

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 1

*Рассматривается проблема постановки геолого-разведочных работ на перспективных в настоящее время площадях, характеризующихся сложными ландшафтно-морфологическими условиями и удаленностью от инфраструктуры. Дается обзор существующих подходов к выполнению такого универсального метода геологического картирования и поисков, как магниторазведка, весьма эффективного в различных геологических ситуациях. Описаны основные технические позиции разработанного авторами программно-аппаратного комплекса для низковысотной беспилотной аэромагниторазведки, ориентированного на работу в сложных природных условиях. Рассмотрены проблемы создания аэрогеофизических комплексов и пути решения, использованные авторами. За счет применения оригинальных технических и методических приемов созданный комплекс обеспечивает получение данных крупных масштабов, что достигается за счет низкой себестоимости компонентов и их высокой надежности, а также возможности выполнения измерений на сверхнизких высотах с обтеканием рельефа даже в условиях горных районов. Для этого разработан геоинформационный модуль SibGIS Flight Planner, обеспечивающий автоматизированную подготовку полетных миссий с учетом точной информации о рельефе и выгрузку ее в формате, поддерживаемом распространенными системами автопилотирования. Как и остальные программные модули комплекса, данный плагин создан для свободно распространяемой ГИС QuantiumGIS. Он обеспечивает точную разбивку сетей профилей и пикетов измерений, формирование высот для точек полетной миссии, задание большого количества параметров полета и выгрузку результирующих файлов в формате \*.awt. Поскольку данный программный продукт может быть использован в широком спектре задач, связанных с профессиональным использованием беспилотных летательных аппаратов, авторы посчитали возможным открыть исходный код модуля, а также привести ссылку для скачивания готового плагина, что позволит использовать его любому заинтересованному специалисту. Даны также ссылки на видеоматериалы с полевых работ, доказывающие описанные в статье возможности комплекса, в частности, полет на сверхнизких высотах с обтеканием рельефа, возможность выполнения работ в сложных погодных условиях и при низких температурах.*

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, аэрогеофизика, магниторазведка, геоинформационные системы.

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

© 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.

**LOW-ALTITUDE UNMANNED AEROMAGNETIC SURVEY IN MANAGEMENT OF LARGE-SCALE STRUCTURAL-GEOLOGICAL MAPPING AND PROSPECTING FOR ORE DEPOSITS IN COMPOSITE TOPOGRAPHY.****Part 1**

*The problem of geological studies carried out in prospective areas characterized by complex landscape-morphological conditions and their remoteness from infrastructure has been analyzed. The paper provides an overview of available approaches to conducting magnetic surveys, a universal method applicable for geological mapping and prospecting that proved very efficient in various geologic settings. The main technical features of a hardware and software system developed by the authors for unmanned low-altitude aeromagnetic surveys are described. This aeromagnetic system is meant to operate in difficult environment conditions. Some actual problems of developing airborne geophysical systems are considered and their solutions proposed by the authors are introduced. Due to original techniques and procedures the designed aeromagnetic complex provides large scale data, which is achieved due to the low cost of the used components and their high reliability, as well as a possibility for making taking measurements at extremely low altitudes with a relief flow even in mountainous areas. For this purpose, the authors have developed a geoinformation module named a SibGIS Flight Planner which provides an automated preparation of flight missions taking into account accurate information about a terrain model and its uploading in a data format supported by common autopilot systems. Like the rest of the complex software modules, this plugin is designed for freeware GIS QuantumGIS. It provides a true layout of networks with profiles and measurement stakes, determination of flight altitudes for mission points, setting a large number of flight parameters and uploading resulting files in the \*.awm format. Since this software can be used in a wide range of tasks related to professional use of unmanned aerial vehicles (UAVs), the authors consider it possible to open the source code of the module (<https://github.com/raulett/SibGIS-Flight-Planner>), as well as provide a link to download the finished plug-in, which now can be used by any interested specialist. We also give some internet links to field exploration videos demonstrating the UAV complex abilities mentioned in the article, in particular a flight at extremely low altitudes around the terrain relief, and activities in difficult weather conditions and at low temperatures.*

Keywords: UAV, aerogeophysics, magnetic survey, geoinformation systems.

**ВВЕДЕНИЕ**

Одним из наиболее эффективных способов решения структурно-картировочных задач в современной геологии является магниторазведка — метод, основанный на выявлении в естественном магнитном поле Земли аномалий, обусловленных различными магнитными свойствами горных пород. Традиционными вариантами магниторазведки являются пешеходная съемка, при которой прибор-магнитометр несет на себе оператор, и аэромагниторазведка — когда сенсор установлен на самолете или вертолете. Перспективы расширения минерально-сырьевой базы РФ в настоящее время в основном связаны с поисково-оценочными работами на труднодоступных объектах, локализованных в недостаточно изученных районах. Для таких объектов характерны сложные природно-ландшафтные условия — курумы, заболоченность, заросли стланика, значительные уклоны рельефа, что затрудняет, замедляет и удорожает пешеходную съемку. Выполнение классической пилотируемой магниторазведки в этих районах также весьма затруднено из-за отсутствия поблизости аэропортов и в связи с типичным для многих перспективных площадей сильнопересеченным рельефом. Кроме того, ввиду затухания аномалий магнитного поля с высотой аэровариант метода не обеспечивает крупномасштабного картирования. Таким образом, техническое совершенствование классических методов не позволяет решить принципиальную проблему экономически эффективного и оперативного исследования перспективных площадей. В то же время происходящее в последнее время исчерпание разведанных запасов благородных металлов и некоторых других видов полезных ископаемых требует разработки эффективных методов геологических поисков и разведки рудных месторождений, позволяющих быстро, дешево и при этом детально исследовать значительные по площади районы.

Избежать проблем с постановкой наземных методов на труднопроходимых и удаленных от инфраструктуры территориях, повысить скорость их обследования и картирования позволяют беспилотные технологии. Перспективы крупномасштабных низковысотных съемок стали очевидны в конце прошлого века [1, 2], однако до настоящего времени, несмотря на развитие рынка беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), в практике отечественной геологической деятельности такие технологии не получили широкого распространения [3]. Научно-технические проблемы создания беспилотных аэрогеофизических систем обусловлены тем, что БПЛА сами по себе являются мощными источниками электромагнитных, вибрационных, ориентационных и других воздействий, которые искажают естественные поля геологической среды, на фиксации и прецизионном измерении последних основаны многие геофизические методы разведки. Тем не менее, как показывает и настоящее исследование, создание БПЛА-геофизических технологий вполне возможно.

На протяжении двух лет авторы занимались разработкой комплекса новых низковысотных аэрогеофизических методов, которые были бы применимы в любых ландшафтно-морфологических условиях и при этом имели бы фиксированную, в отличие от наземной съемки, стоимость работ [4]. Первым из разработанных методов является беспилотная крупномасштабная аэромагниторазведка [5, 6]. В двух частях настоящей работы приведено описание и даны результаты апробации этого метода в сравнении с пешеходным вариантом при решении задач структурно-геологического картирования в пределах нескольких перспективных на рудное золото площадей Бодайбинского синклиория.

### ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС

При разработке технологии БПЛА-магниторазведки акцент был сделан на высокую надежность и максимально низкую себестоимость компонентов, что обеспечило бы высокую рентабельность применения комплекса в самых тяжелых природных условиях, в которых аварии весьма вероятны. В результате аэромобильная часть разработанного комплекса сопоставима по стоимости с современным пешеходным прибором с аналогичной точностью измерений.

Созданный комплекс включает два мультироторных БПЛА и программное обеспечение для подготовки полетных заданий и обработки данных. Несмотря на то что беспилотные аппараты изготовлены непосредственно авторами и не являются серийными, в их конструкции использовано максимальное количество компонентов, представленных в открытой продаже, что обеспечивает высокую ремонтпригодность. Первый БПЛА, так называемый легкий, оснащен курсовой камерой, передающей видеоизображение оператору, что позволяет при необходимости вмешаться в управление за пределами прямой видимости. В обычном случае он предназначен для предварительной верификации корректности полетного задания, загруженного в систему автопилотирования. Если достаточно корректную миссию для автопилота подготовить не представляется возможным по причине отсутствия достоверной пространственной информации, возможна установка на него фотоаппарата для создания цифровой модели местности (ЦММ) по фотоизображениям. В случае, если уже имеется цифровая модель рельефа (ЦМР) или ЦММ с гарантированной точностью, от предварительных полетов можно отказаться.

Второй БПЛА, так называемый тяжелый, представляет собой 6- или 8-винтовой коптер, оснащенный магнитометром — устройством для измерения модуля полного вектора напряженности геомагнитного поля, состоящим из выносного датчика на складном подвесе и расположенного под рамой блока управления, включающего магнитоизмерительный преобразователь и контроллер магнитометра (рис. 1) [5].



Рис. 1. «Тяжелый» мультикоптер с магнитометром.

В комплекс также входит аппаратура GNSS-привязки и радиомодем для обмена данными между наземными станциями и летательными аппаратами. В конструкции данного БПЛА применены несколько уровней виброразвязки, материалы и компоновочные решения, минимизирующие наводки от силовых линий питания моторов.

Полная взлетная масса «тяжелого» БПЛА с магнитометром может достигать 15 кг, время полета — до 20–30 минут. Применение довольно крупного по меркам мультироторных БПЛА аппарата обусловлено его высокой прочностью, мощностью и возможностью эффективно бороться с ветром и снегом, сохраняя прямолинейную траекторию полета и постоянную скорость движения, что необходимо для качественной геофизической съемки. Для удобства транспортировки он выполнен складным и помещается в кофр-рюкзак, в связи с чем авторам вдвоем удавалось переносить весь комплекс оборудования (БПЛА, бензогенератор, ноутбук, базовую станцию, батареи, зарядные устройства и пульт) и выполнять работы на удалении от инфраструктуры, куда автомобиль проехать уже не мог.

В качестве магнитометрического канала в настоящее время используется высокоточный квантовый магнитометр, произведенный по техническому заданию ООО «Геоинформационные технологии — Сибирь» в лаборатории квантовой магнитометрии Уральского федерального университета (зав. лаб. В. А. Сапунов), выпускающей линейку пешеходных и стационарных магнитометров семейства POS. Его сходимость с этими распространенными приборами обеспечивает метрологическую корректность измерений и учета вариаций. Аэромагнитометр обеспечивает абсолютную погрешность измерений в пределах 1 нТл при измерениях 1 раз в секунду, 3 нТл — при измерениях 8 раз в секунду.

Для реализации максимального уровня возможностей, заложенных в аппаратной составляющей, было разработано оригинальное программное обеспечение, представленное в виде нескольких модулей для среды свободно распространяемой геоинформационной системы QuantumGIS. Важной задачей, которую необходимо было решить для практической реализации методических позиций низковисотной беспилотной магниторазведки, являлась разработка программного средства для генерации полетных заданий, которое позволило бы автоматизированно создавать корректные полетные миссии с учетом рельефа и другой пространственной информации, доступной с помощью ГИС-технологий. Обтекание рельефа на заданной, максимально низкой высоте является важной позицией магниторазведочных работ, так как модуль полного вектора напряженности магнитного поля с высотой существенно меняется, причем высокочастотные аномалии, вызванные небольшими по размеру объектами, затухают значительно быстрее, чем аномалии от крупных структур. Создание максимально точно аппроксимирующей рельеф полетной миссии сложно для практической реализации, поскольку современные полетные контроллеры поддерживают ограниченное количество полетных точек — в наиболее распространенных вариантах оно находится в диапазоне от 16 для любительских (DJI NAZA V2) до 50 для профессиональных (DJI WookongM и A2) наборов логики. Причем, как показала практика эксплуатации, более «высокий» в линейке производителя контроллер, поддерживающий большее количество точек, совсем необязательно обеспечивает высокое качество стабилизации БПЛА. Это связано с более точным учетом параметра центра тяжести мультикоптера в более совершенных моделях, а в данном случае из-за кабеля с датчиком центр тяжести БПЛА является плавающим. Естественно, что нехватка точек может привести к недостаточно точной аппроксимации рельефа, вследствие чего возможно крушение летательного аппарата.

Распространенные средства контроля полетов, такие как DJI Ground Station, позволяют создавать полетные задания ориентируясь только на предусмотренные источники картографической информации — ЦМР SRTM 3 Arc-Second и фотоснимки GoogleEarth, недостаточно точные для крупномасштабных и низковисотных работ. Кроме того, при автоматизированной разбивке маршрута стандартными планировщиками высота всего создаваемого массива точек отсчитывается от высоты точки взлета БПЛА и может быть только одинаковой, что допустимо для фотограмметрических миссий, но совершенно не подходит для геофизических. К счастью, форматы данных миссии, в которых задания воспринимают полетные контроллеры БПЛА, открыты, что позволило авторам разработать плагин, получивший название SibGIS Flight Planner. Упрощенная версия модуля, не обладающая интеллектуальными возможностями по нахождению оптимальных точек рельефа, но позволяющая создавать полетные миссии по любым ЦМР в формате \*.awm, опубликована под открытой лицензией и доступна для скачивания по адресу <https://github.com/raulett/SibGIS-Flight-Planner>.

Разработанный модуль позволяет выполнять следующие операции (кнопки слева направо)



: выбор направления профиля, разбивка сети пикетов с установленным шагом между профилями и пикетами (в открытой версии), оптимизация полетного задания (в открытой

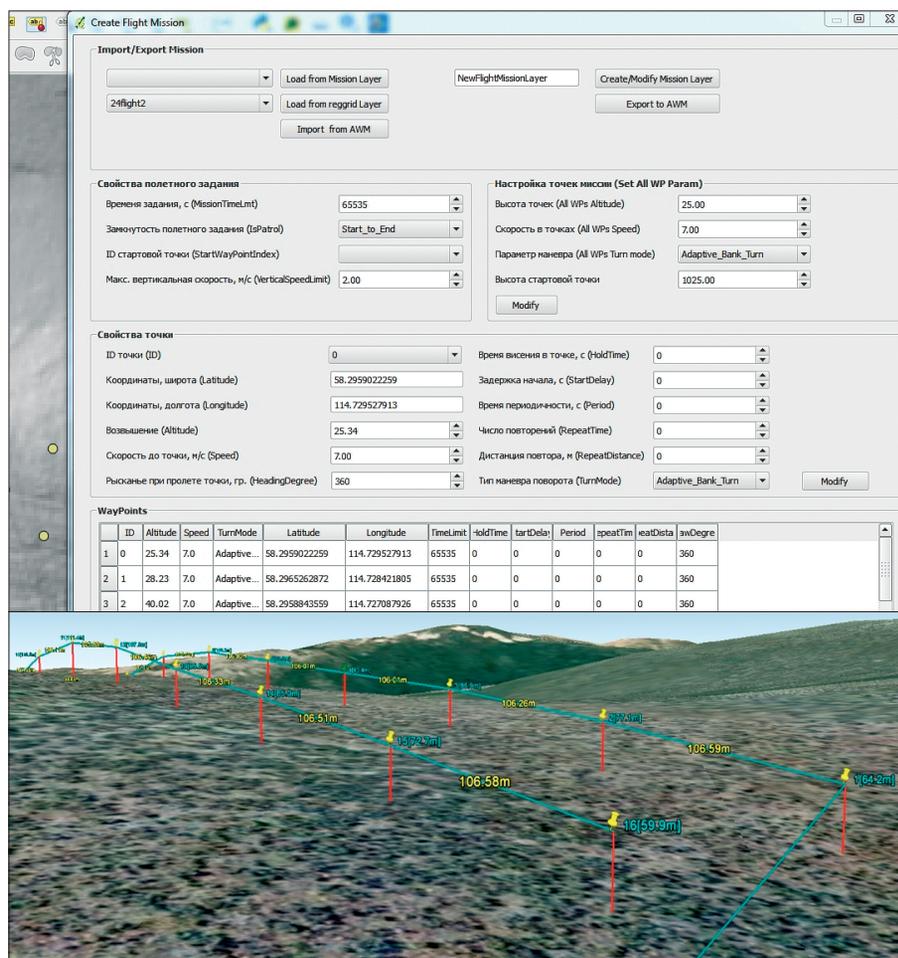


Рис. 2. Интерфейс модуля подготовки полетных миссий и результат экспорта в программу DJI Ground Station.

версии не работает), извлечение высот из ЦМР, конфигурация полетной миссии. Последнее интерфейсное окно приведено на рис. 2, в нем имеется возможность задания широкого набора параметров — от высоты и скорости в каждой точке до режима прохождения поворотов. Подготовка ЦМР выполняется стандартными средствами ГИС.

Важным достоинством данного плагина является возможность абсолютно точного позиционирования всех точек полета, что невозможно в стандартных средствах. Местоположения точек можно задать любым существующим в геоинформационных системах способом, интеграция с ГИС-оболочкой позволяет формировать полетное задание с учетом всей совокупности имеющейся на территорию пространственной информации.

## ВЫВОДЫ

Разработанная технология крупномасштабной магниторазведки на сверхнизких высотах является по меньшей мере одной из первых в мире. Созданный комплекс может быть применен в широком диапазоне условий внешней среды и, по мнению авторов, сформированному на основе известных публикаций и материалов доклада ФГУНПП «Геологоразведка» 2016 г. (автор В. С. Цирель), в рассматриваемой постановке задачи (это абсолютные измерения на сверхнизких высотах при сложном рельефе и неблагоприятных условиях внешней среды) пока не имеет аналогов на рынке магниторазведки. Убедиться в реальности работы комплекса в условиях снега и низких температур можно по видеосюжетам <https://drive.google.com/open?id=0B2TJkeSH8LcYUNh1Snd6ajNYcFE>, <https://drive.google.com/open?id=0B2TJkeSH8LcYZDRsbUN0b0R1TjQ>.

Созданное программное обеспечение, интегрированное с QuantumGIS, позволяет формировать полетные миссии с учетом всей совокупности геоданных о территории. Представлен вариант с открытым кодом, которым специалисты могут воспользоваться для решения научно-технических задач, связанных с управлением БПЛА на контроллерах DJI.

Методика работы и результаты апробаций, выполненных на нескольких золоторудных объектах, расположенных в отложениях черносланцевой формации Байкало-Патомского нагорья, приведены во второй части статьи.

*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. 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.
2. Маснае J. Design specifications for a geophysical unmanned air vehicle assembly (GUAVAS) // SEG Expanded Abstracts. — 1995. — Vol. 14. — P. 375–376.
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. Паршин А. В. Перспективы применения беспилотных летательных аппаратов при выполнении геологоразведочных работ на рудных объектах байкальской горной области // Вопр. естествознания. — 2015. — № 2. — С. 97–101.
5. Комплекс для беспилотной аэромагниторазведки: пат. РФ / Паршин А. В. Заявка № 2016129683, Приоритет 19.07.2016.
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).

*Поступила в редакцию 18 октября 2016 г.*