

ВОЗМОЖНОСТИ КРУПНОМАСШТАБНОЙ МАГНИТНОЙ СЪЕМКИ С ПОМОЩЬЮ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПРИ ПОИСКОВЫХ РАБОТАХ НА ЗОЛОТО НА ПРИМЕРЕ ЧУЛЬБАТКАНСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ

© 2026 М.Ю. Носырев, А.Ю. Юрчук, Г.З. Гильманова, А.Ю. Песков

*Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, Хабаровск, Россия, 65680000;
e-mail: ns041ck@yandex.ru*

Поступила в редакцию 04.06.2025; после доработки 15.03.2026; принята в печать 27.03.2026

Выполнено сопоставление результатов магнитной наземной съемки и съемки с использованием беспилотного летательного аппарата, выполненных в 2020 и 2021 гг. на месторождении золота Чульбаткан в Хабаровском крае и окружающей его площади. Выполнен анализ соотношения модуля полного вектора индукции магнитного поля и его локальных аномалий, полученных по двум видам съемок на площадях перекрытия, показана их высокая сходимость, оценена доля аномалий, не фиксируемых при аэросъемке. Проанализировано влияние сглаживания магнитного поля на высоте на результаты его интерпретации в сравнении с наземной съемкой. Рассмотрен опыт составления сводной карты магнитного поля по данным обоих видов магниторазведочных работ на площади, включающей месторождение золота Чульбаткан. Сделаны методические выводы об эффективности маловысотных съемок для различных геологических обстановок с учетом магнитных свойств пород, показано место таких съемок в общем комплексе поисковых работ.

Ключевые слова: наземная магнитная съемка, БПЛА, месторождение золота Чульбаткан.

ВВЕДЕНИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАБОТ

В настоящее время все большее распространение получают магниторазведочные работы с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Данный вид магнитных съемок относительно новый, находящийся в развитии как с точки зрения решения технических вопросов съемки, как-то конструкция и характеристики летательных аппаратов, типов магнитометров, навигационных устройств, так и с точки зрения понимания эффективности для решения геологических задач в сравнении с наземными съемками. Если первый аспект достаточно специфичен и более важен для компаний разработчиков и производителей аппаратуры, то второй, включающий такие вопросы как эффективность съемок в различных геологических условиях, информативность, преимущества и недостатки в сравнении с существующими наземными модификациями напрямую связан с практическими геологическими задачами

картировочных и поисковых работ. Именно рассмотрению этих вопросов посвящена настоящая статья. В ней анализируются три аспекта сопоставления разновысотных съемки: соответствие аномалий, зафиксированных при наземной и маловысотной БПЛА-съемках, возможности и пути увязки двух видов работ и создание единых карт магнитного поля, возможности БПЛА-съемки в условиях различных петромагнитных разрезов. Анализ выполнен на примере площади включающей месторождение золота Чульбаткан в Хабаровском крае (Алексеев, Старостин, 2017) и окружающей территории. В основу рассмотрения легли данные, полученные по наземной магнитной съемке 2020 г., выполненной ООО ГЕПАРТ и съемке с БПЛА 2021 г., выполненной той же компанией при участии Института тектоники и геофизики (ИТиГ) ДВО РАН им. Ю.А. Косыгина.

Наземная магнитная съемка проводилась оверхаузовскими магнитометрами ММРОС («КМ УГТУ» г. Екатеринбург) с введением поправки за суточные вариации магнитного поля

ВОЗМОЖНОСТИ КРУПНОМАСШТАБНОЙ МАГНИТНОЙ СЪЕМКИ

по сети 100×20 м на площади 118 км² (рис. 1). Топографическая привязка осуществлялась встроенной GPS. Погрешность съемки составила ±2.3 нТл.

БПЛА-съемка выполнена с использованием платформы DJI Matrice 600 pro с магнитометром MMPOS-1aero («КМ УГТУ» г. Екатеринбург). Расстояние между профилями было 50 м, общая площадь съемки — 122 км² (рис. 1). Ориентировка

линий наблюдений, как и для наземной съемки, была запад-северо-западная. Полеты проходили в автоматическом режиме с огибанием рельефа. Топопривязка измерений осуществлялась GPS навигатором. Высота съемки колебалась в диапазоне от 40 до 63 м и составляла в среднем 53 м, погрешность определения высоты — 0.386 м. Средняя скорость полета составляла 9.8 м/с, частота

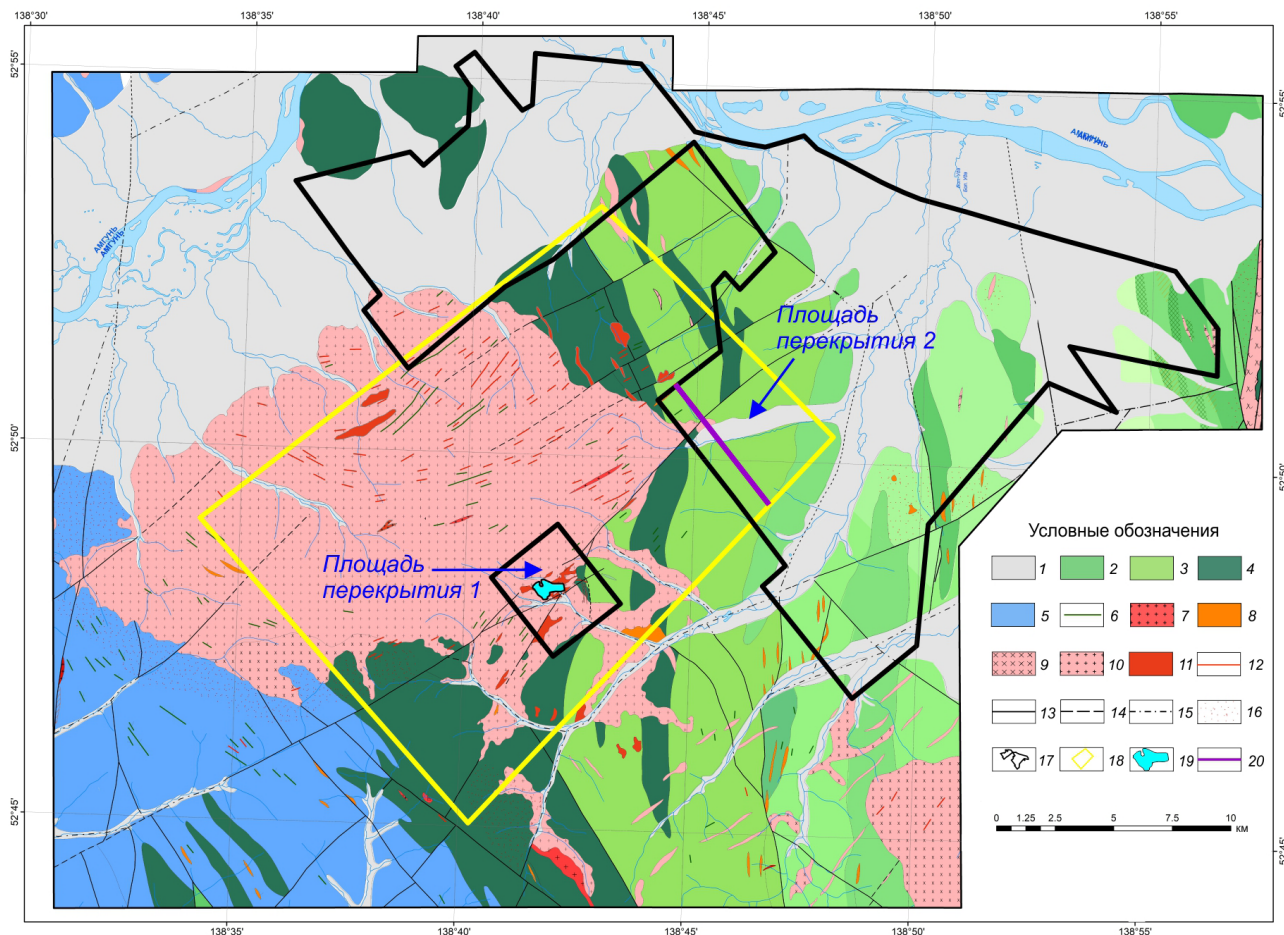


Рис. 1. Геологическая карта Чульбатканской площади с контурами наземных и БПЛА магниторазведочных работ: 1 — четвертичные отложения; 2 — пиванская свита нижняя толща, алевролиты, песчаники, конгломераты; 3 — пионерская свита, нижняя толща, алевролиты, песчаники; 4 — горинская свита, песчаники, алевролиты; 5 — волжский, кимериджский ярус, алевролиты, песчаники, линзы кремнистых пород, диабазов; 6 — дайки диорит-порфиров, спессартитов; верхнеудоминский комплекс: 7 — граниты, гранодиориты биотит-роговообманковые, 8 — риолиты, гранит-порфиры; нижнеамурский комплекс: 9 — первая фаза, диориты, 10 — вторая фаза, плагииграниты, 11 — третья фаза, гранодиориты, 12 — дайки гранодиорит-порфиров, аплитов, плагиигранитов; разрывные нарушения: 13 — достоверные, 14 — предполагаемые, 15 — скрытые под аллювиальными отложениями; 16 — ороговикованные породы; 17 — площадь БПЛА-магнитной съемки 2021 г.; 18 — площадь наземной магнитной съемки 2020 г.; 19 — месторождение золота Чульбаткан; 20 — профиль 726 наземной и БПЛА съемок по которому построены магнитные модели.

Fig. 1. Geological map of the Chulbatkan area with outlines of the ground-based and UAV magnetic survey sites: 1 — Quaternary deposits; 2 — Pivan Formation, lower strata, siltstones, sandstones, conglomerates; 3 — Pioneer Formation, lower strata, siltstones, sandstones; 4 — Gorin Formation, sandstones, siltstones; 5 — Volgian and Kimmeridgian stages, siltstones, sandstones, lenses of siliceous rocks and diabases; 6 — diorite-porphyrite and spessartite dikes; Verkhneudominsky complex: 7 — granites, granodiorites biotite-hornblende 8 — rhyolites, granite-porphyrines; Verkhneamursky complex: 9 — 1st phase, diorites, 10 — 2nd phase, plagiogranites, 11 — 3rd phase, granodiorites, 12 — granodiorite, aplite and plagiogranite dikes; faults: 13 — confirmed; 14 — inferred; 15 — buried under alluvial deposits; 16 — hornfels; 17 — area of 2021 UAV magnetic survey; 18 — area of the 2020 ground-based magnetic survey; 19 — Chulbatkan gold deposit; 20 — the profile 726 of the ground-based and UAV surveys used to create magnetic models.

отсчетов 1/3 сек. В измерения введены поправки за суточные вариации магнитного поля. Погрешность съемки по результатам повторных маршрутов составила ± 0.93 нТл. Съемка выполнена на северо-восточном обрамлении площади наземной съемки с участком перекрытия двух съемок в размере 9.3 км². Также в опытно-методических целях БПЛА-съемка была сделана на локальном участке (5.3 км²) над месторождением Чульбаткан (рис. 1).

В обоих случаях измеряемым параметром являлся модуль полного вектора магнитной индукции обозначаемый далее как *T*. Соответственно далее по тексту при использовании выражения «магнитное поле», имеется ввиду данный параметр его характеризующий. Основной объем информации получен путем сравнения на участках перекрытия съемок 2020 и 2021 гг. Сравнение выполнялось как для модуля полного вектора магнитного поля с учетом векового хода, так и, главным образом, для локальных магнитных аномалий, полученных путем вычитания «регионального» фона, рассчитанного с помощью продолжения поля в верхнее полупространство и применения фильтра Баттерворта (https://karpinskyinstitute.ru/ru/public/sprav/geodictionary/article.php?ELEMENT_ID=92412).

Для сравнения полей, построения карт и расчета трансформаций использовались grids с размером ячейки 20 м. Gridирование в обоих случаях выполнялось методом минимальной кривизны.

Также для оценки убывания аномалий с высотой нами были выполнены некоторые модельные расчеты для вертикальных пластов различной мощности и магнитной восприимчивости (МВ). Расчеты выполнены в двухмерном варианте в программе ZondGM2D (<https://geodevice.ru>). Кроме того, для оценки изменения с высотой высокочастотной составляющей магнитного поля, рассчитаны и проанализированы энергетические спектры поля для двух видов съемок. Также, ориентируясь на результаты интерпретации в виде магнитных моделей, была выполнена инверсия и построение моделей как по данным наземной съемки, так и БПЛА-съемки для одного из профилей в области их перекрытия. Это моделирование также выполнено в программе ZondGM2D. Еще раз подчеркнем, что своей главной задачей мы выделили анализ возможностей и ограничений БПЛА-магнитных съемок в определенных геологических условиях.

КРАТКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ И ПЕТРОМАГНИТНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛОЩАДИ РАБОТ

Площадь работ располагается в северной части Сихотэ-Алиньского орогенного пояса в пределах Журавлевско-Амурского террейна тур-

бидитового типа (Геодинамика, 2006). Осадки представлены терригенными отложениями юрского и раннемелового возраста довольно однообразного состава. Подавляющая часть разреза — монотонное чередование пластов алевролитов и песчаников с редкими вкраплениями слоев, прослоев и линз конгломератов, кремнистых пород и диабазов. Площадь насыщена интрузивными массивами позднемелового и раннепалеогенового возраста (нижнеамурский комплекс). Наиболее крупным интрузивным телом является Чульбатский массив, общая площадь его выхода на современную эрозионную поверхность составляет около 160 км². Состав интрузивных пород довольно однообразен: преобладают гранодиориты и близкие к ним тоналиты, плагиограниты. Дайковый комплекс представлен диоритовыми порфиридами, спессартитами, аплитами, гранит-порфирами. В северо-восточной части площади по данным аэромагнитной съемки¹ положительной магнитной аномалией картируется на глубине южная часть Большереченского гранитоидного массива. По этим данным его магнитная восприимчивость в среднем составляет около $1000 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ.

Месторождение золота Чульбаткан представляет собой серию минерализованных зон (Алексеев, Старостин, 2017). Центральная часть Чульбатканского месторождения расположена в сдвиговой зоне на контакте Чульбатской интрузии плагиогранитов и ороговикованных песчаников и алевролитов, ближе к эндоконтакту. Основная часть минерализованных зон находится в интрузии, и лишь редкие маломощные тела на северо-восточном фланге локализованы в ороговикованных терригенных породах. Морфологически рудные тела представляют собой удлинённые, вытянутые в северо-восточном направлении плитообразные и линзообразные зоны, довольно круто (40–70°) падающие на северо-запад, их мощность от нескольких метров до 100 м. Оруденение часто обрывается дайками андезитов и дацитов, крупный разлом северо-восточного простирания ограничивает распространение минерализации на северо-запад и юго-восток. Рудные тела окружены ореолом гидротермально измененных пород, выделяется четыре формации метасоматитов: березитизация, окварцевание, карбонатизация, аргиллизация.

Возможности применения магниторазведки определяются дифференциацией магнитных

¹ Калмыков Б.А. Левин Ф.Д. Отчет о результатах работ «Выполнение комплексной аэрогеофизической (аэромагнитной, аэроэлектроразведочной, аэрогамма-тспектрометрической) съемки масштаба 1:50000 листов L-53-XXXII, K-53-II, N-54-XXV, XXXI (Хорская площадь) (1–2 этапы)». Т. 2. М.: АО ГНПП «Аэрогеофизика», 2018. 215 с.

свойств горных пород площади (таблица). В ней использованы как авторские данные, так и данные полученные при проведении геологосъемочных работ². Породы изучаемой площади преимущественно немагнитные, включая сам Чульбатский массив. Аномально высокой магнитной восприимчивостью обладают только широко развитые разнообразные дайки среднего состава и породы Большереченского интрузивного массива. Что касается ороговикованных пород, то по нашим данным для них не характерно существенное повышение магнитной восприимчивости. По данным геологосъемочных работ отдельные образцы могут иметь значения МВ более $2000 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ, однако среднее значение тоже невелико (таблица). В любом случае — это низкие значения МВ и ожидать хорошо выраженных положительных магнитных аномалий в связи с такими образованиями, по крайней мере на площади работ, нет оснований.

² Кайдалов В.А. и др. Отчет Херпучинской партии по групповой геологической съемке масштаба 1:50 000, проведенной в междуречье Амгунь-Бичи на листах N-54-110-А, Б-б, в, г, В, Г; N-54-111-В; N-54-122-А,Б,Г; N-54-123-А, В за 1981–1986 гг. Хабаровск. ПГО «Дальгеология». 1987. 310 с.

Наложенные гидротермальные изменения понижают МВ, однако для изначально немагнитных пород (осадки, плагиограниты) такое понижение с точки зрения отображения в магнитном поле не актуально. Уменьшение МВ для измененных даек основного состава весьма значительно (в ≥ 10 раз) и должно приниматься в расчет при интерпретации. При довольно значительном разбросе их МВ до очень высоких значений, магнитные аномалии, с ними связанные, свидетельствуют, что в пределах изученной площади они в основном имеют низкую МВ на уровне $(50-100) \cdot 10^{-5}$ ед. СИ. Это характерно для рудных полей, где все породы в той или иной степени подвержены гидротермальным изменениям что приводит и к снижению МВ по сравнению с окружающей территорией. Таким образом, основная информация, которую можно извлечь при интерпретации аномального магнитного поля, по нашему мнению, связана с дайками (отдельными небольшими штоками среднего состава и глубинными магнитными интрузиями).

При рассмотрении аномального магнитного поля площади надо отметить, что при достаточно сложной его структуре и обилии большого количества локальных аномалий, оно, в целом, слабо дифференцировано (рис. 2).

Магнитные свойства пород Чульбатканской площади

Magnetic properties of rocks in the Chulbatkan area

№ п.п.	Порода	Магнитная восприимчивость, 10^{-5} ед. СИ				Источник
		Кол-во образцов	Минимальное значение	Максимальное значение	Среднее значение	
1.	Осадочные породы (пионерская, горинская свиты)	2400	1	120	11	(Кайдалов и др, 1986) ² ,
	Роговики по песчаникам, алевролитам	44			23	Авторские данные
	Роговики	48	3	2100	55	(Кайдалов и др, 1986) ² ,
	Песчаники алевролиты окварцеванные, лимонитизированные, с кварцевыми прожилками	30			10	Авторские данные
2.	Плагиограниты, граниты Чульбатского массива	73			12	Авторские данные
	Плагиограниты окварцеванные, осветленные	11			3	Авторские данные
	Граниты Большереченского массива		1000	1900		(Калмыков, Левин, 2018) ¹
	Порфириовидный мелкозернистый диорит	18			2251	Авторские данные
	Диорит мелкозернистый	140			489	Авторские данные
	Осветленные, интенсивно хлоритизированные дайки среднего состава с редкой вкрапленностью сульфидов	14			53	Авторские данные

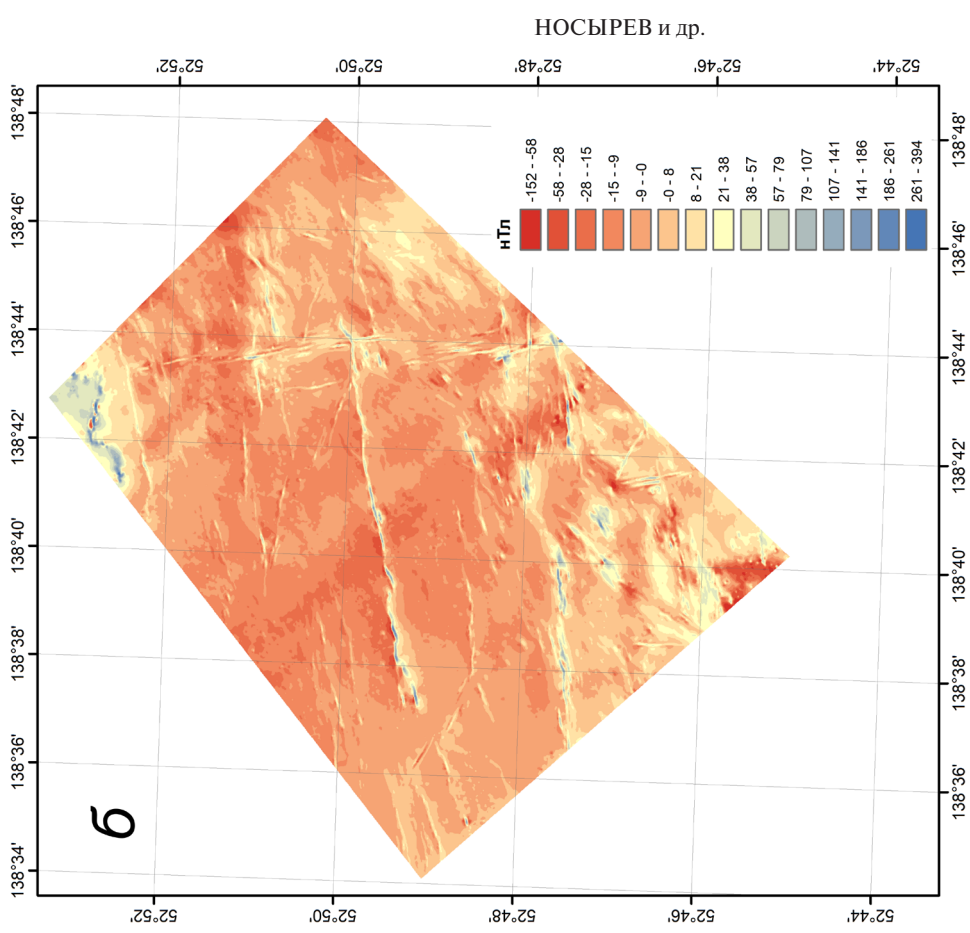
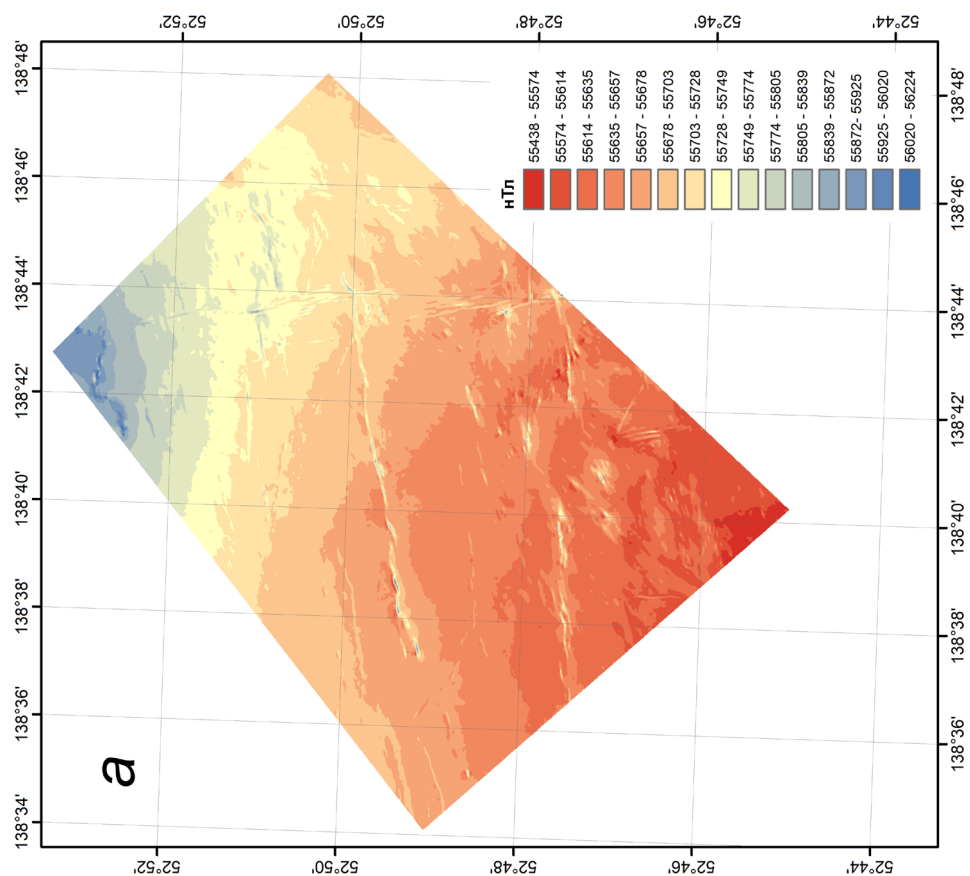


Рис. 2. Чульбатканская площадь. Карта модуля полного вектора индукции магнитного поля по данным наземной съемки (а), локальные аномалии модуля полного вектора (б), региональный фон — поле, продолженное на высоту 1000 м.
Fig. 2. Chulbatkan area. Map of total magnetic intensity (TMI) from the ground-based survey data (a), local anomalies of TMI (b), regional background — a field extended upward to 1000 m altitude.

ВОЗМОЖНОСТИ КРУПНОМАСШТАБНОЙ МАГНИТНОЙ СЪЕМКИ

Амплитуда большинства локальных положительных магнитных аномалий составляет в среднем 50–60 нТл, редко поднимаясь до 100 нТл. Только в северной части площади над областью развития Большереченского массива интенсивность некоторых положительных магнитных аномалий превышает 200 нТл. Эти аномалии связаны с отдельными небольшими штоками гранитоидов или с локальными подъемами кровли массива.

При рассмотрении магнитного поля площади с учетом данных по аэромагнитной съемке окружающей территории (Калмыков, Левин, 2018) можно выделить несколько его составляющих, отражающих различные геологические объекты. Низкочастотная составляющая связана с магнитными гранитами Большереченского интрузивного массива, глубиной его залегания и особенностями контактов с немагнитными осадочными породами (рис. 3). На рассматри-

ваемой площади мы видим только южную часть соответствующей массиву аномалии, здесь он залегает на глубине и не выходит на поверхность.

Высокочастотная составляющая магнитного поля представлена хорошо выраженными линейными аномалиями протяженностью до нескольких километров при ширине в десятки–первые сотни метров, как уже указывалось, амплитуда этих аномалий небольшая, в среднем 50–60 нТл и они связаны с разнообразными дайками, имеющими различную ориентировку и широко развитыми на площади. С геофизической точки зрения они могут рассматриваться как крутопадающие пласты различной мощности.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В ряде работ, посвященных сопоставлению наземных и БПЛА-съемок (Иванова и др., 2021, Мовчан и др., 2022, Снегирев и др., 2023), много

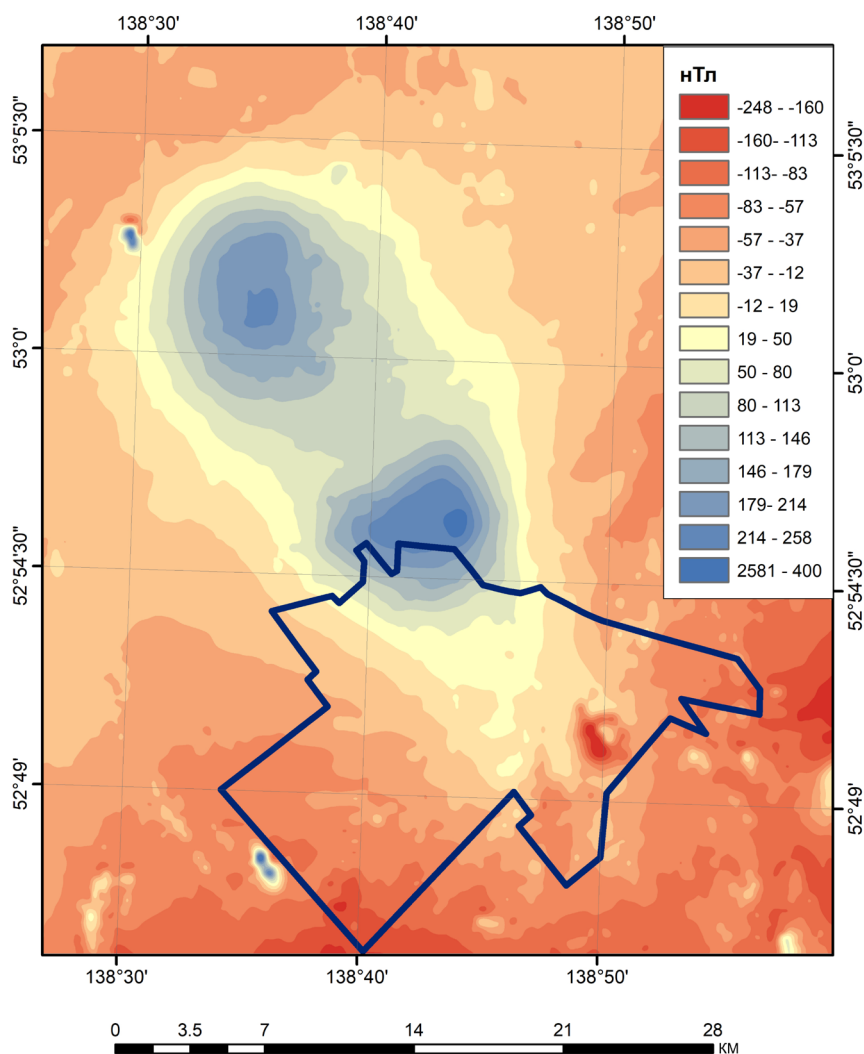


Рис. 3. Карта магнитного поля ΔT_a листов N-54-XXV, XXXI по данным вертолетной АГСМ-съемки масштаба 1:50000. Черный контур площадь наземной и БПЛА-съемок 2020 и 2021 гг.

Fig. 3. Magnetic field map ΔT_a for sheets N-54-XXV, XXXI based on helicopter-based AGSM-survey 1:50000 scale. Black-bordered is the area of ground-based and UAVs surveys in 2020 and 2021.

пишется про «сходимость» полей на разных уровнях измерений, их повторяемость в той или иной мере. Надо сказать, что данное утверждение очевидно, поскольку в обоих случаях выполняются измерения одного и того же параметра магнитного поля и сходимость результатов является совершенно естественной. Точно так же очевидно и уменьшение детальности получаемых данных для аэросъемок по сравнению с наземными. Более важным нам представляется проанализировать это изменение поля в условиях конкретной площади для известного геологического разреза, оценить теряемую информацию и ее значимость для решения геологических задач.

Если низкочастотная составляющая практически идентично отображаются в магнитном поле по данным наземной съемки и по данным съемки с БПЛА, то высокочастотная составляющая — эта та часть магнитного поля, которая наибольшим образом зависит от высоты наблюдений. При высоте магнитометра 40–60 м она будет в определенной степени сглажена, а некоторые аномалии исчезнут совсем, что определяется размерами и намагниченностью аномалиеобразующих тел.

Применение определенного фильтра высоких частот к данным наземной съемки позволяет сгладить наземное магнитное поле примерно до степени детальности, отвечающей полю, полученному по данным БПЛА съемки. Обычно для этой процедуры используют или осреднение с небольшим радиусом (Ермолин и др., 2023), или продолжение поля в верхнее полупространство (Груздев, 2020). При этом в работе (Ермолин и др., 2023) указывается, что при соответствии высоты продолжения поля в верхнее полупространство высоте магнитометра БПЛА задача решается аналитически точно и поля должны быть идентичны. Однако существует целый ряд причин, делающих это утверждение не столь однозначным, а именно:

- высота БПЛА-магнитометра не постоянна и колеблется в интервале до 20 м;

- пересчет магнитного поля по данным наземной съемки в верхнее полупространство выполняется не с горизонтальной плоскости, всегда будет ощущаться влияние рельефа местности;

- неучет аномалий от тел, расположенных вне участка съемки на низкой высоте, но сопоставимо влияющих на более высоких уровнях.

Таким образом, мы можем говорить лишь о примерном (хотя и очень близком) соответствии сглаженного магнитного поля по данным наземных наблюдений и поля, полученного по данным БПЛА-съемки. В настоящей работе для сглаживания поля мы использовали его аналитическое продолжение в верхнее полупространство.

В методических целях выполнено сопоставление трансформированного магнитного поля (наземная съемка) и магнитного поля БПЛА-съемки на двух участках их перекрытия (рис. 1). Этот анализ проведен для высот пересчета 25–250 м. Понятно, что с высотой пересчета магнитное поле сглаживается, некоторые аномалии практически не просматриваются, другие изменяют свою форму и амплитуду, что сближает пересчитанное «наземное» поле с магнитным полем, измеренным с помощью БПЛА. Наилучшее их совпадение наблюдается для высот пересчета 50–120 м. Поэтому далее основным объектом для сравнения будем считать магнитное поле по данным наземной съемки продолженное вверх на 50 м.

Проанализируем какая часть аномалий «исчезает» из поля при пересчете на высоту 50 м. Этот анализ выполнен на участке перекрытия двух видов съемок № 2 (рис. 1, рис. 4а, 4б). Для этого рассчитаны локальные аномалии магнитного поля по данным наземной съемки на высоте 50 м (уровень поля на этой высоте брался за «региональный фон») (рис. 4в). Эти остаточные аномалии в первом приближении соответствуют той части поля, которая не отображается за счет высоты. Видно, что эта высокочастотная часть поля, обусловленная дайками. Для подтверждения данной картины рассмотрим также непосредственно разность магнитного поля по результатам наземной и БПЛА-съемок (рис. 4г). Полученная картина совершенно идентична теоретически рассчитанной доле «потерянных» локальных аномалий. Таким образом, считаем данную составляющую той долей магнитного поля, которая исчезает при маловысотной съемке. По интенсивности это преимущественно аномалии в интервале + 5 нТл, на локальных участках до первых десятков нТл, по форме отчетливо видно, что это многочисленные линейные аномалии, связанные с дайками, достаточно узкие, но хорошо выраженные. Локальные аномалии по данным наземной съемки (рис. 2б) — одна из основных составляющих при интерпретации магнитного поля и поэтому для оценки информативности ее надо сравнивать с соответствующей трансформированной картой по данным БПЛА-съемки. Поэтому для этого поля нами были также рассчитаны локальные аномалии с использованием того же фильтра (т.е. продолжение вверх на 1000 м). Эти аномалии для участка перекрытия № 2 приведены на рис. 5. В этом случае совершенно отчетливо видна определенная потеря информации на карте по БПЛА-съемке, хотя основные структурные черты поля сохраняются, но часть высокочастотной компоненты исчезает (рис. 5). Однако учитывая высокую точность БПЛА-съемки, представляется

ВОЗМОЖНОСТИ КРУПНОМАСШТАБНОЙ МАГНИТНОЙ СЪЕМКИ

возможным для этих данных применить фильтр с более высокой пропускной способностью в отношении высокочастотной компоненты. Нами опробованы два из них (5*в*, 5*з*): локальные аномалии на высоте пересчета 250 м и фильтр Баттерворта для выделения высокочастотной составляющей. Интенсивность локальных аномалий составляет более 3–4 нТл, что вполне приемлемо при высокой точности БПЛА-съемки.

В этом случае структура поля локальных аномалий по данным БПЛА в определенной степени приближается к структуре «наземного» поля, появляются сопоставимые аномалии. Следовательно, применение фильтров с выделением локальных аномалий по магнитному полю, измеренному с БПЛА ≥ 5 нТл позволяет увеличить разрешающую способность маловысотной съемки.

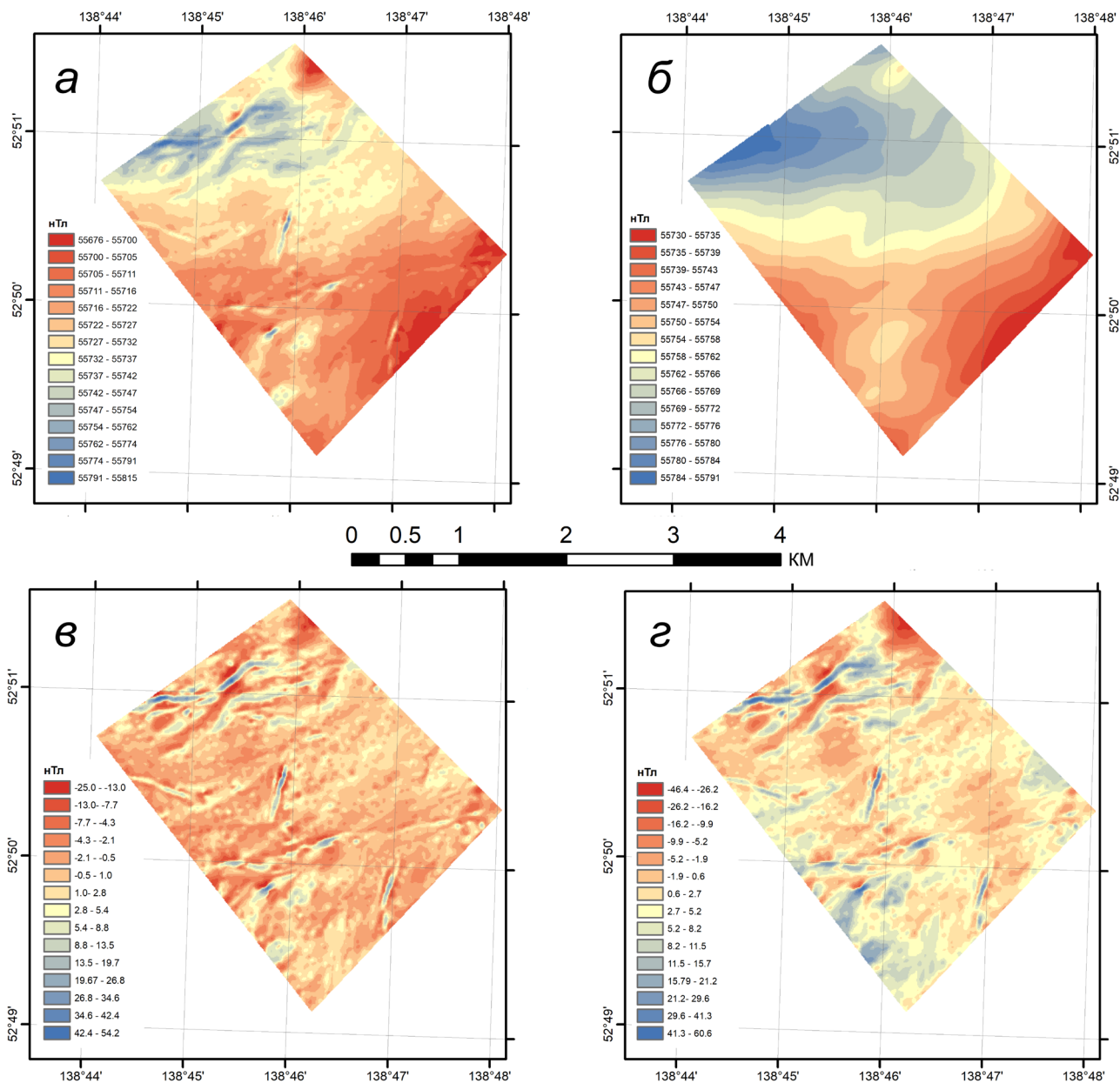


Рис. 4. Магнитные поля участка перекрытия съемок № 2: *а* — модуль полного вектора индукции магнитного поля по данным наземной съемки; *б* — то же по данным БПЛА-съемки; *в* — остаточные аномалии модуля полного вектора индукции магнитного поля по данным наземной съемки на высоте 50 м; *з* — разность модулей полного вектора индукции магнитного поля по данным наземной съемки и съемки с БПЛА (уровень наземных измерений приведен ко времени измерений с БПЛА).

Fig. 4. Magnetic fields of the overlap area of the survey № 2: *a* — magnitude of the total magnetic intensity based on the ground survey data; *б* — total magnetic intensity from the drone-borne survey data; *в* — residual magnetic anomalies from the ground survey data at an altitude of 50 m; *з* — difference between magnetic fields from the ground and drone-borne survey data.

Таким образом по результатам анализа на участке перекрытия двух съемок можно сказать:

- некоторые узкие аномалии, фиксируемые при наземной съемке, при БПЛА-съемке не проявляются. Это просто класс аномалий, которые не могут быть зафиксированы из-за малой намагниченности вызывающих их тел или малых горизонтальных размеров;
- достаточно широкие аномалии близкие по форме к изометричным по результатам обеих

съемок соответствуют друг другу достаточно точно;

- часть линейных аномалий при применении определенных фильтров фиксируется и на карте локальных аномалий по данным БПЛА-съемки, но чаще фрагментарно (очевидно наиболее намагниченные части даек), в виде цепочек локальных аномалий, расположенных по оси протяженной наземной аномалии. При этом интенсивность аномалий уменьшается. В целом

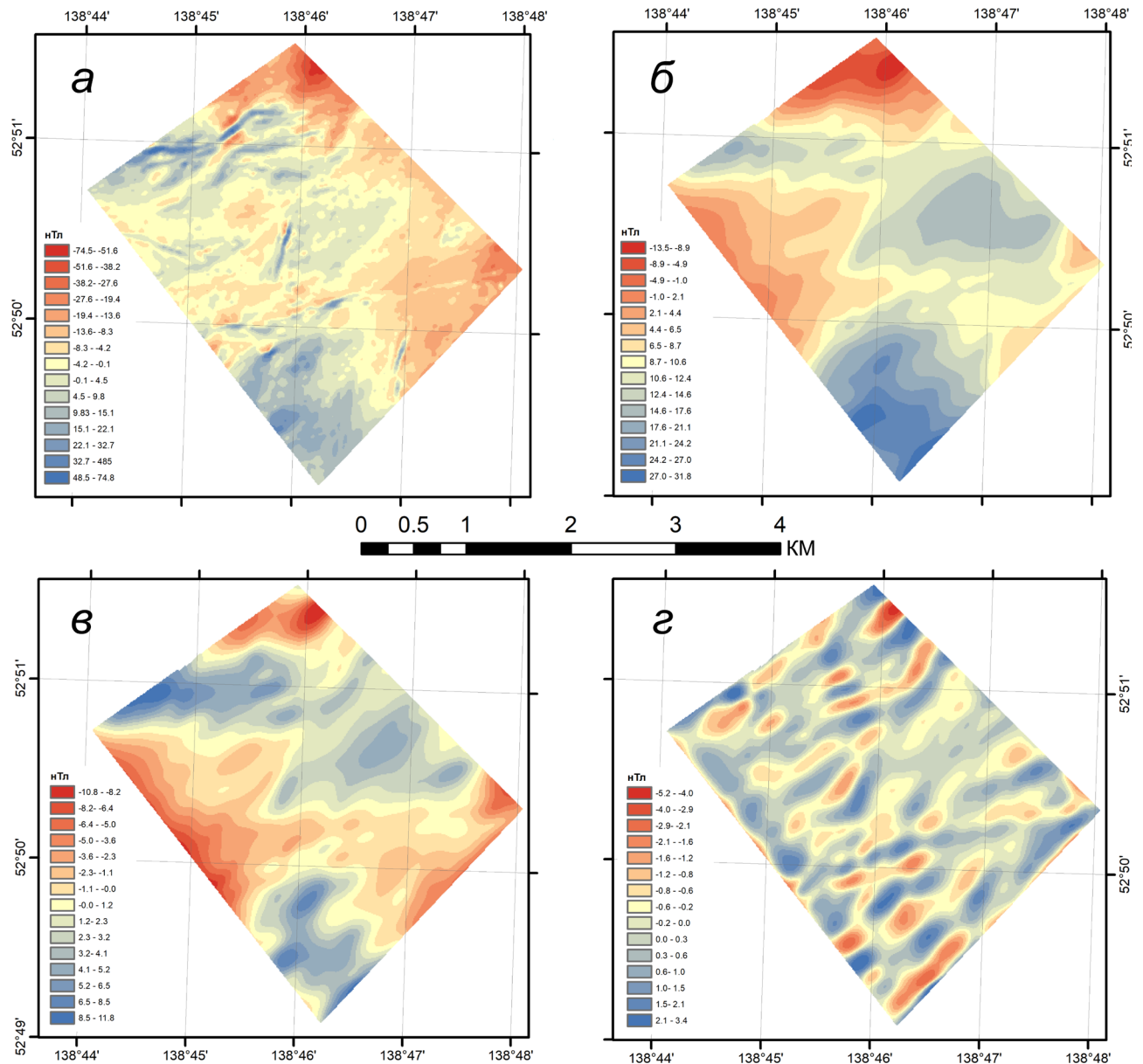


Рис. 5. Локальные аномалии модуля полного вектора индукции магнитного поля на участке перекрытия съемок № 2: *a* — по данным наземной съемки (региональный фон — поле, пересчитанное на высоту 1000 м); *б* — по данным БПЛА-съемки (региональный фон — поле, пересчитанное на высоту 1000 м); *в* — по данным БПЛА-съемки (региональный фон — поле пересчитанное на высоту 250 м); *з* — по данным БПЛА-съемки (фильтр Баттерворта).

Fig. 5. Local magnetic anomalies in the total magnetic intensity in the survey overlap area № 2; *a* — from the ground survey data (regional background — field values converted to an altitude of 1000 m); *б* — from the drone-borne survey data (regional background — field values converted to an altitude of 1000 m); *в* — from the drone-borne survey data (regional background — field upward-continued to 250 m); *з* — based on UAV survey data (Butterworth filter).

как структурный элемент интерпретации эта особенность поля в ряде случаев сохраняется;

– часть сближенных узких аномалий на высоте объединятся в единую, тогда как на поверхности Земли они отчетливо смотрятся отдельными полосовыми аномалиями, которым соответствуют отдельные магнитные тела.

Это говорит об уменьшении разрешающей способности БПЛА-съемки.

Также из проведенного анализа следует, что практически трудно добиться точного соответствия магнитного поля, измеренного БПЛА-магнитометром и продолженного вверх по данным наземной съемки, с точки зрения локальных аномалий — наземное поле в этом случае все равно остается более детальным. В общем видно, что для магнитных аномалий «дайкового» типа и локальных изометричных аномалий от тел с повышенной намагниченностью ситуация, с точки зрения повторяемости аномалий выглядит удовлетворительно. За исключением ряда полностью исчезнувших аномалий, остальные в той или иной мере фиксируются на высоте. При этом естественно изменяется их форма и наблюдаются трудности с разделением сближенных полосовых аномалий, они сливаются в единые. Соответственно при БПЛА-съемке мы теряем определенный класс высокочастотных аномалий от приповерхностных объектов и вопрос только в том, нужны или нет нам эти аномалии с геологической и (или) поисковой точек зрения. По нашему мнению, для геологического картирования — это важная информация, в аспекте поискового направления эти данные также достаточно важны, поскольку дайки трассируют зоны разломов, потенциально проницаемые зоны.

Наиболее адекватное соотношение продолженного в верхнее полупространство магнитного поля по данным наземной съемки и наблюдаемого с БПЛА-магнитометром наблюдается для высоты пересчета наземной магниторазведки в 1–2 раза больше средней высоты магнитометра на БПЛА. Также надо отметить, что любая зафиксированная при наземной съемке на площади аномалия при пересчете на высоту БПЛА-магнитометра остается в результирующем поле, пусть и в ослабленном виде.

Показательным является пример сопоставления наземной съемки с маловысотной аэромагнитной съемкой на участке перекрытия съемок № 1, внутри которого находится месторождение золота Чульбаткан (рис. 6).

Если оценить разницу по величине среднеквадратической погрешности (СКП) двойных измерений, то получается величина ± 4.59 нТл, что свидетельствует о высокой подобности результатов этих двух съемок, выполненных

с разницей в год по времени, иным прибором, без физического закрепления пикетов на местности. Однако если рассматривать изменение структуры поля для наземной, продолженной вверх и БПЛА-съемок, то в этом ряду отчетливо видна потеря детальности. Основные положительные локальные аномалии и площадные поля, приобретая более сглаженный характер, все же имеют хорошую сопоставимость. Но даже при пересчете в верх на 50 м, видно, как теряются линейные аномалии низкой интенсивности, а на карте маловысотной аэромагнитной съемки происходит еще большая генерализация магнитного поля.

Создание единой карты магнитного поля по данным наземной и БПЛА-съемок. Высказанные замечания и соображения не отменяют задачи построения единых карт магнитного поля. Для этого необходима в первую очередь временная увязка выполненных измерений (введение поправки за вековой ход). Разница между измерениями с БПЛА в 2021 г. и данными наземной съемки в 2020 г., продолженными вверх на 50 м, рассчитанная по узлам грида в области перекрытия съемок, составила 38.3 нТл. Согласно модели, международного геомагнитного аналитического поля IGRF (wdc.ku), изменение (т.н. «вековой ход») модуля геомагнитного поля с 2020 по 2021 гг. в области съемки ($52^{\circ}48'$ с.ш. и $138^{\circ}42'$ в.д.), высота над уровнем моря ~ 300 м) составляет 36.1 нТл.

После учета систематической разницы за «вековой ход», величина расхождения между результатом наземной съемки 2020 г., пересчитанной в верх на 50 м и измерениями на высоте 53 м составила в среднем величину около нуля нТл (пределы колебаний от -8.1 нТл до $+5.7$ нТл), соответственно величина СКП двойных измерений составила ± 1.63 нТл.

После этого возможно построение единой карты. Нами построена сводная карта, приведенная к уровню съемки БПЛА (рис. 7а). При этом увязка карт осуществляется путем пересчета данных наземной съемки в верхнее полупространство на 50 м с последующим получением единого грида. При этом понятно, что детальность уровня наземной съемки исчезает, хотя все равно превышает детальность карты по съемке с БПЛА. Эта разница особенно видна на карте локальных аномалий (рис. 7б–г). Для фильтрации поля с целью выделения локальных аномалий мы бы рекомендовали использовать наиболее чувствительный фильтр, приемлемый для магнитного поля на высоте, с тем, чтобы максимально сблизить структуру остаточных аномалий для двух типов съемок (это рассмотрено выше на примере участка перекрытия № 2). Способ выделения локальных аномалий может быть любой.

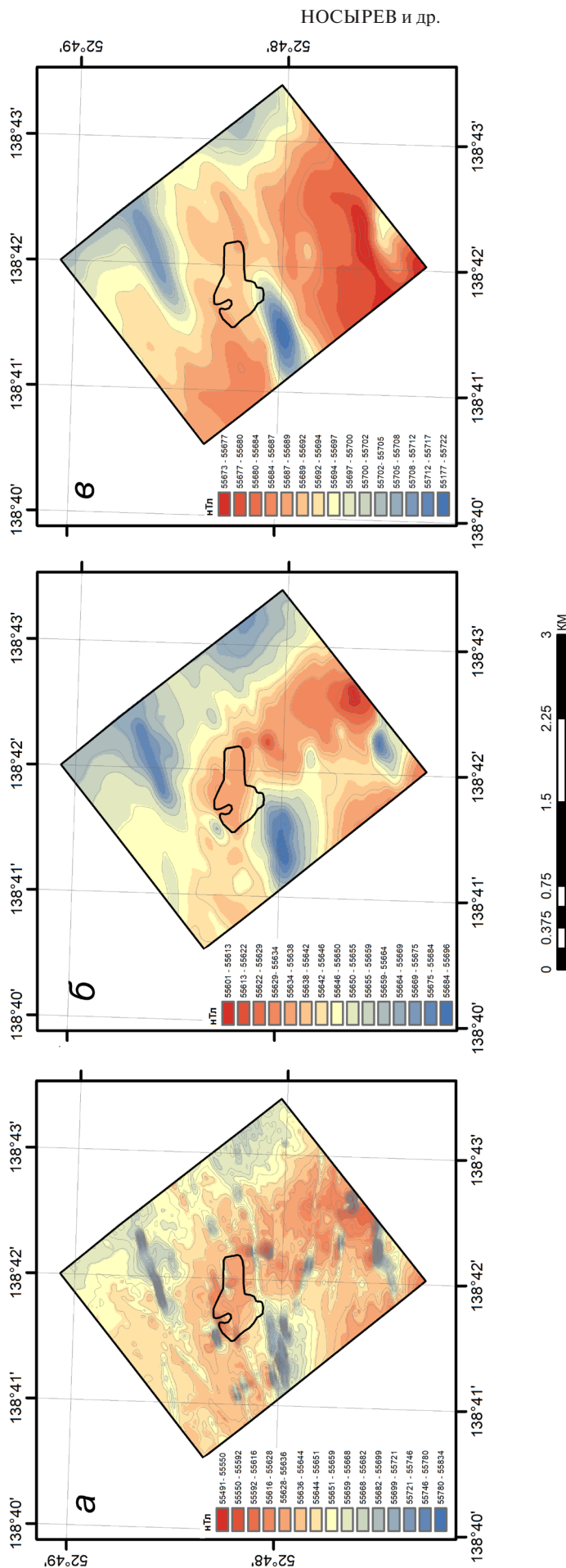


Рис. 6. Сопоставление результатов наземной и БПЛА-магнитных съемок на участке перекрытия съемок № 1: *a* — модуль полного вектора индукции магнитного поля по данным наземной съемки; *b* — то же, пересчитанный вверх на 50 м; *e* — модуль полного вектора индукции магнитного поля по данным БПЛА-съемки. Черный контур — граница месторождения золота Чульбаткан.

Fig. 6. Comparison of the ground and UAV magnetic surveys in the survey overlap area № 1: *a* — total magnetic intensity from ground-based survey; *b* — same as above, extrapolated upward by 50 m; *e* — total magnetic intensity from the UAV-borne survey. The black outline is the boundary of Chulbafkan gold deposit.

ВОЗМОЖНОСТИ КРУПНОМАСШТАБНОЙ МАГНИТНОЙ СЪЕМКИ

В результате получаются единые карты магнитного поля, увязанные по уровню. Они могут быть полезны при охвате больших площадей, где стоит задача интерпретации основных черт геологического строения.

Таким образом при увязке площадей для построения единых карт оптимальным является увязка карты магнитного поля, пересчитанного вверх на среднюю высоту БПЛА-съёмки с картой, полученной по результатам маловысотной съёмки. В этом случае карты не будут различаться

по урону, но только по детальности. При этом аномалии, зафиксированные на уровне 50 м будут наилучшим образом совпадать с наземными аномалиями, пересчитанными вверх. Если же нужна региональная составляющая, примерно соответствующая уровню БПЛА-съёмки, то в этом случае оптимальным вариантом будет использование данных наземной съёмки, пересчитанных на высоту примерно в 2–2.5 раза больше средней высоты магнитометра БПЛА над поверхностью Земли.

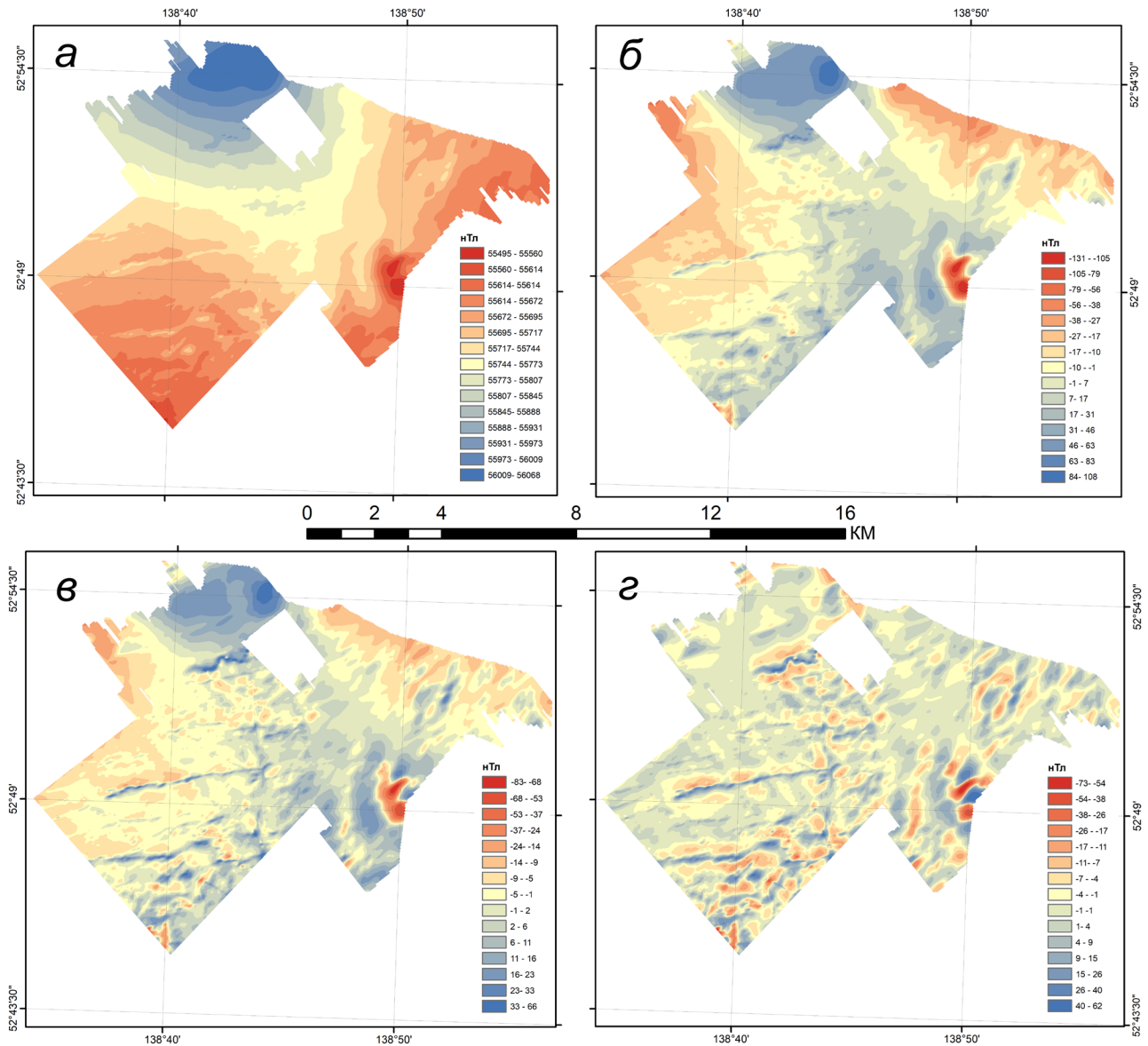


Рис. 7. Сводные карты магнитного поля по данным наземной и БПЛА съёмок: *a* — сводная карта модуля полного вектора индукции магнитного поля; *б* — локальные аномалии модуля полного вектора индукции магнитного поля (региональный фон — поле на высоте 1000 м); *в* — локальные аномалии модуля полного вектора индукции магнитного поля (региональный фон — поле на высоте 250 м); *з* — локальные аномалии модуля полного вектора индукции магнитного поля (фильтр Баттерворта).

Fig. 7. Combined magnetic field maps based on the ground and UAV survey data: *a* — combined map of the total magnetic intensity; *b* — local anomalies of the total magnetic intensity (regional background — field at an altitude of 1000 m); *v* — local anomalies of the total magnetic intensity (regional background — field at an altitude of 250 m); *z* — local anomalies of the total magnetic intensity (Butterworth filter).

Спектральный анализ разновысотных магнитных полей. Еще одним способом сравнения разновысотных съемок может выступать спектральный анализ полей и соответствующая статистическая оценка глубин залегания магнитных источников (Spector, Grant, 1970). Нами рассчитаны двумерные энергетические спектры для двух областей перекрытия съемок и отдельно для площадей наземной и БПЛА-съемок и выполнена оценка глубин до магнитных источников. Во всех трех случаях в качественном отношении спектры практически идентичны, поэтому приведены спектры только по одной площади перекрытия № 2 (рис. 8). Для построения спектров использованы гриды с размером ячейки 20 м. Размер площади в обоих случаях одинаков, поэтому шаг волнового грида для обоих случаев составил 0.198413 цикла/км. Это позволяет корректно сравнивать полученные данные. На рисунке показано, что для двух видов съемок наблюдается большая разница на высоких частотах. При частоте более 10 мощность на БПЛА-спектре падает до -8 . Это значит, что сигнал на высоких частотах очень малый, т.е. высота съемки «погасила» эффект от мелких магнитных приповерхностных объектов. На наземном спектре мощность падает всего до -4.5 . Это в тысячи раз больше энергии, чем у БПЛА на тех же частотах. Соответственно наземная съемка фиксирует много мелких приповерхностных объектов, часть из которых в определенных геологических условиях является важной информацией для проведения поисковых работ. В этом смысле наземная съемка более информативна. Для структурного картирования

глубоких горизонтов этот «шум» в результатах наземной съемки может мешать, но, при этом он достаточно легко убирается любым фильтром, ограничивающим высокие частоты. Оценка глубин магнитных источников характеризуется следующими особенностями. Предварительное еще раз отметим что в данном случае дается усредненная оценка глубины для ансамбля магнитных тел в пределах всей рассматриваемой площади. Первый глубинный уровень для данного участка (наиболее низкочастотная часть спектра) по наземной съемке составляет около 410–430 м, по данным съемки с БПЛА этот же горизонт отображается на глубинах 470–510 м. Сходимость неплохая, разница составляет ~ 10 –30 м и может быть вызвана тем, что БПЛА-съемка за счет высоты «сглаживает» пики от магнитных тел этого уровня и «математический» центр масс источников кажется глубже.

В наземной съемке на частотах 1.7–2.5 достаточно четко выделяется уровень глубин магнитных тел 90–100 м. В магнитной БПЛА-съемке этот уровень несколько «размыт» и уходит в область глубин 150–170 м, что также достаточно хорошо соответствует оценке по наземному магнитному полю (100 м реальной глубины + 50 м высоты).

Также еще раз отметим, что наземная съемка имеет гораздо более мощный сигнал на высоких частотах (\ln Энергии = ~ -4 против -8 у БПЛА), что подтверждает большую эффективность наземной съемки для картирования приповерхностных структур.

Таким образом полагаем, что для картирования магнитных тел, определяющих

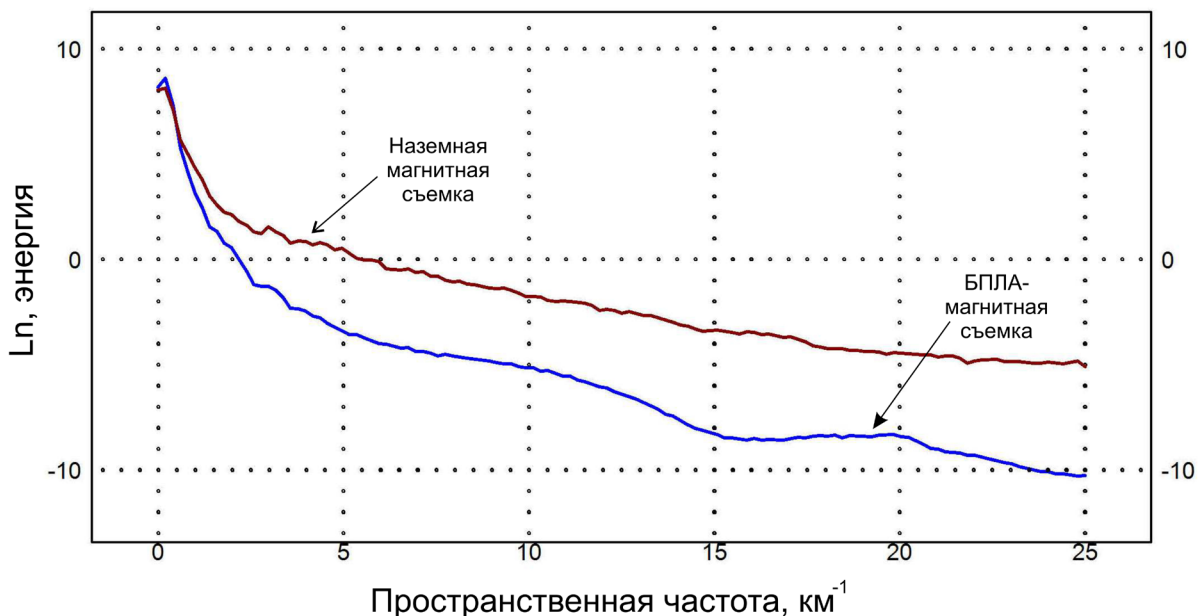


Рис. 8. Энергетические спектры наземной и БПЛА-магнитных съемок для площади перекрытия № 2.

Fig. 8. Energy spectra from ground-based and UAV-base magnetic surveys for survey overlap area № 2.

«региональную» составляющую магнитного поля нет принципиальной разницы в результатах интерпретаций наземной и БПЛА магнитных съемок, более того, последняя дает более «чистую» региональную составляющую за счет естественной «фильтрации» высокочастотных аномалий. Что касается приповерхностной составляющей, то здесь на первом месте стоит наземная магнитная съемка, особенно на площадях где на поверхности развиты породы с низкими значениями МВ.

Моделирование разновысотных магнитных полей. Нами выполнено моделирование магнитного поля в двух направлениях: анализ уменьшения интенсивности магнитных аномалий с высотой для тел правильной геометрической формы и сравнение информативности магнитных моделей, полученных по отдельным разрезам в результате инверсии.

Одним из факторов, позволяющих оценить относительную эффективность двух видов съемок, является оценка изменения интенсивности типовых аномалий с высотой. Известно, что с увеличением расстояния R от намагниченного тела напряженность магнитного поля затухает по закону $1/R^3$ (Martyshko et al., 2024). Подобные расчеты применительно к задачам БПЛА-магнитной съемки выполнялись для сильномагнитных объектов небольших размеров (Cunningham, 2016; Muravyev, Sapunov, 2021).

Для понимания конкретных цифр в условиях слабомагнитного разреза нами выполнено моделирование магнитного поля от тел правильной формы при их различной магнитной восприимчивости. Моделирование выполнено по профилю широтной ориентировки, параметры нормального поля при расчете соответствовали времени наземной съемки ($T=55720$ нТл, $I=68.8^\circ$, $D=-13^\circ$). Модель представляла собой вертикальный пласт, выходящий на поверхность, ограниченный на глубине 400 м. Ширина пласта составляла 10, 20, 50, 100 м, магнитная восприимчивость $50 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ, расчет аномалии ΔT выполнен для высот 10, 20, 50 и 100 м (рис. 9). Существует условно пороговые значения МВ, со значениями ниже которой магнитные тела на высоте не смогут фиксироваться в силу малости аномалии. Кроме того, это зависит и от ширины пласта, узкие пласты (≤ 20 м) на высоте 50–60 м создают аномалии ≤ 10 нТл. При этом дополнительно происходит выполаживание градиентов аномалии, что в совокупности делает их выделение затруднительным.

При этом на многих площадях, сложенных немагнитными породами, такие и меньшие значения эффективной МВ — обычная ситуация. Также отметим, что если такие аномалии зафиксированы на поверхности, то при пересчете

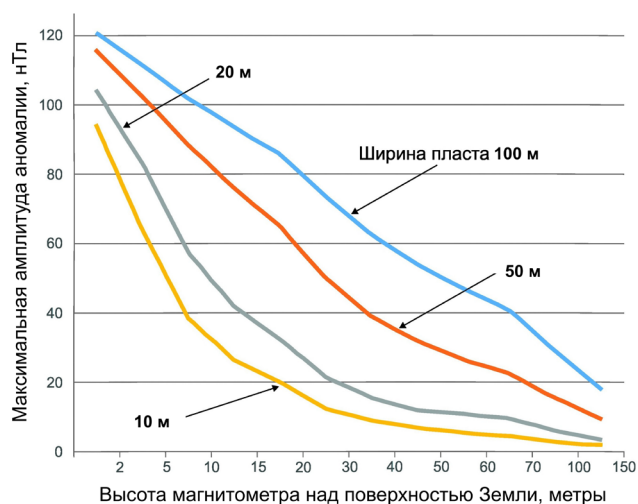


Рис. 9. Зависимость максимальной амплитуды магнитной аномалии от высоты магнитометра над поверхностью Земли и ширины вертикального пласта. Магнитная восприимчивость пласта $50 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ.

Fig. 9. The dependence of the maximum amplitude of the magnetic anomaly on the height of the magnetometer above the Earth's surface and the width of the vertical layer. The magnetic susceptibility of the layer is $50 \cdot 10^{-5}$ SI units.

на высоту 50 м они всегда в том или ином виде остаются, магнитное поле по наземной съемке, пересчитанное на 50 м вверх, в ряде случаев для слабо магнитных разрезов более детальное, чем измеренное на этой высоте. То есть существует группа аномалий, которые не фиксируются (или не могут быть выделены) на высоте магнитометра БПЛА. Для аномалий, зафиксированных на обоих уровнях с высотой просто меняются характеристики.

В практике работ в последнее время при интерпретации широко используется построение разрезов эффективной магнитной восприимчивости по серии профилей на основе автоматической инверсии магнитного поля, например, Zond2GM, Zond3GM (<https://geodevice.ru>).

Такая информация позволяет более наглядно представлять магнитную модель площади, расположение аномалиеобразующих объектов и анализировать особенности ее геологического строения. В связи с этим нами выполнена инверсия магнитного поля с построением разреза эффективной магнитной восприимчивости по линии 726 (см. положение линии на рис. 1) для его «наземного» варианта (высота магнитометра над землей 2 м) и снятого с БПЛА (фактическая высота магнитометра по профилю). Дополнительно для анализа детальности соответствующих съемок выполнена инверсия «наземного» магнитного поля, пересчитанного в верхнее полупространство на высоту 50 м. Результаты этих расчетов приведены на рис. 10.

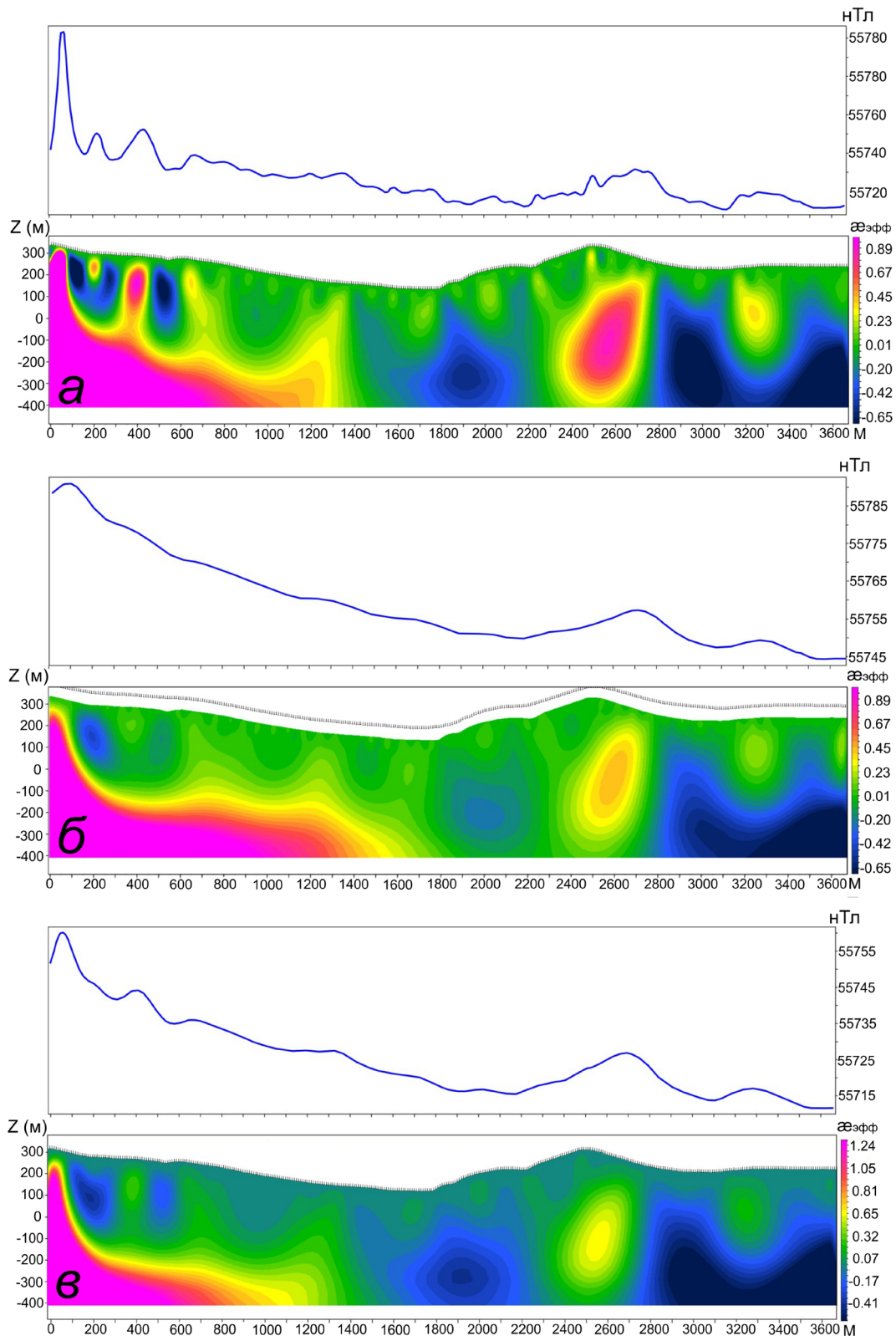


Рис. 10. Разрезы эффективной магнитной восприимчивости по данным инверсии магнитного поля в программе ZondGM2D по профилю 726: *a* — наземная съемка, высота магнитометра над Землей — 2 м; *б* — БПЛА-съемка, высота магнитометра над землей в среднем — 53 м; *в* — наземная съемка, магнитное поле, продолженное вверх на 50 м. $\varepsilon_{\text{эфф}}$ — эффективная магнитная восприимчивость, 10^{-3} ед. СИ.

Fig. 10. Cross-sections of effective magnetic susceptibility based on magnetic field inversion data from the ZondGM2D software along survey line 726: *a* — ground-based survey, the height of the magnetometer above the ground is 2 m; *б* — UAV survey, the height of the magnetometer above the ground is 53 m in average; *в* — ground-based survey, magnetic field extended upward by 50 m. $\varepsilon_{\text{эфф}}$ — effective magnetic susceptibility, 10^{-3} SI units.

По результатам сравнения можно сделать следующие выводы:

- границы глубинных магнитных тел на разрезах в целом хорошо повторяются, однако все же не являются полностью идентичными;

- крупные магнитные тела с относительно высокой МВ и горизонтальными размерами проявляются практически одинаково;

- для инверсии по полю, измеренному на поверхности, наблюдается большая дифференцированность верхних 100–150 м разреза, магнитные тела имеют более четкие границы, более определенную форму;

- есть группа магнитных тел, аномалии от которых просто исчезают на разрезе, построенном по магнитному полю, полученному при съемке с БПЛА, т.е. это группа аномалий, которые не проявляются на высоте;

- модель, полученная по сглаженному полю при высоте магнитометра 2 м достаточно точно отвечает модели, полученной по магнитному полю при съемке с БПЛА.

Соответственно общий вывод состоит в том, что при инверсии магнитного поля, полученного по данным БПЛА-съемки уменьшается детальность верхней части разреза, некоторые слабомагнитные тела могут не выделиться. Но вопрос опять же в том, насколько такие магнитные неоднородности разреза будут важны для решения поисковых задач.

Таким образом, эффективность магнитной съемки, определяющая решение поставленных геологических задач, в том числе и с БПЛА, зависит от дифференциации пород изучаемой площади по магнитной восприимчивости, интенсивности ожидаемых полезных аномалий, их амплитуды и морфологических особенностей. Наименее благоприятны для БПЛА-съемки участки, сложенные слабомагнитными породами. Здесь возможно выделение каких-либо магматических тел, но выделение магнитных аномалий, связанных с неоднородностями осадочного разреза, в том числе с зонами изменений пород невозможно. Можно условно провести границу в эффективной магнитной восприимчивости в $(50-70) \cdot 10^{-5}$ ед. СИ, выше которой опасения о пропуске аномалий по крайней мере с картировочной точки зрения безосновательны. При магнитной восприимчивости менее $50 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ существует большой риск пропустить аномалию.

Исходя из этого, магнитная БПЛА-съемка для изучения площадей преимущественно с осадочным разрезом должна выполняться с ясным пониманием возможных ограничений по интерпретации. В этом смысле ее применение при поисках орогенных месторождений золота в метаосадочных толщах без дополнения

детальной наземной съемкой может оказаться не всегда эффективным. Подобные соображения о преимуществах наземной съемки для решения ряда поисковых задач высказывались и для некоторых других золоторудных районов (Ермолин, Калинина, 2023). С другой стороны, для площадей с контрастными по магнитным свойствам породами (например, вулканогенные структуры, сложенные магнитными породами, магнитные интрузии) эффективность БПЛА-съемки может не уступать наземной.

Кроме того, эффективность съемки в аспекте выделения слабых магнитных аномалий, существенно зависит от высоты магнитометра. В горно-таежных условиях Дальнего Востока его высота вряд ли может быть менее 40–60 м, что, по сути, определяет промежуточное положение БПЛА-съемки между наземной и вертолетной съемками. При этом надо понимать, что экономически это вещи несопоставимые и вряд ли в современных условиях использование для этих целей вертолета может быть оправдано.

Вместе с тем БПЛА-съемка имеет несколько специфических преимуществ. Не будем останавливаться на экономических показателях, они достаточно очевидны и рассмотрены в работе (Мовчан и др., 2022). Отметим лишь два методических аспекта: первый — это более густая частота отсчетов, что обеспечивает и более ясную форму аномалий, а в случае необходимости выделение аномалий с очень малыми горизонтальными размерами. Второе перспективное направление — возможность выполнять съемку на разных уровнях и строить объемные модели магнитного поля и соответственно более точные магнитные модели среды.

Применение БПЛА оптимально при масштабе съемок 1:10000–1:25000, может быть 1:50000. При масштабе 1:5000 и крупнее лучше использовать наземную съемку, поскольку в ряде случаев, стоящие перед ней задачи выделения слабых аномалий, связанных с рудными телами, зонами гидротермально измененных пород и т.п., могут не решиться из-за высоты полета, поскольку нет гарантии, что они зафиксируются. Также съемка масштаба 1:5000 и крупнее охватывает относительно компактные и доступные участки, которые можно без особых затрат отработать наземной съемкой. При более мелких масштабах использование БПЛА становится нерациональным. При этом надо учесть, что при любом масштабе возможно применение БПЛА с методическими целями, к примеру изучение отдельных аномалий на разных высотных уровнях и т.п. Также надо отметить, что в случае, когда детальная магнитная съемка может проводиться с расположением магнитометра на

высотах до 5–8 м, т.е. там, где нет залесенности и сложного рельефа, она вполне приемлема и экономически обоснована.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Маловысотная аэромагнитная съемка, выполненная с целью изучения флангов золоторудного поля, включающего месторождение золота месторождения Чульбаткан, с использованием беспилотного летательного аппарата показала хорошую сходимостью с результатами наземной магнитной съемки масштаба 1:10000 с точки зрения решения задачи геологического картирования. При изучении непосредственно участка месторождения золота Чульбаткан (5.4 км²), даже увеличение плотности наблюдений с БПЛА вдвое, не дает той детальности, которую обеспечивает наземная магнитная съемка.

Проведение маловысотной аэромагнитной съемки с использованием беспилотного летательного аппарата позволяет оперативно, с относительно более высокой детальностью, соответственно с более высокой геологической эффективностью относительно традиционной аэромагнитной съемки изучать площади порядка сотен квадратных километров. Магнитные съемки с использованием БПЛА совершенно определенно могут заменить вертолетные съемки, если только использование последнего не связано с выполнением каких-либо электро-разведочных методов, требующих тяжелого оборудования.

Качество маловысотной аэромагнитной съемки с использованием беспилотного летательного аппарата позволяет составлять сводные карты с площадями наземной съемки с определенной потерей информативности, но вполне пригодные для решения широкого круга картировочных задач. Данный факт создает предпосылку для использования наземных съемок предыдущих лет в комплексе с современными съемками. Подобный подход к составлению сводных карт разных лет позволяет получать высококачественную геофизическую основу для обеспечения геологических проектов на площадях размером десятки — первые сотни квадратных километров, т.е. объектов ранга рудного поля — рудного узла. Для изучения объектов ранга рудного месторождения, размером до первых квадратных километров, желательно все же использовать наземную магниторазведку.

Высокочастотная составляющая магнитного поля, сглаживающаяся на высоте при БПЛА-съемках, в некоторых случаях может нести важную специфическую информацию необходимую для решения геологических и поисковых задач. С этой точки зрения нужно выделять

типы разрезов благоприятные и не благоприятные для проведения БПЛА-съемки. В первую очередь не благоприятными являются площади, сложенные осадочными образованиями, что заставляет осторожно относиться к применению этого метода при поисках орогенного золотого оруденения.

В целом мы полагаем, что использование БПЛА на этапе поисковых работ масштаба 1:10000–1:25000 вполне обосновано и эффективно, но при этом надо учитывать геологические особенности площади, магнитные свойства пород и актуальность теряемой информации.

Работа выполнена в рамках госзадания ИТиГ ДВО РАН (тема НИР № 126020216323-2).

Список литературы [References]

- Алексеев А.С., Старостин В.И.* Новое месторождение золота в нижнем Приамурье—Чульбаткан (Хабаровский край) // Вестник Московского Университета. 2017. Серия 4. Геология. № 13. С. 33–38 [Alekseev A.S., Starostin V.I. New gold deposit in the lower Amur region - Chulbatkan (Khabarovsk Krai) // Bulletin of Moscow University. 2017. Series 4. Geology. № 13. P. 33–38 (in Russian)].
- Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России: в 2 кн. // Под ред. А.И. Ханчука. Владивосток: Дальнаука, 2006. Кн. 1. 572 с., Кн. 2, 409 с. [Geodynamics, magmatism and metallogeny of the East of Russia: in 2 books. // Ed. A.I. Khanchuk. Vladivostok: Dalnauka, 2006. Book. 1., 572 p., Book. 2, 409 p. (in Russian)].
- Груздев Р.В.* Магниторазведочные работы — наземная технология, аэромагнитная съемка на самолете и беспилотном летательном аппарате: сопоставительный анализ результатов (на примере Восточного Забайкалья) // Вестник Забайкальского государственного университета. 2020. Т. 26. № 8. С. 6–15. <https://doi.org/10.21209/222792452020268615> [Gruzdev R.V. Magnetic exploration work - ground-based technology, aeromagnetic survey by aircraft and unmanned aerial vehicle: comparative analysis of results (using the example of Eastern Transbaikalia) // Bulletin of the Transbaikalian State University. 2020. V. 26. № 8. P. 6–15 (in Russian)].
- Ермолин Е.Ю., Мелешикина Д.А., Угрюмов И.А.* Сопоставление результатов опытно-методических работ по магниторазведке в наземной и БПЛА технологиях // Материалы 49-ой сессии Международного семинара им. Д.Г. Успенского — В.Н. Страхова «Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей». Екатеринбург. 2023. С. 150–154 [Ermoilin E.Yu., Meleshkina D.A., Ugryumov I.A. Comparison of the results of experimental and methodological work on magnetic exploration in ground and UAV technologies // Proceedings of the 49th session of the International Seminar named after D.G. Uspensky - V.N. Strakhov «Issues of the theory and practice of geological interpretation of gravitational, magnetic and electric fields». Ekaterinburg. 2023. P.150–154 (in Russian)].

- Ермолин Е.Ю., Калинина А.Е.* Преимущества наземной магнитной съемки перед БПЛА при поисках золотоносных кварцевых жил в Якутии // Материалы 49-ой сессии Международного семинара им. Д.Г. Успенского – В.Н. Страхова «Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей». Екатеринбург: ИГФ УрО РАН. 2023. С.147–149 [*Ermolin E.Yu., Kalinina. A.E.* Advantages of ground-based magnetic survey over UAVs in the search for gold-bearing quartz veins in Yakutia // Proceedings of the 49th session of the International Seminar named after D.G. Uspensky – V.N. Strakhov «Issues of the theory and practice of geological interpretation of gravitational, magnetic and electric fields». Ekaterinburg: IGF UrO RAN 2023. P. 147–149 (in Russian)].
- Иванова Ю.Н., Иванов К.С., Бондарева М.К. и др.* Применение беспилотных летательных аппаратов при геологоразведочных и поисково-оценочных работах // Исследование Земли из космоса. 2021. № 1. С. 78–88. [*Ivanova Yu.N., Ivanov K.S., Bondareva M.K. et al.* Use of unmanned aerial vehicles in geological exploration and prospecting and evaluation work // Earth Research from Space. 2021. № 1. P. 78–88 (in Russian)].
- 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. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.23> [*Movchan I.B., Shaigallyamova Z.I., Yakovleva A.A.* Identification of structural control factors of primary gold ore occurrences by the method of unmanned aeromagnetic exploration on the example of the Neryungri region of Yakutia // Journal of Mining Institute. 2022. V. 254. P. 217–233 (in Russian)].
- Снегирев Н.В., Гаченко С.В., Паршин А.В.* Сравнительный анализ информативности маловысотной магниторазведки с применением беспилотных летательных аппаратов и наземной магниторазведки // Науки о земле и недропользование. 2023. Т. 46. №2. С. 182–189. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-2-182-189> [*Snegirev N.V., Gachenko S.V., Parshin A.V.* Comparative analysis of the information content of low-altitude magnetic exploration using unmanned aerial vehicles and ground-based magnetic exploration // Earth Sciences and Subsoil Use. 2023. V. 46. № 2. P. 182–189 (in Russian)].
- Cunningham M.* Aeromagnetic surveying with unmanned aircraft systems. Thesis for: M. Sc. Earth Sciences. 2016. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4141.8009>
- Martyshko P.S., Fedorova N.V., Rublev A.L.* On the Crustal Sources of Magnetic Anomalies in the Middle Urals // Geodynamics & Tectonophysics. 2024. V.15. № 3. P. 0763. <https://doi.org/10.5800/GT-2024-15-3-0763>
- Muravyev L.A., Sapunov V.A.* Approximation of Multichannel Magnetometry Results for Local Ferromagnetic Objects Search // Engineering and Mining Geophysics. 2021. V. 2021. P. 1–8. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202152093>
- Spector A., Grant F.S.* A statistical models for interpreting aeromagnetic data // Geophysics. 1970. V. 35. № 2. P. 293–302.

THE POTENTIAL OF LARGE-SCALE MAGNETIC SURVEYING USING UNMANNED AERIAL VEHICLES IN GOLD PROSPECTING: THE CASE OF THE CHULBATKAN ORE FIELD

M.Yu. Nosyrev, A.Yu. Yurchuk, G.Z. Gilmanova, A.Yu. Peskov

Kosygin Institute of Tectonic and Geophysics FEB RAS, Khabarovsk, Russia, 65680000

Received Yune 04, 2025; revised March 15, 2026; accepted March 27, 2026

A comparison was made of the results of ground-based magnetic surveys and unmanned aerial vehicle surveys performed in 2020 and 2021 at the Chulbatkan gold deposit in the Khabarovsk region and its surrounding area. The analyses of the correlation between the total magnetic field induction vector and its local anomalies obtained from the two types of surveys in overlapping areas demonstrate their high consistency. The proportion of anomalies not detected by the aerial magnetic survey was evaluated. The influence of magnetic field smoothing at altitude on the results of its interpretation was analyzed in comparison with ground-based surveys. The experience of compiling a composite magnetic map based on both types of magnetic surveys for the Chulbatkan deposit area was examined. Methodological conclusions were drawn regarding the effectiveness of low-altitude surveys for various geological settings, considering the magnetic properties of the rocks, and the role of such surveys within the overall exploration complex was demonstrated.

Keywords: ground-based magnetic survey, UAV, Chulbatkan gold deposit.