

Варианты легких беспилотных систем для электромагнитных профилирований и зондирований

А.В. Паршин* (ИРНТУ, ИГХ СО РАН), С.В. Яковлев (ИРНТУ), Ю.А. Давыденко (ИРНТУ, ООО «Гелиос»), А.С. Башкеев (ИРНТУ), В.В. Винокуров (ИРНТУ), С.В. Бухалов (ИРНТУ)

Введение

В настоящее время методы беспилотной аэрогеофизики по отдельности или в комплексе широко применяются при поисках месторождений и геофизическом картировании (Park and Choi 2020; Parshin et al 2016-2021; Jackish et al 2019; Cunningham et al 2018 и мн. др.). В российской практике технологии магнитных и гамма-съемок получили большое распространение и уже фактически полностью заменили наземные варианты тех же методов (Parshin 2018-2021). В дополнение к этим двум методам, классическая «большая» аэрогеофизика обязательно включает один из методов электроразведки, что позволяет более качественно решать обратные задачи и осуществлять геометризацию недр (Маснае 2007; Orta et al 2013; Контарович и др. 2007 и мн.др.). До настоящего момента реально существующие в геологической практике варианты БПЛА-электроразведки по всей видимости были ограничены вариантом VLF (GEM Systems, 2020 и подобные), где источником поля в геологической среде являются поля радиостанций диапазона первых десятков килогерц. Глубинность такого варианта электроразведки ограничена первыми десятками метров даже при высоком сопротивлении верхней части разреза, возможности полноценной инверсии весьма ограничена или даже она невозможна вовсе - если доступные станции не имеют существенных различий в частотах вещания. Не вызывает сомнений, что для дальнейшего повышения эффективности комплексной БПЛА-аэрогеофизики необходимо развивать методы БПЛА-электроразведки, обеспечивающие большую глубинность и возможность полноценной инверсии в классе 3Д-моделей.

В классической аэрогеофизике широкое распространение получили методы TDEM (Orta et al 2013 и др.), при которых вертолет обычно буксирует генераторную и измерительную системы. Масса и размеры буксируемой системы (и самого электрогенератора) велики. Законодательство Российской Федерации разрешает упрощенный порядок эксплуатации беспилотных систем полной массой до 30 кг, в связи с чем задача, которую мы хотели решить, заключалась в создании легкой электроразведочной системы (или нескольких взаимодополняющих технологий), которые позволят нам как выполнять электроразведочные работы на относительно больших площадях, так и получать данные, пригодные для качественной инверсии в классе 1Д и в перспективе 3Д-моделей, не выходя при этом за рамки обозначенной массы системы. Более того, поскольку авторами ранее уже был создан набор технологий магнитных, гамма, лидарных и мультиспектральных съемок (Parshin et al 2016-2021), мы хотели реализовать возможность одновременных съемок всеми этими методами, включая электроразведку, не выходя за 30 кг веса для всего беспилотного комплекса. В результате были разработаны и внедрены в практику две взаимодополняющие технологии, описанные далее.

Созданные технологии БПЛА-электроразведки

Были разработаны и применяются на практике две технологии БПЛА-электроразведки: Для комплексирования с магнитной и гамма-съемкой на ранних стадиях геологического картирования применяется вариант VLF, сходный с упомянутыми ранее. В нашем варианте измерительная система размещается на выносном кабеле в нескольких метрах под БПЛА и включает две либо три магнитные антенны. Антенны ориентированы для измерений горизонтальной и вертикальной компонент поля, причем на каждом новом участке съемки горизонтальная антенна направляется на максимум сигнала от радиостанции. Соответственно измерительная система осуществляет запись одновременно двух либо трех аудиотрактов с

записью времени и координат измерений по GNSS. С помощью быстрых преобразований Фурье из дискрет аудиозаписей извлекаются значения спектральных амплитуд сигнала на выбранной частоте (или нескольких частотах), т.е. значения H_y и H_z . В последние два года мы часто сталкиваемся с наличием одной, максимум двух доступных радиочастот, в связи с чем инверсия не выполняется, а строятся карты отдельных параметров – горизонтальной или вертикальной магнитной компоненты электромагнитного поля, их отношений, полного вектора, что, по нашему мнению, достаточно для решения задач опережающего картирования аномалий сопротивления. Измерения сопровождаются наблюдениями за суточными вариациями уровня СДВ радиоволн с неподвижной антенны, поскольку эти изменения зачастую значительны (). Масса измерительной системы не превышает 1.7 кг, что позволяет комплексовать этот вариант с другими видами геофизической съемки.

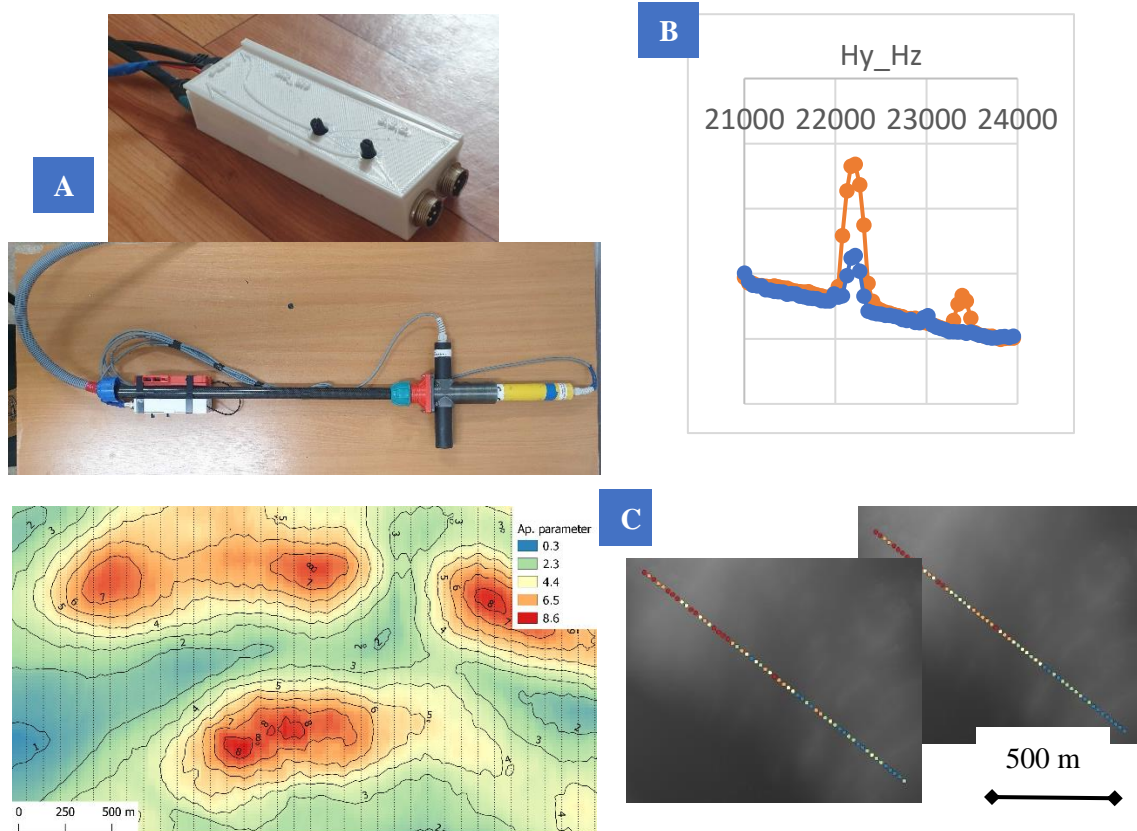


Figure 1 SibGIS UAS VLF system (a); sample of FFT result: amplitudes of horizontal (H_y) and vertical (H_z) components of EM field at 22.2 kHz frequency (b); H_z and H_y at same survey profile; sample of map of

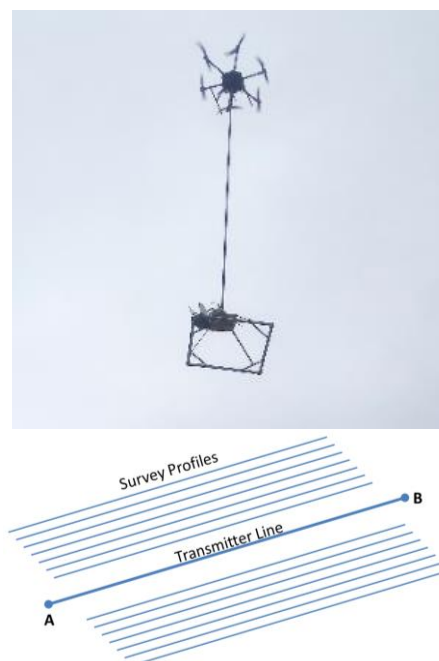
После того как по комплексу методов в пределах всей площади выделены наиболее интересные участки, применяется вторая разработанная технология. Эта технология представляет собой полноценные зондирования TDEM, однако, поскольку легкий БПЛА не может нести генератор и большую генераторную петлю, измерения выполняются по сети параллельных маршрутов вблизи гальванически заземленной линии длиной в несколько километров (рис. 2а). Например, при длине генераторной линии в 2 км, и токе менее 0.9А в условиях высокоомной части верхней части разреза крайние профили могут находиться на расстоянии до 1 км от генераторной линии. Используемая нами для обработки данных электромагнитных зондирований среда MARS 1D позволяет моделировать и учитывать эффекты влияния концов линии, поэтому выполнять съемку в геометрии срединного градиента необходимости нет. БПЛА буксирует измерительную систему с индукционным датчиком – эквивалентом пятидесяти или 20-метровой петли. Масса буксируемой части в существующем варианте достигает почти 8 кг, однако в дальнейшем будет существенно снижена. Конструкция подвеса обеспечивает достаточно качественную для получения кондиционных данных

стабилизацию измерительной системы по горизонту в условия среднегорного рельефа при крейсерской скорости полета 7-8 м/с. Параметры АЦП 100 кГц/18 бит, запись ведется на двух коэффициентах усиления с частотой 10 кривых зондирований в секунду и в дальнейшем будет существенно повышена. Граф обработки данных БПЛА-МПП включает: накопление и осреднение записей переходных процессов на заданные пространственные или временные интервалы съемки для устранения «шума» в данных; подавление промышленных помех (50 Гц) от используемого электрогенератора; выделение спадов; устранение тренда, вызванного движением приемной петли в пространстве; робастное сглаживание в скользящем окне, где длина окна – отсчеты АЦП по спаду, а ширина окна – накопления; интегрирование в кривую зондирования; привязка кривых зондирования к координатам. До последнего времени обработка производилась в классе 1Д моделей, однако в настоящее время уже возможно выполнять 3Д-инверсию данных с помощью программного комплекса ИТЕМ-IP (Persova et al 2019).

Примеры

На рисунке 2 приведен фрагмент БПЛА-МПП съемки, выполненной в рамках поисковых работ на уран в горных районах Восточной Сибири летом 2020 года (геология района более подробно описана в статьях Parshin et al 2018; 2021). Карта поля и разрезы фиксирует появление и увеличение мощности высокоомного рифейского осадочного чехла, а также наличие разломной тектоники (рис. 2b).

На этой и подобных сильно залесенных площадях со сложным рельефом наземные работы весьма трудоёмки в постановке, а с помощью разработанной технологии мы можем получать до 30-40 погонных километров электромагнитных зондирований в день. Однако перестановка генераторной линии занимает не менее двух-трех часов, в связи с чем разработанный вариант БПЛА-МПП в первую очередь ориентирован на детальное изучение участков площадью в несколько квадратных километров, характеризующихся сложной пешеходной проходимостью.



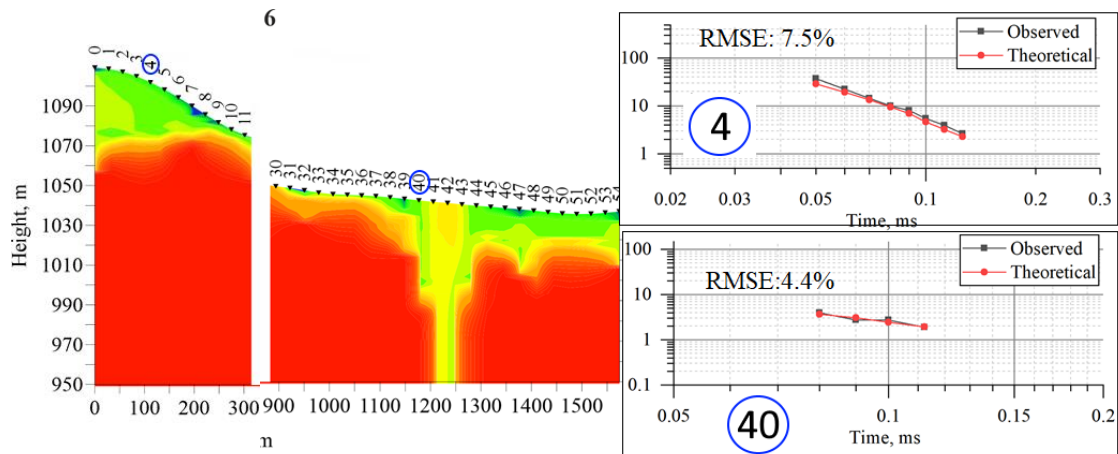


Figure 2. SibGIS UAS TDEM: at flight and geometry of system (a); samples of obtained and model sounding curves and example of 1D inversion (b).

Результаты испытаний на чувствительность, проведенные на эталонном разрезе на водоеме, будут показаны в докладе, в таких условиях глубинность зондирований составила более 600 метров.

Заключение

Описанные технологии преждевременно считать полноценными решениями рыночного уровня, однако и в существующем виде мы успешно используем их для решения геологических задач в реальных условиях. На первом этапе геологического изучения «зеленых листов» эффективен набор магнитной, гамма, и ВЛФ съемки, а после выделения перспективных участков можно использовать БПЛА-МПП, которая может выполняться одновременно с гамма-спектрометрией. Дальнейшее развитие обеих электроразведочных систем лежит в технической плоскости (например, сейчас осуществляется разработка нового АЦП для БПЛА-ТДЕМ с еще более высокой частотой записи), и уже не представляет для нас каких-либо научных проблем. Важно отметить, что решающее значение для получения качественных данным электромагнитных зондирований имеет конструкция подвеса индукционного датчика.

Однако в целом решив проблему сбора электромагнитных данных, а это по-настоящему «большие геоданные», мы сразу столкнулись с проблемой их быстрой обработки. Актуальной проблемой следующего этапа развития БПЛА-МПП является реализация программ сред для быстрой 3D-инверсии тысяч точек измерений, поскольку только такой вариант обработки позволяет в полной мере реализовать преимущества технологии. Тем не менее мы считаем, что создание технологии БПЛА-МПП представляет собой новую веху, которая в ближайшее время повлияет на изменение рынка геофизической разведки в России, а затем и в мире. Так, в настоящее время эта технология уже рекомендована для применения в государственных поисковых программах на уран и ряд других рудных минералов.

Acknowledgements

This work is supported by the Russian Science Foundation under grant No. 20-67-47037

References

1. Cunningham, M., Samson, C., Wood, A. *et al.* [2018] Aeromagnetic Surveying with a Rotary-Wing Unmanned Aircraft System: A Case Study from a Zinc Deposit in Nash Creek, New Brunswick, Canada. *Pure Appl. Geophys.* **175**, 3145–3158. <https://doi.org/10.1007/s00024-017-1736-2>

2. GEM Systems [2020] UAV VLF-EM SYSTEM: Resistivity Mapping Solution <https://www.gemsys.ca/uav-vlf/>
3. Jackisch, R., Madriz, Y., Zimmermann, R., Pirttijärvi, M., Saartenoja, A., Heincke, B.H., Salmirinne, H., Kujasalo, J.-P., Andreani, L., Gloaguen, R. [2019] Drone-Borne Hyperspectral and Magnetic Data Integration: Otanmäki Fe-Ti-V Deposit in Finland. *Remote Sensing*, **11**, 2084.
4. Macnae, J. [2007] Airborne Electromagnetic Systems. *ASEG Extended Abstracts*, **1**, 1-4.
5. Park, S.; Choi, Y. [2020] Applications of Unmanned Aerial Vehicles in Mining from Exploration to Reclamation: A Review. *Minerals*, **10**, 663. <https://doi.org/10.3390/min10080663>
6. Parshin, A., Budyak, A., Chebokchinov, I., Sapunov, V., BulnayeV A. and Morozov, V. [2019] Complex UAS-Geophysical Surveys at the First Stages of Geological Prospecting: Case in the Western Sayan (Russia). *First EAGE Workshop on Unmanned Aerial Vehicles*, Extended Abstracts, MoUAV02.
7. Parshin, A.; Morozov, V.; Snegirev, N.; Valkova, E.; Shikalenko, F. [2021] Advantages of Gamma-Radiometric and Spectrometric Low-Altitude Geophysical Surveys by Unmanned Aerial Systems with Small Scintillation Detectors. *Appl. Sci.* **11**, 2247. <https://doi.org/10.3390/app11052247>
8. Parshin, A.; Bashkeev, A.; Davidenko, Y.; Persova, M.; Iakovlev, S.; Bukhalov, S.; Grebenkin, N.; Tokareva, M. [2021] Lightweight Unmanned Aerial System for Time-Domain Electromagnetic Prospecting—The Next Stage in Applied UAV-Geophysics. *Appl. Sci.* **11**, 2060. <https://doi.org/10.3390/app11052060>
9. Persova, M., Soloveichik, Yu., Vagin, D., et al. [2019] Finite element solution to 3-D airborne time-domain electromagnetic problems in complex geological media using non-conforming hexahedral meshes. *Journal of Applied Geophysics* **172**, 103911.
10. Orta, M., Legault, J., Prikhodko, A., Plastow, G., Zhao, S., Moreton, M., and Ulansky, C. [2013] Ztem-Vtem-Aerotem Helicopter EM Comparisons Over The 501 Project Cu-Zn Vms At Mcfauld's Lake, Northern Ontario, Canada. *13th SAGA Biennial Conference & Exhibition*, cp-378-00015.
11. Контарович, Р., Бабаянц, П. and Овчарук, В. [2007] Современные тенденции развития аэрогеофизических методов и технологий. *Conference Proceedings, Geomodel 2007 - 9th EAGE science and applied research conference on oil and gas geological exploration and development*, Sep 2007, cp-331-00060 <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201405457>
12. Паршин А.В., Будяк А.Е., Блинов А.В. и др. [2016] Низковысотная беспилотная аэромагниторазведка в решении задач крупномасштабного структурно-геологического картирования и поисков рудных месторождений в сложных ландшафтных условиях. Часть 2. *География и природные ресурсы* **6**. 150-155.