



Научная статья
УДК 550.83

Выявление факторов структурного контроля коренных золоторудных проявлений методом беспилотной аэромагниторазведки на примере Нерюнгринского района Якутии

И.Б.МОВЧАН, З.И.ШАЙГАЛЛЯМОВА ✉, А.А.ЯКОВЛЕВА

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Как цитировать эту статью: Мовчан И.Б., Шайгаллямова З.И., Яковлева А.А. Выявление факторов структурного контроля коренных золоторудных проявлений методом беспилотной аэромагниторазведки на примере Нерюнгринского района Якутии // Записки Горного института. 2022. Т. 254. С. 217-233. DOI: 10.31897/PMI.2022.23

Аннотация. Длительное развитие геофизической отрасли, в которой методы магнитометрии отличаются максимальной востребованностью, как наиболее простые в инструментальном и методологическом исполнении, определило развитие дистанционных методов измерений, реализуемых как с космических, так и аэровоздушных носителей. Потребность применения последних как обязательной составляющей полевых изысканий, обеспечивающей охват значимых площадей, определяет апелляцию к беспилотным малотоннажным носителям. Их задействование реализовано для поиска допускающих прогнозные построения элементов структурного (пространственного, генетического) контроля эндогенных золоторудных проявлений, т.е. решения задачи прироста золоторудных запасов, решаемой в рамках федеральных программ. Цель изыскания – разработка системного инструментального и последующего интерпретационного подходов при организации беспилотной магнитометрической съемки, реализованной для структурно-геологического картирования на примере Нерюнгринского района Якутии. В рамках формирования цифровой модели рельефа и аномального магнитного поля рассматривается методика съемки с использованием беспилотного воздушного судна, его технические характеристики, выполнен анализ и авторская модификация камеральной обработки данных магнитометрии. На основании полученных материалов создана физико-геологическая модель исследуемого участка, которая представлена в форме геолого-структурного разреза, сопровождающегося физическими характеристиками структурно-вещественных комплексов. Уточнение физико-геологической модели реализовано совместным морфоструктурным анализом дистанционной основы и аномального магнитного поля с применением результатов количественной интерпретации аномального магнитного поля. Итог исследований представлен актуализированной геологической основой с выделением перспективных рудных участков для их детализации в рамках планируемых крупномасштабных геолого-геофизических изысканий. Научная новизна работы состоит в синтезе прошедших апробацию методов беспилотных аэромагнитометрических измерений и геологоструктурных реконструкций, допускающих обработку как потенциальных, так и непотенциальных геополей.

Ключевые слова: аномальное магнитное поле; аэромагниторазведка; БПЛА; интерпретация; дешифрирование; дистанционная основа; рудоконтролирующий фактор

Благодарность. Исследование выполнено за счет субсидии на выполнение государственного задания в сфере научной деятельности на 2021 г. № FSRW-2020-0014.

Поступила: 31.10.2021

Принята: 26.04.2022

Онлайн: 05.07.2022

Опубликована: 13.07.2022

Введение. Тема работы связана с двумя актуальными аспектами: картированием элементов структурного контроля эндогенных золоторудных проявлений и применением беспилотной авиации. В качестве геологического полигона рассмотрена одна из перспективных площадей Якутии. Золотодобыча в данном регионе ведется чуть менее века при оценке ресурсов (Центрально-Алданский рудный район, Южная Якутия – 1000 т золота) [1]. Рассмотрены золоторудные месторождения в областях Южной Якутии, характеризующихся на большей своей площади широким развитием мезозойского магматизма, интрузивные продукты которого пронизывают карбонатные толщи



перекрывающих осадков. Выбранный геологический полигон размещен в пределах Тимптоно-Беркакитской площади (бассейны рек Иенгра, Беркакит, Тимптон, Чульман). Ближайшими к геологическому полигону детально разведанными эндогенными (коренными) месторождениями золота с промышленными запасами являются месторождения Куранах, Лебединое и Рябиновое, расположенные севернее (на расстоянии порядка 170-180 км) от центра полигона.

Месторождение Куранах сформировано окисленными золотоносными рудами с исходно высоким содержанием сульфидов, отличается комплексным характером оруденения (полиметаллов, вольфрама и серебра). В первичном своем проявлении золото Куранахского рудного поля относят к образованиям гидротермального типа, где выделяют руды двух генераций: микроскопические вкрапления, ассоциированные с пиритом; миллиметровые вкрапления различной морфологии, ассоциированные с кварцем и пиритом. Месторождение Рябиновое представляет собой массивы вкрапленных в щелочных мезозойских комплексах золото-сульфидных руд. Месторождение Лебединое образовано залежами частично окисленных золото-сульфидных руд, ассоциированных с кварцевыми жилами, пронизывающими карбонатные породы. Все три месторождения относят [2] к разным геолого-промышленным типам: минерализованные залежи золото-пирит-адуляр-кварцевых руд (Куранах); кварц-золото-сульфидные рудные скопления и жилы (Лебединое); золото-порфиновые медные руды прожилково-вкрапленной морфологии (Рябиновое). Если первые два типа тяготеют к карбонатным породам и их контактам с интрузивными комплексами, то третий тип формируется непосредственно в интрузивных комплексах.

В пределах выбранного геологического полигона, где при субмеридиональном движении наблюдается резкая смена геологической обстановки (от моноклиналиного залегания осадочных и вулканогенно-осадочных толщ юрского возраста на севере через выраженную контактную зону к крутопадающим архейским комплексам, представленным чередующимися продуктами кислого и щелочного магматизма в центральной и южной частях полигона), оруденение, тяготеющее к контактной зоне магматогенных и осадочных комплексов и древним кристаллическим формациям. Выбранный геологический полигон находится практически посередине между двумя рудно-россыпными районами [3]: Эвотинским – севернее полигона (включает рассмотренные выше месторождения), Гувилгринским – на юге и юго-востоке относительно полигона. Опубликованная геологическая основа [3] демонстрирует детерминированную структурную картину в окрестностях геологического полигона: он тяготеет к области пересечения субмеридиональной дизъюнктивной зоны, связывающей оба указанных рудно-россыпных района, и дизъюнктивной полосовой зоны северо-западного простирания, пересекающей кроме Гувилгринского района Талангинский рудно-россыпной район. Согласно работам [4], данная область пересечения определяется как дискордантная структура, а отмеченные дизъюнктивные зоны рассматриваются в качестве каналов миграции рудонасыщенных растворов и расплавов, что гипотетически способно сформировать в пределах избранного геологического полигона промышленно значимый золоторудный массив.

Методология. Площадь выбранного полигона более 40 км², что делает проблематичным его представительные оценки на основе только наземных изысканий. В то же время имеет место плохое состояние специализированного (геолого-геофизического) аэропарка: в условиях массового притока на отечественный рынок импортной измерительной аппаратуры российская геологическая отрасль сохранила единичные аэроотряды, в числе которых – действующие подразделения АО НПП «Аэрогеофизика» (Москва), летные отряды филиалов ВСЕГЕИ (Санкт-Петербург), ЗАО «Аэрогеофизическая разведка» (Новосибирск). Такой дефицит техники при аэрогеофизической съемке неизбежно влечет рост ее себестоимости и, как следствие, понижение рентабельности изысканий [5]. Поэтому анонсировано применение малотоннажных и малоразмерных беспилотников с геофизической полезной нагрузкой. Возможность их использования позволила сотрудничать с фирмой ООО «Геоскан», имеющей собственное производство аэроносителей и многолетний опыт их применения в различных задачах [6, 7]. Несмотря на популяризацию применения дронов [8-14], в частности в геологии и геофизике, следует обратить внимание на такие особенности, как подверженность аппарата влиянию атмосферных потоков, малую полезную нагрузку, неизбежно определяющую уменьшение размеров сенсора, т.е. его разрешающей способности. Данные особенности не являются единственными и представляют собой источник совершенствования методологии применения



беспилотной специализированной (здесь – магнитометрической в комплексе с геоморфологической) съемки. Поэтому целью изысканий выступают анализ и подбор вариантов модификации методики комплексной геоморфологической и аэромагнитометрической разведок, включающей разработку системы интерпретации, обеспечивающей совместный анализ разнородных геополей (здесь – поля оптической плотности дистанционного образа и аномального магнитного поля (АМП) в привязке к задаче прогноза проявления эндогенного оруденения.

Технические основы аэромагнитной съемки с беспилотного летательного аппарата (БПЛА). Аэромагнитная съемка с применением БПЛА выполняется с помощью комплекса «Геоскан 401 Геофизика», который включает в себя квадрокоптер мультироторного типа и квантовый рубидиевый магнитометр Geoscan GeoShark. Магнитометр установлен на БПЛА с помощью капронового шнура длиной 20 м. Техника произведена компанией ООО «Геоскан» [15, 16]. Основные технические характеристики квадрокоптера «Геоскан 401»: длительность полета – до 60 мин; продолжительность полета – до 22 км; горизонтальная и вертикальная скорости – до 50 и 5 км/ч соответственно; высота – 500 м; максимальная скорость ветра – до 10-12 м/с; масса полезной нагрузки – 2 кг; рабочие температуры – от –20 до +40 °С. Характеристики магнитометра GeoShark: чувствительность – $1 \text{ пТл}/\sqrt{\text{Гц}}$; диапазон измерения поля – 20000-100000 нТл; общая девиационная ошибка – $< 0,3 \text{ нТл}$; частота измерений – 1000 Гц; диапазон допустимых углов датчика – $\pm 45^\circ$; диапазон рабочих температур – от –20 до +40 °С; масса датчика/электронного блока – 120/300 г.

Методической особенностью беспилотной аэромагнитной съемки выступает маловысотность, обусловленная стремлением минимизировать удаление сенсора от горного массива и снижением воздействия атмосферных потоков на малотоннажный дрон [17, 18]. Необходимым элементом данного типа аэросъемки оказывается предварительное картирование локальных форм рельефа и сопутствующих им лесных массивов и инженерных конструкций для обеспечения безаварийного полета магнитометрического беспилотника. Опережающая съемка локальных форм ландшафта (геоморфологической съемки) осуществляется на больших, чем при магниторазведке, высотах (до 2 км) с борта дрона типа «летающее крыло» на основе радарного или лазерного сканирования, комплексируемого с фотографированием (реализуется посредством спектральной цифровой камеры). Стандартная камеральная обработка результатов опережающей съемки сводится к формированию географически увязанной цифровой модели относительных превышений земной поверхности (матрица превышений загружается в память магнитометрического дрона). В случае изысканий, реализуемых в рамках рассматриваемой тематики, данная методика, многократно отработанная экспедиционными группами, дополнена авторским блоком оптимизации проектирования измерительных маршрутов. Общеизвестна потребность ориентировать эти маршруты вкост доминирующего простирания геоструктурных элементов, к которым относятся проявленные в современном ландшафте стратиграфические и тектонические контакты структурно-вещественных комплексов. Таким образом, в состав камерального анализа результатов опережающей геоморфологической съемки включен автоматизированный параметрический анализ линеаментных структур, восстанавливаемых на основе цифровой модели рельефа (ЦМР), комбинированного с фотообразом местности, и применения авторского алгоритма дешифрирования. На данной стадии изысканий геоструктурный образ местности, получаемый после линеаментного дешифрирования, оказывается менее значимым, чем интегральная роза доминирующих простираний геоструктурных элементов (в данном случае – северо-восточные доминирующие простирания). При проведении измерительных (магнитометрических) работ по системе маршрутов северо-западного простирания обязательно устанавливается магнитовариационная станция на базе квантового магнитометра для регистрации суточных вариаций геомагнитного поля Земли и их последующего учета в обработке.

Аэромагнитные съемки с борта БПЛА и камеральная обработка при доразведке коренных золоторудных проявлений. Уточняя приведенный геологический обзор, необходимо отметить позицию площади работ: Нерюнгринский район Республики Саха (Якутия), Тимптонский золото-промышленный район (в пределах листа О-51-XXX). Контуры данного листа относятся к югу Алданского нагорья, району бассейна р. Тимптон (правого притока р. Алдан) в среднем ее течении. В геологическом строении рассматриваемой части этого региона принимают участие



сложнодислоцированные и глубокометаморфизованные слоисто-кристаллические образования архейского возраста, морские карбонатные породы нижнего кембрия, континентальные отложения юры и рыхлые четвертичные отложения различного генезиса. Интрузивные образования наблюдаются только в пределах площади распространения докембрийских кристаллических пород, а на участках, занятых нижнекембрийскими и юрскими образованиями, проявлений интрузивной деятельности не отмечено. По времени внедрения интрузивные породы территории разделяются на архейские и нижнепротерозойские. Рудное золото, ассоциируемое преимущественно с сульфидами, в основном своем объеме сформировано в пределах исследуемого полигона, как и в пределах всего Алдано-Станового щита, на этапе мезозойской тектоно-магматической активизации [3]. Применительно к выбранному геологическому полигону данные руды сингенетичны протяженным дизъюнктивным структурам, имеющим глубинное заложение и рудоконтролирующую значимость. Золоторудные проявления Верхне-Тимптонского района тяготеют к гранитоидным штокам и дайкам, маркирующим указанные разрывные структуры регионального проявления.

Работы в пределах обозначенного геологического полигона проводились в октябре-ноябре 2019 г. Общая площадь работ (после опережающих оптимизационных оценок) составила 30 км², длина рядовых маршрутов – 327,8 км, опорных – 9,2 км. Съёмка выполнялась с расположением магнитометра на высоте 40 м над уровнем рельефа, квадрокоптера – 60 м. Расстояние между профилями – 100 м.

После проведения полевых работ все материалы были проверены на корректность и переданы на камеральную обработку. Основная цель камеральной обработки данных аэромагниторазведки заключается в получении на площади съёмки цифровой модели АМП и оценки погрешности полученных результатов измерений геомагнитного поля [19-22].

Для решения поставленных задач необходимо последовательно выполнить несколько видов работ независимо от типа используемого при съёмке носителя:

- создать базы данных аэромагнитных наблюдений в формате пакета обработки данных;
- ввести поправки за суточные вариации геомагнитного поля Земли;
- вычислить АМП ΔT_a (поправка за нормальное поле Земли);
- взаимно увязать опорные и рядовые маршруты;
- оценить среднеквадратическую погрешность съёмки по повторным измерениям;
- учесть влияние локальных форм рельефа на структуру итоговой цифровой модели АМП.

Если первые пять пунктов относятся к отработанным операциям, дающим относительно однозначный результат, то учет взаимосвязи магнитного поля и локальных форм рельефа земной поверхности тяготеет к разряду научных задач. Полет дрона с огибанием локальных форм рельефа можно рассматривать по аналогии с наземным движением оператора: корректно представлять поверхность измерений в качестве условной плоскости; решать относительно данной плоскости обратную задачу [23]; при визуализации ее результатов вносить геометрическую коррекцию, привязывая вычисленные элементы залегания к локальным аномалиям форм земного рельефа. Однако есть ряд проблем, которые такой подход не решает. Первая из проблем состоит в определении соотношения линеаментных структур, закартированных по дистанционному образу ландшафта, с геоструктурными реконструкциями (аналог линеаментов) по АМП. Здесь ставится цель выяснить, какие из линеаментов отражают глубинную (эндогенную) составляющую ландшафта, а какие связаны с приповерхностными процессами. В данном случае актуальным оказывается снижение корреляционной связи между АМП и полем относительных превышений. Другой проблемой оказывается выявленная на эмпирическом уровне функциональная связь между амплитудными и морфологическими особенностями магнитных аномалий и характеристиками земного рельефа. Данная функциональная связь обсуждается в научных публикациях с середины 20 в. (Б.Д.Микрова, 1963) [24, 25].

Обобщая, можно выделить два подхода к введению поправок за рельеф в АМП: аналитический и статистический. В аналитическом подходе есть два ключевых (для данных изысканий) недостатка: потребность решать прямую задачу, что исключает автоматизацию в технологии расчета поправки за рельеф; зависимость точности поправки от уровня физико-геологической информации о приповерхностных толщах. В статистическом подходе доминирует примитивизм: построение



аппроксимационной зависимости значений АМП от относительных превышений (абсолютных высот) рельефа земной поверхности с последующим пересчетом этих превышений в коррелируемую с ними составляющую АМП. Как показали исследования А.С.Долгая [26, 27], этот подход отличается относительной строгостью только в рамках модели линейной статистики, тогда как интервальные оценки демонстрируют выраженную нелинейность отмеченной аппроксимации. В силу данного противоречия предложен альтернативный способ учета рельефа, опирающийся на расчет функции когерентности:

$$\Psi_{\Delta T, RI}^2(\omega) = |S_{\Delta T, RI}(\omega)|^2 / (S_{\Delta T}(\omega)S_{RI}(\omega)),$$

где ω – пространственная частота, $S_{\Delta T, RI}$ – кросс-спектр, вычисляемый на основе прямого преобразования Фурье взаимно-корреляционной функции между АМП и ЦМР; $S_{\Delta T}$, S_{RI} – энергетические спектры АМП и ЦМР соответственно.

Принимая за параметр функциональной взаимосвязи АМП и ЦМР выраженную положительную и отрицательную корреляцию между ними, можно сформировать на основе функции когерентности фильтр для вычисления компоненты АМП, коррелируемой с ЦМР. Полосы пропускания такого фильтра будут отвечать условию $0,5 \leq \Psi^2 \leq 1$, что, согласно работе Р.Отнеса (1982), эквивалентно положительной и отрицательной корреляции между разночастотными составляющими АМП и ЦМР, превышающей 0,7. Исключение из АМП компоненты, коррелируемой с земным рельефом, демонстрирует выраженное падение итогового коэффициента парной корреляции (по опытным полигонам – менее 0,3 по модулю). В результате камеральной обработки были отстроены карты изолиний АМП (с внесенной поправкой за локальные формы рельефа), графиков АМП и трансформанты, а также рассчитана оценка среднеквадратической погрешности съемки, которая составила $\pm 5,52$ нТл.

Характеристика основных трансформаций магнитного поля, составляющих сущность первого этапа реализованной процедуры качественной интерпретации, приведена в табл.1. Как можно увидеть из рис.1, отображающего итог некоторых трансформант, на фоне доминирующих простираний северо-восточного азимута проявляется транзитная структура северо-северо-западного простирания, отображающая гипотетическую шовную зону.

На основании полученных материалов построена физико-геологическая модель горного массива (рис.2). Представления о допустимых формах и содержании физико-геологической модели зафиксированы как в классической геофизической литературе [15], так и в последней редакции геологического словаря (ВСЕГЕИ, 2012). Физико-геологическая модель имеет вид разреза, особенности которого выведены на основе комплексирования и анализа различной геофизической и геологической информации, и отображает литологические и физические характеристики геологической среды, позицию стратиграфических и тектонических контактов.

Переход к производным более высокого порядка традиционно относится к повышению разрешающей способности метода.

Данные для построения физико-геологической модели сформированы среднемасштабной (1:200000) геологической основой (геологической картой и разрезом), предоставленной картографическим онлайн-ресурсом ВСЕГЕИ, а также данными лабораторного анализа пробоотбора и первичными количественными оценками по карте АМП. В структуре модели отражена область формирования шовной зоны, разделяющей интервал подъема кристаллического основания от зоны развития осадочного субстрата. Тектонически эта шовная зона маркирует элемент краевого шва Предстанового прогиба на южной окраине Алданского плоскогорья и играет роль рудоконтролирующего фактора по отношению к одному из эталонных объектов с золотосульфидной полезной нагрузкой. Как видно из рис.2, большая часть территории исследуемого полигона приходится на северный фланг флексуры, сложенной метаморфогенными и магматогенными породами архейского возраста, в системе которых наблюдается погружение поверхностей напластования на северо-запад при угле падения порядка 30° . В северной части полигона данная структурная картина сменяется моноклиальным залеганием осадочных формирований юрского возраста.



Таблица 1

Характеристика использованных трансформаций АМП

Трансформация	Математическая суть	Назначение
Вертикальный градиент АМП	$\partial T_a / \partial z$ – скорость затухания АМП при пересчете вверх	Работает как фильтр верхних частот. Удаляет из поля региональную составляющую, обусловленную крупными глубинными объектами. В результате контрастно подчеркиваются магнитные объекты, находящиеся вблизи поверхности. Хорошо видны также структурные особенности поля, связанные с тектоническими нарушениями
Полный горизонтальный градиент АМП	$Hor_grad = \sqrt{(\partial T_a / \partial x)^2 + (\partial T_a / \partial y)^2}$ Вычисляется как корень квадратный из суммы квадратов производных по x и y направлениям. Показывает скорость изменения поля в горизонтальном направлении. Является всегда положительным числом. Как правило, имеет большой динамический диапазон и логнормальное распределение, поэтому данный параметр удобно изображать в логарифмическом масштабе	Работает как фильтр верхних частот. Подчеркивает зоны наибольшего изменения поля (точка перегиба на графиках), которые часто отвечают границам выхода магнитных тел на поверхность. Хорошо подчеркиваются ступени поля, обусловленные тектоническими границами
Полный градиент АМП или аналитический сигнал AS	$AS = \sqrt{(\partial T_a / \partial x)^2 + (\partial T_a / \partial y)^2 + (\partial T_a / \partial z)^2}$ Вычисляется как корень квадратный из суммы квадратов производных по x , y и z направлениям. Является всегда положительным числом. Форма аномалий AS не зависит от направления намагниченности тел. Как правило, имеет большой динамический диапазон и логнормальное распределение, поэтому данный параметр удобно изображать в логарифмическом масштабе	Работает как фильтр верхних частот. Так как AS не зависит от направления намагничивающего вектора, то максимум AS всегда находится над центром верхней кромки магнитного тела. Для тел с большой горизонтальной протяженностью (субпластовые тела) максимумы AS образуются над границами тел
Тилт-трансформация	$Tilt = \text{atan}(\partial T_a / \partial z) \cdot \sqrt{(\partial T_a / \partial x)^2 + (\partial T_a / \partial y)^2}$ Арктангенс отношения вертикальной производной к полному горизонтальному градиенту. Изменяется в диапазоне от -90° до 90° . Положение минимумов и максимумов $Tilt$ полностью соответствует положению минимумов и максимумов АМП	Работает как автоматический регулятор усиления в теории обработки радиосигнала. Удаляет из поля амплитудные характеристики, оставляя только структурные особенности. Подходит для структурного дешифрирования геофизических полей. Позволяет проследить слабые линейные аномалии и выявить слабопроявленные пликативные и разрывные тектонические нарушения

По распределению магнитной восприимчивости в пределах данной модели наблюдается заметная дифференциация, связанная с различным объемным процентом содержания магнетита. Так, аляскитовые граниты, залегающие в центральной и северной частях полигона, характеризуются магнитной восприимчивостью в диапазоне от 10^{-5} до 10^{-3} ед., что дает в пределах этого комплекса вариацию магнитного поля T на несколько сотен нТл (до 500). Контактующие с аляскиотовыми гранитами амфиболит-пироксеновые гнейсы и сланцы федоровской свиты обладают магнитной восприимчивостью в диапазоне от первых единиц до первых десятков единиц СИ, что проявляется скачком магнитного поля на 2000 нТл относительно значений T для аляскиотовых гранитов. В пределах федоровской свиты вариация T составляет нескольких сотен нТл (до 800). Контактующим с комплексами федоровской свиты в южной части полигона гранитогнейсам отвечает магнитная восприимчивость от 10^{-3} до 10^{-2} , что определяет малую изменчивость магнитного поля в пределах гранитогнейсов (до 200 нТл) и промежуточное значение среднего уровня T по отношению к среднему уровню магнитного поля, свойственного аляскиотовым гранитам, федоровским гнейсам и сланцам.

Последующий морфоструктурный анализ реализован посредством авторских программ картирования [4] – линеаментных структур (на основе данных дистанционного зондирования Земли) и геоструктурных элементов (на основе АМП), их классификации и последующей разбивки с применением расчета областей пространственной стационарности геополей. В качестве исходных материалов для параметрического линеаментного дешифрирования применялись

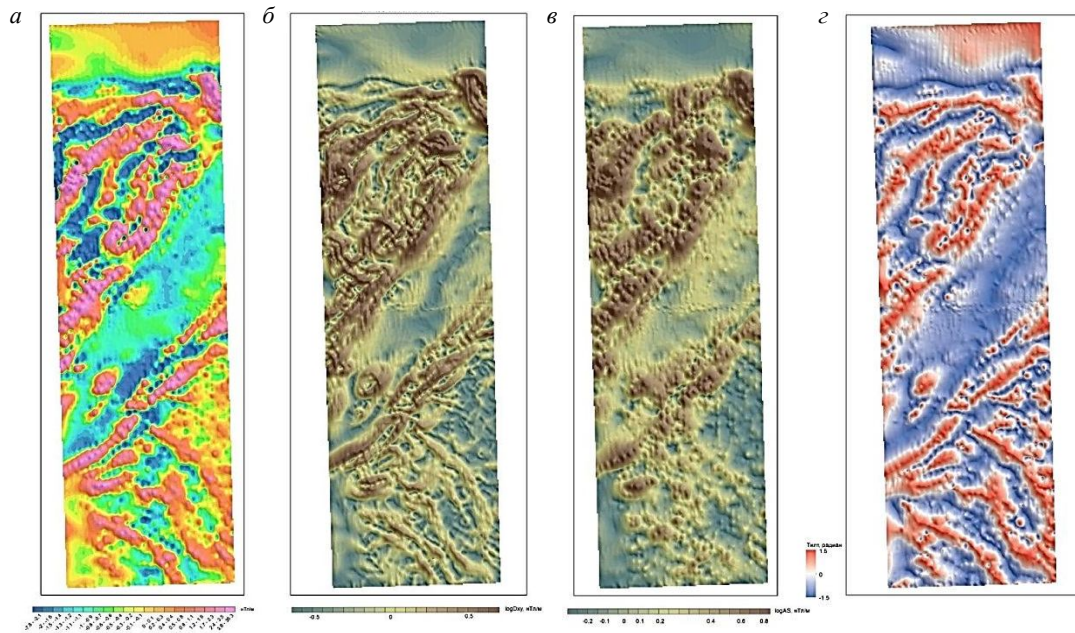


Рис.1. Трансформации АМП: а – вертикальная компонента вектора градиента АМП; б – горизонтальная компонента; в – модуль вектора; г – тилт-трансформация

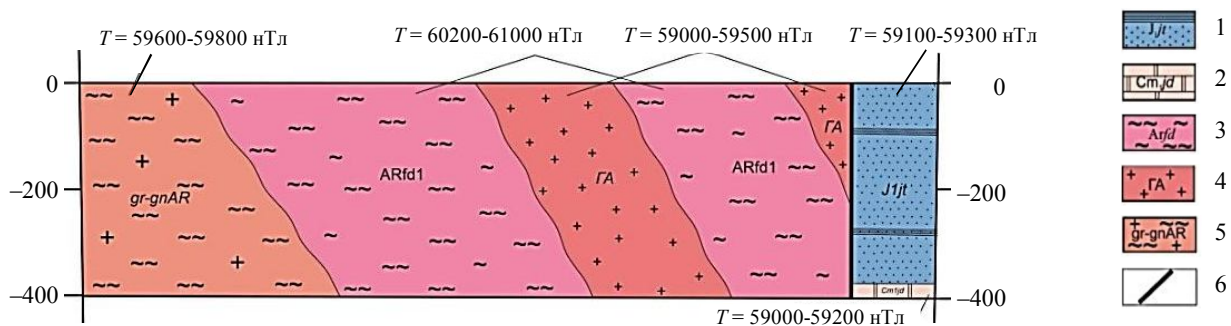


Рис.2. Физико-геологическая модель исследуемой территории, показывающая контакт двух геоблоков разной структуры и возраста

1 – юрская система, нижний отдел. Юхтинская свита нерасчлененная. Песчаники, гравелиты, алевролиты, базальные конгломераты; 2 – кембрийская система, нижний отдел. Юдомская свита. Доломиты с пластами песчаников и конгломератов переменной мощности в основании; 3 – архейская группа, иенгская серия. Федоровская свита, нижняя подсвита. Амфиболитовые, биотит-амфиболитовые, пироксеновые гнейсы и кристаллические сланцы; 4 – аляскинские нерасчлененные граниты: биотитовые, биотит-амфиболитовые и аляскинские; 5 – архейские глубоко гранитизированные породы и гранитогнейсы; 6 – установленное разрывное нарушение

инфракрасный канал космической съемки с межпиксельным интервалом порядка двух метров, комбинированный с ЦМР. Конечным результатом разбраковки и генерализации схемы линейных морфоструктурных элементов выступает ранжированный морфоструктурный образ полигона (рис.3).

Анализ материалов, отраженных на рис.3, демонстрирует общность морфологии геополей (рис.3, а, в) и ее корреляцию с первичной геологической основой (рис.3, б). Обращаясь к дистанционному снимку местности, как материалу высокой пространственной разрешающей способности, видно разделение полигона на две области со своей пространственно стационарной структурой: северную часть полигона, занимающую более трети его площади и характеризующуюся сложной морфологией структурных поверхностей при доминирующем их субширотном простирании; среднюю и южную часть полигона, обладающую монотонной пространственной динамикой структурных поверхностей при их общем субмеридиональном и северо-северо-западном простирании. Можно увидеть, что линеаментное и геоструктурное дешифрирования (рис.3, г)

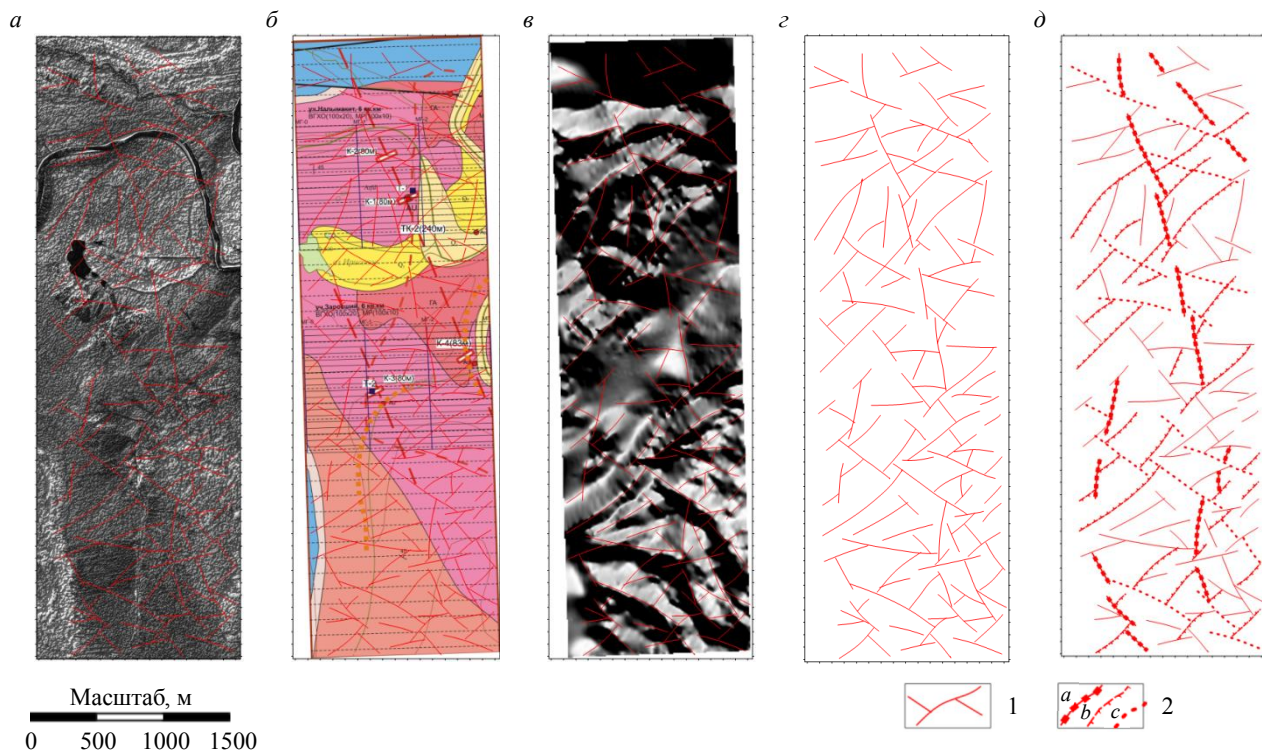


Рис.3. Результаты комбинированного морфоструктурного анализа: *a* – инфракрасный канал дистанционного образа исследуемого полигона, комбинированный с ЦМР; *б* – общий вид стратиграфических и тектонических границ на первичной геологической основе полигона (известные рудопроявления маркированы коричневыми кружками); *в* – АМП в 8-битовом полутоновом представлении; *г* – образ линейных структур, исходно картируемый по дистанционной основе (рис.3, *a*) и разбраковываемый с применением цифровой модели АМП (рис.3, *в*); *д* – результат первичного ранжирования разбракованной линейной схемы по степени контрастности проявления протяженных структур

1 – линейные протяженные структуры малой контрастности и сильной раздробленности; 2 – протяженные структуры, формирующие квазипериодические системы разной контрастности (*a* – 0,5-0,7; *b* – 0,4-0,6; *c* – 0,3-0,4)

выделяют по отношению к заявленным азимутам простирания субортогональные транзитные структуры. Как демонстрирует первичная геологическая основа, к области пересечения некоторых из этих структур тяготеют известные рудопроявления. Наложение разбракованной линейной схемы на дистанционную основу (рис.3, *a*) и полутоновое представление АМП (рис.3, *в*) отражает наличие в современном ландшафте и потенциальном геополе откликов, порожденных одними и теми же эндогенными объектами. Разбракованная линейная схема в отсутствие каких-либо ранжирований подобна структуре «битой тарелки» (рис.3, *г*) – не отображает значимых закономерностей. Поэтому на этапе первичных оценок применялась классификация линейных структур по контрастности их проявления (рис.3, *д*). Даже в таком варианте примитивной градации можно заметить организацию сонаправленных протяженных структур в квазипериодические семейства, к узлам пересечения которых тяготеют отмеченные рудопроявления. Окончательный вариант ранжирования в проекте реализован на основе алгоритма эллиптического скользящего окна, длина полуосей которого определяется радиусами автокорреляции, а ориентировка большей полуоси – доминирующим простиранием изолиний в малой окрестности центра окна. На основании ограниченной выборки точек измерений геополя, попадающей в пределы скользящего окна, вычисляется радиус автокорреляции, поле значений которого отображено на рис.4, *a*:

$$r_{ACF} = \sqrt{r_x r_y} = \left((4R(0,0))^{-1} \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} R(\xi, \psi) \partial \xi \partial \psi \right)^{1/2},$$

где *R* – автокорреляционная функция исходного геополя (АМП).

Вынося с исходной геологической основы (см. рис.3, *б*) маркеры позиции эталонных объектов (золоторудных проявлений) на схему изолиний скалярного поля радиуса автокорреляции (рис.4, *a*),

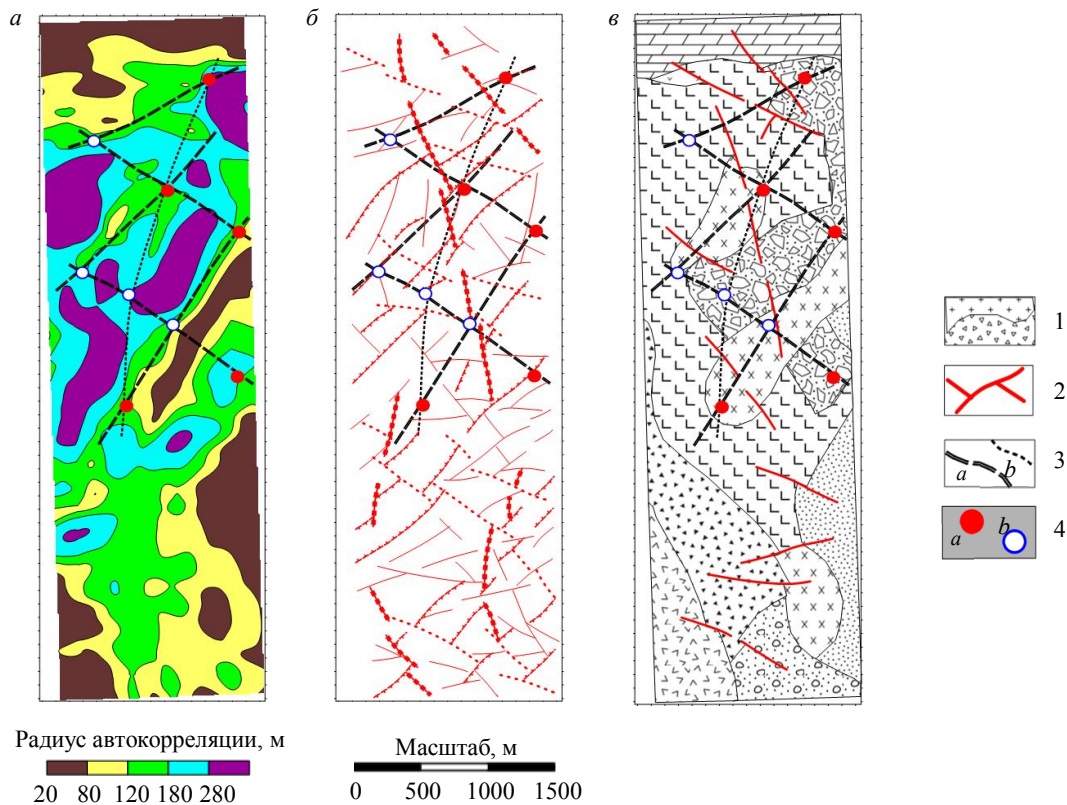


Рис.4. Морфоструктурный прогноз, реализуемый по ограниченному семейству геоблоков: *а* – схема распределения областей пространственной стационарности АМП (в терминах радиуса автокорреляции); *б* – верификация рудоконтролирующих соосных структур посредством сравнения со схемой ранжированных линейментов, приведенной на рис.3, *в* – актуализация геологической основы по рис.4, *а* и верификация морфоструктурных прогнозных маркеров

1 – области пространственной стационарности – геоблоки; 2 – разбракованные линейментные структуры высокой контрастности – элементы дизъюнктивной тектоники; 3 – дискордантные рудоконтролирующие структуры высокой (*а*) и малой (*б*) контрастности; 4 – маркер эталонного (*а*) и прогнозируемого (*б*) золоторудных проявлений

можно отметить, что все эталонные маркеры попадают в градиентные области этого поля. При этом наблюдается тяготение эталонных маркеров к детерминированной зоне значений коэффициента автокорреляции от 180 до 280 м, а сами градиентные области организуются в пересекающиеся (дискордантные) протяженные структурные оси. Размещая эталонные маркеры в узлах реконструируемой решетки дискордантных структур, получаем закономерную квазипериодическую систему, в пределах которой позиция эталонов укладывается в детерминированный диапазон, определяемый как прогнозный маркер или аналог рудного интервала. Обобщение отмеченных особенностей приводит к трем объективно наблюдаемым феноменам:

- рудоконтролирующие дискордантные структуры верифицируются как в поле значений радиуса автокорреляции (рис.4, *а* – в области сочленения градиентных зон разного простирания, проявленных в данном поле), так и в независимо полученном семействе ранжированных линейментов (рис.4, *б*);
- узлы реконструированной квазипериодической сетки дискордантных структур, где размещены маркеры, прогнозные на золоторудное проявление, тяготеют к градиентным зонам в поле значений радиуса автокорреляции (рис.4, *а*), как и эталонные объекты;
- в системе геоблоковых структур (рис.4, *в*), границы которых прослеживались по градиентным зонам в поле на рис.4, *а*, эталонные и прогнозные маркеры тяготеют к элементам разрывной тектоники либо к границам геоблоков.

Данная система прогнозирования укладывается в парадигму волнового структурирования геологической среды, неравновесной в плотностном отношении [4]. В рамках выполненной апробации можно настаивать на представительности выделенных прогнозных маркеров, размещенных



в пределах области задания эталонных маркеров (коренных золоторудных проявлений) или на расстоянии единичного «рудного интервала» за пределами этой области.

После завершения верификации реализованного морфоструктурного прогноза применяется решение обратной задачи, включающей два этапа:

1. Аналитическое продолжение АМП с линии наблюдений в объем горного массива с получением параметрического разреза в форме разночастотных составляющих этого поля, отнесенных к разным глубинам. Принцип отнесения детерминированной составляющей АМП к строго заданной глубине опирается на общеизвестное соотношение:

$$S(\omega, h) = S(\omega, 0) \exp(h|\omega|),$$

где $S(\omega, 0)$ – Фурье-спектр магнитного поля, измеренного на земной поверхности; h – глубина аналитического пересчета; $S(\omega, h)$ – Фурье-спектр магнитного поля, пересчитанного на глубину h .

2. Применение к полученному параметрическому разрезу семейства градиентных фильтров $G(\tau)$ в режиме свертки:

$$\tilde{F}(x, h) = \iint F(x, h) G(x \pm \tau_x, h \pm \tau_h) \partial \tau_x \partial \tau_h,$$

где $F(x, h)$ – результат обратного преобразования Фурье с переходом из спектральной плоскости, где задана $S(\omega, h)$ в предметную плоскость; $G(\tau)$ – два последовательных фильтра, реализующих сначала расчет пространственной изменчивости аналитически продолженного геополя, затем – сглаживание с помощью весовой функции Гаусса. Для повышения детальности итогового изображения к данным фильтрам добавляется расчет пространственной производной первого порядка по избранному (доминирующему) простиранию.

Результат глубинной реконструкции приведен на рис.5, б, где вынесены проекции позиций эталонных и прогнозных маркеров: 2600 и 5500 м по линии профиля – для эталонных маркеров;

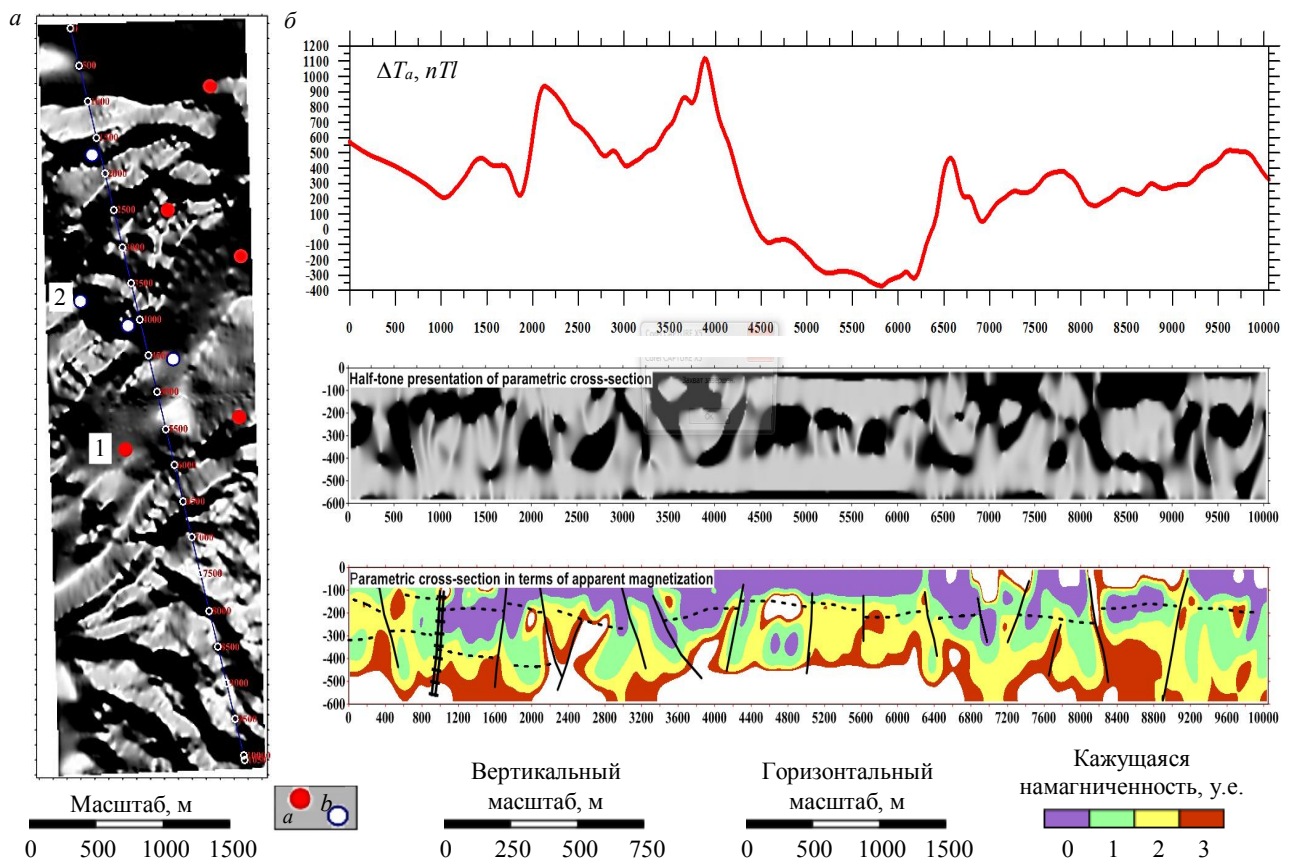


Рис.5. Отбор значений АМП по профилю, проложенному вкост доминирующих простираний рудоконтролирующих структур (а) с последующим аналитическим продолжением (б)
Условное обозначение см. на рис.4



1600-1700, 4000 и 4500 м – для прогнозных маркеров (рис.5, а). В структуре параметрического разреза можно видеть наличие крутопадающих структурных поверхностей на позиции 2600 и 5000 м (полутоновой образ), коррелирующихся с образом субвертикальных «плюмов» (в распределении кажущейся намагниченности). Принимая эти особенности в качестве прогнозирующих параметрических маркеров, получаем:

- на прогнозной позиции 1600-1700 м имеет место крутопадающая структурная поверхность, комбинируемая с мало контрастным «плюм»-образом;
- на прогнозной позиции 4000 м наблюдается крутопадающая структурная поверхность и контрастный «плюм»-образ;
- на прогнозной позиции 4500 м наблюдается мало контрастная крутопадающая структурная поверхность и мало контрастный «плюм»-образ.

Привязка эталонных и прогнозных маркеров к линии профиля осуществляется посредством нанесения метража на линию профиля и проекции на эту линию ближайших маркеров (рис.5, а). На параметрическом разрезе (в терминах безразмерного распределения кажущейся намагниченности (рис.5, б) достоверные эталонные и прогнозные маркеры коррелируют с образом резкого нарушения монотонности залегания структурных поверхностей в форме «плюм»-структур.

Таким образом, получена основа для ранжирования объектов, перспективных на золоторудное проявление, в части очередности планируемых детализационных (наземных) изысканий. Завершая интерпретационные оценки, нужно отметить, что параметрический разрез на рис.5, б противоречит физико-геологической модели на рис.2, так как наряду с субвертикальной расслоенностью горного массива отражает субгоризонтальную его стратификацию. Это противоречие оценивается как кажущееся, и субгоризонтальная расслоенность разреза относится к уменьшению в интрузивных комплексах объемной плотности трещин с глубиной и, соответственно, к уменьшению с глубиной объемного содержания магнетита, преимущественно метаморфогенного [28].

При планировании детализационных изысканий рекомендуется результат полученных прогностических построений комбинировать с прошлыми геолого-геохимическими исследованиями. Так, единичные признаки золота в пределах картографического листа О-51-XXX обнаружены в шлиховых пробах р. Тимптон выше устья рек Чульмакан, Горбыллах и в отдельных пробах р. Улахан-Мелемкен. Возможно, источниками золота в шлиховых пробах по названным водотокам выступают размываемые реками россыпи металла за пределами листа. Рудопроявление золота на правом берегу р. Чульман установлено в 2002 г. С.А.Черновым и связывалось с explosивными брекчиями [29, 30]. Исходя из этих положений, предложены четыре участка (рис.6) для проведения поисковых работ, где наибольшими перспективами выявления золотоносной минерализации обладают зоны пересечения разнонаправленных тектонических нарушений в пределах гранитизированных комплексов.

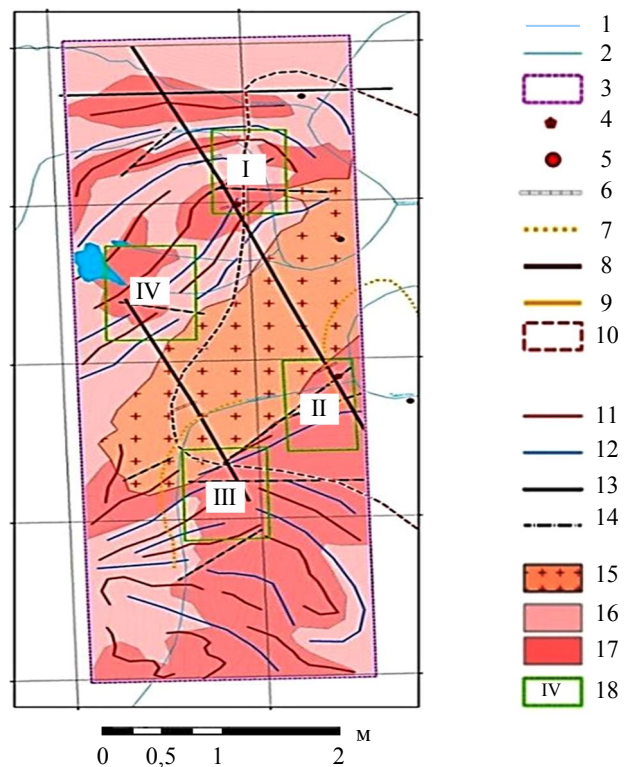


Рис.6. Планирование очередности детализационных работ (зеленые прямоугольники с нумерацией) на фоне упрощенного представления первичной структуры АМП

- 1 – изолинии рельефа через 20 м; 2 – реки и ручьи; 3 – участок аэромагнитной съемки; 4 – рудопроявления золота в explosивных брекчиях; 5 – шлиховая проба со значительным содержанием золота;
- 6 – каналы; 7 – перспективные потоки рассеяния; 8 – предполагаемые золоторудные тела; 9 – россыпи золота; 10 – ореол россыпной золотоносности; 11-14 – структурные линии магнитного поля: 11 – низкая намагниченность; 12 – высокая намагниченность;
- 13 – региональная тектоническая зона; 14 – зоны трещиноватости; 15 – архейские нерасчлененные аляскинские граниты; 16 – амфиболовые, биотит-амфиболовые, рироксеновые гнейсы и кристаллические сланцы; 17 – архейские глубоко гранитизированные породы и гранитоидные гнейсы; 18 – поисковые участки



Обсуждение. Аэромагнитная съемка с БПЛА обладает рядом преимуществ по сравнению с наземной и самолетной съемками. Сравнительный анализ видов магнитной съемки приведен в табл.2.

Таблица 2

Сравнение видов магнитной съемки

Параметр	Наземная съемка	Съемка с БПЛА	Большая авиация
Стоимость работ, руб./км	От 6500	От 2000	От 1500
Точность	Высокая подверженность шуму	Высокая, прецизионная	Средняя, сложная компенсация помех
Производительность, км/день	В среднем 15	До 220	До 1000
Подготовка к работам	Сложная	Простая	Сложная/дорогая
Человеческий фактор	Высокая вероятность ошибки	Отсутствует	Средняя вероятность ошибки, риск для жизни экипажа

На основании данных, полученных на участке исследований и прошлого опыта применения БПЛА при магниторазведке в России и за рубежом, поставлена цель совершенствования методики аэромагнитной съемки с БПЛА так, чтобы качество получаемых данных оказывалось соизмеримым с качеством наземных и самолетных типов магнитных съемок. Для этого разработаны рекомендации к беспилотной аэромагнитной съемке:

1. Увеличение числа контрольных маршрутов. В аэромагнитной съемке с БПЛА их объем определяется формально – на основе масштаба и задач, согласно техническому заданию. В соответствии с инструкцией по магниторазведке за 1981 г., рекомендованный объем контрольных измерений составляет не менее 5 % от общего количества рядовых маршрутов, а при опытно-методических съемках – не менее 10 %. При проведении аэромагнитной съемки с БПЛА необходимо всегда покрывать не менее, чем 10 % площади съемки контрольными измерениями, но не более 20 %, что определяется фактором экономической рентабельности [31, 32]. Такой объем контрольных измерений необходим для корректной оценки среднеквадратической ошибки съемки, как критерия качества аппаратурных измерений:

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i^2}{2(n-1)}}$$

где Δ_i – разности ординат окончательных графиков ΔT или ΔT_a на рядовых и независимых диагональных секущих маршрутах в точках их пересечения; n – число разностей Δ_i , $n > 50$.

2. «Нахлест» на опорных и секущих маршрутах. Согласно стандартным требованиям, опорные и секущие маршруты должны выполняться за один пролет в день выполнения рядовых пролетов. Данное условие не всегда соблюдается при съемке с борта дрона: максимальная длительность полета квадрокоптера составляет 1 ч (с полезной нагрузкой в виде магнитометра максимальное время полета будет не более 45 мин), и по техническим параметрам дрон может не долететь до конца маршрута на большом участке съемки [33]. Для минимизации влияния данного фактора предлагается выполнять «нахлест» 200-500 м между полетом по одному и тому же опорному и секущему маршрутам в один и тот же день. Затем участки необходимо «сшивать» в процессе первичной (до интерпретации) обработки данных магнитной съемки.

3. «Контрольный пролет» до и после рядового маршрута по одному и тому же участку за пределами площади съемки (аналогично контрольному пункту при наземном варианте магнитной съемки). Необходим для проверки корректности работы аппаратуры. Данные «пролеты» иногда используются для предварительной грубой увязки результатов аэромагнитной съемки. Если среднеквадратическая ошибка будет более 5 нТл, то необходимо выполнить перелет рядового маршрута.

4. «Звезда» – форма полета, реализуемого перед началом системных измерений на площади для проверки корректности работы оборудования. Это нужно для вычисления ориентационной погрешности комплекса (среднее квадратическое отклонение фактического положения гондолы



от заданного не должно превышать двух метров) и последующего введения поправок при обработке данных.

5. Увеличение числа разворотов измерительного комплекса за контуром участка работ необходимо для увеличения времени, отводимого магнитометру для принятия стабильного положения на подвесе при минимизации его раскачивания. Процедура позволит свести к минимуму технически обусловленные «вылеты» получаемых значений магнитного поля и обеспечить корректность данных. Рекомендуемая длина разворотов составляет минимум 150 м.

6. Обеспечение разновысотной съемки для верификации результатов аналитического продолжения и получения в разной степени генерализованных образов аномалеобразующих объектов [34, 35]. Процедуру возможно выполнить только средствами беспилотной авиации в отсутствие таковых при наземной съемке и экономической нерентабельности в условиях применения большетоннажных аэроносителей. Аппаратурные оценки структуры поля при реализации разновысотных срезов отличаются единственным характером, тогда как обратная задача определяется как некорректная из-за множественного характера конечного решения [36].

7. Реконструкция вертикальных профилей для более корректной интерпретации данных и сужения эквивалентного множества решения обратной задачи теории потенциала. С этой целью квадрокоптер с постоянной скоростью совершает полет по вертикальной траектории сначала вверх на определенную высоту, затем с такой же скоростью вниз. Данная процедура рациональна для угловых точек площади съемки и в своей реализации обладает методической особенностью: магнитометр должен быть жестко и неподвижно закреплен на подвесе для минимизации влияния на измерения сильных атмосферных потоков и снижения ориентационной погрешности измерительного комплекса [36].

8. Создание ЦММ (цифровой модели местности) и ЦМР для участка съемки. ЦММ в силу своей большей детальности призвана исключить аварийный контакт БПЛА с природными и техногенными локальными формами земной поверхности. ЦМР должна обеспечить полеты с избирательным и детальным огибанием локальных форм рельефа. Файлы с ЦММ и ЦМР предназначены для загрузки в память магнитометрического квадрокоптера.

9. Грамотный выбор масштаба съемки. Для достоверного дешифрирования, особенно в условиях складчатых и тектонических структур, нужно проводить аэромагнитную съемку в более крупных масштабах, чем 1:25000 или 1:10000. Необходимые масштабы – 1:5000; 1:2000 и т.д. Для этого применяется техническое правило: расстояние между маршрутами должно быть сопоставимо с высотой наблюдения полета магнитометра. В случае корректной ориентации профилей вкрест доминирующего простирания геоструктурных элементов, проявленного в розе направленности линеаментов, АМП фиксирует большую часть структурно-литологических и структурно-петрографических аномалий полигона. Глубинный характер этих аномалий определяется корректным внесением поправки в АМП, учитывающей влияние на его амплитудно-частотный состав локальных форм земного рельефа.

10. Использование двух и более измерительных комплексов одновременно для обеспечения режима накопления и увеличения соотношения сигнал/помеха в режиме прямых измерений [37].

11. Беспроводная передача данных по Wi-Fi-сети через систему ретрансляторов. В комплексе «Геоскан 401 Геофизика» реализуется запись данных магнитометрии и позиционирования в автоматическом режиме на съемную флэш-карту. Процедура беспроводной передачи данных способна обеспечить комплекс предварительного (в режиме реального времени съемок) качественного и количественного анализа магнитного поля. Актуальность процедуры связана с непредсказуемыми погодными факторами и издержками организации самих полевых работ.

12. Применение безотказной спасательной системы измерительного комплекса, которая напрямую определяет рост рентабельности беспилотных геофизических измерений за счет редукции необратимых потерь как самого измерительного комплекса, так и накопленных им данных. Предлагается два варианта спасательных систем для каждой из составляющих комплекса:

а) для квадрокоптера – парашют; кнопка экстренного выброса парашюта, встроенная в модем связи, будет срабатывать даже при выходе наземной станции управления из строя;

б) для магнитометра – система автоотцепа капронового шнура с прибором от беспилотного летательного аппарата.



13. Разработка бесперебойной системы позиционирования, предполагающей как комбинирование спутниковых навигационных систем GPS и ГЛОНАСС, так и зарекомендовавшую себя в период доспутниковых аэросъемок методику триангуляции по системе наземных радиомаяков. В используемом магнитометре установлен GPS-датчик компании НАВИС с точностью позиционирования примерно ± 10 м. Несмотря на данный относительно качественный показатель, точность пространственной привязки можно увеличить за счет внедрения альтернативных датчиков. Так, датчик швейцарской фирмы U-blox позволит реализовать точность определения положения до ± 5 м. Введение поправок в специализированной программе MAGNET Tools для полученных данных с датчика U-blox допускает рост точности привязки до $\pm 20-30$ см (при сильных шквалах ветра максимум до ± 50 см).

Приведенный способ прогнозирования дополняется в рамках научно-производственных работ распознаванием образов с обучением, включающим:

- формирование активационной функции на основе обученных нейросетей;
- реконструкцию вероятностных ореолов, детектирующих степень достоверности прогноза при нелинейном (модифицированном) дискриминантном анализе;
- оценку множественной корреляции между произвольной и эталонной спектральными сигнатурами, выделяемыми в структуре данных дистанционного зондирования (спектральной съемки).

Несмотря на теоретическую потребность в поэтапном уточнении результатов рассмотренного морфоструктурного прогноза, отмеченные способы распознавания с обучением требуют увеличения объема экспериментальной выборки, как правило, за счет применения геополей, измеренных физически независимыми способами. Имитация расширения выборки за счет накопления трансформант одного геополя часто приводит к накоплению первичной погрешности измерений, что на выходе определяет сильно диспергированную структуру прогнозных карт. Разработанный и апробированный способ морфоструктурного прогноза отличается применимостью в условиях ограниченной выборки: в данном случае – инфракрасным каналом дистанционной съемки и распределением значений АМП. В рамках рассмотренной методики беспилотной аэромагнитной съемки увеличение объема анализируемой выборки может быть реализовано посредством включения в стадию количественного анализа ЦММ и ЦМР, а также комплексирования магнитометрических измерений с тепловизионными и аэрогамма-спектрометрическими оценками.

Методика морфоструктурного прогноза активно дополняется безэталонными маркерами аномального состояния горного массива, что можно назвать принципиальным в условиях некоторой неоднозначности рассмотренных интерпретационных построений. Примером такой неоднозначности может выступать генерализованный морфоструктурный образ полигона (см. рис.3, *з*): переход от семейства разрозненных локальных линеаментов к закономерной системе протяженных структур и их дискордантных соотношений опирается на регуляризирующий функционал. Другой пример неоднозначных построений (рис.4, *а*): структура подразумевает потребность в итерационном подборе точной позиции градиентных зон, обеспечивающей минимальное среднеквадратичное отклонение от оси этих зон эталонных рудных объектов. Третий пример относится к множественности гипотез, касающихся проявления в измеряемых геополях рудоконтролирующих факторов. Отвлекаясь от концепции соосных и дискордантных рудоконтролирующих структур, предлагается обратить внимание на рис.5, *а*, где семейство эталонных и прогнозных рудных объектов тяготеет к периферии кольцевой структуры, контрастно проявленной в полутоновом образе АМП. Контур этой структуры отражены на рис.7. Вместе с отмеченной неоднозначностью можно сказать, что картирование рудоконтролирующей кольцевой структуры, к контурам которой тяготеет 100 % эталонных и прогнозных рудных маркеров, дополнительно верифицирует обоснованный итог морфоструктурного анализа. В южной части области задания АМП можно наблюдать подобную циркуидную форму, при том, что некоторые из рудоконтролирующих протяженных геоструктур явно простираются в направлении центра кривизны южной циркуидной структуры. Таким образом, может быть поднят вопрос расширения площади детализации наземными съемками при выяснении рудогенеза в южной части полигона.



Заключение. Магнитометрические съемки, в том числе с борта беспилотных носителей, апробируются около 30 лет в России и за рубежом, успев зарекомендовать себя на рынке как надежный геофизический метод. Отмеченная надежность формируется на основе ряда методических ухищрений и технологических совершенствований, которые со временем сформируют единую методическую основу, зафиксированную в нормативной документации. На данный момент такой документации не существует даже для применения БПЛА в кадастровой съемке без учета геолого-геофизических изысканий. Поэтому система сформулированных рекомендаций по улучшению качества и повышению рентабельности беспилотной аэромагниторазведки обладает выраженной актуальностью. Особенно это относится к пунктам, касающимся авторских методик оптимизации простирания полетных маршрутов и внесения поправки, учитывающей влияние локальных форм земного рельефа на структуру АМП. Первый из этих пунктов касается параметрической разработки реконструкции геоструктурного образа полигона, которая в своей алгоритмической реализации составляет выраженную конкуренцию отечественной WinLESSA и канадской PCI Geomatica. Ознакомившись с сайтами этих программных разработок, предложенный алгоритмический модуль, опираясь на критерий минимизации дисперсионного функционала, способен выделять не только интегральные характеристики линеаментного поля (как WinLESSA) и очевидные пространственные структуры (как PCI Geomatica), но и картировать малоcontrastные геоструктурные элементы, включая циркоидные. Особую значимость модуль морфоструктурной реконструкции приобретает в части единой критериальной основы для качественной интерпретации потенциальных и непотенциальных полей при их комплексировании. На этом фоне апробация технологии внесения поправки в АМП за локальные формы рельефа позволяет определить позицию линеаментных структур, отвечающих эндогенным геоструктурным формам, в большинстве представленным элементами разрывной тектоники, активизированными в настоящее время.

Разрабатываемая дополнительно к технологии самих магнитометрических съемок методика качественной и количественной интерпретации призвана решать две принципиальные задачи: прогнозирование коренных рудных объектов в условиях минимума геолого-геофизической фактуры и сокращение временного разрыва между полевой съемкой и ее геоструктурной интерпретацией. Необходимы стандартные методы распознавания образов с обучением (дискриминантный анализ, метод k -средних) как можно большего числа независимых геолого-геофизических признаков, детектирующих эталонный объект. Эта же необходимость присутствует в технологии нейросетевых оценок. В представленном алгоритме применяются волновые аналогии, допускающие прогнозные построения на основании только первичных геоморфологических съемок с построением и комплексированием ЦММ и ЦМР при разбраковке результата на основе морфоструктурного

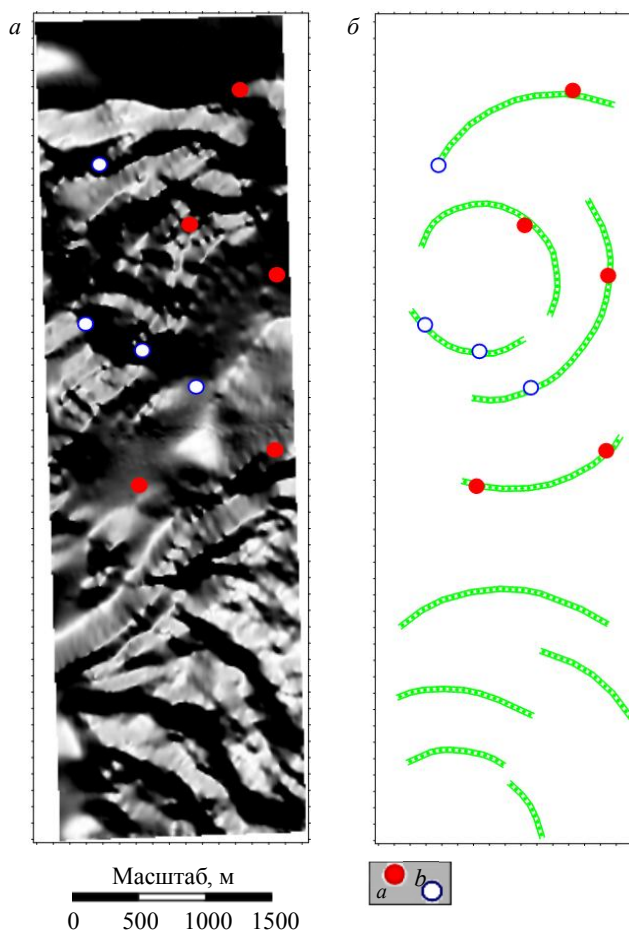


Рис. 7. Образ нелинейной (циркоидной) рудоконтролирующей структуры, альтернативный образу соосных и дискордантных рудоконтролирующих структур на рис. 4: *a* – полутоновой образ АМП с нанесенными на него эталонными и прогнозными маркерами при подборе азимута подсветки, контрастирующей образ рудоконтролирующей циркоидной структуры; *б* – результат дешифрирования контуров рудоконтролирующей кольцевой структуры в северной части полигона и кольцевой структуры близкой морфологии и линейных размеров в южной части полигона

Условное обозначение см. на рис. 4



анализа АМП. Присваивание какого-либо ранга значимости выявленным перспективным объектам оказывается возможным, апеллируя к итогам количественного истолкования АМП, опирающегося на те же волновые аналогии. Применимость последних как в рамках геолого-разведочных задач, так и для решения менее глубоких и более предметных инженерно-геофизических задач, подтверждается 20-м опытом.

Побочным итогом представленных изысканий выступает экспресс-оценка результатов дистанционного зондирования на этапе формирования ЦММ и ЦМР или на стадии магнитометрических измерений. Если в первом случае имеются в виду линейные реконструкции, то во втором – количественная интерпретация АМП по отдельным маршрутам (до стадии увязки и выравнивания сети наблюдений). Таким образом, открывается возможность формирования единого аппаратно-программного конгломерата, способного в режиме реального времени формировать геологически значимый результат. В отношении данного конгломерата нужно отметить направление безэталонного прогноза, развиваемого отделами ВИРГ «Рудгеофизика» в советский период становления геологической отрасли в РФ: концепцию рудоконтролирующих дискордантных структур, развиваемую Т.А.Милаем и В.К.Орловым, маркирование ослабленных зон центрами тектонических напряжений в программном комплексе LEGRA (MARS). В данной работе эти критерии получили свое представление на примере геологического полигона – одного из перспективных золоторудных регионов.

Авторы выражают благодарность генеральному директору АО «НИИ телевидения» А.Е.Семенову, генеральному директору ООО «Геоскан» А.В.Юрецкому и руководителю проекта аэромагнитной съемки с БПЛА ООО «Геоскан» Д.А.Гоглеву за предоставленные материалы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гурьев К.Н. Якутский Клондайк – Золотой Алдан // Историко-географический культурологический журнал. 2005. № 2 (43). С. 48-54.
2. Максимов Е.П. Мезозойские рудоносные магматогенные системы Алдано-Станового щита: Автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. Якутск: Институт геологии алмаза и благородных металлов, 2003. 47 с.
3. Молчанов А.В., Терехов А.В., Шатов В.В. и др. Золоторудные районы и узлы Алдано-Становой металлогенической провинции // Региональная геология и металлогения. 2017. № 71. С. 93-111.
4. Petrov O.V., Movchan I.B. Applied aspects of dissipative structuring theory to the nonequilibrium geological environment // The Earth's Dissipative Structures. Fundamental Wave Properties of Substance. Springer, 2019. P.187-255. DOI: 10.1007/978-3-319-93614-7
5. Semenova T., Al-Dirawi A. Economic Development of the Iraqi Gas Sector in Conjunction with the Oil Industry // Energies. 2022. Vol. 15. Iss. 7. № 2306. DOI: 10.3390/en15072306
6. Кузьмин Д.К. Группа компаний «Геоскан» – будущее в геоинформационном обеспечении // Горная промышленность. 2015. № 2 (120). С. 98-99.
7. Тарасов А.В., Ихина Э.Р., Каюков А.Е., Гоглев Д.А. Опыт применения низковысотной аэромагнитной съемки с комплексом Геоскан-401-Геофизика на Сыньнырском ультракалийевом массиве // Разведка и охрана недр. 2019. № 10. С. 20-31.
8. Скуднева О.В. Безальтернативность беспилотных летательных аппаратов в реалиях современной геополитики // Научные тенденции: вопросы точных и технических наук, 12 октября 2018, Санкт-Петербург, Россия. ЦНК МОАН, 2018. С. 27-35. DOI: 10.18411/spc-12-10-2018-09
9. Фирсов А.П., Злыгостев И.Н., Савлук А.В. и др. Аэромагнитная низковысотная съемка с БПЛА: достижения, перспективы, проблемы // Эффективность геологоразведочных работ на алмазы: прогнозно-ресурсные, методические, инновационно-технологические пути ее повышения, 29 мая – 1 июня 2018, Мирный, Россия. Алроса, 2018. С. 325-330.
10. Dandan Jiang, Zhaofa Zeng, Shuai Zhou et al. Integration of an Aeromagnetic Measurement System Based on an Unmanned Aerial Vehicle Platform and Its Application in the Exploration of the Ma'anshan Magnetite Deposit // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 189576-189586. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3031395
11. Mahmut Sari, Aysel Seren, Selcuk Alemdag. Determination of geological structures by geophysical and geotechnical techniques in Kirklartepe Dam Site (Turkey) // Journal of Applied Geophysics. 2020. Vol. 182. № 104174. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2020.104174
12. Malehmir A., Dynesius L., Paulusson K. et al. The potential of rotary-wing UAV-based magnetic surveys for mineral exploration: A case study from central Sweden // The Leading Edge. 2017. Vol. 36. Iss. 7. P. 538-620. DOI: 10.1190/tle36070552.1
13. Parshin A., Morozov V., Blinov A. et al. Low-altitude geophysical magnetic prospecting based on multirotor UAV as a promising replacement for traditional ground survey // Geo-spatial Information Science. 2018. Vol. 21. Iss. 1. P. 64-74. DOI: 10.1080/10095020.2017.1420508
14. Shiliang Liu, Wenping Li, Wei Qiao et al. Zoning method for mining-induced environmental engineering geological patterns considering the degree of influence of mining activities on phreatic aquifer // Journal of Hydrology. 2019. Vol. 578. № 124020. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.1214020



15. Гоглев Д.А. Маловысотная аэромагнитная съемка с применением беспилотных воздушных систем на базе квадрокоптера в археологии // Геопрофи. 2018. Т. 6. С. 20-22.
16. Черкасов С.В., Стерлингов Б.В., Семенов А.Е. Использование БЛА для решения геологических задач. Аэромагнитная съемка // Применение технологии Геоскан для дистанционного зондирования Земли и мониторинга объектов, март-апрель 2016, Санкт-Петербург – Москва, Россия. URL: http://fcpir.ru/upload/iblock/96b/corebofs000080000ki60oc8ddmf1s7c_presentation.pdf (дата обращения 20.10.2021).
17. Tada N., Ichihara H., Nakano M. et al. Magnetization structure of Nishinoshima volcano, Ogasawara island arc, obtained from magnetic surveys using an unmanned aerial vehicle // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2021. Vol. 419. № 107349. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2021.107349
18. Zamani A., Nedaei M., Boostani R. Tectonic zoning of Iran based on self-organizing Map // Journal of Applied Sciences. 2009. Vol. 9. Iss. 23. P. 4099-4114. DOI: 10.3923/jas.2009.4099.4114
19. Аникеева И.А., Кадничанский С.А. Оценка фактической разрешающей способности аэро- и космических фотоснимков по пограничной кривой // Геодезия и картография. 2017. Т. 78. № 6. С. 25-36. DOI: 10.22389/0016-7126-2017-924-6-25-36
20. Береговой Д.В., Мустафин М.Г. Методика автоматизированного создания топографического плана на основе съемки с беспилотного летательного аппарата // Геодезия и картография. 2018. Т. 79. № 9. С. 30-36. DOI: 10.22389/0016-7126-2018-939-9-30-36
21. Tang R., Fritsch D., Cramer M., Schneider W. A Flexible Mathematical Method for Camera Calibration in Digital Aerial Photogrammetry // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing (PERS). 2012. P. 1069-1077. DOI: 10.14358/PERS.78.10.1069
22. Wim Van Wegen. High-end UAVS. A Key Link in the Value Chain // GIM International. 2017. Vol. 31. Iss. 4. P. 30-31.
23. Sadykov M.I., Blinov P.A., Nutskova M.V. Use of the water-swellable polymers (WSP) for wellbore stabilization in intensely fractured rock intervals // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 266. № 01013. DOI: 10.1051/e3sconf/202126601013
24. Долгаль А.С. Компьютерные технологии обработки и интерпретации данных гравиметрической и магнитной съемок в горной местности. Абакан: Таймыркомприродресурсы, 2002. 188 с.
25. Parshin A., Budyak A., Babyak V. Interpretation of Integrated Aerial Geophysical Surveys by Unmanned Aerial Vehicles in Mining: a Case of Additional Flank Exploration // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. Vol. 459. Iss. 5. № 052079. DOI:10.1088/1755-1315/459/5/052079
26. Долгаль А.С. Оценка влияния формы поверхности измерений в методе истокообразной аппроксимации геопотенциальных полей // Горное эхо. 2020. № 2 (79). С. 49-57. DOI: 10.7242/echo.2020.2.10
27. Муравина О.М., Долгаль А.С., Пономаренко И.А. Применение статистических методов для учета влияния рельефа местности при проведении аэромагнитных съемок // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: геология. 2020. № 2. С. 69-75. DOI: 10.17308/geology.2020.2/2860
28. Калинин Д.Ф., Егоров А.С., Большакова Н.В. Потенциальная нефтегазоносность Западно-Камчатского побережья и ее связь со структурно-тектоническим строением Охотоморского региона по геофизическим данным // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2022. № 1 (53). С. 59-75. DOI: 10.31431/1816-5524-2022-1-53-59-75
29. Прокопьев И.Р., Дорошкевич А.Г., Редина А.А. Минералогия и флюидный режим формирования карбонатитов Центрального Алдана: Апатитового месторождения Селигдар и проявления Усть-Чульман (Ю.Якутия, Россия) // Геология и минерагения Северной Евразии, 3-5 октября 2017, Новосибирск, Россия. Институт геологии и геофизики, 2017. С. 195-196.
30. Радьков А.В., Молчанов А.В., Артемьев Д.С. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Алдано-Забайкальская. Лист О-51 – Алдан. Объяснительная записка. СПб: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2015. 365 с.
31. Кремчев 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
32. Пашикевич М.А., Смирнов Ю.Д., Данилов А.С. Оценка качества окружающей среды с применением малогабаритных беспилотных летательных аппаратов // Записки Горного института. 2013. Т. 204. С. 269-271.
33. Смирнов Ю.Д., Добрынин О.С. Разработка беспилотных летательных аппаратов для проведения экологического мониторинга // Записки Горного института. 2014. Т. 207. С. 213-216.
34. Алексеев С.Г., Козлов С.А., Штокаленко М.Б., Смирнов В.Е. Особенности 2D- и 3D-интерпретации аномалий потенциальных полей // Записки Горного института. 2011. Т. 194. С.128.
35. Захаров С.В. Моделирование и интерпретация потенциальных полей некоторых двумерных границ раздела, описываемых иррациональными функциями // Записки Горного института. 1987. Т. 113. С. 109-114.
36. RICS (2014). Measured surveys of land, buildings and utilities, 3rd edition. Guidance note. London: RICS. URL: www.rics.org/uk/upholding-professional-standards/sector-standards/land/measured-surveys-of-land-buildings-and-utilities/ (дата обращения 29.04.2019).
37. 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. № 104245. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2020.104245

Авторы: И.Б.Мовчан, канд. геол.-минерал. наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0003-2311-8979> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), З.И.Шайгаллямова, аспирант, zilyamining@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0789-214X> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), А.А.Яковлева, канд. физ.-мат. наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0003-2476-2790> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.