

МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИЕ ЗОНДИРОВАНИЯ ПРИ АЛМАЗОПОИСКОВЫХ РАБОТАХ



**Сергей Филимонович
Бессмертный,**

кандидат геолого-минералогических наук, заведующий отделом опытно-методических геолого-геофизических исследований Научно-исследовательского геологоразведочного предприятия АК «АЛРОСА».



Роман Алексеевич Шишмарёв,
заместитель заведующего лабораторией геофизических исследований Научно-исследовательского геологоразведочного предприятия АК «АЛРОСА».



Анна Андреевна Переведенцева,
ведущий инженер-геофизик Научно-исследовательского геологоразведочного предприятия АК «АЛРОСА».

**С. Ф. Бессмертный, Р. А. Шишмарёв,
А. А. Переведенцева**

Изучение особенностей строения земной коры в районах продуктивных (алмазоносных) кимберлитовых полей для определения глубинных прогнозных признаков этих объектов с целью последующей локализации площадей, перспективных на обнаружение новых проявлений кимберлитового магматизма на территории Сибирской платформы, является актуальной проблемой геолого-поискового комплекса АК «АЛРОСА». Геофизические методы (грави- и магнитометрия, сейсморазведка и электроразведка) в геологической отрасли относятся к технологиям, обеспечивающим изучение земных недр посредством регистрации физических полей на поверхности Земли. В результате последующей интерпретации наблюдаемых физических величин появляется возможность получить информацию о строении глубинных структурно-вещественных комплексов кристаллической коры, недоступных геологам для непосредственного исследования.

В Якутской алмазоносной провинции (ЯАП) консолидированная земная кора мощностью 34 – 58 км в основном перекрыта горизонтально слоистыми образованиями осадочного чехла мощностью 2 км и более. Кимберлитопроявления ранга трубка, куст сближенных тел, кимберлитовое поле выделяются в горизонтально-слоистой структуре платформенного чехла как неоднородные (гетерогенные) объекты. По современным представлениям, кимберлитовая магма формировалась в верхней мантии и более глубоких слоях планеты. Её проникновение через консолидированную кору от границы Мохоровичича (кровля мантии) к подошве образований платформенного чехла должно происходить по ослабленным (проницаемым) зонам. Проницаемые зоны консолидированной коры, как и кимберлитопроявления в образова-

ниях платформенного чехла, являются аномальными объектами.

В процессе поиска алмазных месторождений в ЯАП проведены региональные комплексные геофизические наблюдения методами глубинного сейсмического и магнитотеллурического зондирования, гравиметрические съёмки, направленные на выделение гетерогенных зон в земной коре. При интерпретации материалов этих исследований установлено, что для алмазоносных кимберлитовых полей Якутии характерна неоднородность консолидированной коры. Аномальные свойства подобных областей в геофизических полях проявлены низкоградиентными локальными магнитными и гравитационными минимумами амплитудой 20 – 80 нТл и 1 – 3 мГл соответственно, наличием многочисленных разноориентированных осей синфазности волнового поля и субвертикальными проводящими зонами на фоне пород с высоким электрическим сопротивлением. По данным физико-геологического моделирования на участках проявления кимберлитов земная кора преобразована в процессе эволюции кимберлитовых магм на этапе среднепалеозойской тектоно-магматической активизации. Вероятно, под воздействием флюидно-магматической системы с повышенными температурами и давлениями формировались гетерогенные субвертикальные зоны, характеризующиеся неравномерным распределением вещества и, как следствие, вариациями физических свойств слагающих их породных ассоциаций. Такие структуры отличаются аномальными петрофизическими характеристиками и обнаруживаются в геофизических полях. Однако вследствие мелкого масштаба сети наблюдений и низкой разрешающей способности региональных исследований, при интерпретации, как правило, не удаётся достаточно

надёжно восстановить особенности строения аномальных транскоровых зон.

Более точную информацию об этом может дать моделирование геоэлектрических свойств разреза консолидированной коры на основе материалов среднemasштабных профильных и площадных магнитотеллурических зондирования. Этот метод является наиболее дешёвым, мобильным и экологически безопасным. Для него достаточно полно, по сравнению с другими методами на переменном токе, разработано теоретическое обоснование. Метод основан на измерении электромагнитного поля, индуцируемого в Земле ионосферными и магнитосферными переменными токами, возникающими при воздействии солнечного ветра и околоземной плазмы с магнитосферой Земли. Естественное переменное электромагнитное поле Земли получило название магнитотеллурического. Оно состоит из геомагнитной и электрической (теллурической) компонент. Возможность использования этого поля для зондирования Земли и оценки геоэлектрического разреза литосферы, вплоть до мантийного проводника – астеносферы (ослабленного и подплавленного слоя пород верхней мантии), предложена в 1950 г. академиком А. Н. Тихоновым [1]. Им было показано, что для горизонтально-слоистого (одномерного) геологического разреза соотношения между горизонтальными компонентами электрического и магнитного полей в одной точке определяют волновое сопротивление (входное сопротивление) Земли – импеданс. Импеданс, как волновое сопротивление, зависит от глубины проникновения поля (частоты поля или длины волны и геоэлектрической характеристики исследуемого разреза). По измеренному на земной поверхности входному импедансу вычисляются удельные сопротивления однородного полупространства.

В 2002 г. Якутским научно-исследовательским геологическим предприятием (в настоящее время – НИГП АК «АЛРОСА») начато среднemasштабное магнитотеллурическое зондирование. Целевым назначением исследований являлось изучение особенностей глубинного геоэлектрического разреза алмазоносных кимберлитовых полей, а также прогноз и выявление промежуточных поисковых объектов в ранге кимберлитового поля и куста кимберлитовых тел на лицензионных площадях геологоразведочных экспедиций АК «АЛРОСА». Результаты региональных работ, проведённых на территории Якутской алмазоносной провинции различными организациями [2], показали, что районы кимберлитового магматизма пространственно приурочены к высокоомным блокам земной коры (рис. 1). Высоким сопротивлением обычно обладают области, относящиеся к древним стабильным блокам. С другой стороны, при-

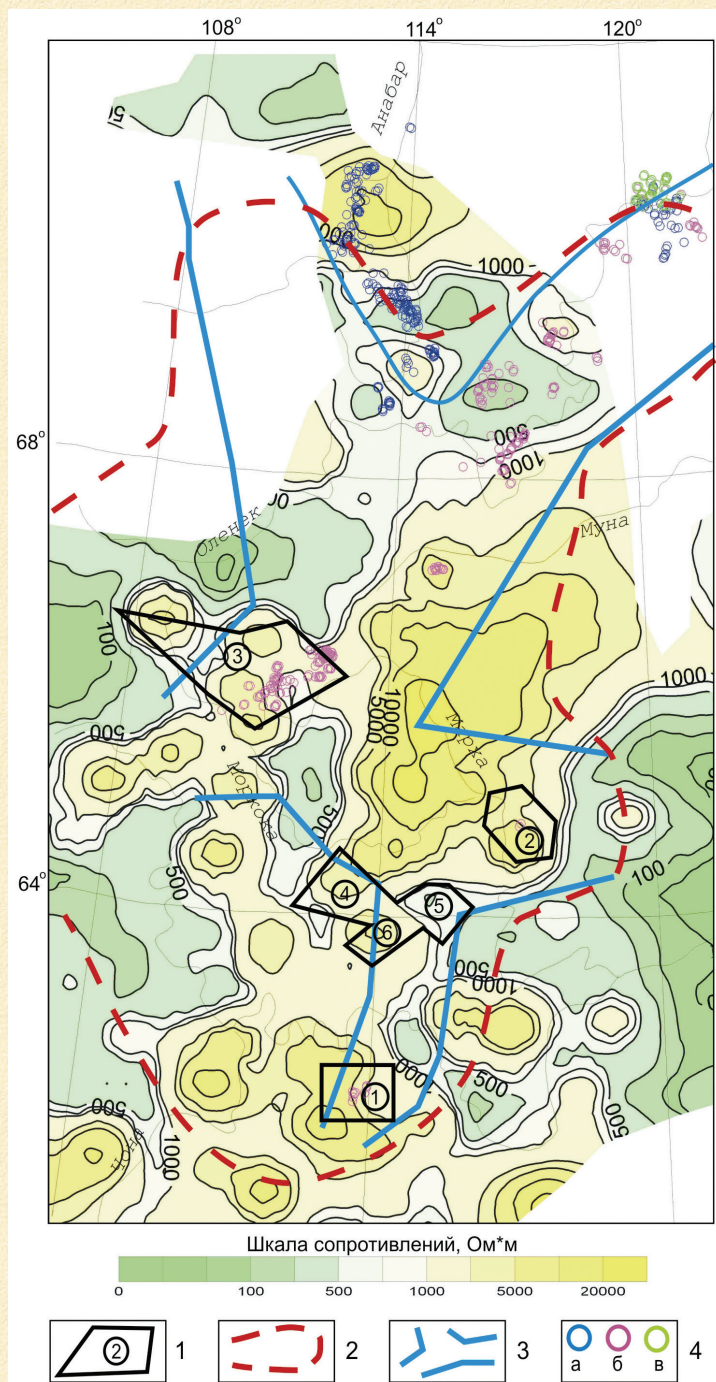


Рис. 1. Карта распределения сопротивлений пород земной коры Якутской алмазоносной провинции на глубине 20 км, по данным региональных работ магнитотеллурических зондирований (МТЗ) [2]: 1 – контур площадей среднemasштабных работ МТЗ: 1 – Мало-Ботуобинский район, 2 – Среднемархинский район, 3 – Далдыно-Алаkitский район, 4 – Олгуйдахский участок (АМГРЭ), 5 – Правобережный участок (БГРЭ), 6 – Хампинский участок (БГРЭ); 2 – границы литосферного корня [3]; 3 – область максимальной мощности литосферы [2]; 4 – кимберлитовые трубки: а – мезозойские, б – палеозойские, в – неуставленного возраста.

уроченность проявлений алмазоносных кимберлитов к древним кратонам, не подвергавшимся существенной тектоно-магматической активизации на протяжении последующих докимберлитовых этапов развития, объясняется известным «правилом Клиффорда». Области древней кратонизации сложены породами земной коры, сформировавшимися около 3 млрд лет назад и претерпевшими на рубеже 2,7 млрд лет метаморфизм в гранулитовой фации [4]. В дальнейшем на протяжении последующей эволюции земная кора таких областей существенных преобразований не испытывала. В настоящее время она характеризуется низким тепловым потоком 20 – 25 мВт/м² (300° С на уровне границы Мохоровичича и 200° С – на глубине 20 км), низкой проводимостью пород, её слагающих. Критерием прогнозирования кимберлитовых проявлений служит наличие проводящей субвертикальной неоднородности под кимберлитовыми полями на фоне высокоомного разреза, характеризующего древний стабильный блок.

Для регистрации компонент магнитотеллурического поля в диапазоне периодов 0,003 – 5000 с (интервал исследований от первых десятков метров до 50 – 60 км) были приобретены современные электроразведочные станции MTU V5 System 2000 компании «Phoenix Geophysics Ltd» (Канада). Станции оснащены программным пакетом обработки первичных данных SSMT-2000. Аппаратура отличается стабильностью параметров, высокой точностью, современным уровнем автоматизации, надёжностью, низким энергопотреблением, широким климатическим диапазоном использования, простотой управления и обслуживания. Центральным узлом аппаратуры V5 System 2000 является приёмник MTU (MagnetoTelluric Unit), который выполняется в нескольких вариантах комплектации, каждый из которых имеет своё назначение. Прибор MTU-2E предназначен для осуществления регистрации горизонтальных электрических компонент поля (E_x, E_y). Прибор MTU-5 (рис. 2) фиксирует как электрические (E_x, E_y), так и магнитные компоненты (H_x, H_y, H_z). Использование указанных модулей в различных сочетаниях обеспечивает гибкость в

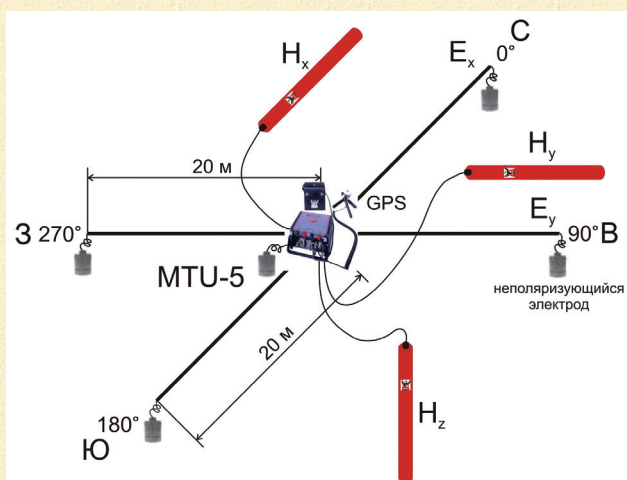


Рис. 2. Расстановка регистратора MTU-5 на точке зондирования.

выборе конфигурации измерителей для решения конкретных геологических задач. Синхронизация работы приёмников обеспечивается с помощью GPS. Базирующаяся на GPS спутниковая синхронизация позволяет проводить работы по схеме с удалённым базовым пунктом для подавления промышленных помех, создаваемых действующими предприятиями АК «АЛРОСА».

Учитывая то, что магнитное поле изменяется значительно медленнее, чем электрическое, методика проведения полевых работ заключается в синхронной регистрации магнитотеллурического поля несколькими станциями. Одна из них является базовой (MTU-5) и осуществляет регистрацию пяти компонент поля. Вокруг неё размещаются станции, которые фиксируют только две электрические компоненты поля (MTU-2E). Использование станций MTU-2E экономически выгодно, так как, во-первых, они в 1,5 раза ниже по стоимости, во-вторых, проще устанавливаются на местности. Для получения значения импеданса на точке наблюдений, где зондирование выполнено с использованием станции MTU-2E, при обработке данных, помимо вариаций электрического поля, используются вариации магнитного поля, зарегистрированные станцией MTU-5. Таким образом, можно получить кривые кажущегося удельного сопротивления в пунктах зондирования, выполненных регистраторами MTU-2E.

Методика регистрации MT-поля двух- и пятиканальными измерителями была успешно применена в Мало-Ботуобинском, Среднемархинском и Далдыно-Алакитском алмазоносных районах (см. рис. 1). По результатам этих работ установлено, что наиболее целесообразно базовую станцию располагать в центре, а двухканальные – по обе стороны от неё на расстоянии, не превышающем 2 км (рис. 3). Длительность наблюдений в пункте зондирования для получения компонент магнитотеллурического поля до глубин 40 – 50 км в среднем не превышает 24 часов. Оценка достоверности материалов зондирования осуществляется калибровкой MTU-аппаратуры, которая выполняется один раз в месяц при проведении полевых работ и повторными наблюдениями. Число последних регламентируется [5] и составляет 5% от общего числа зондирований.

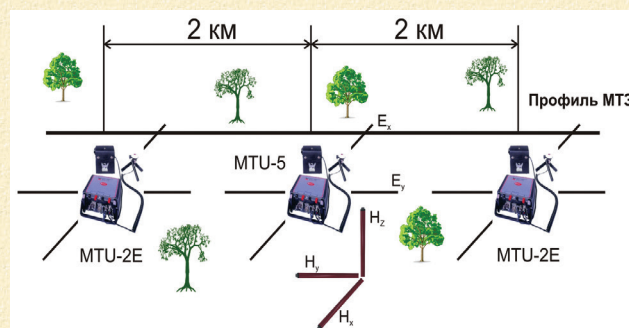


Рис. 3. Расположение регистраторов MTU-5 и MTU-2E на профиле наблюдений.

В 2002 – 2004 гг. на территории Мирнинского кимберлитового поля в опытно-производственном режиме реализовано площадное зондирование (см. рис. 1). Объем среднemasштабных зондирований составил 550 физических измерений. В результате этих наблюдений было изучено строение земной коры до глубин 40 – 50 км, исследована связь кимберлитового магматизма с особенностями геоэлектрического разреза. На рис. 4 представлена карта распределения геоэлектрических

от стабильных архейских блоков общим повышением проводимости пород в интервале земной коры, превышая по уровню сопротивлений проницаемые зоны.

Мирнинское кимберлитовое поле находится в узле сочленения двух систем разломов – Вилуйско-Мархинской и Укугутской и, по данным геоэлектрики, выделяется аномалиями проводимости (проницаемости) земной коры. Кимберлитовые тела района приурочены к разломам Вилуйско-Мархинской системы, проходящим

по участкам соприкосновения высокоомных блоков коры с аномальными зонами проводимости, и находятся внутри последних, что выходит из рассмотрения геоэлектрического разреза 1D-инверсии по профилю 28, пересекающему кимберлитовую жилу АН-21 (рис. 5).

Детальное магнитотеллурическое зондирование в площадном варианте выполнено в 2005 – 2009 гг. в Среднемархинском алмазосном районе (см. рис. 1). В блоке высокого сопротивления земной коры локализованы коровые проводящие неоднородности, которые отражают внутреннюю глубинно-тектоническую структуру кимберлитовых полей (рис. 6). Установлено, что их корневые части ухо-

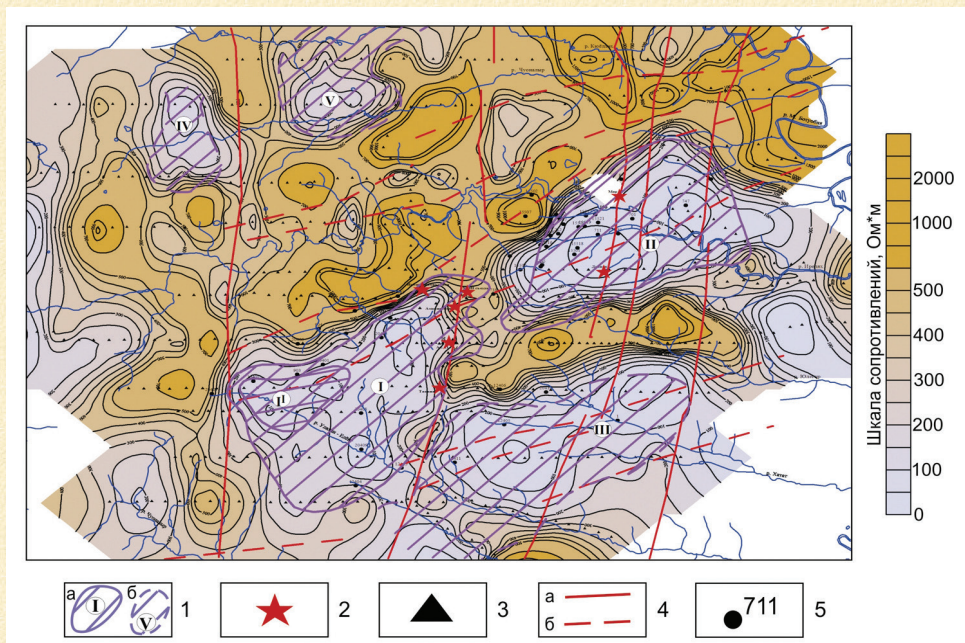


Рис. 4. Карта распределения сопротивлений пород земной коры Мало-Ботубинского района на глубине 25 км:

1 – проводящие неоднородности, по данным количественной интерпретации МТЗ: а – достоверные, б – предполагаемые; 2 – кимберлитовые тела; 3 – пункты МТЗ; 4 – системы разломов: а – Вилуйско-Мархинская, б – Укугутская; 5 – скважины глубокого бурения и их номера.

параметров земной коры Мало-Ботубинского алмазосного района на глубине 25 км. В плане на уровне 25 км установлены три разновидности коровых аномалий проводимости. Консолидированная кора древних стабильных блоков (коричневый цвет), отвечающая антеклизам, обладает высоким сопротивлением. В пределах областей высокого сопротивления зафиксированы участки повышенной проводимости (фиолетовый цвет), соответствующие зонам высокой проницаемости. Области протерозойской тектоно-магматической активизации (прогибы, впадины) отличаются

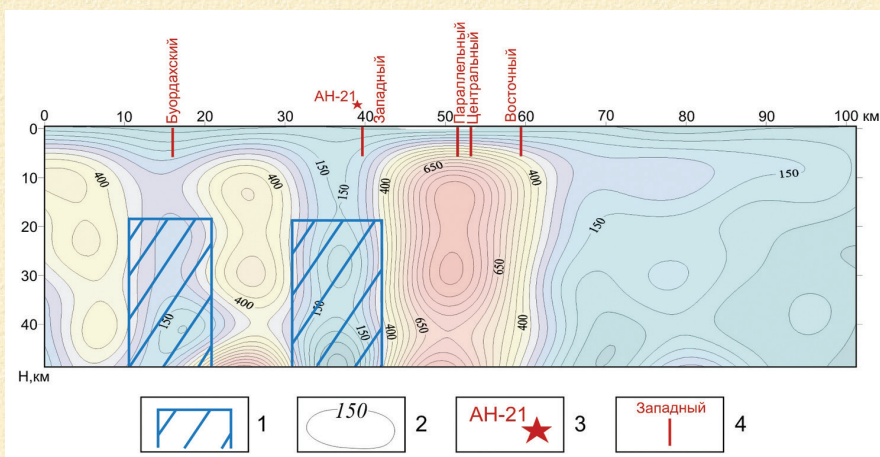


Рис. 5. Глубинный геоэлектрический разрез 1D-инверсии через Мирнинское кимберлитовое поле по профилю 28:

1 – проводящие неоднородности, по данным количественной интерпретации МТЗ; 2 – изолинии сопротивлений (Ом·м); 3 – кимберлитовые тела; 4 – разломы Вилуйско-Мархинской системы.

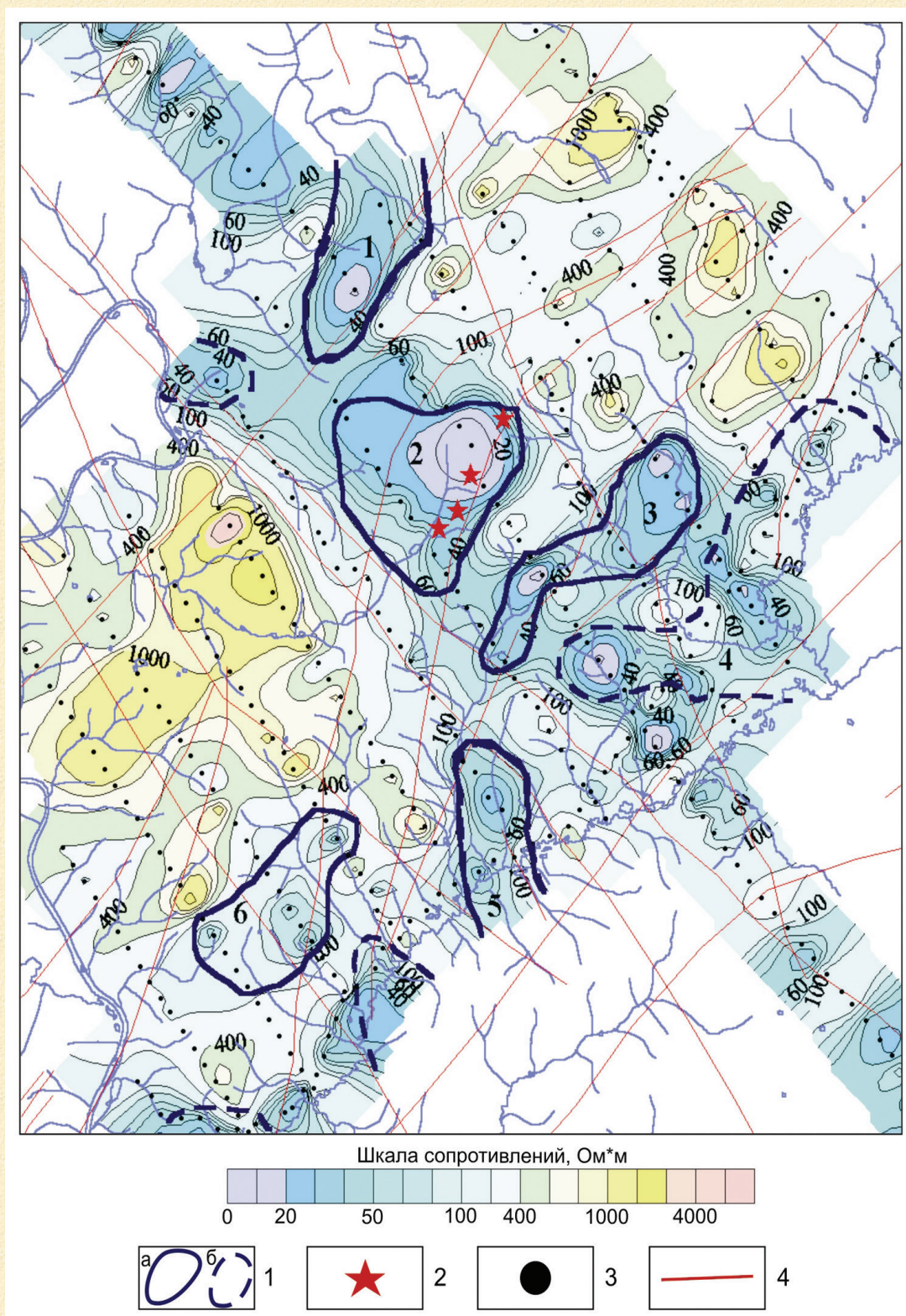


Рис. 6. Карта распределения сопротивлений пород земной коры Среднемархинского района на глубине 20 км:

1 – проводящие неоднородности, по данным количественной интерпретации МТЗ: а – достоверные, б – предполагаемые; 2 – кимберлитовые тела; 3 – пункты МТЗ; 4 – разрывные нарушения, по данным сейсморазведки МОГТ.

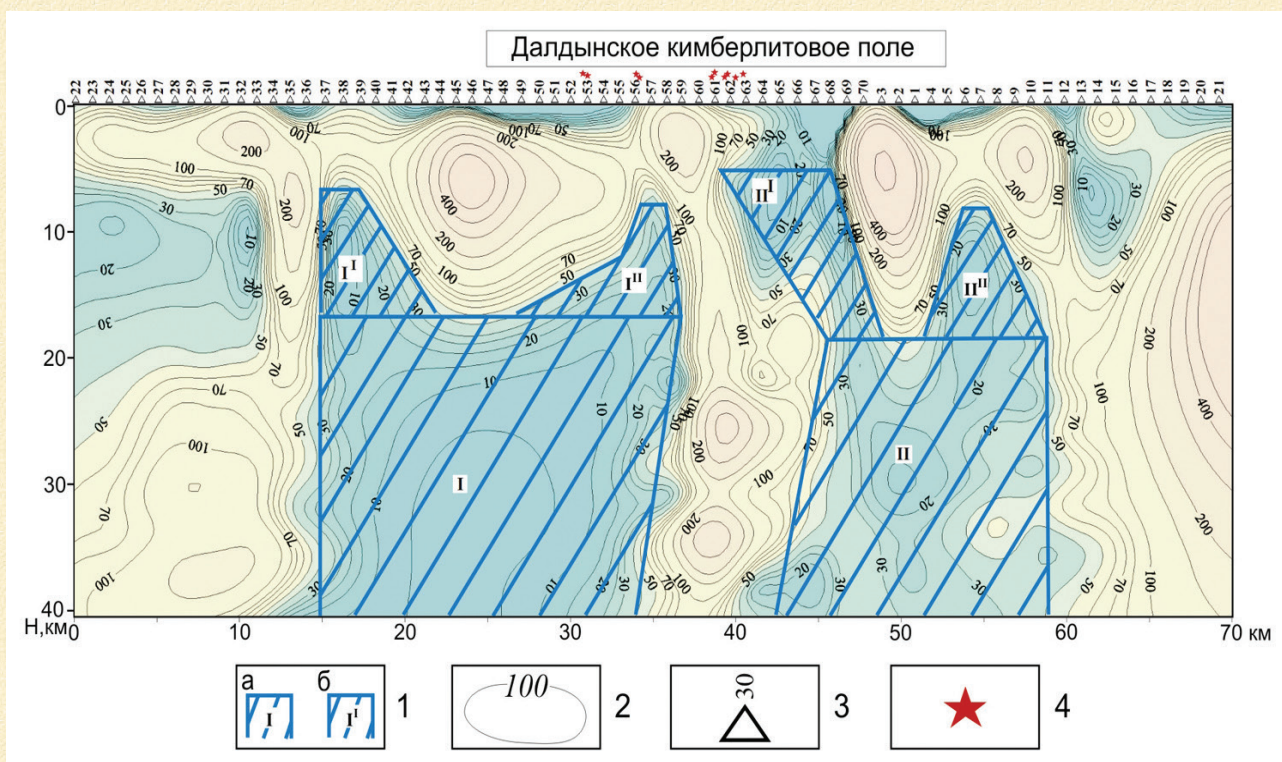


Рис. 7. Глубинный геоэлектрический разрез 1D-инверсии через Далдынское кимберлитовое поле: 1 – проводящие неоднородности, по данным количественной интерпретации МТЗ: а – первого порядка, б – второго порядка; 2 – изолинии сопротивлений (Ом·м); 3 – пункты МТЗ; 4 – кимберлитовые тела.

дят в мантию. К одной из зон высокой проводимости, верхняя кромка которой зафиксирована в диапазоне глубин 10 – 12 км, приурочен куст кимберлитовых трубок «Ботуобинская» и «Нюрбинская», тел Мархинское и Майское Накынского кимберлитового поля. Участки выделенных неоднородностей как в Мало-Ботуобинском, так и в Среднемархинском районах учитываются Ботуобинской геологоразведочной экспедицией при планировании крупномасштабных геолого-поисковых работ.

В Далдыно-Алакитском алмазоносном районе работы, выполненные в 2006 – 2008 г. по относительно редкой сети наблюдений (см. рис. 1), также показали наличие мощных сквозящих проводящих неоднородностей, в пределах которых локализуются кимберлитовые тела района. Достаточно сложное строение проводящих зон привело к разделению неоднородностей на порядки (рис. 7). На глубинах 18 – 20 км прослеживаются верхние кромки массивных низкоомных областей первого порядка. Ширина неоднородностей по профилю наблюдений достигает 20 – 30 км. От нижнекоровых аномальных зон к основанию осадочного чехла картируются неоднородности второго порядка с верхними кромками на глубинах 2,5 – 6 км. Углы наклона плоскостей, ограничивающих неоднородности в верхних частях коры, составляют примерно 70°, ширина неоднородностей по профилю наблюдений – 5 – 7 км.

Учитывая полученные положительные результаты, в дальнейшем намечено внедрение метода

магнитотеллурических зондирований в геолого-геофизический комплекс геологоразведочных экспедиций АК «АЛРОСА».

Список литературы

1. Тихонов, А. Н. О возможности использования импеданса естественного электромагнитного поля Земли для изучения её верхних слоев / А. Н. Тихонов, Д. Н. Шахсуваров // Изв. АН СССР, серия геофиз. – 1956. – № 4.
2. Манаков, А. В. Кимберлитовые поля Якутии / А. В. Манаков, Н. И. Романов, О. Л. Полторацкая. – Воронеж : Воронежский госуниверситет, 2000. – 82 с.
3. Манаков, А. В. Глубинные геофизические критерии коренной алмазоносности (на примере Якутской кимберлитовой провинции) : дис. ... д-ра геол.-минерал. наук / А. В. Манаков. – Якутск : ИГАиБМ, 2002. – 278 с.
4. Розен, О. М. Сибирский кратон : строение, эволюция, алмазоносность / О. М. Розен, А. В. Манаков, Н. Н. Зинчук. – М. : изд-во РОБОНРИ, Новый мир, 2006. – 212 с.
5. Инструкция по электроразведке : Наземная электроразведка, скважинная электроразведка, шахтно-рудничная электроразведка, аэроэлектроразведка, морская электроразведка / Министерство геологии СССР. – Л. : Недра, 1984. – 352 с.