

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД КОНКУДЕРО-МАМАКАНСКОГО НАГОРЬЯ В СВЕРХДЛИННОВОЛНОВОМ ДИАПАЗОНЕ РАДИОВОЛН

Ю.Б. Башкуев¹, Д.Г. Буянова¹

¹ Институт физического материаловедения Сибирского отделения РАН,
Улан-Удэ, Россия, e-mail: dbuy@mail.ru

Аннотация: Рассмотрены статистические характеристики эффективного сопротивления ρ_{Σ} кристаллических комплексов горных пород Конкудеро-Мамаканского нагорья в сверхдлинноволновом (СДВ) диапазоне радиоволн, которые получены методом радиоимпедансного зондирования с борта самолета. На частоте 22,3 кГц исследован участок площадью 30 тыс. км². Установлена значительная дифференциация эффективного сопротивления между гранитоидами и метаморфическими породами протерозоя, выявлено хорошее совпадение электрических границ между этими комплексами горных пород с геологическими границами. Для горных районов, сложенных гранитоидами, средние значения ρ_{Σ} составляют 4000–16 000 Ом·м, тогда как для метаморфических пород средние значения ρ_{Σ} обычно ниже, 1000–3000 Ом·м. Наиболее высокими значениями ρ_{Σ} (>8000 Ом·м) характеризуются выходы гранитоидов, не перекрытые слоем наносов. Используемый в экспериментах метод дистанционного зондирования позволил быстро исследовать большую территорию в труднодоступной местности. Он дает возможность оперативно определять эффективное сопротивление верхней части земной коры крупных регионов, которое необходимо при инженерно-геологических изысканиях трасс трубопроводов, ЛЭП и линий связи. Результаты аэроработ использованы для решения практических задач инженерной геофизики, геологии и транспортного строительства.

Ключевые слова: аэроэлектроразведочные работы, эффективное сопротивление, Конкудеро-Мамаканское нагорье, радиоимпедансное зондирование, сверхдлинные радиоволны (СДВ), статистическая оценка, гранитоиды, метаморфические породы протерозоя

Благодарность: Работа выполнена в рамках гранта № 075-15-2020-787 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект «Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории»).

Для цитирования: Башкуев Ю. Б., Буянова Д. Г. Электрические свойства горных пород Конкудеро-Мамаканского нагорья в сверхдлинноволновом диапазоне радиоволн // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 2. – С. 86–96. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_2_0_86.

Electrical properties of Konkudero-Mamakan highlands in long radio wave range

Yu.B. Bashkuev¹, D.G. Buyanova¹

¹ Institute of Physical Materials Science, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
Ulan-Ude, Russia, e-mail: dbuy@mail.ru

Abstract: The estimators of the effective resistance ρ_{Σ} determined in the Konkudero-Mamakan highland rocks in the long radio wave range by the radio sounding of impedance from the board of a plane. The area of 30 thousand km² is examined at a frequency of 22.3 Hz. It is found that the effective resistance differentiates greatly in granitoids and in metamorphic rocks of the Proterozoic era, and the electrical and geological boundaries of these rocks coincide. The average values of ρ_{Σ} are 4000–16 000 Ohm·m in granitoid rocks and usually less than 1000–3000 Ohm·m in metamorphic rocks. The highest ρ_{Σ} (>8000 Ohm·m) is a feature of out-cropped granitoids nonoverlaid with alluvium. The method of remote sounding used in the experiments allowed fast investigation of a vast hard-to-reach area. This method enables real-time determination of the effective resistance in the upper crust, which is essential in geological engineering surveys of the routes of pipelines, power transmission lines and communication lines. The airborne prospecting results are used in applied engineering geophysics, geology and transportation construction projects.

Key words: airborne electrical exploration, effective resistance, Konkudero-Mamakan highlands, radio sounding of impedance, long radio waves, statistical estimation, granitoids, Proterozoic metamorphic rocks.

Acknowledgements: The study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation in the framework of large R&D project in priority development areas in science and technology, Grant No. 075-15-2020-787: Fundamentals, Methods and Technologies of Digital Monitoring and Prediction of Ecological Situation in the Baikal Natural Territory.

For citation: Bashkuev Yu. B., Buyanova D. G. Electrical properties of Konkudero-Mamakan highlands in long radio wave range. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(2):86-96. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_2_0_86.

Введение

В связи с началом эксплуатации газопровода «Сила Сибири», идущего из России в Китай, началом прокладки второй ветки Байкало-Амурской железной дороги и развитием горнорудной отрасли Восточной Сибири стала актуальной задача изучения геологического строения, минерально-сырьевой базы, геокриологических условий и физико-химических (в том числе электрических) свойств горных пород северных районов Бай-

кальской горной области [1]. Геологическое строение региона достаточно полно рассмотрено в работах [2–6]. Анализ фондовых и литературных материалов по востоку России показал, что наименее исследованным объектом — «белым пятном» — являются кристаллические массивы Конкудеро-Мамаканского нагорья с очень низкой электропроводностью [7].

Цель статьи — дать обобщенное статистическое описание эффективного со-

противления ρ основных комплексов горных пород Конкудеро-Мамаканского нагорья по данным радиоимпедансного зондирования с борта самолета в сверхдлинноволновом (СДВ) диапазоне электромагнитных волн на частоте 22,3 кГц [8]. Исследования эффективного сопротивления подстилающей среды в СДВ-СВ-диапазонах электромагнитных волн с борта самолета выполнены в США, Канаде и России [8, 9].

Основы теории и практического использования СДВ-диапазона радиоволн для целей электроразведки были разработаны профессором Ленинградского государственного университета д.г.-м.н. А.В. Вешевым и развиты в последние годы его учениками [8, 10–16]. Статистические характеристики эффективного сопротивления ρ различных комплексов горных пород используются при решении практических задач инженерной геофизики, транспортного строительства, геологии, электроэнергетики и телекоммуникаций. В бездорожной гористой местности использован метод дистанционного определения электрических свойств земной коры с борта летательного аппарата.

На рис. 1 представлена схема аэроэлектроразведочных работ на самолете АН-2. Аэроэлектроразведочные работы

на Конкудеро-Мамаканском нагорье проведены на частоте 22,3 кГц на площади около 30 тыс. км², ограниченной координатами 57°–58°40' с.ш., 112°10'–116°34' в.д. Общая длина маршрутов составила 4544 км. Из них 882 км относятся к детализационным работам на участке «Бодайбинский», где через 2 км проведено 23 маршрута. Расстояние между рядовыми маршрутами составляло 5–10 км при длине маршрутов от 61 до 178 км. Все маршруты были ориентированы по азимуту «север–юг» и проходили в горно-лесистой местности с перепадом высот 800–1400 м.

Краткая природно-геологическая характеристика региона

Объектом наших исследований является Конкудеро-Мамаканское нагорье, расположенное в пределах Северо-Байкальского нагорья и юга Патомского нагорья [2–6]. Эти два нагорья имеют естественную границу в виде долины р. Витим. Основная часть района исследований находится на левобережье р. Витим и называется нами Конкудеро-Мамаканским нагорьем. Преобладающие абсолютные высоты 800–1400 м, относительные высоты 400–600 м и более. На территории нагорья протекает р. Витим с многочисленными притоками. Наи-



Рис. 1. Схема аэроэлектроразведочных работ на самолете АН-2

Fig. 1. Scheme of aerial electro-prospecting works on the AN-2 aircraft

более крупные из них — реки Мама, Конкудера, Мамакан, Тельмама, Бисяга, Бодайбо и др. Местность в основном залесенная, труднопроходимая для всех видов транспорта. Леса хвойные с преобладанием лиственницы и сосны. Гребни и вершины гор покрыты мохово-лишайниковой растительностью. Климат резко континентальный, с очень холодной зимой ($-26\div-32$ °С днем) и умеренно-теплым летом ($14\div19$ °С днем). На территории повсеместно распространены массивы многолетней мерзлоты толщиной 30—100 м и более [17]. Глубина сезонно-оттаивающего грунта 1—2 м. Преобладают каменисто-супесчаные и каменисто-суглинистые грунты. Своеобразие ландшафта выражается в наличии нагорья с высотными отметками около 1000 м, на фоне которого возвышаются на 400–600 м над ним одиночные гольцы и гольцовые гряды.

В центральной и восточной частях левобережья р. Витим интрузивные образования представлены нижнепалеозойскими интрузиями — конкудеро-мамаканским и тельмамским интрузивными комплексами. Среди интрузивных образований имеются породы очень различного состава, но резко преобладают граниты мамско-оронского, конкудеро-мамаканского и тельмамского комплексов. Область развития верхнепротерозойских гранитов мамско-оронского комплекса в основном совпадает с Мамско-Бодайбинской и Делюн-Уранской зонами Бодайбинского внутреннего прогиба. Восточная часть площади занята Оронским массивом гранитов и гранит-пегматитов площадью около 7000 км². В междуречье р. Мамакан и Мама находится Мамско-Витимский массив площадью 3000 км², сложенный биотитовыми гранитами, гнейсо-гранитами и гранит-пегматитами. К тельмамскому и конкудеро-мамаканскому комплексам гранитоидов отнесены биотит-амфиболовые средне-

зернистые граниты, слагающие большой тельмамский массив площадью около 4000 км². Левомамаканский массив гранитоидов тельмамского и конкудеро-мамаканского комплексов расположен юго-западнее Тельмамского массива, занимаемая в бассейнах рек Большой и Малой Конкудеры и р. Лев. Мамакан площадь около 4000 км². С северо-запада, севера и северо-востока он окаймляется метаморфизованными вулканогенными толщами нижнего протерозоя.

Специфическая особенность Конкудеро-Мамаканского нагорья — многократное проявление процессов активизации (нижний и верхний протерозой, палеозой), с которыми связано формирование разнообразных сводово-глыбовых структур.

Аппаратура и методика измерений

Аппаратура представляет трехканальный селективный микровольтметр-фазометр, измеряющий амплитудно-фазовую структуру СДВ электромагнитного поля вблизи границы раздела «земля — воздух» [8]. 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 фазо-квадратурной компенсации помехи от вертикальной составляющей E_z в канале приема горизонтальной составляющей E_x [8].

При этом регистрируется не полный вектор E_x , а только его мнимая часть ImE_x , и измеряется мнимая часть приведенного поверхностного импеданса

$$\delta = Re\delta - iIm\delta,$$

где $Im\delta = (ImE_x)/(H_y \cdot Z_0)$, Z_0 — характеристический импеданс вакуума.

Над однородным проводящим полупространством $Im\delta = Re\delta$ фаза импе-

данса $\varphi\delta = \arctg(lm\delta/Re\delta) = -45^\circ$ и эффективное сопротивление ρ_* вычисляется по формуле

$$\rho_* = 120\lambda[(ImE_x)/(H_y \cdot Z_0)]^2, \quad (1)$$

где ρ_* — эффективное электрическое сопротивление среды, λ — длина волны в воздухе, м. Источником электромагнитного поля служила СДВ-радиостанция NWC, работавшая на частоте 22,3 кГц. При съемке использовалась равномерная сеть прямолинейных маршрутов длиной до 178 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 [8]. Калибровка аппаратуры проводилась над однородной в пределах скин-слоя водной средой оз. Байкал при сопротивлении воды $\rho = 150 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

Методика обработки результатов

С целью получения статистических оценок ρ_* однородного комплекса горных пород значения ρ_* объединялись в вариационные ряды, содержащие до 1550 величин ρ_* , по которым строились гистограммы распределения ρ_* . Форма гистограммы служила основным качественным

критерием для выяснения правильности выделенной петрофизической группы. После уточнения выделенных групп вычислялись обобщенные показатели распределения ρ_* [18, 19]: среднее арифметическое значение, среднее значение логарифма, их среднеквадратические отклонения: σ_{ρ_*} , $\sigma_{\lg\rho_*}$. Также рассчитывались среднее геометрическое значение ρ_* и среднеквадратическое отклонение логарифма $\lg\rho_*$.

Результаты определения эффективного сопротивления и их анализ

На рис. 2 представлены кривые двух вертикальных электрических зондирований (ВЭЗ), полученных на Конкудеро-Мамаканском гранитоидном массиве при максимальных разносах $AB/2 = 1500 \text{ м}$. Уже на малых разносах кажущееся сопротивление ρ_k составляет 115 кОм·м, а на больших разносах оно не опускается ниже 10 кОм·м. Верхняя часть геоэлектрического разреза гранитоидов обычно содержит слой мерзлых пород толщиной до 20–40 м [17]. Кривые ВЭЗ, полученные на земной поверхности, наглядно свидетельствуют о высоком сопротивлении горных пород Конкудеро-Мамаканского нагорья.

В целом по всей площади работ отмечена отчетливая корреляция между эффективным сопротивлением ρ_* и геологическим строением маршрутов. Для гранитоидных массивов характерны более высокие значения ρ_* (в среднем от 4000 до 20 000 Ом·м), чем для метаморфических пород протерозоя (в среднем от 1000 до 4000 Ом·м). Массивы гранитоидов с высокими ρ_* занимают большие участки маршрутов, достигающие 20–30 км. Типичным является маршрут 52 длиной 126 км, на котором гранитоидный массив протяженностью около 30 км выделяется зоной повышенных сопротивлений от 8000 до 49 000 Ом·м

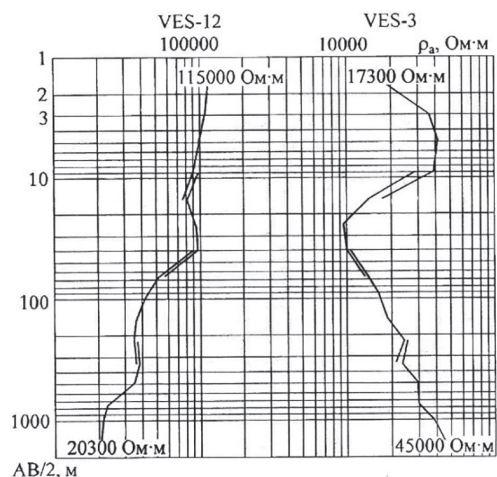


Рис. 2. Кривые ВЭЗ на Конкудеро-Мамаканском гранитоидном массиве

Fig. 2. VES curves for Konkudero-Mamakan granitoid massif

Статистические характеристики эффективного сопротивления ρ_{\sim} для гранитоидов и метаморфических пород протерозоя на маршруте 52 (22,3 кГц)
Statistical characteristics of the effective resistance ρ_{\sim} for granitoids and metamorphic Proterozoic rocks on route 52 (22.3 kHz)

Комплекс горных пород	№	$\rho_{\sim ca} / \rho_{\sim cr}, \text{ Ом}\cdot\text{м}$	$\sigma_{\sim ca} / \sigma_{\sim cr}, \text{ Ом}\cdot\text{м}$	$\rho_{\sim max} / \rho_{\sim min}, \text{ Ом}\cdot\text{м}$
Гранитоиды протерозоя с прерывистым чехлом рыхлых отложений	64	9730 8180	5110 0,28	21 000 2500
Метаморфические породы протерозоя с прерывистым чехлом рыхлых отложений	42	3830 1290	1290 0,14	7000 2250

(в среднем 14–20 тыс. Ом·м). Статистические характеристики эффективного сопротивления ρ_{\sim} на частоте 22,3 кГц для гранитоидов и метаморфических пород протерозоя на маршруте 52 приведены в таблице.

Гранитоиды, перекрытые четвертичными отложениями, имеют на данном маршруте $\rho_{\sim} = 2000–4000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Минимальные значения ρ_{\sim} совпадают с зонами тектонических нарушений (разломов). Участок «Бодайбинский» сложен в основном гранитоидами тельмамского и конкудеро-мамаканского комплексов, в северо-западной части развиты метаморфические породы протерозоя. Долины рек и межгорные понижения перекрыты маломощным чехлом рыхлых отложений. Аэроэлектроразведочные работы выполнены на 23 маршрутах общей длиной 1149 км. На всем участке наблюдается очень широкий диапазон изменения ρ_{\sim} . Гистограмма ρ_{\sim} гранитоидов представлена на рис. 3.

Анализ гистограммы показывает, что участок сложен высокоомными породами, около 80% значений ρ_{\sim} выше 4000 Ом·м, а максимумы распределения ρ_{\sim} приходятся на интервал от 4000 до 16 000 Ом·м. Для участка «Бодайбинский», сложенного как гранитоидами протерозоя и палеозоя, так и метаморфическими породами, средние значения эффективного сопротивления для гранитоидов составляют 6000–12 000 Ом·м, тогда как для метаморфических пород

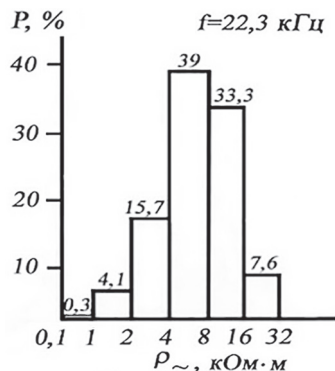


Рис. 3. Гистограмма эффективного сопротивления ρ_{\sim} участка «Бодайбинский»

Fig. 3. Histogram of effective resistance ρ_{\sim} of Bodaibo section

его средние значения составляют 1000–3000 Ом·м, а в зонах тектонических нарушений они ниже 1000 Ом·м.

Наиболее высокими значениями эффективного сопротивления (>8000 Ом·м) характеризуются выходы кристаллических пород гранитоидного типа, не перекрытые слоем наносов. В целом участок «Бодайбинский» характеризуется вполне закономерной пространственной геоэлектрической картиной.

На рис. 4 представлен типичный маршрут 23 длиной 37 км. Кривая ρ_{\sim} носит дифференцированный характер. При этом минимумы ρ_{\sim} обычно связаны с участками развития проводящих рыхлых отложений в долинах рек, а максимумы ρ_{\sim} характеризуют области выхода на дневную поверхность монолитного кристаллического фундамента. Толщина рыхлых покровных отложений колеблется от

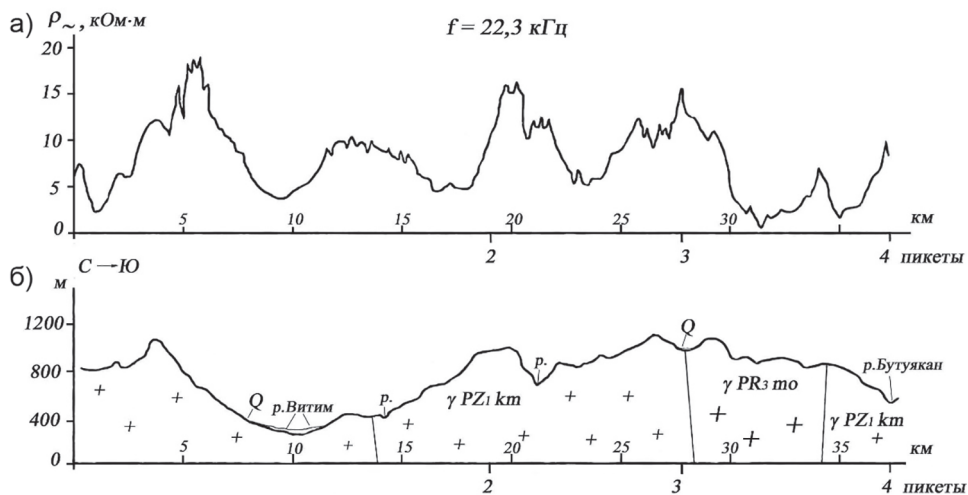


Рис. 4. Результаты определения ρ_{\sim} на маршруте 23 (а), его геологическое строение и рельеф (б)
 Fig. 4. Results of determination ρ_{\sim} (а), geological structure and topography (б) of route 23

единиц до нескольких десятков метров, удельное сопротивление — от десятков $\text{Ом}\cdot\text{м}$ до первых тысяч $\text{Ом}\cdot\text{м}$. На всей площади развиты тектонические нарушения (разломы) различной ориентировки, зоны распространения которых отличаются узкими протяженными областями пониженных значений эффективного сопротивления ρ_{\sim} .

Дополнительно обследованы участки «Восточный-1» ($115^{\circ} - 115^{\circ} 15'$ в.д.; $57^{\circ} 20' - 57^{\circ} 35'$ с.ш.) и «Восточный-2» ($116^{\circ} - 116^{\circ} 15'$ в.д.; $57^{\circ} 20' - 57^{\circ} 35'$ с.ш.).

Определение эффективного сопротивления ρ_{\sim} проведено на 60 маршрутах общей длиной 1588 км. Расстояние между маршрутами составляло 500 м. Съёмкой масштаба 1:50 000 покрыта площадь 746 км^2 . На участках проведены детализационные работы короткими маршрутами по 20 км, но по более густой сети.

На рис. 5 представлены гистограммы распределения ρ_{\sim} на участках «Восточный-1» и «Восточный-2». Статистическая обработка по каждому маршруту и всему участку «Восточный-1» показана

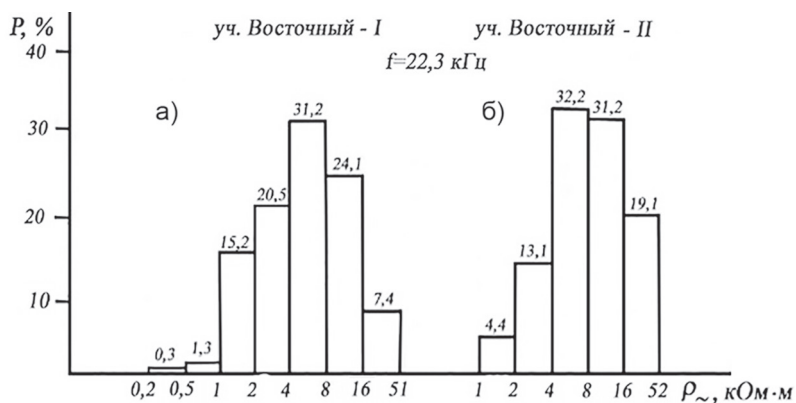


Рис. 5. Гистограммы распределения эффективного сопротивления ρ_{\sim} на участках «Восточный-1» и «Восточный-2»

Fig. 5. Histograms of distribution of effective resistance ρ_{\sim} of «Vostochny-1» and «Vostochny-2» sections

ла, что средние статистические оценки математического ожидания эффективного сопротивления ρ_{ca} и ρ_{cr} и распределение ρ_* изменяются от маршрута к маршруту незначительно. В целом на всем участке только 1,6% всех значений ρ_* меньше 1000 Ом·м, что свидетельствует о существовании здесь рыхлых четвертичных отложений. На обоих участках развиты тектонические нарушения (разломы) с узкими областями низкого эффективного сопротивления ρ_* . На основе анализа измерений ρ_* предложено для повышения эффективности грозозащиты в зонах повышенной грозовой деятельности Сибири и снижения сопротивления заземлений в горной местности с высоким сопротивлением грунтов располагать заземления в зонах разломов. Анализ таблицы и гистограмм на рис. 3, 5 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 фундамента. В целом можно отметить рост средних значений ρ_* гранитоидов от 2000 до 8000 Ом·м и более с увеличением степени расчлененности рельефа. Причиной может быть появление развитой криолитозоны (климатический фактор) [17] и понижение минерализации поверхност-

ных и грунтовых пород. Распределение ρ_* ограничено условием $\rho_* > 100$ Ом·м, а изменение ρ_* происходит в широких пределах и достигает нескольких порядков (от 0,1 до 105 кОм·м). Распределение удельного электрического сопротивления для гранитоидов обычно подчиняется логнормальному закону с $\sigma_{lg\rho} = 0,28 \div 0,35$. Полученные статистические характеристики ρ_* позволяют оценить степень геоэлектрической неоднородности однотипных в геологическом отношении комплексов, а также степень отличия различных комплексов горных пород. В целом Конкудеро-Мамаканское нагорье можно рассматривать как большое «электромагнитное окно», через которое должна быть хорошо видна глубинная электропроводность литосферы Земли [7]. Здесь следует существенно расширить исследования электрических свойств литосферы с помощью электромагнитных полей на основе решения некорректных обратных задач. Наша статья продолжает исследования электрических свойств горных пород крупных кристаллических массивов юга Сибири и Дальнего Востока [19, 20].

Заключение

Проведена классификация и получены статистические характеристики эффективного сопротивления ρ_* для гранитоидов и метаморфических пород Конкудеро-Мамаканского нагорья на частоте 22,3 кГц. Установлена значительная дифференциация эффективного сопротивления между гранитоидами и метаморфическими породами, выявлено хорошее совпадение электрических границ этих комплексов горных пород с геологическими границами.

Для горных районов, сложенных гранитоидами, средние значения ρ_* составляют 4000–16 000 Ом·м, тогда как для метаморфических пород средние значения ρ_* обычно ниже, 1000–3000 Ом·м.

Наиболее высокими значениями $\rho_{\text{н}}$ (>8000 Ом·м) характеризуются выходы гранитоидов, не перекрытые слоем наносов.

Использованный в экспериментах метод дистанционного зондирования позволил быстро исследовать большую территорию в труднодоступной местности. Он дал возможность определить эффективное сопротивление крупного

региона. Результаты использованы при инженерно-геологических изысканиях для решения практических задач инженерной геофизики, геологии и транспортного строительства.

Авторы выражают признательность за помощь коллеге Ц.Н. Аюржанаеву, чей вклад в работу носил технический характер.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кислов Е. В. Минерально-сырьевая база северных и восточных районов Бурятии: воспроизводство и освоение // География и природные ресурсы. — 2015. — № 2. — С. 156–163.
2. Красный Л. И. Геология региона Байкало-Амурской магистрали. — М.: Недра, 1980. — 159 с.
3. Кислов Е. В. Йоко-Довыренский расслоенный массив. — Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 1998. — 264 с.
4. Конников Э. Г., Цыганков А. А., Врублевская Т. Т. Байкало-Муйский вулканоплутонический пояс: структурно-вещественные комплексы и геодинамика. — М.: ГЕОС, 1999. — 163 с.
5. Цыганков А. А. Магматическая эволюция Байкало-Муйского вулканоплутонического пояса в позднем докембрии. — Новосибирск: Наука, 2005. — 305 с.
6. Толстых Н. Д., Орсов Д. А., Кривенко А. П., Изох А. Э. благороднометаллическая минерализация в расслоенных ультрабазит-базитовых массивах юга Сибирской платформы. — Новосибирск: Параллель, 2008. — 193 с.
7. Фадеев В. М., Послеев В. И. Результаты глубинных электромагнитных исследований в Бодайбинском районе / Геофизические исследования Сибирской платформы и смежных регионов: Сборник научных статей. — М., 1982. — С. 77–88.
8. Вешев А. В., Ивочкин В. Г., Яковлев А. В. и др. Аэроэлектроразведочная аппаратура РЭМП и результаты ее полевых испытаний / Геофизическая аппаратура: Сборник научных статей, вып. 73. — Л., 1981. — С. 77–87.
9. Becker A. Airborne resistivity surveys // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. 1989, vol. 36, no. 4, pp. 557–562.
10. Saraev A., Simakov A., Shlykov A., Tezkan B. Controlled source radiomagnetotellurics. A tool for near surface investigations in remote regions // Journal of Applied Geophysics. 2017, vol. 146, pp. 228–237. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2017.09.017.
11. Tezkan B., Muttaqien I., Saraev A. Mapping of buried faults using the 2D modelling of far-field controlled source radiomagnetotelluric data // Pure and Applied Geophysics. 2019, pp. 751–766. DOI: 10.1007/s00024-018-1980-0.
12. Shlykov A., Saraev A., Tezkan B. Study of a permafrost area in the Northern part of Siberia using controlled source radiomagnetotellurics // Pure and Applied Geophysics. 2020, vol. 177, pp. 5845–5859. DOI: 10.1007/s00024-020-02621-x.
13. Saraev A. K., Shlykov A. A., Tezkan B. Application of the controlled source radiomagnetotellurics (CSRMT) in the study of rocks overlying kimberlite pipes in Yakutia/Siberia // Geosciences. 2022, vol. 12, no. 1, article 34. DOI: 10.3390/geosciences12010034.
14. Shlykov A., Saraev A., Agrahari S. Studying vertical anisotropy of a horizontally layered section using the controlled source radiomagnetotellurics: an example from the North-Western Region of Russia // Geophysica. 2019, vol. 54, no. 2, pp. 3–21.


15. Tezkan B., Saraev A. A new broadband radiomagnetotelluric instrument: applications to near surface investigations // *Near Surface Geophysics*. 2008, vol. 6, no. 4, pp. 245 – 252. DOI: 10.3997/1873-0604.2008019.

16. Сараев А. К., Анташук К. М., Еремин И. С. Возможности аудиоманнитотеллурических зондирований с бесконтактными электрическими линиями при изучении геоэлектрического строения полуострова Рыбачий (Мурманская область) // *Криосфера Земли*. – 2018. – Т. 22. – № 5. – С. 65 – 76.

17. Ан В. В., Любомиров А. С., Соловьева Л. Н. Геокриологические условия Байкало-Становой части зоны БАМ. – Новосибирск: Наука, 1984. – 152 с.

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

19. Башкуев Ю. Б., Буянова Д. Г. Электрические свойства горных пород Алданского щита по данным СДВ аэроэлектроразведки // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2018. – № 9. – С. 140 – 151. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-9-0-140-151.

20. Башкуев Ю. Б., Буянова Д. Г. Электрические свойства горных пород Алданского нагорья по данным сверхдлинноволнового радиоимпедансного зондирования с борта самолета // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2011. – № 1. – С. 190 – 197. 

REFERENCES

1. Kislov E. V. Mineral resource base of the northern and eastern regions of Buryatia: reproduction and development. *Geografiya i prirodnye resursy*. 2015, no. 2, pp. 156 – 163. [In Russ].

2. Krasnyy L. I. *Geologiya regiona Baykalo-Amurskoy magistrali* [Geology of the region of the Baikal-Amur Mainline], Moscow, Nedra, 1980, 159 p.

3. Kislov E. V. *Yoko-Dovyrenskiy rassloennyy massiv* [Yoko-Dovyren layered massif], Ulan-Ude, Izd-vo BNTS SO RAN, 1998, 264 p.

4. Konnikov E. G., Tsygankov A. A., Vrublevskaya T. T. *Baykalo-Muyskiy vulkanoplutonicheskiy poiyas: strukturno-veshchestvennyye komplekсы i geodinamika* [Baikal-Muya volcano-plutonic belt: structural-material complexes and geodynamics], Moscow, GEOS, 1999, 163 p.

5. Tsygankov A. A. *Magmaticheskaya evolyutsiya Baykalo-Muyskogo vulkanoplutonicheskogo poiyasa v pozdnem dokembrii* [Magmatic evolution of the Baikal-Muya volcano-plutonic belt in the Late Precambrian], Novosibirsk, Nauka, 2005, 305 p.

6. Tolstykh N. D., Orsoev D. A., Krivenko A. P., Izokh A. E. *Blagorodnometall'naya mineralizatsiya v rassloennykh ul'trabazit-bazitovykh massivakh yuga Sibirskoy platformy* [Noble metal mineralization in layered ultramafic-mafic massifs in the south of the Siberian Platform], Novosibirsk, Parallel', 2008, 193 p.

7. Fadeev V. M., Pospeev V. I. Results of deep electromagnetic research in the Bodaibo region. *Geofizicheskie issledovaniya Sibirskoy platformy i smezhnykh regionov: Sbornik nauchnykh statey* [Geophysical research of Siberian Platform and adjacent regions. Collection of scientific articles], Moscow, 1982, pp. 77 – 88. [In Russ].

8. Veshev A. V., Ivchkin V. G., Yakovlev A. V., etc. Equipment of the REMP airborne electromagnetic survey and the results of its field tests. *Geofizicheskaya apparatura: Sbornik nauchnykh statey*, vyp. 73 [Geophysical equipment. Collection of scientific articles, issue 73], Leningrad, 1981, pp. 77 – 87. [In Russ].

9. Becker A. Airborne resistivity surveys. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. 1989, vol. 36, no. 4, pp. 557 – 562.

10. Saraev A., Simakov A., Shlykov A., Tezkan B. Controlled source radiomagnetotellurics. A tool for near surface investigations in remote regions. *Journal of Applied Geophysics*. 2017, vol. 146, pp. 228 – 237. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2017.09.017.

11. Tezkan B., Muttaqien I., Saraev A. Mapping of buried faults using the 2D modelling of far-field controlled source radiomagnetotelluric data. *Pure and Applied Geophysics*. 2019, pp. 751 – 766. DOI: 10.1007/s00024-018-1980-0.

12. Shlykov A., Saraev A., Tezkan B. Study of a permafrost area in the Northern part of Siberia using controlled source radiomagnetotellurics. *Pure and Applied Geophysics*. 2020, vol. 177, pp. 5845 – 5859. DOI: 10.1007/s00024-020-02621-x.

13. Saraev A. K., Shlykov A. A., Tezkan B. Application of the controlled source radiomagnetotellurics (CSRMT) in the study of rocks overlying kimberlite pipes in Yakutia/Siberia. *Geosciences*. 2022, vol. 12, no. 1, article 34. DOI: 10.3390/geosciences12010034.

14. Shlykov A., Saraev A., Agrahari S. Studying vertical anisotropy of a horizontally layered section using the controlled source radiomagnetotellurics: an example from the North-Western Region of Russia. *Geophysica*. 2019, vol. 54, no. 2, pp. 3 – 21.

15. Tezkan B., Saraev A. A new broadband radiomagnetotelluric instrument: applications to near surface investigations. *Near Surface Geophysics*. 2008, vol. 6, no. 4, pp. 245 – 252. DOI: 10.3997/1873-0604.2008019.

16. Saraev A. K., Antashchuk K. M., Eremin I. S. Audio-frequency magnetotelluric surveys with non-grounded lines for imaging the resistivity structure of the Rybachy Peninsula (Murmansk region). *Kriosfera Zemli*. 2018, vol. 22, no. 5, pp. 65 – 76. [In Russ].

17. An V. V., Lyubomirov A. S., Solov'eva L. N. *Geokriologicheskie usloviya Baykalo-Stanovoy chasti zony BAM* [Geocryological conditions of the Baikal-Stanovoi part of the BAM zone], Novosibirsk, Nauka, 1984, 152 p.

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

19. Bashkuev Yu. B., Buyanova D. G. Electric properties of the Aldan Shield rock mass by the data of super-long wave airborne electromagnetic survey. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2018, no. 9, pp. 140 – 151. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-9-0-140-151.

20. Bashkuev Yu. B., Buyanova D. G. Electrical properties of the Aldan-Stanovoy highland rocks according to VLF radio impedance sounding data from aircraft. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2011, no. 1, pp. 190 – 197. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Башкуев Юрий Буддич¹ — д-р техн. наук,
профессор, e-mail: buddich@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-7102-3977,

Буянова Дарима Гармаевна¹ — канд. физ.-мат. наук,
доцент, e-mail: dbuy@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-9187-0735,

¹ Институт физического материаловедения Сибирского отделения РАН.

Для контактов: Буянова Д.Г., e-mail: dbuy@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yu.B. Bashkuev¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor,
e-mail: buddich@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-7102-3977,

D.G. Buyanova¹, Cand. Sci. (Phys. Mathem.),
Assistant Professor, e-mail: dbuy@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-9187-0735,

¹ Institute of Physical Materials Science, Siberian Branch
of Russian Academy of Sciences, 670047, Ulan-Ude, Russia.

Corresponding author: D.G. Buyanova, e-mail: dbuy@mail.ru.

Получена редакцией 09.09.2022; получена после рецензии 08.12.2022; принята к печати 10.01.2023.

Received by the editors 09.09.2022; received after the review 08.12.2022; accepted for printing 10.01.2023.