

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ИМПЕДАНСНЫХ ДАННЫХ РАДИОКИП СВЕРХДЛИННОВОЛНОВЫХ РАДИОСТАНЦИЙ С ПОСТРОЕНИЕМ ДВУХСЛОЙНЫХ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗРЕЗОВ

ДАВЫДОВ В. А.

Радиокомпарация и пеленгация (радиокип) полей сверхдлинноволновых радиостанций (СДВР) относится к безгенераторным электроразведочным технологиям, позволяющим оперативно получить данные об электрических свойствах геологической среды. Основным назначением метода радиокип СДВР является электропрофилирование, однако при проведении импедансных наблюдений есть возможность пересчитать профильные данные кажущихся сопротивлений в двухслойные геоэлектрические разрезы. Целью представленной работы является определение корректности построения таких разрезов и их соответствия реальной геологической обстановке. К основным задачам исследований относится сравнение получаемых геоэлектрических разрезов радиокип с результатами вертикальных электрических зондирований на различных объектах. Полевые работы проводились в уральском регионе, вблизи известных месторождений золота (Свердловское), меди (Волковское) и хромитов (Юго-Западное). Проведенные исследования показали, что получаемые разрезы радиокип СДВР соответствуют модели двух контрастных сред: хорошо проводящих рыхлых образований и высокоомных коренных пород. Таким образом, получаемая граница раздела в большинстве случаев соответствует рельефу коренных пород. Результаты интерпретации импедансных измерений радиокип СДВР могут использоваться для оценки общей мощности коры выветривания, выбора точек зондирований другими электромагнитными методами, а также для повышения детальности получаемых геоэлектрических разрезов.

Ключевые слова: электроразведка; радиокип; электромагнитные измерения; импеданс; геоэлектрический разрез.

Возможность применения электрометрии для геологических исследований основывается на различии электрических свойств горных пород. При этом наиболее распространенными являются две базовые модели геоэлектрического разреза. Горизонтально-слоистый разрез характеризуется дифференциацией удельного электрического сопротивления (УЭС) пород по глубине, что наблюдается в платформенных областях. В горных районах, где контакты пород близки к вертикальным, основные изменения сопротивлений происходят вдоль профиля. Горизонтально-слоистая модель заложена в основу электромагнитных зондирований, а при изучении вертикально-слоистых сред используют методы электропрофилирования. Однако в древних складчатых областях, таких как Урал, чаще всего наблюдается комбинация этих двух типов разрезов: вертикально-слоистые коренные породы перекрыты чехлом горизонтально-слоистых отложений. Для достоверного изучения их геоэлектрического строения необходимо использовать

частую сеть зондирований или привлекать томографические установки. Однако данные виды исследований являются довольно затратными, так как требуют выполнения больших объемов работ для получения высокой детальности. В этом случае оптимально воспользоваться электромагнитными методами экспресс-съемки, сочетающими скорость электропрофилирования и основные преимущества зондирования. Такими достоинствами обладают бесконтактное электрическое профилирование с несколькими разностями [1], дистанционно-частотная электромагнитная съемка [2] и некоторые другие методы исследований. Одним из таких методов является радиокип – радиокомпарация и пеленгация удаленных сверхдлинноволновых радиостанций (СДВР). За рубежом используется аббревиатура VLF (Very Low Frequency), причем обозначение VLF-EM (ElectroMagnetic) применяется при изучении типпера, а VLF-R (Resistivity) – импеданса электромагнитного поля. Импедансные измерения радиокип СДВР позволяют за короткое время получать большие массивы данных кажущихся сопротивлений по площади работ. При этом профильные наблюдения можно пересчитать в геоэлектрические разрезы с помощью принципов, принятых для расчета стационарных физических полей. Целью представленной работы является определение достоверности построения таких разрезов для простой двухслойной модели геологической среды. К основным задачам исследований относится сравнение получаемых геоэлектрических разрезов радиокип с результатами классических вертикальных электрических зондирований (ВЭЗ) на различных геологических объектах.

Методика полевых и камеральных работ. Полевые измерения методом радиокип проводились 2-канальной малогабаритной приемно-регистрирующей аппаратурой «ОМАР-2м», разработанной в Институте геофизики УрО РАН [3]. Осуществлялись наблюдения ортогональных компонент электромагнитного поля сигналов сверхдлинноволновых радиостанций системы дальней навигации РСДН-20 «Альфа». Режим работы станций, характеристики передаваемых сигналов и особенности их регистрации рассматривались ранее [4]. Магнитная компонента H_{ϕ} измерялась с помощью резонансного индукционного датчика РМД-80 с чувствительностью $80 \text{ В} \cdot \text{м/А}$ на частоте $12,65 \text{ кГц}$. Электрическая составляющая E_r снималась со стелющейся 10-метровой линии, протягиваемой вдоль профиля. Чтобы исключить влияние вертикальной компоненты E_z , возникающей при перепадах рельефа, для измерения E_r использована симметричная конструкция электрической антенны [5]. На каждой точке проводилась одновременная запись измеряемых составляющих электромагнитного поля в течение 20–30 с. Отношение амплитуды электрической компоненты сигнала к ортогональной магнитной составляющей определяет импеданс среды $Z = E_r/H_{\phi}$, или волновое сопротивление, пропорциональное электрическому сопротивлению подстилающих пород. Результаты измерений представляются в виде кажущихся удельных электрических сопротивлений, вычисленных через модуль импеданса [6]. Имея значения кажущихся сопротивлений и фаз импеданса вдоль профиля, можно по специальной программе рассчитать параметры двухслойного разреза. Для инверсии данных радиокип автором использована программа 2LAYINV [7], разработанная в университете Оулу (Финляндия).

Чтобы оценить достоверность получаемых двухслойных разрезов радиокип, на эталонных геологических объектах проводились вертикальные электрические зондирования по стандартной методике наблюдений [8]. Для одномерной (1D) интерпретации ВЭЗ использовалась программа IP12Win, созданная в МГУ [9].

Результаты работ. Полигон Института геофизики. Для тестирования новой аппаратуры в полевых условиях и проведения опытно-методических работ был

создан контрольный полигон Института геофизики УрО РАН. Он находится на территории небольшого золоторудного месторождения Свердловское, вблизи контакта Верх-Исетских гранитоидов с Новоалексеевским габбровым массивом. Основной профиль пересекает разлом с зоной дробления и метасоматическими изменениями пород. Территория перекрыта слоем элювиально-делювиальных рыхлых отложений коры выветривания мощностью 5–10 м. При изучении полигона применялась гравимагнитная съемка, малоглубинная сейсморазведка, радиометрия и электроразведочные методы. На площади полигона функционируют 3 гидрогеологических скважины, а на контрольном профиле пробурена инженерно-геологическая скважина С-4, встретившая коренные породы на глубине 9,5 м.

Результаты интерпретации вертикальных электрических зондирований (ВЭЗ) указывают на преимущественно двухслойное строение геоэлектрического разреза (рис. 1, а). Это является хорошей предпосылкой для инверсии данных радиокип СДВР, использующей двухслойную модель среды, включающей рыхлые отложения и коренные породы (рис. 1, б).

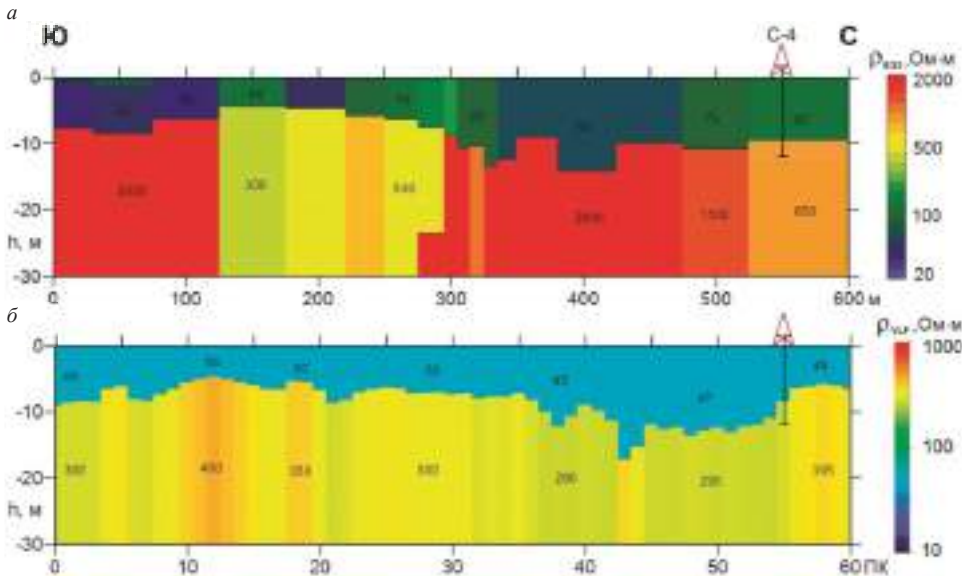


Рис. 1. Геоэлектрические разрезы по контрольному профилю Института геофизики: а – одномерный разрез ВЭЗ; б – двухслойный разрез радиокип СДВР (цифрами указаны значения УЭС в отмеченных блоках)

Полученные разрезы довольно близки между собой, в особенности по форме рельефа коренных пород. Следует отметить, что мощность рыхлых отложений, определенная по ВЭЗ и другим геофизическим методам, неплохо согласуется с результатами радиокип СДВР. В то же время полученные геоэлектрические разрезы отличаются друг от друга по величинам и вариациям удельных электрических сопротивлений. Во-первых, это объясняется отличием физико-геологических моделей и алгоритмов инверсии двух программ. Во-вторых, это связано с различием в прохождении постоянных и переменных токов в неоднородной среде, с разной пористостью и влагонасыщенностью. Электрические сопротивления коренных пород по данным радиокип в целом меньше и составляют 280–400 Ом · м. Результаты ВЭЗ более дифференцированы и варьируют в пределах от 300 до 2000 Ом · м. Величины УЭС рыхлых отложений также отличаются и составляют для ВЭЗ 30–90 Ом · м, а для радиокип СДВР – 45–55 Ом · м.

Волковский рудник. Волковское месторождение – одно из наиболее крупных медных месторождений на Урале. Оно приурочено к одноименному габбровому массиву, расположенному в западной части Тагильского синклинория. Массив сложен габбро, габбро-диоритами и диоритами, строение – складчатое. Медно-сульфидное оруденение тяготеет к сводовой части антиклинальной складки и образует зону из многочисленных линзовидных залежей и вкраплений. Несколько ниже располагаются титаномагнетитовые руды, имеющие вкрапленный и шпировый характер. Преобладающий тип руд – ванадиево-железо-медные, основные минералы руд – борнит, халькопирит, титаномагнетит и апатит. Главным промышленным компонентом является медь, существенное значение имеют также железо, ванадий, титан, фосфор [10].

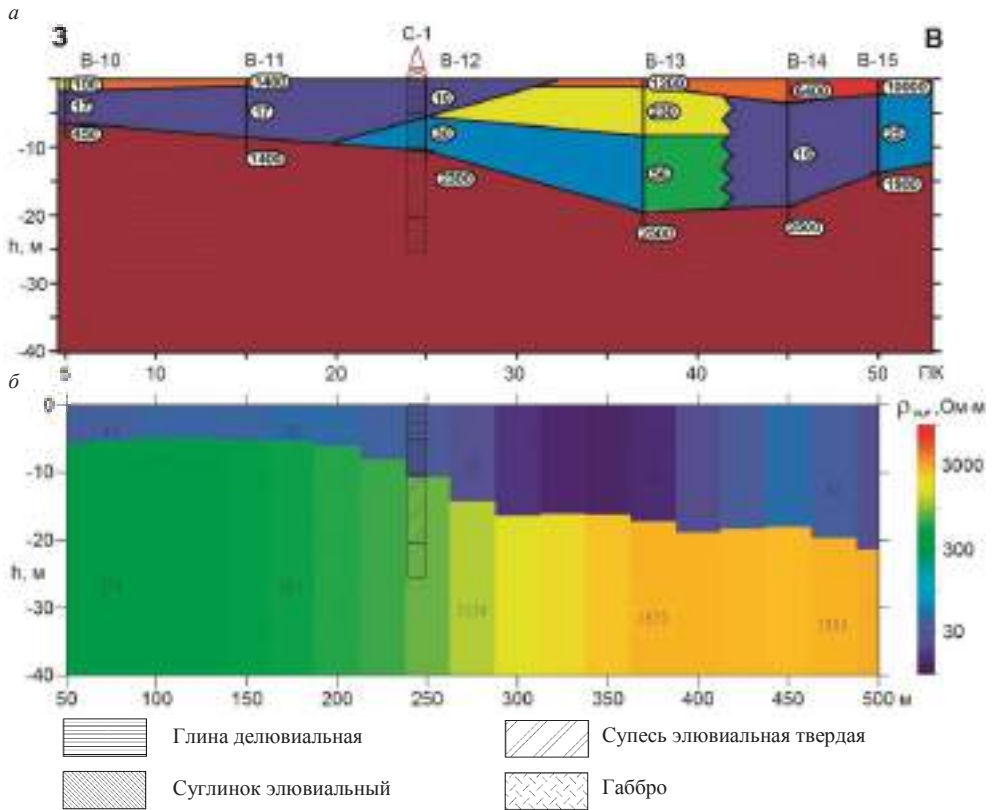


Рис. 2. Результаты электроразведочных работ на территории Волковского рудника (Северный Урал):

a – геоэлектрический 1D-разрез ВЭЗ; *b* – двухслойный разрез радиокопии СДВП (цифрами указаны значения УЭС в отмеченных блоках)

После окончания разработки первого карьера Волковского месторождения на его борту скопился отвал некондиционной руды, планируемый под кучное выщелачивание. Для контроля за экологическим состоянием среды были проведены инженерно-геологические исследования условий залегания подземных вод вблизи площадки отвала. К задачам исследований относилось выделение горизонтов потенциального дренажа подземных кислых вод в долину р. Лая. Состав работ включал бурение инженерно-геологических скважин и геофизические исследования. По результатам бурения выяснено, что коренные породы представлены габбро средней прочности, залегающими на глубине 6–20 м и более. Рыхлые от-

ложения представлены насыпными грунтами, делювиальными глинами и элювиальными суглинками с включениями щебня. По двум широтным профилям по обе стороны отвала были проведены измерения методами ВЭЗ и аудио магнитотеллурическими зондированиями (АМТЗ). В результате исследований выяснено, что основной дренаж стоков приурочен к коре выветривания, трещинные воды в коренных породах не обнаружены [11].

Один из геофизических профилей проходил вблизи линии электропередачи, поэтому данные АМТЗ оказались сильно зашумлены промышленными помехами. Для подстраховки по данному профилю были проведены измерения радиокип СДВР, не подверженные существенному влиянию индустриальных помех. По результатам ВЭЗ геоэлектрический разрез содержит от трех до четырех слоев (рис. 2, а).

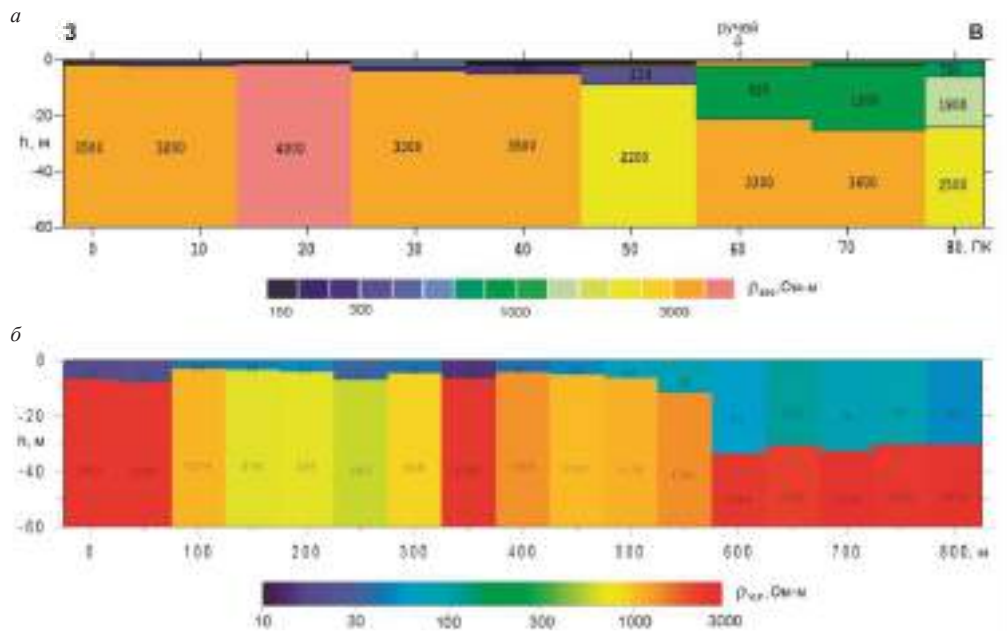


Рис. 3. Результаты электромагнитных зондирований в долине руч. Визувшор (Полярный Урал): а – геоэлектрический 1D-разрез ВЭЗ; б – двухслойный разрез радиокип СДВР (цифрами указаны значения УЭС в отмеченных блоках)

Поверхностный слой насыпных грунтов (щебень) имеет высокие сопротивления (более 1000 Ом · м), далее на фоне низкоомных глин и суглинков (16–30 Ом · м) контрастно выделяются покрытые твердой супесью высокоомные коренные породы (до 2500 Ом · м). Локальный слой с сопротивлением 230 Ом · м вероятнее всего соответствует линзе песка. Согласно результатам двух электроразведочных методов рельеф основания разреза практически совпадает, отличаясь только на последних пикетах (рис. 2). Также согласованно изменяются сопротивления коренных пород, постепенно повышаясь от начала к концу профиля. Возможно, это связано с повышенной минерализацией габбро рудными минералами в западной части профиля (у борта карьера), постепенно снижающейся при удалении от месторождения.

Массив Рай-Из. Исследуемая площадь относится к Приуральскому району Ямало-Ненецкого автономного округа, в 60 км к северо-северо-западу от г. Лабитнанги. Участок работ находится в районе впадения руч. Визувшор

в долину р. Макар-Рузь. В геологическом плане территория входит в состав юго-западной части хромитоносного гипербазитового массива Рай-Из. Вмещающие породы массива представлены дунитами и гарцбургитами офиолитовой серии. Электрические сопротивления исследованных образцов имеют высокие значения, что достаточно характерно для скальных ультраосновных пород. В среднем УЭС горных пород находятся в пределах 3000–6000 Ом · м, к низкоомным следует отнести трещиноватые серпентинизированные разности (<1000 Ом · м). Для выяснения мощности рыхлых отложений на склонах участка и в долине р. Макар-Рузь, в устье руч. Визувшор, были проведены электроразведочные работы методом ВЭЗ и радиокип СДВР. Результаты ВЭЗ показывают, что величина элювиально-делювиальных отложений в горной части профиля (ПК0–50) составляет 2–3 м, увеличиваясь в районе ручья (ПК50–60) до 8–10 м, мощность долинных отложений (ПК70–80) достигает 25 м (рис. 3, а).

По данным радиокип, мощность рыхлых отложений на склонах выше и может превышать 5 м, в долине она резко увеличивается и держится в пределах 30 м (рис. 3, б). Таким образом, величина аллювиальных и флювиогляциальных отложений в долине р. Макар-Рузь составляет по электроразведочным данным 25–30 м.

Электрические сопротивления коренных пород по результатам обоих методов имеют один порядок, а вот УЭС рыхлых отложений по данным ВЭЗ значительно выше. Это объясняется грубообломочным составом делювиальных (щебень) и аллювиальных отложений (галка, валуны). Такие поверхностные отложения создают значительные трудности в заземлении и прохождении постоянного тока, но не препятствуют свободному распространению переменных токов.

Следует отметить, что сопротивления ультраосновных пород, измеренные при переменном токе, отличаются от измерений при постоянном токе более низкими значениями и большей дифференциацией. Причиной может служить разная степень серпентинизации пород с образованием магнетита. Магнетит в серпентинитах может иметь изолированную или проводящую структуру типа «объемной магнетитовой сетки» [12]. Характер структуры будет сильно сказываться на электрических свойствах при измерениях с постоянным током. При бесконтактных измерениях величина электрического сопротивления определяется амплитудой вихревых токов, которые будут зависеть в большей степени от общего количества магнетита, а не от его структурных связей. В данном случае присутствуют серпентиниты непроводящей структуры, поэтому сопротивления по данным ВЭЗ высокие и мало изменчивые. Если сделанное предположение верно, то уменьшение сопротивления по результатам радиокип (например, на ПК10–30) может свидетельствовать об увеличении степени серпентинизации дунит-гарцбургитового комплекса пород. В целом геоэлектрические разрезы хорошо согласуются между собой и соответствуют реальной геологической обстановке.

Таким образом, проведенные исследования показали, что инверсия данных радиокип СДВР позволяет получать вполне адекватные двухслойные геоэлектрические разрезы. Они отвечают модели двух контрастных по проводимости сред: хорошо проводящих рыхлых образований и высокоомных коренных пород. Недостаток технологии заключается в замене нескольких слоев одним эквивалентным слоем, что делает невозможным расчленение рыхлых отложений и вносит искажения в получаемые значения удельных электрических сопротивлений. В верхней части разреза может присутствовать большое количество разнородных маломощных слоев, однако результаты определения общей мощности верхней пачки по ВЭЗ и радиокип довольно хорошо согласуются. Таким образом, получаемая граница раздела в большинстве случаев соответствует рельефу коренных пород.

Несмотря на имеющиеся недостатки, метод радиокип СДВР успешно применяется для оперативной геофизической съемки больших площадей в короткие сроки. При современных методах обработки он может использоваться для оценки общей мощности коры выветривания, выбора точек зондирований другими электромагнитными методами, а также для повышения детальности получаемых геоэлектрических разрезов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Oldenborger G. A., LeBlanc A.-M. Capacitively coupled resistivity inversion using effective dipole lengths: technical note 6. Geological Survey of Canada, 2013. 7 p.
2. Delefortrie S., Saey T., Van De Vijver E., De Smedt Ph., Missiaen T., Demerre I., Van Meirvenne M. Frequency domain electromagnetic induction survey in the intertidal zone: Limitations of low-induction-number and depth of exploration // *Journal of Applied Geophysics*. 2014. Vol. 100. P. 14–22.
3. Давыдов В. А. Измерительная аппаратура ОМАР-2 для электромагнитных методов исследований // *Уральский геофизический вестник*. 2015. № 1(25). С. 37–41.
4. Давыдов В. А. Электроразведка методом радиокип в сверхдлинноволновой модификации с использованием радиостанций системы дальней навигации РСДН-20 («Альфа») // *Инженерные изыскания*. 2014. № 2. С. 65–70.
5. Давыдов В. А. Эквивалентные схемы и основные характеристики различных датчиков электромагнитных сигналов в широкой полосе частот // *Уральский геофизический вестник*. 2014. № 1(23). С. 46–54.
6. Гордеев С. Г., Седельников Э. С., Тархов А. Г. Электроразведка методом радиокип. М.: Недра, 1981. 132 с.
7. Pirttijärvi M. Laterally constrained two-layer inversion of VLF-R measurements: user's guide. Finland, University of Oulu. 2006. 12 p.
8. Инструкция по электроразведке. Л.: Недра, 1984. 352 с.
9. Бобачев А. А., Модин И. Н., Шевнин В. А. Программа IPI2Win: руководство пользователя. М.: МГУ, 2003. 25 с.
10. Месторождения металлических полезных ископаемых / В. В. Авдонин [и др.]. М.: Академический проект, 2005. 720 с.
11. Давыдов В. А. Применение аудиоманнитотеллурических экспресс-зондирований при изучении инженерно-геологических условий рудных месторождений // *Разведка и охрана недр*. 2016. № 6. С. 32–36.
12. Вашгаль Д. С. Об электропроводности гипербазитов // *Теория и практика электромагнитных методов исследования вещества и структур Земли: сб. статей*. Свердловск: УНЦ АН СССР. 1985. С. 119–124.

Поступила в редакцию 19 сентября 2017 года

INTERPRETATION OF IMPEDANCE VERY LOW FREQUENCY RADIO STATIONS DATA WITH PLOTTING OF TWO-LAYER GEOELECTRIC SECTIONS

Davydov V. A. – Institute of Geophysics, the Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, the Russian Federation. E-mail: davyde@yandex.ru

Radio comparison and direction finding of Very Low Frequency (VLF) radio stations refers to transmitterless geoelectric techniques allowing to obtain data about electrical properties of environment operatively. A basic purpose of VLF method is the electro profiling, however at execution of impedance observations there is a possibility to convert profile data of apparent resistance into two-layer geoelectric sections. The purpose of the presented research is definition of reasonableness of such sections plotting and their conformity to real geologic situation. Comparison of gained VLF geoelectric sections with results of vertical electric sounding (VES) on various objects, refers to the primary goals of researches. A field work was fulfilled in the Ural region, nearby from known deposits of gold (Sverdlovsk), copper (Volkovskoe) and chromites (Iugo-Zapadnoe). The carried out researches have shown, that gained sections of VLF match to the model of two contrast media: well conducting friable formations and high-resistance bedrocks. Thus, the gained interface in most cases matches to a landform of bedrocks. Results of interpretation of impedance VLF measurements can be used for general depth of residual soil estimation, choice of sounding sites by other electromagnetic methods, and also for gained geoelectric sections minuteness increase.

Key words: electrical exploration; VLF; electromagnetic measurements; impedance; geoelectric section.

REFERENCES

1. Oldenborger G. A., LeBlanc A.-M. Capacitively coupled resistivity inversion using effective dipole lengths: technical note 6. Geological Survey of Canada. 2013. 7 p.

2. Delefortrie S., Saey T., Van De Vijver E., De Smedt Ph., Missiaen T., Demerre I., Van Meirvenne M. Frequency domain electromagnetic induction survey in the intertidal zone: Limitations of low-induction-number and depth of exploration. *Journal of Applied Geophysics*, 2014, vol. 100, pp. 14–22.
 3. Davydov V. A. [Measuring equipment OMAR-2 for electromagnetic methods of researches]. *Ural'skii geofizicheskii vestnik – Ural Geophysical Herald*, 2015, no. 1(25), pp. 37–41. (In Russ.)
 4. Davydov V. A. [Electrical exploration by the very low frequency radio-interferometry method using radio stations of the RSDN-20 («Alpha») long-range navigation system]. *Inzhenernye izyskaniia – Engineering Survey*, 2014, no. 2, pp. 65–70. (In Russ.)
 5. Davydov V. A. [Equivalent circuits and the basic characteristics of different electromagnetic sensors in the broad frequency band]. *Ural'skii geofizicheskii vestnik – Ural Geophysical Herald*, 2014, no. 1(23), pp. 46–54. (In Russ.)
 6. Gordeev S. G., Sedel'nikov E. S., Tarkhov A. G. *Elektrorazvedka metodom radiokip* [Electrical exploration using the VLF method]. Moscow, Nedra Publ., 1981. 132 p.
 7. Pirttijärvi M. Laterally constrained two-layer inversion of VLF-R measurements: user's guide. Finland, University of Oulu. 2006. 12 p.
 8. Direction on electrical exploration. Leningrad, Nedra Publ., 1984. 352 p. (In Russ.)
 9. Bobachev A. A., Modin I. N., Shevnin V. A. *Programma IPI2Win: rukovodstvo pol'zovatel'ia* [IPI2Win software: user's guide]. Moscow, MSU Publ., 2003. 25 p.
 10. Avdonin V. V., and others. *Mestorozhdeniia metallicheskih poleznykh iskopaemykh* [Metallic minerals deposits]. Moscow, Akademicheskii proekt Publ., 2005. 720 p.
 11. Davydov V. A. [The use of AMT express-sounding at the investigation of engineering-geological conditions of ore deposits]. *Razvedka i okhrana nedr – Prospect and Protection of Mineral Resources*, 2016, no. 6, pp. 32–36. (In Russ.)
 12. Vashgal' D. S. [Regarding the electrical conductivity of ultrabasic rocks]. *Teoriia i praktika elektromagnitnykh metodov issledovaniia veshchestva i struktur Zemli: sb. statei* [Collected works “Theory and practice of electromagnetic research methods of the Earth substance and structures”]. Sverdlovsk, Urals Scientific Center AS USSR Publ., 1985, pp. 119–124. (In Russ.)
-