Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. XLVI, вып. 2, 1963 г.

МЕТОД ВРАЩАЮЩЕГОСЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ЮЖНОЙ КАРЕЛИИ

Л. М. Любавин

Метод аэроэлектроразведки, основанный на использовании вращающегося магнитного поля (ВМП) — одна из модификаций метода индукции — осуществляется с помощью двух самолетов типа АН-2, летящих друг за другом. Один из самолетов — генераторный, несет на себе две взаимно перпендикулярные рамки, возбуждаемые токами одной из рабочих частот с фазовым сдвигом между ними 90°. Благодаря этому результирующий вектор переменного магнитного поля вращается в плоскости, перпендикулярной плоскостям рамок и линии полета. При равенстве магнитных моментов обеих рамок электромагнитное поле вдоль оси самолета будет иметь круговую поляризацию в плоскости вращения вектора.

Самолет, летящий впереди, — измерительный, имеет две приемные взаимно перпендикулярные рамки, вынесенные в гондолу, оси которых попарно параллельны осям генераторных рамок.

В однородном пространстве при отсутствии проводящего тела в приемных рамках будут наводиться переменные э. д. с. одинаковой амплитуды и сдвинутые по фазе на 90°. После усиления сигналов и поворота одного из них на 90° с последующим вычитанием из другого результирующее напряжение $\Delta v_0 = v_y - iv_z$ будет равно нулю. Наличие какого-нибудь проводящего тела в пределах действия установки ВМП нарушит балансировку системы и кроме первичного поля с круговой поляризацией за счет реакции проводящего тела появится вторичное поле, поляризация которого в общем случае будет отлична от круговой. Результирующее напряжение Δv_0 перестанет быть нулевым и сможет быть зарегистрировано измерительным устройством.

При работах методом ВМП для повышения помехоустойчивости системы измеряются: амплитудный параметр A — разность модулей двух сигналов, наведенных в приемных рамках, выраженный в процентах первичного поля в точке приема; фазовый параметр $\Delta\varphi$, определяющий сдвиг фаз между двумя напряжениями v_y и v_z. Амплитудный параметр характеризует вещественную компоненту поля, фазовый — с точностью до постоянного множителя [3] мнимую.

Как установлено опытно-методическими работами, максимальный разнос L, допускаемый мощностью генераторного устройства и чувствительностью приемной аппаратуры, не может быть более 200 *м*. Навигационные же условия соосного полета позволяют выдерживать заданную дистанцию в спокойных условиях с погрешностью ±10—12%. Поэтому оптимальный разнос рамок для данного комплекта ВМП был принят в 150—160 *м*. Такой разнос, естественно, не обеспечивает большой глубинности метода, так как глубинность определяется отношением L и h_0 [1]. Под высотой следует понимать расстоя-

ние по вертикали от уровня полета до верхней кромки проводящего тела, которую удобнее выражать в относительных единицах разносов $\eta = \frac{h_0}{h}$, h — абсолютная высота полета над рельефом.

Для оценки глубинности метода над низкоомными пластами графито-серицито-кварцевых и хлорито-серицито-кварцевых сланцев выполнены разновысотные измерения A и $\Delta\varphi$ по нескольким маршрутам (рис. 1, *а*). Максимальный сигнал отмечается на минимальной высоте 0,40, когда амплитуда над основными проводящими зонами достигает 60—65% первичного поля, а фаза —30—40°. При этом не все аномалии амплитуды сопровождаются фазовыми аномалиями, и наоборот. Интенсивность амплитудных значений выше фазовых и первые значительно более дифференцированы.

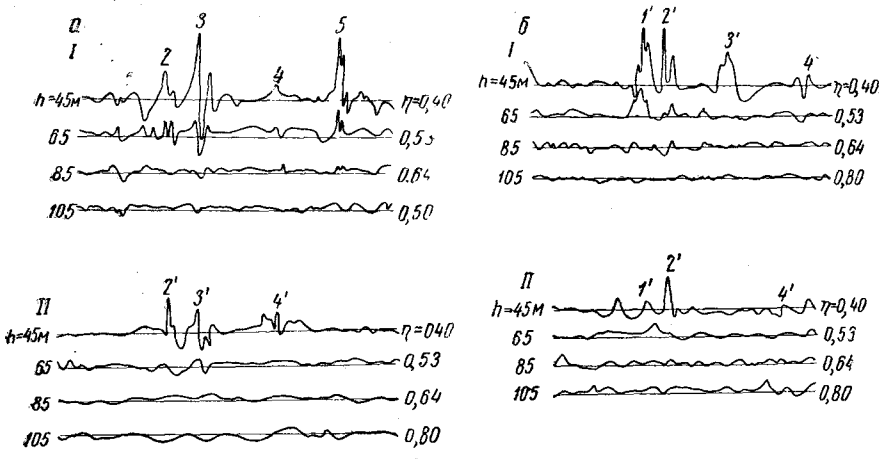


Рис. 1. Разновысотные графики амплитудного (*I*) и фазового (*II*) параметров над:
а — рудовмещающей толщей; *б* — графито-серицито-кварцевыми сланцами

Как следует из теории электромагнитного поля и модельных работ с индуктивными методами, мнимая компонента поля стремится к нулю при проводниках высокой проводимости [4]. Поэтому данные по амплитудному и фазовому параметрам указывают на возможность разделения аномалий над телами различной проводимости.

Проводящий пласт, отмечаемый аномалией *5* амплитудного параметра не сопровождается фазовой аномалией, тогда как аномалия *4*, которая достаточно отчетливо выделяется по фазе, слабо отмечается по амплитуде. Этот пример наглядно подтверждает избирательные возможности метода ВМП. В данном случае изменение соотношения между амплитудными и фазовыми аномалиями отражает, по-видимому, изменение сопротивления сланцев за счет обогащения их сульфидной вкрапленностью.

С увеличением высоты полета (0,53 и 0,64 *м*) некоторые детали аномальной зоны сглаживаются и меняется соотношение между их интенсивностями.

Метод ВМП обладает избирательной глубинностью [1]. Как видно из рис. 1, *б*, интенсивность аномалий *1* и *2* изменяется с высотой полета. По-видимому, проводники, соответствующие отдельным аномалиям внутри аномальной зоны, имеют различную степень погружения нижней кромки на глубину. В этом случае различным относительным глубинам η будет соответствовать и различная реакция проводников на первичное поле.

основном отмечаются двумя методами, однако, по данным ВМП, ни имеют большую интенсивность и дифференцируются на отдель- ые локальные аномалии, соответствующие наличию рудовмещающей олщи пластов низкоомных сланцев. Интенсивность индукционных номалий лежит в пределах суммарного уровня помех или превосхо- ит его не более чем в 1,5—2 раза, а отношение сигнала к помехам методах ВМП, как следует из рис. 2, составляет 8—12. Это позво- яет уверенно отмечать аномальные зоны и еще раз подтверждает анные теоретических работ [2] о большей разрешающей возможно- и метода ВМП перед другими методами аэроэлектроразведки с ин- уктивным способом возбуждения.

Для проверки геологической эффективности метода ВМП про- едена съемка в районе одного из месторождений пирито-пирроти-

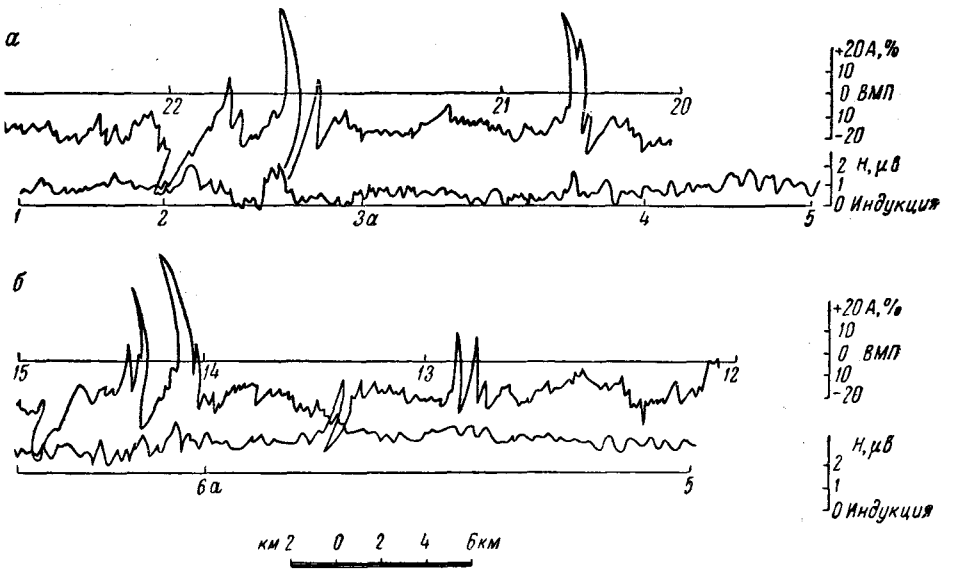


Рис. 2. Графики ВМП — амплитудного параметра A, % и индукции — вертикальной компоненты H, μb, выполненных по одноименным маршрутам:
а — через толщу графито-серицито-кварцевых сланцев; *б* — через рудовмещающую толщу

овых руд Южной Карелии. Маршруты съемки пересекали различ- ые по возрасту и составу комплексы геологических образований, также отдельные поля пирито-пирротинового оруденения.

Отдельными маршрутами, пересекающими эффузивно-сланцевый омплекс западного крыла Онежского синклинория и поле архей- ких и нижнепротерозойских гранитов, гранодиоритов (рис. 3), хо- ошо отмечена смена этих образований по перепаду нормальных по- ей, амплитуда которых меняется от 10% над низкоомными породами ффузивно-осадочной толщи до 25% над полем гранитов, обладаю- их сопротивлением 20—30 тыс. *ом. м.* На границе поля гранитов и садочно-метаморфического комплекса на западном крыле синклино- ия установлена трещиноватость, мелкие смещения и линии депрес- ай, выраженных в рельефе, которые указывают на существование бросов. Эта область тектонически ослабленной зоны, как видно на ис. 3, хорошо отмечается аномалиями амплитудного и фазового па- аметров, которые по интенсивности достигают 50—65% и 30—45° со- ветственно. Тектонические элементы сбросового типа и разрывные ислокации из-за широкого развития на участке четвертичных отло- ений устанавливаются по геоморфологическим данным. По анома- иям электромагнитных параметров устанавливается простирание

основном отмечаются двумя методами, однако, по данным ВМП, ни имеют большую интенсивность и дифференцируются на отдель-ые локальные аномалии, соответствующие наличию рудовмещающей олщи пластов низкоомных сланцев. Интенсивность индукционных номалий лежит в пределах суммарного уровня помех или превосхо-ит его не более чем в 1,5—2 раза, а отношение сигнала к помехам методах ВМП, как следует из рис. 2, составляет 8—12. Это позво-яет уверенно отмечать аномальные зоны и еще раз подтверждает анные теоретических работ [2] о большей разрешающей возможно-и метода ВМП перед другими методами аэроэлектроразведки с ин-уктивным способом возбуждения.

Для проверки геологической эффективности метода ВМП про-едена съемка в районе одного из месторождений пирито-пирроти-

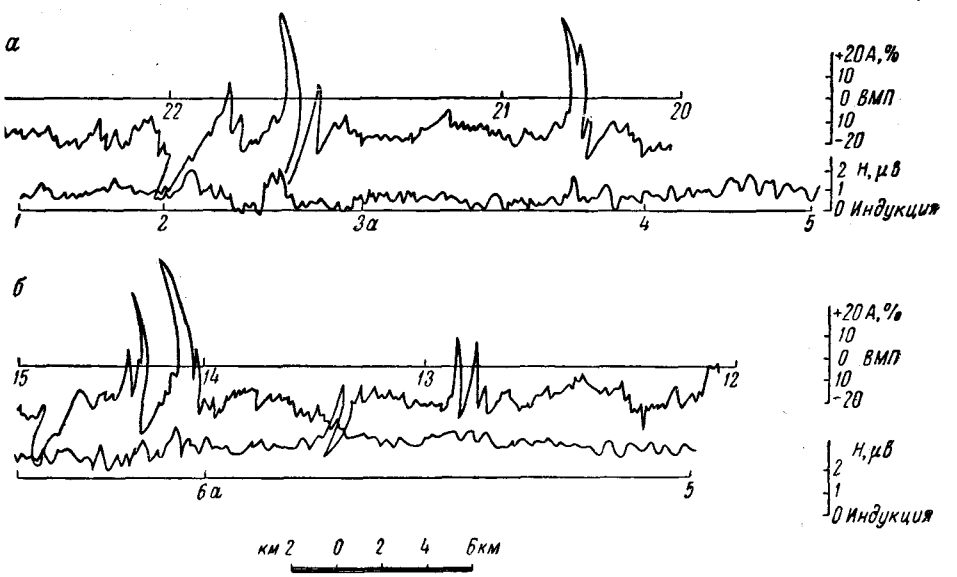


Рис. 2. Графики ВМП — амплитудного параметра A, % и индукции — вертикальной компоненты H, μb, выполненных по одноименным маршрутам:
а — через толщу графито-серицито-кварцевых сланцев; *б* — через рудовмещающую толщу

овых руд Южной Карелии. Маршруты съемки пересекали различ-ые по возрасту и составу комплексы геологических образований, также отдельные поля пирито-пирротинового оруденения.

Отдельными маршрутами, пересекающими эффузивно-сланцевый омплекс западного крыла Онежского синклинория и поле архей-ких и нижнепротерозойских гранитов, гранодиоритов (рис. 3), хо-ошо отмечена смена этих образований по перепаду нормальных по-ей, амплитуда которых меняется от 10% над низкоомными породами ффузивно-осадочной толщи до 25% над полем гранитов, обладаю-ших сопротивлением 20—30 тыс. *ом. м.* На границе поля гранитов и садочно-метаморфического комплекса на западном крыле синклино-ия установлена трещиноватость, мелкие смещения и линии депрес-ий, выраженных в рельефе, которые указывают на существование бросов. Эта область тектонически ослабленной зоны, как видно на ис. 3, хорошо отмечается аномалиями амплитудного и фазового па-аметров, которые по интенсивности достигают 50—65% и 30—45° со-ответственно. Тектонические элементы сбросового типа и разрывные ислокации из-за широкого развития на участке четвертичных отло-ений устанавливаются по геоморфологическим данным. По анома-иям электромагнитных параметров устанавливается простирание

основных проводящих зон, которое в общих чертах совпадает с направлением ослабленных тектонических зон. Однако местоположение осей электрических аномалий иногда не совпадает с тектоническими элементами и это расхождение, особенно в южной части участка, достигает нескольких километров. Таким образом, по данным электромагнитной съемки можно уточнить элементы тектоники, полученные геологической съемкой.

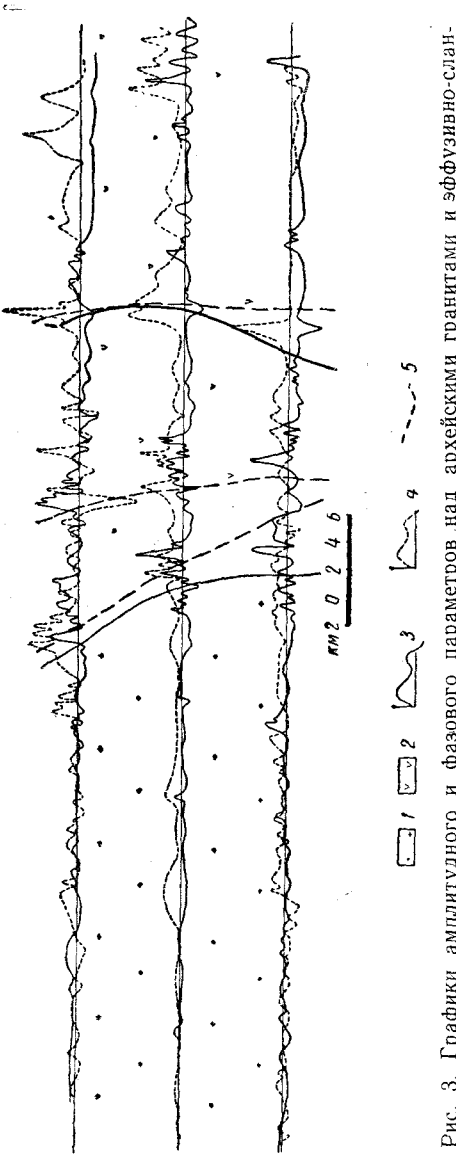


Рис. 3. Графики амплитудного и фазового параметров над архейскими гранитами и эффузивно-сланцевым комплексом нижнего протерозоя (пример картирования):
1 — гранито-гранодиоритовый комплекс; *2* — эффузивно-сланцевый комплекс; *3* — графики амплитудного параметра; *4* — графики фазового параметра; *5* — линии тектонических нарушений

Как правило, основные тектонические нарушения (разломы, сбросы и т. п.) сопровождаются достаточно отчетливыми аномалиями амплитуды шириной до нескольких сот метров. На рис. 3 аномальные зоны достигают нескольких километров. Сама же форма амплитудных и фазовых кривых носит изрезанный характер. Детали кривых от профиля к профилю не повторяют друг друга. Это подтверждает данные геологической съемки, по которой устанавливается система мелких тектонических нарушений небольшого простирания, сгруппированных, как указано выше, около западного крыла Онежского синклинория. Отдельные локальные аномалии от мелких разломов, накладываясь друг на друга, создают аномалии такой сложной формы. Кроме того, индукционный параметр от проводников средней проводимости, какими являются разломы, не достигает значений, соответствующих амплитудному параметру в 50—65% [1]. По-видимому, дополнительно имеет место реакция на первичное поле других проводников. Такими могут быть интрузии габбро-диабазов нижнего протерозоя. В контакте с ними отмечаются зоны филлитовидных, глинисто-кремнистых и углисто-кремнистых сланцев с сопротивлением 600—2000 *ом*, т. е. низким среди высокоомных вмещающих пород. Часть интрузий габбро-диабазов несет ильменито-магнетитовое оруденение. При благоприятных условиях оно может создавать значительные локальные аномалии. Поэтому проводящая зона, характеризующаяся изрезанным вторичным электромагнитным полем, может быть обусловлена не только наличием элементов тектоники, но и реакцией проводников и осланцеванных зон контактов интрузий габбро-диабазов.

Отмечается также очень локальная аномалия на восточном краю участка. Она четко прослеживается по всем маршрутам, показанным на рис. 3. Для нее характерно отрицательное и довольно большое значение фазового параметра, которое в таком сочетании с амплитудным не наблюдается больше нигде. При сопоставлении с геологической картой возникает предположение о связи аномалии с разломом. Удивляет и плановое совпадение аномальной зоны с железнодорожной ветвью. Являясь хорошим проводником, железная дорога могла бы дать аномалию по амплитуде на близких расстояниях, однако значительная высота полета, относительно малая площадь поперечного сечения рельсов и присутствие преимущественной аномалии фазового параметра не дает возможности связать аномалию проводимости с железной дорогой. Съемки на других участках различными маршрутами с пересечением в различных направлениях других железнодорожных веток на той же рабочей высоте не отметили никаких заметных аномалий.

К западу в области распространения гранитного комплекса архея сколько-нибудь заметных аномалий не наблюдается. Это свидетельствует об относительно однородном геологическом строении участка. Отдельные аномалии интенсивностью 10—25%, отмечаемые над полем архейских гранитов по отдельным маршрутам, связываются, по-видимому, с локальным проявлением или изменением петрографического состава пород. Наличие рыхлых четвертичных отложений и относительно большая обводненность района (развитые болота и озерные осадки) увеличивают проводимость в области тектонических нарушений, которые и отмечаются зонами средней проводимости.

Изменения рельефа не отмечаются рельефными аномалиями. Если они и существуют, то амплитуда их лежит ниже уровня аппаратурных и геологических помех. Это еще раз подтверждает положение об избирательной глубинности метода, когда максимальный сигнал вторичного поля, как отмечалось выше, происходит от проводников, погруженных на 20—30 *м* ниже дневной поверхности.

Примером площадной съемки методом ВМП может быть карта графиков амплитудного параметра (рис. 4). Съемка выполнялась на оптимальной для района частоте 1225 *гц*. Часть территории закрыта четвертичными отложениями, поэтому сопоставление с геологическими данными могло быть на ограниченном участке. Съемкой охвачен район месторождения пирито-пирротиновых руд и отдельные участки рудопроявления.

В пределах участка карты отмечается несколько вытянутых зон проводимости различной интенсивности. Главная зона определяет рудовмещающую толщу графитистых, графито-серицитокварцевых, хлорито-актинолитовых, талько-хлоритовых и других сланцев, среди которых крутопадающими линзами мощностью до 10—15 *м* залегают основные рудные тела. Эти породы и руды со сравнительно низким сопротивлением. В зависимости от условий залегания, структуры и обогащения их проводящими компонентами сопротивление колеблется (по данным наземных геофизических исследований) от единиц до 1000 *ом. м*. Аномалии имеют локальную форму и интенсивность, достигающую над основными рудными телами 70%. Такие же интенсивности обусловливаются хорошей проводимостью и значительной мощностью проводника. Так как вмещающие породы и руды имеют сопротивление одного порядка, то выделить аномальный эффект от рудных тел невозможно. Однако наиболее интенсивные аномалии наблюдаются в области установленных рудных объектов.

Более детально качественно оценить разрешающую способность метода и установить связь между интенсивностью амплитудного и

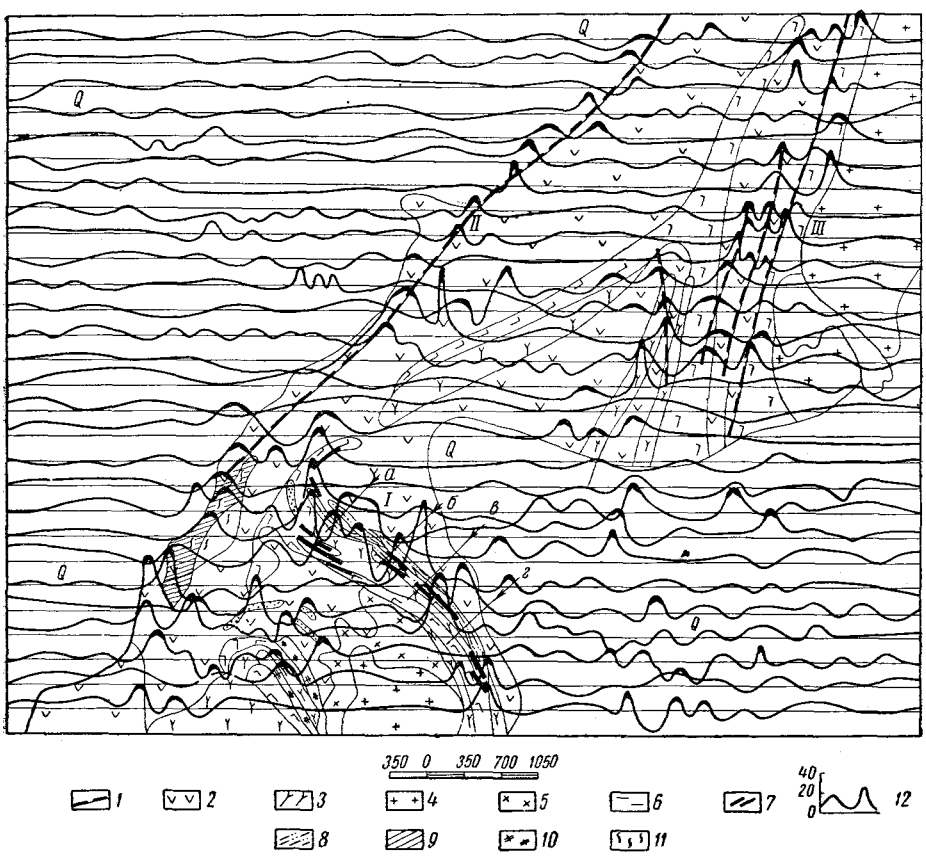


Рис. 4. Карта графиков амплитудного параметра района рудопроявления:
I—III — аномальные зоны; *1* — линии тектонических нарушений; *2* — метадиабазы; метагаббродиабазы; *3* — амфиболиты; *4* — граниты; *5* — гранодиориты; *6* — порфириты и плагиопорфириты; *7* — рудные тела; *8* — графито-серицито-кварцевые сланцы; *9* — ультраосновные тела; *10* — метаперидотиты и метапириксениты; *11* — биотито-амфиболовые гнейсы; *12* — графики амплитудного параметра

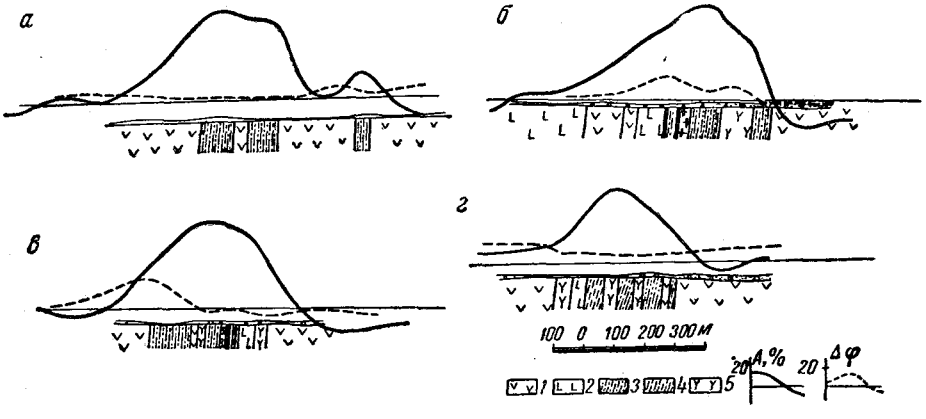


Рис. 5. Геологические разрезы через рудное поле с наложенными графиками амплитуды и фазы:
а—г — маршруты (по рис. 4); *1* — метадиабазы; *2* — порфириты и плагиопорфиры; *3* — графито-серицито-кварцевые сланцы; *4* — графитистые сланцы с сульфидным рассеянным материалом; *5* — амфиболиты

фазового параметров с различной мощностью проводящих тел можно по рис. 5, где представлено четыре геологических разреза через рудовмещающую толщу с наложенными графиками амплитуды и фазы. Аномалиями амплитудного параметра отмечена вся рудовмещающая толща общей мощностью около 250 *м*. Она сложена отдельными крутопадающими пластами различных проводящих сланцев. Сопротивление их варьирует в пределах, указанных выше. Близко залегающие друг от друга пласты определяют суммарный эффект вторичного поля. Всей пачке сланцев соответствует одна амплитудная аномалия. Иногда (например, профили *а* и *б*) проводники отмечены раздельными аномалиями, причем интенсивность последних определяется видимой мощностью пласта. Расчленение аномалии от проводников наблюдается при мощности разделяющих непроводящих пород более 150—200 *м* (для высоты полета 40 *м*). Аномальные эффекты от отдельных проводников (см. рис. 5, *б*) получаются при мощности проводников от 40 *м*.

Фазовые характеристики пластов при принятой геометрии системы двух рамок носят менее выраженный характер, и фазовым параметром отмечаются в одних случаях проводящие пласты графитистых и графито-серицито-кварцевых сланцев и рудных объектов, в других — контакты проводящих и непроводящих пород. Фазовые аномалии иногда более дифференцированы, но менее интенсивны и часто совсем не сопровождают амплитудные аномалии. По-видимому, форма кривых фазового параметра очень зависит от мощности и электрических свойств наносов. Однако недостаточность фактического материала не дает права на более однозначный вывод.

Две другие выдержанные проводящие зоны *2* и *3* (см. рис. 4) северо-северо-восточного простирания ограничивают синклинальную зону развития эффузивно-сланцевой толщи нижнего и среднего протерозоя среди архейского и протерозойского комплексов гранитов, гранодиоритов. Эти зоны, отмечаемые аномалиями амплитудного параметра интенсивностью до 15—30% и шириной до 0,5 *км*, четко ограничивают смену изверженных и метаморфических пород и прослеживаются по всему участку съемки. По геологическим данным, аномальная зона *2* отождествляется с разломом. Меняющаяся интенсивность зоны по простиранию связана с неравномерным распределением в приконтактовой зоне разлома графито-серицито-кварцевых, хлорито-серицито-кварцевых сланцев и измененных основных эффузивов парандовской серии. Область зоны, тяготеющая к рудопроявлению и отличающаяся повышенной интенсивностью амплитудного параметра (в южной части), связана с приконтактовой частью ультраосновных тел и основных эффузивов. Она может быть осланцована в приконтактовой части и обогащена сульфидной вкрапленностью, что понижает среднее сопротивление пород и приводит к резкому увеличению амплитуды вторичного поля. При сопоставлении данных наземных геофизических и геологических работ с данными аэроэлектромагнитной съемки, видно, что наиболее интенсивные аномалии амплитуды южной части относятся к области развития ультраосновных тел (см. рис. 4). Проводящая зона *III* ограничивает восточное крыло синклинальной структуры и отмечается рядом параллельных проводящих осей. Аномальная зона, совпадающая с основным направлением разлома, приурочена к контакту метадиабазов, метапорфиритов, графито-серицитовых и других сланцев с магматическим комплексом архея. Группы аномалий, соответствующие осям проводимости, имеют резко колеблющуюся интенсивность амплитудного параметра и относятся, как и западная зона *II*, к рассланцованным породам и разрывной тектонике. В этой области отмечен ряд рудопроявлений, и наиболее интенсивные аномалии связаны с ними. Весь участок, заключенный в пределы *II* и

II зон, характеризуется неспокойным вторичным электромагнитным полем, появление которого обусловлено, с одной стороны, наличием проводящих пластов различных сланцев в эффузивно-осадочной толще, а с другой — проявлением местной тектоники в виде сложной системы мелких разрывных нарушений.

Выводы

1. Метод аэроэлектроразведки вращающегося магнитного поля достаточно хорошо картирует эффузивно-осадочную толщу среди архейского и нижнепротерозойского комплексов гранитов и гранодиоритов. Малая мощность генераторного устройства и относительно большой уровень аппаратурных помех не позволяли в процессе работ увеличить разнос генераторной и приемной рамок. Это ограничило более полную проверку картировочных возможностей метода.

2. Хорошие поисковые возможности метода позволяют уверенно по аномалиям амплитудного и фазового параметров проводить непосредственно поиски проводящих объектов с сопротивлением 1—20 *ом. м* и мощностью от 40 *м* и более среди вмещающих пород проводимостью на порядок ниже.

3. Высокая разрешающая способность метода допускает применение метода ВМП на съемке масштаба 1 : 10 000 — 1 : 50 000, а избирательная глубинность, которой он обладает, дает возможность осуществлять поиски скрытых наносами проводящих объектов изометрической и пластообразной форм путем вертикального зондирования.

4. По поисковым и картировочным возможностям в ближайшее время метод ВМП займет ведущее место среди методов воздушной электроразведки. Комплексное использование его с другими аэрогеофизическими методами даст возможность получить наиболее полные характеристики разреза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шауб Ю. Б. Некоторые вопросы аэроэлектроразведки методом вращающего магнитного поля. Прикладная геофизика, 1961, № 29.

2. Котюк А. Ф. Анализ схем аэроэлектроразведки методом индукции. Изд-во СО АН СССР, 1961.

3. Шауб Ю. Б. О двух вариантах измерений в аэроэлектроразведке методом вращающегося магнитного поля. Информ. сб. ВИТР, 1959, № 19.

4. Каменецкий Ф. М., Кауфман А. А., Якубовский Ю. В. О выборе оптимальной частоты при индуктивном методе разведки. Изв. АН СССР. Серия геофиз., 1957, № 2.

5. Hedstom E. H., Parasius D. S. Geophysical Prospecting, 1958, v. VI, № 4.