

УДК 550.8.028: 550.837.21

DOI: 10.24930/2500-302X-2025-25-3-633-643

Возможности геофизических методов по выявлению потенциально золотоносных структурно-карстовых зон на Урале

В. А. Давыдов

Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН, 620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 100, e-mail: davyde@yandex.ru

Поступила в редакцию 31.05.2024 г., принята к печати 11.07.2024 г.

Объект исследований. Рассматриваются результаты комплексных геофизических работ, проведенных на периферии Крестовинского рудно-россыпного узла, для оценки перспективности обнаружения золотоносных россыпей в структурных корах выветривания и карстовых образованиях. Дается общее представление о структурно-эрозионно-карстовых россыпях мезозойского возраста на Урале. Приводятся базовые сведения о геологии и полезных ископаемых Туринско-Ауэрбаховского рудного района. **Методы исследований.** Использован комплекс геофизических методов, включающих гравиметрию, магнитометрию, электропрофилирование методом радиоклип и аудиоманнителлурические зондирования. Описываются методические основы полевых наблюдений и принципы камеральной обработки и интерпретации полученных данных. **Результаты.** По контрольному участку работ приведены карты абсолютных отметок дневной поверхности, гравитационного и магнитного полей, а также карта кажущихся удельных электрических сопротивлений. По результатам обработки аудиоманнителлурических зондирований построены трансформированные разрезы электрофизических параметров среды. Проведено сопоставление полученных разрезов с графиками потенциальных полей по исследуемым профилям. Обсуждаются характерные особенности геофизических полей и параметров для выделения структурных элементов, связанных с прогнозируемым оруденением. **Выводы.** В качестве основного геофизического критерия для обнаружения контакто-карстовой коры выветривания, перспективной на золотоносность, принято синхронное снижение величин гравитационного поля и электрического сопротивления. Дополнительным признаком может являться ступенчатый сдвиг уровня магнитного поля. Для выявления карстовых ловушек глубокого заложения площадной геофизической съемки недостаточно. Из-за сложной формы карстовых полостей уточненное местоположение планируемых разведочных скважин можно определить только по результатам электромагнитных зондирований.

Ключевые слова: комплексные геофизические исследования, месторождение золота, кора выветривания, карст, радиоклип, АМТЗ

Capabilities of geophysical methods in identification of potential gold-bearing structural karst zones in the Urals

Vadim A. Davydov

Yu.P. Bulashevich Institute of Geophysics, UB RAS, 100 Amundsen st., Ekaterinburg 620016, Russia, e-mail: davyde@yandex.ru

Received 31.05.2024, accepted 11.07.2024

Research object. The results of geophysical works in the periphery of the Krasnoturyinsk ore cluster to assess the prospects of discovering gold-bearing placers in structural weathering crusts and karst formations. The structural-erosional-karst placers of the Mesozoic age in the Urals are characterized. Basic information about the geology and minerals of the Turinsko-Auerbakhovsky ore region is provided. **Research methods.** A set of geophysical methods was used, including gravimetry, magnetometry, electrophilering by radio interferometry, and audiomagnetotelluric sounding. The methodological foundations of field observations and the principles of office processing and interpretation of the obtained data are described. **Results.** For the area under study, maps of absolute elevations of the day surface, gravitational and magnetic fields, as well as a map of apparent resistivity are presented. Transformed sections of the electro-physical parameters of the medium are constructed based on the results of processing the audiomagnetotelluric sounding data. The obtained sections are compared with the graphs of potential fields for the studied profiles. Characteristic features of geophysical fields and parameters for identifying the structural elements associated with predicted mineralization are discussed. **Conclusion.** The main geophysical criterion for the detection of a contact-karst weathering crust, promising in terms of gold content, is assumed to be a synchronous decrease in the values of gravitational field and elec-

Для цитирования: Давыдов В.А. (2025) Возможности геофизических методов по выявлению потенциально золотоносных структурно-карстовых зон на Урале. *Литосфера*, 25(3), 633–643. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2025-25-3-633-643>. EDN: FPQVZP

For citation: Davydov V.A. (2025) Capabilities of geophysical methods in identification of potential gold-bearing structural karst zones in the Urals. *Lithosphere (Russia)*, 25(3), 633–643. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2025-25-3-633-643>. EDN: FPQVZP

trical resistance. A stepwise shift of the magnetic field level may serve as an additional sign. Areal geophysical surveys are not sufficient for identification of deep karst traps. Due to the complex shape of karst cavities, the correct location of exploration wells can only be determined based on the results of electromagnetic soundings.

Keywords: *integrated geophysical research, gold deposit, weathering crust, karst, VLF-R, AMT*

Acknowledgements

The author thanks I.A. Ugryumov for the materials provided on gravity prospecting, as well as all members of the field team of the IGF UB RAS, who took part in the gravity survey.

ВВЕДЕНИЕ

Россыпи золота, связанные с формами карстового рельефа, известны во всех золотоносных районах, где развиты карстующиеся породы (Урал, Северный Казахстан, Енисейский кряж, Кузнецкий Алатау, Восточный Саян, Алданский щит и др.) (Ильенок, 1970; Казанский, 2004; Сизых и др., 2007; Цыкин, 2011; Дейнека, 2017; Казаков, 2017, 2020; Зубова и др., 2019). В ряде случаев карстовые образования присутствуют как составная часть аллювиальных россыпей. Карстовые процессы протекают наиболее интенсивно в условиях гумидного тропического климата. Такая обстановка была характерна для Урала в мезозойскую эру, что привело к образованию золотоносных россыпей в карстовых полостях и эрозионно-карстовых долинах. Процесс карстообразования шел параллельно с формированием площадных кор выветривания и накоплением элювиально-делювиальных и аллювиальных толщ. Основная роль карста заключалась в формировании дополнительных ловушек в кавернозном плотике, что привело к концентрации тяжелых минералов и появлению россыпей благородных металлов, особенно богатых россыпей типа “косых пластов” (Баранников, 1975). Захороненный в карстовых впадинах обломочный материал оказался наименее уязвимым для последующего размыва и во многих случаях сохранился до настоящего времени. Кроме того, в пределах карстовых полостей в последние годы выявлены продукты более поздних наложенных низкотемпературных гидротермально-метасоматических процессов золотоаргиллизитовой формации (Баранников, 2012). Все значительные карстовые депрессии приурочены к зонам активных разломов и контактам карбонатных пород, подвергшимся эрозионным процессам. Поэтому их можно рассматривать в качестве структурно-эрозионно-карстовых ловушек для рудных минералов. Основной

тип промышленных карстовых месторождений золота связан с корами химического выветривания в контактово-карстовых депрессиях, образованных по зонам рудной минерализации. Такая кора формируется в условиях закрытого карста, заполняя провалы и полости глубиной до 100 м и более. Менее значимыми считаются перемещенные коры выветривания, которые переотлагались в открытые карстовые воронки в пределах четвертичных золотоносных долин. Все мезозойские золотоносные рудно-россыпные узлы Урала локализованы в пределах субмеридиональных эрозионно-структурных депрессий и приурочены к карстово-эрозионным формам того же простирания. Типичными примерами являются золотоносные коры выветривания Воронцовского месторождения на Северном Урале; Светлинского, Кировского и Каменского месторождений на Южном Урале.

В последнее время золотое оруденение нетрадиционного типа, включая рудоносный карст, привлекает все большее внимание. Доразведка флангов известных золоторудных месторождений на предмет обнаружения продуктов их гипергенного преобразования может пополнить балансовые запасы добывающих предприятий. Однако перспективное оруденение в зонах глубоко заполненного карста следует относить к категории трудно открываемых объектов (слепого и погребенного типов). Его выявление возможно лишь с использованием комплекса методов (геолого-геоморфологических, геофизических, геохимических) с заверкой выделенных аномалий скважинами колонкового бурения и значительном объеме опробовательских работ (Баранников, 2013).

Целью представленной работы является изучение геофизических полей на периферии старого рудного района для оценки перспективности обнаружения россыпей в структурных корах выветривания и карстовых образованиях. К основным задачам относятся проведение комплекса геофизиче-

ских исследований на участке карстующихся пород, обработка и интерпретация результатов с построением графиков и разрезов физических параметров, анализ и сопоставление полученных данных с имеющейся геологической информацией.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ

Участок работ располагается в Краснотурьинском районе Свердловской области. В региональном плане он находится в восточной части Тагильского мегаблока в зоне влияния Серовско-Маукского глубинного разлома. В металлогеническом отношении участок входит в состав Турьинско-Ауэрбаховского рудного района. Район является составной частью вулканоплутонического пояса, характеризующегося широким развитием андезит-гранитоидных ассоциаций. Его породы образуют Турьинско-Ауэрбаховскую вулканотектоническую депрессию, представляющую собой грабен-синклиналь с пологим ($15\text{--}30^\circ$) падением крыльев к центру структуры, протягивающуюся в меридиональном направлении на 35 км при ширине 18 км. Указанная структура выполнена вулканогенными и вулканогенно-осадочными породами с линзами известняков, объединенными в краснотурьинскую свиту. К области контакта карбонатных пород краснотурьинской свиты с Ауэрбаховской интрузией габбро-диорит-гранодиоритового состава приурочены многочисленные скарновые магнетитовые, медно-магнетитовые месторождения, характеризующиеся повышенной золотоносностью (Мурзин, Сазонов, 1996). Промышленные месторождения Турьинского медноскарнового рудного поля, цепочкой опоясывающие Ауэрбаховский массив, в основном отработаны. К югу вдоль западного контакта массива развито магнетитовое оруденение Ауэрбаховской группы месторождений (группа Песчанских, Воронцовских и других месторождений), сопряженных с жильной золото-сульфидно-кварцевой минерализацией. Эти месторождения стали источником формирования многочисленных россыпей золота в прилегающем районе.

Участок исследований располагается в 3 км западнее Ауэрбаховского массива и входит в состав Песчанско-Воронцовского рудного поля. В районе работ краснотурьинская свита представлена тремя толщами (снизу вверх): фроловско-васильевской, башмаковской и богословской. Фроловско-васильевская толща сложена серыми рифогенными мраморизованными известняками. Располагающиеся выше вулканогенно-осадочные породы башмаковской толщи представлены тонкопереслаивающимися туффитами и туфопесчаниками. Перекрывающая разрез богословская толща сложена кристаллотуфами, агломератами андезитового и андезибазальтового составов. В основаниях башмаковской и богословской толщ развиты экстру-

зивные купола андезидацитов, с которыми связано скарново-магнетитовое оруденение. Отложения краснотурьинской свиты разбиты многочисленными дайками долеритов, генетически связанных с Ауэрбаховской интрузией. В пределах рудного поля проявляются многочисленные метасоматические изменения пород: пропилитизация, скарнирование, березитизация-лиственитизация, калишпатизация, кварц-серицитовый метасоматоз, аргиллизация-джаспероидизация. По вулканогенно-осадочным породам башмаковской толщи и интрузивным породам Ауэрбаховского комплекса в рудном поле развиты коры химического выветривания мощностью до 60 м, а по карбонатным породам фроловско-васильевской толщи – карст, выполненный продуктами перемещенных кор выветривания мощностью до 120 м. Золотоносные коры выветривания разделяются по морфологии на следующие типы: линейно-площадные, линейно-трещинные, контактово-карстовые и собственно карстовые (Баранников и др., 2016). Основной объект нашего интереса сосредоточен на двух последних морфологических типах.

МЕТОДИКА НАБЛЮДЕНИЙ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Гравиметрия. Гравиметрические измерения проводились высокоточным гравиметром Autograv CG-5 (Scintrex, Канада) по однократной методике с одним гравиметром, с замыканием рейса на пункте опорной гравиметрической сети. Рядовая сеть наблюдений составляла 40×20 м. Отметки высот получены в каждом пункте измерений с помощью тахеометрической съемки. Полевые работы и камеральная обработка материалов съемки выполнены в соответствии с действующей Инструкцией по гравirazведке (Инструкция, 1980). Значения силы тяжести по профилям наблюдений вычислялись в редукции Фая и Буге, конечные материалы представлялись в форме карты и графиков локального гравитационного поля Δg (с вычетом регионального фона).

Магнитометрия. Измерения модуля индукции постоянного геомагнитного поля проводились протонным магнитометром ММП-203 (“Геологоразведка”, Ленинград) по стандартной методике в соответствии с Инструкцией по магниторазведке (Инструкция, 1981). Полевые наблюдения осуществлялись на профилях, размеченных по сети 40×10 м, замкнутых на опорных пунктах. Предварительная обработка магниторазведочных данных заключалась в приведении профильных наблюдений к единому уровню. В расчет брались невязки на точках опорной сети, полученных при замыкании хода, и на контрольных пунктах участка работ. Окончательная увязка измерений выполнена по завершению съемки.

Электрометрия. Профилирование. Электропрофилирование методом радиокип (Гордеев и др., 1981) проводилось 2-канальной универсальной аппаратурой ОМАР-2, разработанной в Институте геофизики УрО РАН (Давыдов, 2015). Была применена модификация метода с измерением импеданса электромагнитного поля сверхдлинноволнового диапазона, известная за рубежом под названием VLF-R (Very Low Frequency Resistivity) (McNeill, Labson, 1991). При этом осуществлялась регистрация взаимных компонент сигналов естественно-магнитотеллурического поля (VLF-MT) (Harja et al., 2016) с шагом 20 м. Магнитная компонента H_ϕ измерялась с помощью рамочного индукционного датчика АМДР чувствительностью 6 В/(А/м) на рабочей частоте 10 кГц. Ортогональная ей электрическая составляющая E_r снималась с емкостной 10-метровой линии, стелющейся вдоль профиля (Давыдов, 2017). На каждой точке проводилась одновременная запись измеряемых составляющих электромагнитного поля в течение 30–40 с. Отношение амплитуды электрической компоненты сигнала к ортогональной магнитной составляющей определяет импеданс среды $Z = E_r/H_\phi$, пропорциональный удельному электрическому сопротивлению (УЭС) подстилающих пород. Результаты измерений представляются в виде кажущегося сопротивления (КС), вычисленного через модуль входного импеданса:

$$\rho_k = |Z|^2 / 2\pi f \mu, \quad (1)$$

где f – частота электромагнитного поля, Гц; $\mu \approx \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ – магнитная проницаемость среды, Гн/м.

По результатам проведенной на площади работ электромагнитной съемки построена карта кажущихся электросопротивлений.

Зондирование. Для изучения геоэлектрического строения разреза были использованы аудиоманнитотеллурические зондирования (АМТЗ). Они проводились также с помощью аппаратуры ОМАР-2 с применением широкополосных датчиков электромагнитных сигналов. Измерения велись в частотном диапазоне 100–16000 Гц аналогично радиокип, но с увеличенным временем наблюдения до 2–3 мин. Для регистрации горизонтальной компоненты магнитного поля (H_y) использовался активный магнитный датчик индукционного типа АМД-5/50 с линейной амплитудно-частотной характеристикой в рабочем диапазоне и изменяемой чувствительностью от 5 до 50 В/(А/м). Электрическая составляющая (E_x) измерялась с помощью стелющейся емкостной линии с предварительным усилителем, эквивалентной 20-метровому проводу, заземленному на концах. Производилась запись парных компонент аудиоманнитотеллурического (АМТ) поля для вычисления частотной зависимости продольного импеданса (волнового сопротивления) среды:

$$Z(f) = E_x(f)/H_y(f). \quad (2)$$

Для определения импеданса в общем виде используется известная формула:

$$Z = (U_e/U_m)(S/L), \quad (3)$$

где U_e – напряжение на выходе электрического канала, мВ; U_m – напряжение на выходе магнитного канала, мВ; S – чувствительность магнитного датчика, В/(А/м); L – действующая длина электрической приемной линии, м.

Получив частотно-зависимые значения импеданса, можно рассчитать частотные кривые кажущегося сопротивления по формуле, подобной радиокип:

$$\rho_r(f) = |Z(f)|^2 / (2\pi f \mu). \quad (4)$$

За счет скин-эффекта высокочастотные вихревые поля концентрируются в верхней части разреза, с понижением частоты глубина проникновения поля возрастает и кажущееся сопротивление несет информацию о более глубоких слоях. Это дает возможность пересчитать частотные кривые КС в амплитудные (глубинные) кривые АМТЗ, которые отражают изменение удельного электрического сопротивления среды с глубиной. Полученные данные служат основой для качественной и количественной интерпретации аудиоманнитотеллурических зондирований. Для быстрого решения задач по выявлению аномалий разреза вполне достаточно получения импеданса среды в одном направлении (по линии профиля). Предложенная методика работ позволяет проводить оперативные наблюдения АМТ компонент поля в движении, с остановками для измерений, названные аудиоманнитотеллурическими экспресс-зондированиями (Давыдов, 2014). Результатом количественной инверсии электромагнитных зондирований обычно является сильно сглаженный геоэлектрический разрез, поэтому для выявления аномалий, связанных с карстом, применена качественная интерпретация. Камеральная обработка АМТ данных включала следующие стандартные операции:

- фильтрация промышленных помех;
- получение частотных спектров на основе быстрого преобразования Фурье;
- восстановление истинных амплитуд сигналов с учетом амплитудно-частотных характеристик измерительных каналов и датчиков сигналов;
- определение продольного импеданса среды $Z(f)$;
- расчет кажущегося сопротивления и получение частотных кривых $\rho_r(f)$;
- трансформация частотной зависимости $\rho_r(f)$ в глубинный разрез $\rho_r(h)$ с помощью оригинального способа преобразования аудиоманнитотеллурических данных с учетом априорной информации (Давыдов, 2016).

Для лучшего выделения локальных аномальных объектов также использовался параметр эф-

фективной продольной проводимости $S_{\text{эф}} = h/\rho_{\text{т}}$. Полученные результаты позволяют определить характер распределения электрофизических свойств по глубине и выделить основополагающие элементы строения геологического разреза.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ

Геолого-разведочные работы на прилегающей территории проводились ранее различными организациями с ориентацией на поиск рудных месторождений и аллювиальных россыпей. Идея изучения карста и связанного с ним оруденения золота появилась не так давно. Поскольку область исследований повсеместно задернована, встал вопрос о возможности обнаружения карстовых образований с помощью геофизических методов. Первые шаги в этом направлении были сделаны полевым отрядом Института геофизики УрО РАН под руководством И.А. Угрюмова. Участниками отряда была проведена тахеометрическая и высокоточная гравиметровая съемка на площади около 2 км². В результате работ выяснено, что поле силы тяжести в редукции Буге изменяется в пределах 3 мГл, а величина локальных аномалий составляет ± 0.5 мГл, что соответствует значимым отклонениям гравитационного поля. Предполагается, что отрицательные аномалии силы тяжести могут быть связаны с трещиноватыми зонами разуплотнения в коренных породах либо с увеличением мощности коры выветривания. Существование линейных отрицательных аномалий дает основание считать, что на территории могут присутствовать тектонические нарушения и связанные с ними линейные или контактово-карстовые коры выветривания. Отрицательные гравитационные аномалии изометричной формы могут свидетельствовать о присутствии собственно карста. Однозначно связать выявленные гравитационные аномалии с карстовыми проявлениями проблематично, для этого требуется привлечение комплекса геофизических методов. В качестве дополнительных методов исследований выступили магнитометрия и электрометрия. Для проведения опытно-методических работ был подобран подходящий участок, интересный в геоморфологическом отношении (рис. 1).

На территории контрольного участка присутствует ряд карстовых воронок диаметром 20–30 м и глубиной до 3 м. Кроме того, всю площадь в широтном направлении пересекает русло временного водотока, изобилующее карстовыми провалами разного размера. Скорее всего, современный водоток частично размыл поверхность и вскрыл карст, образовавшийся в мезозое (см. рис. 1а). На карте гравитационного поля рельеф местности никак не проявляется, а пониженные значения силы тяжести связаны преимущественно с диагональной структурой, расширяющейся в юго-восточном

направлении. Все поверхностные проявления карста связаны именно с этим сектором. Также можно проследить две субмеридиональные гравитационные аномалии, проходящие в районе пикетов ПК25 и ПК70 и, возможно, связанные с тектоникой (см. рис. 1б). Карта магнитного поля указывает на наличие двух блоков горных пород, отличающихся по магнитным свойствам. Контакт между более магнитными породами (на ЮЗ) и менее магнитными разностями (к СВ) проходит от северо-западного угла до середины южной границы участка. В пределах 100 м восточнее контакта, под тем же углом, трассируется большинство карстовых воронок, обнаруженных на поверхности. Таким образом, речь может идти о контактово-карстовой депрессии, образовавшейся вдоль границы двух разнородных пород. Множество положительных локальных аномалий магнитного поля, разбросанных по площади участка, могут быть связаны с концентрацией магнетита в мезозойской коре выветривания, привнесенного в результате эрозии близлежащих скарново-магнетитовых месторождений (рис. 2а).

Обращает на себя внимание меридиональная вытянутость магнитных аномалий, совпадающая с преимущественным направлением основных структурно-тектонических элементов района. Результаты электропрофилирования площади указывают на существование сублинейной низкоомной зоны, проходящей по диагонали участка на некотором удалении от выделенного контакта пород. Данная зона повышенной электропроводности пространственно совпадает с областью распространения карстовых провалов на поверхности и хорошо коррелирует с зонами разуплотнения по гравиметрическим данным. Исходя из результатов комплексной геофизической съемки, можно с уверенностью констатировать присутствие контактово-карстовой коры выветривания, перспективной на золотоносность. Выявленная область низких сопротивлений в северо-восточном углу участка связана с высокой влажностью грунтов вблизи дренажной канавы, заполненной водой. Она имеет избыточную плотность и отношения к карсту не имеет. Обобщая результаты съемки и многочисленных работ по изучению карстового оруденения, можно сделать заключение, что основным геофизическим критерием для его обнаружения являются совместное понижение уровня гравитационного поля и снижение электрического сопротивления. Руководствуясь этим положением, отрицательную аномалию силы тяжести в юго-западном углу участка (ПрЗ ПК10) также следует считать перспективной, поскольку ей соответствует локальное понижение сопротивления. Следует отметить, что для контактово-карстовых зон в пределах распространения фроловско-васильевской толщи известняков актуален дополнительный гео-

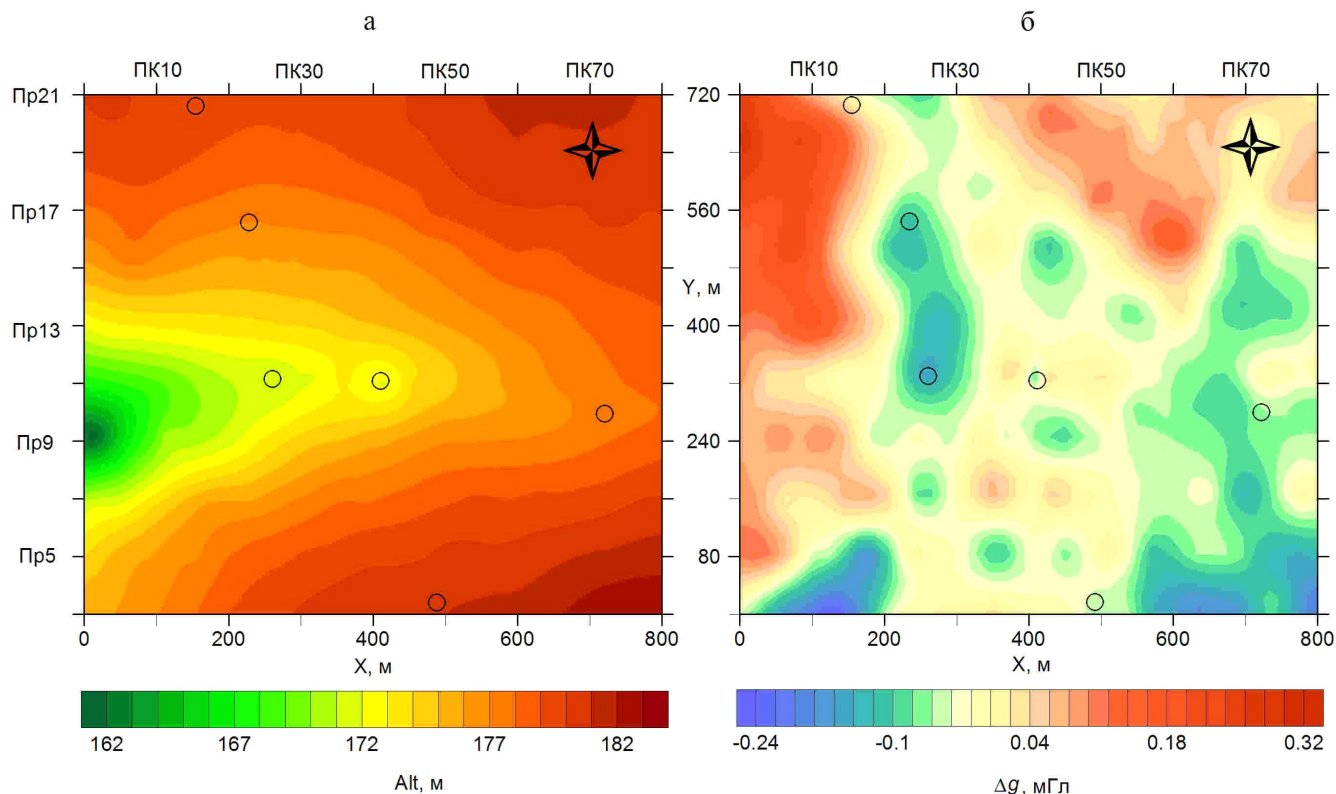


Рис. 1. Результаты ранее проведенных геофизических работ на контрольном участке (по полевым материалам гравиметрической съемки ИГФ УрО РАН).

а – карта абсолютных высот; б – карта локального гравитационного поля. Здесь и на рис. 2 кружками отмечены крупные карстовые воронки, обнаруженные на территории участка.

Fig. 1. Results of earlier geophysical work at the control site (based on field data of gravimetric survey of IGF UB RAS).

а – map of absolute heights; б – map of the local gravitational field. Here and in Fig. 2 circles mark the large sinkholes found on the site.

физический признак – перепад уровня магнитного поля. Данная особенность наблюдалась и на других участках Турьинско-Ауэрбаховского рудного района, при этом простираение эрозионно-карстовых долин может меняться с северо-западного на северо-восточное направление.

Для изучения геологического строения разреза на нескольких перспективных профилях проведены аудиоманнитотеллурические зондирования. Так, профиль №11 (Пр11) интересен тем, что расположен вдоль оси четвертичной долины, где преотлагалась перемещенная мезозойская кора выветривания мощностью до 50 м (рис. 3).

На разрезах электрофизических параметров хорошо выделяется закарстованная форма рельефа поверхности коренных пород. Наиболее заметной является депрессия плотика на пикете ПК30 (глубина 50–60 м). Она напрямую связана с карстом, проявившимся на дневной поверхности в форме крупной воронки на пикете ПК27. Прямо над карстовым провалом наблюдается от-

рицательная аномалия силы тяжести величиной 0.15 мГл. Ширина зоны разуплотнения (по середине амплитуды аномалии) составляет около 100 м. Смещение оси гравитационной аномалии на поверхности от электрометрической аномалии на глубине свидетельствует о наклонной форме карстовой полости. Наклонную аномалию, связанную с карстом, можно визуальнo наблюдать на разрезе электрофизических параметров в конце профиля на глубине 25–60 м (ПК75–80). Здесь гравитационная кривая не так показательна, поскольку искажена краевым эффектом. Ряд более мелких каверн на закарстованной поверхности плотика выделяются в разрезе на интервале пикетов ПК55–70. Они подтверждаются понижением силы тяжести до -0.07 мГл на этом отрезке профиля. Небольшая поверхностная воронка на ПК41 отобразилась локальной отрицательной аномалией $\Delta g \approx 0.075$ мГл. Поскольку электропроводных аномалий плотика не наблюдается, данная промоина связана с современной при-

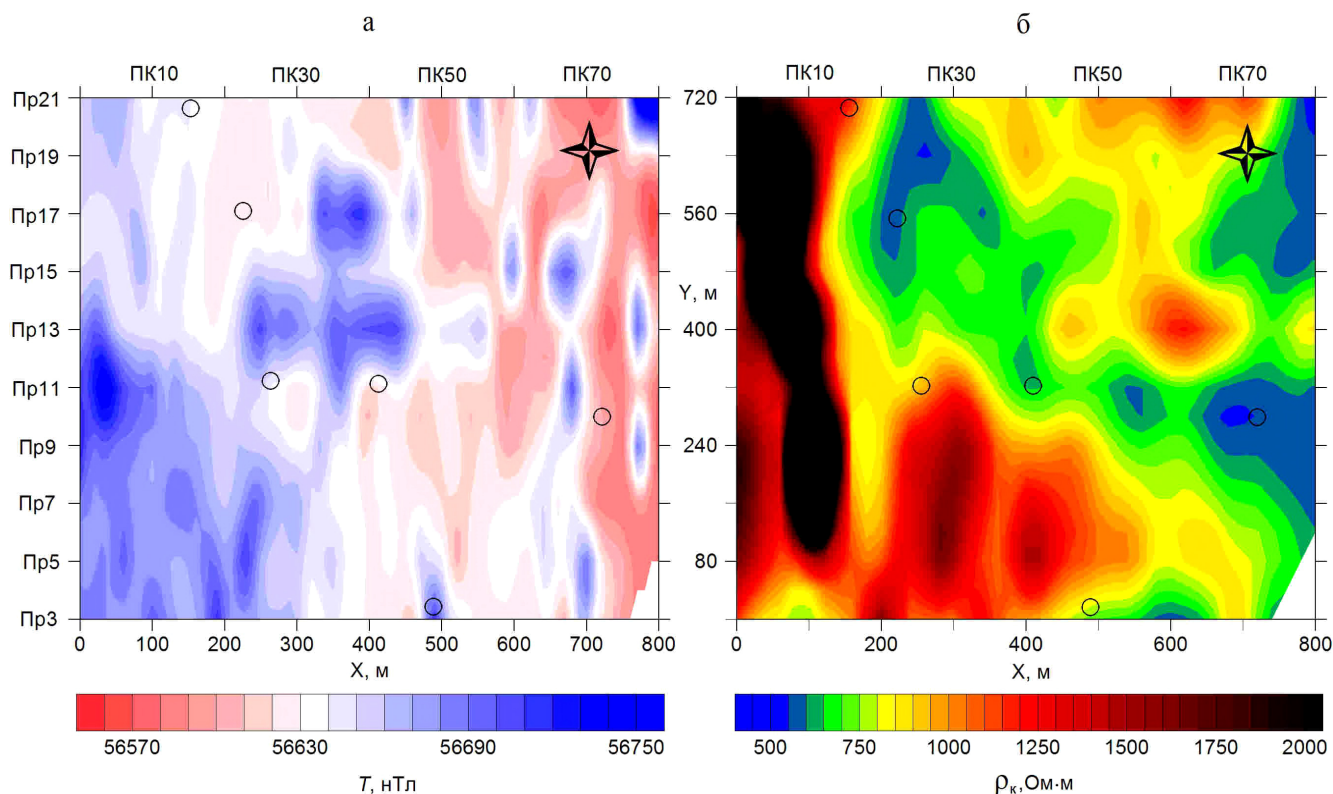


Рис. 2. Результаты выполненных площадных геофизических работ на исследуемом участке.

а – карта модуля индукции геомагнитного поля; б – карта кажущегося сопротивления (метод VLF-MT, частота 10 кГц).

Fig. 2. The results of the performed areal geophysical work in the study area.

а – map of the geomagnetic field induction module; б – map of apparent resistivity (VLF-MT method, frequency 10 kHz).

поверхностной эрозией и перспектив на оруденение не имеет.

Так как других значимых геофизических аномалий в пределах профиля не замечено, наиболее перспективными на потенциальную золотоносность следует считать диапазоны пикетов ПК22–33 и ПК55–80. Отметим, что на первом отрезке присутствует перепад уровня магнитного поля (более 100 нТл), являющийся дополнительным признаком структурно-карстовой ловушки.

Следующий профиль электроразведки (Пр17) располагается на пологом склоне долины, в 240 м северней профиля 11. Поверхность плотика здесь более ровная, а мощность рыхлых отложений меньше (около 30 м). На пикете ПК22 находится карстовый провал на поверхности, отображающийся на графике гравитационного поля отрицательной аномалией величиной 0.1 мГл и шириной 70 м (рис. 4).

На разрезах электрофизических параметров ей соответствует наклонная проводящая аномалия с западным падением, начинающаяся вблизи поверхности и достигающая глубины более 100 м.

Она пересекается на глубине с еще одной электропроводной аномалией в начале профиля. Возможно, что глубинная аномальная зона связана с областью погребенного карста, образовавшегося в мезозое и не подвергшегося размыву. Такие глубинные структурно-карстовые ловушки являются наиболее перспективными на «богатое» золото. Однако выявление подобных ловушек по результатам площадной геофизической съемки возможно только в случае вертикальной ориентировки карста. При наклонном положении карстовых пустот аномалии на поверхности смещаются относительно основных камер на глубине. Например, разведочную скважину на профиле 17 по результатам зондирования следует установить в районе пикетов ПК8–12, а если руководствоваться площадной съемкой – в районе ПК20–24.

Кроме того, существует ряд особенностей и ограничений используемых геофизических методов. Так, глубинность электропрофилирования VLF-MT на частоте 10 кГц составляет 20–30 м, поэтому результаты площадной электромагнит-

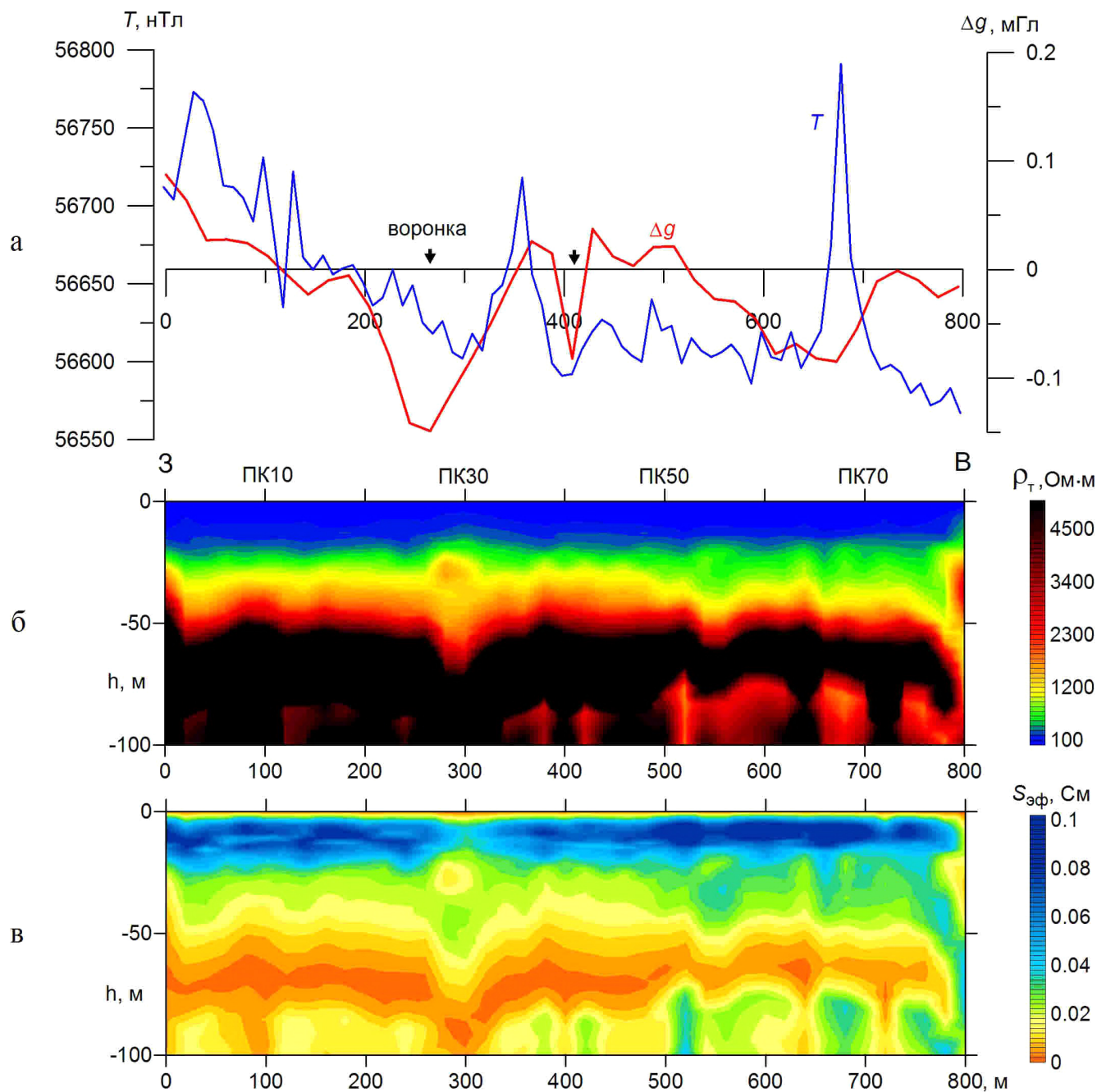


Рис. 3. Результаты геофизических работ по профилю №11 в центральной части участка.

Здесь и на рис. 4: а – графики магнитного (T) и гравитационного (Δg) полей; б – трансформированный разрез кажущихся сопротивлений АМТЗ; в – разрез эффективной продольной проводимости.

Fig. 3. Results of geophysical work on profile no. 11 in the central part of the site.

Here and in Fig. 4: a – graphs of magnetic (T) and gravitational (Δg) fields; б – transformed section of the apparent resistivity of AMT; в – section of effective longitudinal conductivity.

ной съемки несут информацию преимущественно о рыхлых отложениях. Гравиметрия достаточно чувствительна к локальному разуплотнению в верхней части разреза. При увеличении глубины

аномальный эффект может исказиться или вообще исчезнуть за счет избыточной плотности окружающих пород. Таким образом, геофизическое картирование оптимально для выявления перспектив-

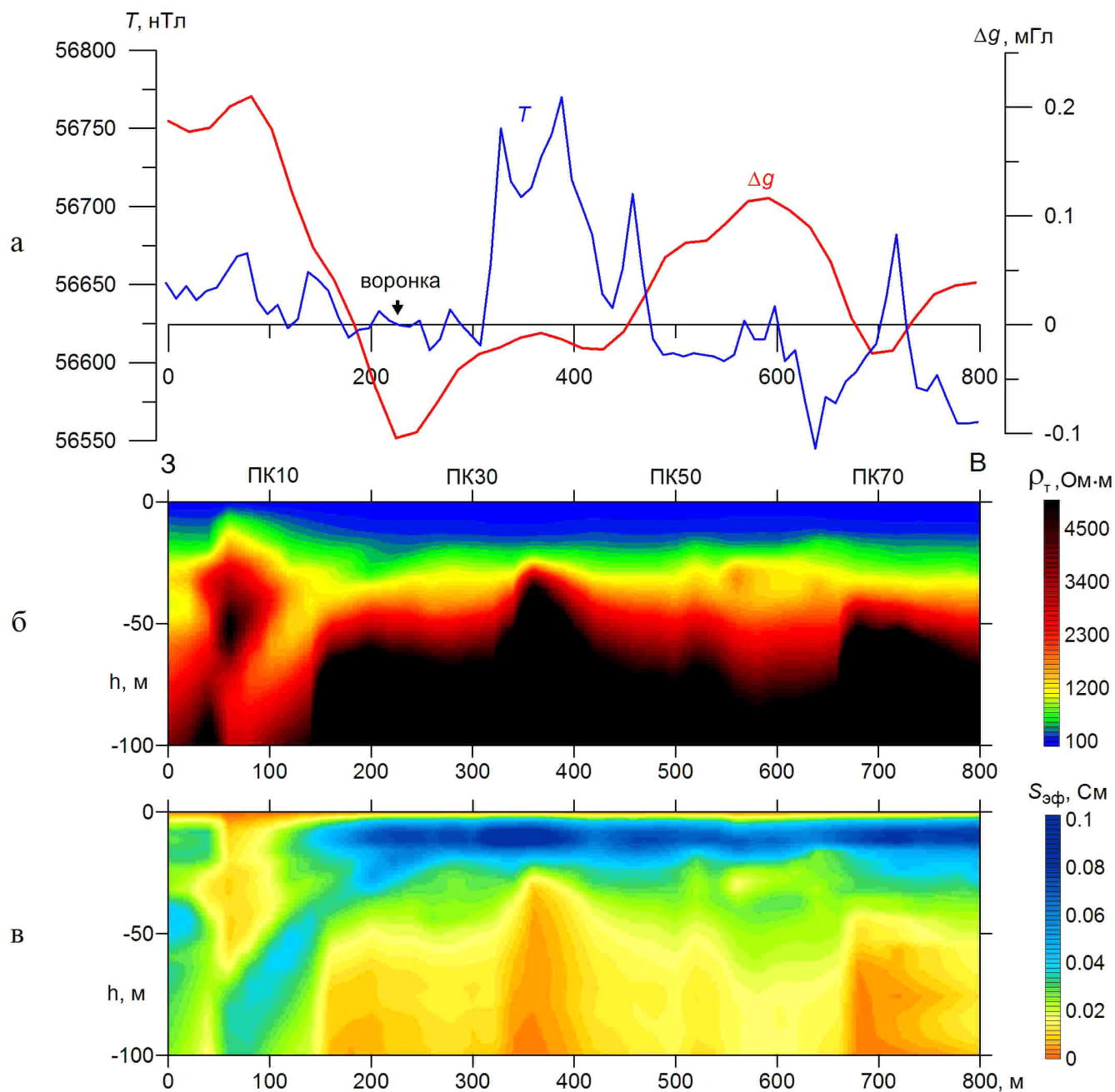


Рис. 4. Результаты геофизических работ по профилю №17.

Fig. 4. Results of geophysical work on profile no. 17.

ных структур, а для закладки разведочных скважин потребуются результаты зондирований.

ВЫВОДЫ

В качестве основного геофизического критерия для обнаружения контактово-карстовой коры выветривания, перспективной на золотоносность, принято синхронное снижение величин гравита-

ционного поля и электрического сопротивления. Дополнительным признаком может являться сдвиг уровня магнитного поля.

Для выявления карстовых ловушек глубокого заложения площадной геофизической съемки недостаточно. Из-за сложной формы карстовых полостей уточненное местоположение планируемых разведочных скважин можно определить только по результатам электромагнитных зондирований.

Благодарности

Автор благодарит всех сотрудников ИГФ УрО РАН, принимавших участие в полевых работах, в особенности И.А. Угрюмова за предоставленные материалы по гравиразведке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Баранников А.Г. (1975) О “косых пластах” в древних россыпях золота на Южном Урале. *Геоморфология*, (2), 58–63.
- Баранников А.Г. (2012) Рудоносный карст мезозойского возраста на Урале. *Современные проблемы науки и образования*, (2), 456–462.
- Баранников А.Г. (2013) Рудоносность заполненного мезозойского карста на Урале: проблемы изучения. *Руды и металлы*, (4), 23–29.
- Баранников А.Г., Азовскова О.Б., Ровнушкин М.Ю., Готтман И.А., Смагин И.В. (2016) Рудоносный карст мезозойского возраста Воронцовского золоторудного месторождения, Северный Урал. *Руды и металлы*, (2), 84–99.
- Гордеев С.Г., Седельников Э.С., Тархов А.Г. (1981) Электроразведка методом радиокип. М.: Недра, 132 с.
- Давыдов В.А. (2014) Аудиомагнитотеллурическая съемка в движении. *Геофизика*, (2), 47–53.
- Давыдов В.А. (2015) Измерительная аппаратура ОМАР-2 для электромагнитных методов исследований. *Урал. геофиз. вестн.*, **25**(1), 37–41.
- Давыдов В.А. (2016) Способ преобразования аудиомагнитотеллурических данных с учетом априорной информации. *Геофизические исследования*, **17**(4), 57–66.
- Давыдов В.А. (2017) Новые электромагнитные датчики для среднечастотной электроразведки. *Датчики и системы*, (11), 58–62.
- Дейнека В.К. (2017) О разломно-карстовых золотоносных россыпях Зауралья. *Геология и охрана недр*, **62**(1), 9–13.
- Зубова Т.П., Краснов А.Н., Черемисина Е.А. (2019) Использование минералого-геохимических методов при поисках золотоносных кор выветривания в различных геолого-геоморфологических обстановках. *Отеч. геология*, (2), 39–47.
- Ильенко С.С. (1970) Влияние неотектоники на формирование россыпей участка Восточного склона Кузнецкого Алатау. *Изв. Томского политехн. ин-та*, **239**, 379–381.
- Инструкция по гравиразведке. (1980) М.: Недра, 80 с.
- Инструкция по магниторазведке. (1981) Л.: Недра, 263 с.
- Казаков П.В. (2017) Погребенный заполненный карст и особенности формирования (или разубоживания) в нем месторождений полезных ископаемых (на примере Северного, Южного Урала и Приуралья). *Геология. Изв. Отделения наук о Земле и природных ресурсов АН Республики Башкортостан*, (24), 65–69.
- Казаков П.В. (2020) Условия локализации карстово-аллювиальных россыпей золота в Бельской и Миндякской межгорных депрессиях Южного Урала. *Геология, полезные ископаемые и проблемы геоэкологии Башкортостана, Урала и сопредельных территорий*, (13), 48–53.
- Казанский В.И. (2004) Уникальный Центрально-Алданский золотоурановый рудный район (Россия). *Геология руд. месторождений*, **46**(3), 195–211.
- Мурзин В.В., Сазонов В.Н. (1996) Минеральные ассоциации и условия образования сульфидных золотосодержащих руд Турьинско-Ауэрбаховского рудного поля (Урал). Екатеринбург: УрО РАН, 97 с.
- Сизых А.И., Юденко М.А., Миронов А.А., Миронова Е.А. (2007) Золотоносность коры выветривания Харанурского участка Восточного Саяна. *Изв. Сибирского отделения РАН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений*, **30**(4), 17–30.
- Цыкин Р.А. (2011) Геология россыпей Северо-Енисейского золоторудного района. *Журнал Сибирского федерального ун-та. Техника и технологии*, **4**(3), 243–262.
- Harja A., Srigutomo W., Tanaka Y., Kagiya T., Sutarno D. (2016) VLF-MT Survey around Nakadake crater at Aso Volcano. *IOP Conf. Ser.: Earth Environmental Sci.*, **29**, 1–8.
- McNeill J.D., Labson V.F. (1991) Geological mapping using VLF radio fields. *Electromagnetic Methods App. Geophys.*, **2**(B), 521–640.

REFERENCES

- Barannikov A.G. (1975) On “oblique strata” in ancient gold placers in the South Urals. *Geomorfologiya*, (2), 58–63. (In Russ.)
- Barannikov A.G. (2012) Mesozoic ore-bearing karst in the Urals. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*, (2), 456–462. (In Russ.)
- Barannikov A.G. (2013) Ore content of the filled Mesozoic karst in the Urals: problems of study. *Rudy i metally*, (4), 23–29. (In Russ.)
- Barannikov A.G., Azovskova O.B., Rovnushkin M.Yu., Gottman I.A., Smagin I.V. (2016) Mesozoic ore-bearing karst of the Vorontsov gold deposit, Northern Urals. *Rudy i metally*, (2), 84–99. (In Russ.)
- Davydov V.A. (2014) Audiomagnetotelluric survey in motion. *Geofizika*, (2), 47–53. (In Russ.)
- Davydov V.A. (2015) Measuring equipment OMAR-2 for electromagnetic research methods. *Ural. Geofiz. Vestn.*, **25**(1), 37–41. (In Russ.)
- Davydov V.A. (2016) Method for converting audiomagnetotelluric data taking into account a priori information. *Geofizicheskiye issledovaniya*, **17**(4), 57–66. (In Russ.)
- Davydov V.A. (2017) New electromagnetic sensors for medium-frequency electrical prospecting. *Datchiki i sistemy*, (11), 58–62. (In Russ.)
- Deineka V.K. (2017) About fault-karst gold-bearing placers of the Trans-Urals. *Geologiya i okhrana neдр*, **62**(1), 9–13. (In Russ.)
- Gordeev S.G., Sedelnikov E.S., Tarkhov A.G. (1981) Electrical prospecting by VLF method. Moscow, Nedra Publ., 132 p. (In Russ.)
- Harja A., Srigutomo W., Tanaka Y., Kagiya T., Sutarno D. (2016) VLF-MT Survey around Nakadake crater at Aso Volcano. *IOP Conf. Ser.: Earth Environmental Sci.*, **29**, 1–8.
- Ilyenok S.S. (1970) Influence of neotectonics on the formation of placers in the area of the Eastern slope of the Kuznetsk Alatau. *Izv. Tomskogo politekhn. in-ta*, **239**, 379–381. (In Russ.)
- Instruction for gravity prospecting. (1980) Moscow, Nedra Publ., 80 p. (In Russ.)
- Instruction for magnetic prospecting. (1981) Leningrad, Nedra Publ., 263 p. (In Russ.)

- Kazakov P.V. (2017) Buried filled karst and features of the formation (or dilution) of mineral deposits in it (on the example of the Northern, Southern Urals and Urals). *Geologiya. Izv. Otdeleniya nauk o Zemle i prirodnym resursov AN Respubliki Bashkortostan*, (24), 65-69. (In Russ.)
- Kazakov P.V. (2020) Conditions for localization of karst-alluvial gold placers in the Belsk and Mindyak intermontane depressions of the Southern Urals. *Geologiya, poleznye iskopyemye i problemy geoekologii Bashkortostana, Urala i sopredel'nykh territorii*, (13), 48-53. (In Russ.)
- Kazansky V.I. (2004) Unique Central Aldan gold-uranium ore region (Russia). *Geol. Rud. Mestorozhd.*, **46**(3), 195-211. (In Russ.)
- McNeill J.D., Labson V.F. (1991) Geological mapping using VLF radio fields. *Electromagnetic Methods App. Geophys.*, **2**(B), 521-640.
- Murzin V.V., Sazonov V.N. (1996) Mineral associations and conditions for the formation of sulfide gold-bearing ores of the Turinsko-Auerbakhovsky ore field (Urals). Ekaterinburg, UrO RAN, 97 p. (In Russ.)
- Sizykh A.I., Yudenko M.A., Mironov A.A., Mironova E.A. (2007) Gold content of the weathering crust of the Kharanur area of the Eastern Sayan. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya RAEN. Geologiya, poiski i razvedka rudnykh mestorozhdenii*, **30**(4), 17-30. (In Russ.)
- Tsykin R.A. (2011) Geology of placers of the North Yenisei gold ore region. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii*, **4**(3), 243-262. (In Russ.)
- Zubova T.P., Krasnov A.N., Cheremisina E.A. (2019) Use of mineralogical and geochemical methods in the search for gold-bearing weathering crusts in various geological and geomorphological settings. *Otech. Geol.*, (2), 39-47. (In Russ.)