

УДК 550.83

DOI: 10.18799/24131830/2024/12/4577

Шифр специальности ВАК: 1.6.9, 1.6.10

Технология геоструктурного прогноза золоторудных проявлений на примере участка Верхояно-Колымской складчатой системы (Баягское рудное поле, Якутия)

И.Б. Мовчан¹, А.А. Яковлева¹, З.И. Садыкова²✉, Д.К. Мединская¹, Д.А. Гоглев²

¹ Санкт-Петербургский горный университет, Россия, г. Санкт-Петербург

² ГК «Геоскан», Россия, г. Санкт-Петербург

✉ z.sadykova@geoscan.ru

Аннотация. *Актуальность* работы определяется доразведкой Баягского золоторудного поля (Республика Саха, Якутия), требующей локализации контуров, прогнозных на золотосульфидные рудопоявления эндогенного (гидротермального) характера. *Целью* связанных с указанной доразведкой исследований выступает дальнейшая апробация и окончательное формирование технологии представительного истолкования результатов измерений аэромагниторазведки, реализуемой по отечественной беспилотной технологии. В рамках отмеченных геологического объекта и цели работ методы исследования включают комплексный анализ дистанционных, геоморфологических и аэромагнитных данных, опирающийся на инвариантные относительно типа первичного сигнала приёмы качественной и количественной интерпретации, а также прямые и косвенные критерии прогнозирования. Под приёмами интерпретации, не зависящими от природы первичного скалярного поля, измеренного инструментально, понимаем в разной степени автоматизированные подходы к дешифрированию морфоструктуры этого поля, его фильтрации и учёта взаимосвязи нескольких таких полей различного генезиса. Прямые критерии прогнозирования подразумевают в нашем подходе экстраполяцию эталонной выборки в границы опытного полигона при последующем распознавании образов с обучением. Косвенные критерии прогнозирования относятся нами к распознаванию образов без обучения и, помимо общеизвестных классификаций, включают пересчёты в квазиупругие показатели толщи – параметр раздробленности и параметр позиции концентратора напряжений. *Результаты* работ сводятся к обоснованию применимости апробируемого авторами настоящей статьи метода экстраполяции квазипериодической эталонной выборки в пределы опытного полигона на основе распознавания с обучением и последующей верификацией посредством геохимической оценки. Содержание выводов составляет: 1. оптимизация картируемых прогнозных контуров, локализуемых в пределах рудоконтролирующих тектонических зон; 2. возможность применения при прогнозе свойства квазипериодического проявления структурно-вещественных аномалий как частного случая волнового структурирования горного массива.

Ключевые слова: золотосульфидный, прогноз, распознавание, квазипериодический, длина волны, дистанционная основа, аномальное магнитное поле, интерпретация, аналитическое продолжение

Для цитирования: Технология геоструктурного прогноза золоторудных проявлений на примере участка Верхояно-Колымской складчатой системы (Баягское рудное поле, Якутия) / И.Б. Мовчан, А.А. Яковлева, З.И. Садыкова, Д.К. Мединская, Д.А. Гоглев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 12. – С. 81–98. DOI: 10.18799/24131830/2024/12/4577

UDC 550.83

DOI: 10.18799/24131830/2024/12/4577

Technology for geostructural forecasting of gold ore occurrences using the example of a section of the Verkhoyansk-Kolyma fold system (Bayag ore field, Yakutia)

I.B. Movchan¹, A.A. Yakovleva¹, Z.I. Sadykova²✉, D.K. Medinskaia¹, D.A. Goglev²

¹ Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russian Federation

² Geoscan Group of Companies, St. Petersburg, Russian Federation

✉ z.sadykova@geoscan.ru

Abstract. Relevance. Additional exploration of Bayag gold-ore deposit (Republic of Sakha, Yakutia), requiring the localization of targets predicted for gold-sulphide occurrences of endogenous (hydrothermal) nature. **Aim.** Further approbation and finalizing of representative technology for interpretation of aeromagnetic survey results, using domestic unmanned aerial vehicle technology. In the context of the mentioned geological object and research goals, the research methods include the combined analysis of remote-sensing, geomorphological and aeromagnetic data based on the methods of qualitative and quantitative interpretations, which are invariant with regard to the kind of initial signal, as well as it is based on the direct and indirect forecast parameters. Used in this research interpretation methods are not dependent on the nature of initial scalar field, being measured instrumentally, and include relatively automated approaches for decoding the morphostructure of this field, its filtration and consideration of the relationship in the set of such fields of different genesis. The direct forecast parameters are supposed to be the extrapolation of reference sample within the experimental area. Indirect forecast criteria are related to pattern recognition without training and, besides the well-known classifications, they include the recalculations into quasi-elastic indicators of mining block – fragmentation parameter and stress concentrator position parameter. **Results.** Reduced to justifying the applicability of the method, tested by the authors, for extrapolation of quasi-periodic reference sample within the experimental area, based on pattern recognition with training and subsequent verification by geochemical estimation. The content of the conclusions is: 1) optimization of mapped target contours localized within ore-controlling tectonic zones; 2) possibility of applying predictive use of the property of quasi-periodic manifestation of structural-substantial anomalies as special case of wave structuring of the mining massif.

Keywords: gold-sulfide, forecast, recognition, quasiperiodic, wavelength, distance basis, anomalous magnetic field, interpretation, analytical continuation

For citation: Movchan I.B., Yakovleva A.A., Sadykova Z.I., Medinskaia D.K., Goglev D.A. Technology for geostructural forecasting of gold ore occurrences using the example of a section of the Verkhoyansk-Kolyma fold system (Bayag ore field, Yakutia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 12, pp. 81–98. DOI: 10.18799/24131830/2024/12/4577

Введение

В последние четверть века повышенный интерес проявлен к беспилотным разновидностям аэрометодов [1], решавшим в том числе проблему устаревшей материально-технической базы, унаследованной отечественной геологоразведочной отраслью со времен советского периода. В течение отмеченного времени российскими производителями пройден трудный путь от изготовления кустарных образцов аэроносителей и их полезной нагрузки до создания полностью импортозамещенных технологий. Этим достигнута цель обеспечения постадийных и малоаварийных съемок на базе оригинальных измерительных комплексов. Поверхностный анализ рынка беспилотных аэроизмерений от аэрофотосъемки до специализированных геофизических исследований

выявляет до десятка обеспечивающих данные работы фирм только в Санкт-Петербурге. Среди них особое место занимает группа компаний (ГК) «Геоскан»: фирма не только организовала полный производственный цикл от сбора беспилотных измерительных комплексов до производства специализированных измерений [2–4], но и предоставляет студентам и аспирантам Санкт-Петербургского горного университета базу для стажировок и научных работ.

В перечне задач ГК «Геоскан»: обеспечение геолого-геофизических съемок локальных участков (масштаб 1:50000 и крупнее) детальными аэрогеофизическими измерениями, в число которых входит аэромагниторазведка. Измерения проводятся в два этапа, где на первом формируют пространственно привязанное распределение абсолютных

высот земной поверхности – цифровую модель рельефа (ЦМР). Данное распределение является собой результат прямых измерений относительных превышений земной поверхности с борта беспилотного устройства «летающее крыло» на основе лазерного зондирования, синхронизированного с ГЛОНАСС/GPS-привязкой. При пересчете в абсолютные высоты используем ближайший топогеодезический репер. Итоговая пространственная матрица ЦМР закладывается в память БПЛА мультироторного типа в обеспечение последующих безаварийных замеров с огибанием локальных форм рельефа [5–7]. В качестве специализированной полезной нагрузки мультироторный беспилотник оснащается квантовым магнитометром с рубидиевым сенсором, также синхронизированным со средствами географической привязки. Сенсор магнитометра помещают в гондолу, подвешиваемую на шнуре длиной 20 м к аэроносителю. Снятие отсчета и по лазерному радару, и по магнитометру имеет автоматический характер с временным интервалом 0,1 сек. Измерения магнитного поля с борта БПЛА реализуются одновременно с измерениями наземной магнитовариационной станции. Первичная обработка магнитометрических данных включает четыре операции: введение поправок за суточные вариации геомагнитного поля и за нормального магнитное поле Земли; взаимную увязку опорных и рядовых маршрутов; оценку среднеквадратической погрешности съёмки. Обработка второй стадии реализуется по отношению к полученным значениям аномального магнитного поля и, собственно, составляет суть интерпретационных построений, которые до недавнего времени носили обобщенный характер. Под «обобщенным характером интерпретации» понимаем применение ограниченного числа трансформант геофизических сигналов и визуального трассирования по ним геоструктурных особенностей со спорной рудоконтролирующей значимостью [8, 9]. На основании опыта работ поставлена производственная задача параметризации геоструктурных реконструкций при модификации интерпретационных построений. В частности, требовалось повысить представительность прогнозных выводов, перейдя от допущений в рамках так называемой «линеamentной» парадигмы предыдущих подходов [10] к физически обоснованным и количественно оцениваемым моделям. Под «линеamentной» парадигмой понимаем:

- применение подобия структурно-корреляционных схем, полученных визуальным прослеживанием осей синфазности в различных формах визуализации площадных (двумерных) данных;
- комбинацию линейных и дугообразных линеamentов с площадным районированием ландшафта при последующих их верификациях [11–13].

В качестве физически обоснованной модели мы рассматриваем квазипериодическое структурирование неравновесного горного массива. Оно подчиняется законам колебательной и волновой динамики, согласно парадигме О.В. Петрова о развитии пространственно регулярных диссипативных форм в объеме геологической среды [14, 15]. В рамках данной модели даже отмеченные линеamentные образы получают строгое представление, увязываемое не только с позицией рудных эталонов, но и с классическим пониманием ландшафта в терминах Н.А. Солнцева.

Первично в состав рудных эталонов включены как золотосульфидные рудопроявления, так и пункты шлихового опробования с аномально высоким содержанием золота. Строго говоря, рудопоявления и пункты шлихового опробования представляют собой принципиально разные объекты: аномальные по золоту шлиховые пробы, будучи прямым признаком эндогенного оруденения, могут быть отнесены на неопределенное расстояние от первичных эндогенных рудопоявлений. Включение ансамбля аномальных по золоту шлиховых проб в состав рудных эталонов частично оправдывается минимумом априорной геологической информации, необходимой для рудного прогноза. В связи с этим:

- во-первых, аномальные шлиховые пробы мы рассматриваем в составе общего рудного эталона лишь на стадии приблизительной реконструкции рудоконтролирующей структуры;
- во-вторых, на этапе верификации прогноза математическими методами эталонные выборки в окрестности рудопоявлений и в окрестности аномальных шлиховых проб нами разделяются на два независимых типа.

В рамках сформулированной задачи авторы предполагали предельно параметризовать прослеживание по геолого-геофизическим полям отмеченных осей синфазности и их привязку к рудным эталонам на основе критериев соосности и пространственной регулярности. Применение этих двух критериев для увязки ансамбля рудных эталонов с геоструктурным планом должно составить основу экстраполяционных локализаций прогнозных участков за пределами отмеченного ансамбля [16]. Подразумеваем здесь возможность прослеживания квазипериодической группы зон золоторудных проявлений вдоль детерминированной геодинамической зоны (ГДЗ). Она способна маркироваться полосой однонаправленных линеamentов с локализацией вдоль этой ГДЗ перспективных участков на расстоянии среднего пространственно-го периода от крайнего в отмеченной группе золоторудного объекта.

Неполное исключение визуального участия эксперта из интерпретационной процедуры наводит на мысль о верификации результата метода экстраполяции применением алгоритмов распознавания образов с обучением [17, 18]. На данный момент при решении естественнонаучных задач в части распознавания применяется широкий набор эффективных алгоритмов, включающих: различные классификации (методом К-средних, знаковой классификации, байесовской классификации, построением деревьев решений и проч.); метод дискриминантного анализа; нейросетевые алгоритмы; метод опорных векторов; генетические алгоритмы. В каждом из отмеченных подходов присутствует особенность. Например, в нейросетевых методах требуется задание четких границ эталонной выборки, а сама выборка должна быть нормирована; немаловажным оказывается аспект выбора типа нейросети. Другой пример касается метода безэталонной классификации К-средних: это метод безэталонного ранжирования многомерной выборки, ориентированный в геологии на задачу районирования, а не локализации прогнозных ореолов. Третий пример относится к дискриминантному анализу: метод предполагает построение линейной функции гиперплоскости, разделяющей эталонную и произвольную выборки. Обобщая, отметим, что в части алгоритмического распознавания образов есть свои проблемы, такие как:

- учет неоднородности эталонной выборки значений геолого-геофизических признаков;
- компенсация неидеального разделения в пределах эталонной выборки аномального и фонового откликов.

Здесь особо подчеркнем, что статья посвящена не распознаванию образов, как самоцели, а специфическому подходу к прогнозным построениям. В этом подходе предлагается комбинировать:

- геоструктурную реконструкцию геодинамических зон с квазипериодичным проявлением прогнозных участков, объединяющую обработку потенциальных геофизических полей и дистанционной основы;
- один из алгоритмов распознавания образов, неким образом оптимизированный, который реализует альтернативный способ комплексирования геополей;
- набор показательных безэталонных оценок, верифицирующий и распознавание, и геоструктурные построения.

Такая комбинация способна обеспечить работу с ненормированными выборками, а также пренебречь оценками в части однородности выборок. Кроме того, взаимная верификация разнородных прогнозных отображений выступает доказательством демонстрации представительности применя-

емой методики, что отвечает идее комплексирования в современной геофизике.

Решение сформулированной методической задачи в рамках данной статьи привязано к картированию контуров золотоперспективных ореолов в окрестности априори известных эндогенных рудных объектов Баягского рудного поля (восточный фланг Верхоянского хребта) [19]. Учитывая применение беспилотной аэромагниторазведки, утверждаем, что наиболее контрастными в части проявления в структуре внешнего магнитного поля выступают золото-сульфидные формации, которым свойственна ассоциация с ферромагнитной фракцией [20]. С учетом этого на изучаемой площади рассматриваем локальные рудопроявления, характеризующиеся ассоциацией золота с оловом, а также окрестности шлихового опробования с аномальным содержанием золота. В пояснительной записке к геологической карте Верхоянской серии масштаба 1:200000 [21] золотоносные объекты в качестве самостоятельного типа полезного ископаемого не обозначены. В отношении оловорудных образований отмечается:

- принадлежность золоторудных проявлений к касситерит-силикатно-сульфидной формации;
- приуроченность этих проявлений к ороговикованным алевролитам и песчаникам;
- размещение золотоносных объектов на экзоконтакте гранодиоритовых и диоритовых массивов.

На геологической основе в окрестности опытного полигона обозначены четыре олово-золотоносных коренных рудопроявления и восемь золотоносных шлиховых аномалий, рассматриваемых в качестве золоторудных эталонов. Лишь три таких эталона попадают непосредственно внутрь границ опытного полигона (рис. 1, *a*), и это накладывает дополнительные требования на наш проект:

- формирование взаимно увязанных цифровой модели рельефа и дистанционной основы за пределами границ опытного полигона во всей области задания золоторудных эталонов;
- реализация отмеченной выше прогнозной экстраполяции из области задания золоторудных эталонов внутрь означенных границ.

Территория опытного полигона размещена на западном фланге Верхояно-Колымской складчатой системы мезозойского возраста, в области сочленения Адычанского антиклинория и Сартангского синклинория. Эта область характеризуется развитием пликативных дислокаций, осложненных семейством разноранговых дизъюнктивов, в котором выделяют два ансамбля:

- разрывные нарушения со сдвиговой, взбросо-сдвиговой и взбросовой кинематикой, секущие складчатые структуры;
- взбросы и надвиги, простирающиеся вдоль осей складчатых структур.

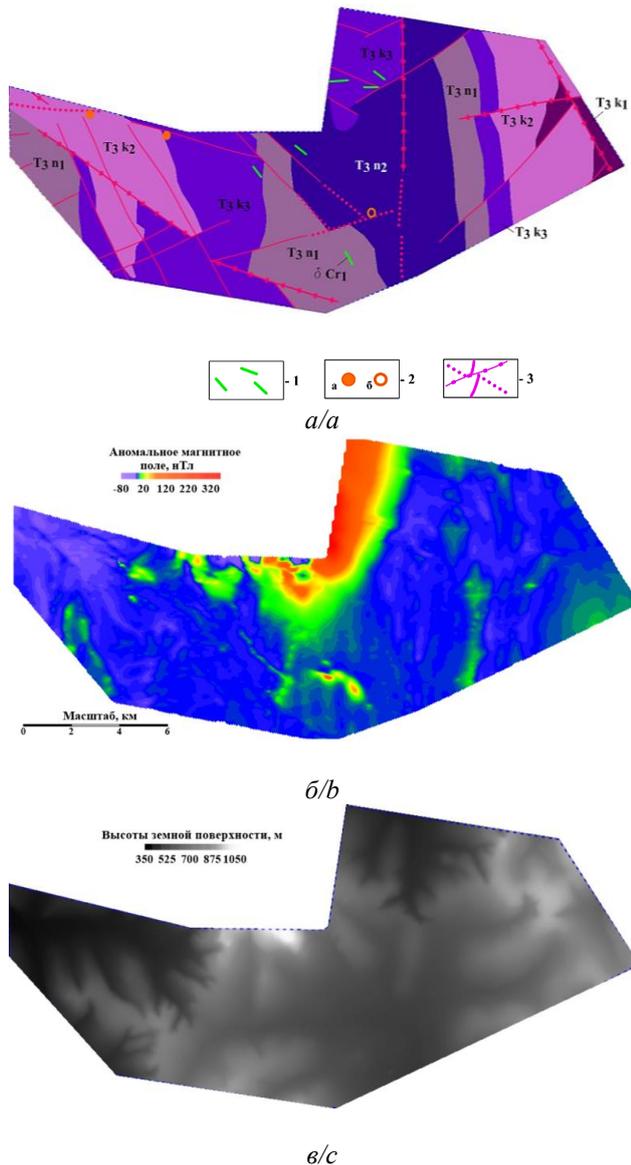


Рис. 1. а) геологическая схема опытного полигона и геополья по данным [21] и с авторской актуализацией; б) аномальное магнитное поле; в) ЦМР. Условные обозначения: 1 – дайки кварцевых диоритов (δCr_1) в поле развития гранитоидного интрузива, 2 – золоторудные эталоны («а» – эндогенные (гидротермальные) рудопроявления; «б» – пункт шлихового опробования с аномальным содержанием золота); 3 – разнопорядковые дизъюнктивы (пунктир – предположительные разрывные нарушения). Структурно-вещественные комплексы: T_{3n1} – верхний триас, норийский ярус, нижний подъярус (алевролиты с прослоями песчаников); T_{3n2} – верхний триас, норийский ярус, нижний подъярус (алевролиты темно-серые, плитчатые и массивные); T_{3k1-3} – верхний триас, карнийский ярус (песчаники и алевролиты в различных пропорциях, с прослоями, линзами и иными включениями)

Fig. 1. Geological diagram of the experimental site, made on the basis of geological maps at a scale of 1:200000 (according to [21] and with the authors' updating). The diagram highlights: 1 – dikes of quartz diorites (δCr_1), localized in the field of development of the granitoid intrusion, 2 – gold ore standards ("a" – local endogenous (hydrothermal) ore occurrences; "b" – spot sampling points with anomalous gold content); 3 – disjuncts of different orders (dotted line – supposed discontinuities). Structural-material complexes (SMC): T_{3n1} – Upper Triassic, Norian stage, lower substage (siltstones with sandstone interlayers); T_{3n2} – Upper Triassic, Norian stage, lower substage (siltstones are dark gray, platy and massive); T_{3k1-3} – Upper Triassic, Carnian stage (sandstones and siltstones in various proportions, with interlayers, lenses and other inclusions)

Иногда надвиги и взбросы прослеживаются диагонально по отношению к складкам. На пересечении региональных зон геологической трещиноватости северо-западного и северо-восточного простирания развиты в разной степени вскрытые комплексы гранитоидов. С ними связывают формирование оловянной и оловополиметаллической специализации региона, где золоторудное проявление выступает как сопутствующее [22]. Территория опытного полигона прилегает с юга к одному из таких гранитоидных внедрений, пронизывающему средне- и верхнетриасовые СВК, образованные переслаиванием песчаников и алевролитов. На картографической плоскости стратиграфические контакты подчинены в своем простирании элементам разрывной тектоники. Эти элементы формируют в плане пространственно нестационарную и квазипериодическую сеть геологической трещиноватости (рис. 1, а). В структуре отмеченной сети наиболь-

шей пространственной корреляцией с золоторудными эталонами обладают дизъюнктивы северо-западного простирания. Данный факт подтверждает правомочность определенных ранее прогнозных экстраполяций. Размещенная на севере, в области U-образного изгиба границ опытного полигона, область внедрения гранодиоритового интрузива определяет как геометрию сопряженного с ней ансамбля дизъюнктивов, так и области разгрузки рудного материала. С областью интрузивного внедрения связываем характер магнитного поля ΔT_a в пределах всей изучаемой площади (рис. 1, б) благодаря ферромагнитной фракции, распределенной по локальным областям растяжения в системе трещин, оперяющих интрузив. Разветвленная система геологической трещиноватости, оперяющей интрузив и отчасти испытавшая новейшую активизацию, также порождает дифференцированный образ составляющих дистанционной основы (ДО).

В совокупности можно говорить о правомочности и геологической содержательности совместной интерпретации магнитного поля ΔT_a , дистанционной основы и функционально связанной с ними ЦМР (рис. 1, в). Как можно видеть из рис. 1, рудные эталоны отчетливо ни в структуре аномального магнитного поля, ни в структуре геоморфологических аномалий не проявлены, что дополнительно определяет актуальность интерпретационных пересчетов этих геополей.

Обобщая доминирующую методическую и геолого-поисковую составляющие задачи, сформулируем ключевые элементы анализа полевых материалов:

1. Пространственное удаление известных золоторудных эталонов от области интрузивного внедрения и формирование закономерного шлейфа в окрестности этого интрузива удовлетворяют классической модели развития эпitherмальных золоторудных месторождений [23].
2. Ассоциация олово-золоторудных проявлений с сульфидами потенциально означает маркирование рудных эталонов ферромагнитной фракцией и, как следствие, решение задачи поиска рудоопределяющих маркеров в структуре магнитного поля ΔT_a и его трансформант.
3. Квазипериодический характер элементов разрывной тектоники пространственно коррелирует с позицией золоторудных эталонов и, возможно, генетически определяет разгрузку золотоносного субстрата. Это позволяет предполагать наличие непосредственно в семействе рудных эталонов закономерного пространственного шага. Данный пространственный шаг теоретически допускает в условиях единой зоны разгрузки рудного вещества экстраполяционные продолжения прогнозных на золото контуров в пределы границ опытного полигона.
4. В отсутствие строгого задания контуров золоторудных эталонов невозможно сформировать эталонную выборку, содержащую отклики в геопольях лишь от искомым объектов. Данный факт, определяющий неопределимые погрешности распознавания, предполагает комплексирование нескольких прогностических маркеров.

Под неоднократно отмечавшимся понятием «прогнозный контур» понимается замкнутое на картографической плоскости геометрическое множество точек, ограничивающее площадь, много меньшую площади опытного полигона. Это геометрическое множество точек должно содержать прогнозную оценку искомого рудного объекта, полученную на основе распознавания образов, в частности, в форме структурных рудоконтролирующих факторов. Соответственно, понятия «прогнозная область», «прогнозный ореол» и подобные им обозначают площадь внутри прогнозного контура.

Методология прогнозных построений

Согласно постановке задач, требуется реализовать картирование ореолов, перспективных на обнаружение эндогенного (гидротермального) золотосульфидного оруденения в условиях минимума априорной информации [24, 25]. Этот «минимум» означает:

А. ограниченный объем априорных геолого-геофизических признаков (компенсируется набором трансформант, рассмотренных ниже);

Б. малое количество золоторудных эталонов (представлены небольшими рудопроявлениями и данными шлихового опробования, распределенными большей частью на периферии или за пределами площади опытного полигона).

Повторимся: особенность «Б» вынуждает использовать в проекте цифровую ЦМР в комплексе с ДО, определённые за пределами границ опытного полигона, для означенной во введении экстраполяции рудоконтролирующей структуры в пределы этих границ.

Первым элементом методики выступает визуальная экспертиза фактических данных, образованных комплексом ДО+ЦМР+ T_a при системном обобщении однонаправленных градиентных зон, локальных протяженных аномалий, цепочек изометричных аномалий, области резкой смены морфологии и амплитудно-частотного состава и увязкой их с рудными эталонами.

Дистанционная основа представлена полутонным инфракрасным (ИК) каналом с аддитивно наложенным на неё полупрозрачным слоем полутонного образа цифровой модели рельефа. Её первичная обработка включает:

- а. повышение общей контрастности за счет нормирования (выравнивания мод) гистограммы распределения яркости [26];
- б. поиск краёв протяженных элементов (линеаментов) на основании оператора Собела [27];
- в. контрастирование линеаризованных структур на основе трассирования изолиниями выявленных линейных контуров;
- г. экспертную генерализацию схем, полученных на шагах «а»–«в», с локализацией линеаментных структур, привязанных к априори заданным рудным эталонам [28].

Переходя к обработке магнитного поля ΔT_a и его трансформант, применяем технологию качественной и количественной интерпретации потенциального сигнала, призванной верифицировать итог морфоструктурного прогноза по ДО:

- верификации и разбраковки результатов дешифрирования дистанционной основы с применением параметрического подхода [15];
- минимизации функциональной связи магнитного поля ΔT_a и локальных форм земного рельефа [29];

- реконструкции образа геоблокового дробления исследуемой площади на основе оценки стационарности магнитного поля ΔT_a [30];
- распознавание образов с обучением на основе формирования эталонной выборки значений геополей с применением модифицированного дискриминантного анализа [31];
- аналитическое продолжение остаточной (после учета рельефа) составляющей T_a с условной плоской поверхности наблюдений в объем горного массива.

В части параметрического дешифрирования геополей воспринимаемое в геологической отрасли как «стандартное» программное обеспечение включает:

- программный комплекс PCI GeoMatica (для прослеживания наиболее контрастных линейризованных форм в морфоструктуре двумерного геополя);
- программу WinLessa (ориентирована на генерализованные отображения в форме роз-диаграмм, региональных осей синфазности, плотности линеаментов и их локальных нелинейных образцов);
- отдельные и в разной степени эффективные подпрограммы к Geosoft Oasis, ENVI и ER Mapper;
- в разной степени эффективные оптические фильтры в программах, подобных CorelDraw под Windows, PhotoArtista-Oil и Paper-Artist под Android.

На фоне указанного математического обеспечения мы обнаружили потребность в применении собственного продукта [14, 30], работающего по понятной нам вычислительной схеме и в условиях выраженной пространственной дискретизации T_a . Немаловажным оказалось картирование посредством собственных программ в разной степени генерализованного геоструктурного образа, содержащего:

- итог трассирования отдельных протяженных геоструктурных осей (в дальнейшем – просто линеаментов без отделения линеаментов, картируемых по геофизическим признакам, от линеаментов, прослеживаемых по геоморфологическим признакам) или семейства концентрических дуговых геоструктурных осей;
- фиксацию обрыва или сдвига в области взаимного пересечения этих осей;
- ранжирование в ансамбле линеаментов по степени контрастности или степени раздробленности (пространственной разнесённости отдельных сонаправленных кластеров).

Алгоритм инициируется прослеживанием в структуре геофизического поля интенсивностью $I(x,y)$ точек экстремума и точек перегиба, после

чего вычисляем средний радиус автокорреляции по формуле В.Н. Страхова [14]:

$$\bar{r}_{acf} \approx \sqrt{(r_{acf})_x (r_{acf})_y} = 0,5 \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} I(x,y) dx dy}{\sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} [I(x,y)]^2 dx dy}},$$

где $(r_{acf})_x$ и $(r_{acf})_y$ – радиусы автокорреляции функции $I(x,y)$ вдоль осей $0x$ и $0y$, соответственно. Величина $r_{acf}/2$ определяет длину отрезка, середина которого совмещается последовательно с каждой точкой экстремума и каждой точкой перегиба геополя, а сами отрезки исходно ориентированы вдоль оси $0y$ (направлением на условный север) дискретной двумерной матрицы $I(x,y)$. Относительно каждой из указанных точек отрезок длиной $L=r_{acf}/2$ вращается с угловым шагом порядка 10° , при этом каждая точка отрезка (x_i, y_i) приобретает при таком повороте новые координаты (x'_i, y'_i) вида

$$\begin{aligned} x'_i &= (x_i \pm x_0) \cos \varphi + (y_i \pm y_0) \sin \varphi, \\ y'_i &= (y_i \pm y_0) \cos \varphi - (x_i \pm x_0) \sin \varphi, \end{aligned}$$

где φ – угол поворота от 0 до 180 градусов; (x_0, y_0) – координаты середины элементарного отрезка. Если полученные координаты (x'_i, y'_i) не совпадают с координатами (x_i, y_i) узлов первичной цифровой модели геополя $I(x,y)$, для новых координат интенсивность геополя определяем на основе сплайн-интерполяции:

$$\begin{aligned} I_i(x') &= a_i + b_i(x' - x_{i-1}) + c_i(x' - x_{i-1})^2 + d_i(x' - x_{i-1})^3, \\ I_i(y') &= \tilde{a}_i + \tilde{b}_i(y' - y_{i-1}) + \tilde{c}_i(y' - y_{i-1})^2 + \tilde{d}_i(y' - y_{i-1})^3 \end{aligned}$$

с последующим усреднением двух значений интенсивности, где $x' \in [x_{i-1}, x_i]$ и $y' \in [y_{i-1}, y_i]$; a_i, b_i, c_i, d_i , а также $\tilde{a}_i, \tilde{b}_i, \tilde{c}_i, \tilde{d}_i$ – коэффициенты кубических сплайнов, определяемые из дополнительных условий. Для каждого угла φ поворота вычисляем среднеквадратическое отклонение:

$$\sigma(\varphi) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I(x'_i, y'_i) - \bar{I})^2}{n-1}},$$

где n – общее количество точек, умещающееся вдоль любого элементарного отрезка, вращающегося относительно точек экстремума I_{extr} скалярного поля $I(x,y)$; \bar{I} – среднее значение поля $I(x', y')$, вычисляемое вдоль всей длины элементарного отрезка при данном угле φ его поворота. Итогом алгоритма выступает расчет для каждой точки экстремума и точки перегиба двумерной матрицы геофизического сигнала $I(x,y)$ дисперсионного функционала $\sigma(\varphi)$, глобальный минимум которого отвечает оптимальному азимуту φ простираения элементар-

ного отрезка вдоль оси простирания аномалии геополя либо вдоль оси простирания зоны градиентного перепада его значений. Этот же дисперсионный функционал применяется при дальнейшей генерализации [30]. Для подтверждения трассируемых геоструктурных элементов по значимо дискретизированному геофизическому полю применяем пересчет данного поля в параметр кривизны виртуальной поверхности (здесь – T_a). Отрицательная кривизна, отражаемая в итоговых схемах чёрно-серым тоном, указывает на антиформу в структуре отмеченной виртуальной поверхности поля. Параметр кривизны представлен следующим соотношением [32]:

$$K = \frac{\left[\left(\frac{\partial^2 T_a}{\partial x^2} \right) \left(\frac{\partial T_a}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial^2 T_a}{\partial x \partial y} \right) \left(\frac{\partial T_a}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial T_a}{\partial y} \right) + \left(\frac{\partial^2 T_a}{\partial y^2} \right) \left(\frac{\partial T_a}{\partial y} \right)^2 \right]}{\alpha \beta^{3/2}},$$

$$\alpha = \left(\frac{\partial T_a}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T_a}{\partial y} \right)^2, \quad \beta = 1 + \alpha.$$

Бинаризация итоговой схемы изолиний параметра K при исключении из этой схемы образа самих изолиний даёт квазинепрерывный образ геоструктурных осей и сдвиговую кинематику по их плоскостям. Очевидно, помимо взаимной верификации результатов параметрического дешифрирования, полученных перечисленными подходами, конечный геоструктурный образ должен корреспондироваться с априорной геологической основой на рис. 1, а.

Дальнейшие трансформации магнитного поля ΔT_a имеют смысл при минимизации парной корреляции T_a и ЦМР для редукции воздействия на структуру поля ΔT_a локальных и, возможно, экзогенных форм земного рельефа R . Здесь вычисляем коэффициент парной корреляции между аномальным магнитным полем и полем абсолютных высот рельефа земной поверхности. Редуцирование функциональной зависимости между T_a и локальными формами земного рельефа R опирается на линейную аппроксимацию $T_a = a_1 R + a_2$, согласно которой для любого значения R вычисляем составляющую магнитного поля δT_a , обусловленную локальными формами рельефа R . Вычитание δT_a из фактических данных поля ΔT_a определяет нулевой коэффициент парной корреляции между остаточным магнитным полем $(T_a)_{ост}$ и R , а также поворот линейной зависимости $T_a = f(R)$ такой, что её график оказывается параллельным оси абсцисс R , то есть имеем $\delta T_a = \text{const}$. На основе $(T_a)_{ост}$ выполняем расчет геоблоковой структуры полигона в параметр пространственной стационарности при численной

реализации свертки в круговом окне, радиус которого равен среднему радиусу автокорреляции [14]:

$$r_{acf}(x_j, y_k) = \frac{\left(0.5 \sum_{i=j-\bar{r}_{acf}}^{j+\bar{r}_{acf}} \sum_{m=k-\bar{r}_{acf}}^{k+\bar{r}_{acf}} ((T_a)_{ост}(x_i, y_m)) \cdot \Delta x \cdot \Delta y \right)}{\sqrt{\sum_{i=j-\bar{r}_{acf}}^{j+\bar{r}_{acf}} \sum_{m=k-\bar{r}_{acf}}^{k+\bar{r}_{acf}} ((T_a)_{ост}(x_i, y_m))^2 \cdot \Delta x \cdot \Delta y}}$$

где j и k – номер столбца и строки двумерной матрицы цифровой модели магнитного поля ΔT_a . Под стационарностью сигнала понимаем неизменность его амплитудно-частотного состава, что, собственно, и отражает параметр r_{acf} . Он вычисляется по амплитудным показателям сигнала и имеет геометрический смысл пространственной протяженности его аномалий. Области малой изменчивости параметра r_{acf} , вычисленного на основе локальной выборки $(T_a)_{ост}$ в скользящем окне радиуса \bar{r}_{acf} маркируют позицию отдельного геоблока. Градиентные зоны в схеме изолиний параметра радиуса автокорреляции определяем как границы геоблоковых структур. Они способны верифицировать геоструктурные элементы, трассированные на стадиях дешифрирования ДО и T_a . Эти градиентные зоны истолковываем как элементы глубинной разрывной тектоники (составляющие ГДЗ).

Связь прогнозной составляющей проекта с параметрическим распознаванием образов предполагает учет специфических условий: дефицита эталонных объектов (малое их число и малодостоверные их контуры) и незначительное количество первичных признаков (ЦМР и $(T_a)_{ост}$). Малое число первичных признаков компенсируется получением по рельефу и остаточной составляющей поля ΔT_a трансформант, обеспечивающих представительное описание морфологии ЦМР и $(T_a)_{ост}$: модуля вектора горизонтального градиента, вертикальной производной, азимута простирания изолиний, плотности линеаментов, плотности центров концентрации напряжений. Если модуль вектора горизонтального градиента элементарно считается на основе приращения конечных разностей в картографической плоскости, то для вычисления вертикальной производной прибегаем к алгоритмизации формулы А.А. Логачёва:

$$\partial f / \partial z = \int_0^{\infty} [f(0,0) - \bar{f}(\rho,0)] \rho^{-2} d\rho.$$

Здесь интегрирование реализуется в пределах кольцевой палетки радиуса ρ , скользящей по картографической плоскости, с оценкой средней величины геофизического сигнала \bar{f} в различных кольцевых секторах этой палетки. Азимут простирания изолиний вычисляется по тому же алгоритму, что и

азимут простирания элементарного линеамента, с той лишь разницей, что в случае определения азимута изолиний этот алгоритм применим к каждой точке двумерной матрицы ЦМР и $(T_a)_{\text{ост}}$. Поле плотности линеаментов истолковывается как маркер степени раздробленности (проницаемости) горного массива [33] и опирается на соотношение вида:

$$\Gamma_{\Sigma} = \frac{\sum_{i=j-R/2}^{j+R/2-1} \Gamma_i}{R}$$

при $\Gamma_i = \begin{cases} 1, & \text{в случае вершины линеамента} \\ & \text{в } i\text{-м узле матрицы;} \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases}$

где Γ_i – число вершин элементарных линеаментов, попадающих в пределы скользящего окна радиуса R , выбираемого из критерия $R \approx \bar{r}_{\text{acf}}$. Наконец, концентраторы напряжений являют собой маркер дискордантных структур, играющих рудоконтролирующую роль, и оценивают локальные участки резкой смены простирания изолиний геофизического сигнала. Расчет позиции концентратора выполняется в скользящем крестообразном окне, для каждого положения которого подсчитываем число изолиний μ и η , пересекающих наружный контур субмеридионального и субширотного прямоугольника окна, соответственно. Логарифмы данных чисел определяют количество информации о наличии аномалии скалярного геополя соответствующего простирания [13]:

$$J_{\text{inf}} = (\ln(\mu) + \ln(\eta))(\ln(\eta) / \ln(\mu)),$$

величина которой присваивается центру крестообразной палетки. Оценке подлежат максимумы параметра J_{inf} , определяющие позицию центра дискордантной структуры. Указанный набор признаков применяется далее в дискриминантном анализе:

- по каждому признаку реализуется стандартизация (нормирование при вычитании из каждого значения признака его среднего значения с последующим делением на среднеквадратическое отклонение);
- в малой окрестности эталонов отбираются значения геолого-геофизических признаков, формирующих первое облако рассеивания эталонных измерений в многомерном пространстве признаков (группу А);
- организуется скользящее окно, размером порядка среднего размера эталонной области, для каждой позиции которого формируем второе облако рассеивания текущих измерений в многомерном пространстве признаков (группа В);

- для групп А и В вычисляются: вектор среднего группы, вектор разностей средних (между группами А и В), исправленная матрица сумм квадратов (по каждой группе), ковариационная матрица объединенной выборки (по группам А и В), обращение ковариационной матрицы объединенной выборки;
- на основе перечисленных матриц выводим дискриминантную линейную функцию (гиперплоскость в многомерном признаковом пространстве, разделяющую группы А и В);
- на основе критерия Фишера (сопоставления его вычисленного и табличного значений при заданном числе степеней свободы) для полученной дискриминантной функции принимается решение о подобии групп А и В либо об их различии. В первом случае координаты центра скользящего окна записываются в отчетный файл, а во втором случае игнорируются.

Основной проблемой классического дискриминантного анализа « α »–« ζ » выступает допущение об однородности эталонной и произвольной рабочей выборок, что в общем случае несправедливо. Поэтому в нашем проекте подход модифицирован [33]: эталонная выборка группы А разделяется на несколько подвыборок традиционным методом К-средних [34]. После этого алгоритм дискриминантного анализа применяется к сравнению произвольной рабочей выборки группы В, отбираемой в скользящем окне, и каждой из подвыборок эталонной группы А.

Переходя к количественной интерпретации магнитного поля ΔT_a , подчеркнем вовлечение в неё исключительно его остаточной составляющей:

- пересчет вниз в трехмерном случае корректно осуществлять с условной плоской поверхности наблюдений, поскольку итог пересчета ориентирован на отнесение отфильтрованной составляющей потенциального поля к горизонтальному срезу горного массива при детерминированной глубинности среза;
- доминирующий максимум в структуре ΔT_a , нивелирующий прочие его особенности и связанный с влиянием гранодиоритового интрузива, исключался нами из рассмотрения на основании отбраковки по стандартному критерию 3σ .

Собственно пересчет вниз опирается на последовательность операций (по мере роста глубины пересчета) [14, 29, 30]:

- Пересчет ΔT_a в спектр Фурье S : $S(\omega, H_1) = \mathfrak{F}(\Delta T_a(x, H_1))$ при глубине наблюдений $H_1=0$. Здесь ω – пространственная частота, x – пространственная координата; \mathfrak{F} – прямое преобразование Фурье.
- Контрастирование спектральных гармоник, относящихся к глубине аналитического продолжения H_2 магнитного поля:

$$S(\omega, H_2) = S(\omega, H_1=0) \exp(i\omega H_2);$$

III. Пересчет преобразованного спектра Фурье в предметную плоскость с получением образа магнитного поля ΔT_a для фиксированной глубины пересчета H_2 :

$$\Delta T_a(x, H_2) = \mathfrak{F}^{-1}(S(\omega, H_2)),$$

где \mathfrak{F}^{-1} – обратное преобразование Фурье.

IV. Вычитание из исходного магнитного поля $\Delta T_a(x, H_1=0)$ образа поля $\Delta T_a(x, H_2)$:

$$\Delta T_a(x, H > H_2) = \Delta T_a(x, H_1=0) - \Delta T_a(x, H_2)$$

с переходом на втором цикле пересчета к п. I при замене $\Delta T_a(x, H_1=0)$ на $\Delta T_a(x, H_1 > H_2)$.

На третьем и последующих циклах пересчета выполняется та же операция возврата к п. I с заменой $\Delta T_a(x, H_j)$ на $\Delta T_a(x, H > H_{j+1})$ при $H_{j+1} > H_j$. В итоге пересчета на каждом из разноглубинных горизонтальных сечений трехмерной блок-диаграммы горного массива имеет место схема распределения значений узкополосной компоненты поля ΔT_a . В задачах рудного прогноза такой пересчет:

- реализует узкополосную фильтрацию сигнала;
- относит выделенную его компоненту к детерминированной глубине;
- потенциально способен локализовать узкий класс малококонтрастных аномалий магнитного поля, детектирующих проявление ферромагнитной фракции, ассоциируемой с искомым рудным объектом.

Окончательно прогнозные ореолы, отвечающие каждому из вычисленных маркеров, оцифрованы нами с учетом пространственной сетки, к которой привязаны все геолого-геофизические признаки. Узлу этой сетки, попадающему в границы детерминированного прогнозного ореола, присваивается единица, а прочим узлам сетки присваивается ноль. Так появляется возможность, избегая визуального сопоставления пространственных схем прогнозных маркеров, рассчитать вероятность проявления объектов, подобных эталонным. Вероятность определяется как частота попаданий конкретной точки исследуемой площади в пределы прогнозных ореолов, отнесенная к общему числу этих ореолов.

Результаты применения методики прогноза

При реализации пунктов «а»–«г» методики дешифрирования ДО в пределах границ опытного полигона некоторая хаотичность итогового геоструктурного образа связана с отмеченным выше малым числом золоторудных эталонов, вовлеченных в анализ (рис. 2, А).

Применение отмеченных выше трансформант дистанционной основы по увеличенной площади даёт более контрастный для линеаментного дешифрирования образ. Результат его экспертной

генерализации (рис. 2, Б) отражает квазипериодический характер границ геоблоковых зон. Существование вдоль геоблоковых границ (геоструктурных осей) детерминированного шага в локальной группе соосных золоторудных эталонов допускает прогноз позиции перспективных объектов на расстоянии одного пространственного шага от крайнего в группе эталона (экстраполяцию). Отмеченные «перспективные объекты» определяются зонами повышенной проницаемости горного массива, генетически связанными с пересечением (дискордантными областями) разновозрастных и разноориентированных ГДЗ. Геодинамические зоны маркируются линеаментными структурами, прослеживаемыми параметрическим и экспертным способами. Дискордантные области верифицируем максимумами параметра J_{inf} , а также максимумами поля плотности линеаментов. В соответствии с подходом Орлова–Милая, нашедшим свое подтверждение на десятках рудных объектов в платформенных и в складчатых обстановках, выделено пять дискордантных областей (рис. 2, В; № 4 в условных обозначениях), размещенных относительно эталонных (рудных) объектов на расстоянии одного шага вдоль фиксированной геоструктурной оси.

Переходя к обработке магнитного поля ΔT_a выполняем оценку коэффициента парной корреляции $r_{(\Delta T_a, \text{ЦМР})}$ между ΔT_a и ЦМР. В данном случае в пределах всей площади опытного полигона: $|r_{(\Delta T_a, \text{ЦМР})}| = 0,1 < 0,7$, что означает наличие слабовыраженной линейной связи между аномальным магнитным полем и локальными формами земного рельефа. В скользящем окне величина $|r_{(\Delta T_a, \text{ЦМР})}|$ варьировалась от 0,1 до 0,85. В обеспечение отсутствия означенной функциональной зависимости выводим линейную функцию связи магнитного поля и ЦМР для каждой позиции скользящего окна, внося поправку δT_a в значения магнитного поля, относящиеся к центру этого окна. Итоговую остаточную составляющую магнитного поля применяем для разбраковки линеаментного дешифрирования ДО. Здесь дискретное поле линеаментов, вычисленных по остаточной составляющей $(T_a)_{\text{ост}}$, накладывались на полутоновую схему параметра кривизны K (рис. 2, В), что позволило представительно закартировать рудоконтролирующую структуру (рис. 2, Г) в границах опытного полигона.

Концентрируясь на анализе тонкой структуры $(T_a)_{\text{ост}}$ и ЦМР, расширим набор первичных признаков за счет перечисленных выше трансформант, включая пересчеты в радиус автокорреляции, в вертикальную производную и в параметр кривизны K . В комплексе эти трансформанты позволяют локализовать контрастные аномальные зоны. Они оказываются пространственно коррелируемыми как с известными рудными эталонами, так и с ансамблем прогнозных областей, локализованных методом экстраполяции.

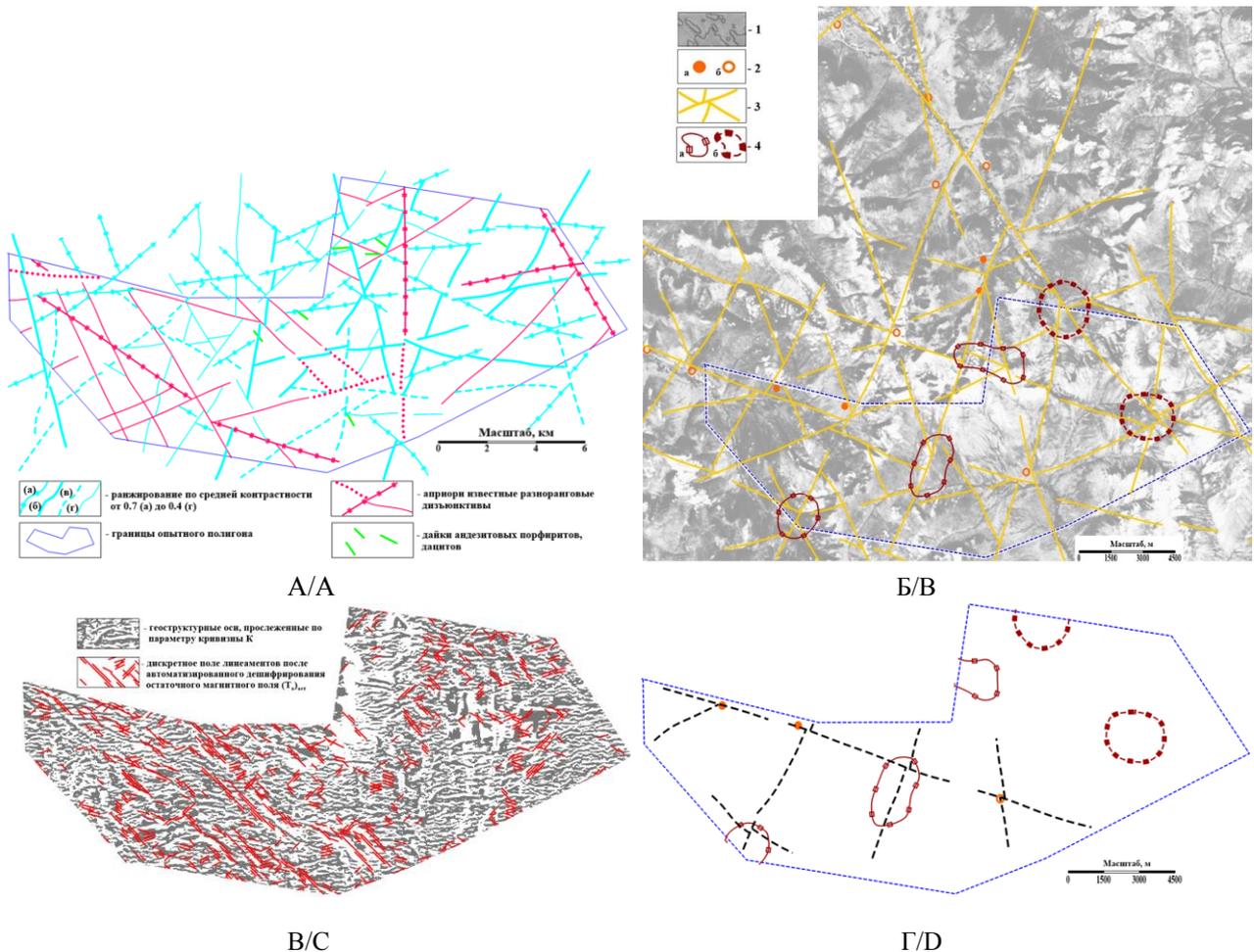


Рис. 2. Геоструктурная реконструкция по комплексу $T_a+DO+ЦМР$ с экстраполяцией рудных эталонов и трассированием рудоконтролирующей структуры в пределы опытного полигона: А) первичное дешифрирование ДО; Б) генерализованная рудоконтролирующая структура посредством комплексирования ДО и ЦМР за пределами опытного полигона (1 – дистанционная основа (ИК-канал); 2 – рудные эталоны (рис. 1); 3 – структура с рудоконтролирующими узлами (дискордантными областями); 4 – золотоперспективные контуры в окрестности этих узлов ((а) представительные; (б) неrepresentative)); В) автоматизированная реконструкция геоструктурных осей по $(T_a)_{ост}$; Г) итоговая рудоконтролирующая структура (черный пунктир) на фоне рудных эталонов и прогнозных контуров, полученных методом экстраполяции

Fig. 2. Geostructural reconstruction on the base of complex $T_a+DO+DEM$ with the extrapolation of reference ore occurrences (ROO) and tracing the ore-controlling structure within the experimental site: А) primary decoding of remote sensing data, RSD (IR-band); Б) generalized image of ore-controlling structure based on combination of RSD and DEM outside the boundaries of the experimental site (1 – IR band of RSD; 2 – ROO (Fig. 1); 3 – structure with ore-controlling nodes (discordant areas); 4 – gold-prospective contours in vicinity of these nodes (a – representative; b – unrepresentative)); С) automated reconstruction of geostructural axes on the base of $(T_a)_{res}$; D) final ore-controlling structure (black dotted line) according to positions of ROO and forecast contours derived by extrapolation

Аномальные зоны маркируются полосовыми образованиями, простирающимися от северо-западного до юго-восточного. Наблюдаем подчиненность «полосовых образований» рудоконтролирующей структуре, закартированной при дешифрировании ДО и верифицированной на стадии дешифрирования $(T_a)_{ост}$ (рис. 3, а).

Дополнительно имеем корреляцию золоторудных эталонов с периферией циркоидных образований, радиус которых варьирует от 1,5 до 2,0 км. Циркоидные структуры контрастно отображаются

по результатам подбора геоблокового образа исследуемой площади (рис. 3, б) на основе пересчета $(T_a)_{ост}$ в параметр r_{acf} . Данный факт говорит о специфической зональности в пространственном распределении намагниченных разностей, встречающейся при гидротермальных процессах замещения. Эти процессы реализуются поэтапно согласно системе периферических трещин скола и отрыва, оперяющих область интрузивного внедрения, что и даёт плановый образ кольцевого образования [16, 23]. Распределение параметра $r_{acf}(x, y)$ сведено

к пространственным ореолам так, чтобы они захватывали как золоторудные эталоны, так и перспективные области, локализованные методом экстраполяции. Неудовлетворение данному требованию определяло вариацию размеров скользящего окна относительно величины \bar{r}_{ref} .

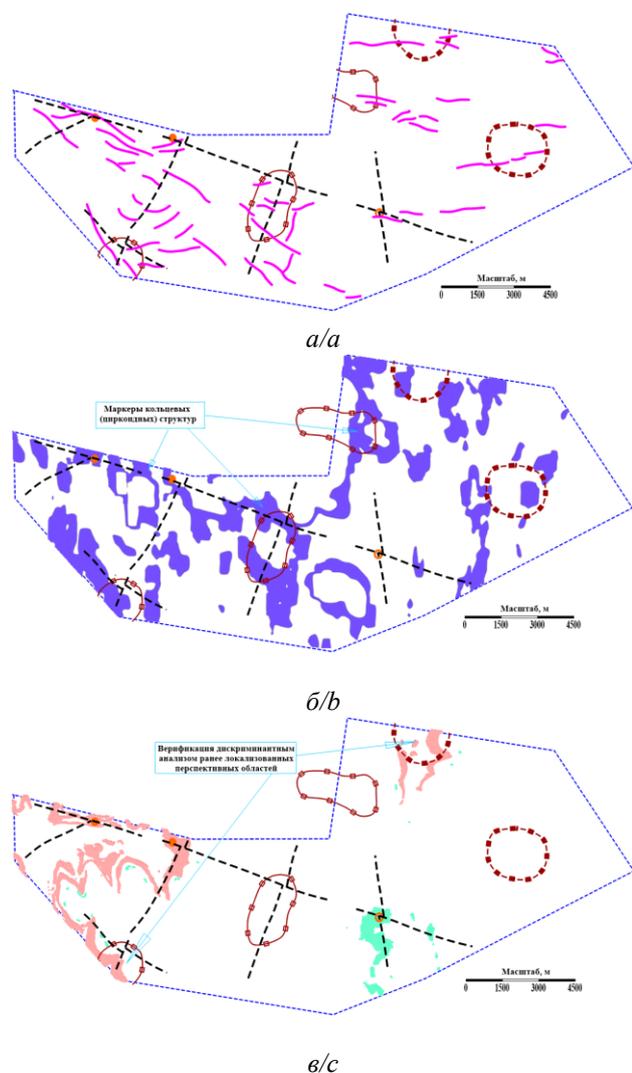


Рис. 3. Трансформанты прогностического характера: а) полосовые магнитные аномалии (розовые линии), коррелируемые с рудными эталонами и ранее локализованными перспективными областями (рис. 2, Г); б) зоны пространственной стационарности $(T_a)_{ост}$ отмечены синим; в) распознавание образов с обучением на основе модифицированного дискриминантного анализа по рудным эталонам двух типов (им отвечают розовые и зеленые ореолы)

Fig. 3. Transformants of a prognostic nature: a) strip magnetic anomalies, correlated with ROO and promising areas, previously located; б) area of spatial stationarity of $(T_a)_{res}$; c) pattern recognition with training based on modified discriminant analysis and two kinds of reference ore occurrences (different ROO correspond to pink and green forecast areas)

По рис. 3, б можно допустить отнесение эталона в центральной части изучаемой площади к другому классу, по сравнению с золоторудными эталонами на северо-западном её фланге. Потому в рамках распознавания образов с обучением подготовлены две эталонные выборки для формирования двух типов прогностических ореолов. Морфология этих ореолов, равно как и степень зависимости их друг от друга, составляют суть последующего численного эксперимента. Как отмечалось, эталонные и рабочие выборки сформированы на основе $(T_a)_{ост}$ и ЦМР при расширении размерности признакового пространства за счет их трансформант. Дистанционная основа в анализ не вовлекалась на данном этапе исследований для минимизации влияния экзогенных факторов. По результатам распознавания на основе модифицированного дискриминантного анализа (рис. 3, в) можно видеть верификацию части перспективных областей, ранее закартированных на южном и на северном флангах исследуемой площади. Прогностические ореолы первого класса, отвечающие золоторудным эталонам на северо-западном фланге этой площади, и прогностические ореолы второго класса, отвечающие золоторудному эталону в центре опытного полигона, формируют узлолокализованные площадные распределения с малыми взаимными перекрытиями.

Завершаем наши построения количественной интерпретацией остаточной составляющей магнитного поля: применяем алгоритм в рамках стадий I–IV по получению трехмерного параметрического образа горного массива. Итоговая трехмерная блок-диаграмма горного массива содержит горизонтальный срез на глубине порядка 400 м (рис. 4, а), где проявлено семейство локальных полосовых аномалий узкополосной составляющей $(T_a)_{ост}$. Часть этих аномалий пространственно совпадает с центральным и западными золоторудными эталонами (рис. 2, Г). Окончательно всего в проекте на основе интерпретационных пересчетов нами выведено семь прогностических на золоторудное проявление признаков, прогностические области по каждому из которых подвергнуты бинарной оцифровке (1 – в пределах прогностических областей, 0 – за их пределами). Вычисляем частоту попадания отдельной точки двумерной матрицы в полученные прогностические ореолы с отнесением частоты к числу прогностических признаков, равному семи. Значимыми представляются локальные вероятностные пики от 0,3, что отвечает одновременному попаданию точки двумерной матрицы в два и более прогностических ореола различного физического содержания. Таковых вероятностных пиков насчитывается порядка десяти (рис. 4, в). Причем число вероятностных пиков, рекомендованных к первоочередной детализационной заверке, подлежит оптимизации на основе гео-

химической съемки. Здесь требуется учитывать, что золоторудные эталоны, равно как и перспективные вероятностные аномалии, тяготеют к периферии полиметаллически-оловорудного узла и к сопряженному с его контуром касситеритовому ореолу рассеяния.

Обсуждение результатов

Проблема доразведки (здесь – Баягского рудного поля) и опережающего прогноза эндогенного оруденения в условиях минимума априорной геолого-геофизической информации при крупномасштабных оценках относится к одному из основных типов производственных задач разведочной геофизики. Решение этой проблемы удовлетворяет распоряжению Правительства РФ от 22.12.2018 № 2914-р, определяющему стратегию развития минерально-сырьевой базы страны до 2035 г. Средствами указанного решения выступают, в том числе, реинтерпретация архивных материалов и системная интерпретация актуализированных данных. Достоверность конечного результата реинтерпретации и интерпретации должна определяться:

- применением геоданных на разных масштабных срезах;
- комплексированием геоданных различного генезиса;
- применением единой критериальной основы для прогноза при анализе гетерогенных геоданных в рамках их качественного и количественного истолкования.

Рассмотренные в настоящей статье исследования удовлетворяют всем перечисленным критериям, благодаря привлечению к анализу магнитного поля ΔT_a итогов интерпретации ДЮ и ЦМР. Последние два признака, строго говоря, относятся к объектам оценки геоморфологии, оперирующей преимущественно эмпирическими классификациями и визуальными методиками. Поэтому адаптация стандартных методов интерпретации геофизических полей к истолкованию разномасштабных геоморфологических данных определяет выраженную научную новизну нашего проекта.

В системе методов интерпретации основным акцентом выступает минимизация экспертного (визуального) участия. Эта минимизация обеспечивается авторскими алгоритмами: линеamentного анализа, районирования, пересчета первичных геополей в систему трансформант, аналитического продолжения $(T_a)_{ост}$ в нижнее полупространство, а также распознавания образов. Применение означенных алгоритмов верифицируется стандартным математическим обеспечением и ориентировано на формирование набора наглядных картографических схем, визуальное обобщение которых носит очевидный характер. Подспорьем прогнозных оце-

нок на каждой стадии пересчетов выступает, прежде всего, наличие нескольких золоторудных эталонов, а также апробированные гипотезы о квазипериодичности рудоконтролирующей структуры. Распознавание образов с обучением верифицировало отмеченные гипотезы. Представительность конечного прогноза обеспечивается как отмеченными ранее принципами (разномасштабности оценок, комплексирования данных и методов интерпретации, применения качественной и количественной интерпретации), так и сведением ансамбля накопленных прогнозных маркеров к вероятностной оценке.

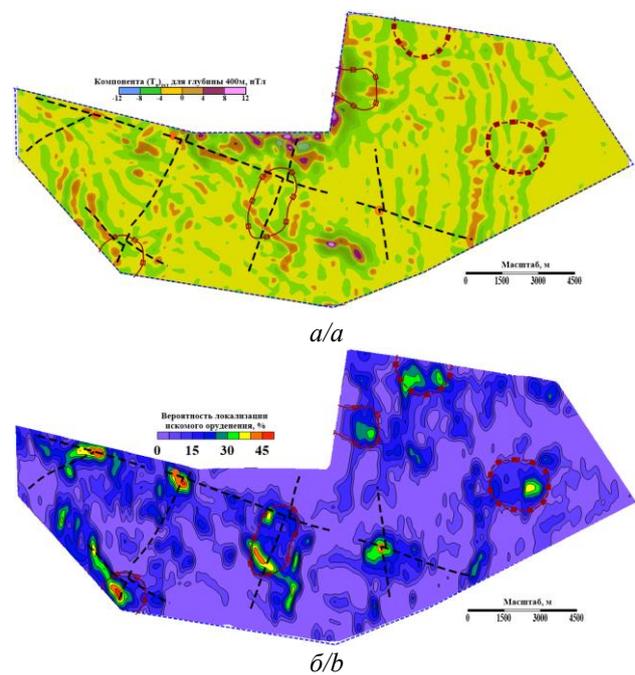


Рис. 4. Верификация позиции локальных аномальных зон: а) схема образа $(T_a)_{ост}$ для глубины 400 м с локализацией семейства полосовых аномалий, коррелируемых с золоторудными эталонами и перспективными областями; б) итоговая схема распределения вероятности обнаружения рудных объектов

Fig. 4. Verification of the position of local anomalous zones: a) image $(T_a)_{res}$ diagram for a depth of 400 m with localization of a family of band anomalies correlated with gold standards and promising areas identified by the extrapolation method; b) final predictive scheme for the distribution of the probability of detecting objects similar to the reference ones

Для картографической схемы распределения вероятности обнаружения рудных объектов, подобной эталонному (рис. 4, б), представительным полагаем оконтуривание максимумов этой вероятности, отвечающей наложению двух и более перспективных ореолов. Стоит принимать во внимание

элемент условности в этих вероятностных оценках, вычисляемых в предположении равной прогнозной значимости каждого из закартированных ранее прогнозных маркеров. Допускаем, что данная представительность, формально задаваемая в виде веса отдельного маркера, разная. Тогда следует сильнее сужать перспективные площади, выделяя часть максимумов поля вероятности, отвечающую наложению трёх и более перспективных ореолов. В нашем случае перечисленные критерии означают картирование контуров вероятностных максимумов на уровне 0,3–0,4 и более. Это даёт конечное семейство прогнозных участков, предлагаемых для постановки детализационных геолого-геофизических работ под планирование заверочного бурения [14, 35]. Аспект заверки реализованного прогноза решён в представленном проекте за счет данных геохимии: учитывая специализацию региона, оперируем ореолами рассеяния олова и полиметаллов. Как отмечалось, существует пространственная корреляция, выраженная в распределении золоторудных эталонов по периферии полиметаллическо-оловорудного района. Данная периферия маркируется комплексной геохимической аномалией, к флангу которой приурочен исследуемый участок. Согласно модели эпitherмальных золоторудных образований [23], взаимосвязь полиметаллических ореолов рассеяния с областями разгрузки золотосодержащего материала носит не только статистический, но и генетический характер. Он функционально определяется термодинамическими условиями миграции рудоносного раствора и разгрузки рудного компонента на потенциальных барьерах. Соответственно, вероятностные максимумы, кар-

тируемые на уровне 0,3–0,4 и более, имеют выраженную прогнозную значимость именно при попадании на периферию полиметаллическо-оловорудного района (рис. 5): таковых максимумов выявлено шесть, и все они сконцентрированы в центральной, северной и северо-западной частях опытного полигона.

Заключение

В выполненном исследовании представлен завершённый результат применения технологии геоструктурного прогноза в форме комплексных геолого-геофизических интерпретационных оценок областей, перспективных на выявление золото-сульфидных рудопроявлений. Прогноз выполнен на основе семейства математически и физически независимых качественных и количественных параметров. Данный прогноз верифицирован корреляцией локализованных перспективных объектов с контуром комплексной геохимической аномалии. Основой прогнозной составляющей, помимо системного применения апробированных и авторских алгоритмов качественной и количественной интерпретации потенциального и непотенциальных геополей, выступают две геологические модели. Одна из них – модель гидротермального золото-сульфидного рудообразования [16, 23], другая – корреспондируемая с первой моделью парадигма развития в неравновесном и расслоенном горном массиве квазипериодических дизъюнктивных и пликтивных дислокаций. Если первая модель носит качественный характер и на сегодняшний день в различных толкованиях активно применяется в прикладной геологии, то вторая модель спорна.

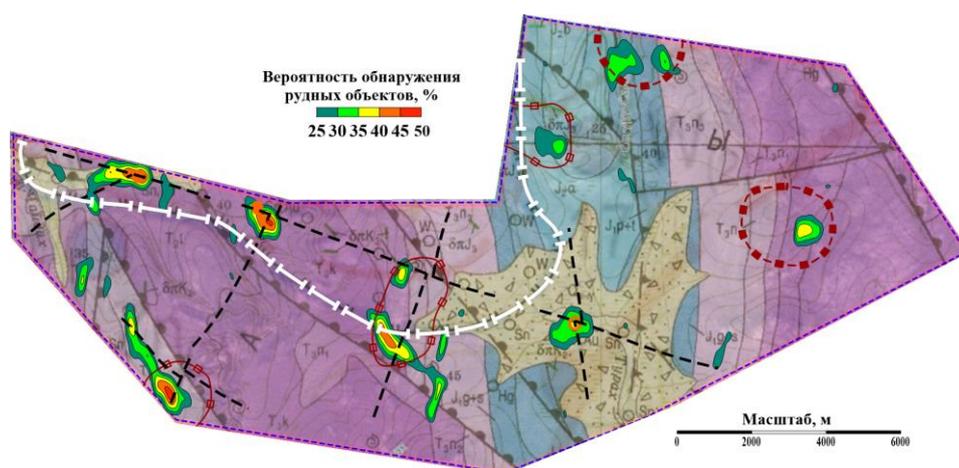


Рис. 5. Совмещение перспективных областей, выявленных методом экстраполяции (коричневые контуры), с вероятностными аномалиями (рис. 4, б), детальной геологической основой и контуром полиметаллическо-оловорудного района (белый пунктир – по [20]). Пояснения к геологической основе – рис. 1, а. Метод экстраполяции – рис. 2, Г

Fig. 5. Combination of promising areas, identified by extrapolation (brown contours) with probabilistic anomalies and the outline of polymetallic-tin ore region (white dotted line – according to [20]). Explanation to geological scheme is on Fig. 1, a. Extrapolation method is given on Fig. 2, d

Во-первых, основной компонент второй модели (о квазипериодических структурах) относится, скорее, к универсальным физическим аналогиям, чем к физико-геологическим моделям. Во-вторых, означенная физическая аналогия используется как упрощенное (вплоть до аналитического представления) обобщение общеизвестного эмпирического факта пространственной регулярности в семействе гомогенных геологических неоднородностей без глубокого генетического обоснования этой регулярности. В развитие прогнозных оценок одним из способов данного обоснования выступает применение верифицированной модели сдвиговых геодинамических зон с сопряженными трещинами скола и отрыва [16]. Отличаясь периодическим проявлением вдоль сдвиговой зоны, эти трещины характеризуются локальными областями растяжения, с которыми связываем потенциальные области разгрузки рудосодержащего субстрата.

Вдобавок к генетическим моделям рудогенеза, в системной реализации интерпретационных алгоритмов важную роль играет поправка δT_a , вносимая в T_a за локальные формы земного рельефа. Статистический характер δT_a , опирающийся на линейную аппроксимацию зависимости T_a от ЦМР, не противоречит решению проблемы дальнейшего совместного анализа двух независимых признаков в виде ЦМР и $(T_a)_{\text{ост.}}$. Тем не менее примененный тезис об аналогии между внесением δT_a и приведением T_a к условной горизонтальной поверхности требует в перспективе более глубокого изучения. Элементом этого изучения можно назвать решение прямой задачи теории потенциала с сопоставлением морфологии первичного сигнала при произвольном рельефе и остаточного сигнала при аналитической редукции наблюдений к плоскости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bian J., Wang X., Gao S. Experimental aeromagnetic survey using a rotary-wing air-craft system: a case study in Heizhugou, Sichuan, China // *Journal of Applied Geophysics*. – 2021. – Vol. 184. – P. 104245. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2020.104245.
2. Гоглев Д.А. Маловысотная аэромагнитная съемка с применением беспилотных воздушных систем на базе квадрокоптера в археологии // *Геопрофи*. – 2018. – Т. 6. – С. 20–22.
3. Опыт ГК «Геоскан». Создание высокоточной трехмерной модели Тульской области / В.Ф. Солощенко, Е.В. Гринько, М.В. Курков, Н.Р. Суздальцев // *Геопрофи*. – 2018. – Т. 2. – С. 10–14.
4. Инновационная аэромагнитная съемка с применением беспилотного летательного аппарата при поисках рудных месторождений в Казахстане / П.Н. Коврижных, Д.О. Кожамсугиров, С.Н. Кожевников, Д.В. Макаров, Д.Я. Капштан // *Геология и охрана недр*. – 2017. – Т. 4. – С. 34–42.
5. Кремчеев Э.А., Данилов А.С., Смирнов Ю.Д. Состояние метрологического обеспечения систем мониторинга на базе беспилотных воздушных судов // *Записки горного института*. – 2019. – Т. 235. – С. 96–105. DOI: 10.31897/pmi.2019.1.96.
6. Pashkevich M.A., Danilov A.S., Matveeva V.A. Remote sensing of chemical anomalies in the atmosphere in influence zone of Korkino open pit coal mine // *Eurasian mining*. – 2021. – Vol. 1. – P. 79–83.
7. Blischenko A.A., Gusev V.N. Anovar of errors in surveying photogrammetric measurements of mountain objects with the help of un-manned aerial vehicles // *International science and technology conference "Earth science" IOP Conference series: Earth and Environmental Science*. – 2021. – Vol. 720. – P. 012103. DOI: 10.1088/1755-1315/720/1/012103.
8. Ermolin E.Y. UAVs aeromagnetic survey data interpretation results from the Asachinsky area (Kamchatka) in order to predict lserpithermal Au-Ag deposits // *Engineering and Mining Geophysics*. – 2021. – Vol. 2021. – P. 1–7. DOI: 10.3997/2214-4609.202152155.
9. Критерий оценки корректности применения технологии микролевелинг при обработке данных авиамагнитной съемки БПЛА «Геоскан Геофизика» / Е.Ю. Ермолин, Д.А. Мелешкина, Д.О. Погосян, Н.П. Сенчина, Д.А. Фельдман // *Инженерная и рудная геофизика*. – 2021. – Т. 2021. – С. 128–128. DOI: 10.3997/2214-4609.202152147.
10. Кац Я.Г., Полетаев А.И., Румянцева Э.Ф. Основы линейamentной тектоники. – М.: Недра, 1986. – 140 с.
11. Тверетинова Т.Ю. Линеаменты как отражение структурного каркаса литосферы (линеаменты – разломы или фантомы?) // *Альманах Пространство и Время*. – 2013. – Т. 4. – С. 1–8.
12. Купцова О.В. Дешифрирование разломов юго-западной части острова Сахалин // *Вестник СГУТиТ*. – 2022. – Т. 27. – С. 52–60. DOI: 10.33764/2411-1759-2022-27-1-52-60.
13. Up-to-date block structure of Central Asia in geophysical fields / Yu.G. Gatinsky, T.V. Prokhorova, D.V. Rundquist, G.L. Vladova // *Альманах Пространство и Время*. – 2013. – Т. 4. – С. 7–7.
14. Петров О.В. Внутренние гравитационные волны Земли и нелинейные палеогеодинамические диссипативные структуры // *Доклады Академии наук*. – 1992. – Т. 326. – С. 323–326.
15. Petrov O.V. The Earth's dissipative structures: fundamental wave properties of substance. – New York: Springer International Publ., 2019. – 270 p. DOI: 10.1007/978-3-319-93614-7.
16. Коробейников А.Ф. Прогнозирование и поиски месторождений полезных ископаемых. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – Т. 1. – С. 214–220.
17. Александрова Т.Н., Хайде Г., Афанасова А.В. Оценка упорности золотосодержащих руд на основе интерпретации данных термического анализа // *Записки Горного института*. – 2019. – Т. 235. – С. 30–37. DOI: 10.31897/pmi.2019.1.30.
18. Егоров А.С., Винокуров И.Ю., Телегин А.Н. Научно-методические приемы повышения геологической и прогнознопойсковой эффективности государственного геологического картирования Российского арктического шельфа // *Записки Горного института*. – 2018. – Т. 233. – С. 447–458. DOI: 10.31897/pmi.2018.5.447.
19. Зайцев А.Ю. Методический подход к обоснованию капитальных вложений золоторудных месторождений на основе удельных затрат // *Записки Горного института*. – 2019. – Т. 238. – С. 459–464. DOI: 10.31897/pmi.2019.4.459.

20. Aleksandrova T.N., Talovina I.V., Duryagina A.M. Gold-sulphide deposits of the Russian Arctic zone: mineralogical features and prospects of ore beneficiation // *Geochemistry*. – 2020. – Vol. 80. – P. 125510. DOI: 10.1016/j.chemer.2019.04.006.
21. Камалетдинов В.А., Антонов П.Е. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200000. Серия Верхоянская. Листы Q-53-XIII, XIV (Юнкюр), Q-53-XIX, XX (Сирэм). Объяснительная записка. – СПб: ВСЕГЕИ, 1999. – 116 с.
22. Щербakov О.И. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1000000. Верхояно-Колымская серия. Q-53 (Верхоянск). – СПб: ВСЕГЕИ, 2016. – 1 с.
23. Arriba A., Gonzalez-Urrien E., Hedenquist J.W. Exploration for epithermal gold deposits, Gold in 2000 // *Society of Economic Geologists Shortcourse*. – 2000. – Vol. 1. – P. 245–277. DOI: 10.5382/Rev.13.07.
24. Bolshakova N.V., Fedorova K.S. The possibilities of using a qualitative interpretation of the potential for creating a zonal-block model of the northern flank of the Okhotsk Sea Region // *Engineering and Mining Geophysics*. – 2021. – Vol. 2021. – P. 1–7. DOI: 10.3997/2214-4609.202152157.
25. Калинин Д.Ф., Яновская Ю.А., Долгаль А.С. Использование статистических методов интерпретации потенциальных полей для изучения структурно тектонического строения нефтегазоперспективных территорий // *Геология нефти и газа*. – 2021. – Т. 2. – С. 27–36. DOI: 10.31087/0016 7894 2021 2 27 36.
26. Хрящев Д.А. Об одном методе анализа цифрового изображения с применением гистограмм // *Вестник АГТУ*. – 2010. – Т. 1. – С. 109–113.
27. Ajith J.K. Technical report on edge detection using Sobel filter in GDAL packages // SRM Nagar, Kattankulathur, Nansen Environmental Research Centre, India. – 2015. – Vol. 1. – P. 11. DOI: 10.13140/RG.2.1.4774.2805.
28. Копылов И.С., Бабеншиев В.М. Поиски полиметаллов и золота на приполярном Урале с применением аэрокосмических методов // *Аэрокосмические методы в геологии*. – 2020. – Т. 2. – С. 159–166.
29. Долгаль А.С. Гравиметрия и магнитометрия: трансформации геопотенциальных полей. – Пермь: ИЦ Пермского государственного национального исследовательского университета, 2022. – 140 с.
30. Early assessment of seismic hazard in terms of Voronezh massif – Moscow depression contact / I. Movchan, A. Yakovleva, A. Movchan, Z. Shaygallyamova // *Mining of Mineral Deposits*. – 2021. – Vol. 15 (3). – P. 62–70 DOI: 10.33271/mining15.03.062.
31. Zheng W., Zhao L., Zou C. A modified algorithm for generalized discriminant analysis // *Neural Computation*. – 2004. – Vol. 16. – P. 1283–1297. DOI: 10.1162/089976604773717612.
32. Peckham Sc.D. Profile, plan and streamline curvature: a simple derivation and applications // *Proceedings of conf. Geomorphometry*. – 2011. – Vol. 2011. – P. 27–30.
33. Лопатин Д.В., Шавель Н.И. Комплексный линейный анализ Орловско-Спокойненского рудного поля (восточное Забайкалье) // *Вестник СПбГУ*. – 2010. – Т. 4. – С. 83–93.
34. Kanungo T. A local search approximation for k-means clustering // *Computational Geometry*. – 2004. – Vol. 28 (2–3). – P. 89–112. DOI: 10.1016/S0925-7721(04)00021-5.
35. Блинов П.А., Садыков М.И. Оценка упруго-прочностных свойств цементно-эпоксидных систем // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2023. – Т. 334. – № 1. – С. 97–105. DOI: 10.18799/24131830/2023/1/3925.

Информация об авторах

Игорь Борисович Мовчан, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геофизики Санкт-Петербургского горного университета, Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2. movchan_ib@pers.spmi.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2311-8979>

Александра Анатольевна Яковлева, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры геофизики Санкт-Петербургского горного университета, Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2. yakovleva_aa@pers.spmi.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2476-2790>

Зиля Ириковна Садыкова, инженер-геофизик, ГК «Геоскан», Россия, 194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 22, литер Л. z.sadykova@geoscan.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0789-214X>

Дарья Кирилловна Мединская, аспирант кафедры геофизики Санкт-Петербургского горного университета, Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2. s225007@stud.spmi.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1020-3955>

Дмитрий Алексеевич Гоглев, руководитель проекта «Аэромагнитная съемка с БПЛА», ГК «Геоскан», Россия, 194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 22, литер Л. d.goglev@geoscan.ru

Поступила в редакцию: 13.02.2024

Поступила после рецензирования: 07.03.2024

Принята к публикации: 21.10.2024

REFERENCES

1. Bian J., Wang X., Gao S. Experimental aeromagnetic survey using a rotary-wing air-craft system: a case study in Heizhugou, Sichuan, China. *Journal of Applied Geophysics*, 2021, vol. 184, pp. 104245. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2020.104245.
2. Goglev D.A. Low-altitude aeromagnetic survey using unmanned aerial systems based on a quadcopter in archeology. *Geoprofi*, 2018, vol. 6, pp. 20–22. (In Russ.)

3. Soloshchenko V.F., Grinko E.V., Kurkov M.V., Suzdaltsev N.R. Experience of Geoscan Group of Companies. Creation of a high-precision three-dimensional model of the Tula region. *Geoprofi*, 2018, vol. 2, pp. 10–14. (In Russ.)
4. Kovrizhnykh P.N., Kozhamsugirov D.O., Kozhevnikov S.N., Makarov D.V., Kapshtan D.Ya. Innovative aeromagnetic survey using an unmanned aerial vehicle when searching for ore deposits in Kazakhstan. *Geology and subsoil protection*, 2017, vol. 4, pp. 34–42. (In Russ.)
5. Kremcheev E.A., Danilov A.S., Smirnov Yu.D. The state of metrological support for monitoring systems based on unmanned aerial vehicles. *Notes of the Mining Institute*, 2019, vol. 235, pp. 96–105. (In Russ.) DOI: 10.31897/pmi.2019.1.96.
6. Pashkevich M.A., Danilov A.S., Matveeva V.A. Remote sensing of chemical anomalies in the atmosphere in influence zone of Korkino open pit coal mine. *Eurasian mining*, 2021, vol. 1, pp. 79–83.
7. Blischenko A.A., Gusev V.N. Anovar of errors in surveying photogrammetric measurements of mountain objects with the help of un-manned aerial vehicles. *International science and technology conference "Earth science" IOP Conference series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 720, pp. 012103. DOI: 10.1088/1755-1315/720/1/012103.
8. Ermolin E.Y. UAVs aeromagnetic survey data interpretation results from the Asachinsky area (Kamchatka) in order to predict lso-epithermal Au-Ag deposits. *Engineering and Mining Geophysics*, 2021, vol. 2021, pp. 1–7. (In Russ.) DOI: 10.3997/2214-4609.202152155.
9. Ermolin E.Y., Meleshkina D.A., Pogosyan D.O. Senchina N.P., Feldman D.A. A criterion for assessing the correctness of using microleveling technology when processing data from aerial magnetic surveys of the Geoscan Geophysics UAV. *Engineering and ore geophysics*, 2021, vol. 2021, pp. 128–128. (In Russ.) DOI: 10.3997/2214-4609.202152147.
10. Kats Ya.G., Poletaev A.I., Rumyantseva E.F. *Fundamentals of lineament tectonics*. Moscow, Nedra Publ., 1986. 140 p. (In Russ.)
11. Tveretina T.Yu. Lineaments as a reflection of the structural framework of the lithosphere (lineaments – faults or phantoms?). *Almanac Space and Time*, 2013, vol. 4, pp. 1–8. (In Russ.)
12. Kuptsova O.V. Interpretation of faults in the southwestern part of Sakhalin Island. *Vestnik SGUTiT*, 2022, vol. 27, pp. 52–60. (In Russ.) DOI: 10.33764/2411-1759-2022-27-1-52-60.
13. Gatinsky Yu.G., Prokhorova T.V., Rundquist D.V., Vladova G.L. Up-to-date block structure of Central Asia in geophysical fields. *Almanac Space and Time*, 2013, vol. 4, pp. 7–7.
14. Petrov O.V. Internal gravitational waves of the Earth and nonlinear paleodynamic dissipative structures. *Reports of the Academy of Sciences*, 1992, vol. 326, pp. 323–326. (In Russ.)
15. Petrov O.V. *The Earth's dissipative structures: fundamental wave properties of substance*. New York, Springer International Publ., 2019. 270 p. DOI: 10.1007/978-3-319-93614-7.
16. Korobeinikov A.F. *Forecasting and searching for mineral deposits*. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. House, 2012. Vol. 1, pp. 214–220. (In Russ.)
17. Aleksandrova T.N., Heide G., Afanasova A.V. Assessment of the refractoriness of gold ores based on the interpretation of thermal analysis data. *Notes of the Mining Institute*, 2019, vol. 235, pp. 30–37. (In Russ.) DOI: 10.31897/pmi.2019.1.30.
18. Egorov A.S., Vinokurov I.Yu., Telegin A.N. Scientific and methodological techniques for increasing the geological and forecasting-search efficiency of state geological mapping of the Russian Arctic shelf. *Notes of the Mining Institute*, 2018, vol. 233, pp. 447–458. (In Russ.) DOI: 10.31897/pmi.2018.5.447.
19. Zaitsev A.Yu. Methodological approach to justifying capital investments in gold deposits based on unit costs. *Notes of the Mining Institute*, 2019, vol. 238, pp. 459–464. (In Russ.) DOI: 10.31897/pmi.2019.4.459.
20. Aleksandrova T. N., Talovina I. V., Duryagina A. M. Gold-sulphide deposits of the Russian Arctic zone: Mineralogical features and prospects of ore beneficiation. *Geochemistry*, 2020, vol. 80, pp. 125510. DOI: 10.1016/j.chemer.2019.04.006.
21. Kamaletdinov V.A., Antonov P.E. *State geological map of the Russian Federation. Scale 1:200000. Verkhoyansk series. Sheets Q-53-XIII, XIV (Yunkur), Q-53-XIX, XX (Sirem). Explanatory note*. St. Petersburg, VSEGEI Publ., 1999. 116 p. (In Russ.)
22. Shcherbakov O.I. *State geological map of the Russian Federation, scale 1:1000000. Verkhoyansk-Kolyma series. Q-53 (Verkhoyansk)*. St. Petersburg, VSEGEI Publ., 2016. 1 p. (In Russ.)
23. Arriba A., Gonzalez-Urien E., Hedenquist J.W. Exploration for epithermal gold deposits, Gold in 2000. *Society of Economic Geologists Shortcourse*, 2000, vol. 1, pp. 245–277. DOI: 10.5382/Rev.13.07.
24. Bolshakova N. V., Fedorova K. S. The possibilities of using a qualitative interpretation of the potential for creating a zonal-block model of the northern flank of the Okhotsk Sea region. *Engineering and Mining Geophysics*, 2021, vol. 2021, pp. 1–7. DOI: 10.3997/2214-4609.202152157.
25. Kalinin D.F., Yanovskaya Yu.A., Dolgal A.S. The use of statistical methods for interpreting potential fields to study the structural tectonic structure of oil and gas promising territories. *Geology of Oil and Gas*, 2021, vol. 2, pp. 27–36. (In Russ.) DOI: 10.31087/00167894202122736.
26. Khryashchev D.A. About one method of digital image analysis using histograms. *Vestnik ASTU*, 2010, vol. 1, pp. 109–113. (In Russ.)
27. Ajith J.K. Technical report on edge detection using Sobel filter in GDAL packages. *SRM Nagar, Kattankulathur, Nansen Environmental Research Centre, India*, 2015, vol. 1, pp. 11. DOI: 10.13140/RG.2.1.4774.2805.
28. Kopylov I.S., Babenyshev V.M. Searches for polymetals and gold in the subpolar Urals using aerospace methods. *Aerospace methods in geology*, 2020, vol. 2, pp. 159–166. (In Russ.)
29. Dolgal A.S. *Gravimetry and magnetometry: transformations of geopotential fields*. Perm, Perm State National Research University Publ. center, 2022. 140 p. (In Russ.)
30. Movchan I., Yakovleva A., Movchan A., Shaygallyamova Z. Early assessment of seismic hazard in terms of voronezh massif-moscow depression contact. *Mining of Mineral Deposits*, 2021, vol. 15 (3), pp. 62–70 DOI: 10.33271/mining15.03.062.
31. Zheng W., Zhao L., Zou C. A modified algorithm for generalized discriminant analysis. *Neural Computation*, 2004, vol. 16, pp. 1283–1297. DOI: 10.1162/089976604773717612.

32. Peckham Sc.D. Profile, plan and streamline curvature: a simple derivation and applications. *Proceedings of conf. Geomorphometry*, 2011, vol. 2011, pp. 27–30.
33. Lopatin D.V., Shavel N.I. Complex lineament analysis of the Oryol-Spokoinensky ore field (eastern Transbaikalia). *Bulletin of St. Petersburg State University*, 2010, vol. 4, pp. 83–93. (In Russ.)
34. Kanungo T. A local search approximation for k-means clustering. *Computational Geometry*, 2004, vol. 28 (2–3), pp. 89–112. DOI: 10.1016/S0925-7721(04)00021-5.
35. Blinov P.A., Sadykov M.I. Assessment of elastic-strength properties of cement-epoxy systems. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 1, pp. 97–105. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2023/1/3925.

Information about the authors

Igor B. Movchan, Cand Sc., Associate Professor, Saint Petersburg Mining University, 2, 21st Line, St. Petersburg, 199106, Russian Federation. movchan_ib@pers.spmi.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2311-8979>

Alexandra A. Yakovleva, Cand Sc., Associate Professor, Saint Petersburg Mining University, 2, 21st Line, St. Petersburg, 199106, Russian Federation. yakovleva_aa@pers.spmi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0789-214X>

Zilya I. Sadykova, Geophysicist Engineer, Geoscan Group of Companies, 22, letter L, Politekhnikeskaya street, St. Petersburg, 194021, Russian Federation. z.sadykova@geoscan.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0789-214X>

Daria K. Medinskaia, Postgraduate Student, Saint Petersburg Mining University, 2, 21st Line, St. Petersburg, 199106, Russian Federation. s225007@stud.spmi.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1020-3955>

Dmitry A. Goglev, Manager of “Aeromagnetic Surveying from UAVs” project, Geoscan Group of Companies, 22, letter L, Politekhnikeskaya street, St. Petersburg, 194021, Russian Federation. d.goglev@geoscan.ru

Received: 13.02.2024

Revised: 07.03.2024

Accepted: 21.10.2024