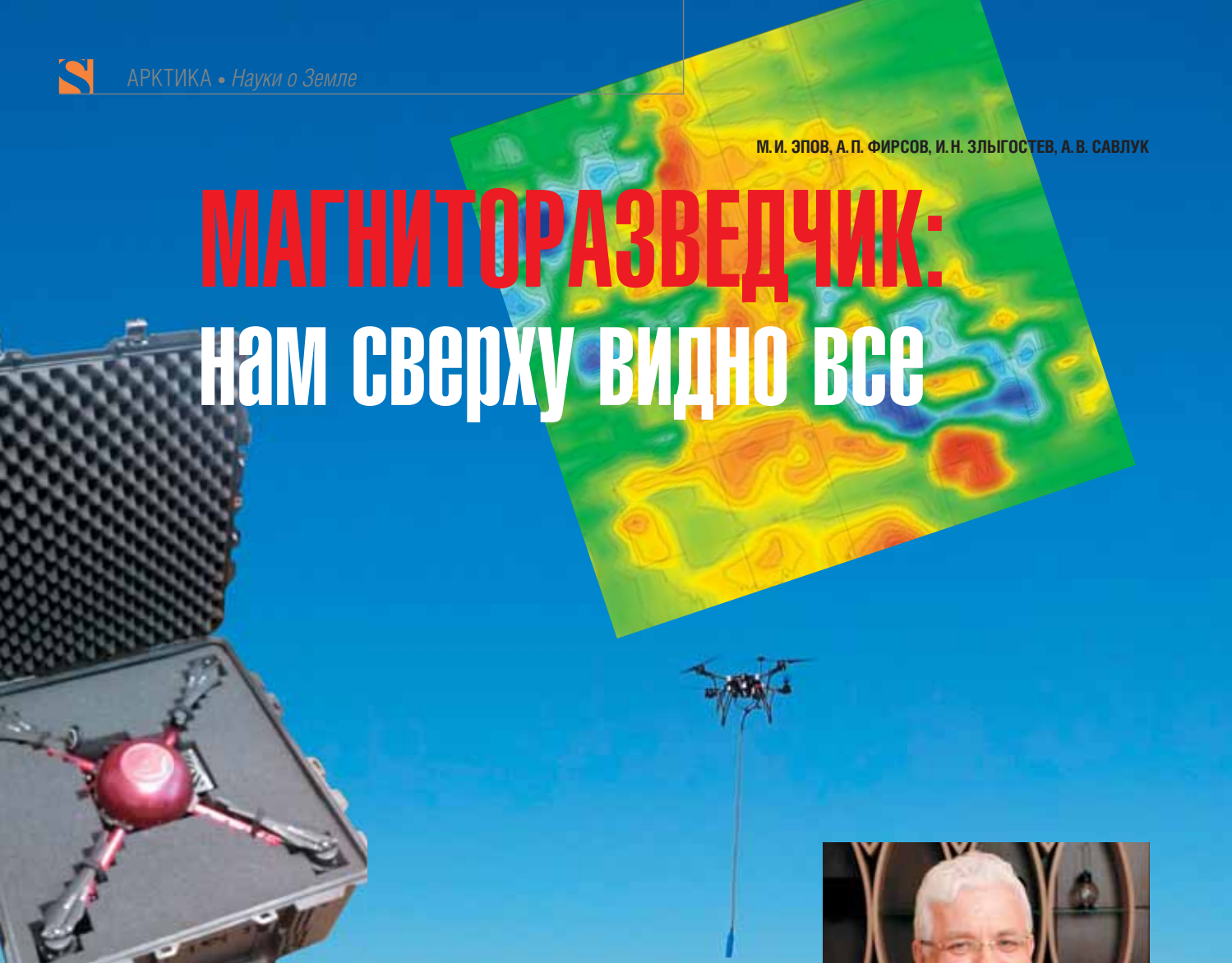


М. И. ЭПОВ, А. П. ФИРСОВ, И. Н. ЗЛЫГОСТЕВ, А. В. САВЛУК

МАГНИТОРАЗВЕДЧИК: НАМ СВЕРХУ ВИДНО ВСЕ



Самые интересные геологические объекты находятся, как правило, в слабо изученных и труднодоступных регионах страны, что сильно усложняет геологоразведочные работы. Сузить круг поисков помогает магнитометрическая разведка, которая дает информацию о локальных изменениях магнитного поля Земли. Однако современные методы геомагнитных исследований имеют серьезные недостатки, главные из которых – за пределами высокая стоимость работ и недостаточная точность данных. Исследователи из Института геологии нефти и газа СО РАН создали принципиально новый аэромагнитный комплекс, который сочетает маневренность беспилотного летательного аппарата с высокой чувствительностью магнитометрического оборудования, в результате чего удалось повысить детальность измерения магнитных данных в сто раз!

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат (БПЛА), магниторазведка, геофизические методы, разведка месторождений, геология, археология, геомагнитная томография.

Key words: unmanned aerial vehicle (UAV), aeromagnetic survey, geophysical methods, field exploration, geology, archeology, geomagnetic tomography



ЭПОВ Михаил Иванович – академик РАН, доктор технических наук, директор Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН (Новосибирск)

© М. И. Эпов, А. П. Фирсов, И. Н. Злыгостев, А. В. Савлук, 2016



ФИРСОВ Андрей Петрович – кандидат геолого-минералогических наук, заведующий отделом развития научных и инновационных программ Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН (Новосибирск)



САВЛУК Андрей Васильевич – ведущий программист Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН (Новосибирск).



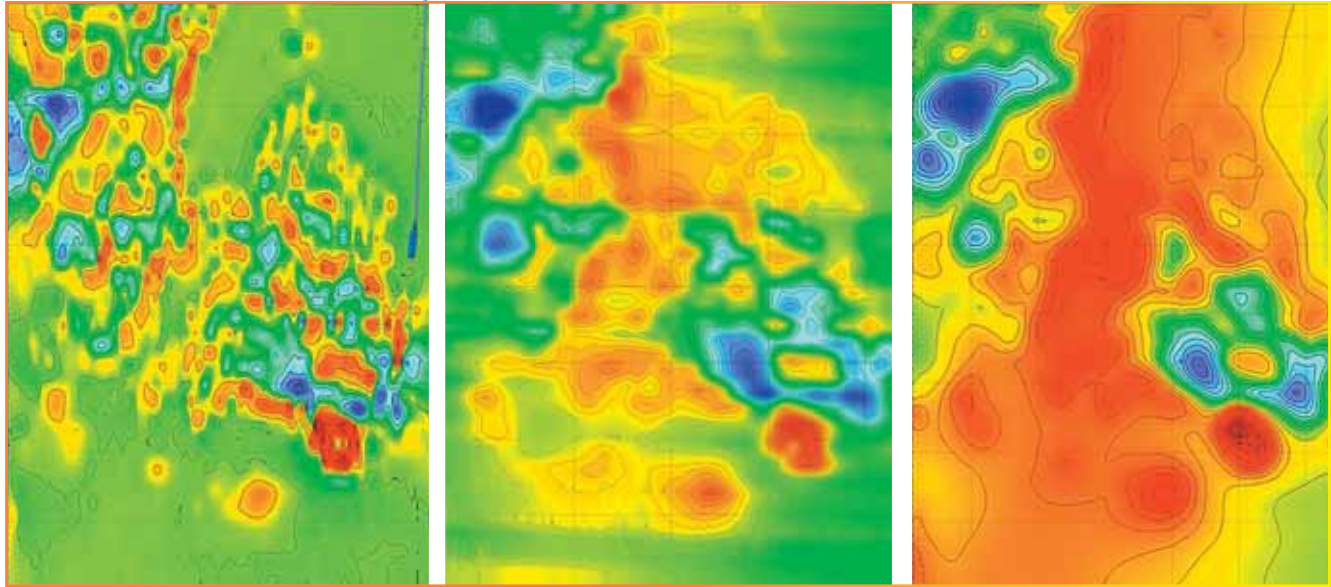
ЗЛЫГОСТЕВ Игорь Николаевич – старший научный сотрудник отдела развития научных и инновационных программ Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН (Новосибирск), главный конструктор некоторых моделей инженерных гидролокаторов.

Одним из самых эффективных на сегодняшний день геофизических методов исследований является метод магнитной разведки, основанный на измерении магнитного поля Земли. Горные породы под воздействием магнитного поля Земли создают вторичные магнитные поля. Определение таких полей и является целью магниторазведки, которая широко применяется при геологическом картировании, структурно-геологических исследованиях и, конечно, при поисках полезных ископаемых, где этот метод является одним из важнейших.

Появление дистанционных методов измерения магнитного поля с помощью летательных воздушных и космических аппаратов открыло перед геологами новые возможности, позволяя оперативно и с высокой точностью проводить магниторазведку самых труднодоступных территорий. Однако стоимость подобных работ тоже «заоблачная». Ведь чтобы провести аэромагнитную съемку нужной местности, нужно арендовать самолет или вертолет и отправиться в малообжитые районы (например, на север Якутии), где нет аэропортов. Другими словами, чтобы провести двадцатиминутное исследование, нужно затратить около 3 часов на полет туда-обратно. Конечно, такие затраты по силам лишь очень крупным компаниям.

Еще один существенный недостаток аэромагнитной съемки: слишком глобальный взгляд на территорию. И в пешеходной, и в аэросъемке используются одни и те же магнитометры, с одной и той же предельной частотой измерения: 20 раз в секунду, поэтому расстояние между точками измерения во столько же раз больше, во сколько раз скорость перемещения датчика на самолете больше скорости передвижения пешехода. Хотите получить детальную карту – летите со скоростью пешехода! С другой стороны, магнитные поля от каждого тела накладываются друг на друга, и, измеряя магнитное поле на высоте, мы получаем карту магнитного поля нечеткую, размазанную, отражающую только главные объекты. Чем выше поднимаемся, тем меньше деталей видим.

На сегодняшний день стандартный сценарий магниторазведочных работ таков: сначала делают площадную магнитную съемку с самолета, а потом на выявленные аномалии «выбрасывают» десант геологов, которые и занимаются детализацией карты. Но такой «наземный» метод связан с колоссальным напряжением самих исследователей: геологи определяют границы для детального изучения, геодезисты точно прокладывают профили, прорубая просеки в тайге, и точно измеряют расстояние между точками будущих измерений. Только



потом пройдут геофизики, останавливаясь в каждой намеченной точке, фиксируя величину магнитного поля, точное время и координаты.

И не нужно забывать, что подобные исследования зачастую ведутся далеко не в райской местности: в арктических снегах и джунглях, в тайге и горах, на болотах и в жарких пустынях. Но именно такие малоизученные и труднодоступные территории являются на сегодняшний день наиболее перспективными с точки зрения поиска ископаемых минеральных ресурсов. Поэтому такой метод всегда будет очень тяжелым, медленным и дорогостоящим.

Пилот не нужен

Объединить достоинства дистанционных и наземных методов магнитометрических исследований позволяет использование в качестве носителей геофизического оборудования беспилотных летательных аппаратов. Беспилотник может летать на разных высотах, в том числе предельно малых и с огибанием рельефа и сам определяет координаты точки измерения на основе спутниковых данных.

Казалось бы, что может быть проще? Нужно только закрепить на беспилотном носителе соответствующее оборудование, и можно проводить исследование. Но как раз с оборудованием все очень непросто. Современные квантовые и протонные магнитометры хоть и очень точные, но слишком медленные. Увеличение скорости их работы наталкивается на физические запреты. Во всем мире ведутся работы по преодолению этого препятствия, но пока значимых результатов не достигли.

В Институте геологии и геофизики СО РАН (Новосибирск) удалось создать принципиально новую

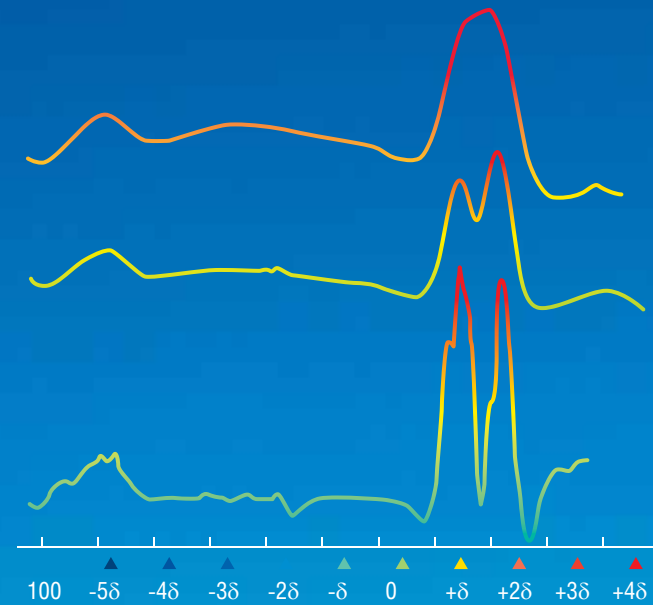
Опытные работы на полигоне алмазодобывающей компании «АЛРОСА», 2015 г.

Карты аномального магнитного поля, полученные в ходе пешеходной съемки (слева), с помощью БПЛА (в центре) и в ходе аэросъемки (справа)

систему – аэромагнитный комплекс, работающий с частотой не менее 1000 герц! То есть в 100 раз быстрее, чем самый лучший современный магнитометр. Теперь можно получать детальные магнитные карты двигаясь со скоростью в 100 раз больше пешехода, что принципиально важно для разведки таких небольших геологических тел, как кимберлитовые трубки. Детальность карт возрастает настолько, что с помощью аэромагнитки становится возможным поиск артефактов в археологии!

Достоверность и точность данных, полученных с помощью аэромагнитного комплекса, была многократно проверена. В 2016 г. испытания этой системы проводились на археологических объектах в Новосибирской области. До этого там работали одни из лучших в мире специалистов по магниторазведке в археологии – команда баварского геофизика Й. Фассбиндера из Мюнхенского университета им. Людвига-Максимилиана (Германия). Анализ геомагнитных данных, полученных с помощью беспилотника, показал, что по детальности и достоверности они не уступают «наземным» данным немецких коллег.

Вроде бы все хорошо: можно получить детальную карту интересной для исследователя площади быстро, недорого. Но карта магнитного поля – не самоцель. В конечном итоге вопрос, который интересует геологов, археологов, других исследователей – чем вызвана аномалия. Это кимберлитовая трубка, потерянная гусеница от трактора, археологический артефакт? На какой



Сравнение аномального магнитного поля, зафиксированного в ходе аэросъемки, съемки с беспилотника и наземной съемки на профиле № 9 на полигоне алмазодобывающей компании «АЛРОСА», 2015 г. На графике видно, что беспилотник и наземная съемка зафиксировали две узкие аномалии, которые на карте, полученной с самолета слились в одну



Новый класс высокочастотных малогабаритных измерителей вектора магнитного поля, не имеющих аналогов за рубежом, который используется в беспилотном аэромагнитном комплексе, создан на основе феррозондового магнитомодуляционного преобразователя. Рекордные характеристики измерителя получены благодаря применению новых методов обработки первичной информации и оригинальным схемотехническим решениям

Немецкий геофизик Йорг Фассбиндер (на фото слева) и его команда исследуют могильник Виноградный 1 (Ставропольский край, Северный Кавказ, 2012 г.). Фото из публикации Г. Парцингера, Й. Фассбиндера, А. Гасса «У подножия больших курганов. Новейшие археологические и геофизические исследования»

Этот малогабаритный датчик, разработанный с. н. с. лаборатории полевых аналитических и измерительных технологий ИНГГ СО РАН И. Н. Злыгостевым, сегодня позволяет сибирским геологам получать максимально подробные магнитные карты



глубине объект? Каковы его магнитные свойства? Даже самая детальная наземная съемка не может ответить на этот вопрос: надо сделать предположение. Аномалия на поверхности может быть вызвана телом с высокой намагниченностью на большой глубине или с малой – на небольшой. Тут возможности для интерпретации полученных таким тяжелым трудом данных слабо ограничены. А если мы проведем съемку на нескольких уровнях и вспомним, что сила магнитного поля зависит от расстояния? Измерив силу поля от высоты полета, можно сделать предположение и о глубине расположения объекта, вызывающего аномалию и о глубине его залегания.

Беспилотные летательные аппараты открывают перед геологами широкие перспективы в принципиально новом направлении исследований – геомагнитной томографии. Благодаря возможности делать магнитную съемку одного и того же участка на разных уровнях от земной поверхности, можно детально изучить магнитное поле в верхнем полупространстве (т.е. над поверхностью) и использовать эти данные для реконструкции магнитного поля в нижнем полупространстве. В результате возможно представить картину магнитного поля, включая аномальные участки, в полном «объеме». Такой подход позволяет резко повысить точность интерпретации геомагнитных данных.

Переход от магнитометрии к геомагнитной томографии можно сравнить с переходом медицинской диагностики от флюорографии к томографии. Но если в медицине такое продвижение вперед было сопряжено с колоссальными финансовыми затратами, то в нашем случае все будет наоборот. Благодаря использованию беспилотников стоимость магнитной карты (т.е. объемного описания магнитного поля) снизится в разы по сравнению с наземной съемкой.

Несмотря на кажущуюся простоту этого метода, при его разработке потребовалось решить много проблем, от технических до «математических»: ведь чтобы получить объемное изображение, нужно проанализировать огромные массивы данных и сделать непростые расчеты. А ведь еще магнитное поле – векторное, поэтому его сила будет зависеть не только от свойств самого материала, его размеров, расстояния до него, но и от того как оно повернуто! Технические проблемы связаны с тем, что магнитное поле все время меняется в зависимости от скорости солнечного ветра и вращения Земли, поэтому потребовалось обеспечить очень

Российской алмазодобывающей компании АЛРОСА потребуются не менее 80-ти лет, чтобы с помощью традиционных методов наземной геомагнитной разведки изучить даже те магнитные аномалии, которые уже выявлены аэромагнитной съемкой

В ПОМОЩЬ АРХЕОЛОГАМ

Методы магниторазведки сегодня активно используются в археологии. Для археологов это особенно важно, так как им в любом случае приходится проделывать ручную колоссальную работу, снимая целые пласты почвы и копая огромные ямы, и автоматизировать эту деятельность невозможно. Главное, чтобы эта работа была не напрасна. С помощью магниторазведки, и особенно с помощью беспилотных летательных аппаратов, можно указать максимально точное место «подозрительной» магнитной аномалии, что поможет значительно снизить трудозатраты на раскопку.

Риск ошибиться при наземной съемке в археологии, действительно, очень высок, так как археологические магнитные аномалии обычно небольшие, и попасть на «пик» этой аномалии, фиксируя магнитное поле каждые 4–5 м, можно лишь при большом везении. Аэромагнитный комплекс фиксирует магнитное поле через каждый сантиметр, поэтому и карты можно получить более детальные

точную синхронизацию измерений внешнего и «местного» магнитных полей.

Кроме того, система оказалась настолько чувствительной, что улавливает «шумы» от всех электрических проводов, расположенных в радиусе нескольких километров от точки измерения. Чтобы «очистить» магнитную съемку от помех, пришлось создавать оригинальное программное обеспечение.

Есть сложности и с самим оборудованием: чтобы система работала бесперебойно, все ее части вплоть до последнего винтика должны быть немагнитными, чего не так просто добиться. К тому же, так как геологам порой приходится работать за тысячи километров от базы, система должна еще быть и в прямом смысле слова неубиваемой.

Разработку новых технологий дистанционных геофизических исследований Земли и оперативного мониторинга окружающей среды на базе беспилотников легкого и сверхлегкого классов планируется продолжить в рамках прорывного проекта НГУ, что в конечном итоге позволит в сотни раз увеличить производительность и в десятки-сотни раз снизить стоимость геофизических, в том числе геологоразведочных, работ.

Литературы

Фирсов А. П., Злыгостев И. Н., Савлук А. В. и др. Применение беспилотных летательных аппаратов при геолого-геофизическом картировании // Материалы V Всероссийской научно-практической конференции "Геология и минерально-сырьевые ресурсы северо-востока России", 31 марта – 2 апреля, 2015. С. 529–533



Весной 2016 г. на базе Иркутского национального технического университета проходило совещание по испытанию новой техники и технологий в геофизике. Команды из Питера, Иркутска и Новосибирска, занимающиеся исследованиями в области магнитометрии с использованием беспилотников представляли свои результаты. Для тестирования был выбран участок 200 × 200 м, на котором с помощью квантового магнитометра была составлена карта магнитного поля масштаба 1:100. Студенты работали 2 дня. Работу смогли выполнить только новосибирцы, затратив на это 20 минут. Карта, полученная с помощью БПЛА, оказалась точнее, чем наземная съемка