

УДК 550.838:528.8

Опыт применения аппаратурно-программного комплекса БПЛА-магниторазведки и аэротепловизионной съёмки в условиях высокогорной местности

■ Рукосяев Д.А.¹, Юрьев А.А.^{1,2}, Черных А.А.¹, Рыбченко А.А.^{1,4}, Буддо И.В.^{1,3}

¹ Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск.

² Институт географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, г. Иркутск.

³ Сибирская школа геонаук ИрННТУ, г. Иркутск.

⁴ Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН

Аннотация. Рассмотрен опыт планирования БПЛА-магниторазведки и аэротепловизионной съёмки на высокогорном участке с высотными отметками 1400-3000 м. Разработанное в ходе проведенных исследований программное обеспечение (ПО) позволяет рассчитывать маршруты по цифровой модели рельефа, изменять шаг маршрутных точек на подъёмах и спусках, предусматривает плавные переходы и рекомендует продолжительность вылета. Магнитная съёмка выполнена с БПЛА DJI Matrice 400 с магнитометром MaxiMag на 10-метровом подвесе, тепловизионная – с БПЛА DJI Mavic 3 Thermal. Для выборки из десяти контрольных профилей (742 интервала) средняя абсолютная ошибка составила 3,07 нТл, среднеквадратичная ошибка – 4,08 нТл. Площадь тепловизионного контура составила 24,2 км². Показан пример теплового дешифрирования склоновых деформаций. Предлагается сопоставлять площадные магнитные и детальные тепловые материалы с учётом различий в масштабе наблюдений. Применение в горных районах Арктики требует проведения локальных полевых испытаний для корректировки параметров полёта.

Ключевые слова: БПЛА, магниторазведка, аэротепловизионная съёмка, высокогорье, обтекание рельефа, планирование миссий, разломы, опасные геологические процессы, Арктика.

Финансирование: Работа выполнена в рамках темы № 1023110300018-4-1.5.4 Министерства науки и высшего образования РФ в молодежной лаборатории комплексных исследований Арктики ИЗК СО РАН.

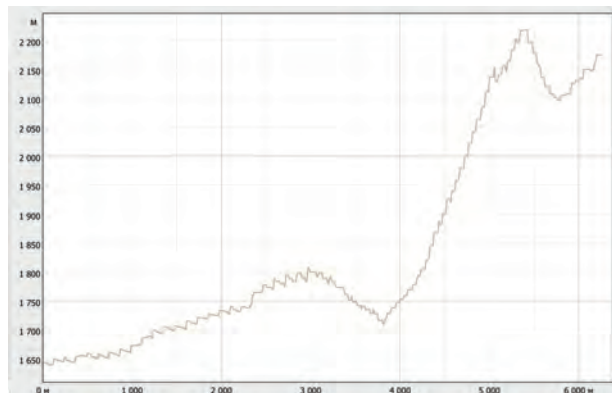
1. Введение

В условиях резко расчленённого рельефа сеть наблюдений геофизических методов нередко прерывается на скальных склонах, в осыпях и в зонах склоновых деформаций. БПЛА снимает часть этих ограничений, но создаёт другую задачу: траектория должна одновременно сохранять условия измерений, не выходить за ограничения носителя и оставлять энергетический резерв для возврата. Для подвесной магниторазведки добавляются раскиска датчика и магнитная помеха от носителя [4, 7-11]. Для аэротепловизионной съёмки критичны время суток, перекрытие кадров и изменение условий инсоляции [13, 14].

Цель работы – описать порядок планирования и полевого контроля двух БПЛА-методов для изучения разломного строения и признаков опасных склоновых процессов. Методическая особенность комплекса состоит в использовании общей цифровой основы при раздельном задании условий магнитных измерений и тепловизионной съёмки. Пригодность принятых технологических решений обоснована по результатам тестовых полевых работ, выполненных в 2026 г.

Материалы и методы

Работы выполнены на высокогорном



▲ Рис. 1. Профиль высот северной части площади по Copernicus DEM (около 30 м/пиксель). По горизонтали - расстояние вдоль профиля, м; по вертикали - абсолютная высота, м.

участке в пределах Алтае-Саянской горной страны с абсолютными высотными отметками 1400-3000 м. Маршруты пересекали водоразделы, долины и склоны разной экспозиции; пешеходный доступ к части профилей был ограничен. В период работ наблюдались порывы ветра до 20 м/с. Эта характеристика погоды не является принятым режимом съёмки с БПЛА: допустимые условия вылета определяются ограничениями носителя и подвесной системы [5].

Условия планирования иллюстрирует профиль северной части площади (рис. 1). На протяжении около 6,3 км отметки меняются приблизительно от 1640 до 2230 м; трасса последовательно пересекает подъёмы и понижения. Профиль построен по цифровой модели рельефа (ЦМР) Copernicus DEM с размером пикселя около 30 м [6]. Он показывает характер изменения высоты вдоль маршрута, не охватывая наиболее высокие и расчленённые части участка.

Геологическая задача заключалась в выявлении разломных зон и оценке признаков опасных склоновых процессов. Магнитные материалы рассматриваются на уровне площадных аномалий и их границ, тепловизионные - на уровне отдельных склонов и поверхностных нарушений.

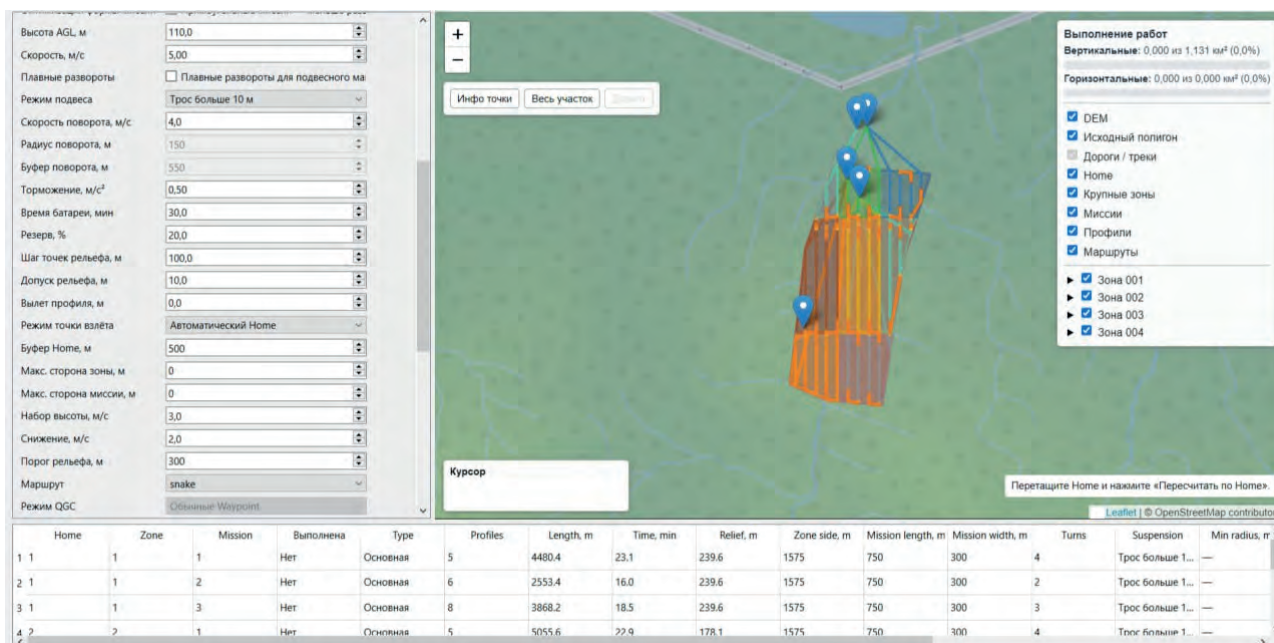
Их интерпретацию необходимо сопоставлять с рельефом и наземными наблюдениями: аномалия сама по себе не определяет активность разлома или механизм смещения [1-3].

Магнитную съёмку выполняли с БПЛА DJI Matrice 400 с магнитометром MaxiMag на тросовом подвесе длиной 10 м. Шаг рабочих линий составлял 75 м, секущих – 375 м. Носитель следовал в 110 м над рельефом, что давало номинальную высоту датчика около 100 м. Вариационная станция работала не далее 10 км от площади. Разнесение датчика и силовой установки снижало помеху, но повышало требования к разгону, торможению и радиусам разворота [7-11].

Тепловизионную съёмку выполняли с БПЛА DJI Mavic 3 Thermal с матрицей 640 × 512 пикселей и объективом 9,1 мм. Контур 24,2 км² разделили примерно на 61 блок по 0,4 км². На блок планировали четыре вылета около 30 мин каждый, скорость на рабочих галсах 7 м/с и перекрытия 80 × 80 %. При высоте 110 м и скорректированном в опытно-методических работах (ОМР) фокусном расстоянии 757,72 пикселя расчётный след кадра равен 92,9 × 74,3 м. Шаг маршрутов составляет 18,6 м, продвижение между кадрами – 14,9 м. Исходный размер проекции пикселя – около 14,5 см. Размер пикселя итоговой ортомозаики составлял 9 см. Объём с учётом перекрытий составил 25,1 км².

Разработка специализированного программного обеспечения

Для геофизических работ потребовалось дополнить штатное планирование DJI расчётом траектории с учётом подвеса и геометрии измерений. В разработанное ПО загружают полигон, ЦМР и точки Home. Расчёт объединяет геометрию сети, высоту над поверхностью, скорость и условия поворотов. Программа определяет продольный уклон и положение



▲ Рис. 2. Интерфейс специализированного ПО планирования полётов: параметры маршрута и ограничения движения (слева), схема миссий и точки Home (справа), таблица рассчитанных заданий (внизу). Показан пример проекта, численные настройки не являются универсальными режимами съёмки.

маршрутных точек; на подъёмах и спусках их шаг уменьшается с учётом допуска по высоте. Для тепловизионной съёмки по той же ЦМР задаются перекрытия и шаг кадров.

Параметры маршрута согласуют последовательно. Сначала выбирают высоту измерений и сеть, затем проверяют возможность набора и снижения высоты вдоль профиля. Для подвешенного магнитометра отдельно настраивают разгон, торможение и повороты, чтобы переход к рабочему режиму завершался до начала измерительной линии. Эти переходы были доработаны в ПО и испытаны в ОМР перед выходом на производственную площадь. Тепловизионная миссия использует общую основу планирования с настройками для кадровой съёмки.

В интерфейсе отдельно задаются параметры геометрии маршрута и ограничения движения (рис. 2). В показанном примере шаг точек рельефа равен 100 м, допуск – 10 м, скорости набора и снижения – 3 и 2 м/с, торможение – 0,5 м/с², резерв – 20 %. Показана конфигурация отдельного проекта. Допуск относится к

расчёту маршрута по ЦМР и не характеризует фактическую ошибку выдерживания высоты. Карту и таблицу миссий используют для проверки длины, времени и разбиения задания на блоки.

Рекомендуемая продолжительность вылета рассчитывается с учётом температуры, абсолютной высоты, ветра и полезной нагрузки. При переносе методики параметры расчёта проверяют в местных ОМР, сопоставляя план с фактической продолжительностью и остатком заряда. Задание экспортируется в ПО DJI Pilot 2. Решение о вылете принимает пилот БПЛА по фактической погоде и состоянию комплекса.

Опытно-методические работы и контроль

В ходе ОМР проверялось поведение подвешенного датчика при разгоне, торможении и поворотах; по результатам испытаний вносились корректировки и улучшения в ПО. Настройку движения выполняют с учётом длины подвеса и рельефа, добиваясь установившегося режима на входе в рабочую линию.



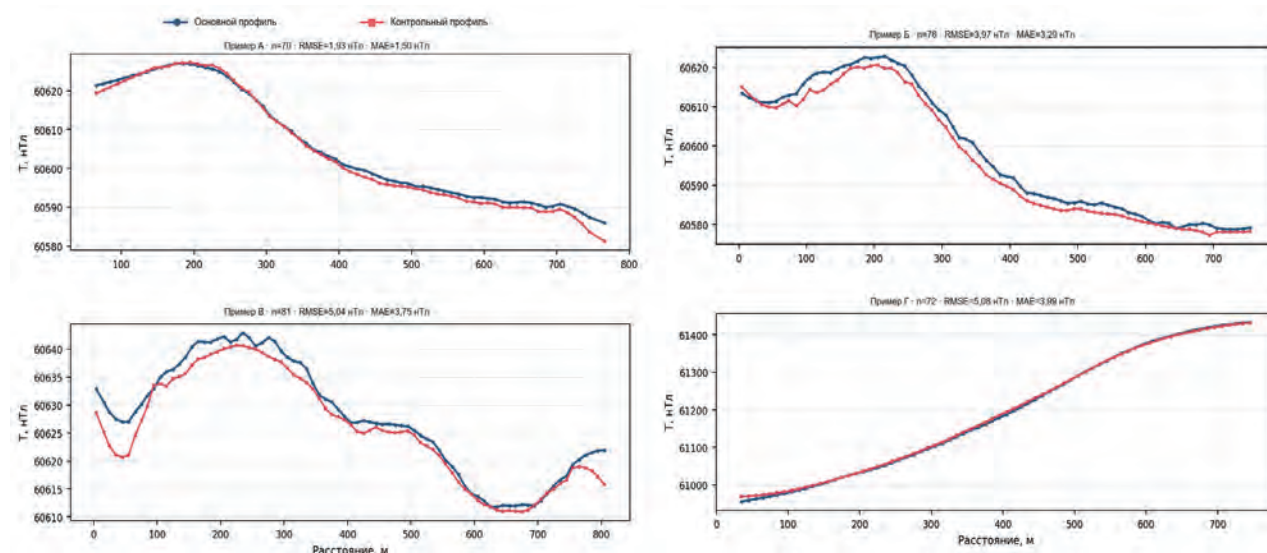
▲ Рис. 3. Принятая геометрия обтекания рельефа: высота носителя 110 м, длина подвеса 10 м, номинальная высота магнитометра около 100 м.

Номинальная геометрия измерений показана на рис. 3. Для нового участка параметры переходов и резерв возврата уточняют при выполнении локальных ОМР.

По результатам тепловизионных ОМР оптимальным временем съемки было выбрано раннее утро (03:00-06:00), скорость рабочих галсов 7 м/с. Скорость была выбрана с учётом рельефа, устойчивости БПЛА на разворотах и качества кадров. Съёмка выполнена с 10 июля по 3 августа 2026 г. При контроле проверялось покрытие и пригодность кадров для построения мозаики.

Повторяемость магнитных измерений оценивали повторным прохождением продольных профилей. Из 1357 полных продольных проходов 68 были контроль-

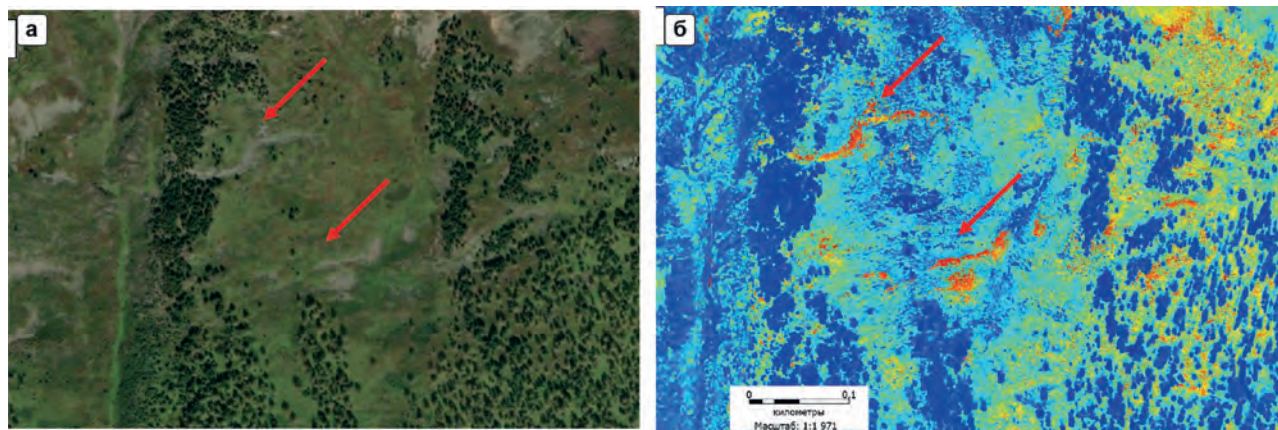
▼ Рис. 5. Четыре примера сопоставления основных и повторных магнитных профилей из контрольной выборки.



ными. Для выборки из десяти контрольных профилей сопоставлены 742 интервала общей длиной 7,33 км. Средняя абсолютная ошибка (MAE) составила 3,07 нТл, среднеквадратическая ошибка (RMSE) – 4,08 нТл; четыре пары профилей показаны на рис. 4. Показатели относятся к этой выборке и оценивают повторяемость измерений, а не эффект отдельных изменений ПО.

Сопоставление методов на разных пространственных масштабах

Общая ЦМР использовалась при планировании обеих съёмок, но их результаты имеют разную детальность. Сеть 75 × 375 м при высоте магнитометра около 100 м предназначена для анализа площадных аномалий и протяжённых границ. Тепловизионная съёмка раскрывает поверхностные особенности отдельных склонов. Для комплексирования предлагается сначала выделять структурные границы по магнитным материалам, затем сопоставлять их положение с признаками склоновых деформаций по тепловизионным и геоморфологическим данным. Наличие самостоятельной магнитной аномалии у каждой трещинной зоны не является условием такого анализа. На рис. 5 показан детальный теплови-



▲ Рис. 5. Признаки склоновых деформаций: а - космоснимок; б - термомозаика. Стрелками отмечены морфологические элементы, интерпретируемые как трещины отрыва и растяжения. Температурная шкала не приведена; показан качественный тепловой контраст.

зионный пример.

На космоснимке и термомозаике прослеживаются соответствующие друг другу линейные и дугообразные элементы (рис. 5). По результатам дешифрирования и маршрутных наблюдений эти элементы интерпретируются как трещины отрыва и растяжения, характерные для склоновых деформаций, в том числе сейсмогравитационных. Повышенный тепловой отклик объясняется открытым грубообломочным материалом и отличиями его нагрева и охлаждения от участков с растительностью. Тепловой контраст помогает проследить морфологические границы; сейсмическое происхождение и современная активность требуют самостоятельного обоснования.

Обсуждение результатов

Сильная сторона рассмотренного подхода – единая модель рельефа и повторяемый порядок контроля. При этом точность ЦМР в горах не равна точности истинной поверхности: в тенях рельефа, на скальных уступах и под древостоем ошибка может превысить заданный допуск.

Для критических участков нужны более детальная модель или бортовое измерение дальности до поверхности. Координата магнитометра на подвесе также не тождественна координате но-

сителя. Следующий шаг – снабдить датчик независимой GNSS/IMU-привязкой и включить оценку раскачки в отбраковку прохода.

Тепловой контраст зависит от излучательной способности поверхности, увлажнения, растительности и предшествующего нагрева. Для количественной температурной интерпретации нужны калибровка, повторные съёмки и наземная термометрия [13, 14]. Совместный анализ методов следует развивать на сопоставимых масштабах: оценивать положение склоновых деформаций относительно протяжённых магнитных границ и учитывать неоднозначность обеих интерпретаций. В представленном примере такая пространственная связь количественно не оценивалась.

Разработанная методика может быть масштабирована для выполнения работ в горных районах Арктики, включая Полярный Урал, где сочетаются трудная доступность, расчленённый рельеф и задачи дистанционного картирования [1, 2, 12-15]. Высокую важность имеет использование алгоритма обтекания, деление площади на миссии, учёт резерва и порядок контроля данных. При отрицательной температуре для таких БПЛА, как DJI Matrice 400 отдельно учитываются энергозатраты на поддержание температурного режима и работу подо-

грева аккумуляторов ТВ100 [5]. Подогрев расширяет рабочий диапазон, но не отменяет проверки фактической ёмкости, ветровой нагрузки и резерва возврата. Числовые параметры миссий для холода, обледенения и низкого солнца получают в местных ОМР.

Предложенный в статье подход применим к исследованиям температурных аномалий в Байкальской рифтовой зоне. Магнитные материалы могут дополнять структурную основу при выборе участков аэротепловизионной съёмки и наземной термометрии. Для активных разломов, геотермальных систем, криогенных и карстовых процессов диагностические признаки следует обосновывать отдельно; совпадение структурной границы и теплового контраста служит основанием для проверки, а не готовым заключением об их происхождении [3].

Выводы

В результате выполненных исследований разработанное программное обеспечение было апробировано для планирования магнитной и тепловизионной съёмок по единой цифровой модели рельефа в условиях высокогорной местности, при этом для каждого метода задавались собственные параметры и ограничения измерений.

Для выполнения БПЛА-магниторазведки с подвесным магнитометром в программном обеспечении были дополнительно реализованы плавные переходы между элементами траектории, а соответствующие параметры предварительно проверены в ходе опытно-методических работ перед производственной съёмкой.

С целью комплексной интерпретации полученных материалов целесообразно сопоставлять тепловые аномалии с площадными магнитными структурами с учётом различий в пространственной детальности применяемых методов.

Полученные результаты показывают возможность масштабирования разработанных алгоритмов планирования и контроля съёмки на горные районы Арктики, однако параметры вылетов должны уточняться по результатам местных опытно-методических работ с учётом низких температур, ветровой нагрузки, возможного обледенения и необходимого энергетического резерва БПЛА.

Литература

1. Базилевич С. О., Казанина М. А., Жилин Ф. Е., Кочетов М. В., Шепелев А. А. Комплексные инженерные изыскания при изучении потенциально опасных геологических процессов арктического шельфа // Приборы и системы разведочной геофизики. 2024. № 1 (80). С. 122-133.
2. Кауркин М. Д., Андреев Д. О., Романов В. В., Кауркин В. Д. Результаты комплексных инженерно-геофизических исследований на территории поста наблюдения за мерзлотными условиями автодороги Р-297 «Амур» // Приборы и системы разведочной геофизики. 2026. № 1 (88). С. 86-92.
3. Семинский К. Ж. Спецкартирование разломных зон земной коры. Статья 1. Теоретические основы и принципы // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5, № 2. С. 445-467. DOI: 10.5800/GT-2014-5-2-0136.
4. Accomando F., Bonfante A., Buonanno M., Natale J., Vitale S., Florio G. The drone-borne magnetic survey as the optimal strategy for high-resolution investigations in presence of extremely rough terrains: The case study of the Taverna San Felice quarry dike // Journal of Applied Geophysics. 2023. Vol. 217. Art. 105186. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2023.105186.
5. DJI. DJI Matrice 400 User Manual. Version 2.0 [Электронный ресурс]. 2026. URL: https://terra-1-g.djicdn.com/6189933d30024fc1b331bffe4fe41837/matrice-400/UM/Matrice_400_User_Manual_v2_

en.pdf (дата обращения: 12.09.2026).

6. Copernicus Data Space Ecosystem. Copernicus DEM - Global and European Digital Elevation Model [Электронный ресурс]. URL: <https://dataspace.copernicus.eu/explore-data/data-collections/copernicus-contributing-missions/collections-description/COP-DEM> (дата обращения: 14.09.2026).

7. Døssing A., Lima Simões da Silva E., Martelet G., Rasmussen T. M., Gloaguen E., Petersen J. T., Linde J. A high-speed, lightweight scalar magnetometer bird for km scale UAV magnetic surveying: On sensor choice, bird design, and quality of output data // *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13, no. 4. Art. 649. DOI: 10.3390/rs13040649.

8. Kaub L., Keller G., Bouligand C., Glen J. M. G. Magnetic surveys with unmanned aerial systems: Software for assessing and comparing the accuracy of different sensor systems, suspension designs and compensation methods // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2021. Vol. 22, no. 7. Art. e2021GC009745. DOI: 10.1029/2021GC009745.

9. Phelps G., Bracken R., Spritzer J., White D. Achieving sub-nanoTesla precision in multirotor UAV aeromagnetic surveys // *Journal of Applied Geophysics*. 2022. Vol. 206. Art. 104779. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2022.104779.

10. Walter C. A., Braun A., Fotopoulos G. Impact of three-dimensional attitude variations of an unmanned aerial vehicle magnetometry system on magnetic data quality // *Geophysical Prospecting*. 2019. Vol. 67. P. 465-479. DOI: 10.1111/1365-2478.12727.

11. Zheng Y., Li S., Xing K., Zhang X. Unmanned aerial vehicles for magnetic surveys: A review on platform selection and interference suppression // *Drones*. 2021. Vol. 5, no. 3. Art. 93. DOI: 10.3390/drones5030093.

12. Иванова Ю. Н., Иванов К. С., Бондарева М. К., Ермолаев В. А., Жуков

А. О. Опыт и возможности применения космических систем дистанционного зондирования Земли для прогнозирования золоторудного оруденения на труднодоступных территориях на примере Полярного Урала // *Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования*. 2019. Т. 20, № 2. С. 123-133. DOI: 10.22363/2312-8143-2019-20-2-123-133.

13. Van der Sluijs J., Kokelj S. V., Fraser R. H., Tunnicliffe J., Lacelle D. Permafrost terrain dynamics and infrastructure impacts revealed by UAV photogrammetry and thermal imaging // *Remote Sensing*. 2018. Vol. 10, no. 11. Art. 1734. DOI: 10.3390/rs10111734.

14. Ponti S., Girola I., Guglielmin M. Thermal photogrammetry on a permafrost rock wall for the active layer monitoring // *Science of the Total Environment*. 2024. Vol. 917. Art. 170391. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.170391.

15. Буддо И. В., Турутанов Е. Х., Мельникова В. И. [и др.]. Комплексные геофизические исследования в регионе Восточной Сибири и Арктики: история и современное состояние // *Актуальные направления и перспективные тенденции в науках о Земле (первая четверть XXI века): материалы Всерос. науч. конф.* Иркутск: ИЗК СО РАН, 2024. С. 31-32.