

при длине бороздовых проб 1 м велика доля случайной составляющей изменчивости.

По результатам исследований проб длиной 1 и 5 м построены графики отдельно по каждой канаве (рис. 2). На графиках видно, что по пробам длиной 1 м плавного изменения содержания олова не наблюдается. При этом по пробам длиной 5 м по некоторым канавам (например, К-258) выявляются участки с повышенными содержаниями, что позволяет отмечать некоторые закономерности распределения олова.

Для большей убедительности можно сравнить графики вариограмм, вычисленные без элиминирования тренда, по канавам К-256 и К-258 при длине проб 1 и 5 м (рис. 3). Эффект самородков вариограмм, построенных по данным опробования с длиной проб в 1 м, выше, чем по данным опробования с длиной проб 5 м.

При сгущении сети наблюдений случайная составляющая изменчивости олова должна уменьшаться, а закономерная — расти. Но в данной ситуации, наоборот, растет величина случайной составляющей. Отчасти это объясняется тем, что при детализации длина и объем проб уменьшаются. Это приводит к увеличению дисперсии и соответственно к увеличению случайной составляющей. Такая ситуация характерна для месторождений с прожилково-вкрапленными текстурами, обладающих высокой степенью прерывистости и опробованных системой небольших проб, размеры которых заведомо меньше пустых интервалов между соседними прожилками, а сами прожилки во много раз меньше линейных размеров проб [2].

Следовательно, бороздовые пробы длиной 1 и 5 м улавливают закономерности разных структурных уровней. Метровые пробы характеризуют размещение рудных прожилков, а 5-метровые — их скопления. Соответственно при описании неоднородности на уровне прожилков для уменьшения доли случайной изменчивости и увеличения закономерной надо сокращать рас-

стояния между соседними наблюдениями, т.е. сгущать сеть до размеров, соизмеримых с элементами неоднородности — прожилками, а это первые сантиметры (средняя мощность прожилков на штокверке Крутой составляет 4 см), что представляется практически невозможным. Следовательно, даже при весьма детальном опробовании с длиной пробы 1 м наблюдаемая изменчивость не будет адекватна абсолютной изменчивости содержаний олова в штокверке.

Из всего вышесказанного можно сделать следующие выводы:

при анализе изменчивости признака надо изучать все аспекты, влияющие на нее, в том числе и анизотропию строения изучаемого объекта;

для описания изменчивости на месторождениях с высокой степенью прерывистости и анизотропным характером изменчивости содержания первостепенное значение будет иметь ориентировка проб, а не их длина и объем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каждан, А.Б. Математические методы в геологии: учебник для вузов / А.Б. Каждан, О.И. Гуськов. — М.: Недра, 1990. — 251 с.
2. Каждан, А.Б. Методологические основы разведки полезных ископаемых / А.Б. Каждан. — М.: Недра, 1974. — 272 с.
3. Каждан, А.Б. Разведка месторождений полезных ископаемых / А.Б. Каждан. — М.: Недра, 1977. — 327 с.
4. Матерон, Ж. Основы прикладной геостатистики / Ж. Матерон. — М.: Мир, 1968. — 408 с.
5. Павловский, А.Б. Геолого-промышленные типы месторождений полезных ископаемых. Олово: учебное пособие / А.Б. Павловский, И.Г. Печенкин, И.Г. Луговская. — М.: ВИМС, 2015. — 52 с.
6. Утин, П.П. Отчет о геологоразведочных работах на штокверках Пыркакайского оловоносного узла с подсчетом запасов по состоянию на 1 июля 1980 г. / П.П. Утин. — Магадан, 1980. — 364 с.
7. Четвериков, Л.И. Оценка анизотропии геологических объектов / Л.И. Четвериков. // Вестник ВГУ. Серия: Геология. — 2000. — № 9. — С. 26–31.

© Макарчева А.А., 2016

Макарчева Александра Анатольевна // ogon.ok@mail.ru

ГЕОФИЗИКА

УДК 550.83:550.814

Семенова М.П., Цирель В.С. (ФГУНПП «Геологоразведка»)

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ БЕСПИЛОТНОЙ АЭРО-ГЕОФИЗИКИ

Развитие беспилотной аэрогеофизики базируются на достижениях науки и новых технологий XXI столетия, позволяющих создавать беспилотные аппараты, геофизическую аппаратуру, методы управления съемкой, системы сбора, обработки и интерпретации данных. Рассматриваются конструктивные и технические особенности беспилотной аэрогеофизики, современное состояние систем геофизических измерений с использованием беспилотных носителей, приводятся результаты проведенных исследований, намечаются пути дальнейшего развития данной

*отрасли. **Ключевые слова:** беспилотная аэрогеофизика, беспилотный летательный аппарат, аэромагниторазведка, аэроэлектроразведка, аэрогамма-спектрометрия, электромагнитные помехи, экономическая эффективность.*

Semenova M.P., Tsirel V.S. (Geologorazvedka)

DEVELOPMENT PROSPECTS UNMANNED AIR GEOPHYSICS

There has been the development of unmanned air geophysics based on the achievements of science and new technologies of XXI century, allowing creating drones, geophysical equipment, shooting management, collection, processing and interpretation of data. There were considered constructive and technical features of unmanned aero geophysics, the current state of geophysical measurement systems using unmanned vehicles, the

results of the research, outlined the further development of the industry. **Keywords:** Air geophysics, an unmanned aerial vehicle, air magnetic service, air-electro-magnetic prospecting, airborne gamma spectrometry, electromagnetic interference, economic efficiency.

Интерес к использованию беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для геофизических исследований с целью решения геологических задач возник в начале 1990-х годов. Анализ существующих БПЛА того времени показал необходимость формирования концепции создания беспилотных геофизических систем, имея в виду: систему беспилотных аэрогеофизических исследований; экономическую эффективность; технические, конструктивные и аэродинамические особенности; обеспечение безопасности; методы управления полетом. Развитие новых технологий позволило уже в первые годы XXI столетия создать беспилотные системы, обеспечивающие проведение геофизических исследований с высокой экономической эффективностью, в том числе в сложных горно-геологических условиях. В настоящее время разработка геофизических БПЛА находится в стадии дальнейшего интенсивного развития. Десятки фирм, научных учреждений, государственных структур во всем мире занимаются решением проблем БПЛА, связанных с особенностями геофизических исследований. Имеющиеся на сегодняшний день системы геофизических БПЛА различаются по техническим, конструктивным, аэродинамическим параметрам, подходу к решению проблем безопасности и управления съемкой, а также требованиям к системам обеспечения экономической эффективности. Полученный опыт создания беспилотной аэрогеофизики является основой для выбора оптимальных путей дальнейшего развития технико-технологических средств приповерхностной геофизики с целью их коммерческой реализации как при поисковых геологоразведочных работах, так и в помощь региональному геологическому изучению. Задача данной статьи заключается в ознакомлении специалистов-геофизиков, инвесторов и производственных компаний с современными достижениями в области беспилотной аэрогеофизики.

Технологические и конструктивные особенности беспилотной аэрогеофизики

Начиная с 1990-х годов, появляется проблема использования БПЛА для геофизических съемок и намечаются пути ее решения. Первая отечественная публикация о перспективах применения для аэрогеофизики беспилотных сверхлегких летательных аппаратов с целью проведения детальных исследований появилась в 1995 г. [1]. Первые опыты коммерческого использования БПЛА для аэрогеофизики (на основе проектов Министерства обороны Австралии, 1995 г.) не смогли стать конкурентоспособными по сравнению с традиционными аэрогеофизическими технологиями, прежде всего вследствие их высокой стоимости (от нескольких сотен тыс. до 1 млн. \$), значительной массы (от десятков до сотен кг) и высокой стоимости страхования.

Предложения по адаптации БПЛА к геофизическим исследованиям были опубликованы в 1992 г. группой авторов *Holland G.J., McGeer T., Youngren H.* в Бюллетене

не американского метеорологического общества [8]. Основными особенностями нового БПЛА являлись: невысокая стоимость, автономный режим работы, возможность многократного использования, масса не более 8 кг и грузоподъемность до 7 кг, среднее время работоспособности (*MTBF — mean time between failure*) не менее 6 мес. В рамках Международного научно-исследовательского проекта *AMIRA (Australian Mineral Research Association Limited)* в 1995 г. проведены аэромагнитные исследования с использованием БПЛА. Измерения магнитного поля производились протонным магнитометром оверхаузеровского типа. Разработанный в рамках проекта *AMIRA* беспилотный аппарат показал значительные преимущества по сравнению с военными аналогами, однако стоимость работ оказалась весьма высокой, что явилось причиной приостановки развития этого направления. Однако многие горные компании неофициально втайне продолжали финансировать разработки БПЛА с надеждой на коммерческую эффективность.

Накопленный опыт многих компаний в течение последнего десятилетия позволил сформировать концепцию построения системы БПЛА для приповерхностных геофизических исследований, включающую:

1. Беспилотную авиационную систему геофизических исследований (БАС);
2. Возможность получения высококачественных геофизических данных;
3. Обеспечение безопасности;
4. Экономическую эффективность.

Беспилотная авиационная система геофизических исследований (БАС)

Лидерство в производстве БАС принадлежит США (64 %). Большое внимание разработке геофизических беспилотных авиационных систем уделяется также в Китае. Основопологающим принципом концепции БАС является обеспечение безаварийной эксплуатации системы и получение полноценной информации. Надежность функционирования БАС требует предварительной подготовки к проведению геофизических работ, обеспечения контроля и управления полетом.

Подготовка к проведению работ предусматривает: согласование с Единой системой организации воздушного движения — согласно ее требованиям осуществляется выбор параметров полета (маршрут, масштаб съемки, высота и скорость). Структура контроля и управления полетом в процессе геофизической съемки производится на базе географической информационной системы (ГИС). При этом предусматривается: наземная станция контроля; наземная станция космической связи; глобальная навигационная спутниковая служба (ГНСС); линии прямой и обратной связи; службы обработки и интерпретации геофизических данных, служба провайдера; геофизические БПЛА с установленными на них геофизической аппаратурой, геодезическими приемниками ГНСС, альтиметрами и фотоаппаратурой.

При проведении геофизических работ на небольших площадях требования к наземной службе контроля и управления полетом ограничиваются обеспечением взлета и посадки БПЛА. Полет в этом случае может

выполняться в автономном режиме. При проведении региональных исследований, особенно над территориями со сложным рельефом и неустойчивыми погодными условиями, требования к наземной станции БАС включают:

- мониторинг параметров полета;
- обеспечение полета по заданному маршруту;
- получение геофизической информации, передаваемой с БПЛА в реальном масштабе времени, и передача ее в службу обработки и интерпретации данных;
- мониторинг состояния территории исследований по данным видеоизображений, получаемых с БПЛА, с целью предотвращения аварийных ситуаций в случае лесных пожаров, сильного ветра и других чрезвычайных ситуаций.

Возможность получения высококачественных геофизических данных

Качество геофизических данных зависит от многих факторов, к основным из которых относятся помехи, влияющие на результаты магнитных и электромагнитных измерений, в том числе на технические характеристики аппаратуры, а также на технологию съемки. Помехами, искажающими магнитное поле при аэромагнитных исследованиях, являются ферромагнитные элементы конструкции летательного аппарата; высокочастотные электромагнитные шумы, возникающие в результате работы силовых и электронных устройств; вибрация БПЛА (в модификации самолета — из-за его малой массы и значительной площади крыльев); изменение положения БПЛА в пространстве. Выполненное как за рубежом [7], так и в России [2] изучение степени влияния указанных помех позволило разработать следующие оптимальные требования к конструкции геофизического БПЛА и технологии съемки: замена всех железных деталей БПЛА на немагнитные; изменение конфигурации БПЛА, обеспечивающее наибольшее удаление датчиков от двигателя и электронных систем навигации; выполнение геофизической съемки со строгим ограничением пределов изменения положения БПЛА в пространстве; замена электродвигателя на двигатель внутреннего сгорания. Технологические возможности современной промышленности позволяют осуществить вышеуказанные требования.

Все имеющиеся на сегодняшний день беспилотные летательные аппараты для геомагнитных исследований выполнены из немагнитных композитных материалов и стекловолокна. Для уменьшения влияния шумов от электродвигателя и электронных устройств конфигурация геофизического БПЛА по сравнению с военными аналогами имеет более удлиненный фюзеляж и больший размах крыльев. Уменьшение вибрации электродвигателя достигается за счет особой конструкции его крепления. Исключение влияния изменения положения БПЛА в пространстве осуществляется выбором определенных аэродинамических характеристик, алгоритма автоматического управления и технологии проведения комплекса геофизических исследований в системе ГИС. Значительную погрешность вносит встречный ветер при развороте БПЛА. Для исключения этого влияния необходимо участок разворота БПЛА удалить от площади исследования. Концепция геофизических

исследований на основе БПЛА предусматривает: обеспечение качества получаемых данных, сравнимое как с результатами наземных измерений, так и с данными пилотируемой аэросъемки; уменьшение размеров и массы аппаратуры до величин, допустимых для установки на малые БПЛА, так как использование подвесных платформ для расположения геофизической аппаратуры удорожает стоимость беспилотных аппаратов.

Значительные успехи в области развития магнитометрической аппаратуры для БПЛА достигнуты компанией *GEM System* (Канада). Используемая в настоящее время магнитоградиентометрическая аппаратура *GSM-35UAV* обладает чувствительностью 0,1 пТл, масса датчика составляет 430 г, электронной системы — 460 г [6]. Для проведения аэроадиометрических исследований успешно используется аэрогамма-спектрометрическая аппаратура нового поколения. Так, аэрогамма-спектрометр *Medusa* с детектором на основе кристалла CsJ имеет массу всего 4 кг (*Medusa Sensing BV*, Нидерланды). В 2014 г. на мировом рынке представлена аэроадиометрическая аппаратура *Kromek GR1*, разработанная компанией *Kromek* (Англия), удовлетворяющая требованиям геофизических исследований с использованием беспилотного летательного средства. Спектрометр *GR1* с объемом блока детектирования 1 см³, массой 60 г (!) создан на основе полупроводникового детектора кадмий—цинк—теллурид (CdZnTe). Диапазон регистрируемых энергий составляет 30–3000 кэВ с энергетическим разрешением 2–2,5 % по гамма-линии 662 кэВ [12].

Обеспечение безопасности

При рассмотрении вопроса безопасности полетов БПЛА следует отметить как положительные, так и отрицательные факторы. Положительным является отсутствие экипажа, подверженного риску гибели при катастрофических последствиях. Однако, как показывает опыт, сами БПЛА в большей степени подвержены инцидентам, чем пилотируемые аналоги, главным образом, за счет человеческого фактора (пилотов, управляющих полетом с наземных станций). Вероятная опасность связана также с нестабильностью работы всех элементов систем БПЛА (блок питания, разъемы, сервомоторы и т.д.). Концепция безопасности полета геофизических БПЛА предусматривает: создание специальных БАС; подготовку высококвалифицированных пилотов наземного пункта управления; совершенствование архитектуры БПЛА в направлении надежности ее элементов; включение БПЛА в общее воздушное пространство. Опытные работы, выполненные за последние 10 лет, показали, что безопасность БПЛА требует ограничений максимального угла крена не более 20° и угла тангажа — не более 30° [15].

Экономическая эффективность

Стоимость геофизических работ с использованием БПЛА зависит от многих факторов, включающих тип летательного аппарата, задачи исследований, характер района работ, стоимость горючего, требования к качеству материалов, коммерческую стратегию. Анализ опубликованных данных свидетельствует о более низкой стоимости проведения исследований на БПЛА по сравнению со съемками с пилотируемых носителей.

При этом следует отметить, что цена исследований, включающих магнитные и радиометрические съемки, с использованием БПЛА ниже в модификации вертолета по сравнению с аналогичными исследованиями с использованием БПЛА в модификации самолета. Стоимость геофизических работ на БПЛА за рубежом колеблется в пределах от 2 до 40 \$ / км. Для сравнения стоимость геофизических исследований с использованием пилотируемых аналогов за рубежом составляет от 10 до 200 \$ / км, тогда как стоимость наземных работ находится в пределах от 55 до 95 \$ / км. Проведенная Государственным геологическим музеем им. В.И. Вернадского сравнительная оценка проектной стоимости традиционной аэромагнитной съемки масштаба 1:10 000 на площади 2000 км² с использованием вертолета Ми-8 и проектной стоимости съемки с использованием БПЛА «Геоскан 201» показала значительное удешевление работ при переходе к БПЛА (11 млн. руб. по сравнению с 30 млн. руб.) [3].

Широкое развитие геофизических БПЛА за последние годы позволило сформулировать основные требования к техническим и эксплуатационным параметрам, обеспечивающим проведение съемки:

- максимальная подъемная масса — не более 150 кг;
- скорость полета — от 50 до 150 км/ч;
- продолжительность вылета — не менее 1,5 ч;
- срок эксплуатации — не менее 6 мес;

Наиболее экономически эффективным является использование БПЛА, не требующих взлетно-посадочной полосы; реализация этого условия осуществляется путем взлета с катапульты и посадки с парашютом, а также вертикального взлета-посадки (при наличии дополнительного винта). Для БПЛА, использующих взлетно-посадочную полосу, ее размеры не менее 150×20 м.

Современное состояние приповерхностных аэрогеофизических технологий

Начало развитию БПЛА для геофизических исследований положила компания *FUGRO AIRBORNE* совместно с *Insitu group*. В 2004 г. ими разработан беспилотный самолет *GeoRanger*, соответствующий по своим характеристикам современным требованиям геомагнитных исследований. В период 2005–2007 гг. были проведены успешные исследования на ряде объектов, однако геофизические результаты этих работ до настоящего времени не опубликованы.

Современную базу приповерхностных аэрогеофизических исследований с использованием беспилотных носителей составляют БПЛА, специально разработанные для аэромагнитных съемок, а также летательные аппараты, используемые для других гражданских целей. Среди значительного количества публикаций, представленных в открытой печати, нами рассматриваются только те, по которым получены результаты, имеющие коммерческую перспективу. Современную базу аэромагнитных БПЛА составляют *GeoSurvII* (Канада), *Venturer UAV* (Канада), *CH-3UAV* (Китай), *Radai's Terrain Scout UAV* (Финляндия), *GEM Systems Monarch* (Канада), БАВК (беспилотный аэромагнитный комплекс) на базе БПЛА «Геоскан 201» (Россия).

Первой разработкой, положившей начало формированию современной технико-технологической базы

беспилотной аэромагнитной технологии, является *летательный аппарат GeoSurvII*, созданный в 2011 г. компанией *Sander Geophysics* совместно с Карлтонским университетом (Оттава, Канада) [5]. *GeoSurv II* предназначен для высокоточных магнитных исследований с использованием двух цезиевых магнитометров, датчики которых установлены на концах крыльев. Размах крыльев в последней модификации самолета составляет 4,9 м. Для создания *GeoSurv II* использовался композитный материал, в котором отсутствуют ферромагнетики. Все компоненты управления *GeoSurv II*, обеспечивающие автономный режим полета (датчики давления, гироскопы, датчики позиционирования *GPS*, акселерометры и др.), сконцентрированы около системы управления. Грузоподъемность *GeoSurv II* составляет 78 кг.

Серия беспилотных самолетов Venturer разработана в 2012 г. канадской фирмой *Stratus Aeronautics*. Корпус сконструирован на основе углеродного волокна и характеризуется высокой прочностью. Самолет оснащен электроникой военного производства, что обеспечивает работоспособность аппарата в экстремальных температурных и ландшафтных условиях. Для взлета требуется полоса длиной не более 100 м. Расход топлива составляет 15 л/ч, время непрерывной работы 10 ч. В процессе полета стабильность положения обеспечивается в автономном режиме. Участие наземных пилотов требуется только при взлете и посадке самолета. Отклонения в процессе полета от заданного режима составляют: ± 1,4 м по вертикали при высоте полета 150 м; ± 0,9 м от заданного положения маршрута. Для измерений используются два цезиевых магнитометра с оптической накачкой *Geometrics G-823A*, установленных на специальной платформе. Работы по совершенствованию технологии *Venture* не прекращаются до настоящего времени. Последние испытания проведены в 2013 г. в Канаде в провинции Южная Альберта [15].

Китай в 2013 г. представил *Технологию CH-3UAV*; разработка выполнена геологической службой КНР, Институтом геофизических и геохимических поисков и Академией геологических наук Китая при участии Академии космической аэродинамики. Геофизическая система создана на базе китайского беспилотного аппарата *CH-3* (среднего размера), на концах крыльев которого установлены датчики высокоточных цезиевых магнитометров CS-V (чувствительность 0,0006 нТл/Hz, погрешность по полному полю 2,5 нТл); в измерительный комплект входит феррозондовый магнитометр системы компенсации. Основные параметры *CH-3*: размах крыльев 8 м, время непрерывной работы 12 ч, грузоподъемность 150 кг. Высокая точность измерений магнитного поля достигается за счет стабильного положения *CH-3* в полете, что обеспечивается специально подобранными аэродинамическими формами носителя. Результаты исследований, проведенных в 2013 г. в провинции Хэйлунцзян на площади Дуобошан (с перепадами по высоте 130 м), подтвердили высокую эффективность БПЛА по сравнению с пилотируемыми аналогами [9].

Геомагнитный БПЛА Radai's Terrain Scout UAV разработан специально для выполнения магнитных исследований по заказу компании *Radai* при поддержке Геоло-

Характеристики	GeoSurvII	Venture UAV	CH-3UAV	Radai's Terrain Scout UAV	GEM System Monarch	«Геоскан 201»
Длина, м	3,6	2,74	4,2	н/д	н/д	1,1
Размах крыльев, м	4,9	4,95	8	2,12	3,2	2,2
Масса, кг	100	55	н/д	3	10	5,5
Масса оборудования, кг	5	8	160	1	2	1,5
Рабочее время, ч	4	10	12	1	1,5	2,5
Скорость, км/ч	100	120	180	50	70–160	64–130
Высота полета, м	50–100	150	80–150	70–130	100	50–300

гической службы Финляндии в рамках проекта *UAV-MEMO. Radai's Terrain Scout UAV* работает в автономном режиме. Автопилот осуществляет запись данных полета, включая время, координаты самолета, его ориентацию (курс, крен, тангаж). Погрешность определения положения БПЛА составляет ± 10 м. Измерения выполнялись трехкомпонентным феррозондовым магнитометром (уровень шума 0,5 нТл, частота записи 10 Гц) [13].

БПЛА GEM System Monarch — новейшая разработка, достоинством которой является возможность проведения исследований в районах со сложным рельефом и неустойчивыми погодными условиями. При создании *GEM System Monarch* за основу взят беспилотный носитель *TEMPEST*, разработанный американской компанией *UASUSA*; *TEMPEST* имеет сертификат на право выполнения коммерческих полетов, выданный Федеральным управлением гражданской авиации США. Магнитоградиентометрические измерения выполняются с помощью двух магнитометров *GSMP-35UAV*, датчики которых установлены на концах крыльев (база 3,2 м).

Отечественный беспилотный аэромагнитный комплекс на базе БПЛА «Геоскан 201» (разработан Группой компаний *Геоскан*, СПб.) создан Государственным геологическим музеем им. В.И. Вернадского РАН с участием МГУ им. М.В. Ломоносова. На сегодняшний день разработан экспериментальный образец комплекса (аббревиатура БАВК), который включает: магниточувствительный датчик, установленный на плоскости левого крыла в максимальном удалении от бортовой электрон-

ной системы и двигателя; бортовой компьютер; автопилот; двигатель внутреннего сгорания. Запуск осуществляется с катапульты, посадка — на парашюте.

Сравнение технических характеристик БПЛА, обеспечивающих проведение аэромагнитной съемки, представлены в таблице.

Радиометрические и электромагнитные технологии с

использованием беспилотных летательных аппаратов в отличие от аэромагнитных появились только в последние годы. Первые опытные образцы и исследования относятся к 2014–2015 гг. Развитие радиометрических датчиков для БПЛА в последние годы обусловлено экологическими проблемами, связанными с аварийными ситуациями на атомных электростанциях. Опытные работы по использованию систем экологических исследований с использованием БПЛА для решения задач геологического картирования успешно проведены в северо-западной части Англии на урановом месторождении *Counwall* в 2014 г. [10]. В качестве летательного аппарата использовался БПЛА в модификации вертолета *AARM-X8 (Advanced Aerial Radiation Monitoring)*, поставляемый компанией *Imi Tec Limited* (Англия). Запись спектров энергии излучения производилась датчиком *Kromek GRI* на высоте 5–15 м от поверхности земли (рис. 1).

В 2015–2016 гг. появились публикации [14] об электромагнитных исследованиях с использованием БПЛА. Немецкая компания Мобильные геофизические технологии (*Metronix Geophysics*) совместно с Институтом биологических и геологических наук и Институтом геофизики Вестфальского университета имени Вильгельма (*Westfälische Wilhelms-Universität*) разработали аппаратуру для аэроэлектромагнитной съемки с использованием в качестве летательного аппарата *Aeroscout B1-100* (Швейцария) (рис. 2). В Японии и КНР в последние годы интенсивно ведутся работы по реанимации давно известного, широко применявшегося в СССР, метода «бесконечно длинного кабеля» (БДК), но с использованием беспилотных аппаратов. В Китае эта технология имеет название *GREATEM (Grounded electrical-source airborne transient electromagnetics)*, в Японии — *AGTEM (air-ground transient electromagnetic method)*. Основная особенность данной технологии заключается в использовании в качестве источника электромагнитного поля диполя длиной 1–2 км. Приемник установлен на платформе БПЛА. Такая технология позволяет исследовать территорию на значительную глубину — более 1 км. Основное достоинство технологии БДК заключается в отсутствии необходимости установки генераторной установки на корпусе БПЛА, что позволяет значительно уменьшить массу системы и повысить степень безопасности полета. Однако в настоящее время эта технология еще находится на стадии теоретических расчетов и опытно-методических работ [4].



Рис. 1. Внешний вид автономного радиометрического БПЛА с детектором



Рис. 2. БПЛА Aeroscout B1-100 с установленной на нем электромагнитной системой Metronix

В последние годы появились публикации о возможности установки на БПЛА новой гравиметрической аппаратуры — микрогравиметров. Так, в университете Глазго (Великобритания) разработан микрогравиметр с чувствительностью $40 \text{ мГал} \cdot \sqrt{\text{Гц}}$, размером несколько см^3 [11]. Эта аппаратура может рассматриваться в качестве весьма перспективной для установки на БПЛА, имея в виду гравиметрические исследования на малой высоте с целью геологического картирования и решения геологоразведочных задач, а также при отработке месторождений путем установления точного расположения рудного тела.

Заключение

Разработки последних лет демонстрируют значительные достижения в области беспилотной аэрогеофизики, обеспечивающие высокую геологическую и экономическую эффективность проводимых работ. Использование композитных материалов и стекловолокна, изменение конфигурации БПЛА, обеспечение стабильности положения носителя в полете позволило существенно снизить влияние электромагнитных помех. Создание систем контроля и управления полетом в процессе геофизической съемки на базе географической информационной системы обеспечивает как изучение небольших участков, так и проведение региональных работ на больших площадях. Построение высокоточной геофизической аппаратуры на базе современной микромеханики, микроэлектроники и компьютерной техники позволяет устанавливать ее непосредственно на корпусе БПЛА без использования специальных платформ, повышающих стоимость и уменьшающих безопасность полетов. Результаты тестовых и опытно-методических работ показали возможности магнитных, электромагнитных и гамма-спектрометрических методов с использованием БПЛА

решать задачи региональных исследований и геолого-поисковые задачи с высокой точностью и разрешающей способностью на уровне современных достижений. Интенсивность развития геофизических систем на основе БПЛА, включение разработок в государственные программы многих стран свидетельствуют о высокой коммерческой перспективе беспилотных технологий при геофизических исследованиях.

Авторы пользуются случаем поблагодарить за предоставленную информацию сотрудников ФГБУ «ВИМС» В.В. Короткова и А.В. Стародубова, директора ГГМ им. В.И. Вернадского С.В. Черкасова.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воробьев, В.П. Перспективы использования аэрогеофизических методов для детальных геофизических исследований / В.П. Воробьев, В.А. Глаголев, В.Н. Кирсанов и др. // Геофизическая аппаратура. — 1995. — Вып. 100. — С. 117–125.
2. Паленов, Ф.Ю. Изучение магнитного поля беспилотного летательного аппарата (БПЛА) с целью создания аппаратного комплекса для аэромагнитной съемки / Ф.Ю. Паленов, С.В. Черкасов, Б.В. Стерлигов и др. <http://www.xpir.fcntp.ru/external/downloads/.../14.607.21.0081-Poster.pdf> (дата обращения 11.02.2016).
3. Черкасов, С.В. Перспективы использования сверхлегких беспилотных летательных аппаратов для целей геологического картирования / С.В. Черкасов, Б.В. Стерлигов, А.Е. Семенов / http://www.vsegei.ru/ru/conf/summary/ggk-15/s2/11S2_08-04.pptx (дата обращения 06.04.2016).
4. Eppelbaum, L. V. Unmanned Airborne Magnetic and VLF investigations: Effective Geophysical Methodology of the Near Future / L.V. Eppelbaum, A.R. Mishne // Positioning. — V. 2. — N 3. — P. 112–133.
5. GeoSurvII / <http://www.GeoSurvII.carleton.ca/mae/wp-content/uploads/UAV-Projects....> (дата обращения 02.02.2016).
6. Gradient Magnetometer UAV Utilizing GEM's High Sensitivity Potassium Sensors UAVs — Pathway to the Future — Gem Systems / <http://www.gemsys.ca/.../uavs-pathway-to-the-future/> (дата обращения 18.02.2016).
7. Guo, Z. Three-component Aeromagnetic Compensation for UAV Platform Baogang Zhang / Z. Guo, L. Zhu, Y.A. Qiao / Institution of Remote Sensing Application, Chinese Academy of Sciences, GEM Beijing 2011: International Workshop on Gravity, Electrical & Magnetic Methods and Their Applications. — Beijing China, 2011, October 10–13.
8. Holland, G.J. Autonomous Aerosondes for economical atmospheric soundings anywhere on the globe / G.J. Holland, T. McGeer, H. Youngren // Bulletin American Meteorological Society. — 1992. — V. 73. N 12. — P. 1987–1998.
9. Li, F. GEM Chengdu 2015: International Workshop on Gravity, Electrical & Magnetic Methods and Their Applications Chengdu / F. Li, J. Li, Z. Cui, X. Zhili. — China, 2015. — P. 232–235.
10. Martin, P.G. The use of unmanned aerial systems for the mapping of legacy uranium mines / P.G. Martin, O.D. Payton, J.S. Fardoulis et al. // Journal of Environmental Radioactivity. — 2015. — V. 143. — P. 135–140.
11. Middlemiss, R.P. Measurement of the Earth tides with a MEMS gravimeter / R.P. Middlemiss, A. Samarelli, D.J. Paul et al. // Nature. — 2016. — V. 531. — P. 614–617.
12. Nuclear detection, Kromek GR1 / <http://www.KromekGroupplc.kromek.com> (дата обращения 18.02.2016).
13. Pirttyavi, M. Ryssänlampi magnetic survey using Radai UAV system and its comparison to airborne and ground magnetic data of GT: Detailed Survey Report, 21.09.2015 / M. Pirttyavi / http://www.Ryssänlampimagnetic survey using Radai UAV system and tupa.gtk.fi/raportti/arkisto/73_2015.pdf (дата обращения 02.02.2016).
14. Tezkan, B. Electromagnetic measurement method using unmanned aerial system: Research project AIDA / B. Tezkan, R. Bergers, J.B. Stoll, U. Munch / <http://www.Electromagnetic measurement method using unmanned...geotechnologien.de/images/Documente/aida.pdf> (дата обращения 05.03.2016).
15. Wood, A. Experimental aeromagnetic survey using an unmanned air system / A. Wood, I. Cook, B. Doyle et al. // The Leading Edge. — 2016. — V. 35. — N 3. — P. 270–273.

© Семенова М.П., Цирель В.С., 2016

Семенова Маргарита Павловна // info@geolraz.com
Цирель Вадим Соломонович // info@geolraz.com