

МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 550.837: 553.41:553.068.4: 622.2

ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОФИЗИКА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ЗОН ПОДРАБОТОК ДАЕК БЕРЕЗИТОВ

© 2021 г. А. В. Кузин^{1,*}, Э. Х. Гадельшина¹, И. О. Борисов¹

¹ Уральский государственный горный университет, ул. Куйбышева, д. 30, Екатеринбург, 620144 Россия

*E-mail: kuzin-av@mail.ru

Поступила в редакцию 08.04.2021 г.

После доработки 20.05.2021 г.

Принята к публикации 11.06.2021 г.

Исследована информативность и разрешающая способность геофизических методов электроразведки, гравиразведки, магниторазведки, сейсморазведки, радиометрии при исследовании зон старательских подработок березитовых золотоносных даек и кварцевых жил. Наиболее эффективна при решении изыскательских задач электроразведка методами сопротивлений, малоглубинная сейсморазведка. Поиск старательских выработок размером в первые метры в пределах золотоносных объектов возможен, если глубина до них не превышает 2–3 размера их сечения. Сеть измерений при этом должна быть соизмерима с размерами искомых объектов.

Ключевые слова: инженерная геофизика, зоны подработки

DOI: 10.31857/S0869780921050088

ВВЕДЕНИЕ

При проектировании строительства сооружений над зонами возможных подработок золотоносных даек березитов и кварцевых жил применение геофизических исследований в составе инженерно-геологических обязательно¹. Маркшейдерская служба рудников не всегда располагает сведениями о старательских приповерхностных выработках, пройденных в XVIII – начале XX веков. Такая ситуация наблюдается, в частности, на Среднем Урале на старейшем золоторудном Березовском месторождении [1, 3].

Задачи перед геофизическими исследованиями следующие: определение мощности рыхлых делювиально-элювиальных образований, поиск в толще коренных пород даек березитов (березитизированных гранит-порфиров), кварцевых жил, обнаружение в них старательских выработок (шахт, дудок, штолен, карьеров) глубиной в единицы–первые десятки метров, которые чаще всего после отработки заполнялись рыхлыми глинистыми грунтами, но могут быть заполненными грунтовой водой или оставаться полыми. Глубина исследований, как правило, не превышает 8–20 м.

Для решения вышеуказанных задач геофизическими методами существуют благоприятные геологические и петрофизические предпосылки. Искомые объекты – дайки березитов и кварцевые жилы – чаще всего имеют субвертикальное залегание, резкие границы с вмещающими их базальтами, андезитами, хлоритовыми сланцами, серпентинитами [1, 3, 5]. Физические свойства рыхлых и скальных пород верхней части разреза различны, что дает возможность изучать геофизическими методами их литологический состав и структурные взаимоотношения. Таблица физических свойств этих пород на Березовском рудном поле приведена авторами ранее [4, 5], потому укажем их типичные значения лишь в тексте при описании применения различных геофизических методов для решения инженерных задач.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На одном из участков изысканий с известными дайками мощностью около 10 м известной по бурению мощностью рыхлых образований проведены комплексные геофизические исследования методами электроразведки, магниторазведки, гравиразведки. Поэтому есть возможность сравнить информативность применяемых методов. Применение этих же методов на других участках, а также метода малоглубинной сейсморазведки и радиометрии позволяет оценить эффективность

¹ СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть 4. Правила производства инженерно-геологических изысканий в районах с особыми природно-техногенными условиями. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200032526>

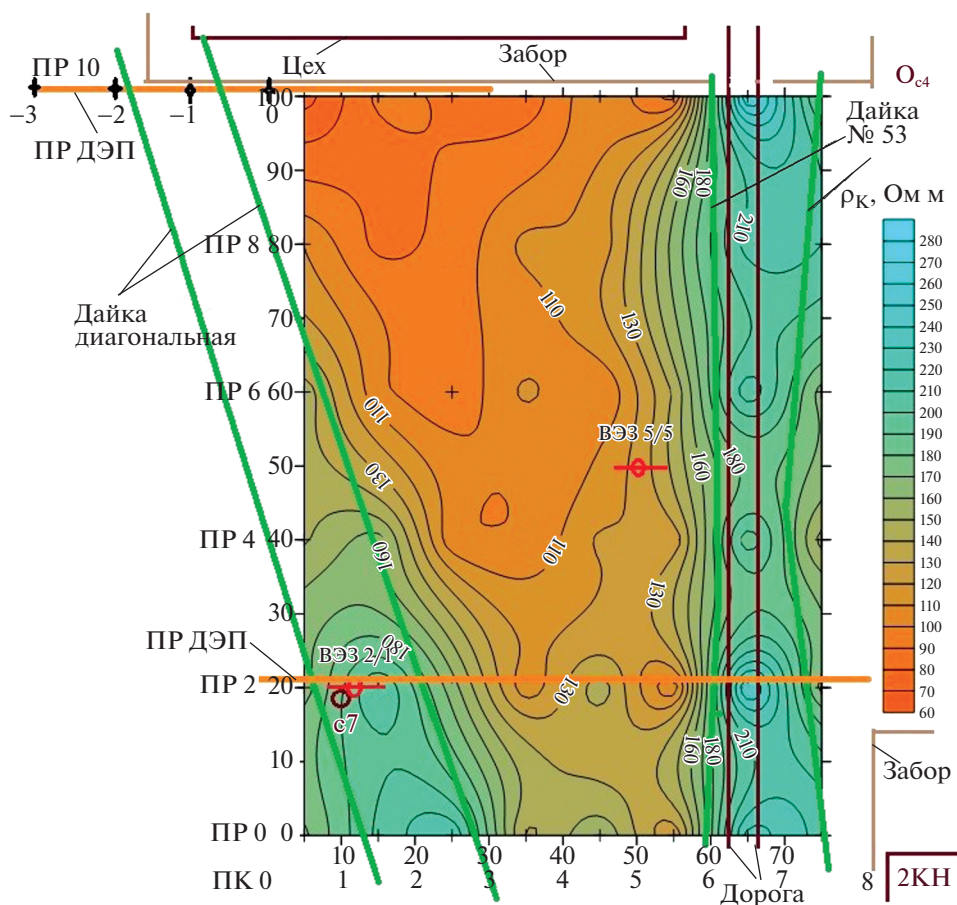


Рис. 1. План значений кажущегося удельного электрического сопротивления на глубине порядка 20–25 м по данным планшета МСГ. Указано положение даек березитов, точки ВЭЗ, скважины и некоторые сооружения.

всех этих геофизических методов более объективно.

На рис. 1 приведен план значений кажущегося удельного электрического сопротивления (УЭС) горных пород на глубине порядка 20–25 м. Он составлен по данным съемки планшета методом срединного градиента (МСГ) размером 100 × 80 м по сети 20 × 10 м. Разнос питающей линии составлял 220 м. Участок располагается в юго-восточной части Березовского. Значения кажущегося УЭС изменяются в диапазоне 60–280 Ом м. Это указывает степень выветривания скальных пород до состояния щебенисто-глинистого агрегата. Для условий Березовского рудного поля такая степень выветривания скальных на исследуемой глубине типична [4, 5]. По данным ВЭЗ № 5/5, мощность делювиальных суглинков в 10 м к западу от дайки № 53 достигает 16 м. К востоку от нее в 30–80 м – по данным Березовского рудника – до 12–16 м.

Значения кажущегося УЭС порядка 70–130 Ом м на планшете МСГ характеризуют распространение в разрезе выветренных базальтов [1, 3].

Дайки березитов Диагональная II и № 53 проявляются линейными зонами повышения кажущегося УЭС до 180–280 Ом м. По данным Березовского рудника, они не подвергались разработке. Верхняя кромка дайки Диагональная II скважиной № 7 вскрыта на глубине 8.5 м. В керне виден щебень светло-зеленых каолинизированных березитов с прожилками кварца, вкрапленностью кубических кристаллов сульфидов размером 2–4 мм, фактически это метаморфозы лимонита по пириту. По кривой ВЭЗ № 2/1, снятой вблизи скважины, кровля выветренных березитов с УЭС 138 Ом м залегает на глубине 7.8 м, кровля более прочных скальных березитов – на глубине 12.6 м, их УЭС достигает 206 Ом м.

Нерасчлененный по геоэлектрическим данным ВЭЗ № 2/1 слой рыхлых делювиальных и элювиальных суглинков светло-бурого, желтого цветов обладает УЭС порядка 35 Ом м. Это значение в полтора-два раза выше, чем УЭС бурых суглинков по базальтам в других частях исследованной точками ВЭЗ площади. Это обусловлено тем, что над дайками березитов, кварцевых жил в составе рыхлых присутствуют вторичные минералы

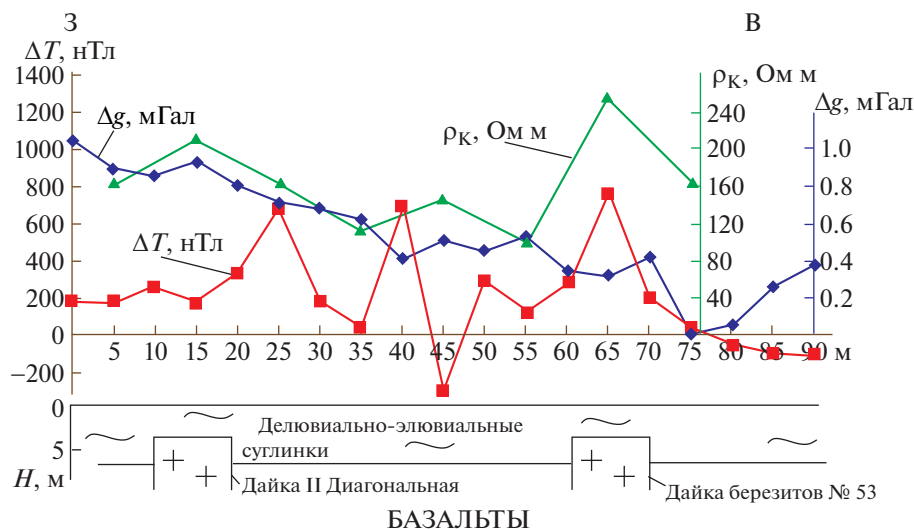


Рис. 2. Кривые ρ_k аномального магнитного и гравитационного полей на профиле № 2 планшета метода срединного градиента вкрест даек Диагональная П и № 53.

аморфного кварца: опал, халцедон [5]. Таким образом, по данным электроразведки методами сопротивлений по значениям УЭС элювиальных суглинков можно предполагать литологический состав коренных пород.

Данные двух профилей дипольного электрического профилирования (ДЭП, питающий диполь 10 м, приемный 10 м, расстояние между непарными электродами 10 м), оценивающих кажущееся УЭС отложений на глубине порядка 5 м, также показывают, что в толще делювиальных суглинков над дайками березитов отмечается повышение УЭС. Над Диагональной П — до 40–50 Ом м, над дайкой № 53 — до 40 Ом м при фоновых значениях УЭС глинистого элювия по базальтам порядка 20–30 Ом м.

Отметим решение одной из важных структурных задач инженерно-геофизических исследований площадок: по данным планшета МСГ, дайка № 53 проходит под дорогой, а не в 10 м западнее ее, как это указано на геологических схемах. Такое в рудном поле отмечается нередко: не подвергавшиеся разработке дайки могут быть указаны на геологической карте и схемах с погрешностью в несколько метров, так как их истинное положение было некогда определено разведочными линиями через 100–250 м, а между ними их положение — интерполировано.

На профиле 2 длиной 90 м планшета МСГ проведены магниторазведочные и гравиразведочные работы шагом 5 м (рис. 2). Диапазон аномального магнитного поля — от минус 350 до 800 нТл относительно фонового значения геомагнитного поля 56000 нТл. Резкая изменчивость поля от пикета к пикету обусловлена наличием металлических предметов (трубы, стальная арматура и др.) на месте бывших теплиц. Нами дополнительно были проведены исследования по трем соседним про-

филям. Графики аномального магнитного поля столь же изменчивы и между собой не коррелируются. Однако следует сослаться на опыт магниторазведочных работ на участке рудного поля, не осложненного техногенными помехами: над дайкой березитов в толще базальтов, перекрытых 5-метровым слоем суглинков, установлена локальная линейная отрицательная аномалия магнитного поля интенсивностью до сотни нТл. Магнитная восприимчивость березитов составляет $(5-10) \cdot 10^{-5}$ ед. СИ, базальтов — в 5–10 раз выше [4].

Гравитационное поле на профиле имеет региональное понижение 0.9 мГал с запада на восток. На фоне регионального снижения выделяются локальные участки понижения и повышения интенсивностью 0.1–0.3 мГал. Обе дайки березитов локальными отрицательными аномалиями не проявляются. Плотность березитов 2.6 г/см^3 , базальтов 2.8 г/см^3 . Расчетная локальная отрицательная аномалия от пласта мощностью 10 м с недостатком плотности должна составлять 0.3 мГал. Отсутствие аномалии в наблюдаемом поле обусловлено выступом выветренных березитов с плотностью порядка $2.5-2.6 \text{ г/см}^3$ в толщу элювиальных суглинков с плотностью порядка 2.0 г/см^3 . Здесь образуется гравитирующий объект с избыточной плотностью. Таким образом, относительно легкие дайки березитов, а также кварцевые жилы, залегающие в рудном поле в толще относительно тяжелых базальтов, андезитов, хлоритовых сланцев, гравиразведкой, обнаружить затруднительно, так как искомые объекты в зоне гипергенеза более стойки к выветриванию и формируют в слое относительно легких перекрывающих суглинков выступы-гряды с избыточной плотностью.

Описанная выше структурная особенность верхней части разреза с дайками березитов и

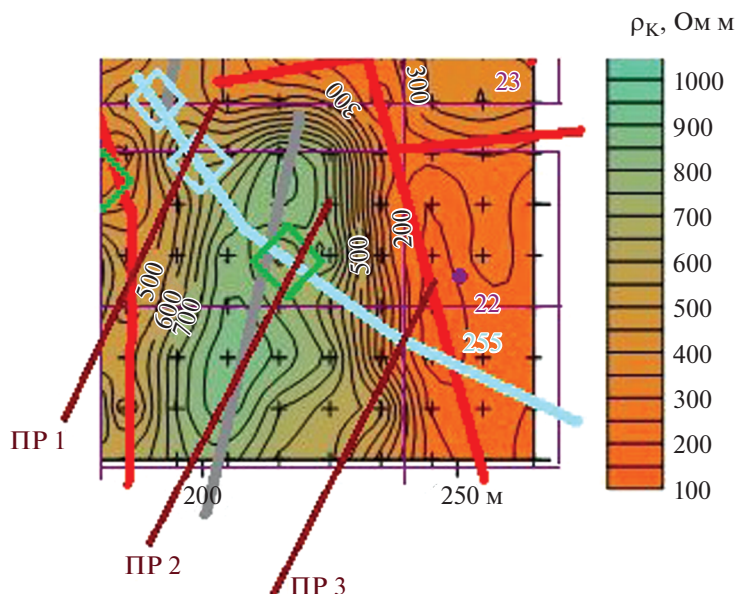


Рис. 3. Фрагмент плана изоом сводных планшетов МСГ с разносами питающей линии 130 м (глубина оценки ρ_k порядка 12–15 м) с отражением элементов выработанной красичной жилы № 255: в северо-западной части остатки жильного кварца или полые выработки проявляются относительным повышением ρ_k ; в восточном борту высокоомного тела гранит-порфиров заполненное глинистым материалом пространство выработанной жилы проявляется относительным снижением ρ_k . Красные линии — оси предполагаемых тектонических нарушений. Голубые и зеленые квадратики — возможные локальные изоляторы и проводники в интервале глубин 12–15 м.

кварцевыми жилами является благоприятной предпосылкой для исследования предполагаемых зон подработок малоглубинной сейсморазведкой. Кровля скальных под слоем суглинков и глинисто-щебенистой коры выветривания скальных является сильной отражающей и преломляющей сейсмической границей. На толще базальтов, андезитов, березитов она резкая, так как переходный слой глинисто-щебенистой коры имеет мощность небольшую — 2–4 м. Скорость упругих волн в толще делювиальных суглинков — 400–800 м/с, в базальтах — 1500–2000 м/с, в березитах — до 3000 м/с. Любой из методов малоглубинной сейсморазведки — КМПВ², МОГТ³ — установит мощность слоя рыхлых над вмещающими дайку породами основного состава и структурный выступ дайки скальных березитов в толщу рыхлых. Такой геосейсмический разрез был получен над дайкой золотоносных гранитов в районе Гагарского месторождения. Локальные старательские выработки сечением 1–2 м в толще березитовой дайки возможно обнаружить, если волновое сейсмическое поле будет исследовано в частотном диапазоне более 1 КГц.

Гранит-порфиры Березовского рудного поля (березиты) обладают естественной гамма-активностью порядка 15–25 мкР/час. Это в 2–5 раз вы-

ше, чем гамма-активность вмещающих дайки пород основного состава и кварцевых жил. Однако слой делювиальных суглинков мощностью даже в 2–3 м с фоновыми значениями гамма-активности порядка 5–10 мкР/час не позволяет широко применять полевую радиометрию для уточнения положения в разрезе даек березитов.

Что касается решения важнейшей инженерно-геологической задачи обнаружения в верхней части разреза возможных старательских выработок, то она представляется для существующего геофизического комплекса проблемной. Вопросы разрешающей способности электроразведки методами сопротивлений, гравиразведки при поисках локальных объектов рассмотрены [6, 7] в 1980-е годы и остаются столь же неутешительными, несмотря на разработку более чувствительной аппаратуры и некоторых новых методов. Фактически полую выработку (изолятор) можно обнаружить по отрицательной аномалии гравитационного поля, если глубина до ее верхней кромки не превышает ее диаметра. Однако сеть исследований должна быть соизмерима с размером искомой выработки, т.е. порядка 2 × 2 м. Если выработка заполнена глинистыми образованиями, интенсивность аномалии от нее уменьшается до 0.05–0.2 мГал, она становится соизмеримой с аномалиями от многочисленных плотностных неоднородностей в верхней части разреза, которые исследователю неизвестны.

На рис. 3 и 4 приведены материалы геофизических работ, проведенных на трех профилях, пере-

² КМПВ — модификация метода преломленных волн, основанная на регистрации первых и последующих вступлений преломленных волн.

³ МОГТ — метод общей глубинной точки.

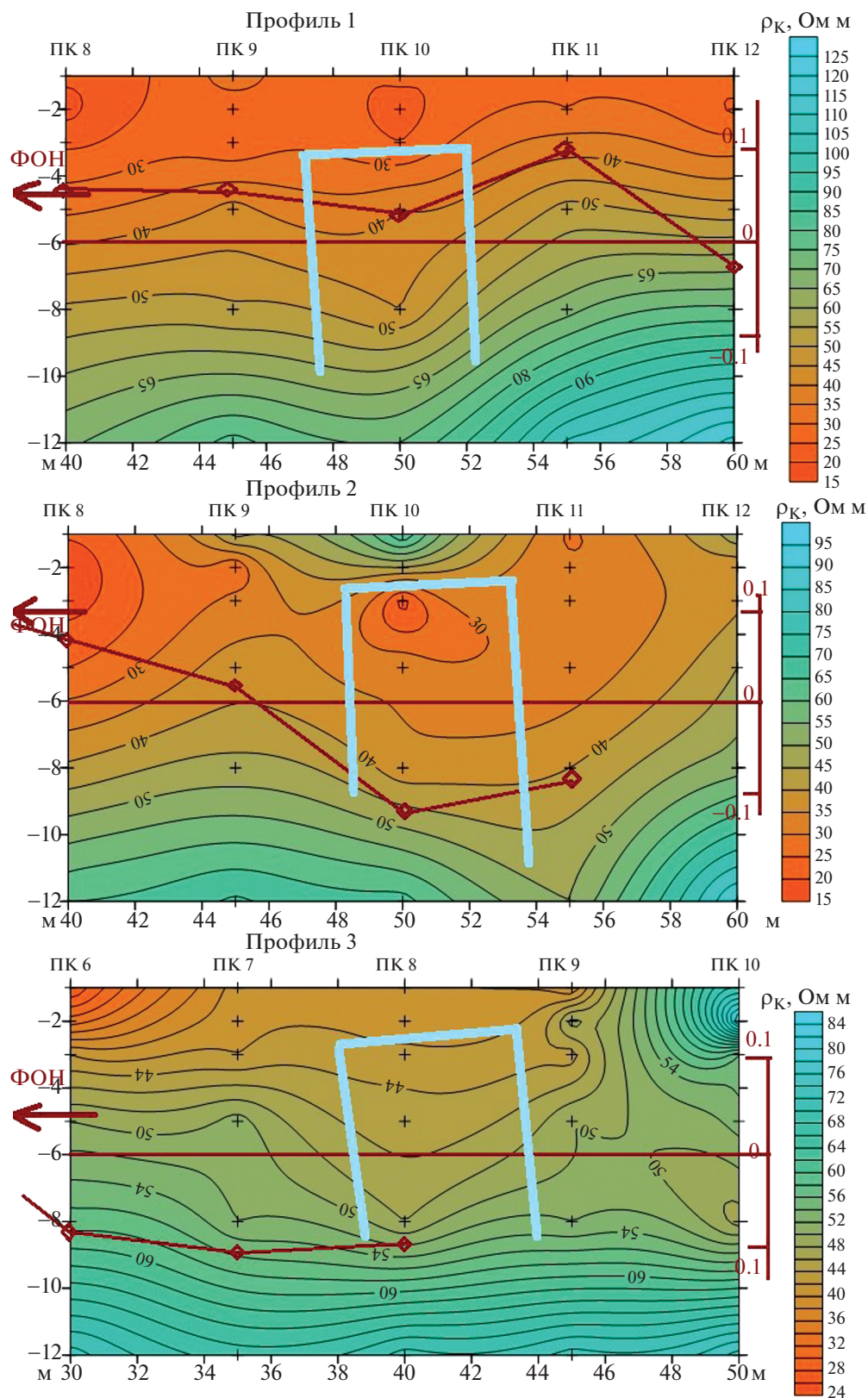


Рис. 4. Вертикальные карты сопротивления по данным ВЭЗ (условная глубина принята в 0.25 от разносов питающей линии) над профилями вкрест выработанной до глубины 17 м красичной кварцевой жилы № 255 мощностью 4–6 м и фрагмент аномального гравитационного поля в редукции Буге, указаны фоновые значения поля над вмещающими породами к юго-западу от жилы. Голубыми линиями показано предполагаемое положение глинистого заполнения на месте выработанной жилы.

секающих красичную жилу № 255. Расстояние между профилями около 30 м, длина их 60 м. Жила № 255 имеет северо-западное простирание, субвертикальная, мощностью 4–6 м, длина ее более 100 м, она выработана и заполнена грунтом. Жила пересекает 10-метровой мощности дайку гранит-порфиров субмеридиональной ориентировки с УЭС 600–1000 Ом м. По данным планшета МСГ с разносом питающей линии 220 м (глубина оценки ρ_k порядка 25–30 м), длиной приемного диполя 10 м, выработанная кварцевая жила на фоне картины изом, характеризующих УЭС лиственитов (300–400 Ом м), базальтов (100–200 Ом м), гранит-порфиров (600–1000 Ом м) не проявляется. По данным планшетов МСГ с разносами питающей линии 130 м (глубина оценки ρ_k порядка 12–15 м), длина приемной линии 5 м, жила проявляется локальными понижениями и повышениями кажущегося УЭС (см. рис. 3). Последнее подтверждает известное положение о необходимости соизмеримости длины и шага исследований с размерами искомых объектов.

Детализационные работы на профилях методами ВЭЗ, гравиразведки, магниторазведки шагом 5 м показывают (см. рис. 4) довольно однообразную двухслойную структуру верхней части разреза. Магнитное поле на рисунке не приведено, так как оно ровное безаномальное на всех профилях на всей их протяженности в 60 м. Гравитационное поле в северо-восточной части профилей, над зоной выработки дайки, пониженное, что вызвано недостатком массы из-за заполнения выработанного пространства рыхлым глинистым материалом. Однако при наличии 6–10-метрового покрова таких же относительно легких глинистых делювиально-элювиальных суглинков на профиле по гравитационным аномалиям невозможно определить мощность пластообразного тела суглинков, заполняющих выработанное пространство кварцевой жилы до глубины 17 м.

По данным ВЭЗ (симметричная установка, приемный диполь 2 м, полуразносы питающей линии АВ/2 равнялись 2, 3, 5, 9, 15, 25 м) на глубине порядка 8–10 м выделяется опорная высокоомная граница по кровле скальных пород. Положение пласта-проводника из суглинистого заполнителя выработанной жилы не проявляется в верхней рыхлой части разреза и среди скальных до глубины порядка 12 м.

Таким образом, по детализационным геофизическим работам над отработанной кварцевой жилой можно сделать вывод о заполнении отработанного пространства глинистым рыхлым электропроводным материалом. Глубину отработки установить не удастся. И можно сделать вывод об отсутствии пустот в недрах.

Применение георадарной съемки для исследования зон подработок даек березитов и кварцевых

жил возможно и целесообразно, если мощность рыхлых глинистых образований над искомыми объектами не превышает первые метры — из-за высокой поглощающей способности суглинков для ультракоротких радиоволн.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, опыт проведения инженерных геофизических исследований зон подработок березитовых даек и кварцевых красичных жил на площади Березовского рудного поля позволяет сделать вывод об информативности различных геофизических методов. Самыми информативными в комплексе методов являются электроразведочные методы сопротивлений (МСГ, ВЭЗ, СЭП) и малоглубинная сейсморазведка. При отсутствии техногенного загрязнения участков исследований истинное положение даек березитов и кварцевых жил можно выявить магниторазведкой.

Обнаружение полых выработок в толще дайки березитов или кварцевой жилы возможно при их размерах, соизмеримых с глубиной до их верхней кромки, а также при использовании георадарной съемки над участками, не перекрытыми толщей делювиально-элювиальных суглинков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабенко В.В., Поленов Ю.А., Огородников В.Н. Роль интрузивного магматизма в генезисе Березовского золоторудного месторождения (Средний Урал) // Известия Уральского государственного горного университета. 2016. № 1 (41). С. 39–49.
2. Гадельшина Э.Х., Борисов И.О., Кузин А.В. Геофизические методы при инженерных исследованиях даек березитов // Уральская горнопромышленная декада. Уральская горная школа — регион: матер. междунар. научно-практ. конф. Екатеринбург: УГТУ, 2020. С. 63–64.
3. Золотооруденение Екатеринбургского геологического полигона / В.Н. Сазонов, В.Н. Огородников, Ю.А. Поленов и др. Екатеринбург: Изд. УГГА, 1997. 226 с.
4. Кузин А.В., Ветошкин В.Д., Зырянова Е.С. Исследования геофизическими методами зон старательских разработок золотоносных березитизированных даек и кварцевых жил // УГЖ. 2019. № 3 (129). С. 63–67.
5. Кузин А.В. Исследование профиля коры выветривания Березовского золоторудного месторождения методом ВЭЗ // Разведка и охрана недр. 2019. № 8. С. 29–31.
6. Рекомендации по изучению карста геофизическими методами / ПНИИИС, М.: Стройиздат, 1986. 112 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001334384>
7. Огильви А.А. Основы инженерной геофизики. М.: Недра. 1990. 428 с.

ENGINEERING GEOPHYSICS FOR THE STUDY OF UNDERMINED ZONES AROUND BERESITE DYKES

A. V. Kuzin^{a, #}, E. Kh. Gadel'shina^a, and I. O. Borisov^a

^a Ural State Mining University, ul. Kuibysheva, 30, Yekaterinburg, 620144 Russia

[#]E-mail: kuzin-av@mail.ru

The applicability and resolution of geophysical methods (electric prospecting, gravity prospecting, magnetic prospecting, seismic prospecting, and radiometry) have been assessed for the study of prospectors' mining zones of gold-bearing beresite dykes and quartz veins. Electrical resistivity prospecting and shallow seismic prospecting appear to be the most effective in solving exploration problems. The search for prospector mine workings of the first meters in size within the gold-bearing bodies is possible, in case the depth of their occurrence does not exceed 2–3 times their cross-section. In this case, the measurement network should be comparable to the sizes of the bodies under study.

Keywords: engineering geophysics, undermined zones

REFERENCES

1. Babenko, V.V., Polenov, Yu.A., Ogorodnikov, V.N. *Rol' intruzivnogo magmatizma v genezise Berezovskogo zolotorudnogo mestorozhdeniya (Srednii Ural)* [The role of intrusive magmatism in the genesis of the Berezovskoe gold ore deposit (the Middle Urals)]. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta*. 2016, no. 1 (41), pp. 39–49. (in Russian)
2. Gadel'shina, E.Kh., Borisov, I.O., Kuzin, A.V. *Geofizicheskie metody pri inzhenernykh issledovaniyakh daek berezhitov* [Geophysical methods in engineering studies of beresite dikes]. *Ural'skaya gornopromyshlennaya dekada. Ural'skaya gornaya shkola – regionam. Mater. mezhdunar. nauchno-prakt.konf.* [The Urals mining decade. The Urals mining school to the regions. Proc. Intern. Sci. and Pract. Conference]. Yekaterinburg, UGGU, 2020. pp. 63–64. (in Russian)
3. Sazonov, V.N., Ogorodnikov, V.N., Polenov, Yu.A., et al. *Zolotoorudnenie Ekaterinburgskogo geologicheskogo poligona* [Gold ore of the Yekaterinburg geological test site]. Yekaterinburg, UGGGA Publ., 1997, 226 p. (in Russian)
4. Kuzin, A.V., Vetoshkin, V.D., Zyryanova, E.S. *Issledovaniya geofizicheskimi metodami zon staratel'skikh razrabotok zolotonosnykh berezhitirovannykh daek i kvartsevykh zhil* [Geophysical research of gold-bearing beresitized dikes and quartz veins by geophysical methods]. *Ural'skii geologicheskii zhurnal*, 2019, no. 3 (129), pp. 63–67. (in Russian)
5. Kuzin, A.V. *Issledovanie profilya kory vyvetrivaniya Berezovskogo zolotorudnogo mestorozhdeniya metodom VEZ* [Investigation of the weathering crust profile of the Berezovskoe gold ore deposit using the VES method]. *Razvedka i okhrana nedr*, no. 8, 2019. pp 29–31. (in Russian)
6. *Rekomendatsii po izucheniyu karsta geofizicheskimi metodami* [Guidelines for the study of karst by geophysical methods]. PNIIS, Moscow, Stroyizdat Publ., 1986, 112 p. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001334384>. (in Russian)
7. Ogil'vi, A.A. *Osnovy inzhenernoi geofiziki* [Basics of engineering geophysics]. Moscow, Nedra Publ., 1990, 428 p.