

**НОВЫЙ ПОДХОД К ИЗУЧЕНИЮ БЛОКОВОГО ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО
СТРОЕНИЯ ЛИТОСФЕРЫ И ФЛЮИДОНАСЫЩЕННЫХ ФРАГМЕНТОВ
РАЗЛОМОВ КАК ИНДИКАТОРОВ ЗОН ПОВЫШЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ
(ПО ДАННЫМ МТЗ НА ЮЖНОМ САХАЛИНЕ)**

В.М. Никифоров¹, Г.Н. Шкабарня^{1,2}, А.Ю. Жуковин¹, В.Б. Каплун³, Ю.В. Талтыкин³

¹ФГБУН Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, ул. Балтийская 43, г. Владивосток, 690041; e-mail: nikiforovv@mail.ru

²ФГАОУВО Дальневосточный федеральный университет, ул. Суханова 8, г. Владивосток, 690950; e-mail: shkabarnya@mail.ru

³ФГБУН 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 5 октября 2017 г.

Магнитотеллурическими зондированиями на о-ве Сахалин обнаружены крупные крутопадающие геоэлектрические структуры, пронизывающие всю литосферу и уходящие глубоко под нее. Система разломов, образующая такую структуру, способствует перетеканию теллурических токов из глубинных горизонтов тектоносферы в приповерхностные слои. В результате этого электрическая составляющая вкрест простирания структуры оказывается весьма чувствительной к присутствию в разрезе проводящих, гальванически связанных вертикальных и горизонтальных элементов (объектов), по которым и происходит перетекание токов. Это явление создает основу для нового подхода к детальному изучению блокового строения литосферы и ее верхней части – земной коры. Основываясь на этом ранее не изучавшемся в практике магнитотеллурических работ эффекте, проведено исследование блоковой структуры земной коры Южного Сахалина. Как выяснилось, межблоковые швы, характеризующиеся относительно низким уровнем удельного электрического сопротивления, указывающим на их флюидонасыщенность, являются фрагментами региональных или более высокого ранга разломов. Расположение очагов коровых землетрясений тесным образом связано именно с этими фрагментами. Показано, что городской округ Южно-Сахалинск находится в районе тройного сочленения геоэлектрических блоков земной коры.

Ключевые слова: магнитотеллурическое зондирование, тектоносфера, аномалии поперечного тока, геоэлектрическая модель, глубинные разломы, флюидонасыщенные трещины, сейсмоактивная зона, землетрясения, о. Сахалин.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема связи между глубинной структурой региона и его сейсмичностью всегда была актуальной с начала изучения землетрясений. Этой проблеме посвящено большое количество публикаций как в нашей стране, так и за рубежом [1, 23 и др.]. Считается установленной корреляция сейсмических поясов, зон, ареалов с подъемом кровли астеносферы и аномальной разуплотненной мантией, реже с градиентными изменениями мощностей литосферы и уплотненной мантии [10]. Отмечается корреляция в поведении сейсмичности и теплового поля [32]. Имеется много работ, посвященных роли воды в механизмах земле-

трясений. Существует теория, что сильным землетрясениям должны предшествовать и сопутствовать изменения сопротивления проводящих зон, расположенных вблизи сейсмоактивного слоя, а также изменение флюидного режима крупных разломов, изменение состава и концентрации в глубинных водах компонентов гелия, углекислоты и т.д. [5, 7].

Важным геофизическим методом для изучения глубинного строения Земли является магнитотеллурическое зондирование, которое освещает глубинную морфоструктуру и особенности теплового и флюидного режимов [2–4]. Этот метод успешно используется в течение нескольких последних десятилетий

для изучения глубинного строения Сахалина, его осадочной толщи, вопросов нефтегазовой геологии и сейсмичности [14, 15, 18]. Этими исследованиями установлены основные геоэлектрические параметры оболочек тектоносферы, изложены новые взгляды на их природу, где особая роль уделяется накоплению водно-графитовой смеси, возникающей в процессе химических преобразований верхнемантийного флюида при его подъеме по ослабленным зонам в верхние слои земной коры. Впервые именно на Сахалине была обоснована, а позднее подтверждена гипотеза о широком развитии анизотропно-проводящих (трещинных) образований в нижней литифицированной части осадочной толщи и земной коре. Показано, что глубинный интервал коровых землетрясений соответствует глубинному интервалу распространения трещинных пород [26]. Аналогичные закономерности обнаружены и в других регионах Тихоокеанского побережья, например в Приморье [17].

Тесная корреляционная связь между вариациями сейсмической активности и вариациями электрического сопротивления различных горизонтов установлена многочисленными электрометрическими исследованиями с применением различных методик, в том числе и с применением МГД-генераторов на Бишкекском прогностическом полигоне [25]. Такая связь подтверждается теоретическими работами [28]. Исследованиями МТЗ на Северном Сахалине по профилю, пересекающему остров на широте г. Нефтегорск, разрушенного катастрофическим землетрясением 1995 г., показано, что подавляющее количество афтершоков сосредоточены в анизотропно-проводящем (трещинном) горизонте в интервале 5–15 км, а сгущение афтершоков отмечается в зонах изменения мощности горизонта [26]. О роли изменения физических свойств неглубоко залегающих трещинных образований в процессе подготовки землетрясения, изученных методами электроразведки на постоянном токе, а также частотным зондированием (ЧЗ) и зондированием становления поля (ЗС) сообщается в публикациях по Китаю [27, 29] и южным районам Сибири [12, 13].

Работами МТЗ в последние годы [20, 21] впервые обоснованно показана высокая чувствительность метода МТЗ при использовании поперечного кажущегося сопротивления для выявления в изученном разрезе тектоносферы вертикальных флюидонасыщенных разломов и анизотропно-проводящих объектов в различных глубинных интервалах. Основываясь на этом подходе, проведено исследование блоковой геоэлектрической расчлененности литосферы Южного Сахалина. Высокая дифференциация аномалий поперечного кажущегося сопротивления, в отличие от ранее применяемых подходов интерпретации, дающих

интегральную картину, способствовала детализации трассирования геоэлектрических блоков, что позволило впервые установить на территории Сахалина факт концентрации очагов коровых землетрясений вблизи межблоковых швов, отличающихся низким электрическим сопротивлением. Поскольку, чаще всего, они являются фрагментами региональных или более высокого ранга глубинных разломов, можно утверждать, что не весь глубинный разлом, а только его флюидонасыщенные (водонасыщенные) фрагменты выступают в качестве индикаторов зон повышенной сейсмичности.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ МТЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЕЗА ЛИТОСФЕРЫ

На территории Южного Сахалина (южнее 51° параллели) в разные годы выполнены более 100 МТЗ в диапазоне периодов $10 < T < 2500$ с. В 2015–2017 гг. нами проведены длительные наблюдения МТ-поля еще в 12 пунктах (рис. 1), которые позволили впервые в данном регионе получить надежные представления о поведении кривых МТЗ в длиннопериодном диапазоне до периодов 20 000 с. Весь набор данных МТЗ подтвердил аномальную природу поперечного кажущегося сопротивления на Сахалине в направлении запад-восток. На рис. 2 показаны типы кривых поперечного кажущегося сопротивления (ρ_{\perp}), полученные в районе исследования, а также приводятся теоретические максимальные кривые кажущегося сопротивления с учетом трехмерного берегового эффекта, вызванного проводимостью водной толщи прилегающего океана [16]. Как видно из рис. 2-I и 2-II, в прибрежной зоне континента и в некоторых районах Сахалина практические кривые ρ_{\perp} в своих длиннопериодных частях ($T > 1000$ с) хорошо согласуются с теоретическими кривыми для континентальной (ТКК) и островной (ТКО) модели, которые демонстрируют предельно допустимые наклоны ветвей в этом диапазоне. В принятой модели максимальные кривые МТЗ характеризуются монотонно-нисходящей ветвью.

Вместе с тем на Сахалине четко выделяются зоны с устойчиво развитыми восходящими ветвями ρ_{\perp} , продолжающимися в длиннопериодном диапазоне до периодов 20 000 с и более (рис. 2-III и 2-IV). Они резко контрастируют по своей форме с максимальными кривыми на остальной территории острова и других изученных регионов материковой части Дальнего Востока, но аналогичны кривым ρ_{\perp} на Камчатке [11], Курилах [14], в Приморье [8], Японии [30, 31]. Для объяснения аномального поведения поперечного кажущегося сопротивления [20, 21] нами предложена модель сверхглубинной флюидо-разломной системы

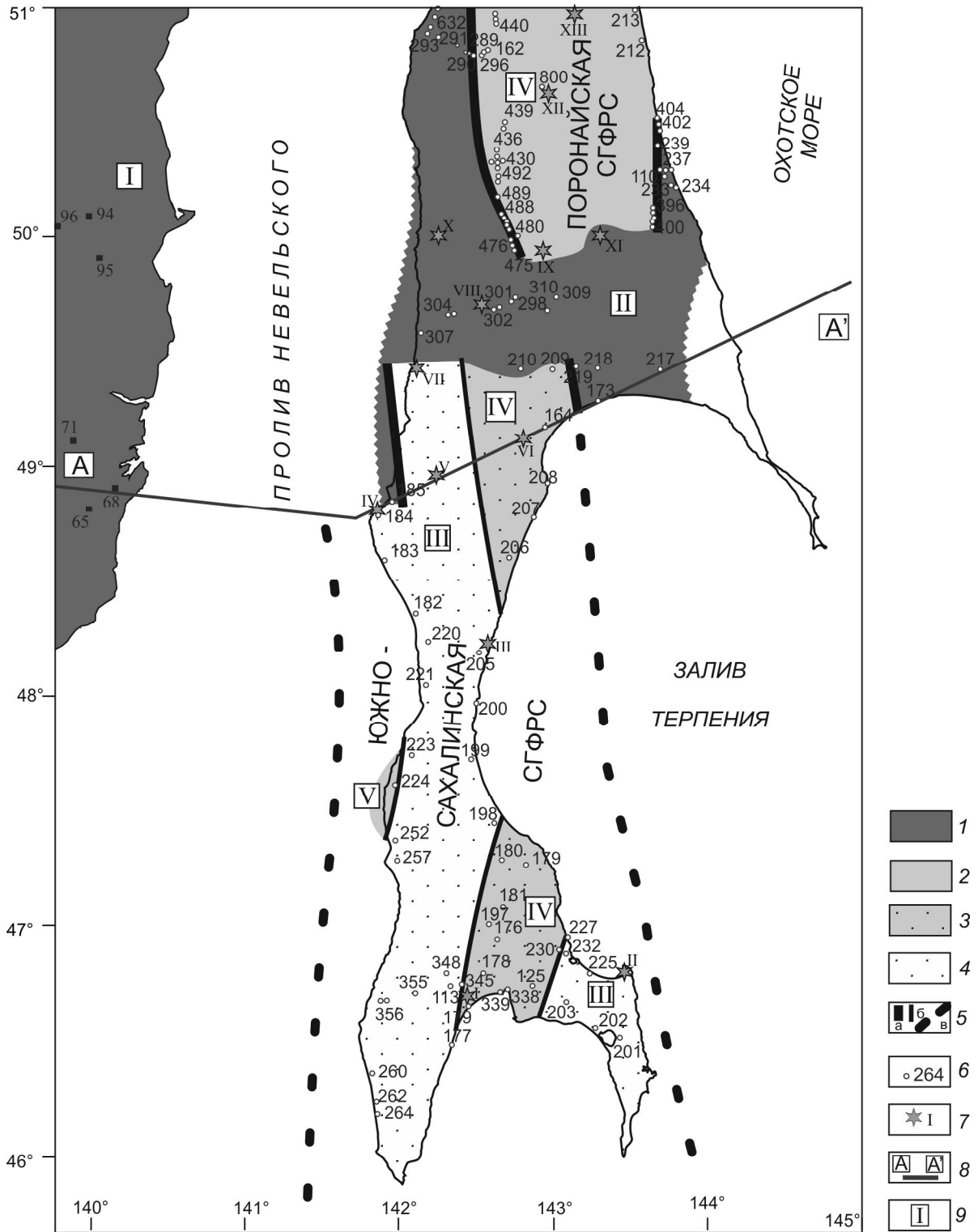


Рис. 1. Схема расположения пунктов МТЗ и элементов сверхглубинных флюидоразломных систем (СГФРС).

1 – территории, где зафиксирован стандартный разрез тектоносферы; 2 – территории, на которых развиты относительно высокоомные литосферно-астеносферные образования Поронайской СГФРС, $\rho > 1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; 3–4 – территории, на которых развиты относительно высокоомные литосферно-астеносферные образования Южно-Сахалинской СГФРС: 3 – $\rho > 1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, 4 – $\rho > 5000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; 5 – низкоомные межблоковые швы: а – сквозьлитосферные, ограничивающие СГФРС, б – сквозьлитосферные внутри СГФРС, в – предполагаемые, ограничивающие СГФРС; 6 – пункты МТЗ, в которых зафиксированы кривые МТЗ в диапазоне периодов $10 < T < 2000 \text{ с}$; 7 – пункты МТЗ, где в 2015–2017 гг. получены кривые МТЗ в диапазоне периодов $10 < T < 20\ 000 \text{ с}$; 8 – линия профиля, вдоль которого построена теоретическая модель; 9 – номера зон с типами кривых, указанных на рис. 2.

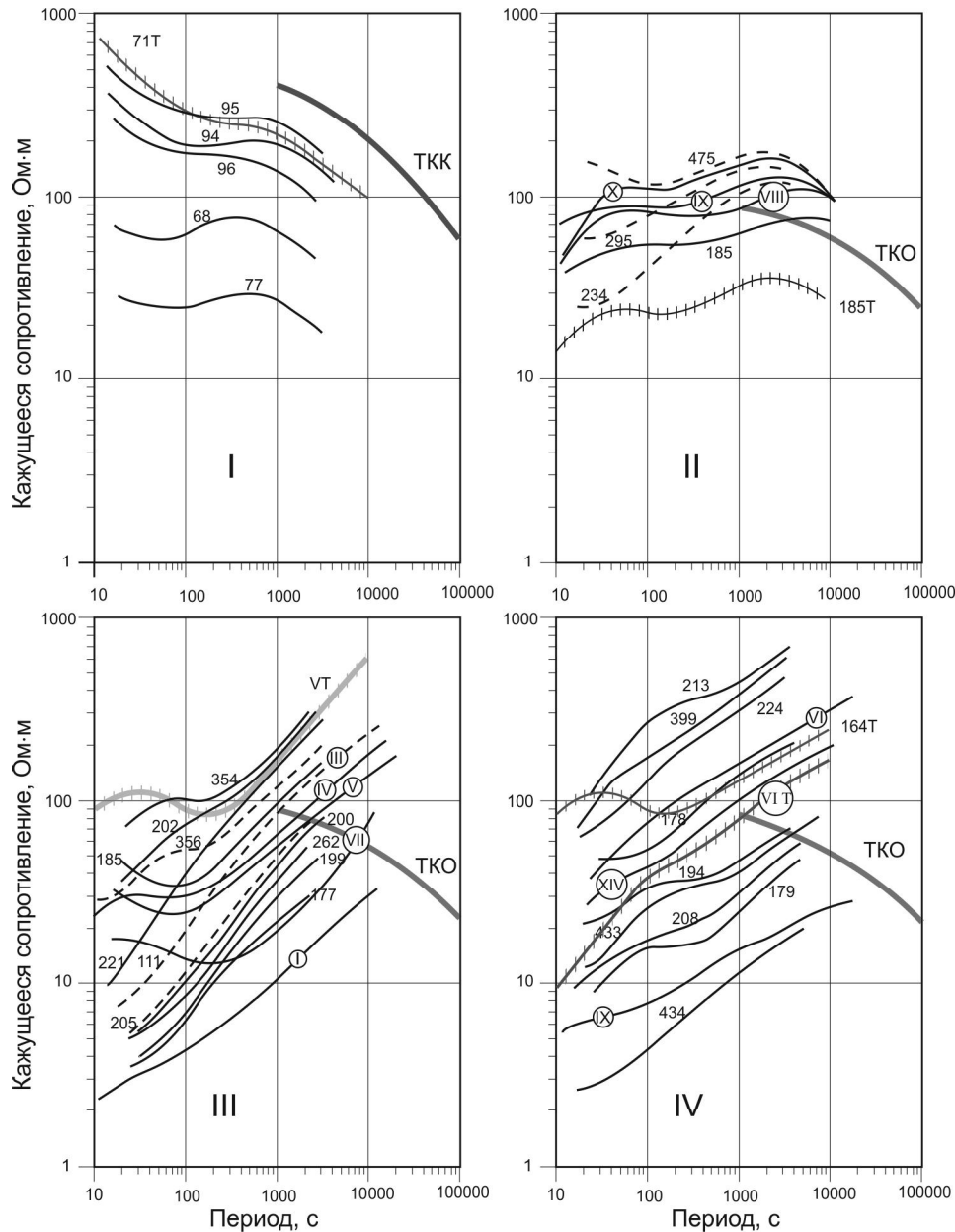


Рис. 2. Типы поперечных кривых кажущегося сопротивления ρ_{\perp} на территории Южного Сахалина и прилегающей к Татарскому проливу части Сихотэ-Алиня.

I, II, III, IV – семейства кривых, соответствующие четырем типам. ТКО – теоретическая поперечная кривая МТЗ с учётом трехмерного берегового эффекта в центре острова. ТКК – теоретическая поперечная кривая МТЗ с учетом трехмерного берегового эффекта на континенте. 71Т, VT, VII, 164Т, 185Т – теоретические поперечные кривые МТЗ в обозначенных пунктах, соответствующие модели СГФРС. Оцифровка экспериментальных кривых соответствует схеме расположения точек МТЗ на рис. 1.

(СГФРС). Эта система представляет собой высокоомный блок, погруженный в астеносферу, разрывающий сплошность ее электропроводности, обрамленный с обеих сторон низкоомными сквозьлитосферными субвертикальными разломами. Электропроводящие разломы обеспечивают гальваническую связь между приповерхностной и глубинной токовыми системами, благодаря чему на поверхности внутри разломной

зоны создается избыточная плотность поперечного тока.

Настоящим исследованием этой модели уделено особое внимание изучению влияния водной толщи Татарского пролива и Охотского моря, а также блоковой конструкции земной коры на характер аномального поля. Численными математическими методами исследовались модели с различным сочетанием раз-

меров геоэлектрических блоков, их удельного электрического сопротивления и профиля водной толщи. В качестве одного из примеров приводится результат вдоль профиля А–А', пересекающего горную структуру Сихотэ-Алиня, Татарский пролив, Сахалин от мыса Ламанон на западе до мыса Беллинсгаузена на востоке и западную часть Охотского моря (рис. 1). Геоэлектрические параметры слоев модели в пределах изученных МТЗ районов выбирались на основании интерпретации продольных кривых МТЗ, в остальных районах они являются прогнозными. Окончательный вид модели показан на рисунке 3. Ниже отметки 180 км она представлена стандартным градиентным разрезом [4], который перекрывается электропроводящей астеносферой $20 \text{ Ом}\cdot\text{м} < \rho < 15 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Ее кровля варьирует от глубины 120 км под Сихотэ-Алинем до 50 км в Охотском море. Расчеты велись как для модели с непрерывной астеносферой, так и в ее отсутствии под Сахалином. В последнем случае электропроводящая астеносфера разрывалась высокоомными блоками $\rho = 1000\text{--}5000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, шириной 50–100 км.

Сопротивление вышележащей литосферы для простоты выбрано единым для всей толщи $\rho_{\text{л}} = 1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, т.е. на границе Мохо не предусмотрен скачок удельного сопротивления. В нижней части земной коры помещен относительно низкоомный слой 15–20 Ом·м мощностью 5–15 км. Под Сахалином различные блоки земной коры отличаются различной глубиной погружения этого слоя или его полным отсутствием. Мощность осадочной толщи изменяется от 0 до 6 км в депрессиях, а ее сопротивление составляет 10 Ом·м. Перекрывает разрез водная толща Татарского пролива мощностью до 250 м и Охотского моря мощностью до 800 м с удельным электрическим сопротивлением 0.3 Ом·м, с наличием которой часто связывают аномальное поведение поперечного тока [10, 11].

Важными элементами модели являются электропроводящие (флюидонасыщенные) разломы различных рангов: сквозьлитосферные и коровые. Ширина разломных зон составляет 3 км и 2 км, соответственно. Их удельное электрическое сопротивление варьировалось от 2 Ом·м до 10 Ом·м. Внутренняя область СГФРС представлена высокоомными блоками 1000 Ом·м и 5000 Ом·м. Теоретические поперечные кривые МТЗ для этой модели, рассчитанные в указанных пунктах, приводятся на рис. 3 б. В материковой части профиля МТЗ 71, 65, 68 расчетные кривые конформны экспериментальным и при $T > 1000 \text{ с}$ хорошо согласуются с теоретическими максимальными кривыми, осложненными трехмерным береговым эффектом (рис. 2-Г). Смещение экспериментальных кривых МТЗ связано с хорошо известным в магнитотеллури-

ке статическим сдвигом, вызванным влиянием приповерхностных неоднородностей удельного электрического сопротивления [3]. Теоретические поперечные кривые в пунктах 185 и 173 конформны кривым семейства, полученного в западной и восточной частях Сахалина (на рис. 1 эта территория обозначена темным цветом). Здесь кривые ρ^{\perp} также характеризуются участком нисходящих (возможно частично искаженных) ветвей в длиннопериодном диапазоне. На профиле А–А' можно считать установленным фактом наличие западной и восточной границ Южно-Сахалинской сверхглубинной флюидо-разломной системы (СГФРС). На остальной же территории к югу от профиля А–А' настоящими работами границы Южно-Сахалинской СГФРС не зафиксированы. Возможно, они располагаются под водной толщей Татарского пролива и Охотского моря.

Расчетные аномальные поперечные кривые МТЗ внутри СГФРС хорошо согласуются как с экспериментальными кривыми, расположенными по линии профиля А–А', так и на обширных территориях Южно-Сахалинской и Поронайской СГФРС вне профиля А–А'. При этом в пределах Южно-Сахалинской СГФРС выделяются несколько зон, в которых ρ^{\perp} отличаются по крутизне наклона восходящих ветвей в интервале периодов 500÷1000 с (рис. 2 III-IV). Судя по результату моделирования, это отличие связано с величиной удельного сопротивления литосферных блоков, особенно их частей, погруженных в астеносферу (рис. 3 б). Так крутая восходящая ветвь на кривой V обусловлена, очевидно, сопротивлением литосферы, равным 5000 Ом·м, более пологая ветвь на кривой VI (пункт расположен восточнее по линии профиля А–А') связана с более низким сопротивлением литосферы, равным 1000 Ом·м. Высокоомный литосферный блок закартирован на протяжении более 350 км от пункта МТЗ VIII до южного окончания острова на мысе Крильон (рис. 1). Средняя ширина блока составляет 40 км. Аналогичный фрагмент высокоомного литосферного блока зафиксирован на юго-востоке острова в пределах Тонино-Анивского полуострова. В восточной части Южно-Сахалинской СГФРС прослеживается литосферный геоблок с пониженным значением удельного сопротивления $\rho = 1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Возможно, аналогичный литосферный геоблок, зафиксированный в пункте МТЗ 224, имеет место также и в Татарском проливе. Обращает на себя внимание, что низкоомные литосферные геоблоки в пределах Южно-Сахалинской СГФРС перекрыты молдами осадочными образованиями.

В северо-восточной части Южного Сахалина выделена Поронайская СГФРС, отличающаяся однородностью удельного сопротивления подкоровой

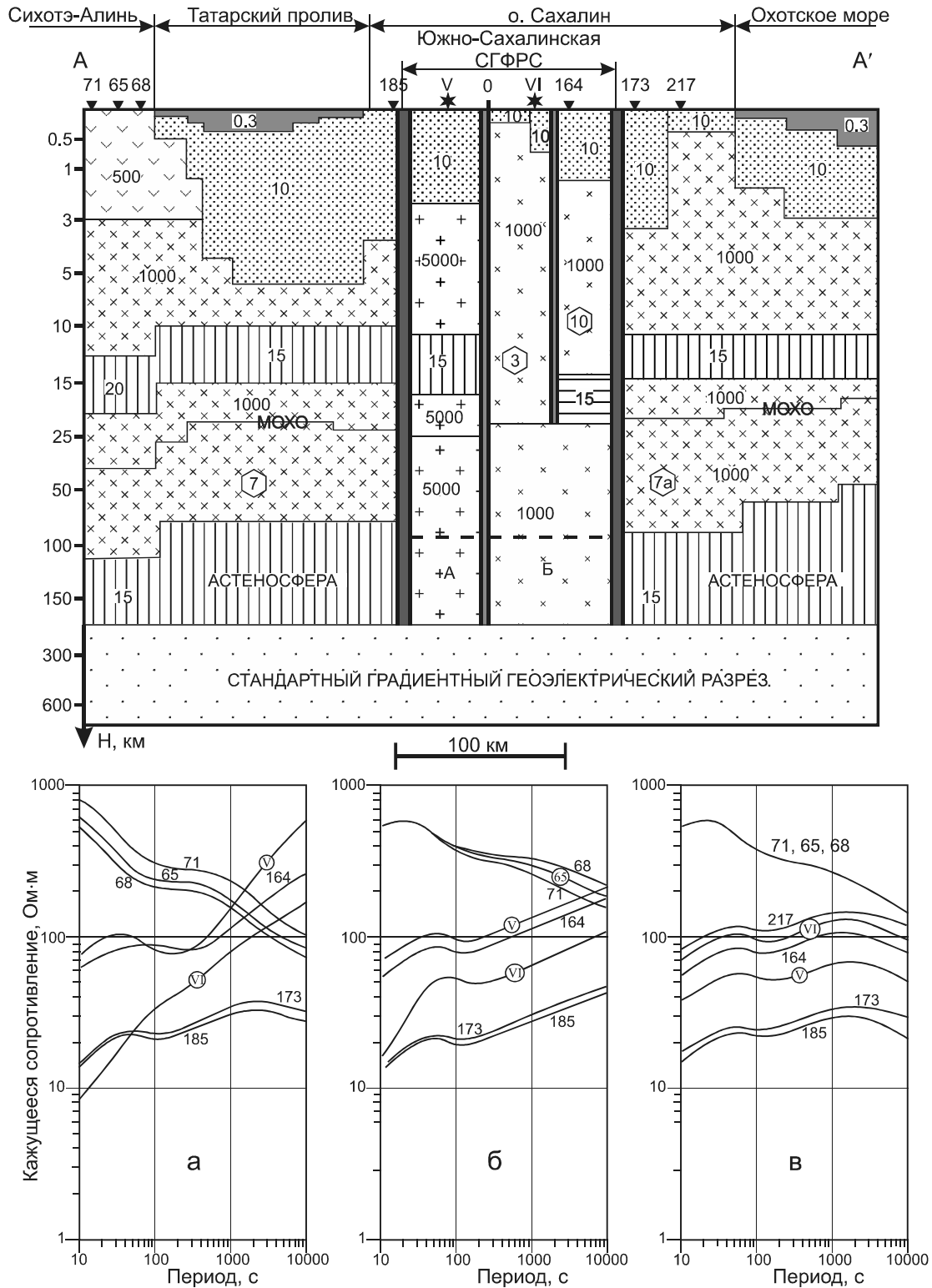


Рис. 3. Модель геоэлектрического разреза по профилю А–А' и теоретические кривые поперечной поляризации в точках наблюдения МТЗ.

Цифрами указаны значения удельного электрического сопротивления отдельных блоков; цифры в шестиугольниках обозначают номера геоблоков, отмеченных на рис. 4. Ширина электропроводящих вертикальных разломов на модели: внутренних – 2 км, ограничивающих СГФРС – 3 км. Удельное электрическое сопротивление электропроводящих разломов = 5 Ом·м. Теоретические кривые в пунктах наблюдения МТЗ: а – для модели, показанной на рисунке (включаящую в себя СГФРС); б – для той же модели, но без флюидонасыщенных разломов; в – для той же модели без флюидонасыщенных разломов и с непрерывной астеносферой.

литосферы, составляющего около 1000 Ом·м. В ее изученной части уверенно прослеживается западная и фрагмент восточной границы (рис. 1).

Присутствие в тектоносфере крупнейших высокоомных структур, которыми являются СГФРС, благоприятствует развитию пока еще слабо изученных электромагнитных процессов перетекания аномального поперечного тока в различных глубинных интервалах литосферы.

Моделирование показало, что поперечные кривые ρ_{\perp} весьма чувствительно реагируют на наличие электропроводящих объектов в земной коре, гальванически связанных посредством флюидонасыщенных разломов с осадочной толщей. При этом коровые проводники проявляются на ρ_{\perp} в виде минимумов. Их смещение по оси периодов обуславливается глубиной расположения кровли проводящего объекта (рис. 3 б). Даже сравнительно узкая зона отсутствия проводника в земной коре, не превышающая 25 км, характеризуется резким различием ρ_{\perp} . Это видно из сопоставления теоретических и экспериментальных кривых МТЗ V, МТЗ VI и МТЗ 164 на профиле А–А'. Изменение формы ρ_{\perp} происходит в узкой зоне, соответствующей в плане выходу низкоомного разлома в основание осадочной толщи.

Решающая роль флюидонасыщенных разломов в формировании поперечного кажущегося сопротивления наглядно подтверждается моделированием того же самого геоэлектрического разреза в их отсутствии. На рис. 3 б показаны теоретические поперечные кривые в тех же самых пунктах для того же разреза, но без вертикальных проводящих разломов.

В пределах Сахалинского отрезка профиля А–А' теоретические кривые ρ_{\perp} оказались конформными, независимо от существующих неоднородностей электрического сопротивления в литосфере. Исключение составляет точка МТЗ VI, где в земной коре отсутствует коровый проводник. Расчетная кривая содержит крутую восходящую ветвь в высокочастотном диапазоне ($10 < T < 80$ с) и дает ложное представление о наличии проводника в земной коре.

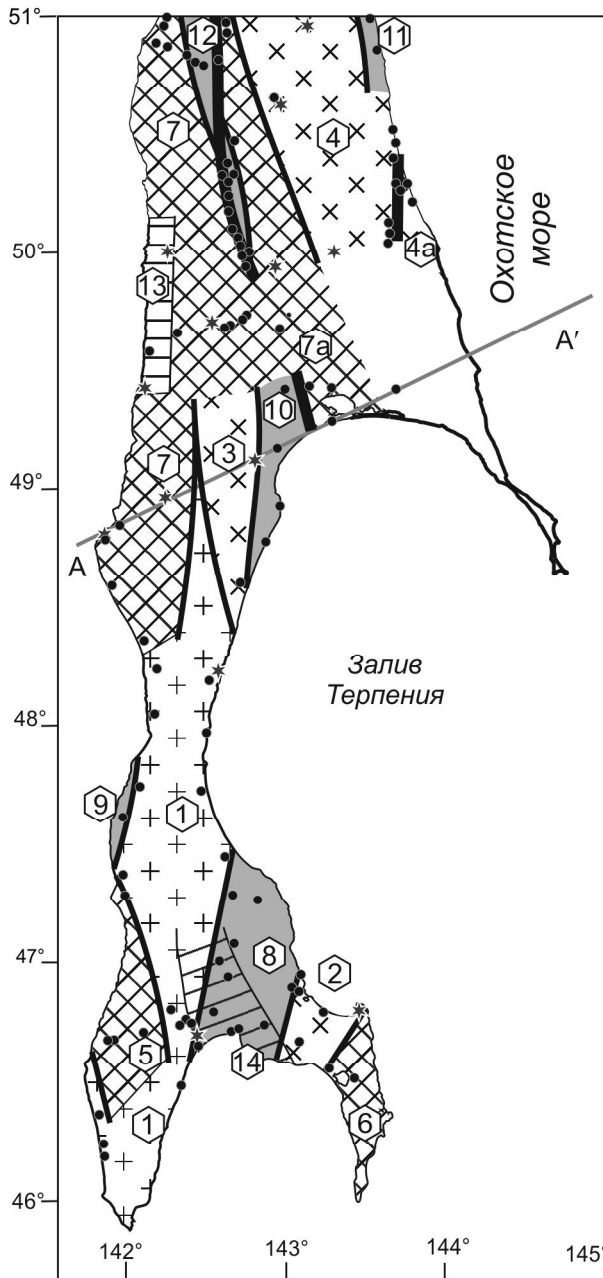
Еще более существенной представляется роль высокоомного блока, нарушающего непрерывность электрической проводимости астеносферы. Если в модели проводимость астеносферы непрерывна, то на всем профиле А–А' фиксируются конформные кривые, слабо реагирующие на изменения удельного сопротивления блоков подкоровой литосферы и земной коры. На рисунке 3в показаны теоретические поперечные кривые в тех же самых пунктах для «нормального» варианта того же разреза, т.е. без вертикальных проводящих разломов и с непрерывной астеносферой.

Эти кривые имеют классический нисходящий тренд в длиннопериодной части. С помощью этого варианта модели устанавливается масштаб возможного берегового эффекта. Влияние проводимости водной толщи Татарского пролива и Охотского моря проявляется в виде небольшого, не более 35 %-ного завышения кажущегося сопротивления на длинных периодах, в пунктах МТЗ 217 и МТЗ 185, расположенных вблизи береговой линии.

БЛОКОВОЕ СТРОЕНИЕ ЛИТОСФЕРЫ ЮЖНОГО САХАЛИНА ПО ДАННЫМ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ПОПЕРЕЧНОГО КАЖУЩЕГОСЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Приведенные данные являются обоснованием принципиально нового подхода к изучению блокового строения тектоносферы и ее составных частей – подкоровой литосферы и земной коры. Положения этого подхода можно сформулировать следующим образом: а – изменение формы поперечных кривых МТЗ происходит на границах геоэлектрических блоков, представляющих собой электропроводящие (флюидонасыщенные) швы; б – в районах с выраженной двумерностью геоэлектрического строения в пределах геоблоков, ограниченных электропроводящими швами, поперечные кривые МТЗ везде конформны; в – форма поперечных кривых, проявляющаяся в характере восходящих ветвей, их наклонах, наличии минимумов, диапазон периодов, где они проявлены, и т.д. позволяют решать задачу оценки глубинности проникновения электропроводящих швов и параметров геоэлектрических блоков.

Используя этот новый подход, нами проведено выделение геоэлектрических геоблоков на территории Южного Сахалина (рис. 1, 4). На рис. 1 показаны геоблоки подкоровой литосферы, образующие Южно-Сахалинскую и Поронайскую СГФРС. Как отмечалось выше, Поронайская СГФРС ограничена низкоомными швами с запада и востока. Низкоомные границы Южно-Сахалинской СГФРС в пределах изученной площади зафиксированы только в ее северной части. Учитывая угол наклона кривой ρ_{\perp} внутри зоны, близкий к асимптотическому (около 60°), и характер теоретических кривых ρ_{\perp} в отсутствии ограничивающих низкоомных разломов (рис. 3 б II), можно уверенно предполагать, что реально ограничивающие Южно-Сахалинскую СГФРС сквозьлитосферные разломы находятся под водной толщей Татарского пролива и Охотского моря. На блоках подкоровой литосферы залегают геоэлектрические блоки земной коры (рис. 4), отличающиеся главным образом глубиной расположения хорошо проводящих образований ($\rho = 15$ Ом·м) в нижней части земной коры. На данном этапе исследований



Блоки земной коры:

Высокоомные $\rho > 5000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$:

- 1 – Камышовый,
- 2 – Тунайчинский;

Высокоомные $\rho > 1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$:

- 3 – Макаровский;
- 4 – Набильский,
- 4а – Пограничный;

С проводящими образованиями $\rho = 15 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ в интервале глубин 12–20 км:

- 5 – Холмский,
- 6 – Тонино-Анивский,
- 7 – Западно-Сахалинский,
- 7а – Поронайский;

С проводящими образованиями $\rho = 15 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ в интервале глубин 20–30 км:

- 8 – Сусунайский,
- 9 – Тамаринский,
- 10 – Гастелловский,
- 11 – Комровский,
- 12 – Тымовский;

С анизотропнопроводящими (трещинными) образованиями в интервале глубин 5–15 км:

- 13 – Бошняковский,
- 14 – Успеновский.

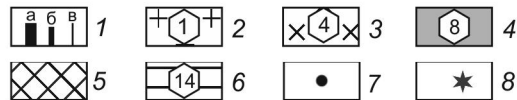
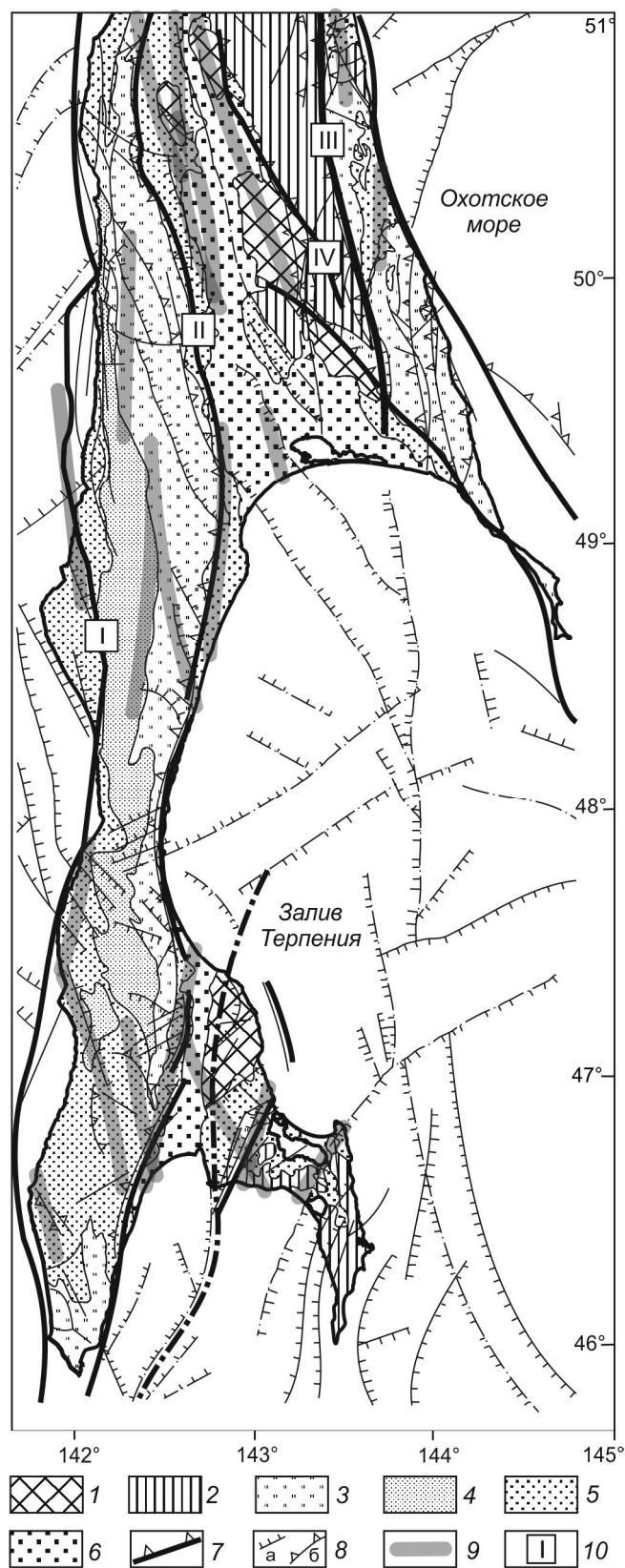


Рис. 4. Схема блокового строения земной коры Южного Сахалина по данным МТЗ.

1 – электропроводящие флюидонасыщенные разломы: а – сквозлитосферные; б – сквозькоровые; в – внутрикоровые; 2–6 – геоэлектрические блоки земной коры, их номера (названия в списке): 2 – высокоомные блоки земной коры $\rho > 5000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; 3 – высокоомные блоки земной коры $\rho > 1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; 4 – блоки земной коры, содержащие низкоомные слои ($\rho = 15 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) в интервале глубин 20–30 км; 5 – блоки земной коры, содержащие низкоомные слои ($\rho = 15 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) в интервале глубин 12–25 км; 6 – блоки, содержащие анизотропнопроводящие образования в интервале глубин 5–15 км; 7 – точки МТЗ прошлых лет; 8 – точки МТЗ, выполненные в 2015–2017 гг.

можно выделить четыре группы геоблоков. К первой группе относятся Камышовый, Тунайчинский, Макаровский, Набильский и Пограничный геоэлектрические блоки, не содержащие в земной коре электропроводящих образований. Они высокоомны во всем глубинном интервале, определяемом положением границы Мохо. Их удельное сопротивление варьирует от 1000 Ом·м до 5000 Ом·м. Вторая группа геоэлектрических блоков, занимающая большую часть исследованной площади, характеризуется наличием относительно низкоомных образований ($\rho \approx 15 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) в интервале глубин 12–20 км. Низкое сопротивление, вероятно, обусловлено наличием водно-графитовой

смеси в трещинном пространстве рассматриваемого геоэлектрического горизонта [19]. Для геоэлектрических блоков третьей группы характерно наличие низкоомных образований ($\rho \approx 15 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) в самых низах земной коры, вблизи границы Мохо. Эти блоки отличаются сравнительно небольшой шириной и прилегают к Западно-Сахалинскому (Тамаринский блок), Центрально-Сахалинскому (Сусунайский, Гастелловский, Тымовский блоки) и Хоккайдо-Сахалинскому (Камышовый блок) глубинным разломам. Отличительным признаком блоков четвертой группы является наличие анизотропнопроводящих (трещинных) образований в интервале глубин 5–15 км.



Не останавливаясь на подробной характеристике геоэлектрических блоков, рассмотрим их формальное сопоставление с элементами тектоники Южного Сахалина. На рисунке 5 выделенные низкоомные швы нанесены на тектоническую карту [26]. Все выделенные по геоэлектрическим критериям электропроводящие швы хорошо согласуются с сетью разломов Сахалина. При этом обнаруживается, что непрерывные геологические разломы оказываются неоднородными по геоэлектрической характеристике. Так, известные протяженные Западно-Сахалинский, Центрально-Сахалинский, Первомайский тектонические разломы являются только фрагментарно электропроводящими (флюидонасыщенными). Протяженность фрагментов составляет 70–140 км.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рисунке 6 показано совместное расположение эпицентров коровых землетрясений и выделенных электропроводящих межблоковых швов. Как видно, существует определенная связь между их взаимным расположением. Известно, что разломная тектоника считается важным обстоятельством сейсмической активности. Сопоставление взаимного положения эпицентров землетрясений [6, 9, 22] и электропроводящих швов приводит к важному выводу: не все разломы, а только их проводящие (флюидонасыщенные) фрагменты являются индикатором зон повышенной сейсмичности. Физически это означает, что в зоне активизации разлома возникающие трещины заполняются глубинным флюидом, в том числе и рассолом. Его повышенная концентрация резко снижает электрическое сопротивление трещинных зон, благодаря чему возникают вышеизложенные электромагнитные явления, способствующие надежному картированию геоблоков.

Обратясь к рисунку 4, можно отметить, что ареалы высокой концентрации коровых землетрясений согласуются с ареалами развития низкоомных ($\rho \approx 15 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) коровых образований. Сильные землетрясения ($M > 4.5$), как правило, располагаются вну-

Рис. 5. Сопоставление линейных электропроводящих флюидонасыщенных разломов (межблоковых швов) с тектоническими элементами Южного Сахалина. (Тектоническая карта – В.В. Харахинова, 2010 г.)

1–6 – геологические образования: 1 – палеозоя; 2 – юры–нижнего мела; 3 – верхнего мела; 4 – палеогена; 5 – неогена; 6 – четвертичные; 7–8 – разломы: 7 – литосферные; 8 – коровые: а – сбросы; б – взбросы; 9 – геоэлектрические зоны: флюидонасыщенные электропроводящие разломы (межблоковые швы); 10 – литосферные разломы: I – Западно-Сахалинский, II – Центрально-Сахалинский, III – Хоккайдо-Сахалинский, IV – Первомайский.

три таких геоэлектрических блоков, а к межблоковым швам тяготеют цепочки слабых землетрясений.

Следуя оценке распределения глубины очагов коровых землетрясений [6], можно заметить, что средневыборочное значение глубины 10–12 км находится вблизи кровли электропроводящего горизонта в блоках, где он наиболее приподнят. Это указывает на высокую роль флюида в процессах, приводящих к землетрясениям.

Из анализа схемы геоэлектрической блокировки земной коры Южного Сахалина (рис. 4) и положения эпицентров коровых землетрясений относительно электропроводящих межблоковых швов (рис. 6) следует, что на Южном Сахалине имеют место зоны тройного сочленения геоблоков и к ним тяготеют сгущения эпицентров землетрясений. Одна из таких зон располагается непосредственно на территории Южно-Сахалинского городского округа. В этой зоне происходит стыковка Камышового блока, в земной коре которого отсутствуют проводящие образования, Сунайского блока, в котором электропроводящий слой располагается в нижней части земной коры выше границы Мохо, и Успенского блока, в котором содержатся электропроводящие образования на двух глубинных уровнях: 20–30 км и 5–15 км. Причем верхний проводящий горизонт выполнен анизотропно-проводящими образованиями, указывающими на развитие в верхней части земной коры сдвиговых процессов.

Аналогичная геоэлектрическая ситуация обнаружена нашими исследованиями МТЗ 2016–2017 гг. в районе г. Нефтегорска, разрушенного в результате катастрофического землетрясения 1995 г. Кроме того, разломная зона на участке от Анивы до Стародубского идентифицируется нами как фрагмент Центрально-Сахалинского разлома, отличающегося высокой проводимостью от основания осадочной толщи до астеносферы. В этой связи очевидно, что необходимо активизировать исследовательские работы по изучению глубинной структуры прилегающих к г. Южно-Сахалинску территорий и расширить существующий сейсмический мониторинг постоянными наблюдениями других геофизических полей, прежде всего электромагнитного поля.

ВЫВОДЫ

Магнитотеллурическими зондированиями на Сахалине и восточной части горной системы Сихотэ-Алинь обнаружены крутопадающие (субвертикальные) геоэлектрические структуры, пронизывающие всю литосферу и уходящие глубоко под нее. Система глубинных разломов, образующая эту структуру, благоприятствует перетеканию теллурических токов,

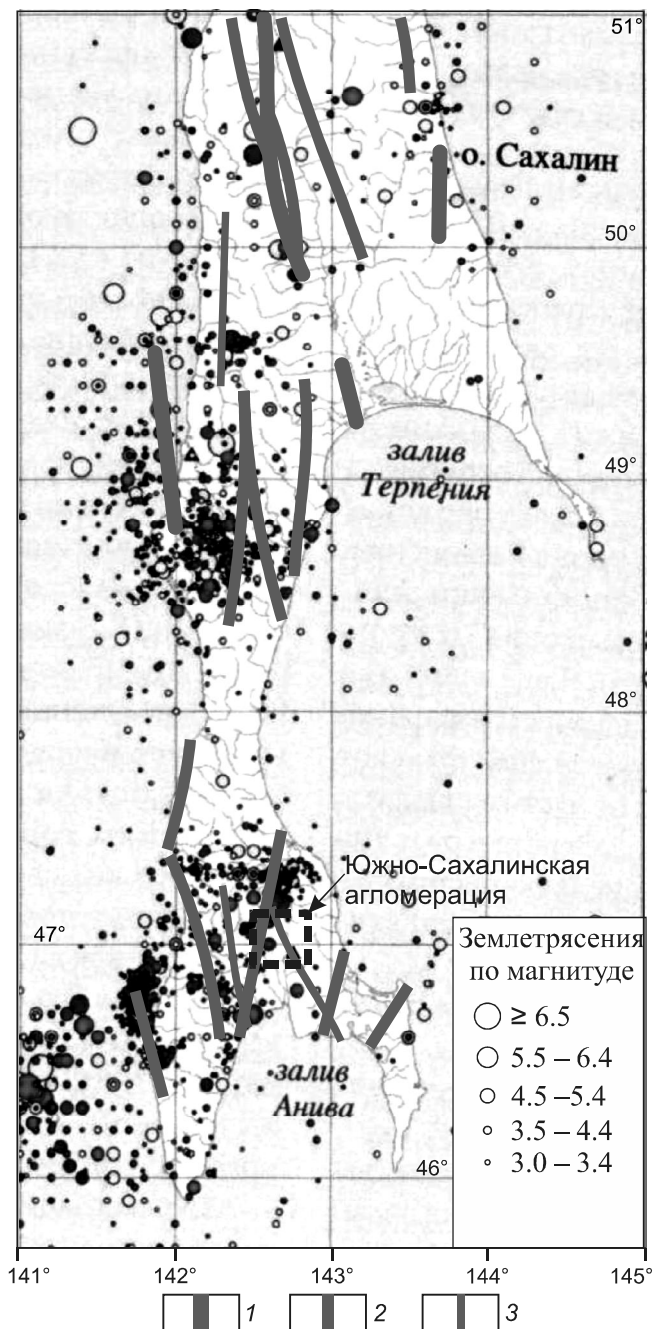


Рис. 6. Положение эпицентров коровых землетрясений Южного Сахалина относительно электропроводящих межблоковых швов.

Электропроводящие флюидонасыщенные фрагменты глубинных разломов: 1 – сквозьлитосферные, 2 – сквозькоровые, 3 – коровые.

(Положение эпицентров коровых землетрясений по [24]).

индуцированных в глубоких горизонтах тектоносферы, в верхние слои земной коры, включая осадочную толщу. В этих условиях электрическая составляющая МТ-поля вкост глубинной структуры, в отличие от

всех других классов моделей, оказывается весьма чувствительной к наличию в разрезе узких электропроводящих тел, посредством которых осуществляется гальваническая связь между глубинными и поверхностными токовыми системами. Это создает основу для нового подхода к изучению блоковой структуры литосферы. Как показали вышерассмотренные исследования, такой подход позволил установить и изучить межблоковые швы, которые, очевидно, представляют собой низкоомные и, как следствие, флюидонасыщенные фрагменты региональных (возможно планетарных) глубинных разломов. Именно с этими фрагментами связаны зоны повышенной сейсмической активности Южного Сахалина. Аналогичная связь установлена и в других районах перехода от Тихого океана к Азиатскому материка, например в пределах разломной зоны реки Красной [20, 21]. Обнаруженная связь является основанием для детального изучения блоковой структуры литосферы в сейсмоактивных районах Тихоокеанского побережья. Кроме того, учитывая, что эффект перетекания тока из глубинных горизонтов в приповерхностные происходит по сравнительно узким низкоомным швам, можно ожидать изменения их проводящих свойств вследствие современных геодинамических движений блоков, а следовательно, возникновения заметных эффектов в поведении поперечного тока на поверхности Земли. Эта гипотеза может быть проверена путем синхронного мониторинга МТ и сейсмического полей в различных геоэлектрических блоках.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 15-05-05596, 16-55-540007, гранта ДВО РАН 15-И-1-033 и госзадания программы ФНИ РАН-70 тема 3, № 011201363044. Авторы выражают признательность директору ООО «Электра» В.И. Поносову и главному специалисту В.Е. Подошвину за содействие в проведении экспедиционных работ на о-ве Сахалин в 2016–2017 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология: Теория и методы. В 2-х т. Пер. с англ. М.: Мир, 1983. 520 с.; 360 с.
2. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И., Куликов В.А. О нормализации магнитотеллурического поля флюидонасыщенными разломами // Физика Земли. 1991. № 3. С. 45–51.
3. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики. М.: Науч. мир, 2010. 680 с.
4. Ваньян Л.Л., Шиловский П.П. Глубинная электропроводность океанов и континентов. М.: Наука, 1983. 88 с.
5. Кадик А.А., Луканин О.А. Дегазация верхней мантии при плавлении. М.: Наука, 1986. 85 с.
6. Ким Чун Ун, Семенова Е.П., Жердева О.А., Сен Рак Се, Михайлов В.И., Левин Ю.Н., Паршина И.С., Урбан Н.А., Касахара М., Ичиянаги М., Такахаша Х. Каталог землетрясений юга острова Сахалин за период с 2000 по 2010 гг. (по данным автономных цифровых сейсмических станций). Владивосток: Дальнаука, 2011. 357 с.7. Киссин И.Г. Флюидонасыщенность земной коры, электропроводность, сейсмичность // Физика земли. 1994. № 4. С. 30–40.
8. Кузнецов В.А., Никифоров В.А., Старжинский С.С. Роль глубинных разломов при изучении литосферы Японского моря с использованием подводного кабеля Находка-Наоэцу // Физика земли. 2001. № 4. С. 74–76.
9. Ломтев В.Л., Патрикеев В.Н. Сейсмические исследования ИМГиГ ДВО РАН в Северо-Западной Пацифике (1985–2005 гг.) // Вестн. ДВО РАН. 2006. № 1. С. 59–66.
10. Малышев Ю.Ф. Глубинное строение, геодинамика и сейсмичность в области сочленения Центрально-Азиатского и Тихоокеанского подвижных поясов // Тихоокеан. геология. 1998. Т. 17, № 2. С. 18–27.
11. Мороз Ю.Ф. Электропроводность земной коры и верхней мантии Камчатки. М.: Наука, 1991. 182 с.
12. Неведрова Н.Н., Эпов М.И. Электромагнитный мониторинг в сейсмоактивных районах Сибири // Геофиз. журн. НАН Украины. 2012. Т. 34, № 4. С. 209–223.
13. Неведрова Н.Н., Шалагинов А.Е. Мониторинг электромагнитных параметров в зоне сейсмической активизации Горного Алтая // Геофизика. 2015. № 1. С. 31–40.
14. Никифоров В.М., Альперович И.М., Ваньян Л.Л. Особенности кривых магнитотеллурических зондирований на Сахалине и методика их интерпретации // Тихоокеан. геология. 1983. № 5. С. 59–65.
15. Никифоров В.М., Альперович И.М., Гаврилов А.И. Аномалии электропроводности земной коры на Северном Сахалине и связь с ними месторождений нефти и газа // Докл. АН СССР. 1985. Т. 285, № 3. С. 678–681.
16. Никифоров В.М., Пальшин Н.А., Старжинский С.С. Трехмерный береговой эффект в Приморье // Физика Земли. 2004. № 8. С. 56–69.
17. 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.
18. Никифоров В.М., Дмитриев И.В. Геоэлектрический разрез тектоносферы в зоне сочленения Япономорской впадины с материковым обрамлением // Тихоокеан. геология. 2007. Т. 26, № 6. С. 3–14.
19. Никифоров В.М., Кулинич Р.Г., Валитов М.Г., Дмитриев И.В., Старжинский С.С., Шкабарня Г.Н. Особенности флюидного режима литосферы в зоне сочленения Южного Приморья и Японского моря по комплексу геофизических данных // Тихоокеан. геология. 2013. Т. 32, № 1. С. 54–64.
20. Никифоров В. М., Долгих Г.И., Кулинич Р.Г., Шкабарня Г.Н., Дмитриев И.В., Фунг Ван Фач, Хоанг Ван Вуонг. Новые данные о глубинном строении северной части зал. Бакбо Южно-Китайского моря (по результатам магнитотеллурических исследований) // Докл. АН. 2014. Т. 458, № 6. С. 696–700.
21. Никифоров В.М., Шкабарня Г.Н., Жуковин А.Ю., Каплун В.Б., Пальшин Н.А., Варенцов И.М., До Хуы Кюонг, Фунг Ван Фать, Хоанг Ван Вуонг, Старжинский С.С.. Системы вертикальных нарушений геоэлектрического разреза тектоносферы в нефтегазоносных областях Сахалина (Россия) и Тонкинского залива (Вьетнам) по данным МТЗ // Тихоокеан. геология. 2016. Т. 35, № 6. С. 3–15.

22. Поплавская Л.Н., Иващенко А.И., Оскорбин Л.С., Нагорных Т.В., Пермкин Ю.Ю., Поплавский А.А., Фокина Т.А., Ким Чун Ун, Краева Н.В., Рудик М.И., Сафонов Д.А., Дорошкевич Е.Н., Паршина И.А., Жердева О.А. Региональный каталог землетрясений острова Сахалин, 1905–2005 гг. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2006. 104 с.
23. Садовский М.А., Писаренко В.Ф. Сейсмический процесс в блоковой среде. М.: Наука, 1991. 96 с.
24. Соловьев В.Н., Тихонов И.Н., Кожурин А.И. Уточнение фоновой сейсмичности на участке изысканий «Сахалинская ГРЭС-2» (о. Сахалин) // Вопросы инженерной сейсмологии. 2014. Т. 41, № 2. С. 60–76.
25. Рыбин А.К., Спичак В.В., Баталев В.Ю. Площадные магнитотеллурические зондирования в сейсмоактивной зоне Северного Тянь-Шаня // Геология и геофизика. 2008. Т. 49, № 5. С. 445–460.
26. Харахинов В.В. Нефтегазоносная геология Сахалинского региона. М.: Науч. мир, 2010. 276 с.
27. Fuqiong H., Mei Li, Yuchuan Ma, Yanyan Han, Lei Tian, Wei Yan, Xiaofan Li. Studies on earthquake precursors in China: A review for recent 50 years // Geodesy and Geodynamics. 2017. V. 8, Iss. 1. P. 1–12.
28. Hyndman R.D., Shearer P.M. Water in the lower continental crust: modelling magnetotelluric and seismic reflection results // Geophys. J. Int. 1989. V. 98. P. 343–365.
29. Ma Q., Feng Zh., Song Zh., Zhao W. Study on the variation characteristics of the geoelectric field preceding earthquakes // Acta Seismologica Sinica. 2004. V. 17, Iss. 3. P. 334–343.
30. Utada H., Koyama T., Shimizu H., Chave A.D. A semiglobal reference model for electrical conductivity in the mid-mantle beneath the north Pacific region // Geophys. Res. Lett. 2003. V. 30, N 4. P. 1194.
31. Utada H., Baba K. Estimating the electrical conductivity of the melt phase of a partially molten asthenosphere from seafloor magnetotelluric sounding data // Phys. Earth Planet. Int. 2014. V. 227. P. 41–47.
32. Wiemer S., Zuniga R.F. ZMAR - a software package to analyze seismicity // EOS Transactions, Fall Meeting, Agu. 1994. V. 75. 456 p.

Рекомендована к печати Р.Г. Кулиничем

V.M. Nikiforov, G.N. Shkabarnya, A.Yu. Zhukovin, V.B. Kaplun, and Yu.V. Taltykin

A new approach to the study of the block geoelectric structure of the lithosphere and fluid saturated fractures of the faults as indicators of zones with increased seismicity from magnetotelluric sounding data (MTS), Southern Sakhalin

Large steeply-falling geoelectric structures, that penetrate the entire thickness of the lithosphere and extending deep beneath it, were detected on the Sakhalin Island by magnetotelluric soundings. The fault system, which forms such structure, serves to flow telluric currents from the deep horizons of the tectonosphere into the near-surface layers. As a result, the electrical component across the strike of the structure is very sensitive to the presence in the section of the conductive galvanically connected vertical and horizontal elements (objects), over which currents flow. This phenomenon provides the basis for a new approach to detailed study of the block structure of the lithosphere and its upper part - the earth's crust. Based on this previously unexamined effect in the practice of magnetotelluric works, the block structure of the earth's crust of Southern Sakhalin has been studied. As it turned out, interblock joints, characterized by a relatively low level of electrical resistivity, indicating their fluid saturation, are fragments of regional or higher rank of faults. The location of the foci of crustal earthquakes is closely related to these fragments. It is shown that the urban district of Yuzhno-Sakhalinsk is located in the region of the triple junction of geoelectric blocks of the earth's crust.

Key words: magnetotelluric sounding, tectonosphere, transverse current anomalies, geoelectric model, deep faults, fluid-saturated fractures, seismically active zone, earthquakes, Sakhalin Island.