

А. В. ПАРШИН<sup>1,3,4</sup>, А. Е. БУДЯК<sup>1,2,3</sup>, А. В. БЛИНОВ<sup>1,3</sup>, А. Н. КОСТЕРЕВ<sup>1,3</sup>, В. А. МОРОЗОВ<sup>1</sup>,  
А. О. МИХАЛЕВ<sup>1,3</sup>, С. Н. ПРОСЕКИН<sup>1,3</sup>, Ю. И. ТАРАСОВА<sup>2,3</sup>, А. М. СПИРИДОНОВ<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> ООО «Геоинформационные технологии – Сибирь», 664074, Иркутск, ул. Игошина, 1а, Россия, sarhin@geo.istu.edu, belor\_cool@gmail.com, raulett@gmail.com, ak.auken@gmail.com

<sup>2</sup> Иркутский научный центр СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 134, Россия, budyak@igc.irk.ru, j.tarasova84@yandex.ru, sam@igc.irk.ru

<sup>3</sup> Институт геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Фаворского, 1а, Россия, alexeycomikhalev@gmail.com, pros.sergey@gmail.com

<sup>4</sup> Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664076, Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

## НИЗКОВЫСОТНАЯ БЕСПИЛОТНАЯ АЭРОМАГНИТОРАЗВЕДКА В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ КРУПНОМАСШТАБНОГО СТРУКТУРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОГО КАРТИРОВАНИЯ И ПОИСКОВ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В СЛОЖНЫХ ЛАНДШАФТНЫХ УСЛОВИЯХ.

### Часть 2

*Дан обзор методики работ по созданной авторами технологии низковысотной беспилотной аэромагниторазведки. Основными методическими позициями являются создание цифровой модели рельефа и подготовка полетных миссий с учетом обтекания рельефа, предварительная верификация полетного задания, выполнение измерений и последующая обработка данных. Создание цифровой модели местности может быть произведено по совокупности данных глобальных покрытий высот и кондиционных топографических карт либо в результате предварительной аэрофотосъемки. Верификация полетного задания производится более легким беспилотным летательным аппаратом (БПЛА) с камерой, средства подготовки полетных миссий описаны в первой части статьи. Приведены результаты работ, полученные по итогам апробации технологии БПЛА-магниторазведки при решении поисково-оценочных задач на золоторудных объектах черносланцевого типа, находящихся в пределах Байкало-Патомского нагорья. Апробация проходила в сложных погодных и ландшафтных условиях. Некоторые исследуемые объекты представляли существенную сложность с позиций постановки магниторазведки в связи со слабой контрастностью магнитного поля, что требовало высокой абсолютной точности и чувствительности магнитометров. Сопоставлены результаты, полученные новым беспилотным способом, с данными традиционной пешеходной съемки. Показано, что в сложных природно-ландшафтных условиях БПЛА-технология позволяет получать кондиционные данные, не уступающие по качеству и даже превосходящие наземную съемку, при этом производительность и экономическая эффективность аэромагниторазведочных работ значительно выше, стоимость ниже примерно в два раза, не требуются рубки и лесоотвод. В результате делается вывод о возможности и целесообразности замещения традиционной пешеходной магниторазведки новой беспилотной технологией, по крайней мере в масштабах работ от 1:10 000 до 1:1000.*

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, аэрогеофизика, магниторазведка, поиски и разведка полезных ископаемых, золото.

A. V. PARSHIN<sup>1,3,4</sup>, A. E. BYDYAK<sup>1,2,3</sup>, A. V. BLINOV<sup>1,3</sup>, A. N. KOSTEREV<sup>1,3</sup>, V. A. MOROZOV<sup>1</sup>,  
A. O. MIKHALEV<sup>1,3</sup>, S. N. PROSEKIN<sup>1,3</sup>, YU. I. TARASOVA<sup>2,3</sup>, AND A. M. SPIRIDONOV<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> JSC «Geoinformational Technologies – Siberia», 664074, Irkutsk, Igoshina str., 1a, Russia, sarhin@geo.istu.edu, belor\_cool@gmail.com, raulett@gmail.com, ak.auken@gmail.com

<sup>2</sup> Irkutsk Scientific Center SB RAS, 664033, Irkutsk, Lermontova str., 134, Russia, budyak@igc.irk.ru, j.tarasova84@yandex.ru, sam@igc.irk.ru

<sup>3</sup> A. P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, 664033, Irkutsk, Favorskogo str., 1a, Russia, alexeycomikhalev@gmail.com, pros.sergey@gmail.com

<sup>4</sup> Irkutsk National Research Technical University, 664076, Irkutsk, Lermontova str., 83, Russia

## LOW-ALTITUDE UNMANNED AEROMAGNETIC SURVEY IN MANAGEMENT OF LARGE-SCALE STRUCTURAL-GEOLOGICAL MAPPING AND PROSPECTING FOR ORE DEPOSITS IN COMPOSITE TOPOGRAPHY. Part 2

*The article provides an overview of techniques and procedures used in the low-altitude unmanned aeromagnetic survey technology developed by the authors. The main procedure methods are aimed to develop a digital terrain model and prepare*

© 2016 Паршин А. В., Будяк А. Е., Блинов А. В., Костерев А. Н., Морозов В. А.,  
Михалев А. О., Просекин С. Н., Тарасова Ю. И., Спиридонов А. М.

*flight missions taking into account the relief flow; to pre-verify a flight mission; to perform measurements and data post-processing. A digital terrain model can be developed based on a combination of global elevation coverage data and conditioned topographic maps or preliminary aerial imageries. A flight mission is verified by a lighter Unmanned Aerial Vehicle (UAV) equipped with a camera. The flight mission planner tool is described in the previous part of this article. The authors present survey results obtained by testing the UAV-magnetic exploration technology in solving prospecting and evaluation problems on the black shale type gold objects located within the Baikal-Patom Highland. The technology was tested in adverse weather conditions and composite topography. Some of the explored objects presented a real challenge to magnetic survey due to low contrast of the magnetic field, which required a high absolute precision and sensitivity of magnetometers. The results obtained by the new unmanned method have been compared with the data of traditional pedestrian survey. It is shown that in complex environment the UAV technology produces good conditioning data, their quality is even better than that of the ground surveys. Productivity and economic efficiency of the UAV magnetic survey technology are therewith significantly higher, the cost is about two times less, and there is no need for deforestation. As a result, we draw a conclusion that it is possible and advisable to replace the traditional pedestrian magnetic prospecting with the new unmanned technology, at least in the surveys of scales from 1:10 000 to 1:1000.*

Keywords: UAV, aerogeophysics, magnetic survey, geological exploration, gold.

## ВВЕДЕНИЕ

Рассматриваются методика работ и данные, полученные в результате апробации технологии низковысотной беспилотной аэромагниторазведки, описанной в первой части статьи. Технология, апробированная при решении поисково-оценочных задач на двух площадях в Бодайбинском районе Иркутской области [1], анализируется в том числе с позиций применимости БПЛА-магниторазведки как перспективного метода, который позволит существенно повысить эффективность решения научно-практических задач в рамках проекта ИНЦ СО РАН «Крупные и уникальные месторождения золота черносланцевых формаций: генезис, формы нахождения углерода и благородных металлов, инновационные технологии извлечения тонкодисперсного золота коренных и россыпных месторождений». Описанные магнитометрические исследования выполнены на фрагментарно изученных площадях, сколько-нибудь точная геологическая основа на которые пока отсутствует. Материалы съемки будут использованы при подготовке отчетов о результатах геолого-разведочных работ (ГРР), в связи с чем авторы не имеют возможности привести весь объем полученных данных, а также обозначить пространственную привязку. Тем не менее организации — владельцы лицензий на исследуемые площади, любезно разрешили опубликовать фрагменты материала в открытой печати.

## МЕТОДИКА РАБОТ

Выполняется построение цифровой модели местности по доступным топографическим данным: в первую очередь это карты Госгисцентра и цифровая модель рельефа SRTM 1-Arc-Second. Зачастую наиболее рациональным способом подготовки цифровой модели рельефа (ЦМР) является внесение локальных коррективов в ЦМР SRTM путем поднятия или понижения фрагментов покрытия на определенную высоту, установленную путем сопоставления данных глобального покрытия с кондиционными топоданными. В настоящее время с целью топографического обеспечения полетов и в связи с востребованностью такого вида продуктов организациями — заказчиками геолого-разведочных работ, авторами создана технология построения цифровых моделей местности (ЦММ) по фотоснимкам с БПЛА, что позволяет при необходимости предварительно создать собственную ЦММ соответствующего работам масштаба.

С помощью разработанного программного обеспечения [2] производится подготовка полетных заданий для системы автопилотирования БПЛА таким образом, чтобы обеспечить исследование территории по регулярной сети профилей и пикетов с обтеканием рельефа и постоянной скоростью полета; это наиболее правильный режим измерений [3–5]. Выполняется экспорт полетных заданий в форматы, поддерживаемые используемыми системами автопилота. Полеты производятся на высоте 10–15 м над растительностью, в типичных условиях Бодайбинского синклиория высота полета над рельефом находится в диапазоне от 20 м над участками, заросшими кедровым стлаником, до 35 м над залесенными площадями.

Если точность ЦМР или ЦММ не гарантирована и характер растительности для всей площади не известен, то выполняется предварительный облет территории по созданному полетному заданию «легким» коптером с камерой. Полет проходит на автопилоте, но в режиме «от первого лица» (FPV), что позволяет оператору БПЛА при необходимости избежать столкновения и откорректировать полетное задание.

Выполняются измерения «тяжелым» мультикоптером с установленным магнитометром. БПЛА также движется на автопилоте, измерения производятся автоматически и записываются в память прибора. Точность удержания аппарата в плане до 1 м, по вертикали — 0,5 м в обычном режиме и первые сантиметры при использовании дифференциальной GNSS-системы. Сенсор магнитометра находится на гибком подвесе, исключающем кручение и минимизирующем раскачку датчика [6, 7]. Привязка точек измерения осуществляется с помощью приемника ГЛОНАСС/GPS. Измерения выполняются с периодичностью от 1 до 8 раз в секунду, что позволяет получать данные любой плотности, и сопровождаются вариационной съемкой. Скорость полета составляет 6–8 м/с. На данном этапе развития технологии с одной точки может быть выполнена съемка на площади до 10 км<sup>2</sup> без использования усилителей сигнала радиоаппаратуры. По мере разряда батарей БПЛА возвращается на базу для их замены. Непрерывный режим работы комплекса обеспечивается при наличии 6–7 аккумуляторов и бензогенератора для их зарядки.

На последнем этапе выполняется стандартная предварительная обработка данных: учет вариаций и фона, картографирование, построение цифровых моделей поля, оценка точности съемки по секущим маршрутам.

### РЕЗУЛЬТАТЫ

Апробация, результаты которой представлены ниже, проходила в широком диапазоне температур — от –10 до +25 °С, при ветре порывами до 10–12 м/с, во время дождя, снега, метели, что позволило в полной мере судить о производственных возможностях комплекса. Рельеф характеризуется типичными для Северного Забайкалья углами уклона рельефа (до 40°), зарослями стланика, курумами, заболоченностями (рис. 1).

Съемка производилась в масштабах 1:10 000 и 1:5000 (профили через 100 и 50 м соответственно) [4]. При этом расстояние между пикетами по профилю составляет в обоих случаях 5 м, в связи с чем масштаб 1:10 000 можно считать условным [8]. На рис. 2 приведен фрагмент магнитного поля участка N1.

Поле данного участка слабоконтрастное, изменчивость по профилям не превышает первых нанотесла, что существенно меньше суточных геомагнитных вариаций. В связи с этим участок представляет собой весьма сложный объект для магниторазведки: погрешность даже в 2 нТл существенно исказит картину поля, а погрешности до ±5 нТл, допустимые для крупномасштабной съемки в соответствии с Инструкцией по магниторазведке [8] и характерные для первых версий технологии образца 2014–2015 гг. [6], являются неприемлемыми. Разработанная технология позволила обнаружить и проследить в центре участка явную, хоть и незначительную, аномалию повышенных значений, не



Рис. 1. Типичные условия проведения аэромагнитной съемки на объектах апробации.

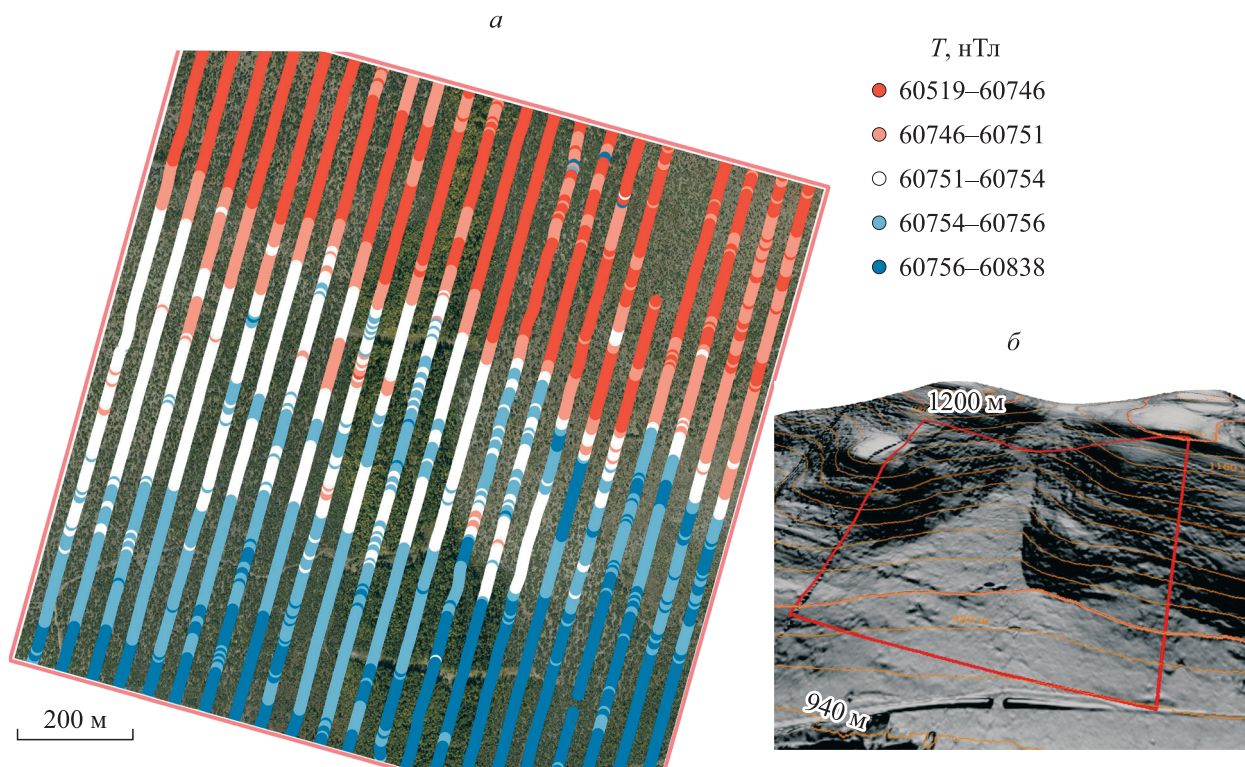


Рис. 2. Фрагмент схемы модуля полного вектора напряженности магнитного поля  $T$  для участка N1 (а) и цифровая модель рельефа участка (б).

превышающую 3 нТл по амплитуде, что говорит о высокой чувствительности технологии и позволяет считать полученные результаты измерений достаточно точными.

Для сопоставления результатов, полученных наземной и БПЛА-съемкой, на рис. 3, в представлен фрагмент магнитного поля участка N2.

На данном участке выделяется близкая к субширотному простиранию аномалия пониженных значений поля амплитудой до 40 нТл. Характер поля позволяет предварительно интерпретировать его как наклонный пласт с падением на юг. Сопоставление данных беспилотной и пешеходной съемки (см. рис. 3, а, б) позволяет констатировать их в целом хорошую сходимость, однако обращает на себя внимание периодически возникающая повышенная дисперсия наземной съемки. Она обусловлена тем, что при выполнении пешеходных измерений операторы вынуждены были буквально продираться сквозь заросли густого и мокрого кедрового стланика, датчик магнитометра постоянно испытывал удары и рывки, не исключено периодическое попадание влаги в разъемы приборов, что также приводит к снижению точности измерений. Беспилотный комплекс свободен от таких проблем, кроме того, он обеспечивает намного более удобные для математической обработки и решения обратной задачи данные, имеющие регулярный характер.

Корректность измерений БПЛА-комплексом дополнительно проверялась выполнением секущих маршрутов и периодически — повторным пролетом профилей. Допустимой была признана погрешность в пределах 2,5 нТл, что в 4 раза точнее, чем предписано Инструкцией [8].

В целом можно отметить, что за счет постоянной скорости движения и меньших воздействий на датчик в сложных природных условиях беспилотная технология обеспечивает высокое качество данных, часто превосходящее результаты наземных измерений. Это утверждение справедливо по крайней мере для масштабов 1:10 000–1:1000 и при условии, что наземная съемка выполняется без предварительных топогеодезических работ и рубки профилей, как это обычно происходит в современной практике. Необходимо отметить, что сметная стоимость пешеходной магниторазведки без предварительных топогеодезических работ оценивается в данных условиях 58 тыс. руб. за 1 км<sup>2</sup> съемки масштаба 1:10 000, в то время как беспилотная съемка рентабельна уже при 30 тыс. руб./км<sup>2</sup>.

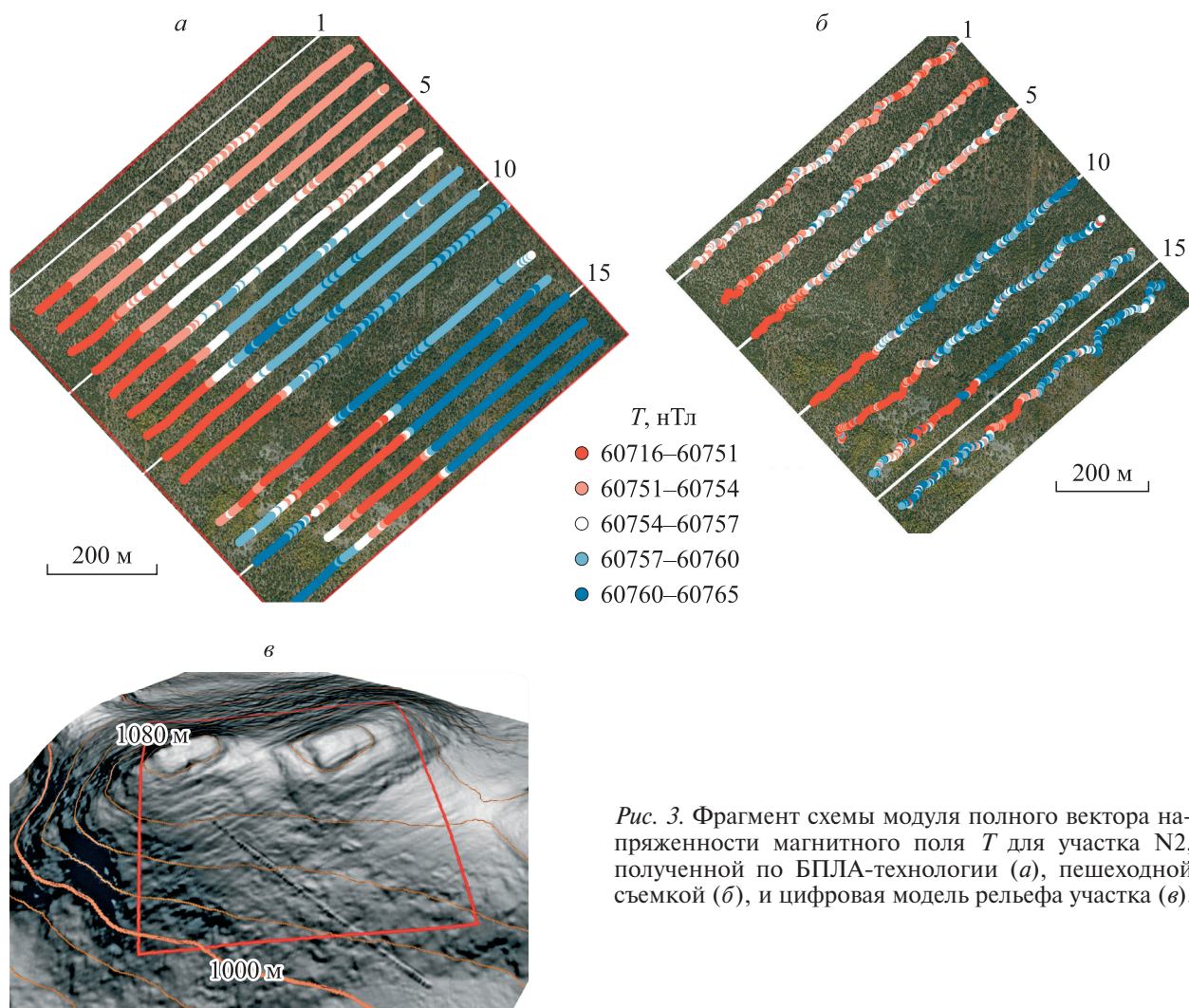


Рис. 3. Фрагмент схемы модуля полного вектора напряженности магнитного поля  $T$  для участка N2, полученной по БПЛА-технологии (а), пешеходной съемкой (б), и цифровая модель рельефа участка (в).

### ВЫВОДЫ

Исследуемые участки представляли собой весьма сложные с позиций постановки магниторазведочных работ объекты, что обусловлено такими факторами, как слабоконтрастное поле, значительные перепады высот, различный характер растительности. Тем не менее можно констатировать, что чувствительности созданного комплекса достаточно для выделения значимых аномалий. Обязательным условием положительного результата является учет геомагнитных вариаций и точная фиксация высоты измерений.

Показано, что разработанная технология низковысотной БПЛА-магниторазведки позволяет получать данные более высокого по сравнению с пешеходной съемкой качества при существенно более низкой стоимости. БПЛА и наземная съемка характеризуются сходной чувствительностью и фиксируют одни и те же объекты, в связи с чем какие-либо явные преимущества в качестве данных наземной съемки отсутствуют.

Применение «тяжелых» мультикоптеров оказалось вполне оправданным, поскольку более «легкие» коптеры не смогли бы эффективно бороться с сильным ветром (и даже снегом), который часто ощущается внизу, в районе точки взлета, но при наборе высоты на 100–200 м до вершины сопков он проявляется в полной мере. Созданные БПЛА смогли работать даже в условиях метели.

Наиболее эффективным масштабом БПЛА-съемки на этом и аналогичных объектах можно считать 1:5 000 и 1:2 000. Обследование значительных площадей в таких масштабах классическими методами не представляется реальным в современной геолого-экономической обстановке.

В целом можно с уверенностью утверждать, что разработанный комплекс позволяет успешно решать геологические задачи в условиях черносланцевых формаций Байкало-Патомского нагорья. В настоящее время система дорабатывается с целью установки на БПЛА гамма-спектрометра и лидарного сканера, что обеспечит комплексирование данных аэрогеофизической разведки с высокоточной цифровой моделью местности, имеющей собственную значимость в рамках геолого-разведочных работ.

Важно отметить, что данная технология может обеспечить еще более высокий геологический результат на сопредельных районах Байкальской горной области, для которых также характерны сложные природно-ландшафтные условия и, кроме того, наличие в рудных ассоциациях магнитных минералов [9, 10].

Авторы выражают признательность главному геологу ОАО «Высочайший» В. И. Микляеву и главному геологу «Кору Goldfields АВ» Е. Н. Божко за разрешение опубликовать представленные в статье фрагменты съемки.

*Работа выполнена в рамках Интеграционной программы ИИЦ СО РАН «Фундаментальные исследования и прорывные технологии как основа опережающего развития Байкальского региона и его межрегиональных связей».*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Официальный сайт ИРННТУ.** Уникальный комплекс беспилотной геофизической разведки, разработанный в ИРННТУ, успешно испытан в Бодайбинском районе [Электронный ресурс]. — <http://www.istu.edu/news/26126/> (дата обращения 26.10.2016).
2. **Морозов В. А., Паршин А. В.** Модуль SibGIS Flight Planner [Электронный ресурс]. — <https://github.com/raulett/SibGIS-Flight-Planner> (дата обращения 18.10.2016).
3. **Korotkov V. V., Glinsky N. A., Kirsanov V. N.** Measurements using unmanned aerial vehicles — a new stage of development of domestic aerogeophysics // Russian Journ. Geophys. — 2014. — Vol. 53–54. — P. 122–125.
4. **Маснае J.** Design specifications for a geophysical unmanned air vehicle assembly (GUAVAS) // SEG Expanded Abstracts. — 1995. — Vol. 14. — P. 375–376.
5. **Воробьев В. П., Глаголев В. А., Кирсанов В. Н., Нахабцев А. С., Филимонов В. В., Цирель В. С.** Перспективы использования аэрогеофизических методов для детальных исследований // Геофиз. аппаратура. — 1995. — Т. 100. — С. 8–15.
6. **Parshin A. V., Kanaikin V. S., Blinov A. V., Mikhalev A. O.** Cost-saving low-altitude UAV magnetic survey technology and its GIS software // EAGE EarthDoc.2016 [Электронный ресурс]. — <http://earthdoc.eage.org/publication/publicationdetails/?publication=84648>. — DOI: 10.3997/2214-4609.201600547 (дата обращения 18.10.2016).
7. **Комплекс** для беспилотной аэромагниторазведки: пат. РФ / Паршин А. В. Заявка № 2016129683, Приоритет 19.07.2016.
8. **Инструкция** по магниторазведке (наземная магнитная съемка, аэромагнитная съемка, гидромагнитная съемка) / М-во геологии СССР. — Л.: Недра, 1981. — 263 с.
9. **Паршин А. В., Будаев А. Е., Блинов А. В.** Комплексирование методов поисков с целью обнаружения рудопроявлений урана в условиях криолитозоны Байкальской горной области // Вопр. естествознания. — 2015. — № 3. — С. 57–62.
10. **Budyak A. E., Parshin A. V., Spiridonov A. M. et al.** New results of geochemical and geophysical studies of the Khadatkandskii fault zone (North Tansbaikal region) // Russian Journ. Pacific Geology. — 2015. — N 5. — P. 373–380.

*Поступила в редакцию 18 октября 2016 г.*