



ГЕОФИЗИКА

Научная статья
УДК 550.3
EDN: TEZSJR
DOI: 10.21285/2686-9993-2023-46-4-364-373



Результаты аэромагниторазведки с использованием беспилотного воздушного судна на Ромашкинском месторождении углеводородов

Б.М. Насыртдинов^{a✉}, А.В. Старовойтов^b, М.М. Хамиев^c

^{a-c} Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия

Резюме. Целью представленного исследования являлось проведение на Ромашкинском нефтяном месторождении (Республика Татарстан, Россия) съемки индукции магнитного поля с применением беспилотного воздушного судна по профилю длиной 68 км 320 м. В качестве беспилотного летательного аппарата использовался электрический гексокоптер DJI Matric 600Pro. Схема проведения съемки заключалась в следующем: маршрут во время полета состоял из трех параллельных залетов (основных профилей) и одного пересекающего залета (перпендикулярный профиль). Расстояние между соседними параллельными залетами составляло 100 м. Пересекающий профиль был необходим для проведения увязки основных профилей относительно друг друга. Каждый полевой день полетные задания строились таким образом, чтобы профили перекрывались с соседними вылетами величиной не менее 100 м и траектория движения совпадала с предыдущим вылетом. Для оптимизации процесса для двух соседних вылетов выбиралась одна точка взлета/посадки. Максимум за одну съемку в течение 20–25 мин беспилотное воздушное судно с магнитометром покрывало профиль величиной, равной 1,25 км. Максимальная величина полета (от момента взлета до момента посадки) не превышала 6–6,5 пог. км. Рассмотренная в работе методика позволила покрывать 45 пог. км на протяженном участке даже в сложных погодных условиях (дождь и порывы ветра 8–12 м/с). Итоговая среднеквадратичная погрешность данной съемки составила $\pm 4,7$ нТл. В результате проведенной съемки было получено три профиля со значением индукции магнитного поля на протяженном участке. В итоге наблюдалась хорошая корреляционная зависимость между аэромагнитной съемкой с данными блокового строения фундамента (по данным геоморфологического анализа) с локальной компонентой кристаллического фундамента. Алтунино-Шунакский разлом уверенно проявился в магнитном поле в виде положительной аномалии с амплитудой ≈ 60 нТл.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, аэромагниторазведка, геофизика

Для цитирования: Насыртдинов Б.М., Старовойтов А.В., Хамиев М.М. Результаты аэромагниторазведки с использованием беспилотного воздушного судна на Ромашкинском месторождении углеводородов // Науки о Земле и недропользование. 2023. Т. 46. № 4. С. 364–373. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-4-364-373>. EDN: TEZSJR.

GEOPHYSICS

Original article

Unmanned aerial vehicle aeromagnetic survey results on Romashkinskoye hydrocarbon field

Bulat M. Nasyrtdinov^{a✉}, Alexander V. Starovoytov^b, Marsel M. Khamiev^c

^{a-c} Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia

Abstract. The purpose of the study is to survey the magnetic field induction on the Romashkinskoye oil field (Republic of Tatarstan, Russia) using an unmanned aerial vehicle over the profile of 68 km 320 m. A DJI Matric 600Pro electric hexacopter was used as an unmanned aerial vehicle. The survey scheme was as follows: the mission route consisted of three parallel flights (main profiles) and one crossing flight (transverse profile). The distance between adjacent parallel flights was 100 m. The intersecting profile was necessary to connect the main profiles. The flight assignments of each field day

© Насыртдинов Б.М., Старовойтов А.В., Хамиев М.М., 2023



were built to overlap the profiles by at least 100 m by the nearby flights and make the flight trajectory coincide with the one of the previous flight. To optimize the process one takeoff / landing point was selected for two nearby flights. During one 20-25 min survey the maximum profile covered by the unmanned aerial vehicle was 1.25 km. The maximum flight distance (from the takeoff moment to the landing) did not exceed 6–6.5 linear kilometers. The methodology considered in the article made it possible to cover 45 linear kilometers over a long span even in adverse weather conditions (rain and wind gusts of 8–12 m/s). The resulting root mean square error for this survey was ± 4.7 nT. The survey conducted allowed to obtain 3 profiles with the magnetic field induction magnitude over an extended section. A good correlation was registered between the aeromagnetic survey and the data on the block structure of the basement (according to geomorphological analysis data) with the local component of the crystalline basement. Altunino-Shunak fault has clearly manifested itself in the magnetic field as a positive anomaly with an amplitude of ≈ 60 nT.

Keywords: unmanned aerial vehicle, aeromagnetometry, geophysics

For citation: Nasyrtdinov B.M., Starovoytov A.V., Khamiev M.M. Unmanned aerial vehicle aeromagnetic survey results on Romashkinskoye hydrocarbon field. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsol use*. 2023;46(4):364-373. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-4-364-373>. EDN: TEZSJR.

Введение

На сегодняшний день активная разработка беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) ведет к их повсеместному применению в различных областях. Магниторазведочные работы не стали исключением. Так, для проведения аэромагнитных исследований начали применяться БПЛА в различных модификациях¹. Данный тип съемки в настоящее время рассматривается в качестве разновидности аэромагнитной съемки², что позволяет решать не только задачи классической аэромагниторазведки (выделение рудных залежей, исследование нефтегазовых структур и т. п.), но и проблемы, связанные с инженерной геологией и археологией³.

Большая часть подобных работ посвящена аэромагниторазведочным работам масштаба 1:1000–1:10000 [1–20], на основании которых в 2018 году были выпущены «Методические рекомендации по выполнению маловысотной аэромагнитной съемки»⁴, а в 2020 году «Методические рекомендации по проведению комплексных аэрогеофизических съемок»⁵.

Целью представленного исследования являлось проведение аэромагнитной съемки с беспилотным воздушным судном (БВС) на протяженном участке (68,32 км). Для решения поставленной задачи использовалась следующая аппаратура (рис. 1):

– БВС гексокоптер DJI Matrice 600 Pro;

– аэромагнитометр оверхаузеровский POS-1 Aero.

В качестве объекта исследования был выбран участок, представляющий интерес в геологическом и геодинамическом отношении, в районе расположения месторождений углеводородов. Общая длина протяженного участка составляла 68 км 320 м (см. рис. 1). Съемка проводилась в период с 3 по 8 октября 2022 года.

Материалы и методы исследования

Крепление магнитометра к БВС осуществлялось с помощью немагнитного троса длиной 16 м. Длина была определена авторами опытно-методическим путем в 2020 году, когда проводилась оценка влияния различных типов БВС на оверхаузеровский магнитометр MMPOS-1, а также возможности использования данного типа магнитометра с различными БВС [21]. Магнитометр выполнен в виде гондолы с расположением на нем датчика Глобальной навигационной спутниковой системы для определения текущих координат самой гондолы.

Основной проблемой служила невозможность покрытия всего профиля за один вылет, так как у БВС есть ограничение на нахождении в воздухе, которое составляет 30–40 минут в зависимости от температуры

¹ William F. Hanna geologic applications of modern aeromagnetic surveys // Proceedings of the U.S. Geological Survey workshop on geological applications of modern aeromagnetic surveys. Lakewood, 6–8 January 1987. Lakewood, 1987.

² Molyneaux B.L. Report on an aeromagnetic survey of the Missouri national recreational river data acquisition, geophysical processing, and base map interpretation. Omaha: Archaeology Laboratory, 2002. 48 p.

³ Инструкция по магниторазведке (наземная магнитная съемка, аэромагнитная съемка, гидромагнитная съемка). Л.: Недра, 1981. 263 с.

⁴ Паршин А.В., Цирель, В.С., Ржевская А.К. Методические рекомендации по выполнению маловысотной аэромагнитной съемки. М.: Изд-во ВИМС, 2018. 37 с.

⁵ Методические рекомендации по проведению комплексных аэрогеофизических съемок / сост. Ю.В. Асламов, П.С. Бабаянц, Н.А. Глинский, Е.И. Зубов, П.В. Мельников. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2021. 50 с.

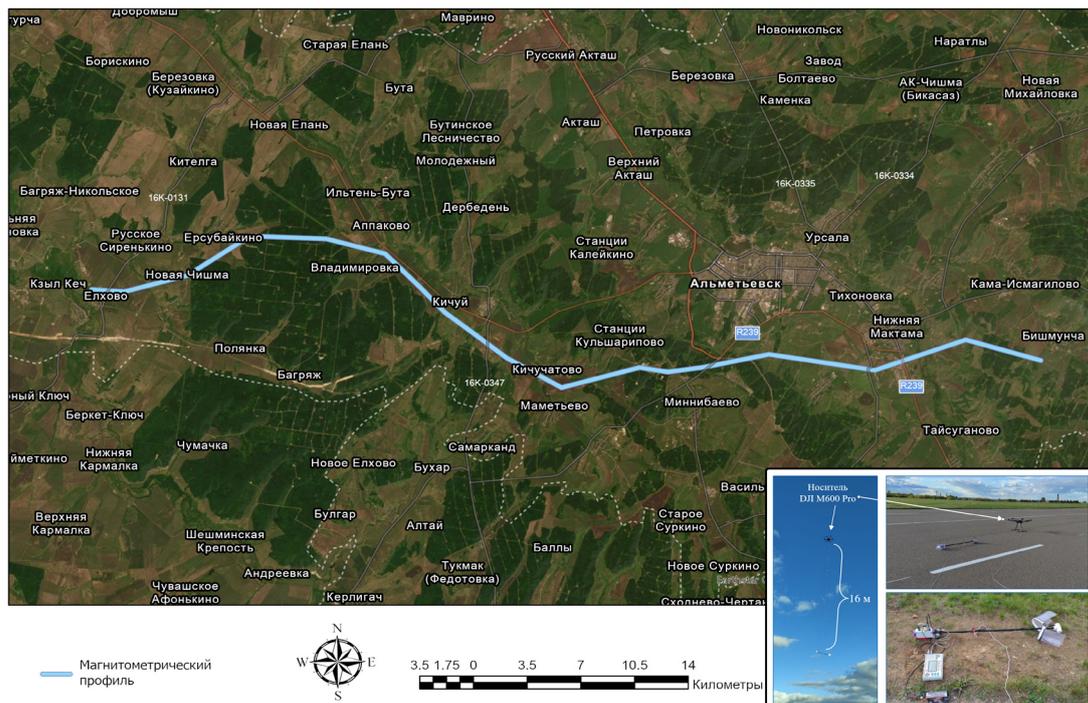


Рис. 1. Расположение магнитометрического профиля на участке исследования
Fig. 1. Magnetometric profile location on the site under investigation

окружающей среды и веса подвешенной полезной нагрузки. В ходе опытно-методических работ были выбраны следующие параметры для проведения аэромагнитных работ с БПЛА на данном участке:

- максимальная дальность полета не должна была превышать 6 км;
- время нахождения БВС с магнитометром в воздухе должно было составлять не более 20–25 минут.

Работы проводились в различных погодных условиях (слабый дождь, порывы ветра 8–12 м/с).

Для решения поставленной задачи было необходимо определить маршрутное задание, по которому БВС осуществляло бы съемку. В качестве маршрутного задания была выбрана следующая схема: полетный маршрут состоял из трех залетов (основных профилей) и одного пересекающего залета (перпендикулярный профиль). Расстояние между соседними параллельными залетами равнялось 100 м. Пересекающий профиль был необходим для проведения увязки основных профилей относительно друг друга. Каждый полевой день полетные задания строились таким образом, чтобы профили перекрывались с соседними вылетами величиной не менее 100 м и траектория движения совпадала с предыдущем полетом, также для оптимизации процесса для двух сосед-

них вылетов выбиралась одна точка взлета/посадки (рис. 2).

В итоге в течение одного рабочего дня выполнялась съемка от 4 до 6 таких точек или осуществлялось от 8 до 12 вылетов, что за один рабочий день позволяло закрывать до 15 км по профилю и 45 пог. км (если брать в расчет только три основных профиля). Итоговая суммарная протяженность за весь период съемки составляла 205 пог. км. Высота полета БПЛА равнялась 150 м. При создании маршрутных заданий для гексокоптера была выбрана возможность полета с огибанием рельефа по данным грубой цифровой модели рельефа (детальность цифровой модели рельефа составляла 90 м на 1 пиксель). Данная высота была выбрана с учетом соображений безопасного пролета всех техногенных помех и возможности удаления от них на максимальное расстояние (когда отсутствует влияние), но таким образом, чтобы сохранить возможность детальной съемки. Вследствие этого положение магнитометра составляло в среднем 134 м от поверхности земли.

Формирование полетных заданий проходило в программном пакете UgCS. Для построения данных заданий использовался алгоритм, разработанный и написанный на языке Python, который позволял располагать траекторию движения БПЛА по заданному центральному профилю.

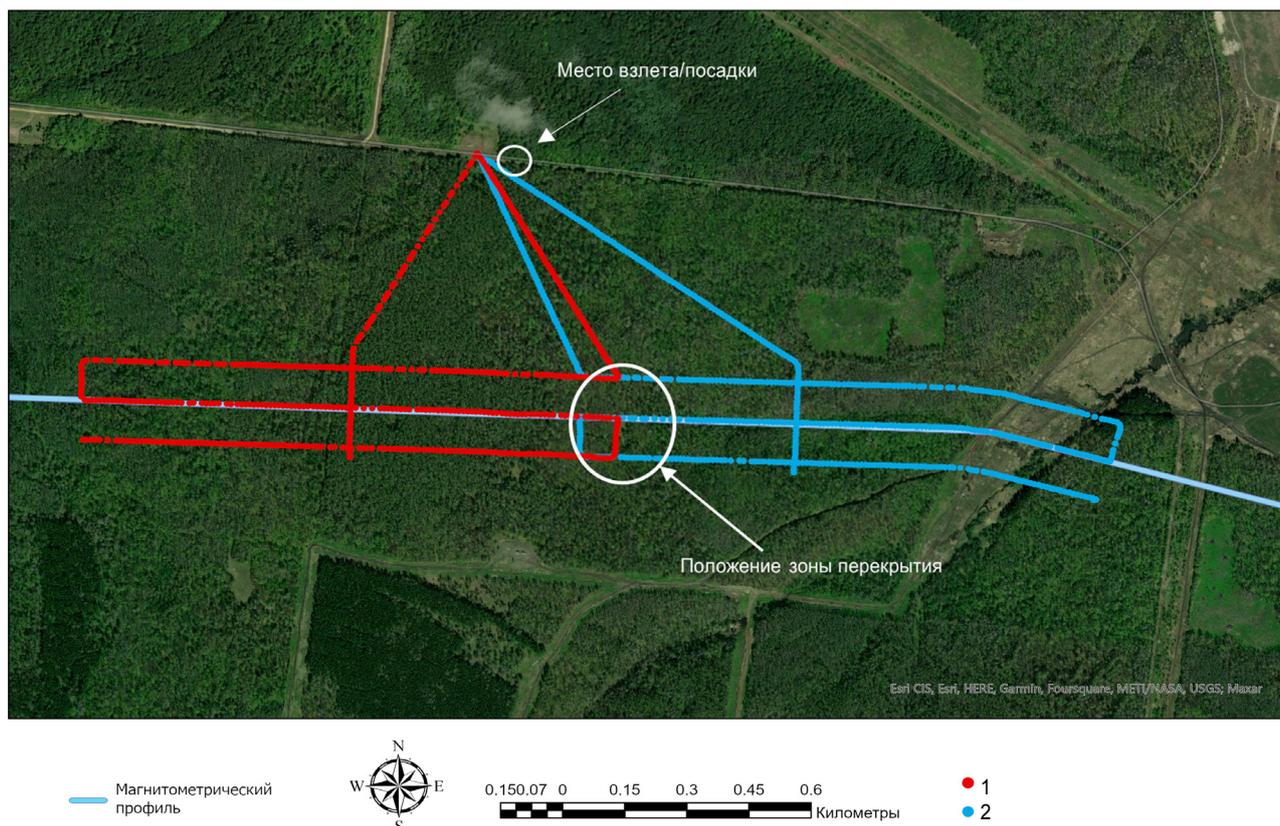


Рис. 2. Траектория двух соседних вылетов 5 октября 2022 года:
1 – четвертый вылет; 2 – пятый вылет
Fig. 2. The trajectory of two nearby flights on October 5, 2022:
1 – fourth flight; 2 – fifth flight

Так как общая длина профиля составляла 68,32 км, установка магнитовариационных станций (МВС) посередине профиля была не совсем корректной в связи с сильной удаленностью МВС от точек съемки более чем на 30 км³. В связи с этим каждый полевой день выбиралось место с минимально возможными техногенными помехами, где и устанавливались МВС. Расположение МВС от самых дальних точек съемки не превышало 8 км. Также такой подход в нашем случае позволял ускорить процесс проведения полевых работ. В качестве МВС использовался оверхаузеровский магнитометр MMPOS-1, съемка велась с интервалом в 10 с.

В результате проведения аэромагнитной съемки было выполнено 58 вылетов. Обработка материалов проводилась в два этапа:

1. Обработка каждого вылета в отдельности (ввод поправки за вариацию магнитного поля).
2. Сшивка всех вылетов и интерпретация полученной результирующей карты.

Обработка всех вылетов осуществлялась в программном пакете Geosoft Oasis montaj. Для каждого вылета была создана база данных, в которую импортировались исходные данные.

Ввод поправки за вариации магнитного поля осуществлялся с помощью стандартной функции Oasis montaj «Ввод поправки». Далее весь вылет разбивался на соответствующие профили, в результате разбивки были получены профили с нумерацией. Помимо этого, в каждом вылете проводилась проверка на аппаратные ошибки прибора (значения, являющиеся ошибкой и не связанные с геологическими особенностями территории исследования).

Как описывалось выше, все вылеты формировались таким образом, что между соседними вылетами существовало перекрытие величиной около 100 м (см. рис. 2). Были выделены участки перекрытия и произведен сравнительный анализ относительного смещения соседних вылетов. В течение дня смещения между вылетами являлись незначительными. В табл. 1 представлена величина разницы локального магнитного поля в зоне перекрытия по профилю 1 между соседними вылетами, полученная в течение одного дня – 4 октября 2022 года. На рис. 3 представлен пример сопоставления такой зоны перекрытия между первым и одиннадцатым вылетами за 5 октября 2022 года.



Таблица 1. Величины разницы локального магнитного поля в зоне перекрытия разных вылетов за 4 октября 2023 года
Table 1. Difference in the local magnetic field magnitudes in the overlap area of different flights on October 4, 2023

Номер вылета	Номер соседнего вылета	Среднее смещение в течение дня, нТл
1	2	-0,725
2	7	-0,732
3	4	1,175
4	1	0,627
5	6	0,232
6	3	0,004
7	8	0,276
8	9	0,434
9	10	0,281

Среднее смещение по вылетам в течение дня приведено в табл. 2. Значительные смещения 8 и 9 октября 2022 года были вызваны сильным градиентом магнитного поля, связанным с крупной Алтунино-Шунакский магнитной аномалией (расположенной восточнее г. Альметьевска). Отметим, что, несмотря на применение функции огибания рельефа, ис-

пользование грубой карты рельефа во время полета приводит к серьезным смещениям индукции магнитного поля. В связи с этим для учета смещений проводимая съемка выполнялась с перекрытием соседних вылетов. Среднеквадратичная погрешность всей съемки составила 4,732 нТл.

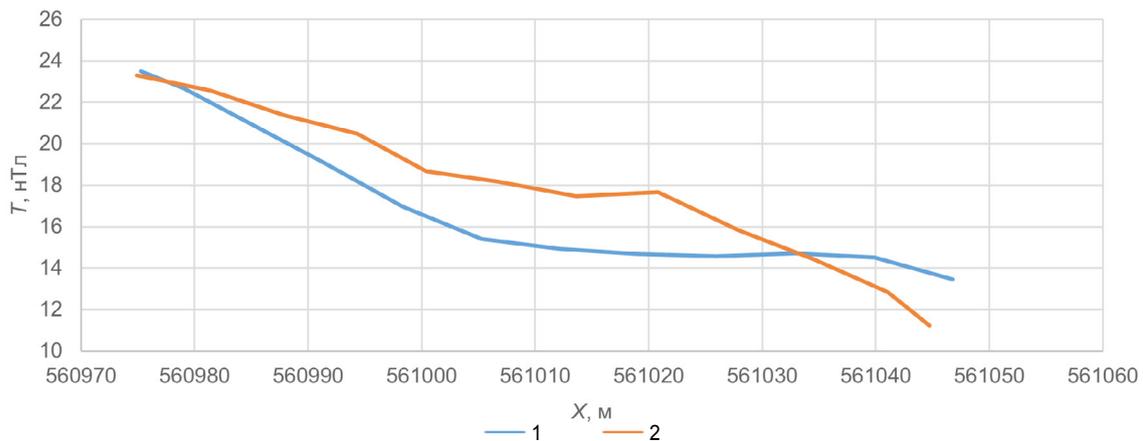


Рис. 3. Сравнение величины локального магнитного поля в зоне перекрытия разных вылетов 5 октября 2022 года:

1 – первый вылет; 2 – одиннадцатый вылет

Fig. 3. Comparison of the local magnetic field magnitude in the overlap zone of different flights on October 5, 2022:

1 – the first flight; 2 – the eleventh flight

Таблица 2. Величины разницы локального магнитного поля в зоне перекрытия по профилю между вылетами по дням
Table 2. Difference in the local magnetic field magnitudes in the overlap zone along the profile between the flights by days

Дата	Среднее смещение в течение дня, нТл
4 октября 2022 года	0,943
5 октября 2022 года	1,363
6 октября 2022 года	1,171
7 октября 2022 года	3,48
8 октября 2022 года	4,602
9 октября 2022 года	14,457



Результаты исследования и их обсуждение

В результате сшивки получена результирующая карта связанными значениями вех вылетов и построена карта локального магнитного поля длиной 68 км 320 м (рис. 4). На рис. 4 представлено распределение значения локального магнитного поля по всем профилям. На рис. 5 показано сравнение итоговых значений локального магнитного поля магнитной индукции сшитых профилей относительно друг друга.

Согласно априорной геологической информации, на территории исследования основной региональный вклад в значение индукции магнитного поля вносят магнитные горные породы, залегающие в фундаменте. Так как осадочный чехол сложен карбонатными и терригенными горными породами, их средняя намагниченность не превышает $20 \cdot 10^{-3}$ А/м [22].

Результирующая карта индукции магнитного поля совмещена в программном пакете

ArcGIS Pro с границами блоков второго порядка и локальными особенностями рельефа кристаллического фундамента (рис. 6). Согласно геологическому строению, химический состав кристаллического фундамента территории исследования представлен кислыми и основными горными породами [22]. Получившиеся магнитные аномалии хорошо коррелируются с локальной компонентой кристаллического фундамента и блоками второго порядка. Можно предположить, что основной вклад в амплитуду этих магнитных аномалий, скорее всего, вносит вещественный состав кристаллического фундамента, который значительно варьируется. Помимо вещественного состава на величину магнитной аномалии оказывает влияние рельеф кристаллического фундамента (высота кровли кристаллического фундамента). Участок Алтунино-Шунакского разлома выделяется локальной аномалией амплитудой ≈ 60 нТл, что тоже соответствует априорной информации.

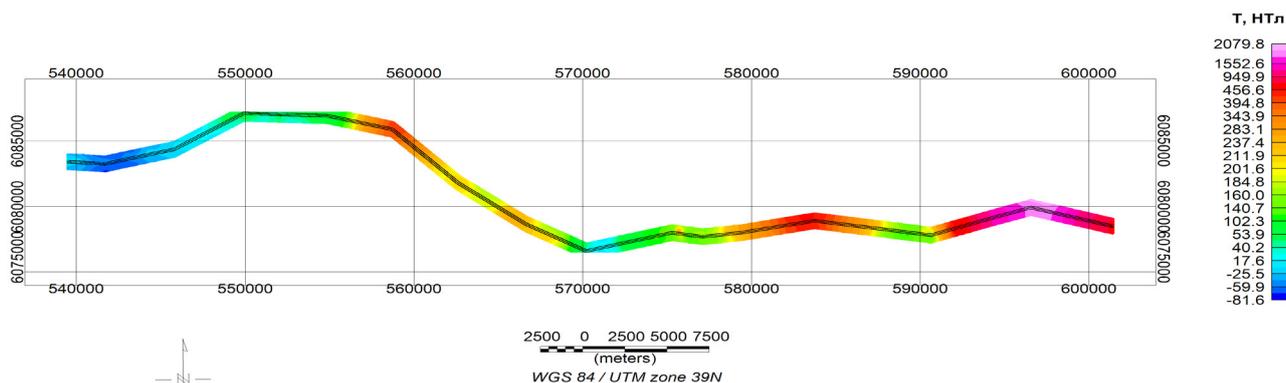


Рис. 4. Результирующая карта локального магнитного поля магнитометрического профиля
 Fig. 4. Resulting map of the local magnetic field of the magnetometric profile

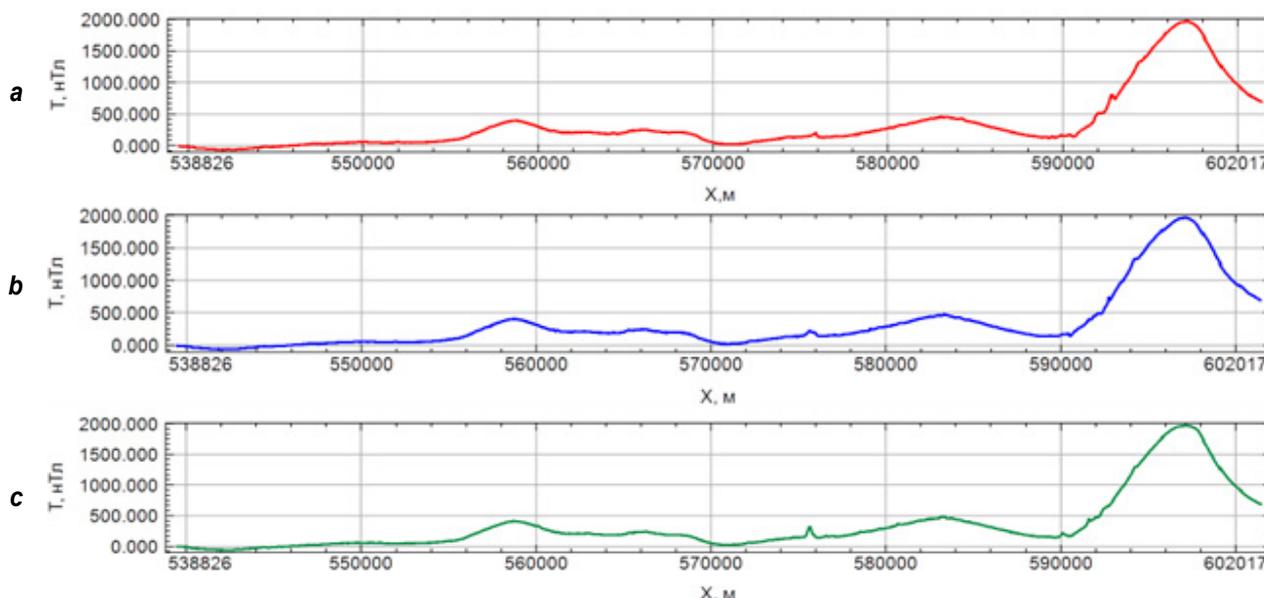
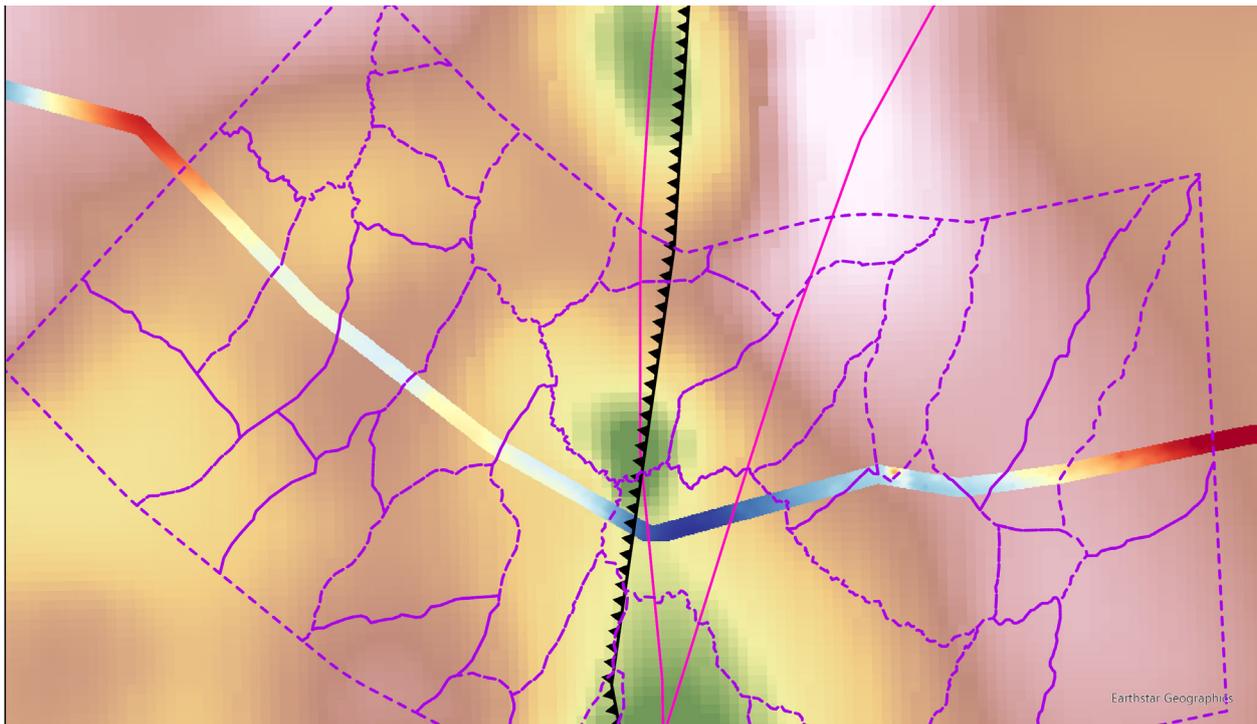


Рис. 5. Значение локального магнитного поля по профилю 1 (a), 2 (b) и 3 (c)
 Fig. 5. Local magnetic field magnitudes for the profile 1 (a), 2 (b) and 3 (c)



Карта локального магнитного поля

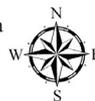
8.68 482.54

1 0.5 0 1 2 3 4

Километры

Кровля кристаллического фундамента

-1559.28 -1640.71



1

2

3

Рис. 6. Карта локального магнитного поля в сравнении с локальными особенностями рельефа кристаллического фундамента:
1 – блоки; 2 – Алтунино-Шунакский разлом; 3 – разлом в г. Альметьевске
Fig. 6. Map of the local magnetic field in comparison with the local relief features of the crystalline basement:
1 – blocks; 2 – Altunino-Shunak fault; 3 – Almetievsk fault

Заключение

В результате проведенной работы можно сделать следующие выводы:

1. Авторами осуществлена аэромагнитная съемка с БВС по профилю длиной 68 км 320 м, среднеквадратичная погрешность которой составляет 4,7 нТл.

2. Результат сопоставления априорных геологических данных с результатами аэромагнитной съемки свидетельствует о том, что подобный вид исследования позволяет выяв-

лять отдельные аномалии, связанные с вещественным составом фундамента, локальными особенностями рельефа кристаллического фундамента, а также блоковым строением фундамента.

3. Полученные результаты показывают, что в пределах исследуемой территории аэромагнитные исследования с БВС могут быть успешно использованы для решения отдельных структурных и геологических задач.

Список источников

1. Пат. № 172078, Российская Федерация, МПК В64С 39/02. Комплекс для беспилотной аэромагниторазведки / А.В. Паршин. Заявл. 19.07.2016; опубл. 28.06.2017. Бюл. № 19.
2. Bian J., Wang X., Gao S. Experimental aeromagnetic survey using a rotary-wing aircraft system: a case study in Heizhugou, Sichuan, China // Journal of Applied Geophysics. 2021. Vol. 184. P. 104245. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.104245>.
3. Cunningham M., Samson C., Wood A., Cook I. Aeromagnetic surveying with a rotary-wing unmanned aircraft system: a case study from a zinc deposit in Nash Creek, New Brunswick, Canada // Pure and Applied Geophysics. 2018. Vol. 175. P. 3145–3158. <https://doi.org/10.1007/s00024-017-1736-2>.
4. Lefebvre R. Introduction to UAV systems for geophysical mapping // SEG International Exposition and 87th Annual Meeting. Houston, 2017.



5. Цирел В.С., Кузнецова А.В. Аэромагнитометрия XXI века // Палеомагнитность и магнетизм горных пород: палеомагнетизм и магнетизм горных пород: теория, практика, эксперимент: материалы семинара (г. Москва, 9–12 ноября 2015 г.). Москва, 2015. С. 252–258.
6. Sakovskaya A.V., Luhmanov V.L., Demchenko N.V., Kuranov V.A. The successful use of UAV with quantum magnetometer for the mapping // *Engineering Geophysics 2017: proc. 13th conf.* Kislovodsk, 2017. P. 1–6. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201700373>.
7. Li H., Ge J., Dong H., Qiu X., Luo W., Liu H., et al. Aeromagnetic compensation of rotor UAV based on least squares // 37th Chinese Control conf. Wuhan, 2018. P. 10248–10253. <https://doi.org/10.23919/ChiCC.2018.8483068>.
8. Юрчук А.Ю., Сапунов В.А., Нархов Е.Д., Сергеев А.В., Васькин Н.М. Опыт составления сводных карт магнитного поля по данным наземных съемок и съемок БПЛА // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: Материалы 49-й сессии Междунар. семинара (г. Екатеринбург, 23–27 января 2023 г.). Екатеринбург, 2023. С. 414–417. EDN: CRVKSJ.
9. Jordan B.R. Collecting field data in volcanic landscapes using small UAS (sUAS)/drones // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2019. Vol. 385. P. 231–241. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2019.07.006>.
10. Черкасов С.В. Состояние и перспективы беспилотной аэромагниторазведки // Науки о Земле: материалы Междунар. конф. (г. Ташкент, 22–23 ноября 2018 г.). Ташкент, 2018. С. 156–157. EDN: DZJJBU.
11. Bell R. Comparison of ground magnetic and low altitude aeromagnetic data // SEG International Exposition and 87th Annual Meeting. Houston, 2017.
12. Наурызбаев А.М., Умирова Г.К., Verube P. Перспективы использования инновационных технологий в Казахстане при проведении аэромагниторазведки // *E-Scio*. 2020. № 5. С. 656–666. EDN: NDKQND.
13. Walter C., Braun A., Fotopoulos G. High-resolution unmanned aerial vehicle aeromagnetic surveys for mineral exploration targets // *Geophysical Prospecting*. 2020. Vol. 68. Iss. 1. P. 334–349. <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12914>.
14. Jiang D., Zeng Z., Zhou S., Guan Y., Lin T. 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. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3031395>.
15. Li Z.-P., Gao S., Wang X.-B. New method of aeromagnetic surveys with rotorcraft UAV in particular areas // *Chinese Journal of Geophysics*. 2018. Vol. 61. Iss. 9. P. 3825–3834. <https://doi.org/10.6038/cjg2018L0588>.
16. Черкасов С.В., Стерлигов Б.В., Золотая Л.А. О возможности использования беспилотных летательных аппаратов для производства высокоточных измерений аномалий магнитного поля Земли // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2016. № 3. С. 17–20. <https://doi.org/10.33623/0579-9406-2016-3-17-20>. EDN: XHFHTN.
17. Семенова М.П., Цирель В.С. Перспективы развития беспилотной аэрогеофизики // *Разведка и охрана недр*. 2016. № 8. С. 34–39. EDN: WHTQJB.
18. Паршин А.В., Гребенкин Н.А., Морозов В.А., Ржевская А.К., Шикаленко Ф.Н. Первые результаты методических работ по применению беспилотных аэрогеофизических технологий на стадии поисков месторождений урана // *Разведка и охрана недр*. 2017. № 11. С. 59–64. EDN: YTHJUE.
19. Parshin A.V., Morozov V.A., Blinov A.V., Kosterev A.N., Budyak A.E. Low-altitude geophysical magnetic prospecting based on multicopter UAV as a promising replacement for traditional ground survey // *Geo-spatial Information Science*. 2018. Vol. 21. Iss. 1. P. 67–74. <https://doi.org/10.1080/10095020.2017.1420508>.
20. Malehmir A., Dynesius L., Paulusson K., Paulusson K., Johansson H., Bastani M., 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. 552–557. <https://doi.org/10.1190/tle36070552.1>.
21. Nasyrtidinov B., Latipov R., Khassanov D., Popov M., Usmanov A. Assessment of the impact of unmanned aerial vehicles with different engine types on the MMPOS-1 magnetometer // 20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2020. Albena, 2020. P. 475–482. <https://doi.org/10.5593/sgem2020/1.2/s05.061>. EDN: QXSJQX.
22. Геология Татарстана. Стратиграфия и тектоника / гл. ред. Б.В. Буров/ отв. ред. Н.К. Есаулова, В.С. Губарева, М.: ГЕОС, 2003. 402 с.

References

1. Parshin A.V. *Complex for unmanned aeromagnetic survey*. Patent RF, no. 172078; 2016. (In Russ.). EDN: CONHQA.
2. Bian J., Wang X., Gao S. Experimental aeromagnetic survey using a rotary-wing aircraft system. A case study in Heizhugou, Sichuan, China. *Journal of Applied Geophysics*. 2021;184:104245. <https://doi.org/10.1016/j.japgeo.2020.104245>.
3. Cunningham M., Samson C., Wood A., Cook I., Doyle B. Aeromagnetic surveying with a rotary-wing unmanned aircraft system: a case study from a zinc deposit in Nash Creek, New Brunswick, Canada. *Pure and Applied Geophysics*. 2018;175:3145-



3158. <https://doi.org/10.1007/s00024-017-1736-2>.

4. Lefebvre R. Introduction to UAV systems for geophysical Mapping. In: *SEG International Exposition and 87th annual meeting*: Houston; 2017.

5. Tsirel V.S., Kuznetsova A.V. Aeromagnetometry of the 21st century. In: *Paleomagnitnost' i magnetizm gornykh porod: paleomagnetizm i magnetizm gornykh porod: teoriya, praktika, ehksperiment: Materialy seminara = Paleomagnetism and magnetism of rocks: paleomagnetism and magnetism of rocks: theory, practice, experiment: Seminar materials*. 9–12 November 2015, Moscow. Moscow; 2015, p. 252-258. (In Russ.).

6. Sakovskaya A.V., Luhmanov V.L., Demchenko N.V., Kuranov V.A. The successful use of UAV with quantum magnetometer for the mapping. In: *Engineering Geophysics 2017: proc. 13th conf.*: Kislovodsk; 2017, p. 1-6. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201700373>.

7. Li H., Ge J., Dong H., Qiu X., Luo W., Liu H., et al. Aeromagnetic compensation of rotor UAV based on least squares. In: *37th Chinese Control Conference*: Wuhan; 2018, p. 10248-10253. <https://doi.org/10.23919/ChiCC.2018.8483068>.

8. Yurchuk A.Yu., Sapunov V.A., Narkhov E.D., Sergeev A.V., Vas'kin N.M. Magnetic field summary map compiling experience based on ground surveys and UAV surveys. In: *Voprosy teorii i praktiki geologicheskoi interpretatsii gravitatsionnykh, magnitnykh i ehlektricheskikh polei: Materialy 49-i sessii Mezhdunar. seminara = Issues of theory and practice of geological interpretation of gravitational, magnetic and electric fields: Materials of the 49th session of the International seminar*. 23–27 January 2023, Ekaterinburg. Ekaterinburg; 2023, p. 414-417. (In Russ.). EDN: CRVKSJ.

9. Jordan B.R. Collecting field data in volcanic landscapes using small UAS (sUAS)/drones. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2019;385:231-241.

10. Cherkasov S.V. State and potential of unmanned aeromagnetic survey. In: *Nauki o Zemle: Materialy Mezhdunarodnoi konferentsii = Geosciences: Proceedings of the International Conference*. 22–23 November 2018, Tashkent. Tashkent; 2018, p. 156-157. EDN: DZJJBU.

11. Bell R. Comparison of ground magnetic and low altitude aeromagnetic data. In: *SEG International Exposition and 87th annual meeting*: Houston; 2017.

12. Naurzbaev A.M., Umirova G.K., Berube P. Prospects of innovative technologies to be used in Kazakhstan in aeromagnetic surveying. *E-Scio*. 2020;5:656-666. (In Russ.). EDN: NDKQND.

13. Walter C., Braun A., Fotopoulos G. High-resolution unmanned aerial vehicle aeromagnetic surveys for mineral exploration targets. *Geophysical Prospecting*. 2020;68(1):334-349. <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12914>.

14. Jiang D., Zeng Z., Zhou S., Guan Y., Lin T. 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;8:189576-189586. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3031395>.

15. Li Z.-P., Gao S., Wang X.-B. New method of aeromagnetic surveys with rotorcraft UAV in particular areas. *Chinese Journal of Geophysics*. 2018;61(9):3825-3834. <https://doi.org/10.6038/cjg2018L0588>.

16. Cherkasov S.V., Sterligov B.V., Zolotaya L.A. The ability to use unmanned aerial vehicles for making high precision measurements of the anomalies of Earth's geomagnetic field. *Moscow University Bulletin. Series 4. Geology*. 2016;3:17-20. (In Russ.). <https://doi.org/10.33623/0579-9406-2016-3-17-20>. EDN: XHFHTN.

17. Semenova M.P., Tsirel V.S. Development prospects unmanned air geophysics. *Exploration and protection of the subsoil*. 2016;8:34-39. (In Russ.). EDN: WHTQJB.

18. Parshin A.V., Grebenkin N.A., Morozov V.A., Rzhhevskaya A.K., Shikalenko F.N. The first results of methodological work on the application of bespilot airborne geophysical technologies at the stage of prospecting of uranium deposits. *Exploration and protection of the subsoil*. 2017;11:59-64. (In Russ.). EDN: YTHJUE.

19. Parshin A.V., Blinov A.V., Kosterev A.N., Budyak A.E., Morozov V.A. Low-altitude geophysical magnetic prospecting based on multirotor UAV as a promising replacement for traditional ground survey. *Geo-spatial Information Science*. 2018;21(1):67-74. EDN: XXHRZ. <https://doi.org/10.1080/10095020.2017.1420508>.

20. Malehmir A., Dynesius L., Paulusson K., Paulusson K., Johansson H., Bastani M., et al. The potential of rotary-wing UAV-based magnetic surveys for mineral exploration: a case study from central Sweden. *The Leading Edge*. 2017;36(7):552-557. <https://doi.org/10.1190/tle36070552.1>.

21. Nasyrtidinov B., Latipov R., Khassanov D., Popov M., Usmanov A. Assessment of the impact of unmanned aerial vehicles with different engine types on the MMPOS-1 magnetometer. In: *20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2020*. Albena; 2020. p. 475-482. <https://doi.org/10.5593/sgem2020/1.2/s05.061>. EDN: QXSJQX.

22. Burov B.V. *Geology of Tatarstan. Stratigraphy and tectonics*. Moscow: GEOS; 2003, 402 p. (In Russ.).



Информация об авторах / Information about the authors



Насыртдинов Булат Мансурович,

старший преподаватель кафедры геофизики и геоинформационных технологий,
Институт геологии и нефтегазовых технологий,
Казанский (Приволжский) федеральный университет,
г. Казань, Россия,

✉ Bulat.Nasyrtdinov@kpfu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6359-9159>

Bulat M. Nasyrtdinov,

Senior Lecture of the Department of Geophysics and Geoinformation Technologies,
Institute of Geology and Petroleum Technologies,
Kazan (Volga Region) Federal University,
Kazan, Russia,

✉ Bulat.Nasyrtdinov@kpfu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6359-9159>



Старовойтов Александр Владимирович,

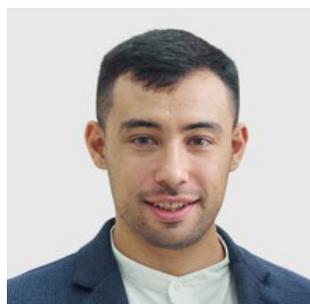
ассистент кафедры геофизики и геоинформационных технологий,
Институт геологии и нефтегазовых технологий,
Казанский (Приволжский) федеральный университет,
г. Казань, Россия,

Alexander.Starovoytov@kpfu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0584-1733>

Alexsandr V. Starovoytov,

Assistant Professor of the Department of Geophysics
and Geoinformation Technologies,
Institute of Geology and Petroleum Technologies,
Kazan (Volga Region) Federal University,
Kazan, Russia,

Alexander.Starovoytov@kpfu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0584-1733>



Хамиев Марсель Маратович,

инженер междисциплинарной учебной лаборатории
петрофизики и физики нефтяного пласта,
Институт геологии и нефтегазовых технологий,
Казанский (Приволжский) федеральный университет,
г. Казань, Россия,

MMHamiev@kpfu.ru

Marsel M. Khamiev,

Engineer of the Interdisciplinary University Laboratory
of Petrophysics and Oil Reservoir Physics,
Institute of Geology and Petroleum Technologies,
Kazan (Volga Region) Federal University,
Kazan, Russia,

MMHamiev@kpfu.ru

Вклад авторов / Contribution of the authors

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.*

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 18.09.2023; одобрена после рецензирования 26.10.2023; принята к публикации 30.11.2023.

The article was submitted 18.09.2023; approved after reviewing 26.10.2023; accepted for publication 30.11.2023.