УДК 550.837.7

**Ю.Б. Башкуев, Д.Г. Буянова**

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД АЛДАНСКОГО ЩИТА ПО ДАННЫМ СДВ АЭРОЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ*

***Аннотация***. Рассмотрены статистические характеристики эффективного сопротивления ρ~ различных комплексов горных пород Алданского щита в сверхдлинноволновом диапазоне электромагнитных волн, которые получены методом радиоимпедансного зондирования с борта самолета в районах развития кристаллических массивов и мерзлоты. Исследованы 6 участков площадью 30 тыс. км$^2$. Проведена классификация эффективного сопротивления для различных комплексов горных пород Алданского щита. 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 ρ~ соответствует логнормальному закону. Использованный в экспериментах метод дистанционного зондирования позволяет быстро исследовать большие территории в труднодоступной местности. Он дает возможность оперативно составлять карты эффективного сопротивления крупных регионов, которые могут использоваться при инженерно-геологических изысканиях. Перспективен данный метод и в мерзлотоведении. Результаты аэроработ использованы для решения практических задач инженерной геофизики, геологии и транспортного строительства.

***Ключевые слова***: Алданский щит, радиоимпедансное зондирование, сверхдлинные радиоволны, аэросъемка, эффективное сопротивление, статистические характеристики.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-9-0-140-151

## Введение

В связи со строительством и эксплуатацией нефтепровода «Восточная Сибирь — Тихий океан», началом эксплуатации Амуро-Якутской железной дороги и развитием горнорудной отрасли Южной Якутии стала актуальной задача изучения электрических свойств горных пород региона. В литературе имеется очень мало данных по электрическим свойствам горных пород Алданского щита. Анализ фондовых и литературных материалов по востоку России показал, что наименее исследованным объектом — «белым пятном» являются кристаллические массивы востока России с очень низкой электропроводностью, в том числе Алданского щита [1—4].

Цель статьи — дать обобщенное статистическое описание эффективного сопротивления ρ~ основных комплексов горных пород Алданского щита по данным радиоимпедансного зондирования с борта самолета в сверхдлинноволновом (СДВ) диапазоне электромагнитных волн [5]. Статистические характеристики эффективного сопротивления ρ~ различных комплексов горных пород необходимы для решения практических задач инженерной геофизики, транспортного строительства, геологии, электроэнергетики и телекоммуникаций [6].

* Статья подготовлена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 15-45-04355 и госбюджетного проекта ИФМ СО РАН «Распространение радиоволн в неоднородных импедансных каналах».


© Ю.Б. Башкуев, Д.Г. Буянова. 2018.

В бездорожной гористой местности необходимо использовать методы дистанционного определения электрических свойств земной коры с борта летательных аппаратов. Исследования эффективного сопротивления подстилающей среды в СДВ-СВ диапазонах электромагнитных волн с борта самолета выполнены в США, Канаде и России [7—11].

### Краткая геологическая характеристика региона

Объект наших исследований, Алданский щит, представляет собой выступ докембрийского фундамента на юго-востоке Сибирской платформы, в основном совпадающий с современным Алданским нагорьем и Становым хребтом. На севере и востоке щит перекрыт чехлом верхнепротерозойских — кембрийских отложений, на юге и западе ограничен глубинными разломами от областей байкальской и палеозойской складчатостей.

Докембрийские образования фундамента слагают несколько структурных этажей, отражающих наиболее ранние стадии эволюции земной коры. Древнейший этаж (свыше 3,5 млрд лет) представлен гнейсами, сланцами, мраморами и кварцитами. Во время формирования среднего структурного этажа (3,5—2,7 млрд лет) образовались шовные прогибы, выполненные метаморфизованными осадочно-вулканогенными отложениями. Широко проявились процессы гранитизации, регрессивного метаморфизма и магматизма, с которыми, в частности, связано внедрение крупных интрузий анортозитов. Верхний структурный этаж (2,7—1,5 млрд лет) представлен мощными комплексами либо обломочных, либо вулканогенных образований и крупными интрузиями основных горных пород и разнообразных гранитоидов. На платформенной стадии развития здесь формировался чехол морских карбонатных отложений и внедрялись немногочисленные интрузии долеритов, и йолитов, карбонатитов, кимберлитов. Своеобразие ландшафта выражается в наличии нагорья с высотными отметками около 1000 м, на фоне которого возвышаются на 300—1000 м над ним одиночные гольцы и гольцовые гряды. Своеобразие геологии региона обусловило уникальность его недровых богатств — золото, флогопит, горный хрусталь, железные руды, апатит, уран, графит, молибден, платина, вермикулит, редкие металлы, каменный уголь, драгоценные камни — вот далеко не полный перечень месторождений полезных ископаемых [12—14].

### Аппаратура и методика 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. Аппаратура представляет трехканальный селективный микровольтметр-фазометр, измеряющий амплитудно-фазовую структуру СДВ электромагнитного поля вблизи границы раздела «воздух-земля» [3].

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 горизонтальной составляющей $E_x$ [2]. Однако при этом регистрируется не полный вектор $E_x$, а только его

мнимая часть $\mathrm{Im}E_x$, и, следовательно, измеряется мнимая часть приведенного поверхностного импеданса $\delta = \mathrm{Re}\delta - i\mathrm{Im}\delta$, где $\mathrm{Im}\delta = (\mathrm{Im}E_x)/(H_y \cdot Z_0)$, $Z_0$ — характеристический импеданс вакуума. Над однородным проводящим полупространством $\mathrm{Im}\delta = \mathrm{Re}\delta$, фаза импеданса $\varphi_\delta = \mathrm{arctg}\, \mathrm{Im}\delta/\mathrm{Re}\delta = -45°$ и эффективное сопротивление $\rho\sim$ вычисляется по формуле:

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

где $\rho\sim$ — эффективное электрическое сопротивление среды; $\lambda$ — длина волны в воздухе, м. Формула для определения $\rho\sim$ справедлива с погрешностью не более 10% при условии $60\lambda/\rho\sim\varepsilon >> 10$, где $\varepsilon$ — относительная диэлектрическая проницаемость однородной среды. На частотах 10—30 кГц при $\varepsilon \leq 10$ этому условию соответствуют $\rho\sim < 18\,000 \div 6000$ 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 200 м со скоростью 140—180 км/ч [1]. Калибровка измерительной установки проводилась над однородной в пределах скин-слоя водной средой оз. Байкал при сопротивлении воды $\rho$ = 150 Ом·м. Схема аэросъемочных работ на Алданском щите представлены на рис. 1.

## Методика обработки результатов

Под эффективным сопротивлением $\rho\sim$ проводящей неоднородной среды (геоэлектрического разреза) на фиксированной частоте СДВ диапазона мы понимаем сопротивление некоторого фиктивного однородного изотропного полупространства, по значению равное 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—20 000 Ом·м составляет 58—540 м, охватывая приповерхностную часть земной коры. Определение $\rho\sim$ проводилось в дискретных последовательностях то-

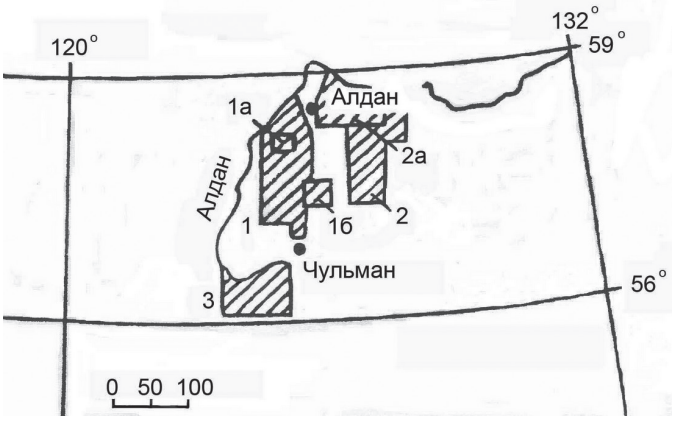


*Рис. 1. Схема аэросъемочных работ на самолете АН-2 на Алданском щите. Участки:* 1 — Центральный Алдан, 1а — Канкунский, 1б — Нимгерканский, 2 — Восточный Алдан, 2а — Эльконкский, 3 — Становой

*Fig. 1. Scheme aerial survey work on the aircraft AN-2 on the Aldan Shield. Sites:* 1 — Central Aldan, 1a — Kankun, 1b — Nimercanskiy, 2 — East Aldan, 2a — Elkonk, 3 — Stanovoi

чек, расположенных на маршруте аэросъемки через 100—400 м.

С целью получения статистических оценок $\rho\sim$ однородной в геологическом отношении области (комплекса горных пород) значения $\rho\sim$ объединялись в вариационные ряды, содержащие от 25 до 1550 величин $\rho\sim$, по которым строились гистограммы распределения $\rho\sim$. Форма гистограммы служила основным качественным критерием для выяснения правильности выделенной петрофизической группы. После уточнения выделенных групп вычислялись обобщенные показатели распределения $\rho\sim$ [15]:

- среднее арифметическое значение

$$\tilde{\rho}_{\sim} = m_{\rho} = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}\rho_{\sim j} \;;$$

- среднее значение логарифма

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

- среднее геометрическое

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

Также рассчитывались значения среднеквадратического отклонения $\rho\sim$, $\sigma_{\rho}$, и $\sigma_{\lg\rho}$ — среднеквадратического отклонения логарифма $\rho$.

Сведения о законе распределения эффективного сопротивления $\rho\sim$ в литературе отсутствуют. Для проверки соответствия эмпирического распределения $\rho\sim$ нормальному или логнормальному законам использован приближенный метод, основанный на вычислении показателя асимметрии $\gamma_3$ и эксцесса $\gamma_4$ выборочного распределения [15].

## Результаты определения эффективного сопротивления

Уникальность Алданского щита проявлена прежде всего в особенностях геологического строения, характеризующегося выходом на дневную поверхность самых древних на Земле пород фундамента Сибирской платформы, не повсеместно перекрытого маломощным чехлом осадочных пород, а также широко и разнообразно проявленными магматическими и гидротермально-метасоматическими образованиями мезокайнозойской активизации.

Геоэлектрической особенностью Алданского щита является сложное пространственное распределение эффективного сопротивления $\rho\sim$ верхней части земной коры, обусловленное его гео-

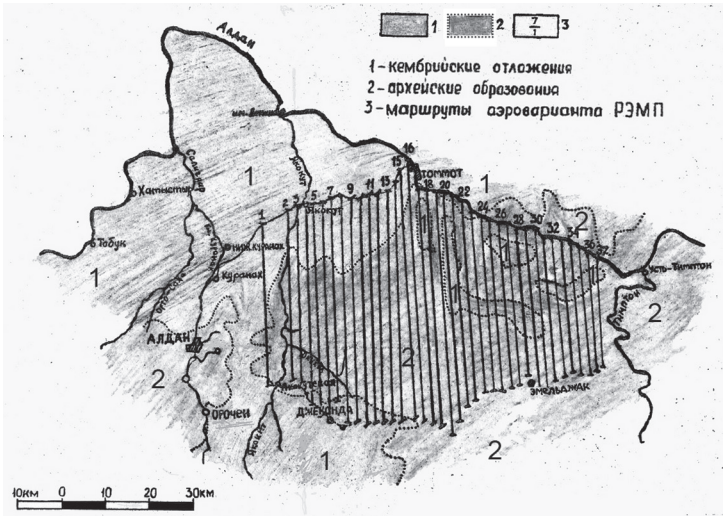


*Рис. 2. Схема маршрутов участка «Эльконкский», частота 22,3 кГц*
*Fig. 2. The scheme of routes of the site «Elkonk», frequency 22.3 kHz*

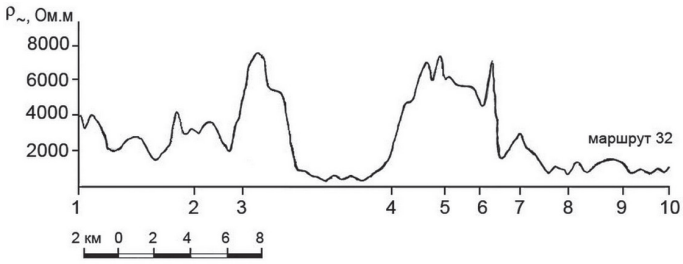


*Рис. 3. Результаты определения эффективного сопротивления по маршруту 32 на частоте 22,3 кГц; 1, 2, 3... — номер ориентиров*

*Fig. 3. The results of determining the effective resistance along the route 32 at a frequency of 22.3 kHz; 1, 2, 3 ... — reference number*

логическим строением. В геоэлектрике обычно принято исследовать электрические свойства горных пород по регионам или участкам 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 дано без излишней детализации. Группирование по комплексам пород выполнено по геологическим картам. Рассмотрим полученные результаты на конкретных участках последовательно с севера на юг.

*Участок «Эльконкский»*. Определение эффективного сопротивления ρ~ на частоте 22,3 кГц проведено на 37 маршрутах, ориентированных по направлению «север-юг». Расстояние между маршрутами составляло 2 км (рис. 2). Съемкой масштаба 1:200 000 покрыта площадь свыше 3000 кв. км. На всем участке наблюдается очень широкий диапазон изменения ρ~ (рис. 3). Для Эльконкского горста, сложенного кристаллическими породами (кварциты, гнейсы, сиениты, гранитоиды архея и кембрийские отложения), средние значения эффективного сопротивления для пород архея

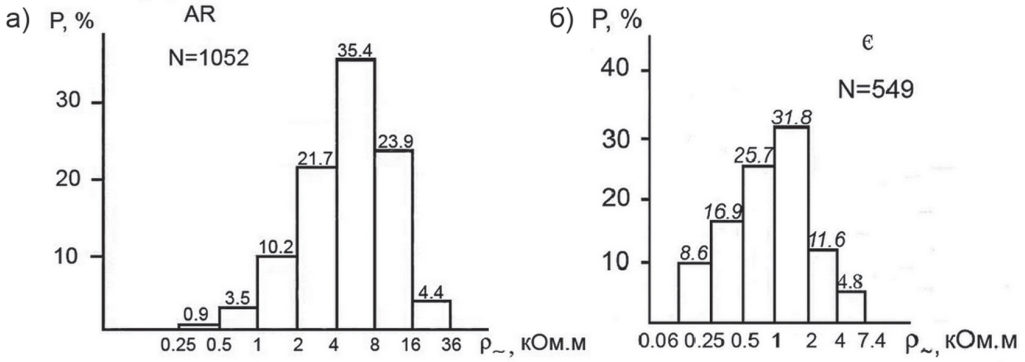


*Рис. 4. Гистограммы распределения эффективного сопротивления ρ~ участка «Эльконкский» на частоте f = 22,3 кГц: гранитоиды архейские с непрерывным чехлом рыхлых отложений (а); карбонатно-терригенные отложения кембрия (б)*

*Fig. 4. Histograms of distribution of effective resistance ρ~ of the «Elkonk» section at a frequency f = = 22.3 kHz: Archean granitoids with a continuous cover of loose sediments (a); carbonate-terrigenous deposits of the Cambrian (b)*

составляют 4700—6200 Ом · м, тогда как для пород кембрия его средние значения составляют 1200 Ом · м и часто они ниже 1000 Ом · м. Для архейского комплекса около 85% всех значений выше 2000 Ом · м, а для кембрийских отложений — ниже 2000 Ом · м. Всего лишь 4,4% значений эффективного сопротивления гранитоидов архея меньше 1000 Ом · м, тогда как в интервал от 1000 до 8000 Ом · м с приблизительно одинаковой вероятностью попадают 67% всех данных (рис. 4). Наиболее высокими значениями эффективного сопротивления (>8000 Ом · м) характеризуются выходы кристаллических пород архея, не перекрытые слоем наносов. Статистические характеристики эффективного сопротивления кембрийских отложений и архейских гранитоидов Эльконкского горста в СДВ диапазоне приведены в таблице. Из нее видна значительная дифференциация эффективного сопротивления между архейскими и кембрийскими образованиями. Также выявлено хорошее совпадение электрических границ между этими комплексами горных пород и геологическими границами. Пространственное распределение ρ~ на участке показывает карта эффективного сопротивления участка «Эльконкский» (рис. 5).

*Участок «Становой»* занимает водораздельное пространство рек Алдан, Чильчи, Н. Ларба, Иенгра, площадь 5640 кв. км. Абсолютные отметки вершин достигают 1670 м, днища речных долин — 800—900 м. Участок сложен метаморфическими и изверженными породами архея и терригенными отложениями юрского возраста. Толщина рыхлых покровных отложений колеблется от единиц до нескольких десятков метров, удельное сопротивление — от десятков до первых тысяч Ом · м. На всей площади развиты тектонические нарушения (разломы) различной ориентировки, зоны распространения которых отличаются узкими протяженными областями пониженных значений эффективного сопротивления ρ~. Участки, сложенные метаморфическими и изверженными породами ар-

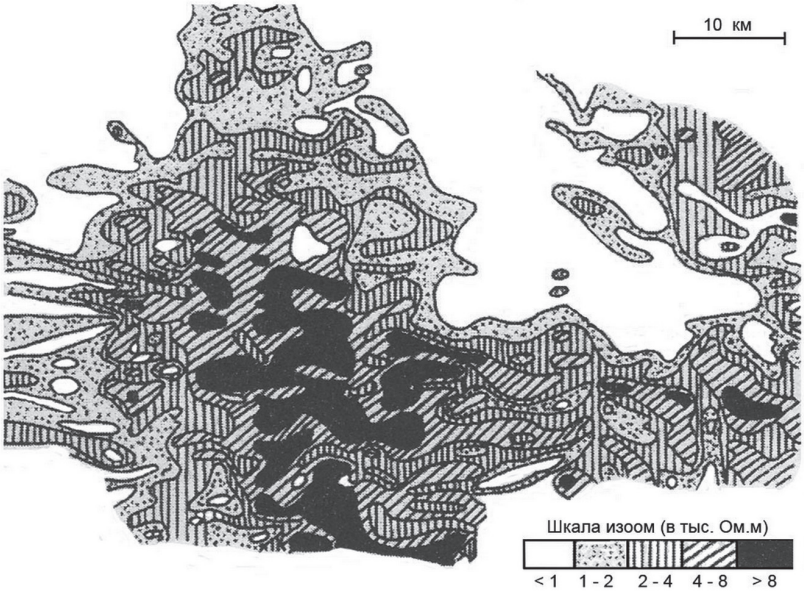


*Рис. 5. Карта эффективного сопротивления участка «Эльконкский» на частоте 22,3 кГц*
*Fig. 5. The map of effective resistance of the «Elkonk» site at a frequency of 22.3 kHz*

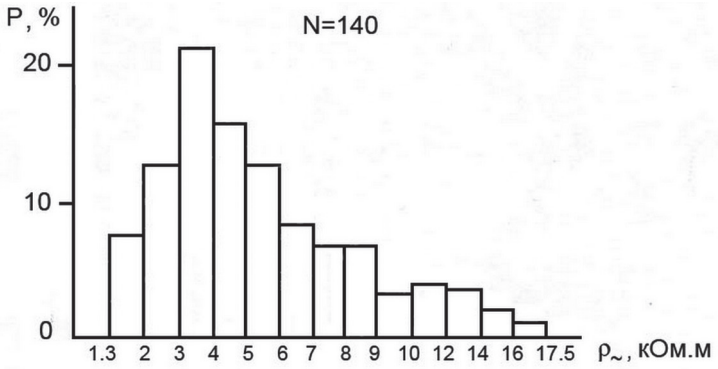


*Рис. 6. Гистограмма распределения ρ~ архейских гранитоидов участка «Становой» на маршруте XXIII на частоте 22,3 кГц*

*Fig. 6. Histogram of distribution of ρ~ Archean granitoids of the «Stanovoi» section on route XXIII at a frequency of 22.3 kHz*

хея, также как и на участке «Эльконкский», имеют высокие значения ρ~. Области развития юрских отложений, расположенные, в основном, в северной части исследуемого участка, обладают более низкими относительно архейских пород значениями ρ~. Участок характеризуется высокими фоновыми значениями ρ~ (рис. 7). При этом 90% всех значений попадают в интервал от 2000 до 16 000 Ом · м, из них 22% от 2000 до 4000 Ом · м, 43% от 4000 до 8000 Ом · м и 25% от 8000 до 16 000 Ом · м. Высокими (>16 000 Ом · м) значениями характеризуются локальные участки, отвечающие выходам скальных коренных пород архея и протерозоя. В северо-восточной части участка низкими значениями ρ~ характеризуются угленосные отложения Чульманской впадины. Для кристаллических пород участка «Становой» средние значения ρ~ составляют 3000—5000 Ом · м, для Чульманской впадины, образованной осадочными породами, среднее значение ρ~ ниже 1000 Ом · м (рис. 6, таблица). В таблице представлены статистические характеристики эффективного сопротивления ρ~ для различных комплексов горных пород, полученные на участках «Эльконкский», «Центральный Алдан» и «Становой».

*Участок «Центральный Алдан»* исследован на частоте 17,4 кГц. На рис. 7 представлены гистограммы распределе-

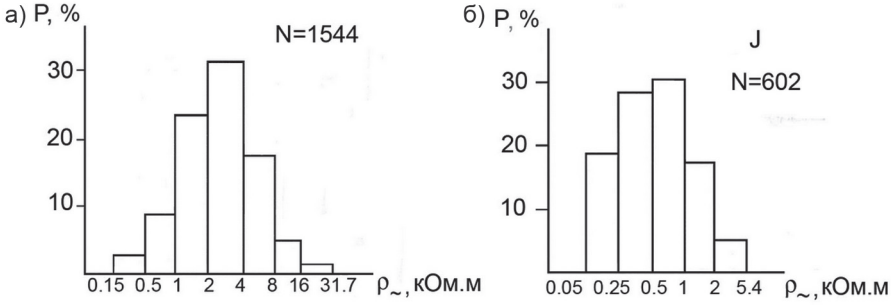


*Рис. 7. Гистограммы эффективного сопротивления ρ~: гранитоиды архейские с непрерывным чехлом рыхлых отложений (а); терригенные угленосные отложения юрского возраста (б)*

*Fig. 7. Histograms of effective resistance ρ~: Archean granitoids with a continuous cover of loose deposits (a); terrigenous carbonaceous deposits of Jurassic age (b)*

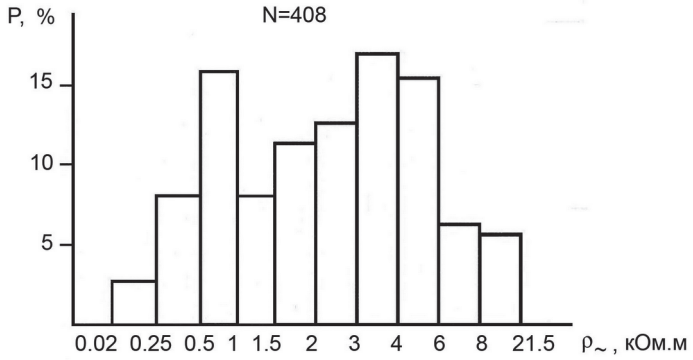


*Рис. 8. Гистограмма ρ~ маршрута 31 на Центральном Алдане*
*Fig. 8. Histogram of ρ~ route 31 on the Central Aldan*

ния ρ~ для архейских гранитоидов и терригенных отложений участка «Центральный Алдан» на частоте 17,4 кГц.

### Обсуждение результатов

Анализ таблицы и гистограмм на рис. 4, 6, 7 показывает, что кристаллические горные породы характеризуются высокими фоновыми значениями ρ~, превышающими 1—2 тыс. Ом · м. Низкие значения ρ~ 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. Сравнительно низкие сопротивления ρ~ 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~, характерные для кристаллического фунда-

| № пп | Горные породы | Рабочая частота, кГц | № | $\bar{\rho}_{\sim}/\rho_{с.г.}$, Ом·м | $\sigma_{\rho}/\sigma_{\lg\rho}$ | $\rho_{макс}/\rho_{мин}$, Ом·м | Участок, маршрут, район |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Кристаллические комплексы | | | | | | | |
| 1 | Гранитоиды архейские | 22,3 | 1052 | 6200/4700 | 4600/0,35 | 36 000/250 | Эльконкский горст |
| 2 | Гранитоиды архейские | 22,3 | 50 | 4500/3300 | 3500/0,32 | 15 000/990 | Становой |
| 3 | Гранитоиды архейские с непрерывным чехлом рыхлых отложений | 17,4 | 1544 | 3600/2500 | 3700/0,42 | 31 700/160 | Центральный Алдан |
| Осадочные комплексы | | | | | | | |
| 4 | Терригенные угленосные отложения юрского возраста | 17,4 | 602 | 750/500 | 730/0,45 | 5400/50 | Чульманская впадина |
| 5 | Карбонатно-терригенные отложения кембрия | 22,3 | 549 | 1160/500 | 940/0,38 | 7400/80 | Эльконкский горст |

мента. В целом можно отметить рост средних значений $\rho\sim$ 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 вод. На некоторых участках гранитоидных массивов, перекрытых чехлом рыхлых покровных отложений, получены бимодальные гистограммы распределения $\rho\sim$, на которых частота меньшего модального интервала соизмерима с частотой большего модального интервала (рис. 8).

Бимодальные гистограммы, полученные в результате определения $\rho\sim$ на длинных маршрутах, проходящих над однотипным комплексом пород, позволяют дать оценку параметров среднестатистического двухслойного геоэлектрического разреза. Для гистограммы $\rho\sim$ на рис. 9 значения $\rho_1$ и $\rho_2$, 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 $h_1$ условно 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.

На основе решения обратной задачи радиоимпедансного зондирования в СДВ-ДВ диапазонах на земной поверхности установлено, что для древних кристаллических пород Алданского щита основной тип геоэлектрического разреза *A* ($\rho_1<\rho_2<\rho_3$), т.е. удельное электрическое сопротивление увеличивается с глубиной от нескольких сот до десятков тысяч Ом·м. Для осадочных пород юга Алданского щита на глубину до 100—300 м наиболее типичными являются геоэлектрические разрезы типа *K* ($\rho_1<\rho_2>\rho_3$) и *Q* ($\rho_1>\rho_2>\rho_3$).

Гистограммы распределения $\rho\sim$ основных комплексов горных пород Алданского щита положительно асимметричные, чаще всего крутые слева и плоские справа. Распределение $\rho\sim$ ограничено условием $\rho\sim > 0$, а изменение $\rho\sim$ происходит в широких пределах и достигает нескольких порядков (от 0,25 до 105 кОм·м). Распределение УЭС для гранитоидов обычно подчиняется логнормальному закону с $\sigma_{\lg\rho}$ = 0,32÷0,35. Полученные статистические характеристики $\rho\sim$ позволяют оценить степень геоэлектрической неоднородности однотипных в геологическом отношении комплексов, а также степень отличия между различными комплексами горных пород. Для большинства рассмотренных в таблице однотипных комплексов горных пород закон распределения $\rho\sim$ соответствует логнормальному.

Величина $\rho_{с.г.}$ в случае логнормального распределения случайной величины $\rho\sim$ является медианой этого распределения, оценки среднего значения $\rho\sim$ и моды $mo\rho\sim$ определяются по формулам [10]:

$$\overline{\rho_{\sim}} = 10^{\left(\overline{\lg\rho_{\sim}}+1{,}15\sigma^2_{\lg\rho_{\sim}}\right)}, \qquad (3)$$

$$mo\rho_{\sim} = 10^{\left(\overline{\lg\rho_{\sim}}-2{,}3\sigma^2_{\lg\rho_{\sim}}\right)}.$$

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 случай-

ной величины. На этом основании в таблице приводятся значения $\rho\sim$ и $\rho_{с.г}$. В частности, для рассмотренных в таблице карбонатно-терригенных пород кембрия расчетные по формулам (3) величины совпадают с приведенными в таблице. На основе проведенных измерений предложено для повышения эффективности грозозащиты в зонах повышенной грозовой деятельности южной Якутии и снижения сопротивления заземлителей в горной местности с высоким сопротивлением грунтов располагать их в зонах тектонических нарушений (разломов). В целом Алданский щит можно рассматривать как большое «электромагнитное окно», через которое должна быть хорошо видна глубинная геоэлектрическая структура литосферы Земли.

### Заключение

1. Проведена классификация и получены статистические характеристики эффективного сопротивления для различных комплексов горных пород Алданского щита в СДВ диапазоне электромагнитных волн. 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 $\rho\sim$ соответствует логнормальному закону.

2. Для горных районов, сложенных кристаллическими породами, средние значения $\rho\sim$ составляют 2500—4700 Ом·м, тогда как для впадин, заполненных осадочными породами, средние значения $\rho\sim$ обычно ниже 1000 Ом·м. Наиболее высокими значениями $\rho\sim$ (>8000 Ом·м) характеризуются выходы кристаллических пород архея, не перекрытые слоем наносов.

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

*Авторы выражают благодарность к.г-м.н. В.Г. Ивочкину и Ц.Н. Аюржанаеву за участие в аэроработах на Алданском щите.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Сикорский В.А.* Измерение сопротивления (ρ) и диэлектрической проницаемости (ε) среды радиоимпедансным методом (Алданский щит) // Геология и геофизика. — 1977. — № 10. — С. 95—101.

2. *Bashkuev Yu.B., Angarkhaeva L.Kh., Buyanova D.G., Dembelov M.G.* Predictive Map of Geoelectric Sections of North Eurasia and its Application for the Radiowaves Propagation Calculations / Proceedings of the 16th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET'2016). — 2016. — Pp. 326—329.

3. *Башкуев Ю.Б., Хаптанов В.Б., Дембелов М.Г., Куценко С.М., Аюров Д.Б.* Некоторые результаты радиоволновых измерений в высоких широтах (район поселка Тикси) // Техника радиосвязи. — 2015. — № 4(27). — С. 60—71.

4. *Захаренко В.Н., Краковецкий Ю.К. Попов Л.Н., Парначев В.П.* Влияние естественных подземных волноводов на распространение радиоволн СДВ—СВ диапазонов / XXIV конференция «Распространение радиоволн». РРВ-24. Т. 2. — Иркутск, 2014. — С. 243—246.

5. *Вешев А.В., Ивочкин В.Г., Яковлев А.В. и др.* Аэроэлектроразведочная аппаратура РЭМП и результаты ее полевых испытаний // Геофизическая аппаратура. — 1981. — вып. 73. — С. 77—87.

6. *Ефремов В.Н.* Радиоимпедансное зондирование мерзлых грунтов. — Якутск, 2013. — 204 с.

7. *Arcone S.A.* Resolution studies in airborne resistivity surveying at VLF // Geophysics. 1979. V.44, no 5. Pp. 937—946.

8. *Becker A.* Airborne resistivity surveys // IEEE Trans. AP. 1989. V.36, no 4. Pp. 557—562.

9. *King R.J.* On airborne wave tilt measurements // Radio Science. 1977. Vol. 12, no 3. Pp. 405—414.

10. *Powell B.W.*, *Jensen O.G.* Radioohm mapping of permafrost // Geological Survey of Canada. 1981. Paper 81—15. Pp. 19—33

11. *Tezkan B., Saraev A.* A new broadband radiomagnetotelluric instruments: applications to near surface investigation // Near Surface Geophysics. 2008. Vol.6, no 4, pp. 245—252.

12. *Бойцов В.Е.*, *Пилипенко Г.Н.* Золото и уран в мезозойских гидротермальных месторождениях Центрального Алдана // Геология рудных месторождений. — 1998. — Т. 40. — № 4. — С. 353—368.

13. *Геодинамика*, магматизм и металлогения Востока России: в 2 кн. / Под ред. А.И. Ханчука. Кн. 1. — Владивосток: Дальнаука, 2006. — 572 с.

14. *Государственная* геологическая карта Российской Федерации. Третье поколение. Алдано-Забайкальская серия. Карта закономерностей размещения и прогноза полезных ископаемых, масштаб: 1:1 000 000, серия: Алдано-Забайкальская / Под ред. В.Н. Зелепугина. — СПб.: ФГБУ «ВСЕГЕИ», 2016.

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

## КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

*Башкуев Юрий Буддич*[1] — доктор технических наук, профессор,
зав. лабораторией, e-mail: buddich@mail.ru,
*Буянова Дарима Гармаевна*[1] — кандидат физико-математических наук,
доцент, ведущий научный сотрудник, e-mail: dbuy@mail.ru,
[1] Институт физического материаловедения Сибирского отделения РАН.

---

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018. No. 9, pp. 140–151.

## Electric properties of the Aldan Shield rock mass by the data of super-long wave airborn electromagnetic survey

*Bashkuev Yu.B.*[1], Doctor of Technical Sciences, Professor,
Head of Laboratory, e-mail: buddich@mail.ru,
*Buyanova D.G.*[1], Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Assistant Professor, Leading Researcher, e-mail: dbuy@mail.ru,
[1] Institute of Physical Materials Science, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
670047, Ulan-Ude, Russia.

***Abstract***. The article considers statistical characteristics of effective resistance ρ~ obtained in the Aldan Shield rock mass by super-long wave electromagnetic impedance sensing of crystalline core areas and permafrost from a plane. The studied sites are 6 in number and 30 thousand square meters in total area. Classification of effective resistance in different systems of the Aldan Shield rock mass is accomplished. Considerable differentiation of effective resistance is found between sedimentary and crystalline rocks, and it is revealed that electric boundaries of different rock mass systems (granitoids, Cambrian and Jurassic deposits, etc.) agree with their geological boundaries. For the same-type crystalline and sedimentary rocks, statistical distribution of ρ~ complies with the log-normal law. The practiced remote sensing method allows quick test of vast hard-to-reach areas and enables real-time mapping of effective resistance in large regions for geological engineering surveys. The method is also promising for permafrost

science. The data of airborn electromagnetic surveys are used to solve applied problems of engineering geophysics, geology and transportation management.

***Key words***: Aldan Shield, airborn impedance sensing, super-long waves, airborn survey, effective resistance, statistical characteristics.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-9-0-140-151

**ACKNOWLEDGEMENTS**

The article was prepared with the financial support of RFBR grant No 15-45-04355 and the state budget project IFPM SB RAS «Radio wave propagation in heterogeneous impedance channels».

**REFERENCES**

1. Sikorskiy V. A. Izmerenie soprotivleniya (ρ) i dielektricheskoy pronitsaemosti (ε) sredy radioimpedansnym metodom (Aldanskiy shchit) [Impedance sensing-based measurement of resistance ρ and dielectric capacitivity ε (Aldan Shield rock mass)]. *Geologiya i geofizika*. 1977, no 10, pp. 95—101. [In Russ].

2. Bashkuev Yu. B., Angarkhaeva L. Kh., Buyanova D. G., Dembelov M. G. Predictive Map of Geoelectric Sections of North Eurasia and its Application for the Radiowaves Propagation Calculations. *Proceedings of the 16th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET'2016)*. 2016. Pp. 326—329.

3. Bashkuev YU. B., KHaptanov V. B., Dembelov M. G., Kutsenko S. M., Ayurov D. B. Nekotorye rezul'taty radiovolnovykh izmereniy v vysokikh shirotakh (rayon poselka Tiksi) [Some data of radiowave measurements at high latitudes (Tiksi settlement area)]. *Tekhnika radiosvyazi*. 2015, no 4(27), pp. 60—71. [In Russ].

4. Zakharenko V. N., Krakovetskiy Yu. K. Popov L. N., Parnachev V. P. Vliyanie estestvennykh podzemnykh volnovodov na rasprostranenie radiovoln SDV—SV diapazonov [Influence of natural underground waveguards on propagation of super-long and medium-long waves]. *XXIV konferentsiya «Rasprostranenie radiovoln»*. RRV-24. Vol. 2. Irkutsk, 2014, pp. 243—246. [In Russ].

5. Veshev A. V., Ivochkin V. G., YAkovlev A. V. Aeroelektrorazvedochnaya apparatura REMP i rezul'taty ee polevykh ispytaniy [Airborn electromagnetic survey equipment REMP and its full-scale testing results]. *Geofizicheskaya apparatura*. 1981, issue 73, pp. 77—87. [In Russ].

6. Efremov V. N. *Radioimpedansnoe zondirovanie merzlykh gruntov* [Impedance sensing in permafrost], Yakutsk, 2013, 204 p.

7. Arcone S. A. Resolution studies in airborne resistivity surveying at VLF. *Geophysics*. 1979. Vol. 44, no 5. Pp. 937—946.

8. Becker A. Airborne resistivity surveys. *IEEE Trans*. AP. 1989. Vol. 36, no 4. Pp. 557—562.

9. King R. J. On airborne wave tilt measurements. *Radio Science*. 1977. Vol. 12, no 3. Pp. 405—414.

10. Powell B. W., Jensen O. G. Radioohm mapping of permafrost. *Geological Survey of Canada*. 1981. Paper 81—15. Pp. 19—33

11. Tezkan B., Saraev A. A new broadband radiomagnetotelluric instruments: applications to near surface investigation. *Near Surface Geophysics*. 2008. Vol. 6, no 4, pp. 245—252.

12. Boytsov V. E., Pilipenko G. N. Zoloto i uran v mezozoyskikh gidrotermal'nykh mestorozhdeniyakh Tsentral'nogo Aldana [Gold and uranium in Mesozoic hydrothermal deposits in the Central Aldan]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*. 1998. Vol. 40, no 4, pp. 353—368. [In Russ].

13. Geodinamika, magmatizm i metallogeniya Vostoka Rossii. Pod red. A. I. Khanchuka. Kn. 1 [Geodynamics, magmatism and metallogeny in the Russian East. Khanchuk A. I. (Ed.), book 1], Vladivostok, Dal'nauka, 2006, 572 p.

14. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Tret'e pokolenie. Aldano-Zabaykal'skaya seriya. Karta zakonomernostey razmeshcheniya i prognoza poleznykh iskopaemykh, masshtab: 1:1 000 000, seriya: Aldano-Zabaykal'skaya. Pod red. V. N. Zelepugina State geological map of the Russian Federation. Third generation. Aldan–Transbaikalia series. Map regularities of mineral occurrence and prediction. Scale: 1:1 000 000, Series: Aldan–Transbaikalia. Zelepugin V. N. (Ed.)], Saint-Petersburg, FGBU «VSEGEI», 2016.

15. Kazhdan A. B., Gus'kov O. I. *Matematicheskie metody v geologii* [Mathematical methods in geology], Moscow, Nedra, 1990, 252 p.