

**ПРИМЕНЕНИЕ СРЕДНЕМАСШТАБНЫХ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ  
ЗОНДИРОВАНИЙ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ГЛУБИННЫХ КРИТЕРИЕВ  
КИМБЕРЛИТОПЕРСПЕКТИВНЫХ ПЛОЩАДЕЙ**

*Е. В. Поснеева*

*Якутское научно-исследовательское геологоразведочное предприятие ЦНИГРИ АК “АЛРОСА”,  
г. Мирный*

Поступила в редакцию 30 ноября 2006 г.

Среднемасштабные магнитотеллурические зондирования, выполненные на территории Малоботуобинского (Якутская алмазоносная провинция) и Зимнебережного (Архангельская алмазоносная провинция) кимберлитовых районов, выявили основные особенности геоэлектрического разреза исследованных районов. Они имеют генетическую связь с процессами кимберлитобразования. В контурах выявленных здесь проводящих геоэлектрических неоднородностей располагаются все известные кимберлитовые трубки обоих районов. Наличие таких неоднородностей может стать одним из глубинных критериев выделения кимберлитоперспективных участков.

**Ключевые слова:** магнитотеллурические зондирования, геоэлектрические неоднородности, кимберлитовые трубки, кимберлитовый район, алмазоносная провинция, Якутия, Архангельская область.

**ВВЕДЕНИЕ**

Изучение особенностей строения земной коры в районах кимберлитовых полей, унификация глубинных вещественно-индикационных признаков таких объектов и локализация площадей, перспективных на обнаружение новых проявлений кимберлитового магматизма на территории как Сибирской, так и других древних платформ, является актуальной проблемой алмазной геологии. Одним из технологических методов, позволяющих изучать глубинное и структурно-тектоническое строение земной коры алмазоносных территорий, является метод магнитотеллурических зондирований (МТЗ).

Результаты применения региональных исследований методом МТЗ на Сибирской платформе показали его высокую информативность при прогнозировании разноранговых объектов кимберлитового магматизма и позволили обосновать глубинную геоэлектрическую модель и соответствующие ей условия в земной коре и верхней мантии [13, 15]. Важнейшими элементами этой модели являются внутрилитосферный и мантийный (астеносфера) проводящие слои. Первый, вероятнее всего, является ответственным за протекание многих тектонических и рудогенетичес-

ких процессов. Выше литосферного проводящего слоя наблюдаются локализованные геоэлектрические неоднородности различного порядка. Они могут являться следствием процессов пространственного перераспределения свободных флюидов за пределы слоя и выделения растворенных в них электропроводящих минералов [13, 17].

Среднепалеозойская Сибирская кимберлитовая провинция расположена в области выклинивания крупных астенолинз в пределах приподнятых по поверхности фундамента районов платформы. Здесь выделены закономерно сочетающиеся геоэлектрические неоднородности, различающиеся по сопротивлению, латеральным размерам и глубинности. Кимберлитовые поля, как правило, располагаются в пределах крупных высокоомных неоднородностей с сопротивлением тысячи Ом·м, а участкам их локализации соответствуют проводящие субвертикальные аномалии [13, 15].

Сходная структурно-тектоническая ситуация наблюдается в Зимнебережном кимберлитовом районе Архангельской алмазоносной провинции (ААП). Здесь региональными магнитотеллурическими зондированиями (ПГО “Архангельскгеология”) выявлена значительная дифференцированность геоэлектри-

ческого разреза в нижнекоровом и подкоровом интервалах глубин. Наиболее низкие значения сопротивлений отмечаются под рифейскими грабенами (предполагаемыми палеорифтами). Они выделяются областями пониженных сопротивлений, в которых прослеживается несколько субвертикальных проводящих зон, совпадающих, как правило, с глубинными разломами. Области высоких сопротивлений связаны с выступами кристаллического фундамента, на которых располагаются трубки взрыва щелочно-ультраосновного состава [21]. Кроме того, отмечена приуроченность трубок к серии линейных зон повышенной проводимости, вытянутых в субмеридиональном направлении.

Целью среднemasштабных прогнозно-поисковых работ является выявление промежуточных поисковых объектов в ранге кимберлитового поля и куста (рудного узла) кимберлитовых тел.

### ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Малоботуобинский кимберлитовый район расположен в южной части Якутской алмазонасной провинции (ЯАП), на северо-востоке Непско-Ботуобинской антеклизы (НБА), являющейся надпорядковой структурой Сибирской платформы (Сибирского кратона) (рис. 1). В тектоническом плане это структура со стабильным платформенным режимом. Для НБА характерен низкий тепловой поток, не превышающий 20 мВт/м<sup>2</sup>, что объясняется длительной тектонической пассивностью района, наличием мощных толщ пород с высокой теплопроводностью (галоге-ных и засоленных карбонатных отложений метаморфических пород фундамента), длительным (сотни миллионов лет) интенсивным поверхностным охлаждением [1]. По геотермическим данным, мощность литосферы составляет 220–240 км. Это соответствует зависимости между мощностью земной коры и тепловым потоком, установленной Чермаком для других регионов мира [22]. С северо-запада НБА ограничивается Тунгусской синеклизой (ТС) с интенсивно проявленным трапповым магматизмом. С востока она резко переходит в Вилюйскую синеклизу (ВС), развившуюся на месте Палеовилюйского авлакогена (рис. 1).

Районирование фундамента Сибирского кратона проведено на основе данных по вещественному составу (скважины, ксенолиты из кимберлитовых тел) и Sm-Nd датированию [18, 20]. Территорию района характеризуют две структурные единицы – Магано-Вилюйский (Маганский) гранулитогнейсовый террейн с модельным возрастом 3.4–2.6 млрд лет и Анабаро-Мирнинская (Котуйканская) коллизионная

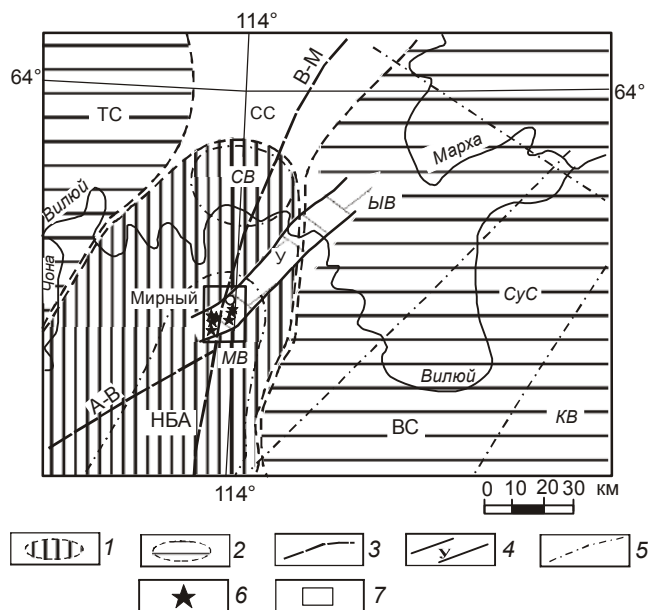


Рис. 1. Обзорная тектоническая схема Западной Якутии [9].

Структуры первого порядка: 1 – НБА – Непско-Ботуобинская антеклиза; 2 – ТС – Тунгусская синеклиза; ВС – Вилюйская синеклиза; структуры второго порядка: ВВ – Ыгыаттинская впадина; МВ – Мирнинский выступ; СС – Сюгджерская седловина; СВ – Сюльдюкарский выступ; KV – Кемпендяйская впадина; Сус – Сунтарский свод; 3 – осевые линии краевых дислокаций: В-М – Вилюйско-Мархинская; А-В – Ангаро-Вилюйская; 4 – секущие зоны: У – Укугутская; 5 – разломы основные; 6 – кимберлиты; 7 – участок работ.

зона, сформировавшаяся на рубеже 1.9-1.8 млрд лет. Магано-Вилюйский террейн занимает западную часть ЯАП и большую часть исследованного района. Его состав в верхней коре представлен ассоциацией двупироксен-плагиоклазовых гнейсов, соответствующими по химическому составу ряду андезитбазальт-дацит и их диафторированными биотит-ортопироксеновыми разновидностями. Изучение ксенолитов из кимберлитовых трубок Мирнинского поля показывает, что материал глубоких горизонтов коры представлен на 70 % пироксеновыми плагиогнейсами и на 20 % метабазами [18]. Породы преобразованы в гранулитовой и, фрагментарно, амфиболитовой фациях метаморфизма. Анабаро-Мирнинская коллизионная зона простирается вдоль восточной границы Магано-Вилюйского террейна полосой шириной 75 км. Она представляет собой коллизионный бластомилонитовый меланж, содержащий жилообразные тела автохтонных гранитов, тектонические блоки анортозитов и крупные отторженцы гранулитов из прилегающих террейнов.

В строении платформенного чехла участвуют осадочные отложения мощностью от 1700 до 2300 м и, в меньшей степени, магматические породы. Они образуют структурные ярусы, сформировавшиеся в несколько магматических этапов. В районе выделено четыре таких этапа: вендско-раннепротерозойский, среднепалеозойский, позднепалеозойский–раннемезозойский и среднепалеозойский–кайнозойский. Кимберлитовые поля тяготеют к краевым частям стабильных блоков. В пределах Малоботубинского района блоковая тектоника фундамента привела к формированию в осадочном комплексе ряда крупных сводовых структур. Складчатая структура венд-нижнепалеозойского комплекса является непосредственным отражением блоковых движений фундамента. Строение верхнепалеозойского–нижнемезозойского комплекса определяется развитием Тунгусской синеклизы, за восточную и юго-восточную границу которой принимается контур распространения на западном крыле НБА верхнепалеозойских отложений и нижнетриасовых траппов. Формирование пород мезозойского структурного комплекса связано с наложенным Ангаро-Вилуйским прогибом. Выполняющие его нижнеюрские осадочные образования залегают на нижне- и верхнепалеозойских породах и нижнетриасовых траппах с глубоким размывом и угловым несогласием.

Мирнинское кимберлитовое поле занимает площадь около 1500 км<sup>2</sup>, объединяет семь кимберлитовых трубок (пять из которых представляют промышленный интерес) и две дайки. Кимберлитовое поле представляет собой сложный в тектоническом отношении участок, расположенный на пересечении субмеридиональной Вилуйско-Мархинской (В-М) и северо-восточной Укугутской (У) систем разломов. По мнению большинства исследователей, разломы Вилуйско-Мархинской системы (Западный, Центральный, Параллельный) являются рудоконтролирующими для кимберлитового магматизма. В региональном плане кимберлитовое поле приурочено к северо-восточной части Мирнинского сводового поднятия.

По данным глубинных сейсмических зондирований [19], Мирнинское поле располагается в аномальной области. В консолидированной земной коре прослеживаются две границы. Верхняя – преломляющая, с граничной скоростью 6.0–6.6 км/с – фиксируется на глубине порядка 10 км. Нижняя – отражающая – залегает на глубине 29 км. Обе границы образуют в районе кимберлитового поля поднятия амплитудой около 4 км. Граничная скорость по преломляющей границе на участке ее поднятия увеличивается до 6.6 км/с. Наиболее значительные изменения граничной скорости наблюдаются по поверхности фун-

дамента. Граница Мохоровичича образует локальный прогиб с граничной скоростью 8.2 км/с на фоне 8.5–8.8 км/с. На участке протяженностью около 30 км, соответствующем кимберлитовому полю, отмечается сложная волновая картина. Ее четкая локализация при различных вариантах наблюдений позволила предположить наличие в нижней части коры коромантийной неоднородности [11]. Наличие неоднородности подтверждают данные переобработки взрывной сейсморазведки, выполненной на основе концепции аппроксимации коры моделями гетерогенного типа [11]. Таким образом, независимо от способа получения данных и их обработки, в районе Мирнинского кимберлитового поля выделяется сейсмическая субвертикальная неоднородность, характеризующаяся поглощением энергии и обусловленная, вероятно, повышенной проницаемостью земной коры. В плане она соответствует литосферной проводящей неоднородности, выделенной по данным магнитотеллурических исследований.

*Зимнебережный кимберлитовый район* (рис. 2) расположен в северо-восточной части Восточно-Европейской платформы, в зоне сочленения крупнейших региональных структур – Русской плиты и Балтийского щита в пределах северо-восточного фланга архейского Беломорского кратона. Вся территория Беломорского кратона располагается в области низкого теплового потока, менее 30 мВт/м<sup>2</sup>. Особенности структурной позиции района в позднепротерозойскую (авлакогенную) стадию развития определяются его приуроченностью к зоне сочленения Притиманского перикратона и северо-восточного борта Кандалакшско-Двинского авлакогена, представляющей собой в предпоздневендское время систему линейных положительных и отрицательных структур северо-западного простирания. В раннегерцинскую эпоху тектономагматической активизации, наиболее продуктивную алмазоносную эпоху Беломоро-Кольского кратона, эта система контролировала положение осевой части Кулойского палеовала девонского времени, с которым связаны все известные трубки взрыва Зимнебережного района. В это же время максимум активности испытывает секущая по отношению к Кулойскому палеовалу Балтийско-Мезенская (Архангельская) зона глубинных разломов, которой отводится определяющая роль в контроле раннегерцинских вулканитов Юго-Восточного Беломорья [3]. Положение кимберлитовых полей Зимнебережного района отчетливо контролируется Северо-Двинской системой разломов [2].

В геологическом строении Зимнебережного района выделяются два структурных этажа – архей-нижнепротерозойский кристаллический фундамент

и рифей-палеозойский осадочный чехол. Структуры фундамента, исходя из общего тектонического плана севера Восточно-Европейской платформы и геофизических данных, находятся на юго-восточном продолжении сформированных в позднем архее и в различной степени переработанных в раннем протерозое литосферных блоков Балтийского щита Кольского полуострова. Породы кристаллического фундамента, по данным глубокого бурения и изучения ксенолитов в трубках взрыва, представлены артеритовыми мигматитами, амфиболсодержащими гнейсами, мигматизированными амфиболитами, гранито-гнейсами архейского возраста. Поверхность фундамента имеет ступенчато-клавишное строение, обусловленное чередованием выступов, впадин и грабенов, в основном северо-западного простирания (рис. 2). Керецкий, Падунский и Лешуконский грабены входят в состав Беломорской (Кандалакшско-Двинской) рифейской, активизированной в среднем палеозое, авлакогенной структуры [3, 7]. Глубина залегания фундамента изменяется от 0.5–1.25 км – на выступах, до 2.0–3.0 км и более – в грабенах и впадинах, при общем погружении в восточном и юго-восточном направлении. Основные кимберлитовые поля Зимнебережного района приурочены к блоковым поднятиям фундамента и их приграничным частям (рис. 2).

Геофизические данные о строении литосферы в пределах территории Зимнебережного района получены по результатам МТЗ, выполненного ПГО “Архангельскгеология”. Здесь пройдено три профиля, по которым составлены геоэлектрические разрезы в интервале глубин от 0.5 до 300 км. В геоэлектрическом строении обращает на себя внимание значительная латеральная дифференцированность разреза в подкоровом интервале глубин [21]. Под выступами кристаллического фундамента в верхней мантии и, реже, в нижних горизонтах коры зафиксированы блоки пород с высокими значениями кажущегося сопротивления (более 100 Ом·м). Области пород с высоким сопротивлением прослеживаются до глубины 300 км, ниже проводимость пород возрастает, но эта тенденция просматривается недостаточно уверенно. Однако вышеописанное геоэлектрическое строение характерно только для северной и центральной частей района. Породы верхней мантии под расположенным южнее Архангельским выступом имеют весьма низкие значения кажущегося сопротивления, не превышающие 30 Ом·м. По мнению авторов [21], выделенные на Зимнем Берегу области верхней мантии, обладающие высоким сопротивлением, по-видимому, характеризуют реликтовые блоки с первичной деплезированной архейской литосферой, которые сохранились при метасоматических процессах в ходе рифейского тектогенеза. Наиболее низкие значения сопротивлений отмечаются под грабенами (предполагаемыми палеорифтами). Области высоких сопротивлений связаны с выступами кристаллического фундамента.

Данные глубинных геофизических исследований подтверждают представления о латеральной неоднородности верхней мантии [8, 10].

Зимнебережный кимберлитовый район расположен на восточной периферии регионального прогиба в кровле верхней мантии в области стабильной литосферы, где было возможно сохранение к моменту

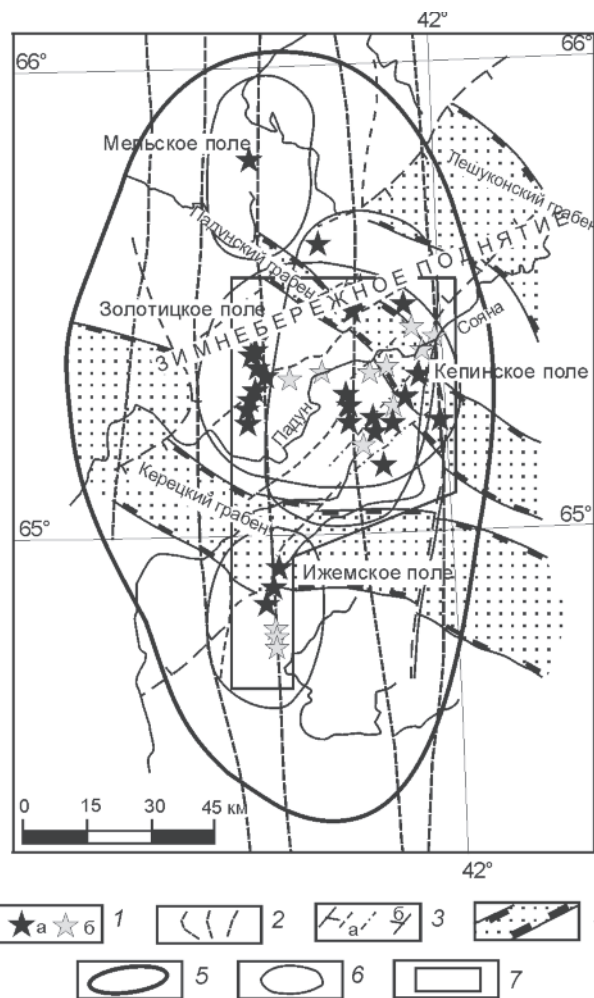


Рис. 2. Структурно-тектоническая карта Зимнебережного кимберлитового района [2].

1 – трубки взрыва: а – кимберлиты; б – пикриты; 2 – кимберлитоконтролирующие зоны разломов субмеридионального простирания; 3 – зоны глубинных разломов северо-восточного простирания, а – отдельные разрывные нарушения в их составе, в том числе: б – проникающие в осадочный чехол; 4 – границы прогибов фундамента (грабенов); 5 – границы Зимнебережного кимберлитового района; 6 – границы кимберлитовых полей; 7 – участок работ.

фейского тектогенеза. Наиболее низкие значения сопротивлений отмечаются под грабенами (предполагаемыми палеорифтами). Области высоких сопротивлений связаны с выступами кристаллического фундамента.

Данные глубинных геофизических исследований подтверждают представления о латеральной неоднородности верхней мантии [8, 10].

Зимнебережный кимберлитовый район расположен на восточной периферии регионального прогиба в кровле верхней мантии в области стабильной литосферы, где было возможно сохранение к моменту

внедрения кимберлитовой магмы реликтовых блоков древней алмазоносной мантии. Его положение контролируется протяженной депрессионной зоной северо-западного простирания, осложненной региональной ступенью в рельефе поверхности Мохоровичича.

#### МЕТОДИКА ПОЛЕВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Регистрация компонент магнитотеллурического (МТ) поля в диапазоне периодов 0.003–5000 секунд выполнялась современными станциями MTU-System-2000 (“Phoenix Geophysics”, Канада), оснащенной программой обработки первичных данных (SSMT). Значительное повышение разрядности аналого-цифрового преобразователя (АЦП) в современных станциях и расширение частотного диапазона регистрации МТ-поля обеспечивает на порядок лучшее качество кривых зондирования, по сравнению со станциями старого поколения (ЦЭС-2). Основным достоинством канадских станций является их высокая технологичность, обеспечиваемая за счет автономной синхронной записи магнитотеллурического поля.

С учетом того факта, что в целом на площади работ магнитное поле изменяется значительно медленнее, чем электрическое, компанией “Феникс Джеофизикс ЛТД” предложена новая методика проведения полевых работ. Суть ее состоит в синхронной регистрации МТ-поля несколькими станциями. Одна из них (MTU-5) является базовой и осуществляет регистрацию 5-ти компонент поля. Вокруг нее расставляются станции (MTU-2E), которые регистрируют только электрические компоненты поля. Для получения тензора импеданса  $Z$  на точке, где зондирования выполняли двухканальными станциями, используются вариации магнитного поля, зарегистрированные базовой станцией. Проведение работ по такой методике обуславливает решение задачи по выбору оптимального расстояния ( $R$ ) между 5- и 2-канальными станциями. Оно неодинаково для различных типов геоэлектрического разреза и определяется опытным путем. Для Малоботуобинского района  $R$  не должно превышать 2 км. Если при регистрации компонент МТ-поля применяются только пятиканальные приборы, выбор шага наблюдений и расстояние между профилями определяется размерами поискового объекта. В качестве поискового объекта выступает куст кимберлитовых тел, минимальные размеры которого составляют 7–9 км. Эмпирически установлено, что такому кусту соответствует проводящая аномалия размером 10–14 км. Чтобы зафиксировать аномалию такого размера, необходим шаг наблюдений не более 4 км.

В Малоботуобинском районе наблюдения выполнялись по серии широтных профилей, расположенных друг от друга на расстоянии 2–4 км. Шаг наблюдений по профилю составил 1–2 км, со сгущением в зонах рудоконтролирующих разломов до 0.5 км. Всего выполнено 550 зондирований.

В Зимнебережном кимберлитовом районе ААП магнитотеллурические исследования выполнялись только пятиканальными станциями по четырем профилям, пересекающим Золотицкое, Кепинское кимберлитовые и Ижмозерское поле оливиновых мелилититов. Здесь выполнено 155 зондирований.

#### МЕТОДИКА ИНТЕРПРЕТАЦИИ

При проведении глубинных МТ-исследований наибольшие трудности встречает процесс качественной интерпретации полученных данных. Это в первую очередь связано с тем обстоятельством, что реальное распределение МТ-поля зависит от всех элементов зондируемой среды – как горизонтальных, так и вертикальных. Поэтому важнейшим этапом интерпретации является анализ МТ-данных, позволяющий построить интерпретационную модель изучаемого региона.

В результате наблюдений, выполненных в Малоботуобинском и Зимнебережном кимберлитовых районах, получены частотные характеристики магнитотеллурического тензора  $|Z|$ , имеющего квадратную матрицу:

$$|Z| = \begin{vmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{vmatrix} \quad (1)$$

Главная информация о вертикальных изменениях электропроводности содержится в антидиагональных компонентах  $Z_{xy}$  и  $Z_{yx}$ . Диагональные компоненты  $Z_{xx}$  и  $Z_{yy}$  характеризуют геоэлектрическую асимметрию среды [4]. Анализ тензора импеданса позволяет оценить степень горизонтальной неоднородности среды, распознать искажения МТ-поля, вызванные ее неоднородностью, идентифицировать геоэлектрические структуры, определить их размеры и простирание.

На этом этапе важную роль играют полярные диаграммы  $|Z|$ , представляющие зависимость МТ-функций отклика от их ориентации [4] и параметр асимметрии SKEW:

$$\text{SKEW} = \frac{|Z_{xx} + Z_{yy}|}{|Z_{xy} - Z_{yx}|} \quad (2)$$

Оценка полярных диаграмм  $|Z|$  показала, что оба района характеризуются “квазидвумерной” моде-

лю. Для двумерной модели, простираение которой совпадает с осью X (рис. 3а),

$$|Z| = \begin{vmatrix} 0 & Z^{\parallel} \\ Z^{\perp} & 0 \end{vmatrix}, \quad (3)$$

где  $Z^{\parallel}$  и  $Z^{\perp}$  – продольный и поперечный импедансы (главные значения тензора импеданса).

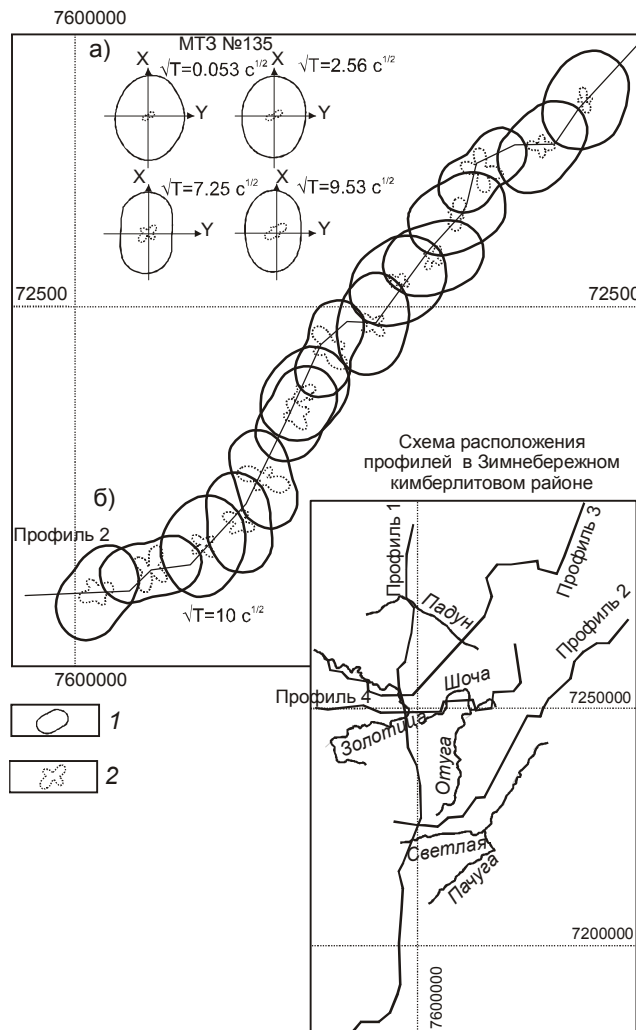
На рисунке 3б, для примера, показаны полярные диаграммы главных значений тензора импеданса на периоде 100 секунд, из которого следует, что диаграммы  $|Z_{xx}|$  имеют четырехлепестковую форму. Биссектрисы углов, образуемых этими лепестками, ориентированы вдоль и вкrest простираения модели. Диаграммы  $|Z_{xy}|$  имеют форму регулярных овалов, а их главные диаметры также ориентированы вдоль и вкrest простираения модели (рис. 3а, б).

Одновременно с анализом полярных диаграмм проводился анализ параметра асимметрии, который в условиях двухмерности должен быть равен нулю. Значение SKEW на большинстве зондирований не превышает 0.02. В Зимнебережном районе отмечается увеличение SKEW до 0.2 на периодах, больших 100 секунд. Возможно, это увеличение обусловлено глубинными трехмерными эффектами.

Кривые кажущегося удельного сопротивления, рассчитанные по направлениям главных значений тензора импеданса, являются продольными ( $\rho^{\parallel}$ ) и поперечными ( $\rho^{\perp}$ ) к простираению геологических структур. Разделение кривых на продольные и поперечные выполнялось на основе сопоставления наблюдаемых кривых с модельными кривыми, характеризующими “нормальный” разрез кимберлитовых провинций, и глобальной магнитовариационной кривой. Продольные кривые должны быть близки к модельным в интервале периодов  $T > 10^2$  с и к глобальной магнитовариационной кривой при  $T > 10^4$  с.

Практика работ во многих регионах нашей страны показала, что наиболее надежную информацию о распределении электропроводности земной коры и верхней мантии дают продольные кривые [5, 12, 15]. На эти кривые зондирования наименьшим образом влияет горизонтальная неоднородность среды, и при одномерной интерпретации они удовлетворительно отражают вертикальное распределение в пункте зондирования. В зависимости от поляризации МТ-поля проявляются два вида эффектов – гальванические и индукционные.

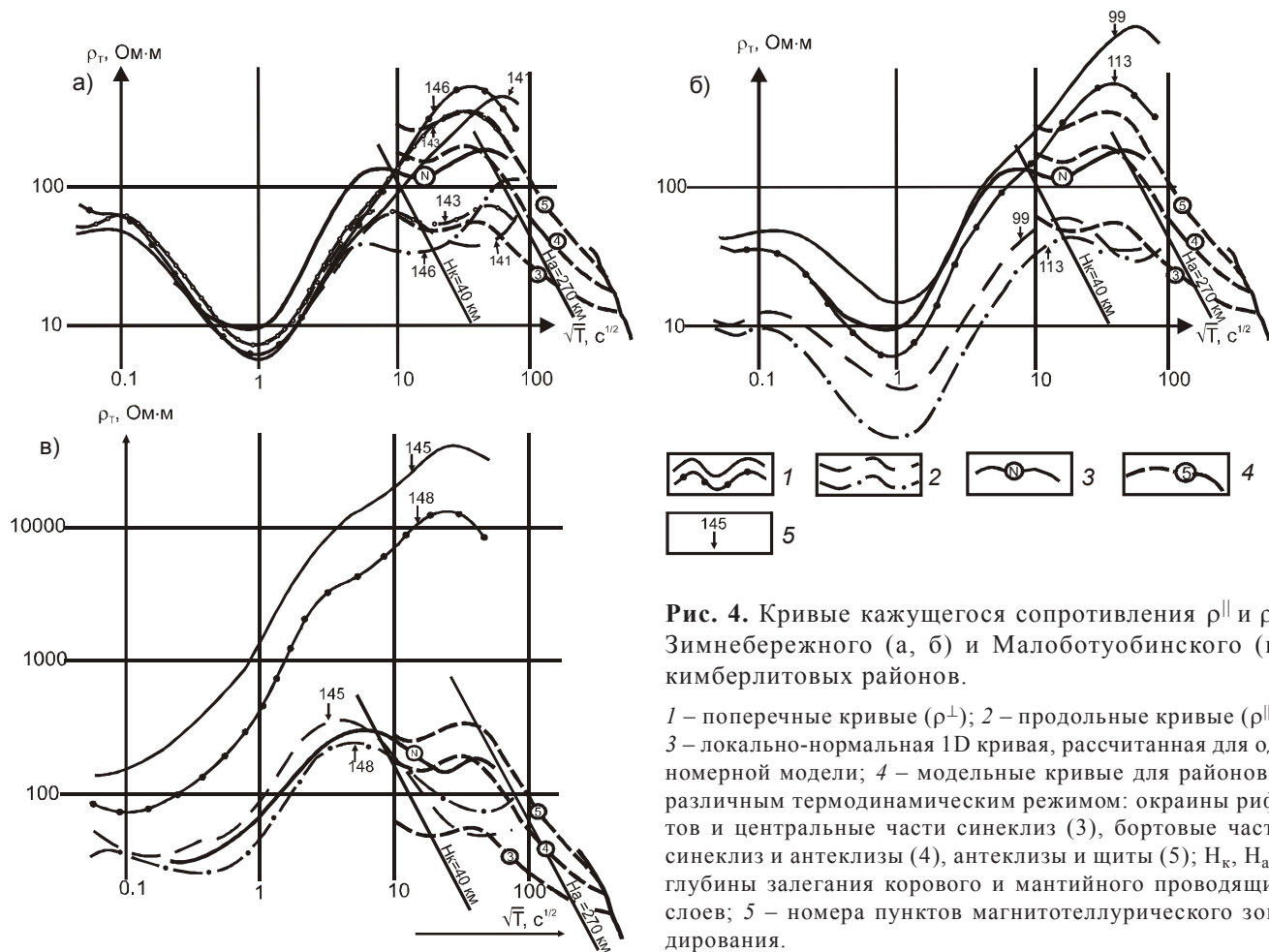
Гальванические эффекты возникают в результате образования на границе неоднородности избыточных зарядов. Это приводит к экранированию поперечной составляющей МТ-поля, которая оказывается опущенной или приподнятой относительно нормаль-



**Рис. 3.** Схема расположения профилей в Зимнебережном кимберлитовом районе и полярные диаграммы тензора импеданса  $|Z|$ : а) – на пункте зондирования; б) – на периоде 100 с вдоль профиля наблюдений.

1 – магнитотеллурические полярные диаграммы  $|Z_{xy}|$ ; 2 – магнитотеллурические полярные диаграммы  $|Z_{xx}|$ . Осевой меридиан – 39, зона 7.

ного уровня. Такие эффекты называют статическими или S-эффектами. Их особенность заключается в том, что искажение кривых МТЗ, возникнув на коротких периодах из-за действия локальных приповерхностных структур, передается в длиннопериодный диапазон. Индукционные эффекты связаны с воздействием на кривые индукционных токов, протекающих в пределах неоднородности. Они проявляются на продольных кривых в виде дополнительных перегибов и минимумов. Индукционные эффекты слабо отражаются на кривой, если электромагнитная



**Рис. 4.** Кривые кажущегося сопротивления  $\rho^\parallel$  и  $\rho^\perp$  Зимнебережного (а, б) и Малоботубинского (в) кимберлитовых районов.

1 – поперечные кривые ( $\rho^\perp$ ); 2 – продольные кривые ( $\rho^\parallel$ ); 3 – локально-нормальная 1D кривая, рассчитанная для одномерной модели; 4 – модельные кривые для районов с различным термодинамическим режимом: окраины рифтов и центральные части синеклиз (3), бортовые части синеклиз и антеклизы (4), антеклизы и щиты (5);  $H_K, H_A$  – глубины залегания корового и мантийного проводящих слоев; 5 – номера пунктов магнитотеллурического зондирования.

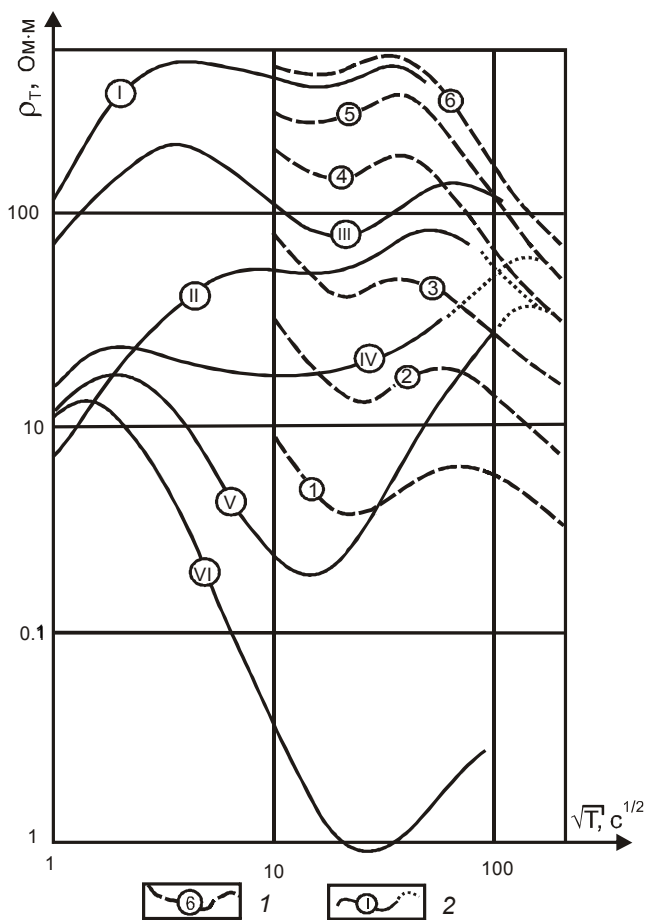
волна еще не дошла или уже прошла неоднородность.

В Малоботубинском районе (рис. 4в) все поперечные кривые смещены по оси сопротивления вверх. В интервале  $S_1$  их смещение обусловлено влиянием анизотропной толщи галогенно-карбонатного кембрия (коэффициент анизотропии  $\lambda$  более 30), которая играет роль промежуточного высокоомного экрана. В области действия коровой неоднородности высокого сопротивления (корового экрана), на периодах 10–500 секунд, происходит еще одно смещение кривых. В этом случае расхождение между продольными и поперечными кривыми может достигать двух порядков (рис. 4в). В Зимнебережном районе (рис. 4б) двойное смещение поперечных кривых происходит в том случае, когда в верхнем горизонте осадочного чехла увеличивается мощность высокоомных четвертичных отложений. Если они отсутствуют или их мощность мала, то в интервале  $S_1$  продольные и поперечные кривые совпадают, а смещение последних происходит в области влия-

ния корового экрана (рис. 4а). Продольные кривые в обоих районах близки к модельным (рис. 4).

Правомерность применения продольных кривых для оценки глубинного геоэлектрического разреза подтверждают результаты математического моделирования [5, 16], которые показали, что если направление простираения глубинных неоднородностей и экрана в осадочном чехле совпадают, то кривые, продольные к экрану, являются продольными и к неоднородности. При несовпадении направлений простираения для определения параметров глубинного разреза применяется кривая, продольная к коровой неоднородности.

Для разделения областей аномального и нормального разреза выполнялось сопоставление наблюденных кривых со среднехарактеристическими и модельными кривыми. Они являются откликом геоэлектрических разрезов, характеризующих нормальный градиентно-слоистый разрез для регионов с различной термодинамической активностью. Модельные разрезы определяют место и петрологическое



**Рис. 5.** Средние продольные кривые МТЗ Якутской алмазоносной провинции.

*I* – модельные кривые, рассчитанные для районов с различным термодинамическим режимом: 1 – районы современного вулканизма, 2 – рифты и океаны, 3 – окраины рифтов и центральные части синеклиз, 4 – бортовые части синеклиз, антеклизы, 5 – антеклизы и щиты, 6 – районы с адиабатическим распределением температур; 2 – средние продольные кривые Якутской алмазоносной провинции: I – Анабарский щит, Малоботубинский кимберлитовый район; II – западный борт Непско-Ботубинской антеклизы; III – Мирнинское алмазоносное поле; IV – Сюльдюкарская проводящая неоднородность; V – Бахчинская проводящая неоднородность; VI – Далдынское и Алакит-Мархинское кимберлитовые поля.

соответствие геоэлектрических комплексов, выделяемых МТ-зондированиями. Распределение удельных сопротивлений с глубиной для Малоботубинского и Зимнебережного кимберлитовых районов (рис. 5, 6) отвечает термодинамическому режиму антеклиз и щитов [6, 14, 16]. Глубина залегания мантийного и литосферного слоев для этих регионов составляет 27 и 40 км, соответственно, а сопротивление – 10 и 150–200 Ом·м.

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Среднемасштабные МТ-исследования, проведенные на территории Малоботубинского и Зимнебережного кимберлитовых районов, позволили определить основные черты глубинной электропроводности обоих регионов и выявить локальные особенности геоэлектрического разреза.

*Малоботубинский кимберлитовый район.* В разрезе осадочного чехла здесь выделено четыре обобщенных геоэлектрических комплекса, параметры которых (мощность и сопротивление) напрямую зависят от вещественного состава слагающих пород. Наибольшее влияние на распределение параметров первого геоэлектрического горизонта оказывают породы мезозойского комплекса, занимающие около 40 % территории. Сопротивление горизонта изменяется от 50 до 100 Ом·м, увеличиваясь до значений 300–400 Ом·м в местах проявления траппового магматизма. Мощность обычно составляет 150–170 м. В южной части района происходит увеличение мощности (до 200 м) и уменьшение сопротивлений (до 30 Ом·м). Это связано с появлением в разрезе платформенных отложений более мощной толщи юрских осадков и, возможно, с увеличением их глинистости. Второй геоэлектрический комплекс приурочен к отложениям нижней части мирнинской свиты верхнего кембрия, метегерской и ичерской свит среднего кембрия. Мощность и среднее продольное сопротивление слоя регионально выдержаны по всей площади исследований и составляют соответственно 300–320 м и 20–30 Ом·м. Третий геоэлектрический горизонт представлен галогенно-карбонатными породами нижнепалеозойского комплекса. Его среднее сопротивление составляет 100–120 Ом·м, мощность – 600–650 м. Четвертый геоэлектрический горизонт приурочен к проводящим отложениям нижнепалеозойского комплекса и венда. Мощность горизонта – 1200–1300 м, сопротивление – 60–100 Ом·м.

Суммарная проводимость осадочных отложений изменяется от 10 до 70 См. Наибольшей проводимостью характеризуется узел пересечения двух систем разломов – Вилуйско-Мархинской и Укугутской. В его пределах выделяется порядка 10 локальных аномалий изометричной формы, размерами от 2 до 5 км, интенсивностью до 70 См при общем фоне 45 См. Аномалии проводимости пространственно тяготеют к разломам платформенного чехла и располагаются преимущественно в пределах коровых проводящих неоднородностей.

Глубинный геоэлектрический разрез Малоботубинского района характеризуется двумя типами разреза земной коры (рис. 7). В восточной части района,



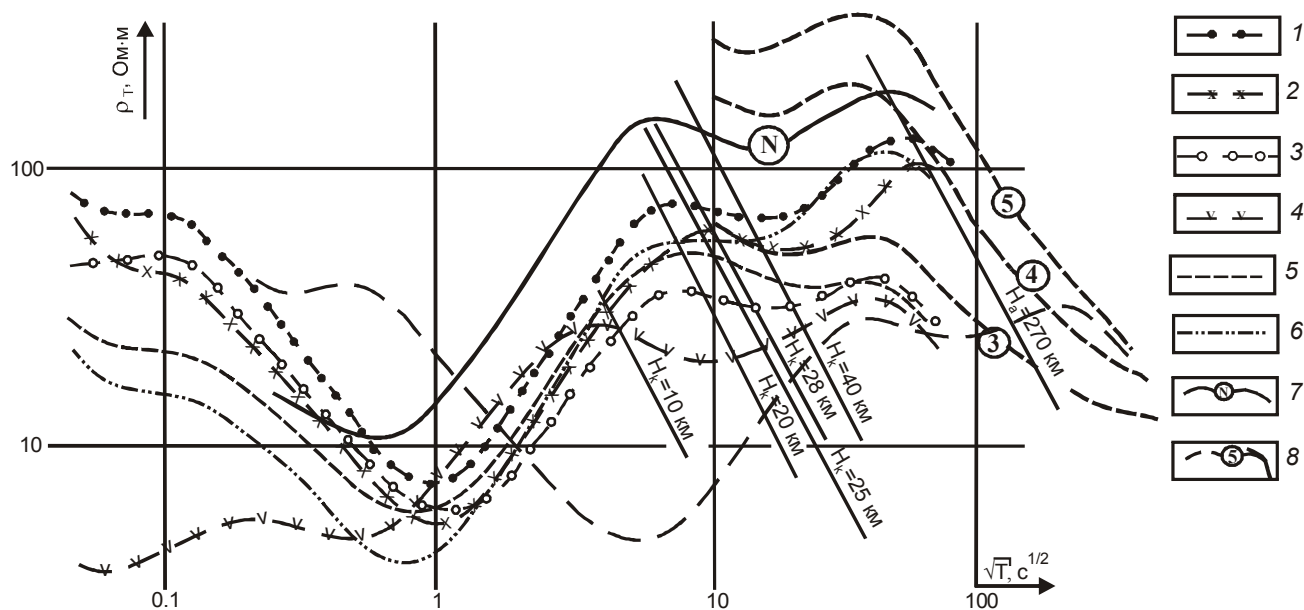


Рис. 6. Средние продольные кривые МТЗ Архангельской алмазоносной провинции.

Средние продольные кривые: 1 – Ключевой, Пачугский кусты, 2 – Шочинский куст, 3 – Чидвинский куст, 4 – Ижемский куст, 5 – Золотицкий куст, 6 – Черноозерский, Верхотинский кусты. Расположение кустов см. на рисунке 10; 7 – локально-нормальная 1D – кривая, рассчитанная для одномерной модели; 8 – модельные кривые, рассчитанные для районов с различным термодинамическим режимом: 3 – окраины рифтов и центральные части синеклиз, 4 – бортовые части синеклиз и антеклиз, 5 – антеклизы и щиты,  $H_k$ ,  $H_a$  – глубины залегания корового и мантийного проводящих слоев.

на западном борту Вилюйской синеклизы, в пределах Анабаро-Мирнинской коллизионной зоны, разрез низкоомный, с сопротивлением первые десятки сотни Ом·м. Более однородным строением обладает верхняя часть кристаллической коры. Сопротивление ее повышено относительно нижних частей до 100–200 Ом·м. Начиная с глубин порядка 20–30 км, разрез становится более проводящим и неоднородным. Здесь на общем фоне выделяются участки относительно повышенного и пониженного сопротивления. Об изменении вещественного состава земной коры также свидетельствует резкое повышение уровня магнитного поля до 600 нТл и уменьшение гравитационного поля на 30 мГл. Характер поведения геофизических полей указывает на изменение физических свойств земной коры.

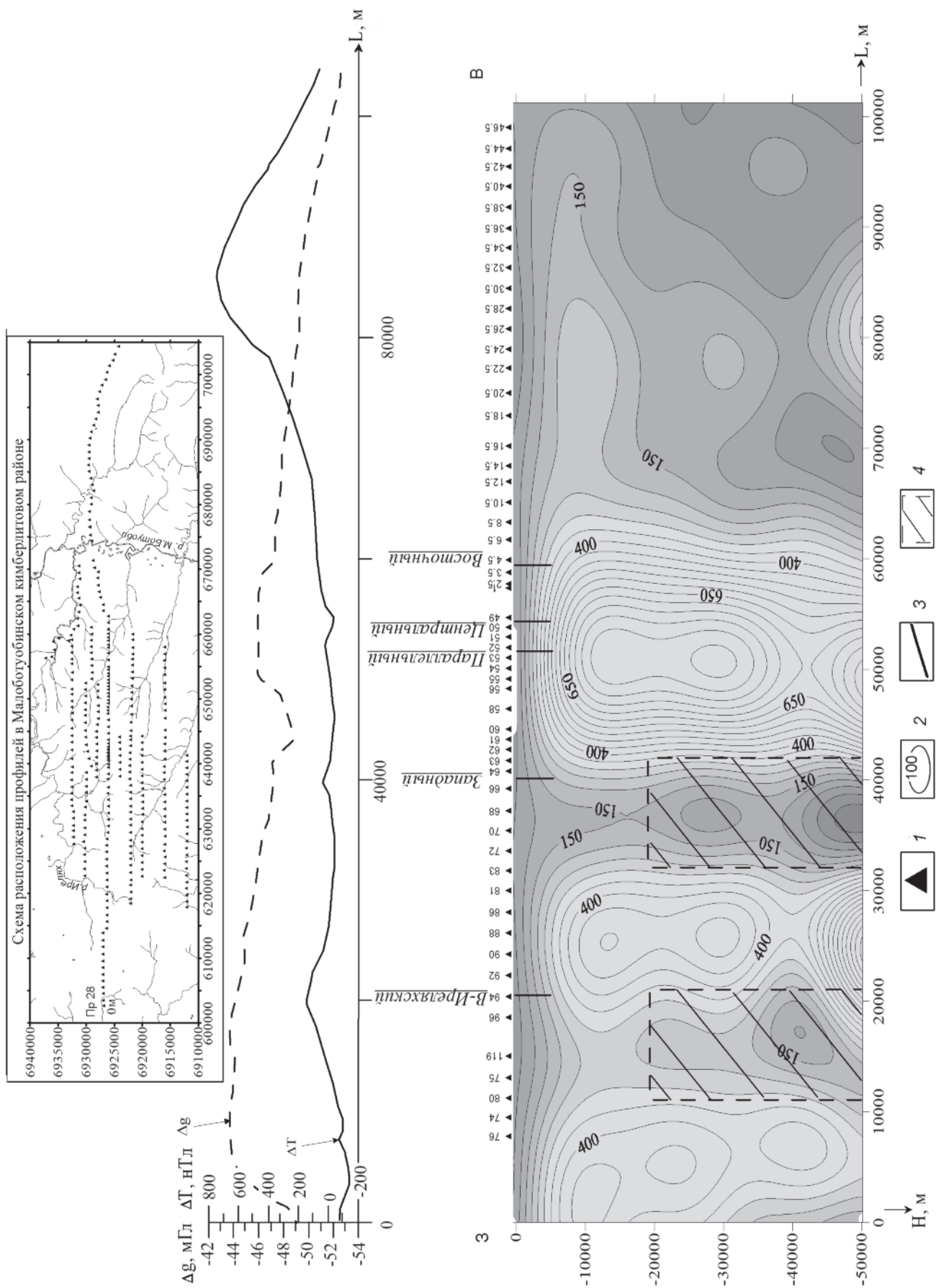
В западной части Малоботуобинского района, на территории Магано-Вилюйского террейна, разрез высокоомный. Верхняя кора до глубин 5–7 км обладает сопротивлением не более 300 Ом·м. Начиная с глубин порядка 10 км, сопротивление увеличивается

до значений более 1000 Ом·м. Магано-Вилюйский террейн является составной частью древнего Сибирского кратона, породы которого сформировались около 3 млрд лет назад и претерпели метаморфизм в гранулитовой фации на рубеже 2.7 млрд лет. На протяжении всей дальнейшей эволюции кора существенных преобразований не испытывала. Приуроченность кимберлитов к областям, характеризующимся высоким сопротивлением, объясняется правилом Клиффорда [23], в соответствии с которым алмазоносные кимберлиты располагаются в пределах древних кратонов, не подвергавшихся существенной тектоно-магматической активизации на протяжении последующих докимберлитовых этапов развития [18, 20].

На фоне высокоомного разреза коры Магано-Вилюйского террейна выделяются проводящие неоднородности. Все они располагаются выше литосферного слоя, имеют различные сопротивления и форму (рис. 8). Первая (I) из них, размером 12×20 км, вытянута в северо-восточном направлении вдоль

Рис. 7. Глубинный геоэлектрический разрез по профилю 28 Малоботуобинского кимберлитового района.

1 – пункты магнитотеллурических зондирований; 2 – изолинии удельного сопротивления в Ом·м; 3 – разломы Вилюйско-Мархинской системы; 4 – литосферные проводящие неоднородности. Осевой меридиан – 111, зона 19.



Укугутской системы разломов. Глубина залегания ее верхней кромки составляет 20 км, сопротивление – 80–100 Ом·м. В ее пределах выделяется неоднородность более высокого порядка ( $I^1$ ), с глубиной залегания 10 км и сопротивлением 30 Ом·м. В контурах проводящей неоднородности, на ее восточном фланге вдоль Западного разлома, расположены кимберлитовые трубки Амакинская, Интернациональная, Имени XXIII съезда КПСС, Таежная, а также жилы ан-21 и Южная. Вторая неоднородность (II) находится в северо-восточной части исследованной площади, на продолжении Укугутской зоны разломов. Ее параметры соизмеримы с параметрами первой неоднородности: глубина залегания – 20 км, сопротивление – 100 Ом·м. В пределах второй неоднородности располагаются кимберлитовые трубки Мир и Дачная. Третья неоднородность выделена в районе среднего течения реки Хатат. Она характеризуется более высокой глубиной залегания верхней кромки (15 км) и более низкими значениями сопротивлений (30 Ом·м). Ее размеры – 8×20 км, длинная ось вытянута в северо-восточном направлении. Центральный разлом пересекает неоднородность и влияет на ее конфигурацию.

На севере исследованного района намечаются еще две неоднородности (IV и V), расположенные в междуречье рек Кюеллэх и Чуоналыр симметрично по обе стороны Буордахского разлома. Обе неоднородности не ограничены с севера из-за отсутствия материалов зондирования.

Таким образом, кимберлитовые трубки Мирнинского поля тяготеют к градиентным зонам, расположенным в зоне сочленения высокоомного блока земной коры и проводящих неоднородностей (рис. 8). В области градиента проходят рудовмещающие участки Западного и Параллельного разломов. Это позволяет сделать предположение о контролирующей роли разрывных нарушений Укугутской системы в формировании проницаемой коры и распределении кимберлитовых тел в пределах Мирнинского поля.

### **Зимнебережный кимберлитовый район**

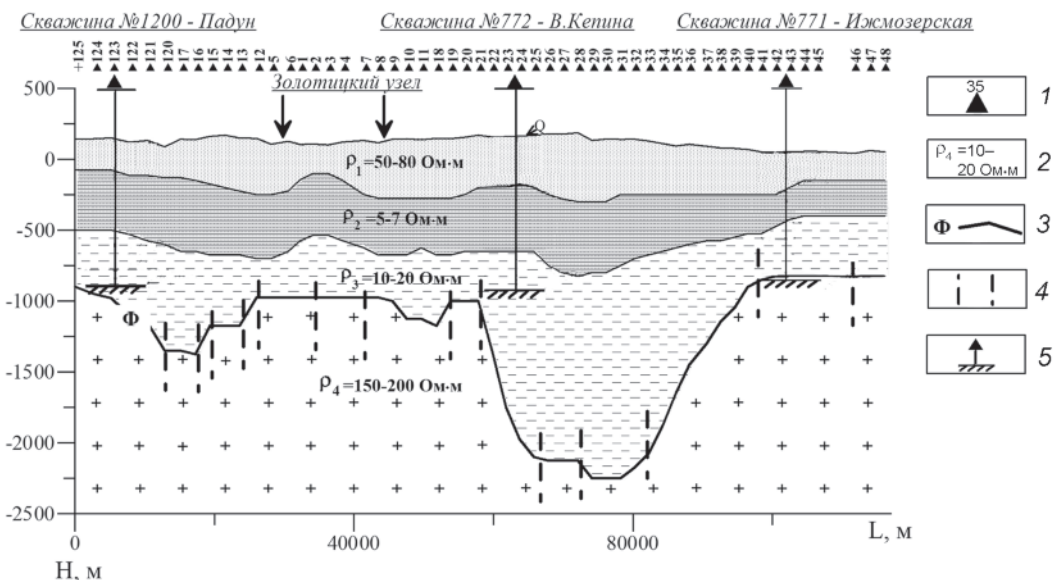
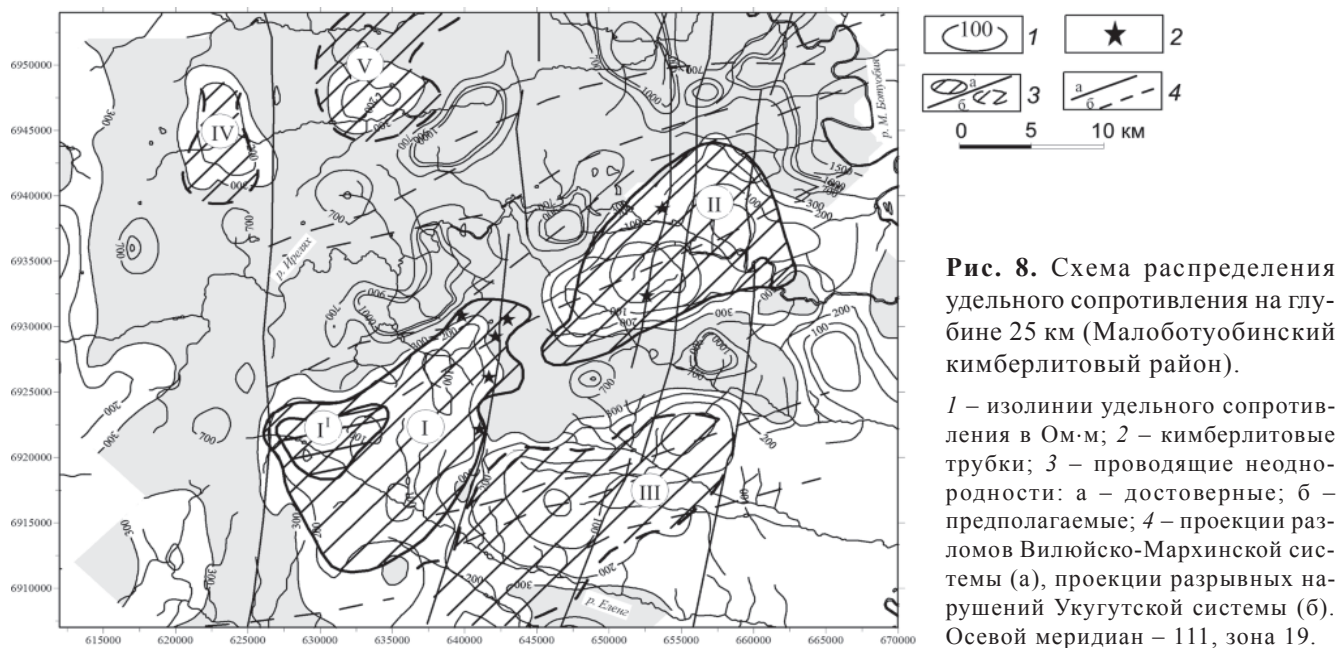
В разрезе осадочного чехла Зимнебережного района выделяются три геоэлектрических горизонта –  $\rho_1 > \rho_2$ ,  $\rho_2 < \rho_3$ . Первый – высокоомный, приурочен к современным четвертичным отложениям, породам верхнего палеозоя (каменноугольная система) и отложениям верхнего протерозоя (золотицкие слои падунской свиты котлинского горизонта). Мощность горизонта изменяется от 150 до 400 м, среднее продольное сопротивление – 50–80 Ом·м. Второй геоэлектрический комплекс – проводящий. Он представлен вендскими отложениями верхнего протерозоя (мельские и ергинские слои мезенской свиты кот-

линского горизонта; зимнегорские, вайзицкие и сюзьминские слои усть-пинежской свиты редкинско-го горизонта), его мощность составляет 250–500 м, среднее сопротивление – 5–7 Ом·м. Третий геоэлектрический горизонт включает в себя отложения венда (верховские, архангельские, лямицкие и тамичские слои усть-пинежской свиты редкинско-го горизонта) и рифея, общей мощностью от 250 до 1500 м и сопротивлением 10–20 Ом·м.

Породы кристаллического фундамента, по данным глубокого бурения и изучения ксенолитов в трубках взрыва, представлены мигматитами, амфиболсодержащими гнейсами, мигматизированными амфиболитами, гранито-гнейсами архейского возраста. Сопротивление пород фундамента в среднем составляет около 200 Ом·м, увеличиваясь до значений более 500 Ом·м под Золотицким и Кепинским кимберлитовыми полями. На поверхности рельефа кристаллического фундамента наблюдается осложнение структурного плана, выразившееся в чередовании выступов, впадин и грабенов. По данным МТЗ четко картируются Керецкий и Падунский грабены, а также Зимнебережное поднятие. Основные кимберлитовые поля Зимнебережного алмазоносного района – Золотицкое и Кепинское – приурочены к Зимнебережному поднятию, и только Ижемское поле северной частью располагается в пределах Керецкого грабена, а южной – в пределах Архангельского поднятия (рис. 9). Глубина залегания поверхности фундамента изменяется от 500 до 1100 м – на выступах, до 2000–2800 метров – в грабенах и впадинах (рис. 9).

В Зимнебережном районе по структурному положению и принадлежности к разным магматическим формациям выделяются четыре поля (рис. 2): Мельское – карбонатит-кимберлитовое; Золотицкое – мелилит-кимберлитовое; Ижемское – щелочное мелилит-кимберлитовое; Кепинское – пикрит-кимберлитовое. Четыре самостоятельные кимберлитовые формации, сформировавшиеся на разных глубинах и разных участках мантии, образуют единый альнеит-кимберлит-карбонатитовый комплекс пород [2]. Золотицкое и Кепинское поля, совмещенные в пространстве и близкие по времени образования, занимают одну и ту же территорию Зимнебережного района. Алмазоносные поля объединяют группы (кусты) кимберлитовых и родственных им пород, принадлежащих к единой формации вулканических образований, локализованных в единых тектонических структурах и внедренных в течение единого тектономагматического цикла [2].

Зимнебережный кимберлитовый район располагается в пределах высокоомной неоднородности, со-



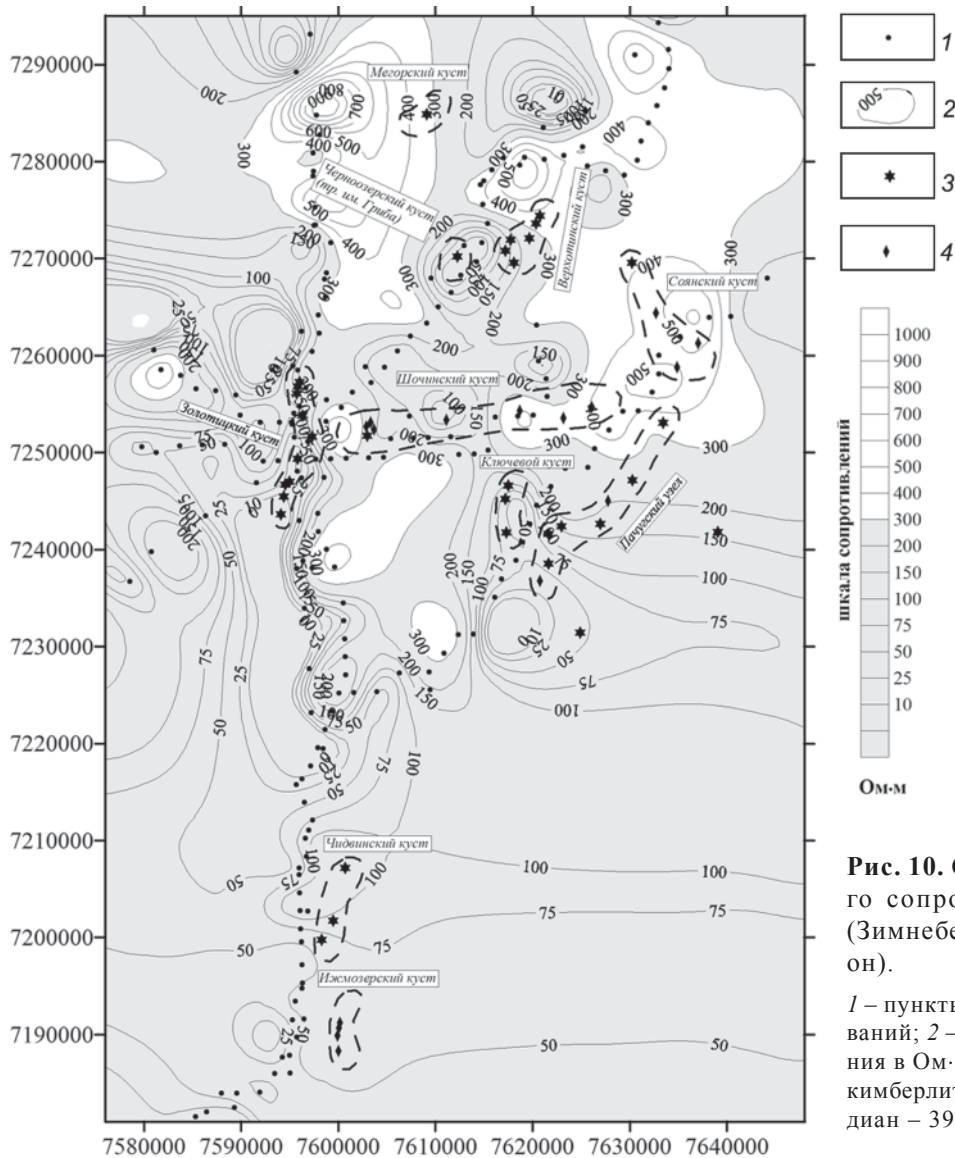
**Рис. 9.** Геолого-геофизический разрез осадочного чехла по профилю 1-1 (Зимнебережный кимберлитовый район; рис. 3).

1 – пункты магнитотеллурических зондирований; 2 – геоэлектрические горизонты, выделенные в осадочном чехле и их параметры; 3 – поверхность кристаллического фундамента, по данным МТЗ; 4 – тектонические нарушения, по данным ОГТ; 5 – скважины глубокого бурения.

противление которой достигает значений 500 Ом·м. Она занимает северную половину изученной площади, где выявлено большинство кимберлитовых тел, в том числе алмазоносных и кимберлитоподобных пород. По аналогии с другими провинциями можно считать, что этот блок земной коры является наиболее стабильным, сохранившимся от интенсивной фанерозойской активизации. В его пределах локализу-

ются известные месторождения и могут быть обнаружены новые продуктивные кимберлиты.

Территория к югу от вышеописанного района характеризуется более низким сопротивлением – около 100 Ом·м. В геологическом отношении она относится к Керецкому рифейскому грабену (авлакогену) и его ближайшему обрамлению. Понижение сопротивления, вероятно, обусловлено процессами



**Рис. 10.** Схема распределения удельного сопротивления на глубине 30 км (Зимнебережный кимберлитовый район).

1 – пункты магнитотеллурических зондирований; 2 – изолинии удельного сопротивления в Ом·м; 3 – кимберлитовые трубки; 4 – кимберлитоподобные породы. Осевой меридиан – 39, зона 7.

тектоно-магматической активизации, связанными с рифтогенезом.

На фоне высокоомного разреза кристаллической коры Зимнебережного района (как и в Мирнинском кимберлитовом поле) выделяются субвертикальные проводящие неоднородности. Они вытянуты в субмеридиональном направлении вдоль Северо-Двинской зоны разломов, контролирующей размещение кимберлитов Зимнебережного алмазоносного района. В западной части Северо-Двинской системы разломов выделяются три проводящие неоднородности (рис. 10). Первая, с глубиной залегания 20 км и сопротивлением менее 50 Ом·м, пространственно совмещена с Золотицким кустом кимберлитовых трубок и раскрывается в северо-западном направлении. Две другие соответствуют Чидвинскому и Ижмозерскому кустам Ижемского мелилит-кимберлитового

поля. Глубины залегания верхних кромок неоднородностей составляют 20 и 15 км, а сопротивление – 70 и 30 Ом·м, соответственно.

В восточной части Северо-Двинской системы разломов выделено четыре проводящих неоднородности, пространственно совмещенных с Черноозерским, Верхотинским, Ключевым, Пачугским и Шочинским кустами Кепинского кимберлитового поля. Параметры неоднородностей соизмеримы: глубины залегания верхних кромок – около 20 км, сопротивление – менее 100 Ом·м.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов региональных МТ-зондирований Малоботуобинского и Зимнебережного кимберлитовых районов, а также других геолого-геофизических данных показал, что особенности структур-

но-тектонического и глубинного строения этих алмазоносных территорий имеют генетическую связь с процессами кимберлитобразования. Для обоих районов характерно:

- расположение в древних архейских блоках стабильных кратонов, характеризующихся мощной литосферой (более 200 км) и низким тепловым потоком (менее 30 мВт/м<sup>2</sup>);
- контроль размещения кимберлитовых тел крупными системами разломов;
- приуроченность большинства кимберлитовых полей к блоковым поднятиям фундамента и их приграничным частям;
- наличие повышенной расслоенности консолидированной коры, которая отражается в геофизических полях в виде параметрических неоднородностей;
- наличие геоэлектрических неоднородностей, пространственно сопряженных с районами и полями кимберлитового магматизма.

В результате среднemasштабных МТЗ установлены основные особенности геоэлектрического разреза кристаллической коры кимберлитовых районов. Оба района располагаются в пределах крупных высокоомных неоднородностей, сопротивление которых достигает 4000 Ом·м в Малоботуобинском и более 500 Ом·м в Зимнебережном районе. Анализ петрофизических данных показывает, что наиболее вероятным источником подобных аномалий являются продукты кристаллизации магматических расплавов. В верхней мантии базальтовые компоненты кристаллизуются в эклогитовой фации, породы которой имеют на один-два порядка большее сопротивление, по сравнению с гипербазитами. В земной коре образование высокоомных неоднородностей может быть связано с непосредственным внедрением магм в пределы литосферного слоя или его дефлюидизацией в процессе магматической деятельности. В пределах высокоомных неоднородностей выделяются субвертикальные, в плане изометричные проводящие зоны большой вертикальной протяженности. Они располагаются выше литосферного проводящего слоя на глубинах порядка 15–20 км, а их сопротивление – менее 100 Ом·м. Понижение сопротивления в пределах неоднородности происходит из-за их насыщения минералами-проводниками, привнос которых возможен лишь по проницаемым зонам в коре, с концентрацией в пространстве с избыточной пористостью.

Поскольку все известные кимберлитовые трубки Малоботуобинского и Зимнебережного районов располагаются в пределах проводящих неоднородностей, то их можно интерпретировать как области с наибольшей вероятностью локализации кимберлитового магматизма.

Пространственно кимберлитовые тела тяготеют к рудоконтролирующим системам разломов, проходящим по участкам соприкосновения высокоомных блоков земной коры с проводящими зонами, находясь внутри последних.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алакшин А.М., Лысак С.В., Письменный Б.М. и др. Глубинное строение и геодинамика Саяно-Байкальской горной области и сопредельных районов Восточной Сибири // Глубинное строение территории СССР. М.: Наука, 1991. С. 72–88.
2. Андросов Е.А., Вержак В.В., Ларченко В.А., Минченко Г.В. О структурном контроле размещения кимберлитовых тел // Геология алмазов – настоящее и будущее. Воронеж. гос. ун-т, 2005. С. 31–43.
3. Балуев В.М., Моралев М.З. и др. Тектоническая эволюция и магматизм Беломорской рифтовой системы // Геотектоника. 2000. № 5. С. 30–43.
4. Бердичевский М.Н., Логунович Р.Ф. Магнитотеллурические полярные диаграммы // Физика Земли. 2005. № 10. С. 66–79.
5. Ваньян Л.Л., Кузнецов В.А., Любецкая Т.В. и др. Электропроводность земной коры Центральной Лапландии // Физика Земли. 2002. № 10. С.4–23.
6. Глазнев В.Н. Комплексные геофизические модели литосферы Феноскандии. Апатиты, 2004. 250 с.
7. Добрынина М.И. Особенности размещения палеозойского магматизма северной части Русской плиты с позиции континентального рифтогенеза // Геология и полезные ископаемые севера Европейской части СССР. Архангельск, 1991. С. 5–10.
8. Егоров А.С. Особенности модели глубинного строения земной коры древних платформ и фанерозойских складчатых областей по данным комплексных исследований вдоль региональных профилей ГСЗ и МОВ-ОГТ // Геофизика XXI столетия. 2000. М.: Науч. мир, 2001. С. 28–32.
9. Еловских В.В., Мокшанцев К.Б. Структурный контроль проявлений кимберлитового магматизма на северо-востоке Сибирской платформы. Новосибирск: Наука, СО РАН, 1974. 132 с.
10. Жамалетдинов А.А. Модель электропроводности литосферы по результатам исследований с контролирующим источником поля. М.: Наука, 1990. 198 с.
11. Караев Н.А., Биезайс Я.Я., Лебедин П.А. Сейсмическая гетерогенность кимберлитобразующей системы // Геофизика. 2000. № 6. С. 16–23.
12. Ковтун А.А., Вагин С.А., Варданыц И.Л. и др. Анализ магнитотеллурических и магнитовариационных результатов в интервале периодов суточных вариаций по данным BEAR и определение “нормального” разреза Балтийского щита // Физика Земли. 2002. № 11. С. 34–53.
13. Никулин В.И. Ерхов В.А., Поспеев В.И. О критериях прогноза кимберлитовых полей // Сов. геология. 1988. № 11. С. 31–42.
14. Поспеев В.И. Михалевский В.И. Электромагнитные данные об астеносфере в районах Сибирской платформы // Геология и геофизика. 1988. № 1. С. 153–157.

15. Поспеева Е.В., Поспеев В.И. Результаты глубинных магнитотеллурических исследований в Якутской алмазоносной провинции // Обеспечение научно-технического прогресса при геофизических исследованиях в Восточной Сибири. Иркутск, 1987. С. 107–115.
16. Поспеева Е.В. Математическое моделирование при решении прямой задачи ГМТЗ в условиях Малоботуобинского алмазоносного района // Геология и геофизика. 1988. № 9. С. 106–109.
17. Поспеева Е.В., Манаков А.В., Магросов В.А. Геоэлектрические неоднородности земной коры в связи с кимберлитовым магматизмом юга Якутской алмазоносной провинции // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. 2004. № 1. С. 137–147.
18. Розен О.М., Серенко В.П., Специус З.В. Якутская кимберлитовая провинция: положение в структуре Сибирского кратона, особенности состава верхней и нижней коры // Геология и геофизика. 2002. Т. 43, № 1. С. 3–26.
19. Суворов В.Д. Глубинные сейсмические исследования в Якутской кимберлитовой провинции. Новосибирск: Наука, 1993. 136 с.
20. Тектоника, геодинамика и металлогения территории республики Саха (Якутия) М.: МАИК. Наука / Интерпериодика, 2001. 571 с.
21. Ширококов В.Н. Некоторые особенности глубинного строения Зимнебережного алмазоносного района // Разведка и охрана недр. М.: Недра, 1977. С. 21–25.
22. Chermak V. Relation between heat flow and crystal thickness // Acta geol. Acad. Sci. hung. 1977 (1979). V. 21, N 4. P. 261–263.
23. Clifford T.N. Tectono-metallogenic units and metallogenic provinces in Africa // Earth, Planet Sci. Lett. 1966. P. 421–434.

*Рекомендована к печати Ю.Ф. Малышевым*

### *Ye. V. Pospееva*

#### **Application of medium-scale magnetotelluric sounding for identification of deep criteria of areas promising for kimberlite**

Medium-scale magnetotelluric soundings performed in the territory of the Malobotuobinskiy (Yakutia diamond province) and Zimneberezhny (Arkhangelsk diamond province) kimberlite districts revealed basic specific features of the geoelectrical section of the studied regions. They are genetically related to processes of kimberlite formation. All the known kimberlite pipes of both regions are located in the contours of the revealed conducting geoelectrical heterogeneities. Such heterogeneities may become one of the deep criteria for recognition of kimberlite-potential areas.

**Key words:** magnetotelluric soundings, geoelectrical heterogeneities, kimberlite pipes, kimberlite district, diamond province, Yakutia, Arkhangelsk area.