

УДК 550.837+838+551.26(575.1)

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ АЭРОЭЛЕКТРОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ ПРИ ПОИСКАХ ЗОЛОТОРУДНЫХ ОБЪЕКТОВ И ГЕОДИНАМИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ ГОР БУКАНТАУ (ЮЖНЫЙ ТЯНЬ-ШАНЬ)

© 2025 г. А.Б. Гоипов¹, А.У. Ашуров², Д.Х. Атабаев³

¹ Государственное учреждение “Институт минеральных ресурсов” Университета геологических наук
Министерства горнодобывающей промышленности и геологии Республики Узбекистан,
г. Ташкент, Республика Узбекистан

² “Центральная геолого-геофизическая” экспедиция АО “Узбекгеологоразведка”
Министерства горнодобывающей промышленности и геологии Республики Узбекистан,
Ташкентская область, Республика Узбекистан

³ Национальный университет Узбекистана им. Мирзо Улугбека, г. Ташкент,
Республика Узбекистан

Автор для переписки: А.Б. Гоипов (e-mail: goipov9700@mail.ru)

Поступила в редакцию 25.03.2024 г. Принята к публикации 02.12.2024 г.

Территория Южного Тянь-Шаня берёт начало от нагорья Бэйшань (Китай), линейно простирается через Кыргызстан и Таджикистан и заканчивается в низовьях течения реки Амударья (Узбекистан). Герцинский покровно-складчатый линейный ороген Южного Тянь-Шаня образовался в результате аккреционного скучивания аллохтонных пластин, блоков и чешуй, состоящих из фрагментов формаций океанической коры, пассивных окраин, островных дуг, окраинных или задуговых морей.

Южный Тянь-Шань характеризуется наличием крупных и сверхкрупных орогенных золоторудных месторождений мирового класса (Мурунтау и Кокпатас). Все крупные месторождения рассматриваемого региона расположены в пределах обнажения палеозойских пород. Необходимость проведения региональных аэрогеофизических изысканий связана с решением проблем расширения фондов перспективных объектов на закрытых территориях с маломощным чехлом отложений, которые вызваны исчерпанием лимита поверхностных и близ поверхностных месторождений.

Представлены результаты комплексного анализа данных региональных аэрогеофизических исследований, выполненных в 2020–2022 гг. в районе горного массива Букантау. Двухмерной обработкой аэроэлектроразведочных профилей определены объёмные зоны в разрезе разного сопротивления, которые отражают глубинное строение структурно-формационных зон субдукционного характера территории.

На основе комплексной интерпретации материалов аэрогеофизической съёмки выявлены зоны глубинных разломов, уточнены границы глубинного залегания гранитоидных интрузивов.

С учётом физического показателя эталонных месторождений установлены отличительные петрофизические особенности рудовмещающих свит. Проанализированы закономерности формирования и размещения эндогенного золоторудного оруденения с выделением поисковых признаков и факторов контроля оруденения, определена геофизическая характеристика зон золоторудной минерализации.

По материалам геологической интерпретации аэрогеофизической съёмки выявлены прогнозно-перспективные площади на золото, которые рекомендованы для осуществления последующих детальных геолого-поисковых работ.

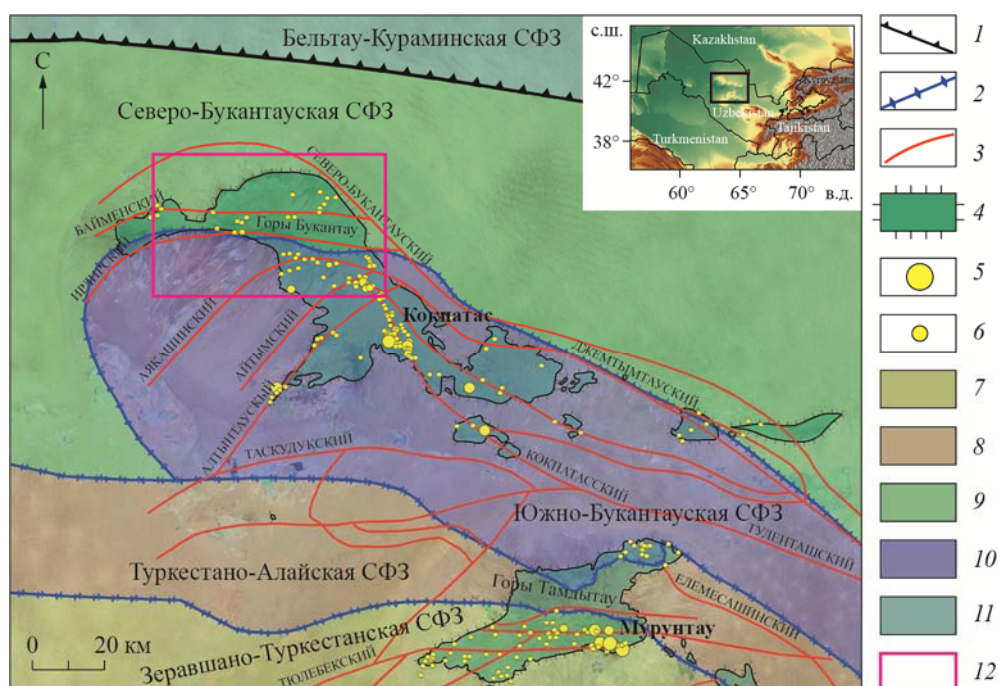
Ключевые слова: Южный Тянь-Шань, структурно-формационная зона, электрическое сопротивление, поляризуемость, магнитное поле, золото.

Введение

На протяжении многих лет исследователи применяли аэрогеофизические (магнитные, электрические и радиометрические) методы в геологических условиях для определения зон потенциальной минерализации [Morgan, 2012; Wetegah et al., 2015].

Электромагнитные методы позволяют получать информацию, связанную с геологической интерпретацией геофизических данных для решения поисково-разведочных задач [Zhang et al., 2018; Бабаянц, Контарович, Трусков, 2020]. Указанные подходы традиционны при поисках зон золоторудной минерализации, сульфидизации и тектонических нарушений [Brempong et al., 2019]. Основные электропроводящие толщи рассматриваемой территории – зоны развития сульфидной минерализации, локализованные в графитистых сульфидсодержащих породах кокпатасской и коксайской свит. В течение последнего десятилетия материалы крупномасштабных аэрогеофизических съёмок применяются для изучения металлогении Южно-Тянь-Шаньской складчатой области территории Узбекистана. В конце 60-х – начале 70-х гг. прошлого века был проведён сравнительный металлогенический анализ структурно-формационных зон Урала и Тянь-Шаня [Гарьковец, 1975; Бухарин, 1999]. Структурно-формационное районирование Тянь-Шаня или его частей с точки зрения мобилизма анализировалось в многочисленных публикациях [Буртман, Поршняков, 1974; Бухарин, Масленникова, Пятков, 1985; Мухин, Каримов, Савчук, 1991; Далимов, Ганиев, Троицкий, 2005; Бискэ, 2004; Савчук, 1998; Бухарин, 1999; Миркамалов и др., 2018; Конопелько, 2020].

Согласно схеме геодинамического районирования А.К. Бухарина [Бухарин, Масленникова, Пятков, 1985], геотектоническая позиция Кызылкумского сегмента (западная часть Южно-Тянь-Шаньской складчатой системы) ограничена с запада Урало-Тянь-Шаньским, а с востока Каракульско-Учбацким разломами [Гарьковец, 1975]. В пределах сегмента расположены фрагменты всех структурно-формационных зон Южного Тянь-Шаня с севера на юг: Северо-Букантауской, Южно-Букантауской, Туркестано-Алайской, Зеравшано-Туркестанской (рис. 1) и Зеравшано-Алайской. Район исследования находится в пределах северной части Центрально-Кызылкумского золоторудного региона, входящего в Южно-Тянь-Шаньский орогенный пояс.



На территории гор Букантау выделяется Северо-Букантауская и Южно-Букантауская (Карачатырская) структурно-формационные зоны и пять подзон [Бухарин, 1999]. Промышленная добыча золота в этом районе начата в 1980-х гг. на месторождении Кокпатас (горы Букантау). Наличие золотого оруденения в пределах Кокпатасского рудного поля впервые установлено Ю.В. Финкельштейном в 1960 г. В том же году Х.Р. Рахматуллаевым здесь было обнаружено самородное золото [Рахматуллаев, 1972]. В 1963 г. Л.З. Палеем было доказано промышленное значение золотого оруденения, при этом значительная площадь на границе известняков и перекрывающих сланцев оценена, как перспективная на золото. В 1964 г. в сланцах и известняках Кокпатаса выявлен ряд мощных зон с высоким содержанием золота [Голованов, 2001].

Методика работ

Для проведения в горах Букантау комплексных аэрогеофизических изысканий масштаба 1:25 000 на вертолёт было установлено следующее оборудование: комплекс аппаратуры импульс А7-450 (аэроэлектроразведка), аэромагнитометр *Scintrex CS-3* (аэромагнитная съёмка) и аэрогамма-спектрометр *RSX-5* (аэрогамма-спектрометрическая съёмка). Аэроэлектроразведочная съёмка осуществлялась методом переходных процессов. Характеристики использованного оборудования: длина трос-кабеля 50 м, частота следования импульсов – 25 Гц, длина записи процесса становления до 10 мс, до 4 измерительных каналов, измеряемый диапазон сигнала ± 5 В, амплитуда импульсов тока 250 А. Режим полёта вертолёта: высота 70–120 м, скорость 100–120 км/ч. Расстояние между профилями 250 м. Методика аэроэлектроразведочных работ включала регистрацию сигнала непосредственно на рядовых профилях рассматриваемого участка, а также запись сигнала на высоте более 100 м при подлёте к нему и сразу после завершения съёмки на участке (запись фона).

Обработка данных аэроэлектроразведки проводилась в следующем порядке.

1. Распаковка бортовых данных.

1.1. Конвертация *USD*-файлов в *UDF*-файлы. 1.2. Конвертация *UDF*-файлов в *XYZ*.

2. Создание базы данных посредством программы *Geosoft Oasis-Montaj*¹.

2.1. Импорт *XYZ*-файлов. 2.2. Импорт координат радиовысотомера.

Рис. 1. Геодинамическое районирование северной части Центральных Кызылкумов – гор Букантау и Тамдытау по [Бухарин, 1985; Хон, Воронков, Хизниченко, 1989] с изменениями

1 – граница Южного и Срединного Тянь-Шаня; 2 – граница структурно-формационных зон (СФЗ) на плане земной поверхности; 3 – глубинные разломы; 4 – выходы палеозойских пород; 5 – крупные золоторудные месторождения; 6 – золоторудные рудопроявления; 7–11 – СФЗ: Зеравшано-Туркестанская (7); Туркестано-Алайская (8); Северо-Букантауская (9); Южно-Букантауская (10); Бельтау-Кураминская (11); 12 – контур аэрогеофизической съёмки. На врезке: расположение исследуемой территории

Fig. 1. Geodynamic zoning of the northern part of the Central Kyzylkum – the Bukantau and Tamdytau Mountains according to [Bukharin, 1985; Khon, Voronkov, Khiznichenko, 1989] with modifications

1 – the border of the Southern and Middle Tien Shan; 2 – the border of the structural-formational zones (SFZ) on the Earth surface plan; 3 – deep faults; 4 – outcrops of Paleozoic rocks; 5 – large gold ore deposits; 6 – gold ore occurrences; 7–11 – SFZ: Zeravshan-Turkestan (7), Turkestan-Alaysk (8); North-Bukantau (9); South-Bukantau (10); Beltau-Kuraminskaya (11); 12 – aerogeophysical survey contour. Inset: location of the study area

¹ <https://my.seequent.com/store/oasis-montaj>

3. Контроль качества данных и их фильтрация.
- 3.1. Анализ шумов и помех. 3.2. Редакция данных. 3.3. Подбор параметра фильтра.
4. Расчёт кажущегося сопротивления (палетки).
- 4.1. Увязка сопротивлений, построение матриц и карт.
5. Инверсия данных с применением программы *Workbench*¹.
- 5.1. Создание проекта *Workbench*. 5.2. Подготовка XYZ-файла для *Workbench* и его импорт в проект. 5.3. Обработка данных. 5.4. Подбор параметров инверсии и сама инверсия. 5.5. Построение разрезов.

Погрешность проведённой электромагнитной (ЭМ) съёмки вычислялась по значениям натурального логарифма кажущейся удельной электропроводности, полученной по рядовым и повторным маршрутам по формуле

$$\varepsilon = \frac{1}{Np} \sum_{np} \varepsilon_{np} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

$$\varepsilon_{np} = \sqrt{\frac{1}{2Nt} \sum_{nt} \left[\left(\frac{\lg \rho_r^{nt}}{\lg \rho_s^{nt}} - 1 \right)^2 + \left(\frac{\lg \rho_s^{nt}}{\lg \rho_r^{nt}} - 1 \right)^2 \right]},$$

в которой ε – погрешность выполненной ЭМ-съёмки; ε_{np} – погрешность ЭМ-съёмки, полученной по рядовым и повторным маршрутам; np – номер профиля; ρ_r^{nt} и ρ_s^{nt} – значения кажущегося удельного сопротивления на рядовом и секущем маршрутах по времени nt ; Np – количество пересечений; Nt – количество временных каналов. При этом величина кажущегося удельного сопротивления определялась с учётом высоты полёта и формы импульса тока. Относительная погрешность рассчитанных значений натурального логарифма кажущейся удельной электропроводности не превышает 10 %.

С целью улучшения соотношения сигнал/помеха проводилась пространственно-временная фильтрация данных [Матвеев и др., 2013]. Зарегистрированные сигналы одновременно переводились в равномерную логарифмическую шкалу (с постоянным в логарифмическом масштабе шагом) и сглаживались на основе следующего алгоритма.

Сначала формировалась равномерная логарифмическая шкала с заданным числом точек на декаду. Затем для каждой точки полученной временной шкалы t_i , $i=1, N$ (N – число точек по времени) рассматривался набор точек исходной кривой, попадающих во временной интервал $\left[10^{\lg\left(t_i - \frac{w}{2}\right)}, 10^{\lg\left(t_i + \frac{w}{2}\right)} \right]$, где w – заданная ширина окна.

Результаты и обсуждения

Для интерпретации результатов аэроэлектроразведочных данных применялась программа *Geosoft Oasis-Montaj*, с помощью которой была составлена карта удельного электрического сопротивления центральной части гор Букантау (рис. 2). Сопоставление фрагментов этой и геологической карт исследуемого района показывает, что в региональном масштабе зоны высокого сопротивления хорошо коррелируют с областями, где палеозойские отложения выходят на поверхность (рис. 3). При этом палеозойские отложения характеризуются высокими сопротивлениями, а осадочные породы мезокайнозоя низкими. По результатам инверсии данных аэроэлектроразведочной съёмки

¹ <https://agtsys.ru/storage/instructions/December2020/GQSV1UvUfX5o5thkyEdk.pdf>

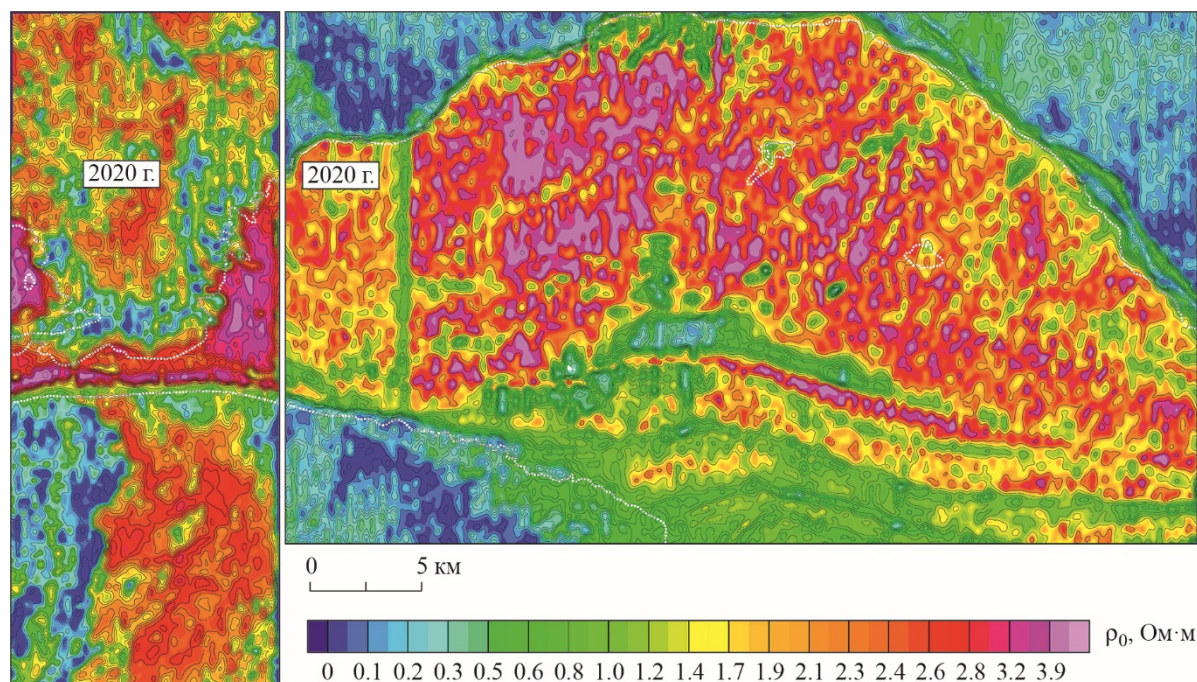


Рис. 2. Карта удельного электрического сопротивления территории центральной части гор Букантау на глубине до 50 м, построенная по данным аэроэлектроразведочной съёмки, выполненной в июле (слева) и в сентябре (справа) 2020 г.

Fig. 2. Map of the electrical resistivity of the territory of the central part of the Bukantau Mountains at the depth of up to 50 m, constructed according to airborne electromagnetic survey data carried out in July (on the left) and September (on the right) 2020

по профилю, показанному на рис. 3, построен геоэлектрический разрез до глубины около 800 м, на котором отображены зоны разного сопротивления и зоны падения субдукционного характера (рис. 4). Можно предположить, что глубинный геоэлектрический разрез отражает структурно-формационные зоны субдукционного характера. На представленном разрезе чётко прослеживаются полого наклонные в южном падении главные структурно-формационные зоны: Северо-Букантауская и Южно-Букантауская. Первой свойственны минимальные значения сопротивления, второй – максимальные.

Северо-Букантауская (Карачатырская) структурно-формационная зона (СФЗ) шириной 20 км и протяжённостью (в пределах площади работ) 140 км ограничивается разломами: Северо-Кызылкумским с севера и Букантауско-Катранским – с юга [Бухарин, Масленникова, Пятков, 1985]. Западное окончание гор Букантау не выходит за пределы площади работ. Общая структура этой зоны – синклинириевая, характеризуется спокойным положительным магнитным полем и линейно вытянутыми аномалиями. Мощность земной коры в горах Тахтатау – восточной части гор Букантау (см. рис. 1) около 40 км. Почти вся территория Южно-Букантауской СФЗ перекрыта мезозойско-кайнозойским осадочным чехлом. Исключение составляет лишь её западная часть. С позиций минерагении данная зона изучена довольно слабо. Промышленные месторождения на её площади не установлены.

На площади аэрогеофизической съёмки Северо-Букантауская (Карачатырская) СФЗ обнажается в северной части гор Букантау. В видимом основании разреза залегает зелёносланцевая кумбулакская свита кембрий–ордовика (Є-О km) второго структурного

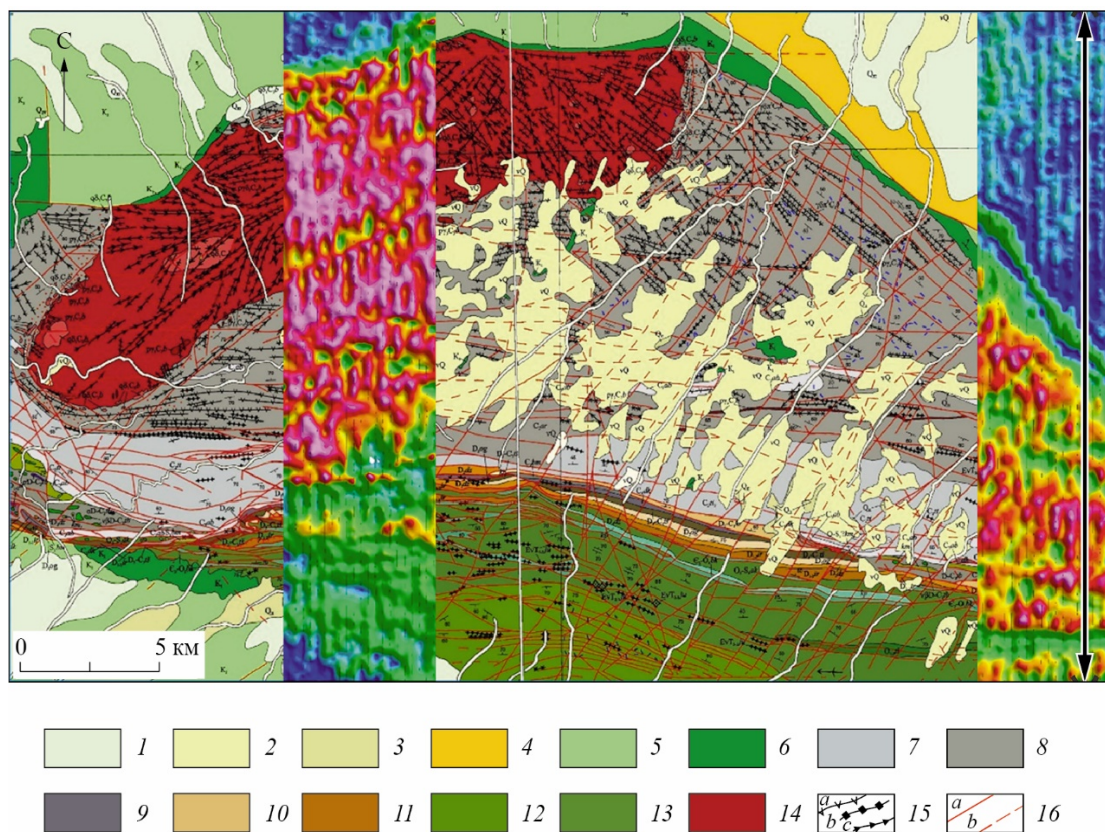


Рис. 3. Сопоставление результатов аэроэлектроразведочных работ с фрагментом геологической карты масштаба 1:100 000 [Харин, Кешубаев, 2007]

1 – верхние четвертичные отложения: Акчадарьинский комплекс; 2 – четвертичные отложения: Амударинский комплекс; 3 – четвертичные отложения: ташакырская свита; 4 – средний палеоген: объединённые маральская, култабанская и сугралинская свиты; 5 – верхний мел: каракатинская и кендыктыубинская свиты; 6 – нижний мел: шурукская и узункудукская свиты; 7 – средний карбон: тохтатауская свита; 8 – средний карбон: архарская свита; 9 – нижний карбон: джускудукская свита; 10 – верхний девон–нижний карбон: тащибулакская свита; 11 – верхний–средний девон: ирлирская свита; 12 – средний ордовик–нижний силур: коксайская свита; 13 – нижний ордовик–нижний силур: аякашинская свита; 14 – верхний карбон: Бокалинский тоналит-трондьемитовый комплекс; 15 – дайки: трондьемит-порфиры (а), дайка и трубки взрыва (b); тоналит-порфиры (с); 16 – разломы: крутопадающие разрывные нарушения (а); предполагаемые разрывные нарушения (b). Чёрными стрелками отмечено расположение профиля, по которому построен геоэлектрический разрез (см. рис. 4)

Fig. 3. Comparison of the results of airborne electromagnetic surveys with a fragment of a geological map at a scale of 1:100,000 [Kharin, Keshubaev, 2007]

1 – Upper Quaternary deposits: Akchadarya complex; 2 – Quaternary deposits: Amudarinsky complex; 3 – Quaternary deposits: Tashakyr formation; 4 – Middle Paleogene: combined Maral, Kultaban and Sugralin formations; 5 – Upper Cretaceous: Karakatinskaya and Kendyktyubin formations; 6 – Lower Cretaceous: Shuruk and Uzunkuduk formations; 7 – Middle Carboniferous: Tokhtatau formation; 8 – Middle Carboniferous: Arkhar formation; 9 – Lower Carboniferous: Dzhuskuduk formation; 10 – Upper Devonian-Lower Carboniferous: Tashibulak formation; 11 – Upper-Middle Devonian: Irlir formation; 12 – Middle Ordovician-Lower Silurian: Koksay formation; 13 – Lower Ordovician-Lower Silurian: Ayakashchinskaya formation; 14 – Upper Carboniferous: Bokalinsky tonalite-trondhjemite complex; 15 – dykes: trondhjemite-porphyry (a); dyke and explosion pipes (b); tonalite-porphyries (c); 16 – faults: steeply dipping faults (a); suspected faults (b). Black arrows mark the location of the profile along which the geoelectric section was constructed (see Fig. 4)

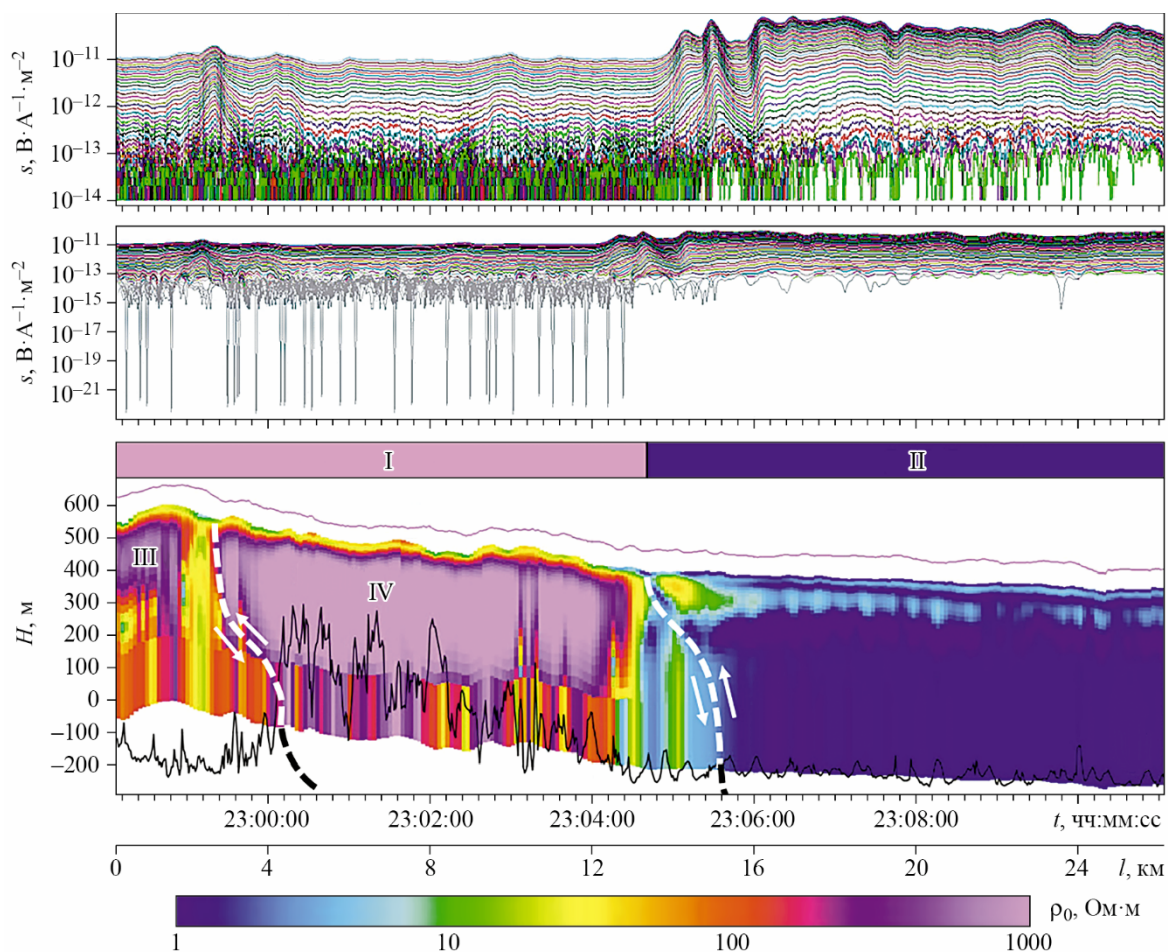


Рис. 4. Геоэлектрический разрез по профилю, показанному на рис. 3. *Вверху:* исходные данные $s, \text{В} \cdot \text{А}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$; *по центру:* данные после осреднения с использованием скользящего окна трапециевидной формы; *внизу:* геоэлектрическая модель по результатам LCI-инверсии (по латерали). I, II – Северо-Букантауская (I) и Южно-Букантауская (II) структурно-формационные зоны (СФЗ); III, IV – Кокпатасская (III) и Ирлирская (IV) структурно-формационные подзоны. Чёрная тонкая кривая – величина ошибки инверсии; белая штриховая линия – границы СФЗ; стрелками указано направление падения и зоны надвигания СФЗ; t – время проведения измерений, чч:мм:сс; l – расстояние по профилю, км; H – глубина, м

Fig. 4. Goelectric section along the profile shown in Fig. 3. *Above:* initial data $s, \text{V} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$; *in the center:* data after averaging using trapezoidal sliding window; *below:* geoelectric model based on the results of LCI inversion (lateral). I, II – North-Bukantau (I) and South-Bukantau (II) structural-formational zones (SFZ); III, IV – Kokpatas (III) and Irlir (IV) structural-formational subzones. Black thin curve – the value of the inversion error; white dashed line – boundaries of SFZ; arrows indicate the direction of dip and thrust zone of the SFZ; t – time of measurements, hh:mm:ss; l – distance along the profile, km; H – depth, m

этажа. Нижняя её подсвета представлена вулканогенно-осадочной базальтовой карбонатно-кремнисто-терригенной формацией (более 400 м), а вторая (более 800 м) – флишовой формацией. Породы дислоцированы до изоклинальных складок и пloyчатости. Кумбулакская свита несогласно перекрывается карабулакской свитой (более 200 м), принадлежащей последовательно дифференцированной, гомодромной базальт-андезит-дацит-риолитовой островодужной формации. Этот разрез слагает третий структурный этаж.

Южно-Букантауская СФЗ, ограниченная Букантауским и Джаманкумским региональными разломами, имеет протяжённость 300 км и ширину 90 км. Она характеризуется положительным слабо варьирующим магнитным полем. Эта зона выступает в качестве относительного автохтона с асимметричной антиформной (антиклиналоидной) общей структурой. Здесь тектонически совмещены два пакета пологих пластин – северный (узкий в плане) и южный. Пакеты разделены Аякацинским субширотным сбросо-взбросом, который сопровождается широкой зоной динамометаморфизма и метасоматоза. Северный пакет состоит из нижней Серкешсайской и верхней Ирлирской подзон, полого наклонённых на север (за исключением центральной части Ирлирской гряды) под образования Северо-Букантауской СФЗ. Южный – из Бозтау-Окжетпесской (нижней), Карашахской и Кокпатасской структурно-формационных подзон, полого наклонённых на юг, под Туркестано-Алайскую СФЗ.

В геоэлектрическом разрезе в Южно-Букантауской СФЗ по изменениям сопротивления выделяются две зоны, которые по отношениям геодинамического районирования и геологической характеристики разреза чётко отражают границы Ирлирской и Кокпатасской структурно-формационных подзон (см. рис. 4). На вертикальном разрезе в Ирлирской структурно-формационной подзоне выделяется два структурных этажа – второй и третий, с неясными соотношениями [Бухарин, 1999]. Второй этаж сложен карбонатно-кремнисто-глинистой (боктекенская ($\text{Є}_3\text{-O}_1 \text{ bk}$) и телибайская ($\text{O}_{1-2} \text{ tl}$) свиты, до 1000 м) формацией, глинисто-алевритно-песчаной (люпекская ($\text{O}_3 \text{ lp}$) свита, 400 м) и известняково-алевролитно-песчано-гравийной (аякацинская ($\text{O}_3\text{-S}_1 \text{ ak}$) свита, до 1600 м) субформациями мифлишоидной формации континентального склона и подножия общей мощностью до 3000 м; третий этаж представлен кремнисто-карбонатной (боздонтауская ($\text{R}_3 \text{ bz}$) свита, 400 м), карбонатной (джартасская ($\text{S}_2 \text{ dž}$), 1650 м, ирлирская ($\text{D}_{1-2} \text{ ir}$) и др. свиты) формациями ($\text{C}_2 \text{ m}_{1-2}$, 700 м).

Кокпатасская структурно-формационная подзона, образующая верхний покров, сложена мощными (до 5000 м) вулканогенно-карбонатно-кремнисто-терригенными отложениями кокпатасской ($\text{R}_3 \text{ kp}$) и согласно её перекрывающей коксайской ($\text{O}_{1-2} \text{ ks}$) свитами. Первая относится к смешанной дацит-андезит-базальт-трахибазальтовой карбонатно-кремнисто-глинистой (первая и вторая подсвиты ($\text{Є-O}_1 \text{ kp}_{1-2}$), 900 м) и карбонатно-кремнисто-глинистой (третья и четвёртая подсвиты ($\text{R}_3 \text{ kp}_{3-4}$), 900 м) формациям, а вторая – к кремнисто-терригенной алевропелитовой (первая подсвита ($\text{O}_{1-2} \text{ ks}$), 1000 м), глинисто-алевритно-песчаной (вторая подсвита ($\text{O}_{1-2} \text{ ks}$), 700 м), алевритно-песчано-гравийной (третья подсвита ($\text{O}_{1-2} \text{ ks}$), 2000 м), глинисто-алевритно-песчаной (четвёртая подсвита ($\text{O}_{1-2} \text{ ks}$), 400 м) субформациями флишоидной формации. Кокпатасская и коксайская свиты составляют второй структурный этаж [Савчук, 1998].

В северо-западном окончании Букантауского горного массива присутствует цинково-медно-колчеданное рудопроявление с золотом, которое сформировалось в тесной связи с базальтами толеитового типа, превращёнными в глаукофановые сланцы кумбулакской свиты [Голованов, 2001].

Альпинотипные гипербазиты (букантауский плагиогранит – габбро-перидотитовый комплекс C_2) сопровождаются небольшими проявлениями хромитов [Далимов, Ганиев, Троицкий, 2005]. С бокалинским тоналит-трондьемитовым комплексом C_3 сформировались проявления меди, золота, молибдена, полиметаллов и др.

В геологическом строении площади принимают участие терригенно-карбонатные, терригенные, вулканогенно-осадочные, молассоидные и магматические породы протерозойского (?) и палеозойского возрастов, образующие складчатый фундамент. Морские осадки меловой и палеогеновой систем залегают в виде покрова в предгорных равнинах. На площади выявлены: золотосодержащее цинк-медноколчеданное месторо-

ждение Карамурун, медноколчеданное проявление Древнее, золоторудное проявление Северный Карабулак, полиметаллическое и медно-молибденовое прожилково-вкраплённое рудопоявление Оразалы, Тубабергенское проявление бокситов и бокситоподобных пород, а также большое количество рудных точек золота, меди, цинка, молибдена, вольфрама, серебра, свинца [Голованов, 2001].

Южно-Букантауская СФЗ ограничена Букантауским и Джаманкумским региональными разломами [Бухарин, Масленникова, Пятков, 1985], её протяжённость достигает 300 км. Мощность земной коры составляет 40 км. Структура чётко выраженная, антиклинориевая. Зона характеризуется интенсивным гранитоидным магматизмом верхнего палеозоя [Савчук, 1998; Далимов, Ганиев, Троцкий, 2005; Конопелько, 2020].

Из складчатых структур в пределах зоны явно прослеживается Кокпатасская антиклиналь, протянувшаяся через горы Каскыртау, Кокпатас и Окжетпес. В результате ундуляции шарнира складки (Кокпатас и Окжетпес) в ядре структуры обнажаются карбонатные отложения девонского и поздневизейского возрастов [Савчук, 1998]. В горах Каскыртау отчётливо выражено периклиналиальное замыкание складки. К юго-западу Кокпатасская антиклиналь переходит в Торткудукскую синклиналь, переходящую в свою очередь в Алтынтаускую антиклиналь, ядерная часть которой прорвана гранитами. Южнее Алтынтауского интрузива под покровом мезозойских и кайнозойских отложений установлена Тамдытауская антиклиналь субширотного простирания. В её ядре залегают карбонатные породы девона, а в крыльях – каменноугольные отложения [Миркамалов и др., 2018]. Кроме вышеприведённых структур в пределах зоны имеют развитие многочисленные мелкие брахискладки.

В Южно-Букантауской СФЗ выделяются Кокпатасский серебро-золоторудный и Турбайский золото-вольфрамоворудный районы [Голованов, 2001]. В первом расположено крупное Кокпатасское рудное поле, состоящее из двух десятков сближенных рудных тел золото-сульфидного (мышьякового) типа. Крутопадающие пологие пласто- и линзообразные залежи находятся в углеродистых песчаниках, алевролитах и сланцах карашахской свиты C_2 , прорванных многочисленными дайками саутбайского габбро-сиенит-граносиенитового комплекса P_1 [Далимов, Ганиев, Троцкий, 2005; Конопелько, 2020].

В Турбайском рудном районе помимо средних и мелких золотых объектов выделяются и средние вольфрамовые месторождения: апоскарново-скарноидное субпластовое в карбонатно-метавулканогенно-терригенных породах R_{2-3} в экзоконтакте адамеллит-гранитов C_3-P_1 (Саутбай) и жильно-штокверковое в гранодиорит-адамеллитовом комплексе C_3-P_1 (Сарытау).

Средняя ширина Туркестано-Алайской структурно-формационной зоны составляет примерно 60 км. От Южно-Букантауской СФЗ она отделена с севера Джаманкумско-Северокатранским разломом, с юга – Мурунтау-Северо-Нуратинским разломом. Данная зона отличается слабо дифференцированным и, преимущественно, отрицательным магнитным полем, в пределах которого линейно вытянутые интенсивные аномалии, как правило, совпадают с локальными максимумами силы тяжести. Мощность земной коры не превышает 45 км. Образования нижнего-среднего палеозоя однотипны с таковыми в Северо-Букантауской структурно-формационной зоне. Терригенные толщи верхнего палеозоя значительно меньшей мощности (до 3000 м) с частыми несогласиями между ними [Бухарин, Масленникова, Пятков, 1985]. В пределах зоны фиксируются тела габбро-перидотитов, габброидов, плагиогранитов, таналитов, кварцевых монцонитов и лейкогранитов [Далимов, Ганиев, Троцкий, 2005]. Внутренняя структура Туркестано-Алайской структурно-формационной зоны определяется кулисообразным расположением складок и наличием чешуйчато-надвиговых нарушений значительных амплитуд. Большое количество рудопоявлений этой зоны тесно связано с офиолитовыми интрузиями [Голованов и др., 1997].

Данные проявления вкраплённого хромита, металлов группы платины (платина, палладий, родий, осмий, иридий) в серпентинизированных перидотитах и т.п.; проявления железа, титана, ванадия в габброидах и т.д.; с процессами серпентинизации гипербазитовых интрузий связаны асбест и тальк [Голованов, 2001]. В пределах зоны установлены магнетитовое рудопроявление Кенеси, колчеданные рудопроявления, зафиксированные в виде “железных шляп”, а также проявления лиственитизации, сопровождаемые ртутной, золотой, свинцовой, цинковой минерализациями.

Обработка аэромагнитных и аэрорадиометрических данных с применением автоматизированных градиентных методов позволяет выявить структуру геологических образований [Okeyode et al., 2019], а также основные структурные линеаменты и зону контакта, контролирующую распределение зоны гидротермальных изменений [El-Raouf et al., 2023]. На карте региональной составляющей магнитного поля (рис. 5) площадь гор Букантау разделяется на две части – северную и южную. Район исследований находится над южной частью гор Букантау, в которой магнитное поле преимущественно отрицательное с многочисленными аномалиями, придающими полю мозаичный характер.

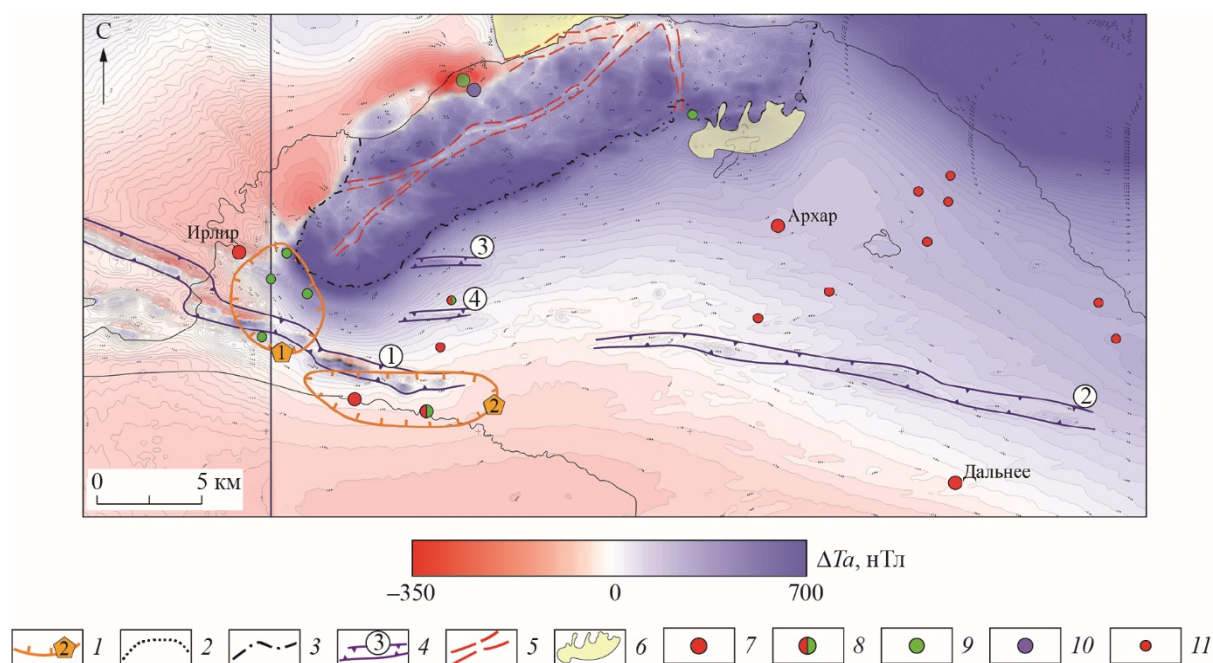


Рис. 5. Карта аномального магнитного поля ΔTa центральной части гор Букантау, построенная по данным аэромагнитной съёмки 2020–2022 гг. (Масштаб 1:25 000)

1 – рудное поле: оразалинское (1), кангашарское (2); 2 – границы выхода палеозоя; 3 – граница Бокалинского интрузива; 4 – выявленные перспективные зоны и их номера; 5 – тектонические нарушения; 6 – скрытая часть интрузива, выделенная по результатам интерпретации аэромагнитной съёмки; 7–10 – проявления: золоторудные (7); золото-медные (8); медные (9); вольфрамовые (10); 11 – золото и медные точки минерализации

Fig. 5. Map of the anomalous magnetic field ΔTa of the central part of the Bukantau Mountains, constructed based on the airborne magnetic survey data of 2020–2022 (Scale 1:25,000)

1 – ore field: Orazalinskoe (1), Kangasharskoe (2); 2 – boundaries of the Paleozoic outcrop; 3 – boundary of the Bokalinsky intrusion; 4 – identified prospective zones and their numbers; 5 – tectonic faults; 6 – hidden part of the intrusion, identified based on the results of interpretation of airborne magnetic survey; 7–10 – occurrences: gold ore (7); gold-copper (8); copper (9); tungsten (10); 11 – gold and copper mineralization points

Резкий переход положительного магнитного поля объясняется различной интенсивностью роста горного сооружения (подъёма кровли домезозойского фундамента к дневной поверхности). Восточная часть гор воздымается медленнее и магнитовозмущающие объекты перекрыты рыхлыми отложениями значительной мощности (см. рис. 5).

В магнитном поле (как и в поле силы тяжести) хорошо выражены Северо-Букантауская и Южно-Букантауская структурно-формационные зоны. На карте аномального магнитного поля Северо-Букантауская СФЗ отражается значениями от 10 до 400 нТл. Сложнее характер магнитного поля над Южно-Букантауской СФЗ. Оно преимущественно отрицательное с интенсивностью от -10 до -100 нТл. Площадные и изометричные отрицательные аномалии магнитного поля картируют гранитоидные массивы и штоки, линейные аномалии соответствуют вмещающим их терригенным породам.

На основе результатов обработки аэромагнитных данных выявлена скрытая часть интрузива с северо-восточным продолжением бакалинского массива. Отображены границы Северо-Букантауской и Южно-Букантауской СФЗ. Кроме того, в ходе изучения магнитного поля эталонного рудного поля на территории исследования обнаружена перспективная зона (см. рис. 5), в которой магнитные аномалии идентичны аномалиям Бошшохинской зоны смятия.

Ранее нами были разработаны классификационные признаки золоторудных объектов на основе типов и показателей геофизических полей, а также характеристик эталонных объектов гор Букантау [Goipov et al., 2024]. В результате установлено, что размещение золоторудных месторождений коррелирует с определённым диапазоном локальных значений геофизических полей.

В программе ArcGIS-10.8¹ выполнен статистический анализ методом распознавания образов, при котором получены физические значения эталонной рудной зоны для выделения прогнозных зон (см. рис. 5).

На рассматриваемой территории в горах Букантау расположено известное золоторудное месторождение Кокпатас, которое не вошло в контур площади аэрогеофизической съёмки.

Геолого-геофизическая характеристика эталонного месторождения Кокпатас

Площадь рудного поля месторождения Кокпатас составляет около 110 км². В настоящее время ведётся третья очередь по разработке данного месторождения. По различным геолого-структурным признакам на месторождении выделено 22 рудных участка. Самый крупный из них – участок Южный-1 [Голованов, 2001]. Главную роль в контроле и распределении рудных зон здесь играют пологие (либо вторично наклонённые) шарьяжно-надвигово-кливажные структуры [Савчук, 1998].

Месторождение приурочено к Кокпатасской антиформной складке север–северо-западной ориентировки. Протяжённость складки более 45 км, размах крыльев 15–20 км, падение пород на крыльях от 10 до 50°. Ядро складки сложено девон-нижнекаменноугольными известняками. Они тектонически перекрываются меланжированной карашахской толщей, состоящей из различных вулканогенных и вулканогенно-терригенных блоков, разделённых, пологими тектоническими зонами. Эта толща подстилает аллохтон, сложенный отложениями кокпатасской свиты [Мухин, Каримов, Савчук, 1991].

¹ <https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/latest/analyze/commonly-used-tools/statistical-analysis.htm>

Рудные залежи представляют собой пласто- и линзообразные тела с раздувами и пережимами как по простиранию, так и по падению, разделённые прослоями пустых пород, рассечённые многочисленными безрудными дайками. Преобладают пластообразные и линзовидные залежи в зонах вязких разрывов с углами падения до $10\text{--}60^\circ$, насыщенные золотоносными сульфидами. Более локально развиты минерализованные тела, секущие дайки порфиритов разного состава [Голованов, 2001]. На площади широко распространены дайки пёстрого состава, развитые в зонах субширотных разломов [Миркамалов и др., 2010].

Основные рудоконтролирующие элементы рудного поля – пересечения широтных разломов с разломом северо-восточного направления. Они подразделяются на пологие взбросы (надвиги) с южным падением и крутые сбросы и сбросо-сдвиги, падающие преимущественно на север. Смещение по ним не превышает первые десятки метров [Голованов, 2001].

Кокпатасская свита (R_3 кр) по площади распространения на Кокпатасском рудном поле занимает ведущее место и представлена протяжёнными горизонтами кварцитов, микрокварцитов, известняков и доломитов. Они переслаиваются со сланцами различного состава, алевролитами, песчаниками и вулканитами основного состава. В северо-западном и центральном блоках Кокпатасской свиты непосредственно контактирует с гранитоидами Кокпатасского интрузива, создавая при этом зоны скарнирования и орого-вирования, фиксирующиеся магнитным и гравитационным полями. Благодаря невысоким значениям физических параметров магнитной восприимчивости ($\kappa=15\cdot 10^{-5}$ ед. СИ) и плотности ($2.67\text{--}2.68$ г/см³), толща в гравитационном поле отображается нейтрально, а в магнитном – слабоотрицательными и слабоположительными значениями.

Карашахская свита (C_2 кр) представляет собой тектоническую смесь, меланж, образовавшуюся при шарнировании кокпатасского-коксайского комплекса на известняки. В рудном поле она располагается в виде крупного площадного образования сложной формы в северо-западном и центральном блоках. Свита картируется площадными магнитными гравитационными аномалиями и зонами повышенной поляризуемости. Повышение значений физических полей определяется наличием в литологическом составе толщи доломитов, известняков, вулканитов основного состава. Зоны золото-сульфидной минерализации в карашахской свите по Кокпатасскому рудному полю характеризуются средними значениями удельного электрического сопротивления (100 Ом·м) и относительно высокой поляризуемостью (18%). В рудном поле зоны повышенной поляризуемости, отождествляемые с зонами сульфидной минерализации, фиксируются в северо-западном блоке линейной полосой сложной формы, протяжённостью 8 км при максимальной ширине 1 км и фрагментом другой зоны, которая пространственно коррелирует с западной областью развития карашахской свиты.

Исключение составляют породы карашахской свиты (сланцы биотит-актинолитовые, роговообманково-плагиоклазовые, амфиболовые), в состав которых входят железосодержащие минералы. Восприимчивость осадочно-метаморфогенных пород карашахской свиты имеет широкий диапазон значений от 10^{-4} до $320\cdot 10^{-5}$ ед. СИ при средних параметрах $40\cdot 10^{-5}$ ед. СИ. Наиболее высокая магнитная восприимчивость присуща породам зон контактового метаморфизма – роговикам (среднее $270\cdot 10^{-5}$ ед. СИ) и скарнам (среднее $320\cdot 10^{-5}$ ед. СИ). При этом разница между максимальными и минимальными значениями весьма значительная, что обусловлено широкой вариацией ферромагнетиков.

Зоны сульфидной минерализации в отложениях карашахской свиты при средних значениях магнитной восприимчивости $67\cdot 10^{-5}$ ед. СИ также отличаются широким интервалом колебаний от 10^{-4} до $936\cdot 10^{-5}$ ед. СИ, что объясняется весьма неравномерным

распределением сульфидов, возможно, пирротина и гидроокислов железа. По гравимагнитным данным площадь рудного поля расположена в межинтрузивном пространстве. Предполагается, что это зона с отрицательной формой поверхности интрузива.

Осевая часть основной тектонической структуры Кокпатасского рудного поля Кокпатасской антиформы нашла отражение в слабо дифференцированном существенно отрицательном магнитном поле, связанном с залегающими в ядре структуры карбонатными породами. Заметно отличаются по значениям поляризуемости и сопротивления среди палеозойских пород известняки, граниты и гранодиориты. Дифференцируются по электрическим свойствам и серпентиниты, дайки и отложения силура.

Геофизические признаки зон золотого оруденения зависят от формы руд, глубины залегания, структуры, геологического режима, степени изменений и содержания сульфидных минералов [Brempong *et al.*, 2019]. По результатам обработки данных электрического сопротивления и вызванной поляризации выявлена зона золотого оруденения в виде узкой дискретной области с повышенным сопротивлением (более 4900 Ом·м) на территории месторождения Субика в Гане [Takyi-Kyeremeh *et al.*, 2019].

Важное значение для решения рудопоисковых задач в горах Букантау имеют различия в электрических свойствах золотосульфидных зон и тел, с одной стороны, и вмещающих пород, с другой стороны. Объясняется это тем, что в пределах золоторудных зон и, особенно, тел отмечается резкое увеличение концентрации сульфидов, прежде всего, пирита и арсенопирита. Кроме того, особенности гидротермального изменения рудовмещающих пород (окварцевание, окремнение) привели к некоторому увеличению их электрического сопротивления по сравнению с сопротивлением тех же пород за пределами рудных зон.

Наряду с золоторудными зонами повышенной поляризуемостью обладают зоны пиритизации и графитизации. Однако последние имеют сравнительно высокую электропроводность, что является важным отличием их от золоторудных зон и тел. Данный факт свидетельствует о том, что при поисковых работах методом вызванной поляризации (ВП) можно не только картировать сульфидизированные отложения, но и надёжно различать золоторудные зоны и тела от графитизированных пород. Так, при достаточной мощности тел, метод ВП может быть эффективен для поисков кварцевых жил и зон окварцевания, которые среди вмещающих сульфидизированных пород должны отмечаться меньшими значениями поляризуемости. Вследствие того, что кварцевые жилы интенсивно раздроблены, по электрическому сопротивлению они практически не отличаются от вмещающих пород.

Таким образом, рассмотренные выше электрические свойства пород и руд свидетельствуют о широком диапазоне их изменения в зависимости от состава пород и присутствия в них электропроводящих минералов. Это позволяет проводить площадные сравнительно мелкомасштабные съёмки методом ВП, в результате которых, путём анализа электрических полей (поляризуемости и сопротивления), в целом, можно установить различные границы раздела, закартировать рудовмещающие отложения, проследить дайки, зоны околорудного изменения пород, т.е. в конечном счёте, изучить особенности геологического строения территории. Помимо решения общих задач геологического картирования методом ВП возможно, как следует из анализа электрических свойств, проводить и прямые поиски рудных месторождений.

Рассеянная сульфидная минерализация в песчаносланцевых отложениях палеозоя отмечена во многих районах Центральных Кызылкумов. Представлена она, в основном, пиритом в объёмной концентрации 1–2 %, широкий ореол развития которого окружает месторождения, рудопроявления, а также интрузии кислого и основного состава. Это приводит к общему увеличению поляризуемости некоторых групп пород до 5–10 % и

более, что осложняет выделение аномалий методом ВП от практически ценных сульфидных объектов. С другой стороны, интенсивные процессы поверхностного гипергенеза привели к тому, что в зоне гипергенеза и под ней физические свойства одних и тех же горных пород резко отличаются. Мощность зоны поверхностного гипергенеза зависит от состава пород и колеблется от единиц до 50–100 м. Например, в плотных известняках, габброидах мощность зоны обычно не превышает 10–15 м, в менее крепких и более подверженных разрушению песчано-сланцевых отложениях достигает 50–100 м. В зонах тектонических нарушений, где породы наиболее раздроблены, мощность зоны гипергенеза оказывается наибольшей, в окварцованных и окремненных породах, наоборот, наименьшей. Помимо всего прочего, мощность зоны гипергенеза зависит от уровня грунтовых вод, понижение которого сопровождается увеличением её мощности.

В зоне поверхностного гипергенеза сульфиды оказываются практически полностью окисленными, а горные породы в сухой период года обезвоженными. Соответственно, поляризуемость верхнего слоя пород низка (1–2 %), а ниже уровня грунтовых вод горные породы с сохранившимися сульфидами имеют поляризуемость 5–10 % и более. Если в породах нет сульфидов, то зона поверхностного гипергенеза по поляризуемости не фиксируется, но, тем не менее, по электрическому сопротивлению горные породы верхнего и нижнего слоя отличаются существенно. Выше уровня грунтовых вод обезвоженные породы имеют более высокое электрическое сопротивление, чем обводнённые, тем более что в условиях Кызылкумов минерализация грунтовых вод обычно значительная.

Заключение

На основании изучения электрических свойств горных пород по данным поисковых электроразведочных исследований можно подчеркнуть две отличительные особенности, отражающиеся на характере электрического поля. Первая – значительное развитие в песчано-сланцевых отложениях рассеянной сульфидной минерализации. Вторая – повсеместное развитие зоны поверхностного гипергенеза, обусловленной пустынно-континентальным климатом региона.

Прежде всего, необходимо отметить приуроченность основных промышленных золоторудных месторождений и рудопроявлений вдомезозойском фундаменте к площадям развития углеродисто-кремнистой (черносланцевой) формации, являющейся одним из наиболее гравиактивных объектов.

Металлогенический облик Южно-Букантауской структурно-формационной зоны и её перспективы обуславливаются широким распространением промышленной золотоносности (Кокпатас и другие месторождения).

Отчётливо картируется наличие глубинных разломов, узлов их пересечений с другими нарушениями, которые проявляются в гравимагнитных полях в виде гравитационных ступеней разных масштабов, линейных протяжённых аномалий силы тяжести и магнитного поля, а узлы их пересечения в виде участков объёмного разуплотнения морфоаномалий в линейно-узловой форме.

Отмечается также присутствие в ряде полей и месторождений интрузивных тел – либо непосредственно на площади их развития, либо на некотором удалении от них, где их влияние определяет термальную и гидротермальную проработку пород рудных полей и месторождений.

Далее наблюдается приуроченность некоторых золоторудных объектов к участкам развития наложенных мульд, которые обычно развиваются вдоль глубинных разломов и служат одним из проявлений тектонической активизации на определённом этапе.

Месторождения и рудопроявления золота, серебра, меди, урана, вольфрама располагаются по периферии плотных блоков (на плотном цоколе) в осложнениях градиентной зоны (граница Северного и Южного Букантау) и приурочены к морфоструктурным аномалиям гравитационных ступеней, к узлам пересечения их со структурами других направлений.

Финансирование

Исследование проведено в рамках производственной деятельности “Центральной геолого-геофизической” экспедиции акционерного общества “Узбекгеологоразведка” Министерства горнодобывающей промышленности и геологии Республики Узбекистан. Подготовка и оформление статьи выполнены в Государственном учреждении “Институт минеральных ресурсов” при поддержке гранта “Создание космоструктурного атласа обнажённых и закрытых территорий горнорудных регионов Центрального Кызылкума с целью выявления перспективных площадей на основе космогеологических исследований” (№ AL-5621112007, 2023-2025).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Литература

- Бабаянц П.С., Контарович О.Р., Трусков А.А. Современные аэрогеофизические технологии при прогнозе, поисках и оценке месторождений твердых полезных ископаемых // Разведка и охрана недр. 2020. № 11. С.30–40.
- Бискэ Ю.С. Тянь-Шаньская складчатая система. II. Палеозойский Южный Тянь-Шань и Кызылкумы // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. Геология и география. 2004. № 2. С.13–30.
- Буртман В.С., Поршняков Г.С. Тектоника варисцид Тянь-Шаня и Кызылкума // Тектоника Урало-Монгольского складчатого пояса / Под ред. М.В. Муратова. М.: Наука, 1974. С.92–106.
- Бухарин А.К., Масленникова И.А., Пятков А.К. Домезозойские структурно-формационные зоны Западного Тянь-Шаня: Стратиграфия. Ташкент: Фан, 1985. 152 с.
- Бухарин А.К. Структурно-формационное районирование Тянь-Шаня // Геология и минеральные ресурсы. 1999. № 2. С.3–10.
- Гарьковец В.Г. Литологические и геолого-структурные условия размещения золотого оруденения кызылкумского типа // Доклады Академии наук СССР. 1975. Т. 222, № 1. С.193–196.
- Голованов И.М. Рудные месторождения Узбекистана. Ташкент: ГИДРОИНГЕО, 2001. 687 с.
- Далимов Т.Н., Ганиев И.Н., Троцкий В.В. Внутриплитный магматизм Западного Тянь-Шаня // Геология и минеральные ресурсы. 2005. № 2. С.6–15.
- Конопелько Д.Л. Палеозойский гранитоидный магматизм Западного Тянь-Шаня. СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет, 2020. 196 с.
- Матвеев Ю.Н., Симончик К.К., Тропченко А.Ю., Хитров М.В. Цифровая обработка сигналов Учебное пособие. СПб.: СПбНИУ ИТМО, 2013. 166 с.
- Миркамалов Р.Х., Голованов И.М., Чирикин В.В., Фадеичева Л.П., Миркамалова Г.Х. Атлас моделей рудных месторождений Узбекистана. Ташкент: ГП “НИИМР”, 2010. 100 с.
- Миркамалов Р.Х., Диваев Ф.К., Селтманн Р., Конопелько Д.Л. Геодинамическая эволюция магматизма и связанного с ним оруденения Западного Тянь-Шаня на территории Узбекистана // Геология и минеральные ресурсы. 2018. № 1. С.3–15.
- Мухин П.А., Каримов Х.К., Савчук Ю.С. Палеозойская геодинамика Кызылкумов. Ташкент: Фан, 1991. 147 с.

- Рахматуллаев Х.Р.* О каледонской и герцинской эпохах золоторудной минерализации в Западном Узбекистане (на примере рудного поля Кокпатас) // Итоги петрометаллогенических исследований. Ташкент: Фан, 1972. С.154–170.
- Савчук Ю.С.* Покровно-складчатая структура домезозойского фундамента и металлогения Кызылкумов: Автореф. дис. ... докт. геол.-мин. наук. Ташкент: НИИМР, 1998. 37 с.
- Харин В.Г., Кешибаев Ж.Д.* Схематическая геологическая карта гор Букантау. Масштаб 1:100 000. Ташкент: Государственная предприятие ЦГТЭ, 2007.
- Хон М.Т., Воронков А.К., Хизниченко И.В.* Выявление потенциальной золотоносности закрытых территорий северной части Центральных Кызылкумов на основе изучения материалов по ранее пробуренным скважинам за 1986-89 гг. Отчет ОМЭ САИГИМС. Ташкент: САИГИМС, 1989. 160 с.
- Brempong F., Wemegah D., Preko K., Armah T., Boadi B., Menyeh A., Oppong I., Quarshie M., Anning A., Asare V., Noye R.* Interpretation of Geological Structures Hosting Potential Gold Deposits in the Konongo Gold Mine Using Airborne Magnetic, Electromagnetic and Radiometric Datasets // Journal of Geoscience and Environment Protection. 2019. V. 7. P.203–225. Doi: 10.4236/gep.2019.76016
- El-Raouf A.A., Doğru F., Abdelrahman K., Fnais M.S., El Manharawy A., Amer O.* Using Airborne Geophysical and Geochemical Methods to Map Structures and Their Related Gold Mineralization // Minerals. 2023. V. 13. 23 p. <https://doi.org/10.3390/min13020237>
- Goipov A.B., Akhmadov Sh.I., Yusupov V.R.* Characteristics of geophysical fields and geophysical signs of mineralization in the Bukantau Mountains in the Southern Tien-Shan // ANAS Transactions, Earth Sciences. 2024. V. 2. P.77–91. DOI: 10.33677/ggianas20240200128
- Morgan L.A.* Geophysical Characteristics of Volcanogenic Massive Sulfide Deposits // Volcanogenic Massive Sulfide Occurrence Model: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey, 2012. 16 p.
- Okeyode I.C., Olurin O.T., Ganiyu S.A., Olowofela J.A.* High Resolution Airborne Radiometric and Magnetic Studies of Ilesha and its Environs. Southwestern, Nigeria // Materials and Geoenvironment. 2019. V. 66, N 1. P.51–73. <https://doi.org/10.2478/rmzmag-2018-0020>
- Takyi-Kyeremeh K., Wemegah D.D., Preko K., Menyeh A.* Integrated Geophysical Study of the Subika Gold Deposit in the Sefwi Belt, Ghana // Cogent Geoscience. 2019. V. 5. P.1–16. <https://doi.org/10.1080/23312041.2019.1585406>
- Wemegah D.D., Preko K., Noye R.M., Boadi B., Menyeh A., Danuor S.K., Amenyoh T.* Geophysical Interpretation of Possible Gold Mineralization Zones in Kyerano, South-Western Ghana Using Aeromagnetic and Radiometric Datasets // Journal of Geoscience and Environment Protection. 2015. V. 3. P.67–82. <https://doi.org/10.4236/gep.2015.34008>
- Zhang G., Lü Q.T., Zhang G.B., Lin P.R., Jia Z.Y., Suo K.* Joint Interpretation of Geological, Magnetic, AMT and ERT Data for Mineral Exploration in the Northeast of Inner Mongolia, China // Pure and Applied Geophysics. 2018. V. 175. P.989–1002. <https://doi.org/10.1007/s00024-017-1733-5>

Сведения об авторах

ГОИПОВ Акрам Байрамович – доктор философии по геолого-минералогическим наукам, доцент, начальник отдела цифрового картирования, Государственное учреждение “Институт минеральных ресурсов” Университета геологических наук Министерства горнодобывающей промышленности и геологии Республики Узбекистан. 100041, Узбекистан, г. Ташкент, Мирзо Улугбекский р-н, ул. Олимлар, д. 64. Тел.: +99(894) 688-97-00. E-mail: goipov9700@mail.ru

АШУРОВ Абдор Учкунович – главный геофизик, “Центральная геолого-геофизическая” экспедиция АО “Узбекгеологоразведка” Министерства горнодобывающей промышленности и геологии Республики Узбекистан. 111800, Узбекистан, Ташкентская обл., Зангиатинский р-н, п. Эшонгузар, ул. Мустакиллик, д. 21. Тел.: +99(897) 918-34-55. E-mail: abrorashurov1986@gmail.com

АТАБАЕВ Дилшот Хусаинбаевич – доктор геолого-минералогических наук, профессор, Национальный университет Узбекистана им. Мирзо Улугбека. 100174, Узбекистан, г. Ташкент, Алмазарский р-н, ул. Университет, д. 4. Тел.: +99(890) 188-40-62. E-mail: atabaev_d@mail.ru

INTERPRETATION OF AIRBORNE ELECTROMAGNETIC SURVEY DATA IN GOLD ORE PROSPECTING AND GEODYNAMIC ZONING OF THE BUKANTAU MOUNTAINS (SOUTHERN TIEN SHAN)

A.B. Goipov¹, A.U. Ashurov², D.Kh. Atabaev³

¹ State Institution “Institute of Mineral Resources” of the University of Geological Sciences of the Ministry of Mining and Geology of the Republic of Uzbekistan, Tashkent, Republic of Uzbekistan

² Central Geological and Geophysical Expedition of JSC Uzbekgeologorazvedka of the Ministry of Mining and Geology of the Republic of Uzbekistan, Tashkent region, Republic of Uzbekistan

³ National University of Uzbekistan named after Mirzo Ulugbek, Tashkent, Republic of Uzbekistan
Corresponding author: A.B. Goipov (e-mail: goipov9700@mail.ru)

Abstract. The territory of the Southern Tien Shan starts from the Beishan plateau (China), extends linearly through Kyrgyzstan and Tajikistan and ends in the lower reaches of the Amu Darya River (Uzbekistan). The Hercynian nappe-fold linear orogen of the Southern Tien Shan was formed as a result of accretionary crowding of allochthonous plates, blocks and scales, consisting of fragments of oceanic crust formations, passive margins, island arcs, marginal or back-arc seas. The Southern Tien Shan is characterized by the presence of large and ultra-large world-class orogenic gold ore deposits (Muruntau and Kokpatas). All large deposits of the considered region are located within the outcrop of Paleozoic rocks. The need to conduct regional airborne geophysical research is associated with the problem of expanding the funds of promising objects in closed areas with thin cover of sediments, which are associated with the exhaustion of the limit of surface and near-surface deposits. This article presents the results of a comprehensive analysis of regional airborne geophysical survey data carried out in 2020–2022 in the Bukantau mountain range. Two-dimensional processing of airborne electromagnetic survey profiles has identified volumetric zones of different resistivity in the section, which reflects the deep structure of the structural-formational zones of the subduction nature of the territory. Based on a comprehensive interpretation of airborne geophysical survey materials, deep fault zones were identified and the boundaries of the deep occurrence of granitoid intrusions were clarified. Taking into account the physical indicator of the reference deposits, distinctive petrophysical features of the ore-bearing formations were established. The patterns of formation and placement of endogenous gold ore mineralization were analyzed with identification of prospecting indicators and mineralization control factors, the geophysical characteristics of gold ore mineralization zones were determined. Based on the geological interpretation of the airborne geophysical survey, prognostic and prospective areas for gold were identified, which are recommended for subsequent detailed geological exploration work.

Keywords: Southern Tien Shan, structural-formational zone, electrical resistivity, chargeability, magnetic field, gold.

Funding

The study was conducted within the framework of the production activities of the “Central Geological and Geophysical” Expedition of JSC “Uzbekgeologorazvedka” of the Ministry of Mining and Geology of the Republic of Uzbekistan. The preparation and design of the article was carried out at the State Institute of Mineral Resources supported by the grant “Creation of a cosmostructural atlas of exposed and closed territories of the mining regions of Central Kyrgyzstan in order to identify promising areas based on cosmogeological research” (no. AL-5621112007, 2023-2025).

Conflict of interest

The authors declare they have no conflict of interest.

References

- Babayants P.S., Kontarovich O.R., Trusov A.A., Modern airborne geophysical technologies in the forecast, search and assessment of solid mineral deposits, *Razvedka i okhrana neдр* (Exploration and Protection of Subsurface Resources), 2020, no. 11, pp. 30-40. [In Russian].
- Biske Yu.S., Tien Shan fold system. II: Paleozoic Southern Tien Shan and Kyzylkum, *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Seriya 7. Geologiya i geografiya* (Bulletin of St. Petersburg University. Series 7. Geology and Geography), 2004, no. 2, pp. 13-30. [In Russian].
- Brempong F., Wemegah D., Preko K., Armah T., Boadi B., Menyeh A., Oppong I., Quarshie M., Aning A., Asare V., Noye R., Interpretation of Geological Structures Hosting Potential Gold Deposits in the Konongo Gold Mine Using Airborne Magnetic, Electromagnetic and Radiometric Datasets, *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 2019, vol. 7, pp. 203-225. doi: 10.4236/gep.2019.76016
- Bukharin A.K., Maslennikova I.A., Pyatkov A.K., *Domezozoiskie strukturno-formatsionnye zony Zapadnogo Tyan'-Shanya: Stratigrafiya* (Pre-Mesozoic structural-formational zones of the Western Tien Shan: Stratigraphy), Tashkent, Fan, 1985, 152 p. [In Russian].
- Bukharin A.K., Structural and formational zoning of the Tien Shan, *Geologiya i mineral'nye resursy* (Geology and Mineral Resources), 1999, no. 2, pp. 3-10. [In Russian].
- Burtman V.S., Porshnyakov G.S., Tectonics of the variscide Tien Shan and Kyzylkum, in *Tektonika Uralo-Mongol'skogo skladchatogo poyasa* (Tectonics of the Ural-Mongolian folded belt), Moscow, Nauka, 1974, pp. 92-106. [In Russian].
- Dalimov T.N., Ganiev I.N., Troitsky V.V., Within-plate magmatism of the Western Tien Shan, *Geologiya i mineral'nye resursy* (Geology and Mineral Resources), 2005, no. 2, pp. 6-15. [In Russian].
- El-Raouf A.A., Doğru F., Abdelrahman K., Fnais M.S., El Manharawy A., Amer O., Using Airborne Geophysical and Geochemical Methods to Map Structures and Their Related Gold Mineralization, *Minerals*, 2023, vol. 13, 23 p. <https://doi.org/10.3390/min13020237>
- Garkovets V.G., Lithological and geological-structural conditions for the placement of gold mineralization of the Kyzylkum type, *Doklady Akademii nauk SSSR* (Reports of the USSR Academy of Sciences), 1975, vol. 222, no. 1, pp. 193-196. [In Russian].
- Goipov A.B., Akhmadov Sh.I., Yusupov V.R., Characteristics of geophysical fields and geophysical signs of mineralization in the Bukantau Mountains in the Southern Tien-Shan, *ANAS Transactions, Earth Sciences*, 2024, no. 2, pp. 77-91. DOI: 10.33677/ggias20240200128
- Golovanov I.M., *Rudnye mestorozhdeniya Uzbekistana* (Ore deposits of Uzbekistan), Tashkent, GIDROINGEO, 2001, 687 p. [In Russian].
- Konopelko D.L., *Paleozoiskii granitoidnyi magmatizm Zapadnogo Tyan'-Shanya* (Paleozoic granitoid magmatism of the Western Tien Shan), St. Petersburg, St. Petersburg State University, 2020, 196 p. [In Russian].
- Kharin V.G., Keshubaev Zh.D., *Skhematicheskaya geologicheskaya karta gor Bukantau. Masshtab 1:100 000* (Schematic geological map of the Bukantau Mountains. Scale 1:100 000), Tashkent, State enterprise CGGE, 2007. [In Russian].
- Khon M.T., Voronkov A.K., Khiznichenko I.V., *Vyyavlenie potentsial'noi zolotonosnosti zakrytykh territorii severnoi chasti Tsentral'nykh Kyzylkumov na osnove izucheniya materialov po ranee proburennym skvazhinam za 1986-89 gg. Otchet OME SAIGIMS* (Identification of potential gold content in closed territories of the northern part of the Central Kyzylkum based on the study of materials from previously drilled wells for 1986-89. Report of the OME SAIGIMS), Tashkent, SAIGIMS, 1989, 160 p. [In Russian].
- Matveyev Yu.N., Simonchik K.K., Tropchenko A.Yu., Xitrov M.V., *Tsifrovaya obrabotka signalov. Uchebnoe posobie* (Digital Signal Processing. Tutorial), St. Petersburg, SPbNIU ITMO, 2013, 166 p. [In Russian].
- Mirkamalov R.Kh., Golovanov I.M., Chirikin V.V., Fadeicheva L.P., Mirkamalova G.Kh., *Atlas modelei rudnykh mestorozhdenii Uzbekistana* (Atlas of models of ore deposits in Uzbekistan), Tashkent, State Enterprise "NIIMR", 2010, 100 p. [In Russian].
- Mirkamalov R.Kh., Divaev F.K., Seltmann R., Konopelko D.L., Geodynamic evolution of magmatism and associated mineralization of the Western Tien Shan on the territory of Uzbekistan, *Geologiya i mineral'nye resursy* (Geology and Mineral Resources), 2018, no. 1, pp. 3-15. [In Russian].
- Morgan L.A., Geophysical Characteristics of Volcanogenic Massive Sulphide Deposits, in *Volcanogenic Massive Sulphide Occurrence Model, U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report*, Reston, Virginia, U.S. Geological Survey, 2012, 16 p.

- Mukhin P.A., Karimov Kh.K., Savchuk Yu.S., *Paleozoiskaya geodinamika Kyzylkumov* (Paleozoic geodynamics of the Kyzylkum), Tashkent, Fan, 1991, 147 p. [In Russian].
- Okeyode I.C., Olurin O.T., Ganiyu S.A., Olowofela J.A., High Resolution Airborne Radiometric and Magnetic Studies of Ilesha and its Environs, Southwestern Nigeria, *Materials and Geoenvironment*, 2019, vol. 66, no. 1, pp. 51-73. <https://doi.org/10.2478/rmzmag-2018-0020>.
- Rakhmatullaev H.R., On the Caledonian and Hercynian eras of gold mineralization in Western Uzbekistan (using the example of the Kokpatas ore field), in *Itogi petrometallogenicheskikh issledovaniy* (Results of petrometallogenic research), Tashkent, Fan, 1972, pp. 154-170. [In Russian].
- Savchuk Yu.S., Fold-cover structure of the pre-Mesozoic basement and metallogeny of the Kyzylkum, *Extended Abstract of Doctoral Sci. (Geol.-Mineral.) Dissertation*, Tashkent, Scientific Research Institute of Mineral Resources, 1998, 37 p. [In Russian].
- Takyi-Kyeremeh K., Wemegah D.D., Preko K., Menyeh A., Integrated Geophysical Study of the Subika Gold Deposit in the Sefwi Belt, Ghana, *Cogent Geoscience*, 2019, vol. 5, pp. 1-16. <https://doi.org/10.1080/23312041.2019.1585406>
- Wemegah D.D., Preko K., Noye R.M., Boadi B., Menyeh A., Danuor S.K., Amenyoh T., Geophysical Interpretation of Possible Gold Mineralization Zones in Kyerano, South-Western Ghana Using Aeromagnetic and Radiometric Datasets, *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 2015, vol. 3, pp. 67-82. <https://doi.org/10.4236/gep.2015.34008>
- Zhang G., Lü Q.T., Zhang G.B., Lin P.R., Jia Z.Y., Suo K., Joint Interpretation of Geological, Magnetic, AMT, and ERT Data for Mineral Exploration in the Northeast of Inner Mongolia, China, *Pure and Applied Geophysics*, 2018, vol. 175, pp. 989-1002. <https://doi.org/10.1007/s00024-017-1733-5>

About the authors

GOIPOV Akram Bayramovich – Dr. Sci. (Geol.-Mineral.), Associate Professor, Head of the Digital Mapping Department, Institute of Mineral Resources of the University of Geological Sciences of the Ministry of Mining and Geology of the Republic of Uzbekistan. Olimlar st., 64, Tashkent, 100041, Uzbekistan. Ph.: +99(894) 688-97-00. E-mail: goipov9700@mail.ru

ASHUROV Abror Uchkunovich – Chief Geophysicist, Central Geological and Geophysical Expedition of JSC Uzbekgeologorazvedka of the Ministry of Mining and Geology of the Republic of Uzbekistan. Mustakillik st., 21, Eshonguzar village, Zangiata district, Tashkent region, 111800, Uzbekistan. Ph.: +99(897) 918-34-55. E-mail: abrorashurov1986@gmail.com

ATABAEV Dilshot Khusainbaevich – Dr. Sci. (Geol.-Mineral.), Professor, National University of Uzbekistan named after Mirzo Ulugbek. University st., 4, Tashkent, Alzamar region, 100174, Uzbekistan. Ph.: + 99(890) 188-40-62. E-mail: atabaev_d@mail.ru