

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОИСКОВ И РАЗВЕДКИ

УДК 553.81:550.8

*В.Н. АНФИЛОГОВ, О.А. ХАЧАЙ, Г.Г. КОРАБЛЕВ,
Е.Н. НОВГОРОВОДА, О.Ю. ХАЧАЙ, А.В. КОНОНОВ*

**ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ УРАЛЬСКИХ ПАЛЕОЗОЙСКИХ
АЛМАЗНЫХ РОССЫПЕЙ И ПОИСК ИХ СВЯЗИ С ПИТАЮЩИМИ
ИСТОЧНИКАМИ**

Приведены результаты геолого-геофизического анализа строения палеозойской алмазной россыпи, расположенной на территории Колчимского поднятия в пределах месторождения Ишковский карьер. Предположено, что на территории Колчимского поднятия имели место два этапа образования кор выветривания: в нижнем силуре и в нижнем девоне. К таким корам выветривания приурочены древние аллювиальные алмазоносные россыпи. На основании этих данных сделан вывод о том, что возраст первичных источников алмазов составляет ≤ 600 млн. лет и что залегают они в вендских или рифейских отложениях. Есть основания полагать, что первичные алмазоносные породы претерпели деформацию в период байкальского этапа складчатости и трансформировались в серию линз, залегающих согласно со смятыми в складки породами. Большую роль для изучения изменения форм кимберлитовых тел будут играть детальные геофизические методы, ориентированные на модели сложнопостроенных сред.

В Красновишерском районе (западный склон Урала) эксплуатируются два типа алмазных месторождений: четвертичные аллювиальные россыпи, расположенные в руслах рек Большой Щугор, Большой и Северный Колчим и древние погребенные россыпи, приуроченные к повышенным участкам рельефа, которые раньше рассматривались как месторождения, залегающие в эрозионных депрессиях [1]. После вскрытия месторождений Ишковский карьер и Северная Рассольная геологические позиции месторождений этого типа стали более определенными.

Месторождение Ишковский карьер расположено на водоразделе рек Волынка и Ефимовка — притоков реки Большой Щугор. Первая информация о геологическом строении месторождения опубликована в [2, 4]. Месторождение залегает на контакте карбонатов колчимской свиты и песчаников такатинской свиты, имеющих меридиональное простирание и пологие углы падения.

Карбонаты колчимской свиты (S_{1kl}) представлены доломитизированными и перекристаллизованными известняками без видимой слоистости. В них широко проявлены карстовые явления. Наи-

более интенсивно карст развивается на контакте известняков с песчаниками такатинской свиты, выходящем на дневную поверхность. В результате контакт приобретает причудливую, изогнутую, конфигурацию, осложненную карстовыми воронками и провалившимися в них блоками песчаника. В некоторых случаях карстовые воронки развиваются на всю мощность известняков, и в этих воронках оказываются блоки такатинских песчаников, лежащие вдали от контактов, в окружении карбонатных пород. Породы такатинской свиты представлены на месторождении гравелитами, грубозернистыми песчаниками и прослоями зеленовато-белых нелигифицированных глин мощностью 1,5—2,0 м, переслаивающихся с кварцевыми песчаниками мощностью 0,1—0,15 м. В основании разреза отмечаются линзы редкогалечных конгломератов размером до нескольких метров и мощностью до 0,2 м.

Происхождение таких линз связано, по-видимому, с разрушением более древних конгломератов и консервированием образованных при выветривании обломков в кварцевом песчанике и в гравелите.

Продуктивный горизонт представляет собой дезинтегрированные кварцевые песчаники и гравелиты такатинской свиты, которые залегают на карстованной поверхности известняков колчимской свиты, отделенной от массивных известняков слоем карстовой глины.

Отдельные кристаллы алмаза обнаружены в массивных песчаниках. Дезинтеграция песчаников происходит не только там, где контакт карбонатов и песчаников выходит на дневную поверхность, но и на глубине, причем массивные песчаники, как правило, залегают на дезинтегрированных.

Наличие карста и карстовых карбонатных глин под такатинскими кварцевыми песчаниками позволяет заключить, что кора выветривания, которая фиксируется на глубине, вдоль поверхности контакта такатинских и колчимских отложений, является палеозойской, сформированной до образования песчаников и гравелитов такатинской свиты, которые в пределах колчимской антиклинали также представляют собой континентальные образования [3, 5]. К такому же выводу пришли Ю.Р. Бекер с соавторами на основе изучения литологии отложений такатинской свиты и геологического строения алмазоносной россыпи на месторождении Ишковский карьер [2].

На палеозойскую кору выветривания наложены мезозойские и кайнозойские процессы выветривания, особенно сильно развитые на контакте карбонатных пород с песчаниками, выходящем на дневную поверхность. Залегание продуктивного горизонта на палеозойской коре выветривания и перекрытие его отложениями такатинской свиты позволяет рассматривать месторождение Ишковский карьер как древнюю палеозойскую россыпь.

Приведенные сведения из геологии формирования уральских алмазоносных россыпей показывают, что важнейшее требование к аппаратурно-методическому геофизическому комплексу и методике интерпретации геофизических данных для изучения строения россыпи и источников их питания — принципиально новая разрешающая способность методов в условиях отсутствия априорной информации об исследуемом участке. Это достигнуто в рамках разработанной в Институте геофизики УрО РАН попланшетной методики электромагнитных индукционных исследований в частотно-геометрическом варианте, которая используется для картирования и мониторинга сложно построенных геологических сред в наземном и подземном (шахтном) вариантах [6—11], (разработчик аппаратуры МЧЗ-12 А.И. Человечков). Адаптация этой методики к подземным исследованиям в шахтных выработках для определения структуры массивов горных пород, их состояния и динамики при техногенном воздействии позволила провести объемные геофизические исследования в геологической среде и выявить основные структурные факторы и критерии состояния геологической среды. Используемая методика относится к геофизическим методикам неразрушающего контроля. Она

отличается от известных методик просвечивания или томографии системами наблюдения и последующим методом интерпретации [6, 9].

Остановимся кратко на аппаратурно-методическом и интерпретационном комплексе, использованном для решения поставленной задачи.

В основу методики исследования трехмерных геоэлектрических сред [6,11] положена концепция трехэтапной интерпретации переменного электромагнитного поля в рамках модели слоисто-блоковой изотропной среды с включениями. На первом этапе определяются геоэлектрические параметры вмещающей неоднородности горизонтальной слоисто-блоковой среды. На втором этапе осуществляется подбор аномального поля полем системы погруженных в среду (с определенными на первом этапе физическими параметрами) сингулярных источников, эквивалентных по полю локальным геоэлектрическим и упругим неоднородностям. При этом определяется геометрическая модель отдельных локальных неоднородностей или группы и их взаимное расположение внутри слоисто-блоковой вмещающей среды. На третьем этапе определяются поверхности искоемых неоднородностей в зависимости от значений физических параметров аномалобразующих объектов.

Для практической реализации этой концепции разработана и опробована система наблюдений для переменного электромагнитного поля с использованием вертикального магнитного диполя. Наличие локального источника возбуждения позволяет регулярно при заданной сети наблюдений реализовать перекрытия при различных углах видимости (источник возбуждения — неоднородность). В качестве входных данных для интерпретации используются три компоненты модуля магнитного поля. В случае наземных наблюдений данные фиксируются на дневной поверхности для набора расстояний между источником и приемником как функции частоты.

Измерения модуля трех компонент магнитного поля (вертикальной $|H_z|$ и двух горизонтальных: направленной на источник $|H_r|$ и перпендикулярной к этому направлению $|H_\phi|$) проводятся в рамках планшета по заданной сети с фиксированными шагом и длиной стороны планшета. В рамках профильных наблюдений планшет вырождается в полосу или линию, а их длина является базой наблюдений или расстановкой. Источник возбуждения находится в варианте широкого профиля в начале расстановки на параллельном профиле относительно профиля наблюдения. Он перемещается систематически с заданной расстановкой через фиксированное число метров или пикетов. В варианте обычного профиля, источник помещается на профиль наблюдения, перемещения его производятся аналогично. В варианте попланшетной съемки источник располагается в центре планшета и измерения ведутся внутри планшета по заданной сети наблюдения. Затем планшет систематически перемещается с заданным перекрытием (обычно на полпланшета). Для каждой расстановки и

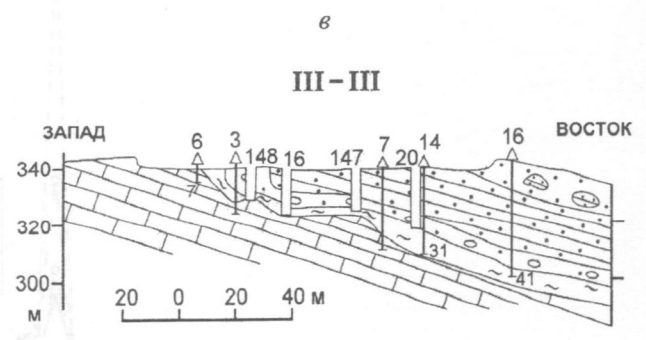
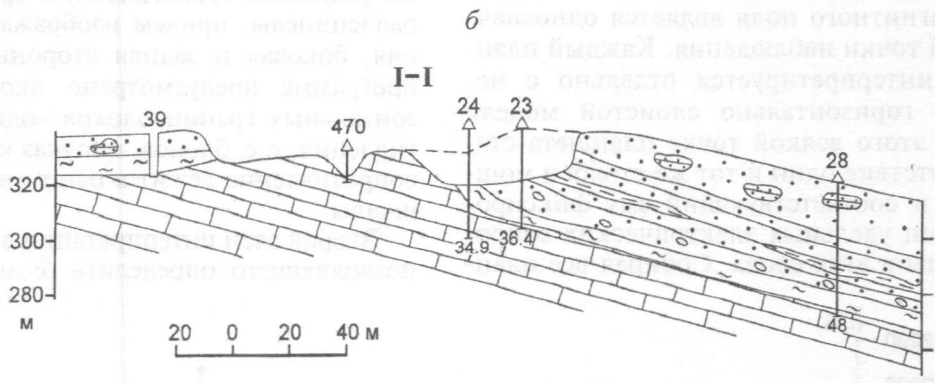
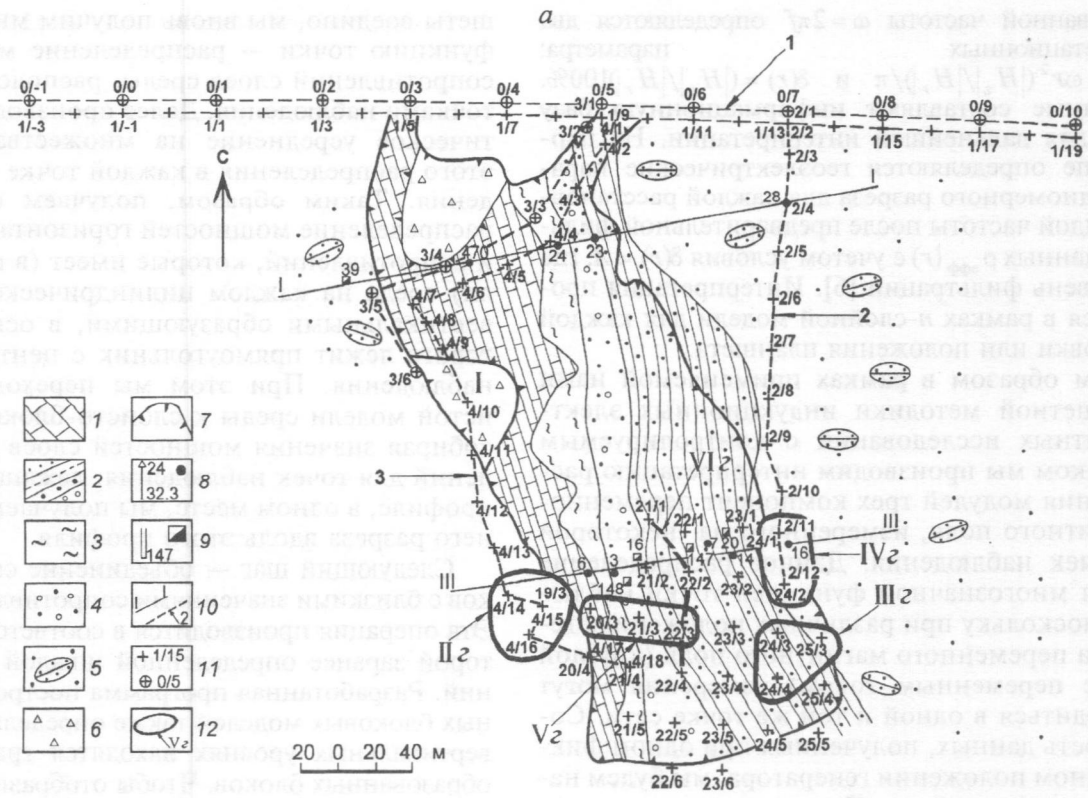


Рис. 1. Схема геологического строения и геофизических наблюдений в карьере Ишковского месторождения алмазов по состоянию на август 2004 г. (а) и геологические разрезы (б, в): 1 – доломиты колчимской свиты (S_{1kl}), 2 – песчаники такатинской свиты (D_{1tk}) с прослоями голубых глин и конгломератов; 3 – глинистая кора выветривания по доломитам; 4 – дезинтегрированные песчаники с обломками конгломератов и песчаников, часто алмазонасытые; 5 – дезинтегрированные до песков песчаники с обломками и прослоями песчаников, такатинские; 6 – техногенные насыпи; 7 – уступы карьера; 8 – скважины на разрезах и плане, их номера и глубина; 9 – разведочные шурфы и их номера на разрезах и плане; 10 – положение геологических (сплошные линии) и геофизических профилей (пунктирные линии); 11 – пункты геофизических наблюдений и пункты расположения источника возбуждения, их номера; 12 – области аномального геологического строения, выделенные по результатам геофизических наблюдений

фиксированной частоты $\omega = 2\pi f$ определяются два интерпретационных параметра: $\rho_{эфф}(r) = \omega r^2 (|H_z|/|H_r|)/\pi$ и $\delta(r) = (|H_\phi|/|H_r|)100\%$. Эти данные составляют информационную базу данных для дальнейшей интерпретации. На первом этапе определяются геоэлектрические параметры одномерного разреза для каждой расстановки и каждой частоты после предварительной фильтрации данных $\rho_{эфф}(r)$ с учетом условия $\delta(r) < A$, где A — уровень фильтрации [6]. Интерпретация производится в рамках n -слойной модели для каждой расстановки или положения планшета.

Таким образом в рамках применяемой нами попланшетной методики индукционных электромагнитных исследований с контролируемым источником мы производим интерпретацию распределения модулей трех компонент переменного магнитного поля, измеренного на некоторой сети точек наблюдения. Данное распределение является многозначной функцией точки наблюдения, поскольку при различных положениях генератора переменного магнитного поля (круглой рамки с переменным током) измерения могут производиться в одной и той же точке сети. Совокупность данных, полученных при одном фиксированном положении генератора, мы будем называть «планшетом». На каждом отдельном планшете распределение измеренных модулей компонент магнитного поля является однозначной функцией точки наблюдения. Каждый планшет данных интерпретируется отдельно с использованием горизонтально слоистой модели среды. После этого всякой точке планшета ставится в соответствие один и тот же столбец мощностей слоев и соответствующий ему фиксированный столбец удельных электрических сопротивлений среды в этих слоях. Собирая все план-

шеты воедино, мы вновь получим многозначную функцию точки — распределение мощностей и сопротивлений слоев среды, расположенной под точками наблюдения. Далее производим арифметическое усреднение на множествах значений этого распределения в каждой точке сети наблюдения. Таким образом, получаем однозначное распределение мощностей горизонтальных слоев и сопротивлений, которые имеет (в нашей модели) среда на каждом цилиндрическом объеме с вертикальными образующими, в основании которого лежит прямоугольник с центром в точке наблюдения. При этом мы переходим от слоистой модели среды к слоисто-блоковой. Далее, собирая значения мощностей слоев и сопротивлений для точек наблюдения, лежащих на одном профиле, в одном месте, мы получаем файл среднего разреза вдоль этого профиля.

Следующий шаг — объединение смежных блоков с близкими значениями сопротивлений в один. Эта операция производится в соответствии с некоторой заранее определенной шкалой сопротивлений. Разработанная программа построения объемных блоковых моделей также определяет, на каких вертикальных уровнях находятся границы вновь образованных блоков. Чтобы отобразить на экране всю внутреннюю структуру модели среды, мы как бы разрезаем геологическую среду на бруски-параллелепипеда, причем изображаются только нижняя, боковая и задняя стороны этих брусков. В программе предусмотрено оконтуривание горизонтальных границ блоков «одинакового» сопротивления, т. е. блоков, в точках каждого из которых сопротивление лежит в одном и том же интервале шкалы.

Второй этап интерпретации в рамках алгоритма, позволяющего определить геометрические харак-

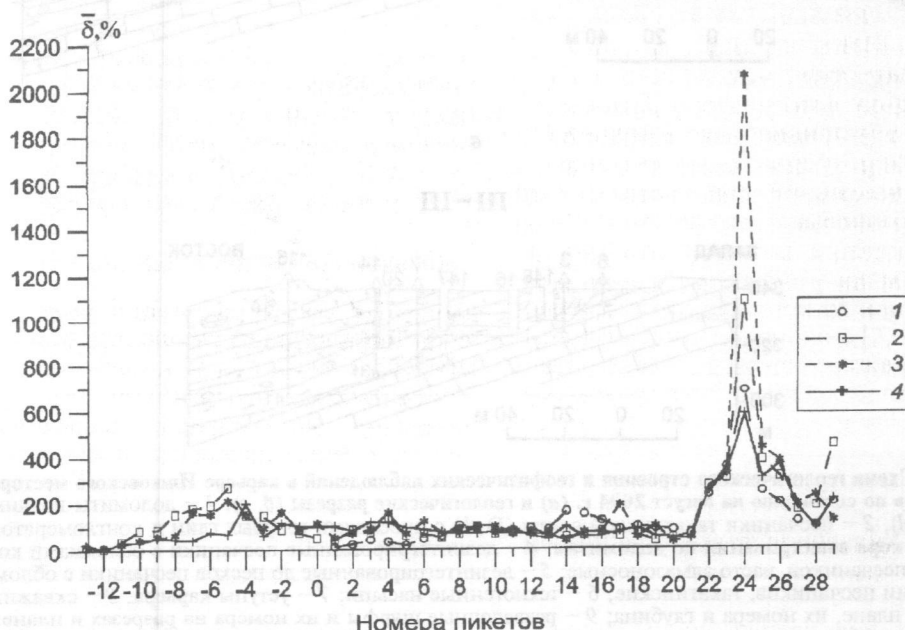


Рис. 2. Распределение среднего параметра геоэлектрической неоднородности по широтно-мус. профилю 0-1 (рис.1, а): 1 — 20,3, 2 — 5,08, 3 — 1,27, 4 — 0,635 кГц

теристики проводящих включений и их суммарные эквивалентные моменты, которые пропорциональны отношению разности проводимостей во вмещающей среде и во включении к проводимости во вмещающей среде. Здесь используется аппроксимационный принцип для переменных электромагнитных полей. Исходная модель включения выбирается в виде токовой линии конечной длины. По-

лем такого типа источников аппроксимируется распределение среднего параметра геоэлектрической неоднородности, определенного как среднее значение δ в каждой точке профиля, расположенного вдоль выработки. Решается задача минимизации среднеквадратичного отклонения (невязки) экспериментальной кривой распределения среднего параметра геоэлектрической неоднородности от

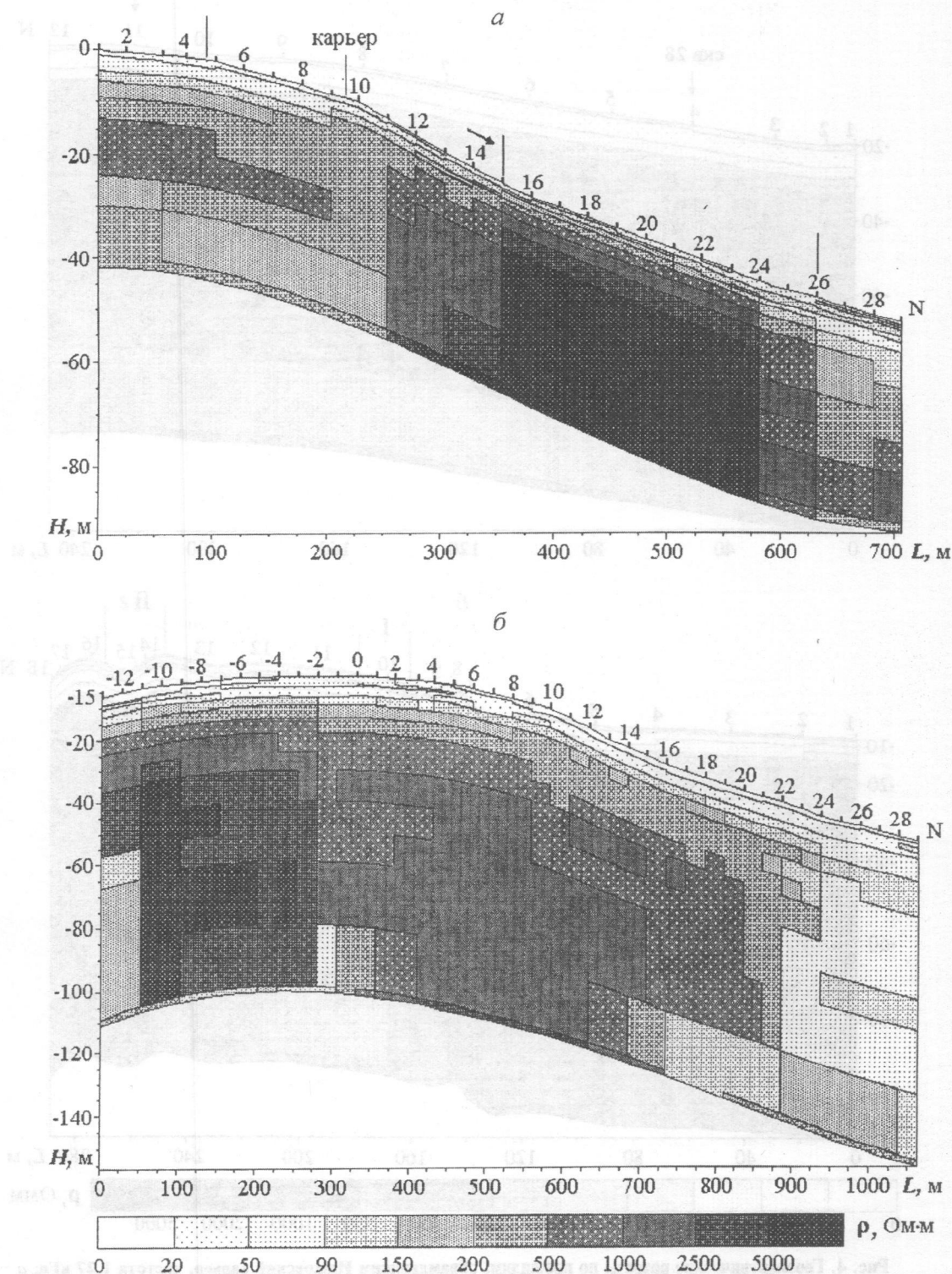


Рис. 3. Геоэлектрические разрезы корней структуры палеозойской россыпи в районе Ишковского карьера; частоты: $a - 20,3$, $b - 0,635$ кГц, 2-28 — номера точек наблюдения

теоретической [9]. Положение источников возбуждения сохраняется, как и при реализации первого этапа. Токовые линии располагаются непосредственно либо под профилем вниз от выработки, либо над профилем вверх. При этом определяются описанные выше параметры этих токовых линий, подбор ведется в полуавтоматическом режиме: изменение искомым параметров в процессе подбора назначается интерактивно. Процедура заканчивается, когда невязка становится меньше заданного значения. Абсолютная величина невязки контролируется заданной точностью подбора экспери-

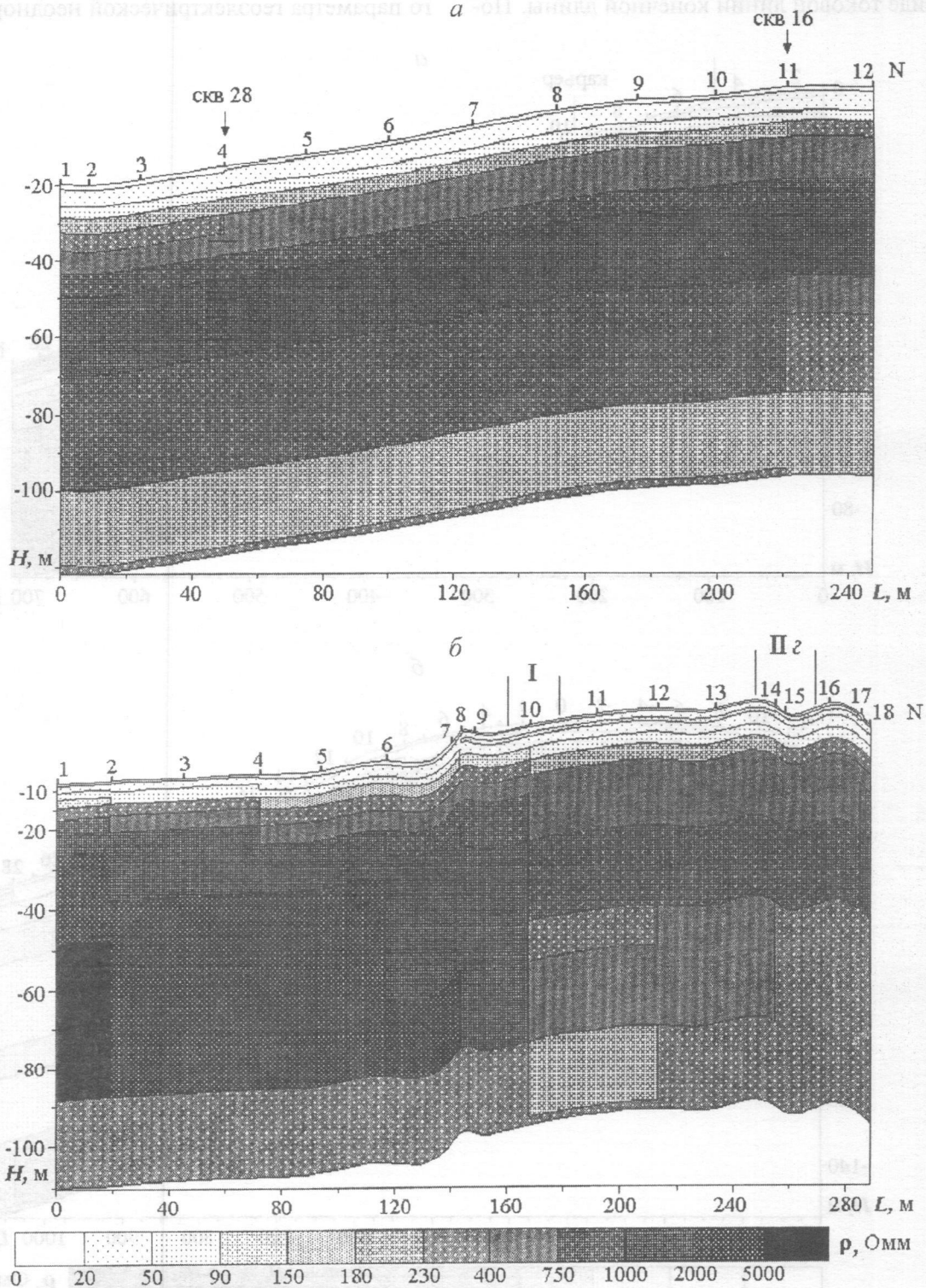


Рис. 4. Геоэлектрические разрезы по профилям, обрамляющим Ишковский карьер, частота 1,27 кГц: а – профиль 2 (рис. 2, а), б – широкий профиль 3-4 (рис. 1, а): а – короткими горизонтальными линиями показано положение литологических границ по скважине 16 (рис. 1, в) и по скважине 28 (рис. 1, б), б – показаны разрезы аномальных геологических областей, соответствующих вынесенным на рис. 1, а

ментального значения среднего значения параметра геоэлектрической неоднородности в экстремальных точках. Математически эта процедура применена в виде программно-реализованного алгоритма для (Е.Н. Новгородова). Таким образом, по результатам первого и второго этапов интерпретации строится трехмерная геоэлектрическая модель изучаемого участка геологической среды.

В 2004 г. в районе Ишковского карьера проведены электромагнитные индукционные исследования в рамках попланшетной электромагнитной методики [6, 7] в площадном варианте, в варианте широкого профиля (профили 0–1, 3–4) и профильном варианте (профиль 2) на ряде частот f (20,3, 5,08, 1,27, 0,635 кГц). На рис. 1, а показано положение карьера относительно геофизических пикетов на дороге. Выход на дорогу карьера совпадает с пикетами 4–5 и 9–10, далее он простирается на юго-восток и проецируется на дорогу в пределах пикетов 9–10, 14–15, (рис. 1, а-в)

На рис. 2. приведено распределение параметра геоэлектрической неоднородности по широкому профилю вдоль дороги. Выделено несколько аномальных зон: первая в пределах пикетов: (-10)–(-3), 3–8, 13–19, 21–29. Вторая аномальная зона совпадает с выходом на дорогу Ишковского карьера и с зоной контакта колчимской свиты с полимиктовыми песчаниками.

На рис. 3, а, изображен геоэлектрический разрез на частоте 20,3 кГц, где породы колчимской свиты выделяются мощным, уходящим на глубину, высокоомным блоком; зона контакта (пикеты 21–29) отличается переслаивающимся штоком более проводящих пород; выход карьера (пикеты 3–8) картируется мульдообразной структурой, постепенно выклинивающейся на восток.

Геоэлектрические разрезы (рис. 3, а-б) демонстрируют сложную вложенную геоэлектрическую структуру, которая может наблюдаться у геологических объектов неосадочного происхождения.

Анализ и интерпретация данных (рис. 2, 3) с учетом геоэлектрических параметров блоковой структуры вмещающего разреза позволили устойчиво выявить слой повышенной трещиноватости и аномальной водонасыщенности, расположенный субгоризонтально на глубинах 15–20 м с нарушениями в выделенной контактовой зоне. С востока россыпь Ишковского карьера окаймляет профиль 2 (рис. 1, а), разрез по которому представлены на рис. 4, а.

По геологическим данным этот профиль вплоть до 11-го пикета проходит по породам вязовской свиты, которые залегают субмеридионально, что и отражено в разрезах. Верхние слои хорошо соответствуют расположению пород по данным бурения (рис. 1, б, в, рис. 4, а, скважины 28, 16). На пикете 11 отмечен контакт, который коррелирует с геологическим контактом пород таккатинской свиты.

С запада Ишковский карьер окаймляет широкий профиль 3–4 (рис. 1, а, 4, б). Он проходит по породам колчимской свиты (пикеты 4–9) и выходит за пределы карьера.

По геологическим данным (рис. 1, а) в этих породах обнаружены карстовые структуры с алмазносным песком, такие участки карьера отработаны. На геоэлектрических разрезах (рис. 4, б) один из этих участков обозначен как I (в пределах 9–11 пикетов). Участок II установлен как аномальный, в результате интерпретации данных электромагнитных площадных исследований (пикет 16 на профиле совпадает с пикетом 19/3 (рис. 5)), где зафиксировано аномальное значение параметра геоэлектрической неоднородности. Эта информация использована при дальнейших вскрышных работах.

Вскрышные работы в этом месте выявили еще одну алмазносную карстовую депрессию, которую отработали в 2004 г. Интересно отметить, что в разрезе (рис. 4, а) выявлено сходство в геоэлектрической ситуации с таковой россыпи соседнего алмазносного участка Северная Рассольная: в геоэлектрическом разрезе был обнаружен слой с таким же сопротивлением (пикеты 11, 12, глубина 10–15 м, 230–400 Ом·м), который после вскрышных работ оказался квазиплотиком.

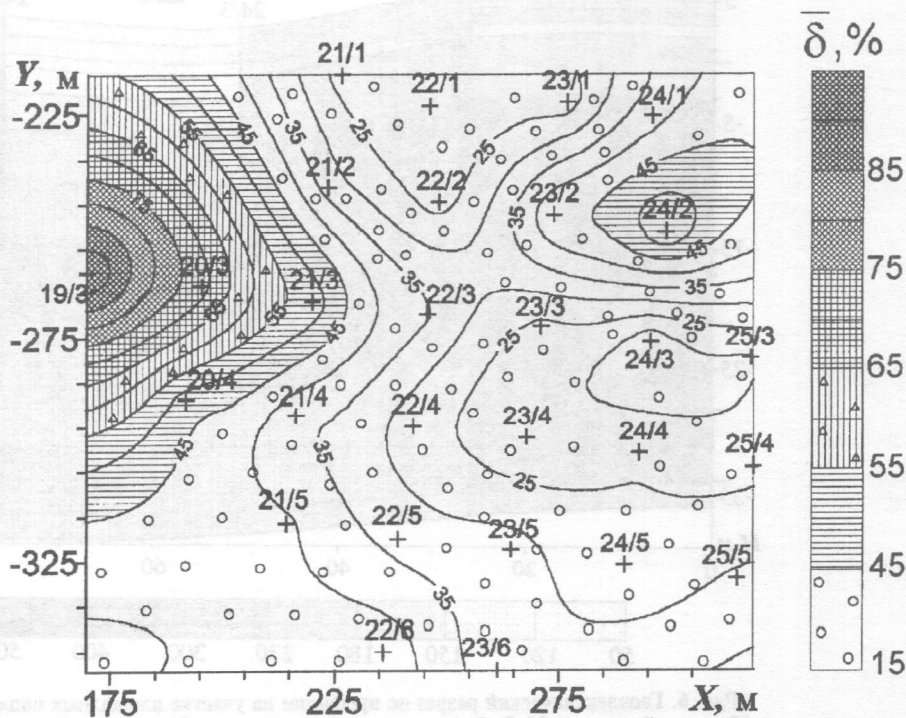


Рис. 5. Распределение среднего параметра геоэлектрической неоднородности на участке площадных попланшетных электромагнитных наблюдений; частота 20,3 кГц

По результатам интерпретации данных площадной попланшетной электромагнитной индукционной съемки (рис. 1, а, 5) выделены зоны нарушений субгоризонтальности напластований (рис. 6, а, б). Эти области вынесены на схему (рис. 1, а) и на геоэлектрические разрезы: зона VI_г, между профилями 21—22 по пикету 2, зона V_г, между профилями 20—22 по пи-

кету 3 и зона III_г, между профилями 24—25 по пикету 3, рис. 6, а, зона IV_г, между пикетами 1, 2 по профилю 24, зона III_г, между пикетами 3—4 по профилю 24, рис. 6, б). Хорошее совпадение с результатами бурения показано на рис. 4, а, б, б (скв. 16).

Изложенные данные по геолого-геофизическому строению и алмазности пород Колчимской

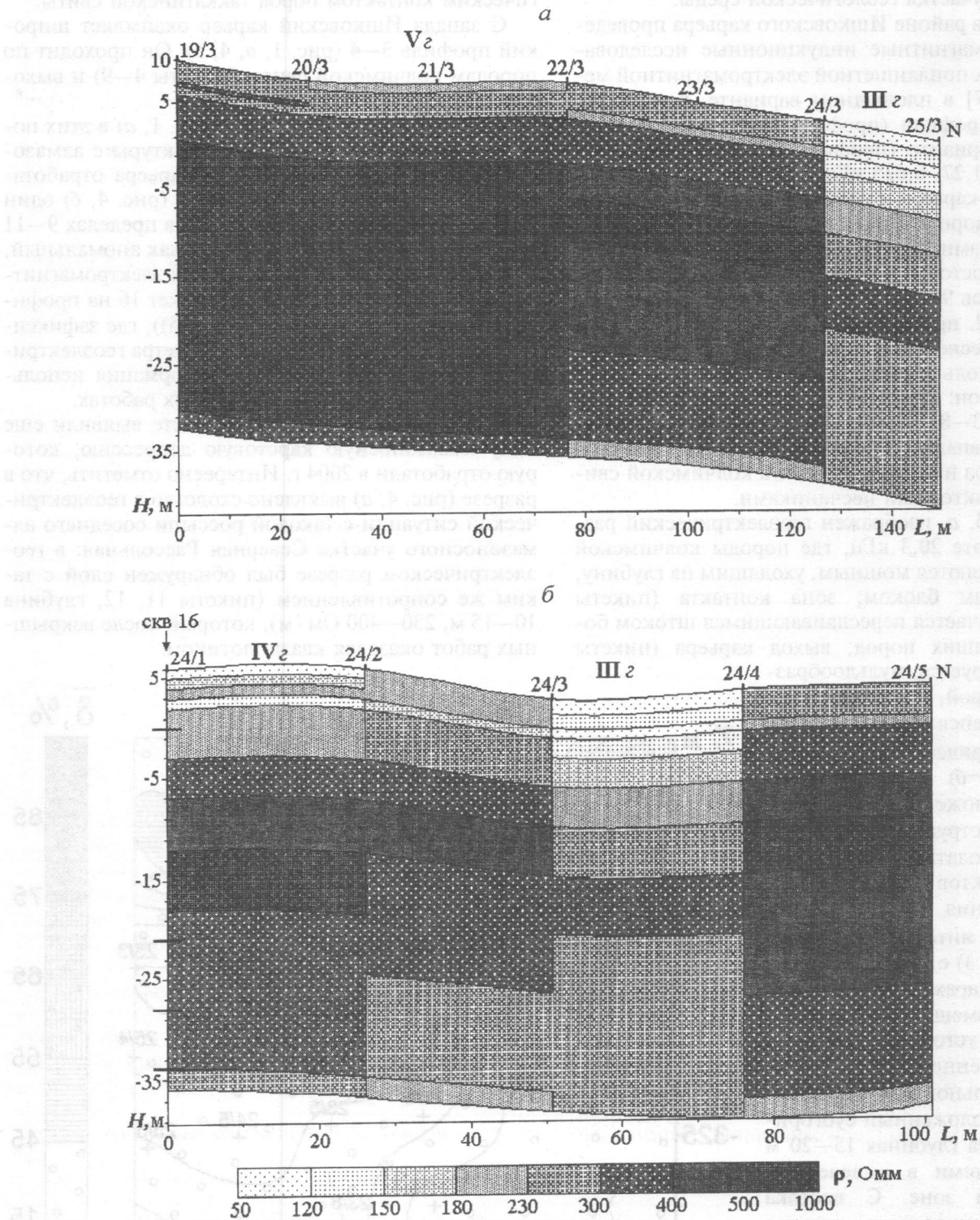


Рис. 6. Геоэлектрический разрез по профилям на участке площадных попланшетных электромагнитных наблюдений; частота 20,3 кГц: а — по третьим пикетам, V_г — то же, что и на рис. 1, а, б — по профилю 24, III_г, IV_г — то же, что и на рис. 1, а; короткими горизонтальными линиями показано положение литологических границ по скважине 16 (рис. 1, в)

антиклинали позволяют предположить, что коренные источники алмазов находятся в досилурийских отложениях, и их возраст с учетом того, что помяненновская и полюдовская свиты выпадают из палеозойского разреза, составляет не менее 670 млн. лет. При разрушении коренных источников алмазы первоначально концентрировались в терригенных отложениях колчимской свиты, а при размыве этих отложений попадали в основание такатинской свиты. Не исключено, что древние алмазоносные россыпи могут быть обнаружены в терригенных отложениях кочешорской свиты или в верхней части разреза ильважской свиты.

Если это предположение верно, то коренные источники следует искать в породах кочешорской, ильважской и более древних свит, но при этом возникает еще одна проблема, осложняющая поиски коренных источников. Породы кочешорской и более древних свит претерпели деформацию и их первично горизонтальное залегание сменилось на субвертикальное. По данным Э.В. Шипилова [12],

деформация связана с байкальским орогенезом, проявленным в пределах Тимано-Печерской плиты. Соответствующую трансформацию должны претерпеть и тела кимберлитов, если они внедрялись до этапа складчатости. Естественно, что после такой трансформации, традиционные методы поисков кимберлитов в районе Красновишерских месторождений алмазов не пригодны. Большую роль здесь будут играть детальные геофизические методы, ориентированные на модели сложнопостроенных сред, один из которых разработан в Институте геофизики УрО РАН и в процессе опробования показал достаточную разрешающую способность для сопоставления с геологическими данными бурения. Используемый метод позволяет решать сложные геологические задачи. В данном случае этот метод способствовал изучению измененных форм кимберлитовых тел, которые возникли за время эволюции алмазоносной провинции.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект 04-05-64136.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анфилов В.Н., Кораблев, Кабанова Л.Я. Особенности геологического строения и генезис красновишерских месторождений алмазов // Алмазы и алмазоносность Тимано-Печерского региона. Сыктывкар: Геопринт, 2001. С. 69–71.
2. Беккер Ю.Р., Бекасова Н.Б., Ишков А.Д. Алмазоносные россыпи в девонских отложениях Северного Урала // Литология и полезн. ископаемые 1970. № 4. С. 65–75.
3. Мухина В.П. Конгломераты такатинской свиты Красновишерского района // Конгломераты и их роль в познании геологической истории Урала. Тр. ИГиГ. № 123, Свердловск: Изд-во АН СССР, УНЦ, 1976. С. 38–48.
4. Соколов Б. Н. Образование россыпей алмазов. М.: Наука, 1982. 93 с.
5. Шуйский В.П. Палеонтологическая характеристика такатинской свиты Красновишерского района (Северный Урал) // Ежегодник, 1999: Информационный сборник Института геологии и геохимии. Екатеринбург, 2000. С. 31–35.
6. Хачай О.А., Новгородова Е.Н. Опыт площадных индукционных исследований резко-неоднородных геоэлектрических сред // Физика Земли. 1997, № 5. С. 60–64.
7. Хачай О.А., Новгородова Е.Н., Бодин В. В. О проблемах малоглубинной геоэлектрики и некоторых результатах их решения // Физика Земли. 1999. № 5. С. 47?53.
8. Хачай О.А., Дружинин В.С. Комплексирование трехмерных методов сейсмических и электромагнитных исследований для решения задач мониторинга // Разведка и охрана недр. 2000. № 2. С. 22–24.
9. Хачай О.А., Новгородова Е.Н., Хачай А.Ю. Картирование трехмерных проводящих зон с использованием площадных систем наблюдения в рамках 3D частотно-геометрической методики // Геология и геофизика. 2000. Т. 41. С. 1331–1340.
10. Шипилов Э.В. Тектоническая и геодинамическая эволюция западно-арктической окраины в фанерозое // Геология и минеральные ресурсы европейского Северо-Востока России. Сыктывкар: Геопринт, 1999. С. 75–78.
11. Hachay O.A. The three — stage concept of common interpretation for 3 Delectromagnetic and seismic fields and some results of it's practical realization. // Engineering and environmental geophysics for the 21-st century 1997. China, Chengdu, 1997. P. 286–292.
12. Hachay O.A., Bodin V.V., Novgorodova E.N., Bodin Vd., Hachay A. Yu., Hinkina T.A. A new complex near-surface electromagnetic and seismic technique for 3-d research of inhomogeneous and unstationary medium // Engineering and environmental geophysics for the 21-st century. 1997. China, Chengdu, 1997. P. 181–189.

Институт минералогии УрО РАН,
Институт геофизики УрО РАН,
Уральский государственный университет
Рецензент — Д.С. Даев