
ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА
ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ

УДК 669.21

DOI: [10.46698/VNC.2021.42.89.008](https://doi.org/10.46698/VNC.2021.42.89.008)

Оригинальная статья

Комплексный анализ и оценка перспективных золоторудных зон с применением современных геофизических методов

И.И. Босиков¹, Р.В. Ключев², В.Х. Тавасиев³, Н.Н. Летичевская⁴

¹Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), Россия, 362021, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44;

²Московский политехнический университет, Россия, 107203, г. Москва, ул. Большая Семеновская, 38, e-mail: kluev-roman@rambler.ru;

³Северо-Осетинский государственный университет им. К.Л. Хетагурова», Россия, 362025, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Ватутина, 44-46

⁴Астраханский государственный технический университет. Институт нефти и газа, Россия, 414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16

Статья поступила: 29.10.2021, доработана: 24.11.2021, принята к публикации: 03.12.2021

Резюме: Актуальность работы. В статье рассматривается комплексный анализ геологической и геофизической информации по проводимым исследованиям с целью выделения перспективных участков для проведения дальнейших геологоразведочных работ. **Цель работы.** Провести комплексный анализ и оценку перспективных золоторудных зон с применением современных геофизических методов. **Методы работы.** Вертикальное электрическое зондирование методом вызванной поляризации, метод вызванной поляризации в модификации срединного градиента, геоэлектрические разрезы по профилям, аномалии поляризуемости поля электрических сопротивлений, метод ТЗ электротомографии. **Результаты работы.** Авторами в 2019 г. в северной части участка на площади 2,87 кв. км были выполнены работы СГ-ВП по сети 50×10 м с MN – 10 м. и АВ – 2000 м. Измерения DU и $\varphi_{вп}$ проводились на частоте 1.22 Гц измерителями МЭРИ – 24 и ЭИН – 209 (режим измерения частотный). Использовался генератор ГЭР – 5000 – 25 (мощность 5 кВт). По результатам измерений построены карты изолиний поляризуемости и кажущегося сопротивления. Следует отметить, что при определении сдвига фаз $\varphi_{вп}$ в частотном режиме сигнал, используемый для измерения сдвига фаз при равных DU с импульсным режимом измерений в 30-100 раз выше. Это основное преимущество фазовых измерений над импульсными. Как видно из приведенного сравнения уменьшение длины приемной линии и шага наблюдений позволило увеличить детальность исследований СГ-ВП и выйти на уровень рудных тел, заданных в техническом задании. По результатам ТЗ электротомографии и ВЭЗ-ВП получены близкие результаты, хотя методически и теоретически ТЗ обладает в данных условиях большей детальностью и информативностью. По результатам геофизических работ построены карты изолиний и графиков ρ_k и $\varphi_{вп}$, выявлена их связь с рудовмещающими структурами и отдельными рудными телами. Всего выявлено 14 локальных аномалий поляризуемости связанных с золото-кварц-сульфидными и сульфидными рудными телами. Выявлены площадные аномалии повышенной поляризуемости и низких значений электрического сопротивления СГ-ВП вдоль Западной рудно-тектонической зоны. Они связаны с метасоматическими процессами в пределах Западной зоны сбросо-сдвигов. На площади работ отмечены слабоконтрастные аномалии магнитного поля в северо-западной части Северной зоны. Отмечено сильное влияние рельефа на характер магнитного поля, вследствие чего наблюдается корреляция хребтов с минимумами магнитного поля.

Ключевые слова: месторождение, геофизическое исследование, комплекс формационных, геолого-структурных, метасоматических, минералого-геохимических, геофизических поисковых критериев и признаков, петрографический состав, золото-кварц-сульфидные и сульфидные рудные тела.

Для цитирования: Босиков И.И., Ключев Р.В., Тавасиев В.Х., Летичевская Н.Н. Комплексный анализ и оценка перспективных золоторудных зон с применением современных геофизических методов. *Геология и геофизика Юга России*. 2021. 11(4): 94-108. DOI: 10.46698/VNC.2021.42.89.008.

GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION
OF SOLID MINERALS, MINERAGENY

[DOI: 10.46698/VNC.2021.42.89.008](https://doi.org/10.46698/VNC.2021.42.89.008)

Original paper

Comprehensive analysis and assessment of prospective gold-ore zones using modern geophysical methods

I.I. Bosikov¹, R.V. Klyuev², V.Kh. Tavasiev³, N.N. Letichevskaya⁴

¹North Caucasian institute of Mining and Metallurgy (State Technological University),
44 Nikolaeva Str., Vladikavkaz 362021, Russian Federation;

²Moscow Polytechnic University, 38 Bolshaya Semenovskaya Str., Moscow 107203,
Russian Federation, e-mail: kluev-roman@rambler.ru;

³North Ossetian State University named after K.L. Khetagurov, 44-46 Vatutina Str.,
Vladikavkaz 362025, Russian Federation;

⁴Astrakhan State Technical University. Institute of Oil and Gas, 16 Tatischeva Str.,
Astrakhan 414056, Russian Federation

Received: 29.10.2021, revised: 24.11.2021, accepted: 03.12.2021

Abstract: Relevance. The article discusses a comprehensive analysis of geological and geophysical information on ongoing research in order to identify promising areas for further exploration. **Aim.** Conduct a comprehensive analysis and assessment of promising gold ore zones using modern geophysical methods. **Methods.** Vertical electrical sounding by the induced polarization method, the induced polarization method in the modification of the median gradient, geoelectric sections along the profiles, anomalies of the polarizability of the electrical resistance field, TK method of electrotomography. **Results.** The authors in 2019 in the northern part of the site on an area of 2.87 sq. km SG-VP works were performed on a network of 50 × 10m with MN – 10m. and AB – 2000 m. Measurements of DU and φ_{vp} were carried out at a frequency of 1.22 Hz with meters MARI – 24 and EIN – 209 (frequency measurement mode). Used generator GER – 5000 – 25 (power 5 kW). Based on the measurement results, maps of isolines of polarizability and apparent resistivity were constructed. It should be noted that when determining the phase shift φ_{vp} in the frequency mode, the signal used to measure the phase shift at equal DU with the pulse measurement mode is 30-100 times higher. This is the main advantage of phase measurements over pulsed ones. As can be seen from the above comparison, a decrease in the length of the receiving line and the step of observations made it possible to increase the detail of SG-VP studies and to reach

the level of ore bodies specified in the terms of reference. Based on the results of the technical specification for electrotomography and VES-IP, similar results were obtained, although methodologically and theoretically, the technical specification has greater detail and information content under these conditions. Based on the results of geophysical work, maps of isolines and graphs of ρ_k and $\varphi_{вп}$ were constructed, their relationship with ore-bearing structures and individual ore bodies was revealed. In total, 14 local anomalies of polarizability associated with gold-quartz-sulfide and sulfide ore bodies have been identified. Areal anomalies of increased polarizability and low values of electrical resistance of SG-VP were revealed along the Western ore-tectonic zone. They are associated with metasomatic processes within the Western fault-strike zone. Low-contrast magnetic field anomalies in the northwestern part of the Northern Zone were noted in the survey area. A strong influence of the relief on the nature of the magnetic field was noted, as a result of which a correlation of the ridges with the minima of the magnetic field is observed.

Keywords: deposit, geophysical research, a complex of formational, geological-structural, metasomatic, mineralogical-geochemical, geophysical prospecting criteria and features, petrographic composition, gold-quartz-sulfide and sulfide ore bodies.

For citation: Bosikov I.I., Klyuev R.V., Tavasiev V.Kh., Letichevskaya N.N. Comprehensive analysis and assessment of prospective gold-ore zones using modern geophysical methods. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2021. 11(4): 94-108. DOI: 10.46698/VNC.2021.42.89.008.

Введение

Исследования проводились на золотоносном коренном рудопроявлении [Некрасов, 2018]. Для наблюдения изменения размеров и характера распределения оруденения были использованы материалы ранее проводимых работ на Северном участке [Босиков и др., 2021а, б; Ключев и др., 2020].

Исследуемый участок расположен в восточной части поднятия Передового хребта (рис. 1). Водно- и гравитационно-аккумулятивные формы рельефа на описываемой площади имеют подчиненное значение. Аллювиальные образования практически отсутствуют. Широко распространены обвальное-осыпные образования. Они располагаются, как правило, в нижних частях склонов, несколько сглаживая рельеф. Иногда осыпи перекрывают древние гляциальные отложения [Голик и др., 2020].

На площади работ весной и в начале лета многочисленны временные водотоки и родники, большинство которых пересыхает к концу августа.

Форма долин рек V-образная. В верховьях рек развиты древние ледниковые цирки. Уклоны долин весьма значительны – до 0,25, часты перепады. Питание рек – преимущественно за счет атмосферных осадков, поэтому указанные водотоки наиболее обильны в летний период. Дебит рек весьма непостоянен и колеблется не только в течение года, но и суток. Осенью и в зимний период реки мелеют и почти полностью перемерзают [Литвиненко, 2018].

Климат района типично высокогорный с резкой сменой и значительными колебаниями суточной и годовой температуры, с большим количеством осадков, достигающих 900 мм в год.

Снежный покров ложится в октябре и держится до июня. В зимний период часты ураганные ветры, которые в совокупности с морозами создают неблагоприятную обстановку для проведения поверхностных геологических работ. Зимой нередки сходы лотковых и склоновых лавин. Летом обычны дожди и густые туманы [Голик и др., 2020; Некрасов, 2019].

Растительный покров весьма беден. Отдельные карликового типа березки и ольха поднимаются до высоты 2000 м на северном склоне хр. Ташорун-баш. До 2800 м развиты альпийские луга. Выше – скальные участки с лишайниками и мхами.

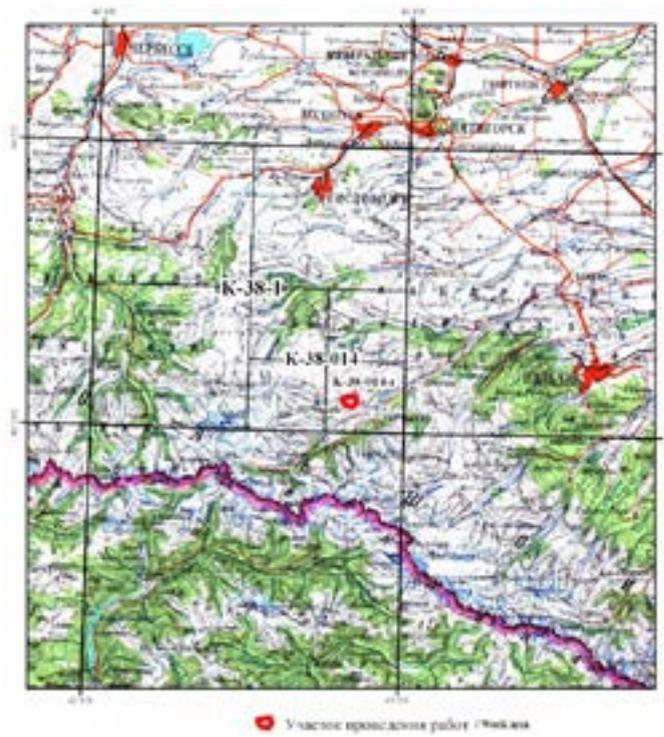


Рис.1. Обзорная карта района исследований /
Fig. 1. Overview map of the research area

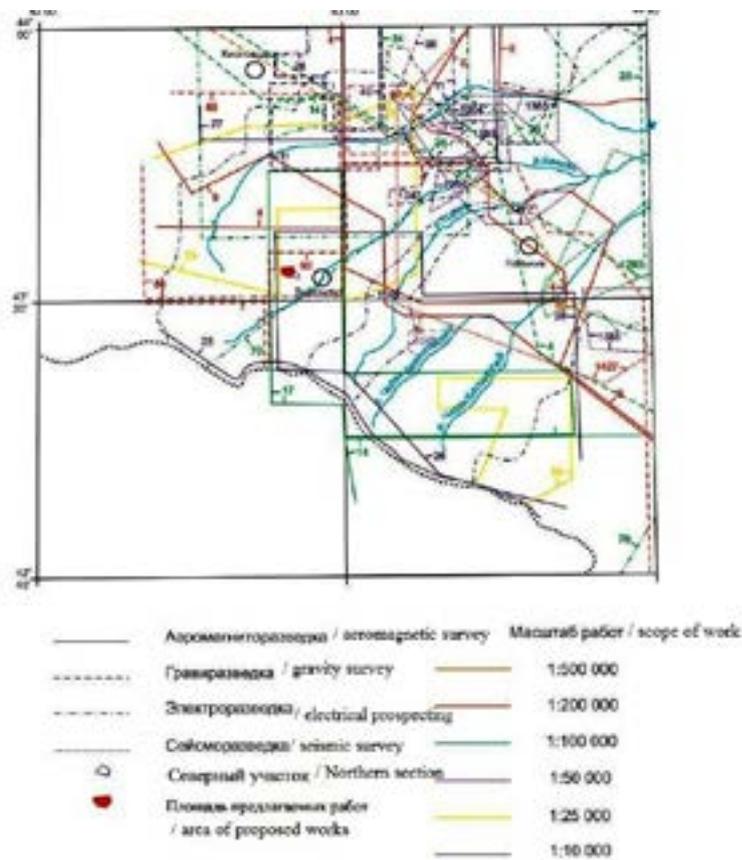


Рис 2. Схема геофизической изученности района /
Fig. 2. Scheme of geophysical study of the area

Геофизические аномалии, выделенные на площади по результатам исследований в 2018-2019 гг., сильно дифференцированы, имеют преимущественно субширотное простирание и локализуются в большей степени в вулканогенно-осадочном и интрузивном комплексах, в меньшей степени в молассовом.

1. Кажущееся удельное электрическое сопротивление изменяется в диапазоне от десятков Ом·м до первых тысяч Ом·м, поляризуемость – от долей процента до 5-6 процентов. Общее направление простирания электроразведочных аномалий – субширотное, что хорошо согласуется с направлением простирания основных геологических структур [Федорова и др., 2018; Чотчаев и др., 2021; Шарафелдин, 2018; Augustin, Gaboury, 2018; Ganapathy et al., 2020; Luo et al., 2018; Nassani et al., 2021; Sebutsoe et al., 2017].

Аномалии поляризуемости можно разделить на два типа. Аномалии первого типа отличаются высокими значениями поляризуемости 3-4% и более на фоне относительно низких значений сопротивления 100–400 Ом·м. Они могут быть ассоциированы с зонами жильково-вкрапленной минерализации в разломных зонах. Аномальные зоны второго типа сочетают высокие значения поляризуемости с относительно более высокими сопротивлениями от 400 до 1000 и более Ом·м. Такие аномалии соответствуют, по-видимому, зонам метасоматической проработки с большим количеством непроводящих минералов, где отдельные сульфидные зерна электрически меньше связаны между собой.

По комплексу прямых и косвенных признаков оруденения предварительно было выделено несколько рудоперспективных участков. Так, в восточной части площади работ ожидалось выявление продолжений рудных зон, локализованных в пределах Северного участка и оставшихся неоконтуренными на флангах.

Методы исследований

Вертикальное электрическое зондирование методом вызванной поляризации, метод вызванной поляризации в модификации срединного градиента, геоэлектрические разрезы по профилям, аномалии поляризуемости поля электрических сопротивлений, метод ТЗ электротомографии.

Техническая часть. Поля электрических сопротивлений и поляризуемости участка определялись петрографическим составом пород участка, степенью метасоматических изменений и тектоническими нарушениями.

Большую часть площади слагают средне-позднедевонские (D_{2-3}) отложения, представленные в основном вулканогенно-осадочными породами: туфами, туфопесчаниками и лавами, перемежающимися слоями глинистых сланцев и филлитов. Все породы в разной степени рассланцованы и перекристаллизованы, подвергнуты метасоматозу пропилитового и березит-лиственитового типов.

2. Развита система разрывных нарушений различного направления. Основное направление – диагональное северо-западное. Выделяют две основных диагональных зоны сбросо-сдвигов: Зыгыркольская и Хромитовая зоны, по которым внедрялись тела гипербазитов, а также дайки и штоки гранитоидов. Тектонические зоны несколько разные по структурной позиции, минералогии интрузивных пород и метасоматитов. По диагональным тектоническим зонам, а также в пределах участка, который они ограничивают, интенсивно развиваются процессы скарнирования и золотоносной метасоматической проработки, таким образом, выделяется рудоносная полоса, шириной до 1 км [Sinclair et al., 2015; Song et al., 2017].

Рудоносные скарны представлены преимущественно крутопадающими линзовидными телами преимущественно эпидот-гранат-пироксенового состава. Рудная минерализация представлена неравномерной вкрапленностью, прожилками и гнездами сульфидов, в составе которых преобладают пирротин, пирит и арсенопирит.

Основной задачей поисковых геофизических работ методом ВП является выявление и оконтуривание минерализованных зон с золото-кварц-сульфидным оруденением, определение их геолого-структурной позиции.

3. Исследования с помощью метода вызванной поляризации в модификации срединного градиента. Электрическое сопротивление пород Северного участка колеблется в широких пределах от десятков до тысячи Ом·м и определяется их литологическим составом и степенью метасоматических изменений. Среднее значение их кажущегося сопротивления (p_k) составляет около 300 Ом·м. На этом фоне выделяются площадные аномалии повышенных и пониженных значений кажущегося сопротивления [Tyulenev et al., 2016, 2018; Zhukovskiy et al., 2019].

По результатам комплексной качественной интерпретации полей электрического сопротивления и поляризуемости с учётом геологического строения Северного участка, результатов бороздового и кернового опробования рудных зон было выделено два перспективных участка.

Участок №1 (Северный участок и проявления «Западное»).

Северный участок и проявления «Западное» входят в один перспективный высокоомный участок, характеризующийся значениями кажущегося сопротивления более 500 Ом·м. Размеры участка 1200 × 700 м.

В западной части этого участка наблюдается площадная аномалия поляризуемости, связанная с рассеянной сульфидной минерализацией. Большая ширина Северного перспективного участка объясняется большой глубиной исследований (800 м) и падением зоны к северо-востоку. В пределах западной части участка сосредоточены все значимые рудопроявления золота.

В северной части участка выявлены две сближенные аномалии кажущегося сопротивления (№№6, 6.1) протяженностью около 1 км при общей ширине 50–100 м с северо-западной и северной ориентировкой. Почти на всём протяжении аномалии совпадает с ореолами золота, выявленными в рыхлых отложениях.

Часть площади аномалий была вскрыта канавой 4 и канавой 17 (рудопроявление «Западное»). По результатам пробирных анализов в бороздовых пробах, отобранных в этих канавах, оказалось высокое содержание золота.

Участок №2 (Северный).

Участок №2 выделен в восточной части исследуемой площади, в районе Северной зоны, где была выявлена область низкоомных пород со значениями кажущегося сопротивления менее 100 Ом·м. Они были вскрыты скважиной 9 и представляют собой графитизированные породы с разноориентированными кварцевыми и кварц-карбонатными прожилками и рассеянной вкрапленностью пирита. По результатам пробирных анализов керновых проб, отобранных по керну скважины 9, содержание золота в этих породах высокое.

Область пониженных сопротивлений сопровождается площадной аномалией поляризуемости и, в свою очередь, совпадает с ореолами золота по вторичным потокам рассеивания.

Поляризуемость φ_{en} горных пород Северного участка определяется объёмным содержанием сульфидных минералов и их минеральным составом. Повышенной фоновой поляризуемостью (около 1%) характеризуются вулканогенно-осадочные породы девона в юго-восточной части площади. На этом фоне зоны золотосульфидной минерализации отмечаются локальными аномалиями до 3%.

В северной части, перекрытой нерасчленёнными отложениями карбона, наблюдается повышенная фоновая поляризуемость, связанная с серией оперяющих ее тектонических нарушений и сульфидной минерализацией по ним.

В западной части, перекрытой отложениями карбона значительной мощности, не отмечено повышенной фоновой поляризуемости. Здесь по графикам φ_{en} выделяются малоамплитудные линейные аномалии поляризуемости, связанные с процессами гидротермальной проработки и метасоматоза по тектоническим зонам и их сульфидной минерализацией.

На картах графиков и изолиний поляризуемости φ_{en} методом вызванной поляризации (ВП) в модификации срединного градиента (СГ-ВП) выделяется 14 локальных линейных и две площадных аномалий, связанных с зонами сульфидной минерализации. Локальные аномалии φ_{en} №№1 и 2 имеют протяженность по 350 м и имеют амплитуду около $0,8^\circ$ и не сопровождаются какими-либо изменениями ρ_k и, вероятно, связаны с маломощной зоной сульфидной минерализации. Аномалии поляризуемости №№3 и 4, протяженностью 350 м и 400 м, сопровождаются локальными максимумами ρ_k и связаны с кварц-сульфидными рудными телами. Локальные аномалии поляризуемости №№5, 5.1 находятся в пределах Северного участка. Аномалии прослеживаются по мало амплитудным повышениям поляризуемости в северо-западной и юго-восточной частях участка. Аномалии находятся в высокоомном блоке пород, вмещающем Северный участок. Широкая зона повышенных значений ρ_k связана с развитыми здесь скарнами и метасоматитами. Аномалия №№5 вскрыта скважинами 1, 2, 6, 4, 5, 7. Во всех скважинах выявлена сульфидная минерализация с золотым оруденением, объясняющая природу аномалии поляризуемости. Аномалия поляризуемости №6 имеет протяженность 1600 м. Амплитуда в пределах аномалии изменяется от $0,8^\circ$ до $2,5^\circ$, образуя узлы увеличения мощности и амплитуды. Аномалия сопровождается повышением ρ_k , характерным для золото-кварц-сульфидного оруденения. В северо-западной, центральной и юго-восточной части площади пространственно совпадает с точками сульфидной минерализации. На профиле 14 аномалия вскрыта канавой 4. По результатам опробования канавы содержание золота составляет до 8,48 г/т. На профиле 12 по канаве 17, пройденной в пределах аномалии, содержание золота составляет 14 г/т. Простираение аномалии на участке канав совпадает с рудным телом рудопроявления «Западное». Учитывая протяженность аномалии, перспективы рудопроявления могут значительно возрасти. Следует отметить, что аномалия 6 была выделена как перспективная для постановки горных работ ещё в июле 2019 г. Аномалия поляризуемости №6.1 отмечается в 40 м от аномалии 6 и не сопровождается четким повышением значений электрического сопротивления, и связана, вероятно, с сульфидной минерализацией в метасоматически изменённых породах.

Локальная линейная аномалия φ_{en} №7 с амплитудой до $2,5^\circ$ имеет протяженность 1700 м и сопровождается повышением удельного электрического сопротивления. По своим параметрам аномалия сходна с аномалией 6 и является перспективной на золотое оруденение. Локальная линейная аномалия φ_{en} №8 протяженностью 1800 м и амплитудой до 3° в юго-восточной части площади. Аномалия связана с сульфидной

минерализацией. Локальная линейная аномалия поляризуемости №9 имеет протяженность 1950 м и амплитуду φ_{en} до 2° . Аномалии 5–9 объединены в один Зыгыркольский перспективный участок, включающий в себя практически все известные на данный момент золоторудные тела. Локальная линейная аномалия поляризуемости №10 имеет протяженность 2100 м и амплитуду φ_{en} $1-2,5^\circ$. В геологическом плане она связана с сульфидной минерализацией по кварц-карбонатным метасоматитам Северной зоны. Локальная линейная аномалия поляризуемости №11 имеет протяженность 1200 м и амплитуду φ_{en} $1,0-2,5^\circ$. В геологическом плане она связана с сульфидной минерализацией по кварц-карбонатным метасоматитам Северной зоны.

Линейная аномалия поляризуемости №12 имеет протяжённость 1100 м, пространственно совпадает с линейной аномалией проводимости. Локальные линейные аномалии поляризуемости в пределах перспективного Северного участка, вскрытые в юго-восточной части отдельными горными выработками, связаны с кварц-золото-сульфидным оруденением и являются перспективными на всём своём протяжении. Положение аномалий на карте точно совпадает с рудными интервалами по канавам. Линейные аномалии поляризуемости №№13 и 14 протяженностью 1000 м и амплитудой до $2,5^\circ$ связаны с сульфидными зонами Теверсинчикокольской зоны. Аномалия 14 пространственно совпадает с геохимическими аномалиями золота. Линейные аномалии поляризуемости №№15 и 16 протяженностью 900 м пространственно совпадают с кварц-карбонатными метасоматитами Западной зоны, выходящими на поверхность и продолжающимися под отложениями карбона.

Вертикальное электрическое зондирование методом вызванной поляризации.

По результатам количественной интерпретации вертикального электрического зондирования с измерением вызванной поляризуемости (ВЭЗ–ВП) построены геоэлектрические разрезы по профилям, проходящим через проектируемые скважины (рис. 3–5) и перспективные аномалии.

Профиль 1 пройден в пределах Северного участка по дороге на склоне крутизной 45° . В связи с этим, все результаты по глубинам следует относить ортогонально к склону. Как видно из приведенного рисунка на точках 1 и 2 верхняя часть разреза мощностью до 40 м представлена делювиальными отложениями, состоящими в нижней части из глыб коренных пород с высокой поляризуемостью и высоким сопротивлением. На точках 3–4 мощность делювия составляет первые метры и далее расположен высокоомный блок скарнов с низкой поляризуемостью. Похожие результаты ранее получены в начале профиля 4. Профиль 2. Профиль пройден в пределах Северного участка по пр. 4–5 СГ–ВП. Как видно из графиков СГ–ВП на пикетах 57–58 выделяется локальная аномалия $\varphi_{вп}$ амплитудой – $1,1^\circ$. На геоэлектрических разрезах мощность делювиальных отложений составляет до 50 м. На ВЭЗ–ВП №7–8 высокими значениями ρ_k и φ_{en} выделяются скарны с сульфидной минерализацией. Профиль 3. В пределах профиля ВЭЗ–ВП по СГ–ВП на пр. 15 аномалий поляризуемости не выявлено. На пр. 3 аномальной поляризуемостью и высокими значениями сопротивлений отмечаются четвертичные аллювиальные отложения мощностью до 60 м, вероятно, представленные чередованием суглинков с гравием и глыбами пород с сульфидной минерализацией. Малоамплитудное повышение поляризуемости отмечено на зондировании №12. Профиль ВЭЗ–ВП №4 пройден в пределах пр. 9 СГ–ВП. На графиках φ_{en} на ПК. 66–67 (ВЭЗ–ВП 17) отмечается локальная аномалия амплитудой – $1,2^\circ$. На геоэлектрических разрезах поляризуемости и сопротивлений четвертичные делювиальные отложения имеют мощность до 60 м и характеризуются как многослойный

разрез с чередованием слоёв разной поляризуемости и сопротивлений. Породы кызылкольской свиты характеризуются сопротивлением ρ 250 Ом·м и поляризуемостью 0,5°. Зона повышенной поляризуемости, связанная с сульфидной минерализацией отмечается на ВЭЗ-ВП №23. Профиль 5. Профиль пройден в пределах Северного участка по пр. 4-5 СГ-ВП. Как видно из графиков СГ-ВП на пикетах 57-58 выделяется локальная аномалия $\varphi_{\text{вп}}$ амплитудой 1,1°. На геоэлектрических разрезах (рис. 3) мощность делювиальных отложений составляет около 50 м. На ВЭЗ-ВП №7-8 высокими значениями ρ_k и $\varphi_{\text{вп}}$ выделяются скарны с сульфидной минерализацией. Профиль 6 проведен между профилями 11 и 12 СГ-ВП в районе скв. 10. На представленных геоэлектрических разрезах мощность четвертичных отложений составляет первые метры. В пределах всего профиля отмечается аномальная поляризуемость и низкие значения электрических сопротивлений. Аномально низким сопротивлением величиной в 16 Ом·м и поляризуемостью 7% характеризуется ВЭЗ-ВП №23. Такие значения поляризуемости и сопротивлений характерны для рудных тел с густовкрапленными рудами. Профиль 7. Профиль выполнен в пределах аномалий поляризуемости №№9 и 10 связанных хромитовой зоной. Как видно из приведенных разрезов мощность четвертичных отложений составляет 7 м. На точках 22-23 в зоне северного сбросо-сдвига в отложениях кызылкольской свиты на глубине около 50 м. выделяется зона сульфидной минерализации. Профиль 8. Измерения выполнены через скв. 11 по пр. 22 СГ-ВП. Как видно из приведенных разрезов мощность четвертичных отложений по профилю 3–5 м. Профиль пройден в районе северного сбросо-сдвига, но в разрезе сопротивлений и поляризуемости это не находит отражения. Профиль 9. Профиль ВЭЗ-ВП №9 пройден в пределах пр. 9 СГ-ВП. На графиках $\varphi_{\text{вп}}$ на ПК. 66-67 (ВЭЗ-ВП 17) отмечается локальная аномалия с амплитудой – 1,2°. На геоэлектрических разрезах поляризуемости и сопротивлений четвертичные делювиальные отложения имеют мощность до 60 м и характеризуются как многослойный разрез с чередованием слоёв разной поляризуемости и сопротивлений. Породы кызылкольской свиты характеризуются сопротивлением ρ 250 Ом·м и поляризуемостью 0,5°. Зона повышенной поляризуемости, связанная с сульфидной минерализацией отмечается на ВЭЗ-ВП №23. Профиль 11 проведен между профилями 11 и 12 СГ-ВП в пределах Северной зоны минерализации. На представленных геоэлектрических разрезах мощность четвертичных отложений составляет первые метры. В пределах всего профиля отмечается аномальная поляризуемость и низкие значения электрических сопротивлений, связанные с развитыми здесь графитизацией и вкрапленной пиритизацией. Аномально низким сопротивлением в 16 Ом·м и поляризуемостью 7° характеризуется ВЭЗ-ВП №25. Такие значения поляризуемости и сопротивлений характерны для рудных тел с густо вкрапленными рудами. Профиль 15. В пределах профиля ВЭЗ-ВП по СГ-ВП на пр. 15 ПК. 85 выделена аномалия поляризуемости. На пр. 15 аномальной поляризуемостью и высокими значениями сопротивлений отмечаются четвертичные делювиальные отложения мощностью 40–60 м, вероятно, представленные чередованием суглинков с гравием и глыбами пород с сульфидной минерализацией. Малоамплитудное повышение поляризуемости на глубине 50 м отмечено на зондировании №12. Профиль 18 отработан в пределах локальных аномалий поляризуемости на профиле 18 СГ-ВП по Северной зоне. На пр. 17 ПК. 91 выделена аномалия поляризуемости. На разрезе сопротивлений ВЭЗ-ВП №30–32 выделяется область очень высоких сопротивлений, связанная с блоком метасоматически изменённых пород. На глубине 100 м в точках 31 и 32 отмечается аномалия поляризуемости, связанная с сульфидной

минерализацией. Мощность четвертичных отложений в пределах профиля составляет 20–25 м. Профиль 22. Измерения выполнены через пр. 22 СГ-ВП. Как видно из приведенных разрезов, мощность четвертичных отложений по профилю составляет 3–5 м. Профиль пройден в районе Северного сбросо-сдвига. На ПК 190 графиков ρ_k СГ-ВП выделяется аномалия низких сопротивлений, связанная с тектонической зоной дробления. На геоэлектрическом разрезе на ВЭЗ-ВП №37 тектоническая зона характеризуется понижением электрического сопротивления до 123 Ом·м и северо-восточным падением. На разрезах поляризуемости аномалии СГ-ВП №№10, 11, 12 не отмечаются, вероятно, из-за их большой глубины залегания. Профиль 26 пройден через аномалию поляризуемости №5. На профиле на глубинах около 30 м выделяется зона повышенных сопротивлений и поляризуемости, обусловленная метасоматически изменёнными породами с сульфидной минерализацией. Мощность четвертичных отложений в пределах профиля около 20 м. Профиль 34 (рис. 4). Профиль пройден через аномалию №5 по пр. 34 СГ-ВП. В пределах профиля на ВЭЗ-ВП 76–78 на глубине около 100 м выявлена аномалия поляризуемости, связанная с зоной сульфидной минерализации. Мощность четвертичных отложений около 50 м. Профиль 42. Профиль пройден через перспективную аномалию поляризуемости №10. На ВЭЗ-ВП №63 выявлена зона повышенных электрических сопротивлений, связанная, вероятно, с зоной метасоматических изменений и окварцевания. На ВЭЗ-ВП №59-60 выделяется область низких значений электрического сопротивления северо-восточного падения, связанная с тектонической зоной дробления.

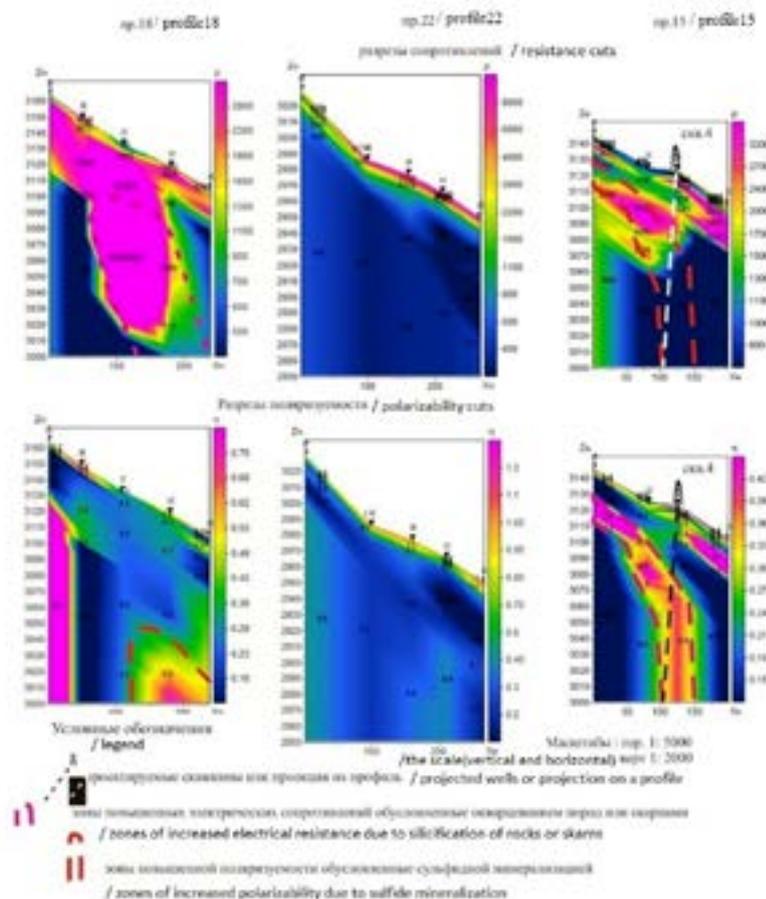


Рис. 3. Геоэлектрические разрезы ВЭЗ-ВП по пр. 18-22-15 / Fig. 3. Geoelectric sections VES-VP on pr. 18-22-15

Профиль 29–32. Профиль пройден через северо-западные фланги аномалий поляризуемости №6–10. В результате на глубинах 60–100 м. выявлено четыре аномалии поляризуемости, связанные с зонами сульфидной минерализации прослеженные методом СГ-ВП.

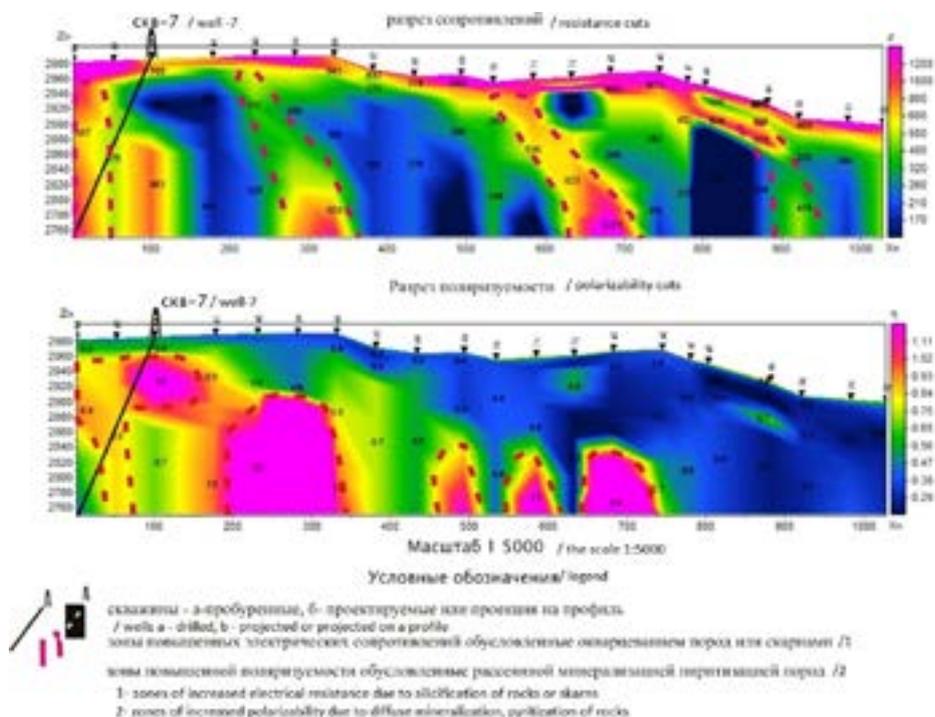


Рис. 4. Геоэлектрический разрез по пр. 29-32 / Fig. 4. Geoelectric section along pr. 29-32

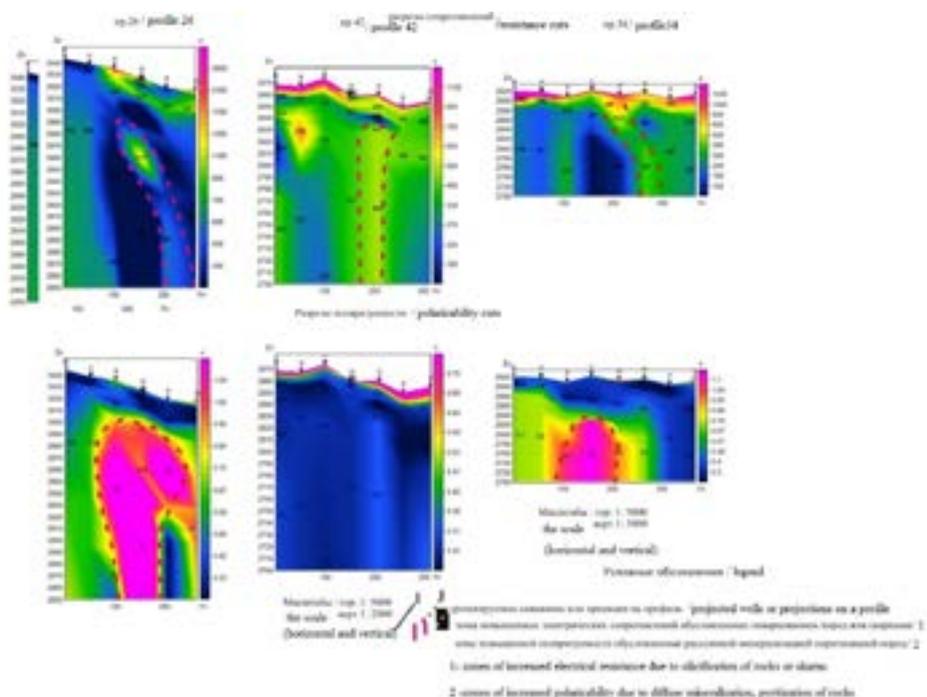


Рис. 5. Геоэлектрические разрезы ВЭС-ВП по пр. 26, 34; 42 / Fig. 5. Geoelectric sections of VES-VP along pr. 26, 34; 42

Результаты работы и их обсуждение

Работы проводились аппаратурой АЭИ-2 с генератором ВП-1000 (мощность 1 кВт). Режим измерений импульсный, длительность импульса – 1 сек. Регистрация DUвп – 200 мсек. В результате работ построены карты изолиний поляризуемости и кажущегося сопротивления. Работы выполнены качественно на высоком технологическом уровне. Однако из-за малого уровня сигнала DUвп исполнители работ вынуждены были удлинить линию MN, что привело к излишнему сглаживанию полей и потере в детальности исследований.

Авторами в 2019 г. в северной части участка на площади 2,87 кв. км были выполнены работы СГ-ВП по сети 50×10 м с MN – 10 м и АВ – 2000 м. Измерения DU и φ_{en} проводились на частоте 1,22 Гц измерителями МЭРИ – 24 и ЭИН – 209 (режим измерения частотный). Использовался генератор ГЭР – 5000 – 25 (мощность 5 кВт). По результатам измерений построены карты изолиний поляризуемости и кажущегося сопротивления. Следует отметить, что при определении сдвига фаз $\varphi_{вп}$ в частотном режиме сигнал, используемый для измерения сдвига фаз при равных DU с импульсным режимом измерений в 30–100 раз выше. Это основное преимущество фазовых измерений над импульсными.

Как видно из представленных в графическом приложении карт изолиний поляризуемости общий план изолиний хорошо совпадает в пределах зон Северной и Западной. На картах 2019 г. дополнительно выделяются локальные линейные аномалии, связываемые с отдельными рудными телами.

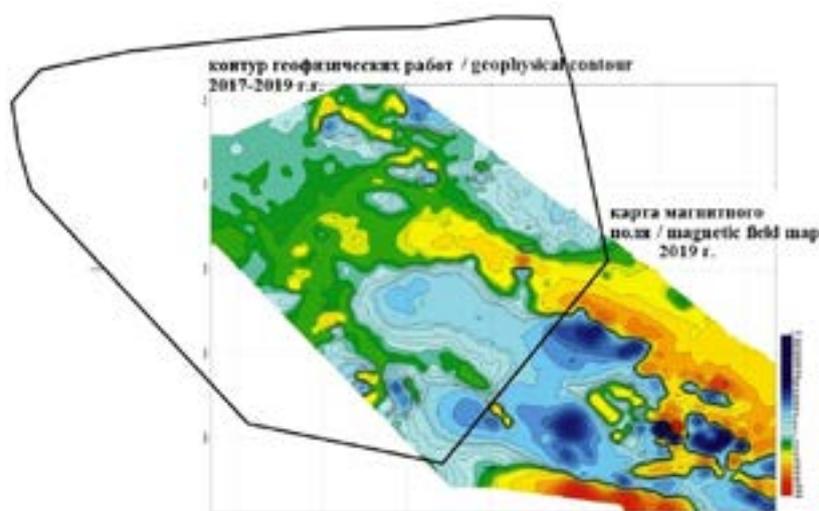
На картах изоом наблюдается очень хорошее совпадение плана изолиний и значений ρ_k . В то же время локальные коррелируемые минимумы и максимумы ρ_k шириной 20 м не находят отражения на картах предыдущих исследований. Так локальная линейная аномалия поляризуемости φ_{en} №6 сопровождается линейным максимумом ρ_k , а аномалия φ_{en} №12 минимумом ρ_k , что четко определяет их геологическую природу.

Как видно из приведенного сравнения уменьшение длины приемной линии и шага наблюдений позволило увеличить детальность исследований СГ-ВП и выйти на уровень рудных тел, заданных в техническом задании.

По результатам ТЗ электротомографии и ВЭЗ-ВП получены близкие результаты, хотя методически и теоретически ТЗ обладает в данных условиях большей детальностью и информативностью.

Характеристика магнитного поля. В средней части участка в процессе производства поисковых работ в 2019 г. выполнена магнитная съёмка.

Структура магнитного поля на участке неоднородна (рис. 6): интенсивность аномалий возрастает в направлении с северо-запада на юго-восток. Направление корреляции аномалий преимущественно северо-западное (географический азимут около 300°), что соответствует общему направлению основных рудо-контролирующих геологических структур - Северной и Западной зон сбросо-сдвигов. Аномалии магнитного поля обусловлены гипербазитами (серпентинитами), магнитными разностями туфов и порфиритов, а также зонами рудных скарнов.



*Рис. 6. Карта изодинам магнитного поля ΔT /
Fig. 6. Map to isodyne magnetic field ΔT*

Выводы

По результатам геофизических работ построены карты изолиний и графиков ρ_k и $\varphi_{\text{вн}}$, выявлена их связь с рудовмещающими структурами и отдельными рудными телами. Всего выявлено 14 локальных аномалий поляризуемости связанных с золото-кварц-сульфидными и сульфидными рудными телами.

Выявлены площадные аномалии повышенной поляризуемости и низких значений электрического сопротивления СГ-ВП вдоль Западной рудно-тектонической зоны. Они связаны с метасоматическими процессами в пределах Западной зоны сбросо-сдвигов.

Непосредственно на площади работ отмечены слабоконтрастные аномалии магнитного поля в северо-западной части Северной зоны.

Непосредственно Северо-восточная рудная зона в магнитном поле не находит отражения. Следует отметить сильное влияние рельефа на характер магнитного поля, вследствие чего наблюдается корреляция хребтов с минимумами магнитного поля.

Литература

1. Босиков И.И., Клюев Р.В., Гаврина О.А. Анализ геолого-геофизических материалов и качественная оценка перспектив нефтегазоносности Южно-Харбинского участка (Северный Кавказ). // *Геология и геофизика Юга России*. – 2021а. – Т. 11. №1. – С. 6–21. DOI: 10.46698/VNC.2021.36.47.001.
2. Босиков И.И., Клюев Р.В., Хетагуров В.Н., Ажмухамедов И.М. Разработка методов и средств управления аэрогазодинамическими процессами на добычных участках. // *Устойчивое развитие горных территорий*. – 2021. – №1. – С. 77–83. DOI: 10.21177/1998-4502-2021–13-1-77-83.
3. Голик В.И., Бурдзиева О.Г., Дзеранов Б.В. Управление геодинамикой массива путем регулирования величины напряжений. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2020. – Т.10. №2. – С. 147–160. DOI: 10.46698/VNC.2020.93.21.011.
4. Клюев Р.В., Босиков И.И., Майер А.В., Гаврина О.А. Комплексный анализ применения эффективных технологий для повышения устойчивого развития природно-технической систе-

мы. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2020. – №2. – С. 283–290. DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-2-283-290.

5. Литвиненко И.С. О коренных источниках россыпей Юглеровского рудно-россыпного поля (Северо-Восток России). // Разведка и охрана недр. – 2018. – №6. – С. 3–10.

6. Некрасов Е.М. Поиск «слепых» золоторудных тел жильного типа. // Руды и металлы. – 2018. – №3. – С. 55–71. DOI: 10.24411/0869-5997-2018-10007.

7. Некрасов Е.М. Локализация руд золота в разломах разных типов. // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2019. – №6. – С. 33–43.

8. Федорова Л.Л., Куляндин Г.А. Опыт применения метода георадиолокации при эксплуатационной разведке россыпных месторождений золота Якутии. // Успехи современного естествознания. – 2018. – №11. – С. 160–165.

9. Чотчаев Х.О., Бурдиева О.Г., Заалишвили В.Б. Зонирование высокогорных территорий по геоэкологическим нагрузкам, обусловленным геодинамическими и климатическими воздействиями. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. №1. – С. 81–94. DOI: 10.46698/VNC.2021.15.66.007.

10. Шарафелдин Х.Э. Позднеорогенные месторождения золота Египта. // Горные науки и технологии. – 2018. – №1. – С. 89–96. DOI: 10.17073/2500-0632-2018-1-89-96.

11. Augustin J., Gaboury D. Multi-stage and multi-sourced fluid and gold in the formation of orogenic gold deposits in the world-class Mana district of Burkina Faso – Revealed by LA-ICP-MS analysis of pyrites and arsenopyrites. // Ore Geology Reviews. – 2018. – Vol. 104. – pp. 495-521. DOI: 0.1016/j.oregeorev.2018.11.011.

12. Ganapathy G.P., Zaalishvili V.B., Chandrasekaran S.S., Melkov, D.A. Integrated monitoring of slope process in India and Russia. // Sustainable Development of Mountain Territories. – 2020. – Vol. 12. No.4. – pp. 572-581. DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-4-572-581.

13. Luo D., Zeng G. Application and effects of singularity analysis in evaluating the denudation degree of Carlin-type gold deposits in southwest Guizhou, China. // Ore Geology Reviews – 2018. – Vol. 96. – pp. 164-180. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2018.04.018.

14. Nassani A.A., Aldakhil A.M., Zaman K. Ecological footprints jeopardy for mineral resource extraction: Efficient use of energy, financial development and insurance services to conserve natural resources. // Resources Policy. – 2021. – Vol. 74. No.102271. DOI: 10.1016/j.resourpol.2021.102271.

15. Sebutsoe T. C., Musingwini C. Characterizing a mining production system for decision-making purposes in a platinum mine. // The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. – 2017. – Vol. 117. – pp. 199 – 206.

16. Sinclair L., Thompson J. In situ leaching of copper: Challenges and future prospects. // Hydrometallurgy. – 2015. – Vol. 157. – pp. 306–324. DOI: 10.1016/j.hydromet.2015.08.022.

17. Song X., Pettersen J.B., Pedersen K.B., Roberg S. Comparative life cycle assessment of tailings management and energy scenarios for a copper mine: A case study in Northern Norway. // Journal of Cleaner Production. – 2017. – Vol. 16415. – pp. 892–904.

18. Tyulenev M.A., Zhironkin S.A., Garina E.A. The method of coal losses reducing at mining by shovels. // International Journal of Mining and Mineral Engineering. – 2016. – Vol. 7. No.4. – pp. 363–370. DOI: 10.1504/IJMME.2016.079990.

19. Tyulenev M.A., Markov S.O., Gasanov M.A., Zhironkin S.A. Numerical Modeling in the Structural Study of Technogenic Rock Array. // Geotechnical and Geological Engineering. – 2018. – Vol. 36. No. 5. – pp. 2789–2797. DOI: 10.1007/s10706-018-0501-3.

20. Zhukovskiy Y., Batueva D., Buldysko A., Shabalov M. Motivation towards energy saving by means of IoT personal energy manager platform. // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1333. No.6. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/6/062033.

References

1. Bosikov I.I., Klyuev R.V., Gavrina O.A. Analysis of geological-geophysical materials and qualitative assessment of the oil and gas perspectives of the Yuzhno-Kharbizhinsky area (Northern Caucasus). *Geology and Geophysics of Russian South*, 2021a. Vol. 11. No.1. pp 6-21. DOI:10.46698/VNC.2021.36.47.001. (In Russ.)

2. Bosikov I.I., Klyuev R.V., Khetagurov V.N., Azhmukhamedov I.M. Development of methods

and management tools aerogasdynamics processes at mining sites. Sustainable development of mountain territories, 2021b. No.1. pp. 77-83. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-1-77-83. (In Russ.)

3. Golik V.I., Burdzieva O.G., Dzeranov B.V. Ground geodynamics control by regulating stress level. *Geology and Geophysics of Russian South*, 2020. Vol. 10. No.2. pp. 147-160. DOI: 10.46698/VNC.2020.93.21.011. (in Russ.)

4. Klyuev R.V., Bosikov I.I., Mayer A.V., Gavrina O.A. Comprehensive analysis of the effective technologies application to increase sustainable development of the natural-technical system. *Sustainable Development of Mountain Territories*, 2020. No.2. pp. 283-290. DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-2-283-290. (In Russ.)

5. Litvinenko I.S. Lode sources of placer deposits in Yugler mineral area, North-east Russia. *Exploration and protection of mineral resources*, 2018. No.6. pp. 3-10. (In Russ.)

6. Nekrasov E.M. Prospecting for lode-type blind gold orebodies. *Ores and Metals*, 2018. No.3. pp. 55-71. DOI: 10.24411/0869-5997-2018-10007. (In Russ.)

7. Nekrasov E.M. Localisation of gold ores in faults of different types. *Proceedings of higher educational institutions. Geology and exploration*, 2019. No.1. pp. 33-43. (In Russ.)

8. Fedorova L.L., Kulyandin G.A. Experience in applying the GPR method in the exploration of placer gold deposits of Yakutia. *Advances in modern natural science*, 2018. No.11. pp. 160-165. (In Russ.)

9. Chotchaev Kh.O., Burdzieva O.G., Zaalishvili V.B. Zoning of high mountainous areas by geocological loads caused by geodynamic and climatic influences. *Geology and Geophysics of Russian South*, 2021. Vol. 11. No.1. pp. 81 - 94. DOI: 10.46698/VNC. 2021.15.66.007. (In Russ.)

10. Sharafeldin H.E. Late-orogenic gold deposits of Egypt. *Mining science and technology*, 2018. Vol. 1. pp. 89-96. DOI: 10.17073/2500-0632-2018-1-89-96.

11. Augustin J., Gaboury D. Multi-stage and multi-sourced fluid and gold in the formation of orogenic gold deposits in the world-class Mana district of Burkina Faso – Revealed by LA-ICP-MS analysis of pyrites and arsenopyrites. *Ore Geology Reviews*, 2018. Vol. 104. pp. 495-521. DOI: 0.1016/j.oregeorev.2018.11.011.

12. Ganapathy G.P., Zaalishvili V.B., Chandrasekaran S.S., Melkov D.A. Integrated monitoring of slope process in India and Russia. *Sustainable Development of Mountain Territories*, 2020. Vol. 12. No.4. pp. 572-581. DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-4-572-581.

13. Luo D., Zeng G. Application and effects of singularity analysis in evaluating the denudation degree of Carlin-type gold deposits in southwest Guizhou, China. *Ore Geology Reviews*, 2018. Vol. 96. pp. 164-180. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2018.04.018.

14. Nassani A.A., Aldakhil A.M., Zaman K. Ecological footprints jeopardy for mineral resource extraction: Efficient use of energy, financial development and insurance services to conserve natural resources. *Resources Policy*, 2021. Vol. 74. №. 102271. DOI: 10.1016/j.resourpol.2021.102271.

15. Sebutsoe T.C., Musingwini C. Characterizing a mining production system for decision-making purposes in a platinum mine. *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2017. Vol. 117. pp. 199 - 206.

16. Sinclair L., Thompson J. In situ leaching of copper: Challenges and future prospects. *Hydrometallurgy*, 2015. Vol. 157. pp. 306-324. DOI: 10.1016/j.hydromet.2015.08.022.

17. Song X., Pettersen J. B., Pedersen K. B., Roberg S. Comparative life cycle assessment of tailings management and energy scenarios for a copper mine: A case study in Northern Norway. *Journal of Cleaner Production*, 2017. Vol. 16415. pp. 892-904.

18. Tyulenev M.A., Zhironkin S.A., Garina E.A. The method of coal losses reducing at mining by shovels. *International Journal of Mining and Mineral Engineering*, 2016. Vol. 7. No.4. pp. 363-370. DOI: 10.1504/IJMME.2016.079990.

19. Tyulenev M.A., Markov S.O., Gasanov M.A., Zhironkin S.A. Numerical Modeling in the Structural Study of Technogenic Rock Array. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2018. Vol. 36. No.5. pp. 2789-2797. DOI: 10.1007/s10706-018-0501-3.

20. Zhukovskiy Y., Batueva D., Buldysko A., Shabalov M. Motivation towards energy saving by means of IoT personal energy manager platform. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019. Vol. 333. No.6. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/6/062033.