

УДК 550.837.7

Ю.Б. Башкуев, Д.Г. Буянова

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД АЛДАНО-СТАНОВОГО НАГОРЬЯ ПО ДАННЫМ СВЕРХДЛИННОВОЛНОВОГО РАДИОИМПЕДАНСНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ С БОРТА САМОЛЕТА

Рассмотрены статистические характеристики эффективного сопротивления ρ различных комплексов горных пород Алдано-Станового нагорья в сверхдлинноволновом диапазоне радиоволн, полученные методом СДВ радиоимпедансного зондирования с борта самолета в районах развития мерзлоты и кристаллических массивов. Исследованы 6 участков площадью 30 тыс. км².

Ключевые слова: Алдано-Становое нагорье, радиоимпедансное зондирование, сверхдлинные (СДВ) радиоволны, аэросъемка, электрические свойства, статистические характеристики горных пород.

В связи со строительством нефтепровода «Восточная Сибирь-Тихий Океан», началом эксплуатации Амуро-Якутской железной дороги на участке «Беркакит-Томмот» и развитием горно-рудной отрасли Южной Якутии актуальной стала задача изучения электрических свойств горных пород Алдано-Станового нагорья. Статистические характеристики эффективного сопротивления ρ различных комплексов горных пород необходимы для решения практических задач транспортного строительства, инженерной геофизики, геологии, электроэнергетики и телекоммуникаций.

В литературе имеется очень мало данных по электрическим свойствам горных пород Алдано-Станового нагорья [1]. Цель статьи – дать обобщенное статистическое описание электрических свойств основных комплексов горных пород Алдано-Станового нагорья по данным радиоимпедансных зондирований с борта самолета в сверхдлинноволновом

(СДВ) диапазоне электромагнитных волн.

В бездорожной горно-лесистой, пустынной и тундровой областях возникает необходимость использования методов определения электрических свойств верхней части земной коры с применением летательных аппаратов. Достоинство этих методов состоит в том, что они дают пространственное распределение эффективного сопротивления ρ и поверхностного импеданса δ исследованной территории в виде крупномасштабных геоэлектрических карт. Исследования эффективного сопротивления подстилающей среды в СДВ-СВ диапазонах электромагнитных волн с борта самолета выполнены в США, Канаде и России [2, 3].

Аппаратура и методика измерений

Аппаратура представляет трехканальный селективный микровольтметр-фазометр, измеряющий амплитудно-фазовую структуру СДВ электромагнитного поля вблизи границы

раздела «земля – воздух» [3, 4]. Антенная система состоит из двух несимметричных антенн для приема вертикальной E_z и горизонтальной E_x составляющих электрического поля и рамочной антенны для приема горизонтальной составляющей магнитного поля H_y . В аппаратуре использован метод фазоквадратурной компенсации помехи от вертикальной составляющей E_z в канале для приема E_x [3]. Однако при этом регистрируется не полный вектор E_x , а только его мнимая часть $\text{Im}E_x$, и, следовательно, измеряется мнимая часть приведенного поверхностного импеданса $\delta = \text{Re}\delta - i\text{Im}\delta$, где $\text{Im}\delta = (\text{Im}E_x)/(H_y \cdot Z_0)$, Z_0 – характеристический импеданс вакуума. Над однородным проводящим полупространством $\text{Im}\delta = \text{Re}\delta$, $\varphi_\delta = \arctg \text{Im}\delta/\text{Re}\delta = -45^\circ$ и эффективное сопротивление $\rho_{\text{э}}$ вычисляется по формуле:

$$\rho_{\text{э}} = 120\lambda \left[(\text{Im}E_x)/(H_y \cdot Z_0) \right]^2$$

$$\rho_{\text{э}} = 120\lambda \left[(\text{Im}E_x)/(H_y \cdot Z_0) \right]^2, \quad (1)$$

где $\rho_{\text{э}}$ – эффективное электрическое сопротивление среды, λ – длина волны в воздухе, м. Формула для определения $\rho_{\text{э}}$ справедлива с погрешностью не более 10% при условии $60\lambda/\rho_{\text{э}} \cdot \varepsilon \gg 10$, ε – относительная диэлектрическая проницаемость однородной среды. В частности на частотах 10–30 кГц при $\varepsilon \leq 10$ этому условию соответствуют $\rho_{\text{э}} < 18000 \div 6000$ Ом·м. Источниками электромагнитного поля служили СДВ радиостанции, работающие на частотах 17,4 и 22,3 кГц. При съемке использовалась равномерная сеть прямолинейных маршрутов длиной до 150–250 км и с расстоянием между ними от 0,5 до 10,0 км. Полеты выполнялись на высотах от 50 до 400 м со скоростью 140 – 180 км/ч. Калибровка измери-

тельной установки проводилась над однородной в пределах скин-слоя водной средой оз. Байкал при сопротивлении воды $\rho = 150$ Ом·м.

Методические погрешности, обусловленные вычислением $\rho_{\text{э}}$ по $\text{Im}\delta$ при $\varphi_\delta = -45^\circ$, а также погрешности при калибровке установки в полете и обработке СДВ сигнала дают общую погрешность определения $\rho_{\text{э}}$ не хуже $\pm(10-15)\%$. Эта оценка подтверждается сравнением данных на контрольных маршрутах и результатами наземных параметрических измерений. Важное достоинство радиоимпедансного зондирования с борта самолета в СДВ диапазоне состоит в его высокой пространственной разрешающей способности при определении геоэлектрических границ между проводящими и слабопроводящими типами горных пород, значительной глубинности и в высокой производительности аэросъемки для целей геоэлектрического картирования и инженерной геофизики в труднодоступных местностях.

Методика обработки результатов

Особенностью геоэлектрического строения Алдано-Станового нагорья является сложное пространственное распределение эффективного сопротивления верхней части земной коры, обусловленное его геолого-тектоническим строением. Исходные данные для статистических расчетов получены в результате аэрооблетов на самолете АН-2 в Южной Якутии (рис. 1) общей площадью свыше 30 тыс. км².

Под эффективным сопротивлением $\rho_{\text{э}}$ проводящей неоднородной среды (геоэлектрического разреза) на фиксированной частоте СДВ диапазона мы понимаем сопротивление некоторого фиктивного однородного изотропного полупространства, по



Рис. 1. Схема аэросъемочных работ на самолете АН-2. Республика Саха - Якутия (участки: 1 - Центральный Алдан, 1а - Нимгерканский, 1б - Канкунский, 2 - Восточный Алдан, 2а - Эльконкский, 3 - Становой)

значению равно его удельному электрическому сопротивлению (УЭС) на данной частоте. Эффективное сопротивление определяется по величине мнимой части импеданса (1). Слой скин-эффекта

$$h_c = 503 \sqrt{\rho_{\sim} / f} \quad (2)$$

изменяется в широких пределах и на частоте $f = 17,4$ кГц при $\rho_{\sim} = 100-20000$ Ом·м составляет 58-540 м, охватывая приповерхностную часть земной коры. Определение ρ_{\sim} проводилось в дискретных последовательностях точек, расположенных на маршруте аэросъемки через 100-400 м.

С целью получения статистических оценок ρ_{\sim} однородной в геологическом отношении области (комплекса горных пород) значения ρ_{\sim} объединялись в вариационные ряды, содержащие от 25 до 1544 величин ρ_{\sim} , по которым строились гистограммы распределения ρ_{\sim} . Форма гистограммы служила основным качественным критерием для выяснения правильности выделенной петрофизической группы. После уточнения выделенных групп вычислялись обобщенные показатели распределения ρ_{\sim} [5]:

среднее арифметическое значение

$$\overline{\rho_{\sim}} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \rho_{\sim j};$$

среднее значение логарифма

$$\overline{\lg \rho_{\sim}} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \lg \rho_{\sim j};$$

среднее геометрическое

$$\rho_{с.г.} = 10^{\overline{\lg \rho_{\sim}}}.$$

Сведения о законе распределения эффективного сопротивления ρ_{\sim} в литературе отсутствуют. Для проверки соответствия эмпирического распределения ρ_{\sim} нормальному или логнормальному законам использован приближенный метод, основанный на вычислении показателя асимметрии γ_3 и эксцесса γ_4 выборочного распределения [5].

Результаты дистанционного зондирования и их обсуждение

В Южной Якутии исследованы 6 участков общей площадью 30 тыс. км². Участки сложены метаморфическими и изверженными породами архея, карбонатно-терригенными породами кембрия и терригенными отложениями юрского возраста. Толщина покровных рыхлых отложений колеблется от единиц до нескольких десятков метров, удельное сопротивление - от десятков до первых тысяч Ом·м. На всей площади развиты тектонические нарушения различной ориентировки, зоны распространения которых отличаются узкими протяженными областями пониженных значений эффективного сопротивления ρ_{\sim} . Участки, сложенные метаморфическими и изверженными породами архея, такие как Эльконкский и Становой, имеют высокие значения ρ_{\sim} . Области развития кембрийских и юрских отложений, расположенные, в основном, в северной и южной частях иссле-

$N_{\text{ин}}$	Горные породы	Рабочая частота, кГц	N	$\overline{\rho_{\sim}} / \rho_{\text{с.г.}}$ Ом·м	$\sigma_p / \sigma_{\text{ср}}$	$\rho_{\text{макс}} / \rho_{\text{мин}}$ Ом·м	Участок, маршрут, район
	1	2	3	4	5	6	7
Кристаллические комплексы							
1.	Гранитоиды архейские	22,3	1052	$\frac{6200}{4700}$	$\frac{4600}{0,35}$	$\frac{36000}{250}$	Эльконкский
2.	Гранитоиды архейские	22,3	50	$\frac{4500}{3300}$	$\frac{3500}{0,32}$	$\frac{15000}{990}$	Становой, маршрут МЗ
3.	Гранитоиды архейские с непрерывным чехлом рыхлых отложений	17,4	1544	$\frac{3600}{2500}$	$\frac{3700}{0,42}$	$\frac{31700}{160}$	Центральный Алдан
Осадочные комплексы							
4.	Терригенные угленосные отложения юрского возраста	17,4	602	$\frac{750}{500}$	$\frac{730}{0,45}$	$\frac{5400}{50}$	Чульманская впадина
5.	Карбонатно-терригенные отложения кембрия	22,3	549	$\frac{1160}{840}$	$\frac{940}{0,38}$	$\frac{7400}{80}$	Северный склон Алданского нагорья

дуюемого района, обладают более низкими относительно архейских пород значениями ρ_{\sim} .

В геоэлектрике обычно принято исследовать электрические свойства горных пород по регионам с выделением типичных комплексов горных пород. Существенным затруднением при систематизации горных пород по электрическим свойствам является то обстоятельство, что их петрографическая классификация составлена по признакам (генезис, химизм, структура и др.), которые не находятся в прямой связи с их электрическими свойствами. В связи с этим описание горных пород (таблица) дано без излишней детализации. Группирование по комплексам пород выполнено по геологическим картам. Результаты определения ρ_{\sim} , полученные на переходных участках от одного комплекса пород к другому, не рассматривались.

Участки аэрообработ расположены на Алдано-Становом нагорье (рис. 1). В целом на всех участках наблюдается очень широкий диапазон изменения ρ_{\sim} : от 20 до 30 000 Ом·м и более. Установлена значительная дифференциация ρ_{\sim} между осадочными и кристаллическими комплексами горных пород (таблица). Для горных районов, сложенных кристаллическими породами, средние значения ρ_{\sim} составляют 4000-6000 Ом·м и выше, тогда как для межгорных впадин, заполненных осадочными породами, средние значения ρ_{\sim} обычно ниже 1000-2000 Ом·м. Электрические границы различных комплексов горных пород довольно точно совпадают с геологическими границами.

Распределения ρ_{\sim} основных комплексов горных пород региона положительно асимметричные, чаще всего

крутые слева и плоские справа (рис. 2). Распределение ρ_{\sim} ограничено условием $\rho_{\sim} > 0$, а изменения ρ_{\sim} происходят в широких пределах и достигают нескольких порядков (от 0,25 до 105 кОм·м). Распределение УЭС в однотипных комплексах горных пород обычно подчиняется логнормальному закону.

Полученные статистические характеристики ρ_{\sim} позволяют оценить степень геоэлектрической неоднородности однотипных в геологическом отношении комплексов, а также степень отличия между различными комплексами горных пород. Для большинства рассмотренных в таблице комплексов кристаллических пород закон распределения ρ_{\sim} соответствует логнормальному, например, для карбонатно-терригенных пород кембрия северного склона Алданского шита.

Величина $\rho_{с.г.}$ в случае логнормального распределения случайной величины ρ_{\sim} является медианой этого распределения, оценки среднего значения ρ_{\sim} и моды определяются по формулам [5]:

$$\begin{aligned} \overline{\rho_{\sim}} &= 10^{(\lg \rho_{\sim} + 1,1513 \sigma_{\lg \rho_{\sim}}^2)}, \\ \text{mod } \rho_{\sim} &= 10^{(\lg \rho_{\sim} - 2,3026 \sigma_{\lg \rho_{\sim}}^2)}. \end{aligned} \quad (3)$$

Следует отметить, что среднее геометрическое не является оценкой неизвестного математического ожидания, так как при увеличении числа наблюдений оно стремится к величине меньшей, чем математическое ожидание. Среднее же арифметическое при увеличении числа наблюдений в пределе приближается к неизвестному значению математического ожидания, независимо от вида функции распределения случайной величины. На этом основании в таблице приводятся значения ρ_{\sim} и $\rho_{с.г.}$. В частности, для рассмотренных в табл. 1

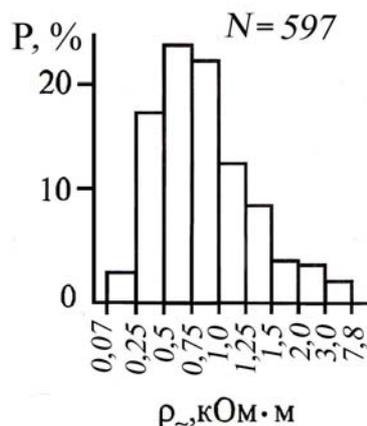


Рис 2. Гистограмма распределения ρ_{\sim} кристаллических пород кембрия северного склона Алданского шита на частоте 22,3 кГц

карбонатно-терригенных пород кембрия расчетные по формулам (3) величины $\overline{\rho_{\sim}}$ совпадают с табличными.

Анализ таблицы и гистограмм на рис. 2 – 3 показывает, что кристаллические горные породы характеризуются высокими фоновыми значениями ρ_{\sim} , превышающими 1–2 тыс. Ом·м. Низкие значения ρ_{\sim} обусловлены влиянием высокопроводящих осадочных пород верхней части разреза и связаны с наличием чехла рыхлых покровных отложений и коры выветривания толщиной от единиц до нескольких десятков метров (рис. 4). Сравнительно низкие сопротивления ρ_{\sim} некоторых кристаллических горных пород обусловлены также наличием проводящих включений (графитистые сланцы, магнетитовые породы и др.). Обнаженные участки кристаллических пород, соответствующие обычно возвышенным частям рельефа, имеют, как правило, высокие значения ρ_{\sim} , характерные для кристаллического фундамента. В целом можно отметить

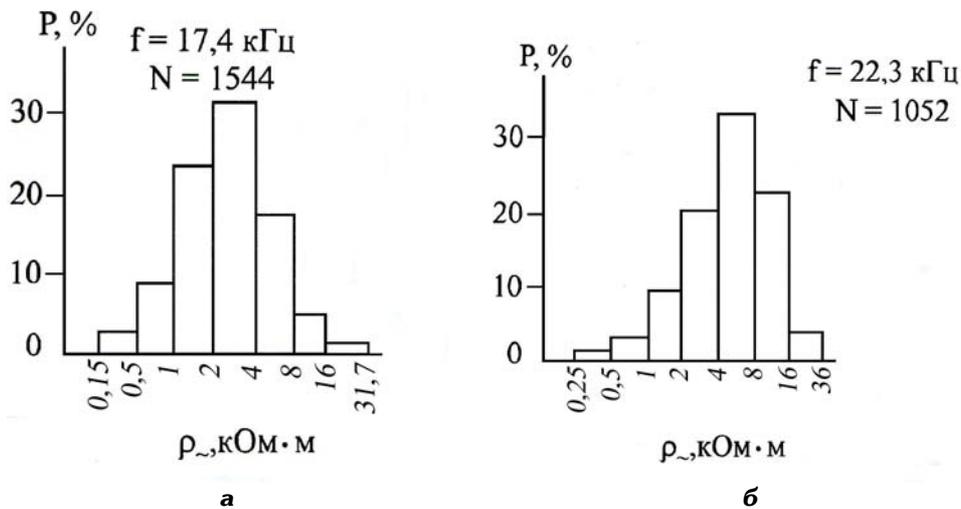


Рис. 3. Гистограммы эффективного сопротивления ρ_{\sim} : а – гранитоиды архейские с непрерывным чехлом рыхлых отложений (участок Центральный Алдан); б – гранитоиды архейские (участок Эльконкский)

рост средних значений ρ_{\sim} архейских гранитоидов от 2500 до 4700 Ом·м с увеличением широты места участка работ и степени расчлененности рельефа. Причиной может быть появление развитой криолитозоны (климатический фактор) и понижение минерализации поверхностных и грунтовых пород.

На некоторых участках гранитоидных массивов, перекрытых чехлом

рыхлых покровных отложений, получены бимодальные гистограммы распределения ρ_{\sim} , на которых частота меньшего модального интервала соизмерима с частотой большего модального интервала (рис. 5). Бимодальные гистограммы, полученные в результате определения ρ_{\sim} на длинных маршрутах, проходящих над однотипным комплексом пород, позволяют дать оценки параметров средне-

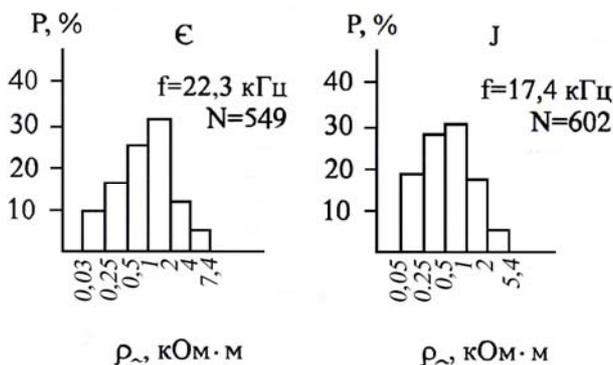


Рис.4. Гистограмма распределения ρ_{\sim} осадочных пород Алданского нагорья

статистического двухслойного геоэлектрического разреза. Для гистограммы ρ_{\sim} рис 5 значения ρ_1 и ρ_2 , определенные по средней величине модального интервала, будут равны 750 и 3500 Ом·м. Толщина первого слоя h_1 может быть определена по величине скин-слоя на рабочей частоте 22,3 кГц по формуле (2). Она будет изменяться случайным образом от 0 до 92 м. В качестве значения h_1 услов-

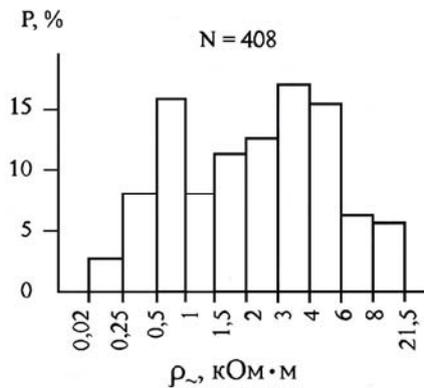


Рис. 5. Гистограмма $\rho_{с}$ маршрута 31 на Центральном Алдане

но можно принять четверть величины скин-слоя $h_1=23$ м. Такая приближенная оценка параметров геоэлектрического разреза может быть полезна при проверке прогнозных карт параметров слоистого геоэлектрического разреза и расчетах поверхностного импеданса слоистой среды.

Заключение

1. Проведена классификация и получены статистические характеристики эффективного сопротивления для различных комплексов горных пород Алдано-Станового нагорья в СДВ диапазоне радиоволн. Установлена значительная дифференциация эффективного сопротивления между осадочными и кристаллическими породами, выявлено хорошее совпадение электрических границ различных комплексов горных пород (гранитоидов, кембрийских и

юрских отложений и др.) с геологическими границами. Для однотипных кристаллических и осадочных пород статистическое распределение $\rho_{с}$ соответствует логнормальному закону.

2. Для горных районов, сложенных кристаллическими породами, средние значения $\rho_{с}$ составляют 2500–4700 Ом·м, тогда как для впадин, образованных осадочными породами, средние значения $\rho_{с}$ обычно ниже 1000 Ом·м. Наиболее высокими значениями $\rho_{с}$ (>8000 Ом·м) характеризуются выходы кристаллических пород архея, не перекрытые слоем наносов, а также узкие речные долины в северной и северо-восточной Алданского нагорья. Резкое увеличение $\rho_{с}$ на узких речных долинах можно объяснить, если предположить, что в их пределах распространены многолетнемерзлые породы.

3. Используемый в экспериментах метод дистанционного зондирования позволяет быстро исследовать большие территории в труднодоступной местности, дает возможность оперативно составлять карты эффективного сопротивления крупных регионов, которые могут использоваться при инженерно-геологических изысканиях. Перспективен данный метод и в мерзловедении. Результаты аэрофотосъемки использованы для решения практических задач инженерной геофизики, геологии и транспортного строительства.

Статья подготовлена при финансовой поддержке грантов РФФИ № 08-02-98007, 09-05-98611 и интеграционного проекта СО РАН №56.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сикорский В.А. Измерение сопротивления (ρ) и диэлектрической проницаемости (ϵ) среды радиоимпедансным методом

(Алданский щит) // Геология и геофизика. – 1977. – № 10. – Р. 95–101.

2. King R. J. On airborne wave tilt measurements // Radio Science. – 1977. – Vol. 12, № 3. – P. 405–414.

3. Вешев А. В., Ивочкин В. Г., Яковлев А. В. и др. Аэроэлектроразведочная аппаратура РЭМП и результаты ее полевых испытаний // Геофизическая аппаратура. – Л., 1981. – Вып. 73. – С. 77–87.

4. Башкуев Ю.Б., Дембелов М.Г., Буянова Д.Г. Высотное изменение импеданса подстилающей среды.// Сб. "Солнечно-земная физика", 2004, вып. 5 (118), с. 147-149.

5. Каждан А. Б., Гуськов О. И. Математические методы в геологии. – М.: Недра, 1990. – 252 с. **ГИАБ**

Коротко об авторах

Башкуев Ю.Б. – профессор, доктор технических наук, заведующий лабораторией геоэлектромагнетизма Отдела физических проблем Бурятского научного центра Сибирского отделения РАН, buddich@mail.ru

Буянова Д.Г. – кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории геоэлектромагнетизма Отдела физических проблем Бурятского научного центра Сибирского отделения РАН, dbuy@mail.ru



РУКОПИСИ,

ДЕПОНИРОВАННЫЕ В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ
МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ГОРНОГО УНИВЕРСИТЕТА

Голиков А.В. – инженер-программист, НФККИПКРО, e-mail: ap4u@ap4u.ru

МЕТОДИКА АВТОМАТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ УЗЛОВЫХ МОДЕЛЕЙ В ЗАДАЧАХ КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНЫХ МОДЕЛЕЙ ПРИ КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНОЙ АППРОКСИМАЦИИ В ЗАДАЧАХ ПОИСКА РУД (784/01-11 от 20.10.2010) 16 с.

В настоящее время методы электроразведки широко применяются в исследовании геологического строения земной коры и поисках месторождений полезных ископаемых. Для расчета электромагнитного поля в областях, имеющих сложную структуру и трехмерные неоднородности, наиболее эффективным является. Метод конечных элементов (МКЭ). Актуальной проблемой является создание быстрых алгоритмов построения конечноэлементных сеток и удобных для реализации вычислительных схем при работе на постоянном токе и по методу ВП для решения задачи поисков и разведки залежей углеводородов и рудных объектов в сложных геологических условиях.

Ключевые слова: метод конечных элементов, разведка, залежей углеводородов.

Golikov A.V. THE METHOD OF DATA CONVERSION OF THE KEY MODELS FOR SOLVING PROBLEMS OF APPROXIMATION DURING ORE SURVEY

Currently the methods of the electrical survey are widely used in the studies of the geological structure of the Earth crust and for the exploration of mineral deposits. The finite element method (FEM) is the most effective one for calculation of parameters of the electromagnetic field in areas with the complex structure and three-dimensional heterogeneity. The topical problem today is the creation of fast algorithms for constructing the finite-element nets and easy to implement numerical schemes while working at DC, and using the overvoltage method to solve the problem of prospecting and exploration for hydrocarbon deposits and ore objects in complex geological conditions.

Key words: The finite element method, exploration of hydrocarbon deposits.