

## ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ ЗЕМНОЙ КОРЫ В СВЯЗИ С КИМБЕРЛИТОВЫМ МАГМАТИЗМОМ ЮГА ЯКУТСКОЙ АЛМАЗОНОСНОЙ ПРОВИНЦИИ

Е.В. Поспеева, А.В. Манаков, В.А. Матросов

*АК «АПРОСА», Якутское научно-исследовательское геологоразведочное предприятие  
ЦНИГРИ, г. Мирный, Республика Саха (Якутия)*

Выполнены магнитотеллурические исследования в Мирнинском кимберлитовом поле на юге Якутской алмазонасной провинции. Работы проводились с аппаратурой нового поколения канадской фирмы «Феникс» с регистрацией периодов поля до 5000 с. Анализ результатов обработки и интерпретации магнитотеллурических зондирований позволил выделить три типа геоэлектрического строения земной коры. Консолидированная кора древних кратонов обладает высоким сопротивлением. В ее пределах выделяются относительно локализованные участки, характеризующиеся повышенной проводимостью. Области протерозойской коллизии отличаются от стабильных архейских блоков общим понижением сопротивления пород коры. Участки аномальной проводимости земной коры пространственно совпадают с кустами кимберлитовых тел.

### Введение

Проведение нового цикла магнитотеллурических исследований в южной части Якутской алмазонасной провинции (ЯАП) связано с совершенствованием глубинных геофизических критериев прогноза кимберлитовых полей. Объектом изучения на начальной стадии работ стал Малоботуобинский район, в пределах которого расположено Мирнинское кимберлитовое поле. В конце прошлого столетия на этой территории проводились региональные работы в модификациях магнитотеллурического зондирования (МТЗ) и глубинного магнитотеллурического зондирования (ГМТЗ) силами Западно-Якутской геофизической экспедиции (ЗЯГЭ) ПГО «Ленанефтегазгеология» и Восточно-Сибирского научно-исследовательского института геологии геофизики и минерального сырья (ВостСибНИИГ-ГиМС). Запись вариаций магнитотеллурического поля осуществлялась цифровой аппаратурой ЦЭС – 2 с помощью электрических и магнитных датчиков, расположенных взаимно перпендикулярно в точке измерения [1]. Точки наблюдения располагались на расстоянии 7-10 км друг от друга. Диапазон измеряемых периодов составлял 0,06 – 10000 с. Интерпретация полученных данных проводилась на основе численного моделирования магнитотеллурического поля горизонтально-неоднородных сред. В результате этих работ в литосфере ЯАП выделены два регионально распространенных проводящих слоя. Нижний - имеет сопротивление единицы Ом·м, располагается на глубинах около 200 км, совпадает с мантийным волноводом и объясняется наличием частичных расплавов. Под областью частичного плавления в верхней мантии понимается астеносфера. Глубина залегания кровли верхнего проводящего слоя находится на глубине 35-40 км, сопротивление составляет 75-150 Ом·м, а мощность 50 км [1]. На фоне региональной структуры электропроводности тектоносферы ЯАП, обусловленной геотермическим и флюидным режимом, выделяются аномальные

зоны и области, проводимость которых отличается. Они размещаются в литосфере на разных уровнях, имеют различную форму, размеры и удельные электрические сопротивления.

Малоботуобинский алмазонасный район приурочен к региональной высокоомной неоднородности размерами первые сотни километров, сопротивлением 5000 Ом·м. Верхняя кромка находится на глубине 10 км. На ее фоне выделены зоны проводимости, параметры которых варьируют в широких пределах: размеры – первые десятки км, глубина залегания верхних кромок 5-15 км, проводимость от 3000 до 20000 См. По мнению авторов, высокоомная неоднородность представляет собой реликтовый палеочаг кимберлитового магматизма в пределах которого распространены породы эклогитового и дунит-гарцбургитового ряда обладающие повышенным сопротивлением, что отличает их от пород базальтового слоя земной коры. Проводящие зоны связываются с увеличением объема токоносителей в породах коры. Под последними понимаются области занимаемые проводящими флюидами законсервированными с момента тектонических активизаций, когда зоны служили путями транспортировки кимберлитовой магмы. Продукты деятельности мантийного и литосферного флюидопотоков – сульфиды, графит так же вносят определенный вклад в проводимость аномальных зон. Авторы считают, что электропроводность проводящих неоднородностей могла формироваться как за счет ионных токоносителей, так и за счет твердых минералов - проводников. Мирнинское кимберлитовое поле вписывается в контур одной из проводящих неоднородностей. Предполагается, что подобное сочетание непроводящих и проводящих неоднородностей имеет генетическую связь с процессами кимберлитообразования и рассматривается как один из прогнозных критериев [1]. К сожалению, редкая сеть наблюдений позволила только выявить пространственное совпадение геоэлектрических неоднородностей с кимберлитовыми полями. Морфология аномалий проводимости изучена недостаточно, не ус-

тановлена их связь с конкретными геологическими структурами. Для решения этих задач в плане уточнения их прогнозной значимости в Малоботуобинском районе в настоящее время проводятся средне-масштабные магнитотеллурические зондирования с современной аппаратурой, которые являются естественным продолжением старых работ.

### Краткие геологические сведения о Малоботуобинском районе

Исследуемый район расположен в южной части ЯАП, на севере Непско-Ботуобинской антеклизы, являющейся надпорядковой структурой Сибирской платформы (Сибирского кратона). Непско-Ботуобинскую антеклизу можно отнести к структурам со стабильным платформенным режимом и мощностью осадочного чехла 2-3 км. С запада она ограничивается Тунгусской синеклизой, с ее уникальным трапповым магматизмом. С востока резко переходит в Вилюйскую синеклизу, развившуюся на месте Палеовиллюйского авлакогена. Синеклизы являются типичными областями тектоно-магматической активизации платформ и характеризуются интенсивной деструкцией земной коры [2]. Районирование фундамента Сибирского кратона проведено на основе данных по вещественному составу (скважины, ксенолиты из кимберлитовых тел) и Sm-Nd датированию [3,4]. Территорию района характеризуют две структурные единицы – Магано-Вилюйский (Маганский) гранулитогнейсовый террейн с модельным возрастом пород 3,4-2,6 млрд. лет и Анабаро-Мирнинская (Котуйканская, Маганская) коллизионная зона, сформировавшаяся на рубеже 1,9-1,8 млрд. лет. Магано-Вилюйский террейн занимает западную часть ЯАП и большую часть исследуемого района. Его состав в верхней коре представлен ассоциациями двупироксен-плагиоклазовых гнейсов, соответствующими по химическому составу ряду андезитобазальт - 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 [4]. Породы преобразованы в гранулитовой и, фрагментарно, в амфиболитовой фации метаморфизма. Анабаро-Мирнинская коллизионная зона простирается полосой шириной до 75 км вдоль восточной границы Магано-Вилюйского террейна, а в исследуемом районе от р. М. Ботуобия до Сунтарской излучины р. Вилюй. Зона представляет собой коллизионный бластомилонитовый меланж, содержащий жиллообразные тела автохтонных гранитов, тектонические блоки анортозитов и крупные, до десятков километров в длину, отторженцы гранулитов из прилегающих террейнов, подвергшиеся регрессивному амфиболитовому метаморфизму вследствие проникновения водного флюида вдоль поверхности надвигания [5].

В строении платформенного чехла участвуют осадочные и, в меньшей степени, магматические

породы мощностью от 1700 до 2300 м. Они образуют структурные ярусы, сформировавшиеся в течение нескольких тектоно-магматических этапов. В районе выделено четыре этапа: вендско-раннепалеозойский (PR<sub>2</sub><sup>4</sup>-S), среднепалеозойский (D-C<sub>1</sub>), позднепалеозойский-раннемезозойский (C<sub>2</sub>-T), средне-мезозойский - кайнозойский (J-Q) [2]. Анализ пространственно-временного положения разнотипных структур позволяет говорить о том, что они развивались на протяжении платформенных этапов в значительной степени унаследовано. Кимберлитовые поля тяготеют к краевым частям стабильных блоков. В пределах Малоботуобинского 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 структурного комплекса определяется развитием Тунгусской синеклизы, за восточную и юго-восточную границы которой, принимается контур распространения на западном крыле Непско-Ботуобинской антеклизы верхнепалеозойских отложений и нижнетриасовых траппов. Формирование пород мезозойского структурного комплекса связано с наложенным Ангаро-Вилюйским 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 кв. км. В его пределах выявлено семь кимберлитовых трубок (пять представляют промышленный интерес) и две дайки. Размеры тел от десятков до первых сотен метров, форма трубчатая. Возраст кимберлитов – среднепалеозойский [6]. Тела прорывают терригенно-карбонатные породы венда-кембрия и выходят на поверхность эрозионного среза или перекрываются юрскими осадками мощностью до 20 м. Каменноугольные и пермские терригенные отложения практически полностью эродированы и сохранились лишь местами в палеодолинах и впадинах. Помимо кимберлитов магматические породы представлены силлами и дайками долеритов среднепалеозойского возраста и туфовыми трубками взрыва основного состава. Пластовые тела долеритов нижнетриасового возраста занимают 30% территории района и имеют мощность от 10 до 150 м. Наличие большого количества туфовых трубок в Мирнинском поле является его особенностью, которая не выявлена в других полях центральной части провинции [7]. Лишь на севере вулканические трапповые аппараты встречаются совместно с кимберлитами. По возрасту трубки основного состава относят к девону [6], считается, что среднепалеозойская фаза основного магматизма предшествовала кимберлитовой, а магмы использовали при своем внедрении одни и те же структурные элементы. Кимберлитовое поле представляет собой сложный в тектоническом отношении участок, расположенный на пересечении субмеридианальной Вилюйско-Мар-

хинской и северо-восточной Джункун-Хампинской систем разломов. Разломы Вилюйско-Мархинской системы отчетливо картируются узкими линейными аномалиями  $\Delta T$ , благодаря дайкам долеритов залеживающим их. По мнению большинства исследователей, разломы этой зоны (Западный, Центральный, Параллельный), являются рудоконтролирующими для кимберлитового магматизма. Разломы Джункун-Хампинской системы выделяются по сейсмическим данным, а также линейным минимумом в поле суммарной продольной проводимости платформенного чехла. По сейсмическим данным большая их часть относится к типу сбросов. Амплитуды вертикальных перемещений блоков нижнепалеозойских пород по этим разломам от 20 до 100 м. В плане они имеют протяженность 5-10 км. Менее отчетливо по геологическим и геофизическим данным проявляются разломы субширотного и северо-западного направлений, носящие подчиненный характер. Они имеют незначительную протяженность, близкие к вертикальным углы падения с амплитудой первые метры.

В региональном плане поле приурочено к северо-восточной части устойчиво развивавшегося Мирнинского сводового поднятия, на которое в среднем палеозое наложилась отрицательная структура, характеризующаяся относительно высокими мощностями нижнепалеозойских отложений сохранившихся от размыва в грабенообразных понижениях. В современном рельефе кровли нижнепалеозойского основания данному участку соответствует возвышенность [8]. В пределах участка зафиксировано множество локальных субизометричных структур и линейных зон в кимберлитовмещающей толще. Размеры их 5-10 км, амплитуда до 80 м. Локальные структуры практически не выражены в рельефе кровли нижнепалеозойских пород, но отличаются различным уровнем эрозионного среза. Отрицательные структуры часто объединены в линейные грабены, трассирующие зоны разломов. Дайки долеритов, также сопровождающие разломы, часто меняют свое простирание, расщепляются, выклиниваются. Кимберлитовые тела располагаются в грабенообразных понижениях или на их склонах, часто приурочены к пересечению разломов. В районе кимберлитового поля наблюдаются многочисленные ореолы минералов индикаторов кимберлитов: пироба, пикроильменита, хромшпинелида и самих алмазов. Отмечается высокий процент минералов с малой степенью износа.

### Методика полевых работ.

#### Обработка и интерпретация МТЗ

Исследования выполнялись с аппаратурой сконструированной в 1996 году компанией Феникс Джеофизикс Лтд. Она благодаря своей точности, производительности, мобильности, помехозащищенности и уровню автоматизации быстро нашла широкое применение при проведении МТЗ. MTU – легкий малогабаритный автономный регистратор с 24 разрядным АЦПУ, суточная автономная работа

обеспечивается внешней малогабаритной батареей 12 В. Размеры 23x22x11 см, вес 4 кг, число каналов 2-5, частотный диапазон-400-0,0002 Гц. Динамический диапазон  $\pm 1,2$  В, входное сопротивление 1 МОм. Вмонтированная в каждый прибор система GPS обеспечивает синхронизацию приборов, расположенных на неограниченном расстоянии с точностью 1 мксек и автоматическое определение координат текущего положения каждого из приборов с высокой степенью точности. Регистратор приспособлен к работе в самых разных климатических условиях в диапазоне температур от -30 до +50<sup>o</sup> С.

Наблюдения проводились по профилям расположенным на расстоянии 2-4 км друг от друга, при этом густота точек зондирований достигала 0,5 км в зонах рудоконтролирующих разломов и не превышала 1-2 км на остальной части профиля. На настоящий момент в Малоботуобинском районе выполнено около 400 зондирований. Измерение вариаций магнитотеллурического поля проводилось станциями MTU-5 и MTU-2. Для полной записи на точке наблюдений устанавливается пятиканальная станция (MTU-5). Две электрические линии раскладываются строго по азимуту в ортогональных направлениях. Расстояние между электродами 40 м. Провода укладываются желательнее на землю так, чтобы избежать влияния ветровых шумов. Электроды неполяризующиеся устанавливаются в углубление 0,3 м, увлажненное соевым раствором. Датчики магнитных каналов выносились на 10-15 м от центра и устанавливались также по азимуту строго ортогонально в вырытые углубления. Затем прикрывались, чтобы избежать лишней помех. Обычное время работы станции на точке составляло 20-22 часа, что позволило получить периоды от 0,003 до 5000 с. На это время хватало питания от аккумулятора и накапливаются сигналы во всем диапазоне частот достаточные, чтобы изучить строение земной коры на всю ее мощность (40-50 км). Измерения всех составляющих магнитотеллурического поля фиксируются по спутниковому времени. Определяются также координаты точки наблюдений. Ежедневно станция переустанавливается на другую точку со сменой аккумулятора и диска с данными. Специфика работ заключается в синхронной регистрации магнитотеллурического поля несколькими станциями. Одна из них (MTU-5) осуществляет запись пяти компонент поля -  $E_x$ ,  $E_y$ ,  $H_x$ ,  $H_y$ ,  $H_z$ , а остальные (MTU-2) только двух -  $E_x$  и  $E_y$ . Для получения полного тензора импеданса при обработке материалов полученных на двухканальных станциях компоненты  $H_x$ ,  $H_y$  и  $H_z$  берутся с базовой пятиканальной станции. Это делается исходя из того, что магнитное поле на ограниченной площади изменяется гораздо медленней, чем электрическое. При этом пятиканальная станция располагается в центре, а двухканальные по обе стороны от нее. При использовании такой методики очень важным является выбор расстояния между пяти- и двухканальными приборами. На опытном профиле, в условиях Малоботуобин-

ского района. были проведены испытания, которые показали, что на расстоянии до 2 км между базовой и полевыми станциями кривые МТ-поля полученные пятиканальными и двухканальными станциями практически не различаются

Обработка данных полевых измерений осуществлялась в программе MTUROBZT EXE и состояла из трех основных этапов:

- 1) обработки временных рядов;
- 2) разворота кривых кажущегося сопротивления по направлениям осей эллипса поляризации магнитотеллурического поля;
- 3) первичного редактирования кривых кажущегося удельного сопротивления.

Дальнейшее редактирование кривых, 1-D-инверсия, 2-D-инверсия, построение качественных и количественных разрезов производилось в программе WinGLink. Комплекс методических приемов, необходимый для получения достоверной информации о геoeлектрическом разрезе, должен быть основан на теоретических и экспериментальных исследованиях для различных типов геoeлектрических моделей региона. В этом плане для кимберлитовых районов ЯАП, а также сопредельных регионов, накоплен обширный материал, изложенный как в отчетах по научно-исследовательским разработкам, так и в отчетах производственных организаций.

Основной методической задачей, решение которой определяет степень достоверности магнитотеллурических зондирований, является учет влияния на форму и уровень кривых МТЗ латеральных геoeлектрических неоднородностей, расположенных в осадочном чехле. Они создают неинтерпретируемый геoeлектрический шум, который проявляется в смещении кривых кажущегося сопротивления вдоль оси сопротивлений. Одной из наиболее важных обобщенных характеристик осадочной толщи платформенного чехла является интегральная (суммарная) проводимость. Мощность осадков пород изменяется от десятков метров на штах, до первых десятков километров в глубоких депрессиях. Чередование слоев с различными удельными сопротивлениями порождает разнообразие типов геoeлектрических разрезов осадочной толщи. Однако все они имеют общую черту: сверху и снизу проводящие пласты ограничены высокоомными средами. Сверху - это воздух, снизу, породы кристаллического фундамента.

В разрезе осадочного чехла Малоботуобинского района выделяются четыре обобщенных геoeлектрических комплекса (рис. 1):

$$\rho_1 > \rho_2 < \rho_3 > \rho_4.$$

**Первый** ( $\rho_1$ ) - высокоомный, имеет региональное распространение и является промежуточным высокоомным экраном, в случае когда горизонт представлен магматическими породами трапповой формации триаса, отложениями балыхтажской свиты нижнего ордовика, верхней частью мирнинской свиты верхнего кембрия. Среднее продольное сопротивление комплекса изменяется от 100-150 Ом м

до 1300-2000 Ом м в местах проваления трапповой магматизма. Если сверху разрез сложен юрскими терригенными породами сопротивления могут составлять менее сотни Ом м

**Второй** ( $\rho_2$ ) геoeлектрический горизонт - проводящий. Он приурочен к отложениям нижней части мирнинской свиты верхнего кембрия, метегерской и ичёрской свит среднего кембрия. Среднее продольное сопротивление слоя составляет первые десятки Ом м.

**Третий** ( $\rho_3$ ) геoeлектрический горизонт представлен газогенно-карбонатными породами среднего и нижнего кембрия. На кривых магнитотеллурических зондирований он выражен подъемом асимптотической ветви и служит высокоомным промежуточным горизонтом. Среднее сопротивление слоя - 100-150 Ом м.

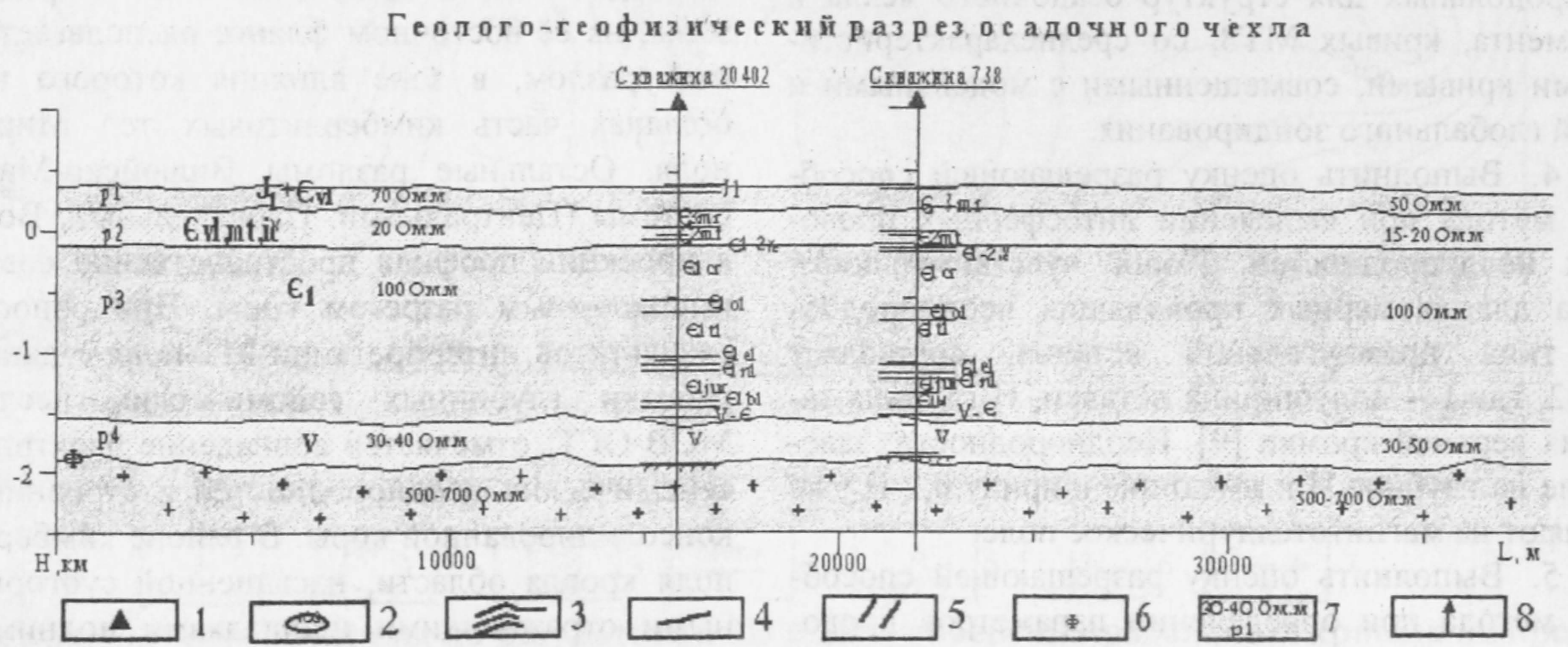
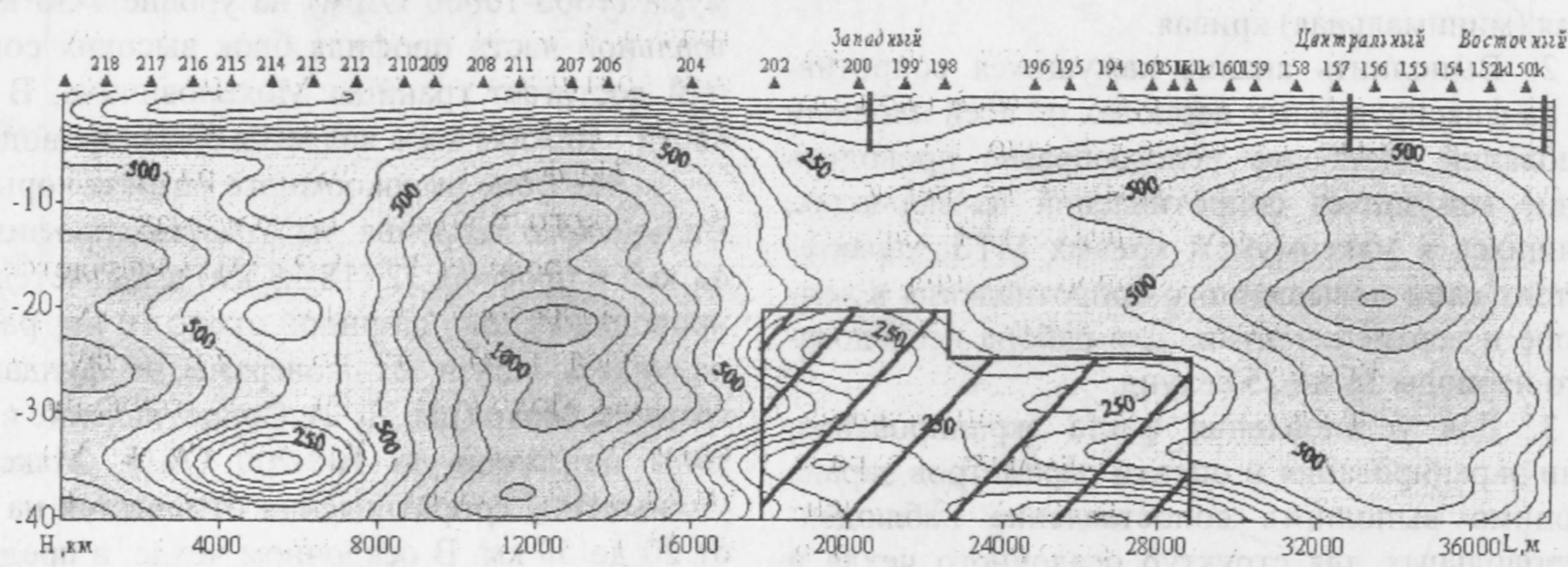
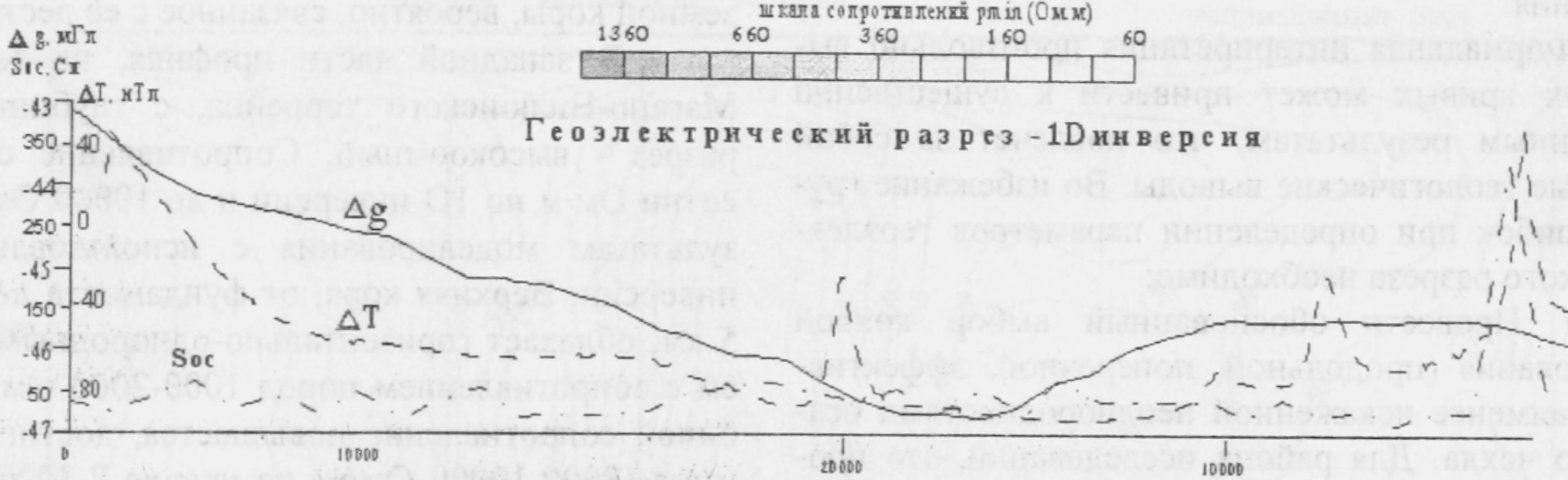
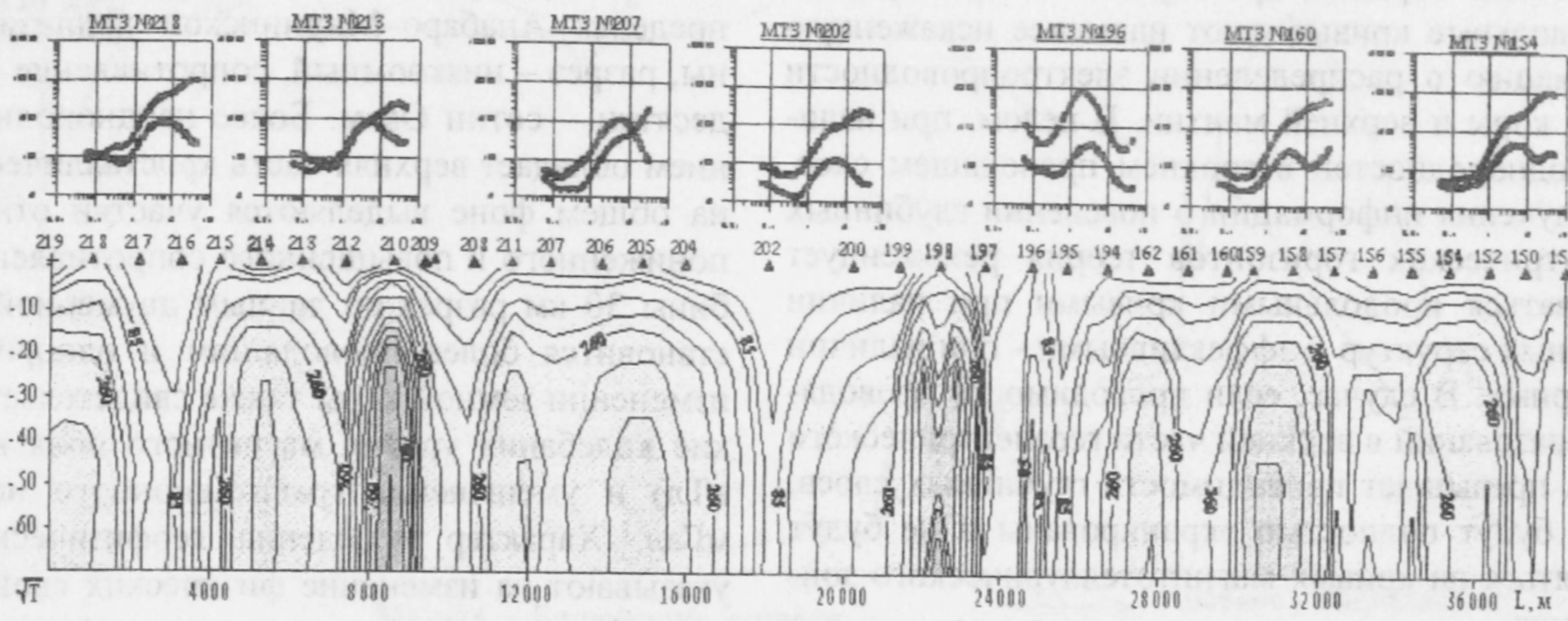
**Четвертый** ( $\rho_4$ ) геoeлектрический горизонт является проводящим комплексом. Он включает в себя карбонатно-терригенные отложения нижнего кембрия и венда. Понижение сопротивления в его пределах до 10-30 Ом м обусловлено увеличением пористости пород, входящих в его состав, а также уменьшением сопротивления вод, заполняющих поровое пространство.

Основным опорным электрическим горизонтом является поверхность кристаллического фундамента. Верхняя часть его, по данным глубокого бурения, представлена метаморфизованной толщей сланцами, амфиболитами, гнейсами, гранитоидами, кварцитами.

В настоящее время принято выделять два основных типа искажающих эффектов, отклоняющих форму и уровень кривых МТЗ, от кривых, соответствующих локальному горизонтально-слоистому разрезу - гальванические и индукционные. Гальванические эффекты возникают в результате образования на границе неоднородности избыточных зарядов. Это приводит к экранированию поперечной составляющей МТ-поля, которая в интервале Н оказывается приподнятой или опущенной относительно нормально уровня. Особенностью гальванических эффектов является их локальность - за пределами неоднородности они быстро ослабевают и на расстоянии в четыре раза меньших мощности верхнего слоя, уже не оказывают экранирующего влияния. В районе работ роль высокоомного экрана играет анизотропная толща карбонатно-газогенного кембрия, которая при наклонном залегании сдвигает поперечную кривую вверх по оси сопротивлений. Сдвиг пропорционален квадрату отношения проводимости пород, лежащих над экраном, к проводимости пород, лежащих под экраном и самого экрана [9,10]. Величина сдвига тем больше, чем больше наклон имеет экран.

Индукционные эффекты проявляются на продольных по отношению к неоднородности кривых в виде дополнительных минимумов и перегибов. Они связаны с воздействием на кривые индукционных токов, протекающих в пределах неоднородности

Псевдоразрез ртн



**Рис.1. Геоэлектрический разрез по профилю 32:** 1 – пункты МТ-зондирования; 2 – изолинии сопротивлений; 3 – графики магнитного ( $\Delta T$ ), гравитационного ( $\Delta g$ ) полей и суммарной продольной проводимости осадочного чехла ( $S_{oc}$ ); 4 – разломы Вилуйско-Мархинской системы; 5 – проводящая неоднородность по данным количественной интерпретации кривых МТЗ; 6 – граница кристаллического фундамента по данным МТЗ; 7 – геоэлектрические горизонты и их сопротивления; 8 – скважины глубокого бурения

Индукционные эффекты слабо проявляются на кривой, если электромагнитная волна еще не дошла или уже прошла неоднородность. В первом приближении интервал действия индукционных эффектов

ограничивается линиями  $S_H$ ,  $S_0$ ,  $d$ ,  $H$ , где  $S_H$ ,  $S_0$  - проводимость верхней части разреза соответственно внутри и вне неоднородности,  $d$  - расстояние до нее,  $H$  - глубина до проводящего основания.

Таким образом, при глубинных исследованиях продольные кривые дают наименее искаженную информацию о распределении электропроводности земной коры и верхней мантии. В целом, при наличии неоднородностей в верхнем проводящем слое, для получения информации о поведении глубинных геоэлектрических горизонтов теория рекомендует пользоваться продольными кривыми при наличии двумерных структур и эффективными - при наличии трехмерных. В случае, если проводимость проводящих образований в верхней части геоэлектрического разреза превышает проводимость глубинных слоев, то они будут полностью экранированы и не будут проявляться на кривых магнитотеллурического зондирования.

Формальная интерпретация произвольно выбранных кривых может привести к существенно искаженным результатам, что повлечет за собой неверные геологические выводы. Во избежание грубых ошибок при определении параметров геоэлектрического разреза необходимо:

1. Провести обоснованный выбор кривой зондирования (продольной, поперечной, эффективной), наименее искаженной неоднородностями осадочного чехла. Для района исследований, это продольная (минимальная) кривая.

2. Выполнить анализ кажущихся сопротивлений на фиксированных периодах по всей площади исследований. Наиболее целесообразно проводить изучение кажущихся сопротивлений на периодах, относящихся к максимумам кривых МТЗ, характеризующих слои повышенного сопротивления в земной коре и верхней мантии. Для района исследований это периоды 36 и 625 секунд.

3. Для установления факта экранирования, степени экранирования и оценки параметров экрана необходимо выполнить сопоставление наблюдаемых продольных для структур осадочного чехла и фундамента, кривых МТЗ, со среднехарактеристическими кривыми, совмещенными с модельными и кривой глобального зондирования.

4. Выполнить оценку разрешающей способности метода при выделении литосферных проводящих неоднородностей. Порог чувствительности метода для двумерных проводящих неоднородностей типа прямоугольной вставки, составляет  $2L/H=2$ , где  $L$  - полуширина вставки,  $H$  - глубина залегания верхней кромки [9]. Неоднородности, залегающие на глубине  $H$  и имеющие ширину  $0,2 H$  уже не влияют на магнитотеллурическое поле.

5. Выполнить оценку разрешающей способности метода при определении параметров проводящих неоднородностей (глубины залегания и проводимости). Для этого целесообразно проведение математического моделирования (решение прямой задачи), а также восстановления магнитотеллурического поля по типперам.

### Результаты исследований

Геоэлектрическая модель Малоботуобинского района характеризуется тремя типами разреза

земной коры (рис. 2). В восточной части профиля, в пределах Анабаро-Мирнинской коллизионной зоны, разрез - низкоомный, сопротивление составляет десятки - сотни Ом·м. Более неоднородным строением обладает верхняя часть кристаллической коры, на общем фоне выделяются участки относительно пониженного и повышенного сопротивления. С глубины 30 км разрез по данным двумерной инверсии становится более проводящим и однородным. Об изменении земной коры также свидетельствуют резкие колебания уровня магнитного поля на (до 500 нТл) и уменьшение гравитационного поля на 30 мГал. Характер поведения геофизических полей указывают на изменение физических свойств пород земной коры, вероятно, связанное с её деструкцией.

В западной части профиля, на территории Магано-Виллюйского террейна, с глубины 2-3 км разрез - высокоомный. Сопротивление составляет сотни Ом·м по 1D-инверсии и до 10000 Ом·м по результатам моделирования с использованием 2D-инверсии. Верхняя кора, от фундамента до глубины 5 км, обладает горизонтально-однородным строением с сопротивлением пород 1000-2000 Ом·м. С глубиной сопротивление повышается, достигая максимума (7000-10000 Ом·м) на уровне 7-30 км. В центральной части профиля блок высоких сопротивлений достигает границы Мохоровичича. В западной части - нижняя кора является более проводящей.

На фоне высокоомного разреза коры Магано-Виллюйского террейна, на отметках профиля 28 (33-43 км) и профиля 32 (18-28 км) выделяется сквозная проводящая зона шириной около 10 км, распространяющаяся почти от поверхности фундамента до границы Мохоро (рис. 1, 2). Сопротивление в пределах зоны понижено до 100-200 Ом·м. Максимальное уменьшение сопротивления отмечается на глубинах от 20 до 50 км. В осадочном чехле, в пределах этой зоны, на её восточном фланге располагается Западный разлом, в зоне влияния которого находится большая часть кимберлитовых тел Мирнинского поля. Остальные разломы Виллюйско-Мархинской системы (Центральный, Параллельный, Восточный) в проекции профиля пространственно совпадают с высокоомным разрезом коры. При сопоставлении результатов интерпретации МТ-поля с данными обработки глубинных сейсмических исследований МОВ-ОГТ, отмечается совпадение электрических и сейсмических неоднородностей в строении разреза консолидированной коры. В районе кимберлитового поля кровля области, насыщенной субгоризонтальными отражающими площадками поднимается от низов коры (35-45 км) до глубины 10 км [11]. Наклонные отражающие площадки образуют аномальную субвертикальную неоднородность типа "яркого пятна", характеризующуюся поглощением энергии и обусловленную, с большой степенью вероятности, повышенной трещиноватостью всего разреза земной коры. Этот же участок разреза обладает пониженным сопротивлением. По результатам одномерной интерпретации в 20 км на запад от проводящей зоны

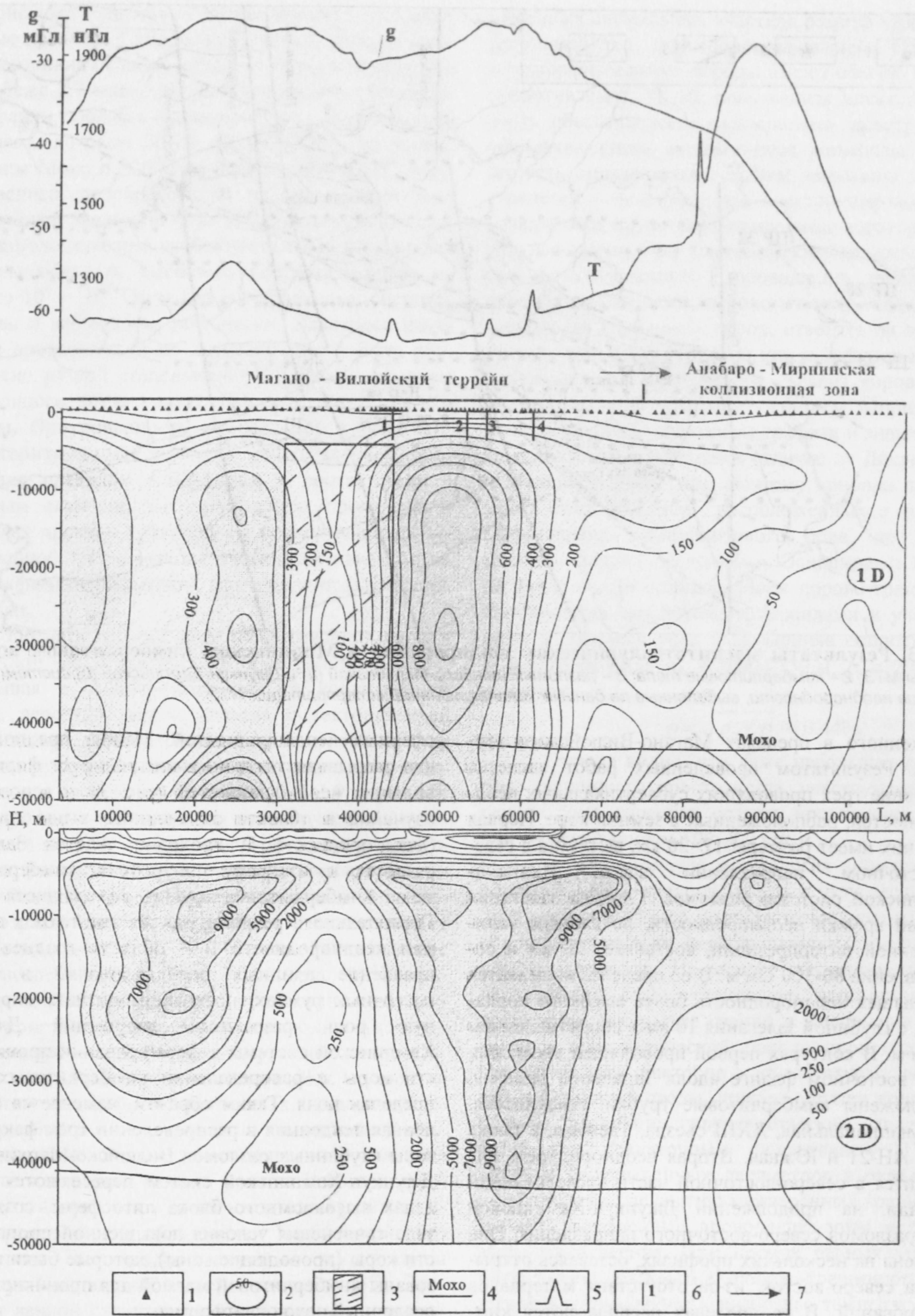


Рис. 2. Геоэлектрические разрезы по результатам 1D и 2D – инверсий продольных кривых на профиле 28: 1 – пункты МТ-зондирований; 2 – изолинии сопротивлений; 3 – зона расслоенности земной коры по данным ОГТ; 4 – граница Моховичича по данным ГСЗ; 5 – графики магнитного (Т), гравитационного (g) полей (из гравитационного поля убрано влияние осадочного чехла платформы); 6 – разломы Вилюйско-Мархинской системы: 1-Западный, 2 - Параллельный, 3 - Центральный; 4-Восточный; 7 – направление увеличения теплового потока в сторону Вилюйской синеклизы

выделяется еще один участок пониженного сопротивления, который не находит отражение в результатах двумерного моделирования.

Площадные магнитотеллурические зондирования представлены на рис. 3 и ограничиваются размерами Мирнинского кимберлитового поля, рас-

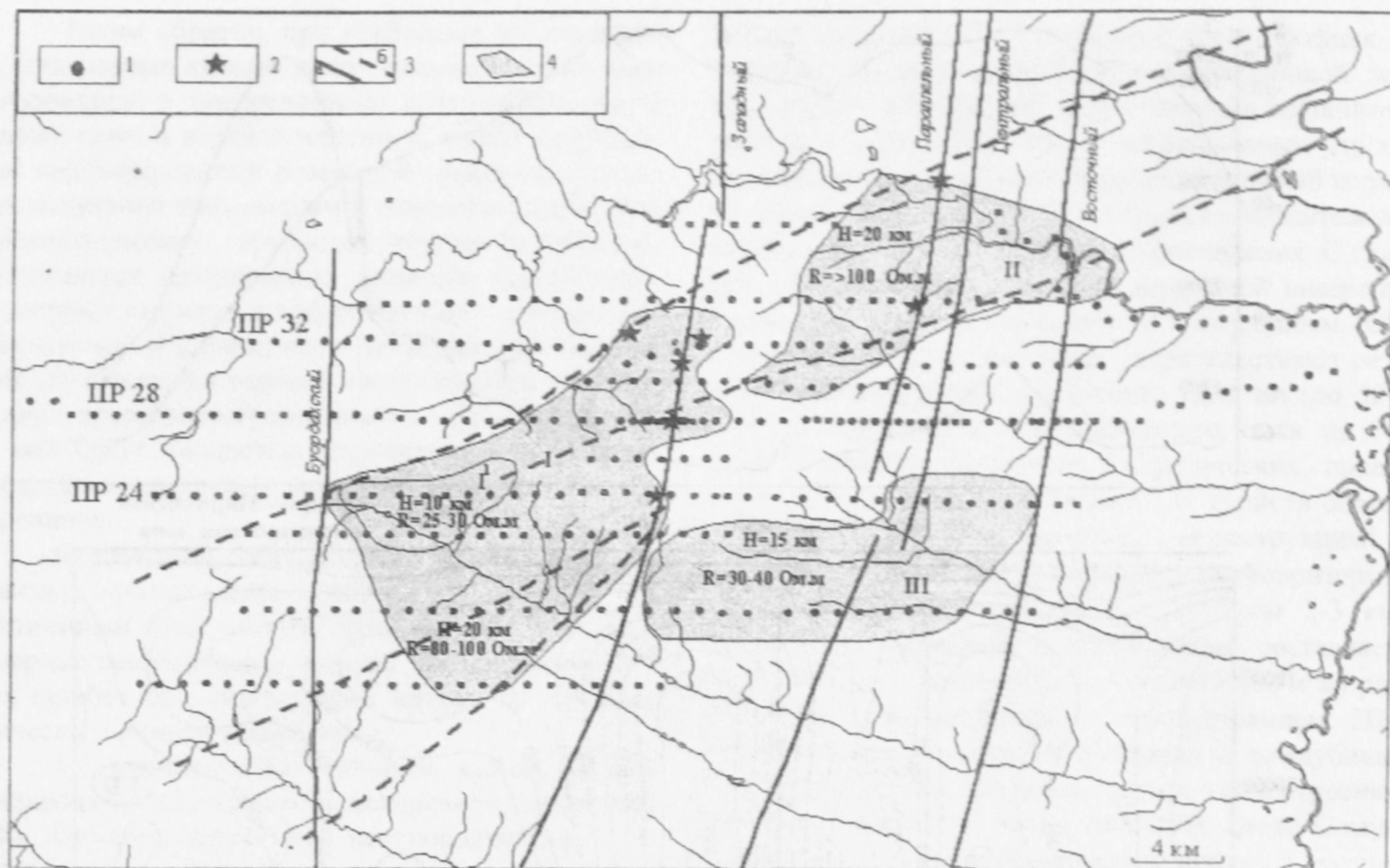


Рис. 3. Результаты магнитотеллурических зондирований в Мирнинском кимберлитовом поле: 1 – пункты МТЗ; 2 – кимберлитовые тела; 3 – разломы Вилуйско-Мархинской (а) и Джункун-Хампинской (б) систем; 4 – проводящие неоднородности, выделенные по данным количественной интерпретации МТЗ

положенного в пределах Магано-Вилуйского террейна. Результатом проведенных работ является выделение трех проводящих субвертикальных неоднородностей, расположенных в земной коре. Первая (I) из них имеет размеры  $12 \times 20$  км, вытянута в северо-восточном направлении вдоль Джункун-Хампинской системы разломов. Глубина залегания верхней кромки неоднородности, по данным количественной интерпретации, составляет 20 км и сопротивление  $80-100$  Ом·м. В ее пределах выделяется проводящая неоднородность более высокого порядка - I<sup>1</sup>, с глубиной залегания 10 км и сопротивлением 30 Ом·м. В контурах первой проводящей аномалии, на ее восточном фланге вдоль Западного разлома, расположены кимберлитовые трубки: Амакинская, Интернациональная, XXIII съезда, Таежная, а также жилы АН-21 и Южная. Вторая неоднородность (II) находится в северо-восточной части исследованной площади, на продолжении Джункун-Хампинской зоны разломов северо-восточного направления. Она отмечена на нескольких профилях, оставаясь открытой на северо-восток, из-за отсутствия материалов зондирований. В ее пределах располагаются кимберлитовые трубки Мир и Дачная. Геоэлектрические параметры второй проводящей неоднородности соизмеримы с параметрами первой (глубина залегания 20 км, сопротивление  $>100$  Ом·м). Третья неоднородность (III) выделяется на юге площади по ограниченному числу зондирований. Глубина ее залегания 15 км, сопротивление  $30-40$  Ом·м. Кимберлитовые трубки Мирнинского поля тяготеют к градиентным зонам, расположенным на сочленении высокоомного блока земной коры и проводящих лито-

сферных неоднородностей. Можно предположить, что разрывная тектоника контролирует форму проводящих неоднородностей (рис. 3) и, вероятно, не случайно в области отмеченного выше градиента (неоднородность I) проходит участок Западного разлома, к которому приурочены кимберлитовые тела. Кимберлитовые трубки, находящиеся в зоне Параллельного разлома, так же тяготеют к периферии неоднородности II – области градиента. Направление длинных осей аномалий в северо-восточных румбах, позволяет признать определенную роль разрывных нарушений Джункун-Хампинской системы в формировании проницаемости коры и распределении кимберлитовых тел в пределах поля. Таким образом, намечается определенная тенденция в распределении трёх факторов – зоны глубинных разломов Вилуйско-Мархинской и Джункун-Хампинской систем пересекаются в пределах высокоомного блока литосферы, создавая в узле сочленения условия повышенной проницаемости коры (проводящие зоны), которые были использованы кимберлитовой магмой для проникновения в осадочный чехол платформы.

### Обсуждение результатов

По результатам магнитотеллурических зондирований в Малоботубинском районе выявлены три типа геоэлектрических разрезов: высокоомные блоки, приуроченные к ним проводящие зоны и участки с пониженным электрическим сопротивлением. Не вызывает противоречий высокое сопротивление земной коры области относящейся к Магано-



Виллюйскому террейну. Террейн является составной частью древнего Сибирского кратона, породы которого возникли около 3 млрд. лет назад и претерпели на рубеже 2,7 млрд. лет метаморфизм в гранулитовой фации. Область характеризуется очень низким тепловым потоком 20-25 мВт/м<sup>2</sup> (300°С на уровне границы Мохо и 200°С на глубине 20 км)[12] и существенных преобразований на протяжении всей дальнейшей эволюции кора не испытывала. По своим петрологическим особенностям данные породы должны обладать высокими сопротивлениями на уровне 10<sup>6</sup> – 10<sup>9</sup> Ом·м (по минеральному составу), что мы и наблюдаем фактически. Некоторое изменение проводимости по латерали может быть обусловлено разной степенью метаморфизма, уровнем эрозионного среза кристаллических пород, их составом. Приуроченность кимберлитов к областям, характеризующимся высоким сопротивлением, объясняется правилом Клиффорда, в соответствии с которым алмазоносные кимберлиты проявлены в пределах древних кратонов, не подвергавшихся существенной тектоно-магматической активизации на протяжении последующих докимберлитовых этапов развития.

Область пониженного сопротивления коры в восточной части профиля 28 пространственно совпадающая с Анабаро-Мирнинской коллизионной зоной, вероятнее всего, связана с тектонической активизацией. Формирование коллизионных зон произошло при столкновении и аккреции микроконтинентов в протерозое на рубеже 1,7–1,9 млрд. лет. Этот процесс сопровождался тектоническим скупиванием и ретроградным метаморфизмом с поступлением флюидов. Изменение состава коры в коллизионной зоне повторный метаморфизм и омоложение возраста неизбежно приводит к изменению её физических свойств [13,14], что находит отражение в наблюдаемых физических полях (рис. 2). Уменьшается сопротивление коры, происходит разуплотнение кристаллических пород, слагающих Анабаро-Мирнинскую коллизионную зону, о чем свидетельствует остаточное гравитационное поле со снятым эффектом от платформенного чехла, отдельные блоки приобретают повышенную намагниченность. Определенный вклад в уменьшение сопротивления и плотности пород данного участка внесла и среднепалеозойская тектоно-магматическая активизация, проявленная в образовании Палеовиллюйского авлакогена на северо-восточном продолжении Джункун-Хампинской системы разломов [15]. Эволюция данной структуры сопровождалась увеличением теплового потока, которое сохраняется до настоящего времени (в Виллюйской синеклизе он повышается до 50 мВт/м<sup>2</sup>) и деструкцией земной коры.

Три, выявленные в пределах Мирнинского кимберлитового поля, проводящие неоднородности имеют примерно одинаковую глубину залегания верхних кромок – 20, 20 и 15 км соответственно. Сопротивления их так же имеют один порядок величин, до 250 Ом·м. Природа проводимости обна-

руженных аномальных участков разреза может быть флюидной или электропроводящей. Поскольку метаморфизованные породы имеют обычно высокое сопротивление, то их повышенная электропроводность обеспечивается межзерновым пространством обволакивающим высокоомные минералы. Проводимость определяется тем чем заполнено это пространство – флюидом или электропроводящими минералами, представленными чаще всего графитом и сульфидами. При изучении кимберлитовых трубок, локализованных в проводящих зонах, когда проводятся массовые петрологические исследования ксенолитов глубинных пород, ответить на вопрос о присутствии в коре графита или сульфидов можно с большой долей уверенности. Анализ коровых ксенолитов из кимберлитовых диатрем Мирнинского поля, показывает отсутствие графита и значительного количества сульфидов в отличие от Далдынского и Мунского полей [16]. Поэтому природа проводимости трех аномалий, расположенных в пределах Мирнинского кимберлитового поля, по нашему мнению, связана с флюидами. Основываясь на законе Арчи можно оценить объем порово-трещинного пространства заполненного флюидами и участвующего в переносе тока [13]. Приняв сопротивление порового флюида  $\rho_{\phi} = 0,004$  Ом·м,  $\rho = 200$  Ом·м получим:

$$p = \sqrt{\rho_{\phi} / \rho} = 0,44\%.$$

Отсюда видно, что даже небольшая доля порово-трещинного пространства, участвующая в переносе тока, способна создать проводящие аномалии сопротивлением 100-200 Ом·м.

Субвертикальная морфология аномалий проводимости и их приуроченность к узлу пересечения двух систем разломов позволяют предположить, что основную роль в их формировании играли тектонические процессы. На основе экспериментальных исследований было установлено, что межзерновая деструкция, раскрытие границ и увеличение пористости в кристаллической породе происходит при сочетании трёх факторов – температуры, напряжения и флюидной среды, причем образец должен находиться под общим гидростатическим давлением и одноосным девиаторным напряжением [17]. Ни один из перечисленных параметров в отдельности не приводит к раскрытию межзеренных границ. Рассмотрим выявленные проводящие зоны исходя из этой точки зрения. При прочих равных условиях интенсивное раскрытие порово-трещинного пространства происходит в интервале температур 100-200°С. В данном районе такие температуры прогнозируются на глубинах 15-30 км, что соответствует уровню наблюдаемых аномалий. Девиаторные напряжения, очевидно, создавались на локальных участках в результате сдвиговых деформаций при образовании или активизации Виллюйско-Мархинской и Джункун-Хампинской систем разломов. Синхронно с разломообразованием шло поступление флюидов в процессе базитового магматизма, проявившегося в образовании туфовых трубок взрыва, даек и смлов.

Эти процессы, вероятно, и привели к возникновению локальных проводящих зон, контролируемых узлами пересечения разломов. Время их образования можно предполагать как среднепалеозойское, синхронное развитию Палеовиллюйского авлакогена. Определенный вклад в возникновение субвертикальных зон повышенной проводимости, контролирующих размещение кимберлитов, также могло внести продвижение этих магм через земную кору. При движении магматической колонны происходит разогрев вмещающих пород до 500-700<sup>0</sup>С [18]. Проницаемость горных пород при этом возрастает в тысячи раз, на несколько процентов увеличивается эффективная пористость. Это явление связывается с возникновением межзеренных промежутков, в результате неодинакового теплового расширения соседних зерен, отличающихся составом или кристаллографической ориентировкой. Процесс резко усиливается в присутствии воды, так как сопровождается флюидизацией межкристалльных пространств, дислокаций и вакансий самих кристаллов. Возникает связанная система каналов, обеспечивающая возможность переноса флюидов, в которой формируется тонкая флюидная пленка, обволакивающая зерна высокоомных минералов. Возникает ионная электропроводящая система, которая сохраняется после остывания пород. Все эти условия являются необходимыми для продвижения кимберлитовых магм с больших глубин к земной поверхности и накладываются на различные структурно-вещественные комплексы, входящие в состав кристаллической коры.

Активизация Сибирской платформы в среднепалеозойское время проявилась в виде базитового и кимберлитового магматизма. Именно в эти кратковременные периоды разломы Виллюйско-Мархинской и Джункун-Хампинской систем могли достигать границы Мохо на участках с жесткой, плотной и высокоомной корой, обеспечивая пути внедрения кимберлитовых расплавов в осадочный чехол платформы. Флюидная составляющая осталась в коре, контролируя магмоводы. В последующие периоды порово-трещинное пространство постепенно деградировало за счёт закрытия пор новообразованными минералами. В настоящий момент мы наблюдаем «реликты» флюидной системы, на что указывает небольшой коэффициент порово-трещинного пространства участвующего в переносе тока (0,4), контроль границ проводящих аномалий разрывными нарушениями, низкое сопротивление в пределах проводящих аномалий, на уровне 20 км, где есть Р-Т условия для сохранения открытой пористости.

### Заключение

Проведенные магнитотеллурические зондирования с аппаратурой нового поколения в южной части Якутской кимберлитовой провинции подтвердили ранее высказываемые предположения о пространственной неоднородности земной коры. Выде-

лены три разновидности коровых аномалий электропроводности. Консолидированная кора древних кратонов обладает высоким сопротивлением и повышенной плотностью. В ее пределах зафиксированы относительно локализованные участки, характеризующиеся повышенной проводимостью, сейсмической расслоенностью и разуплотнением. Области протерозойской коллизии отличаются от стабильных архейских блоков общим понижением сопротивления пород литосферы. Мирнинское кимберлитовое поле находится в узле сочленения двух систем разломов - Виллюйско-Мархинской и Джункун-Хампинской и, по данным геоэлектрики, характеризуется субвертикальными аномалиями проводимости земной коры, в пределах которых отмечены проявления кимберлитового магматизма. Пространственно кимберлитовые тела района тяготеют к разломам Виллюйско-Мархинской системы, проходящим по участкам соприкосновения высокоомных блоков коры с аномальными зонами проводимости, находясь внутри последних. Имеющиеся материалы позволяют предполагать, что такое поведение проводящих участков коры связано с ее высокой проницаемостью, которую использовали кимберлитовые магмы для внедрения в осадочный чехол платформы.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Алакшин А.А., Лысак С.В., Письменный Б.М., Поспеев А.В., Поспеева Е.В. Глубинное строение и геодинамика Саяно-Байкальской горной области и сопредельных районов Восточной Сибири // Глубинное строение территории СССР. - М., 1991. - С.72-88.
2. Горев Н.И. Тектоническое районирование Сибирской платформы при прогнозировании коренных источников алмазов // Проблемы алмазной геологии и некоторые пути их решения. - Воронеж, 2001. - С. 462-481.
3. Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия). - М., 2001. - 571с.
4. Розен О.М., Серенко В.П., Специус З.В. и др. Якутская кимберлитовая провинция: положение в структуре Сибирского кратона, особенности состава верхней и нижней коры // Геология и геофизика. - 2002. - Т. 43, № 1. - С. 3-26.
5. Розен О.М., Журавлев Д.З., Суханов М.К. и др. Изотопно-геохимические и возрастные неоднородности раннепротерозойских террейнов, коллизионных зон и связанных с ними анортозитов на северо-востоке Сибирского кратона // Геология и геофизика. - 2000. - Т.41, № 2. - С. 163-179.
6. Брахфогель Ф.Ф., Зайцев А.И., Шамшина Э.А. Возраст кимберлитов - основа прогнозирования алмазоносности территорий // Отечественная геология. - 1997. - №9. - С. 31-37.
7. Харьков А.Д., Зинчук Н.Н., Крючков А.И. Коренные месторождения алмазов мира. - М., - 1998. - 555 с.
8. Горев Н.И., Манаков А.В., Эринчек Ю.М. и др. Отражение Мирнинского кимберлитового поля в структуре осадочного чехла // Докл. АН. - 1988. - Т. 303, № 3. - С.685-689.
9. Бердичевский М.Н., Жданов М.С. Интерпретация аномалий переменного электромагнитного поля Земли. - М., 1981. - 327с.

10. Михалевский В.И. Электрическая разведка методом теллурических токов в Восточной Сибири. - М., 1987. - 205 с.
11. Суворов В.Д. Глубинные сейсмические исследования в Якутской кимберлитовой провинции. - Новосибирск, - 1993. - 136 с.
12. Дучков А.Д., Соколова Л.С. термальна структура литосферы Сибирской платформы // Геология и геофизика. - 1997. - Т. 38, № 2. - С. 494 - 503.
13. Ваньян Л.Л., Хайндман Р.Д. О природе электропроводности земной коры // Физика земли. - 1996. - № 4. - С. 5-11.
14. Киссин И.Г. Флюидонасыщенность земной коры, электропроводность, сейсмичность // Физика Земли. - 1996. - № 4. - С. 30-40.
15. Дукардт Ю.А., Борис Е.И. Контроль кимберлитового вулканизма Якутской алмазоносной провинции палеорифтовыми структурами // Отечественная геология. - 1996. - № 10. - С. 28-34.
16. Специус З.В., Серенко В.П. Состав континентальной верхней мантии и низов коры под Сибирской платформой. - М., 1990. - 272 с.
17. Абдрахимов М.З., Кузнецов Ю.И., Зонн М.С. Структура порового пространства глубоких образований земной коры (по данным Кольской сверхглубокой скважины) // Физика земли. - 1996. - № 5. - С. 35-45.
18. Зарайский Г.П., Балашов В.Н. О разуплотнении горных пород при нагревании // Докл. АН СССР. - 1978. - Т. 240. - №4. - С. 926-929.

УДК 550.837.75

## ПЕТРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД И ВОПРОСЫ ЭКОЛОГИИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ПРИ ПРОГНОЗНЫХ ПОИСКАХ КИМБЕРЛИТОВЫХ ТЕЛ

А.Т.Бондаренко, М.Н.Зинчук

*АК «АЛРОСА», Якутское научно-исследовательское геологоразведочное предприятие ЦНИГРИ, г.Мирный, Республика Саха (Якутия)*

Приведены результаты измерений петроэлектрических, плотностных параметров и скоростей продольных волн терригенно-карбонатных осадочных пород в пространстве кимберлитовой трубки Амакинская Мирнинского поля Западной Якутии и показана их связь с экологией окружающей среды. Выявленные в околотрубочном пространстве аномальные значения коэффициентов анизотропии электрического сопротивления и их инверсионные свойства могут быть использованы в качестве дополнительных критериев при поисковых работах на алмазы.

Повышение эффективности поисковых работ геолого-геофизическими методами на опоскованных площадях в пределах действующих горнодобывающих предприятий на территории Малоботубинского алмазоносного района Якутии по обнаружению новых коренных месторождений алмазов является весьма актуальным. В связи с этим возникает необходимость искать дополнительные поисковые индикационные критерии на базе изучения петрофизических параметров вмещающих карбонатных сред и их изменение в пространстве кимберлитовых трубок взрыва и разломных структурах. В настоящее время накоплен значительный материал и опубликован в ряде работ, в которых отмечена значимая роль вещественно-индикационных параметров пород диатрем и вмещающих их сред при интерпретации результатов геофизических методов и решении некоторых вопросов, связанных с экологией окружающей природной среды. [1-7]. Так, в частности, в комплексе работ по межскважинному радиоволновому просвечиванию при интерпретации полевых материалов с учетом петроэлектрических экспрессных измерений на мерзлом керне, на опоскованных бурением безореольных площадях в Далдыно-Алакитском районе в 1990 г. были откры-

ты глубоко погребенные четыре кимберлитовые трубки [3].

Необходимо отметить, в Мирнинском кимберлитовом поле имеется определенное количество выявленных, мало контрастных, незавершенных и слабоизученных прогнозируемых аномалий. Намеченные объекты часто являются нетипичными, индивидуальными, характеризующиеся невыраженными традиционными геофизическими индикационными параметрами. Такие перспективные изометрические структуры ранее нами были выделены на многофакторном образе по аномально-распределенным петрофизическим параметрам на поисковых участках Новый (расположенного в зоне регионального Восточного разлома Мирнинского поля) и Перевальный, приуроченного к Далдыно-Оленекской разломной кимберлитоконтролирующей зоне [3, 8].

Кимберлитовая трубка Амакинская перекрыта мерзлыми песчано-глинистыми и песчано-галечными юрскими отложениями мощностью до 6 м, значения удельного электрического сопротивления ( $\rho$ ) для которых находятся в основном в пределах 80-200 Ом.м; слабглинистые («отмытые») юрские светлые пески имеют высокие значения  $\rho$ , достигающие 600-800 Ом.м, их плотность составляет