

из коренного источника, что подтверждает предположение о поступлении золота в руч. Снежный из промежуточного коллектора, в качестве которого могут выступать отложения Адычанских террас II эрозионного уровня. Во-вторых, разделение гипогенного золота на две группы по пробности и однородности ее распределения указывает на то, что в промежуточный коллектор золото поступило из различных рудных формаций: группа низкопробных золотин относится к проявлениям золото-малосульфидной формации, группа высокопробных золотин относится к золото-сурьмяной формации. В-третьих, высокопробные каймы сформировались в результате одного процесса, что подтверждается близкими значениями пробности гипергенной каймы и отсутствием ее зональности. Выявленная зависимость между пробностью остаточ-

ного гипогенного золота и высокопробной гипергенной каймы с коэффициентом корреляции 0,82 указывает на процессы выщелачивания серебра при образовании кайм.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Владимирцева, О.В. О вероятном источнике аллювиальных россыпей золота руч. Куранах и руч. Снежный (Верхоянский район, Якутия) / О.В. Владимирцева / Новые идеи в науках о Земле: Материалы XIV Международной научно-практической конференции. — М.: МГРИ-РГГРУ, 2019. — Т. 2. — С. 46–50.
2. Николаева, Л.А. Генетические особенности самородного золота как критерии при поисках и оценке руд и россыпей / Л.А. Николаева. — М.: Недра, 1978.

© Владимирцева О.В., Набелкин О.А., Субботин Н.А., 2019

Владимирцева Ольга Владимировна // olga_9_4@mail.ru
Набелкин Олег Анатольевич // mulderfw@yandex.com
Субботин Николай Алексеевич // subbotin26@mail.ru

ГЕОФИЗИКА

УДК: 550.837.211

Тарасов А.В.^{1,2}, Ихина Э.Р.¹, Каюков А.Е.³, Гоглев Д.А.⁴
(1 — ООО «НПП ВИРГ-Рудгеофизика», 2 — Санкт-Петербургский государственный университет ИНЗ, 3 — ООО «Байкал Недра Гео», 4 — ООО «ГЕОСКАН»)

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ НИЗКОВЫСОТНОЙ АЭРОМАГНИТНОЙ СЪЕМКИ С КОМПЛЕКСОМ ГЕОСКАН-401-ГЕОФИЗИКА НА СЫННЫРСКОМ УЛЬТРАКАЛИЕВОМ МАССИВЕ

В статье представлены результаты аэромагнитной съемки, выполненной с помощью беспилотного аэромагнитного комплекса ГЕОСКАН-401-Геофизика. Съемка была проведена в пределах Сыннырского ультракалиевого массива в Северо-Байкальском районе Республики Бурятия. В результате обработки аэромагнитных данных была получена новая геолого-структурная информация, позволившая скорректировать программу горно-буровых работ. **Ключевые слова:** аэромагнитная съемка, беспилотные летательные аппараты (БПЛА), Сыннырский массив, сынныриты, шонкиниты.

Tarasov A.V.^{1,2}, Ihina E.R.¹, Kayukov A.E.³, Goglev D.A.⁴
(1 — VIRG-Rudgeofizika, 2 — St. Petersburg State University, 3 — Baikal Nedra Geo, 4 — GEOSCAN)

EXPERIENCE OF USING LOW-ALTITUDE AEROMAGNETIC SURVEY WITH THE COMPLEX GEOSCAN-401-GEOPHYSICS AT THE SYNRYR ULTRAPOTASSIC IGNEOUS MASSIF

The article presents the results of aeromagnetic survey carried out at the Synryr ultrapotassic igneous massif (North-Baikal region of Russia). GEOSCAN-401-Geophysics unmanned

aeromagnetic complex was used to measure magnetic field at low altitude above relief surface. A new geologic-structural information was obtained as a result of the aeromagnetic data processing. It allowed to correct drilling program on the prospecting area. **Keywords:** aeromagnetic survey, unmanned aerial systems, Synryr massif, ultrapotassic rocks, shonkinite.

Введение

Поиски полезных ископаемых геофизическими методами требуют постоянного совершенствования и внедрения инноваций для повышения экономической эффективности с сохранением высокой производительности. В последнее десятилетие значительно вырос интерес к применению беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для решения геологических задач, благодаря возможности установки на них различного оборудования: от фото- и видеоаппаратуры до современных геофизических приборов, таких как квантовые магнитометры.

Магниторазведка, как ни один другой геофизический метод, подходит для использования БПЛА. Современные магнитометры относительно легкие и малопотребляющие электроэнергию геофизические приборы, которые обеспечивают высокую точность измерения модуля вектора магнитного поля. Это позволяет устанавливать магнитометры на относительно легкие БПЛА.

Магниторазведка на базе БПЛА особенно результативна в труднодоступных регионах, характеризующихся резкими перепадами высот, залесенностью, заболоченностью и прочими осложняющими пешеходную съемку условиями.

Преимущества низковысотной аэромагнитной разведки перед пешеходной съемкой очевидны. Производи-

тельность магниторазведки с БПЛА в среднем составляет 160 км в день, тогда как производительность пешеходной съемки при использовании одного магнитометра от 6 до 15 км в день, в зависимости от условий проходимости. К тому же на залесенных участках перед проведением пешеходной съемки требуется предварительная разбивка сети профилей, что также повышает стоимость наземной съемки.

Проведение магнитной съемки с помощью БПЛА значительно ускоряет и автоматизирует процесс получения данных и сводит к минимуму человеческий фактор ошибки. Кроме того, транспортировку легкого и компактного беспилотного аэромагнитного комплекса легко осуществить в любую точку мира.

За последние годы в России и в других странах почти одновременно появились различные варианты аэромагнитных комплексов на базе БПЛА [5, 8, 11, 16]. Одним из таких комплексов является ГЕОСКАН-401-Геофизика (www.geoscan.aero/ru/products/geoscan401/geophysics).

Большая часть публикаций, посвященных магниторазведке с БПЛА, содержит лишь измеренные магнитные поля и результаты сравнения измеренного поля с БПЛА с полями, полученными при наземной съемке или «классической» аэросъемке с пилотируемого летательного аппарата (самолета или вертолета). Практически отсутствуют публикации, где был бы приведен пример решения геологической задачи с помощью

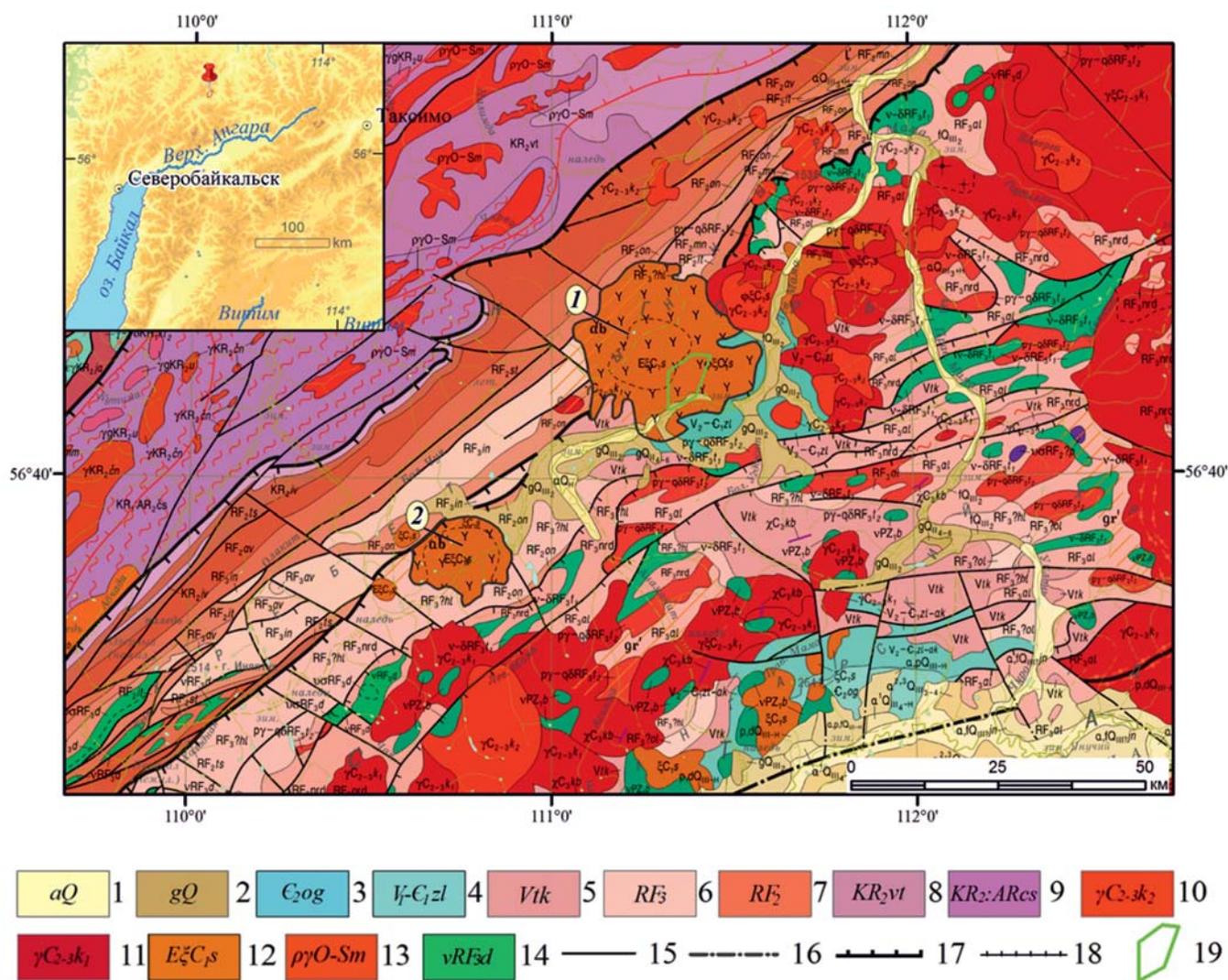


Рис. 1. Положение Сыннырского ультракальциевого массива. (фрагмент геологической карты, О-49). Стратиграфические подразделения: 1 — аллювиальные отложения; 2 — ледниковые отложения; 3 — огненная свита. Карбонатно-глинистые породы; 4 — золотовская и аиктинская свиты нерасчлененные. Карбонатные породы; 5 — туколамийская свита. Терригенно-карбонатные породы; 6 — терригенно-карбонатные породы Авгольской (av), Олдакитской (ol), Холоднинской (hl) свит, карбонатно-силикатные метаморфические породы Нюрюндуканской толщи (nrd); 7 — вулканогенно-осадочные, терригенно-карбонатные породы и кристаллические сланцы Ондокской (on), Стойбищной (st), Авкитской (av), Тыйской (ts) свит; 8 — Витимская толща. Парагнейсы; 9 — Чуйская толща. Ортогнейсы и кристаллические сланцы. Интрузивные образования: 10 — Конкудеро-мамаканский комплекс граносиенит-гранитовый. Вторая фаза; 11 — Конкудеро-мамаканский комплекс граносиенит-гранитовый. Первая фаза; 12 — Сыннырский комплекс щелочных и нефелиновых сиенитов; 13 — Мамский комплекс пегматоидных гранитов и пегматитов; 14 — Довыренский комплекс перидотит-габбровый, расслоенный. Разломы: 15 — достоверные; 16 — скрытые под более молодыми образованиями; 17 — надвиги достоверные; 18 — надвиги предполагаемые; 19 — контур участка «Калюнный»

аэромагнитной съемки с БПЛА. Поэтому мы решили представить такой пример в этой работе.

В октябре 2018 г. по заказу ООО «Байкал Недра Гео» силами ООО «НПП ВИРГ-Рудгеофизика» при участии специалистов ООО «ГЕОСКАН» была проведена беспилотная крупномасштабная (1:4 000) магнитная съемка на участке «Калюмный» (Республика Бурятия, Северо-Байкальский район) (рис. 1). Участок находится в пределах крупного Сыннырского ультракалиевого интрузивного массива (рис. 1, 2). Необходимость проведения магниторазведки на участке обусловлена тем, что при проведении оценочных работ на калиевое сырье специалисты ООО «Байкал Недра Гео» столкнулись с неожиданно сложным геологическим строением. В ходе этих работ было установлено, что магматические породы Сыннырского массива имеют контрастные магнитные свойства. Таким образом, проведение магнитной съемки позволило бы разобраться с геологическим строением участка и составить рациональную программу оценочных работ.

Участок «Калюмный» характеризуется сильнопересеченным рельефом с абсолютными высотами 700–1600 м и перепадами высот до 800 м. Такие ландшафтные условия практически не позволяют провести наземную магнитную съемку в осенне-зимний период, когда уже все склоны покрыты снегом. Именно поэтому было принято решение о проведении магнитной съемки с БПЛА с комплексом ГЕОСКАН-410-Геофизика.

Геологическое строение Сыннырского массива и его рудоносность

Сыннырский массив и ряд родственных ему ультращелочных массивов находятся в западном секторе Байкало-Становой подвижной области, сложенной в основном байкалидами. Байкало-Становая область является сквозной трансконтинентальной структурой, контролирующей размещение щелочного магматизма на протяжении всего фанерозоя.

Массив образовался на раннем палеозойском и наиболее активном этапе калиевого плутономагматизма. Изотопные датировки пород массива дают разброс по возрасту от 350 до 230 млн лет [7].

Сыннырский массив является наиболее крупным (площадь 585 км²) из ультращелочных массивов в западном секторе Байкало-Становой зоны (рис. 1). В непосредственной близости от Сыннырского массива находится Якшинская интрузия, имеющая схожий состав и находящаяся в той же структурно-тектонической обстановке. Массив слагает наиболее высокую часть Сыннырского хребта и расположен на левом борту р. Левая Мама.

В структурном отношении Сыннырский массив (рис. 2) образован двумя самостоятельными интрузивными телами: лакколитом высококалиевых нефелиновых сиенитов и диапировым штоком трахитоидных щелочных и нефелинсодержащих сиенитов-пуласки-тов (площадью около 90 км²), образующими центральную часть массива [7].

Рама массива сложена рифейскими и верхнерифей-кембрийскими породами, представленными эффузивными, терригенными и карбонатными породами. С северо-востока к массиву примыкает массив щелочных гранитов витимканского комплекса, который имеет также палеозойский возраст.

Сыннырский массив относится к числу многофазных массивов-плутонов центрального типа. В его формировании участвуют интрузивные и связанные с ними гидротермально-метасоматические и жильные образования. Поэтому внутренние структуры лакколита и штока концентрические, конфокальные.

Первая фаза внедрения представлена лакколитовой интрузией расслоенных лейкократовых нефелиновых псевдолейцитовых и кальсилитовых сиенитов. Магматическая стадия завершается метасоматозом, приведшим к возникновению обширных площадей и участков светлослюдистых щелочно-полевошпатовых пород. Возможно, с этим процессом связано образование и нефелин-пироксен-биотит-магнетит-апатитовых руд.

Вторая магматическая фаза связана с внедрением в центр массива штока слабодифференцированных трахитоидных щелочных и нефелинсодержащих сиенитов. На завершающем этапе внедрились дайки жильных сиенитов, аплитов и щелочно-основных лампрофиров.

Сыннырский массив вмещает в себя крупное калийно-глиноземное месторождение с одноименным названием. Калийные (кальсилитовые) руды Сыннырского массива являются уникальными: бесхлорными — поэтому представляют собой высокий экономический интерес. На всей площади массива распротранены светло-слюдисто-микроклиновые метасоматиты, образующие крупные месторождения вторичных пород-руд, которые могут иметь практическое значение как самостоятельный минерально-химический и генетический тип калийно-глиноземного сырья.

Участок «Калюмный» является наиболее перспективным рудным объектом в пределах массива. Участок охватывает внутреннюю часть массива, близкую к границе центрального штока (рис. 2).

В результате поисково-оценочных работ, выполненных еще в начале 1980-х годов, были выделены три рудные зоны с высоким содержанием калия. Предполагалось, что рудные зоны имеют простое строение и представляют собой вытянутые в северо-восточном направлении вертикально падающие тела мощностью до сотен метров.

Однако в ходе работ 2018 г. с применением значительного объема горных работ (бульдозерных канав) выяснилось, что геологическое строение участка гораздо сложнее. Магматические породы в пределах ранее выделенных рудных зон имеют невыдержанный петрографический состав. Среди высококалиевых нефелин-кальсилитовых псевдолейцитовых сиенитов-сынныритов встречаются существенно меланократовые разности сиенитов-шонкинитов с пониженным содержанием калия. Тела шонкинитов образуют довольно сложную структуру в виде серии линзовидных

или дайкоподобных тел. При этом было не совсем понятно, какое пространственное положение эти тела занимают в пределах рудных зон. В ходе геологических маршрутов и документирования бульдозерных канав это выяснить не удалось.

Также в ходе работ предшественников было установлено, что породы Сыннырского массива имеют контрастные магнитные свойства. По данным аэромагнитной съемки 1:25 000 масштаба (1966 г.) магнитное поле Сыннырского массива резко дифференцированное, с различно ориентированными локальными аномалиями и выраженной тенденцией увеличения общей намагниченности от периферии к центру. Пуласкитовое ядро (центральный шток) массива выделяется повышенными значениями магнитного поля — 500–700 нТл с локальными аномалиями до 1000–1500 нТл. Магнитное поле над фойидовыми сиенитами более дифференцировано во внешней части кольцевой структуры: в восточной зоне спокойное, с повы-

шенными значениями, в западной — мозаичное. Предполагается, что под кольцевой структурой немагнитных и слабомагнитных пород залегают высококальциевые щелочно-мафитовые и магнетит-апатитовые породы и руды, которые и являются источником интенсивных магнитных аномалий.

В ходе наземной магнитной съемки в начале 1980-х годов на участке поисковых работ были выявлены интенсивные (до 1500 нТл) положительные аномалии над телами шонкинитов. Тогда была выявлена сложная структура магнитных аномалий, которая обусловлена сложным геологическим строением участка. Однако плотность наземных магнитометрических наблюдений (профили располагались с интервалом 100–200 м и шагом наблюдения по профилю 20 м) была недостаточной для однозначной увязки магнитных аномалий между профилями.

Таким образом, в ходе предшествующих магнитных съемок было установлено, что аномальное магнитное поле отражает и петрографический состав пород, и структурную позицию отдельных петрографических разностей внутри ультращелочного комплекса. Наиболее магнитными породами являются меланократовые разности сиенитов, в которых кроме темноцветных минералов содержатся акцессорный титаномагнетит. По данным лабораторного определения магнитных свойств образцов было установлено, что средняя магнитная восприимчивость пород (χ) около 0.01 ед. СИ, а отдельные образцы шонкинитов имеют $\chi > 0.1$ ед. СИ. Образцы лейкократовых разновидностей сиенитов имеют значительно меньшую χ — около 10^{-4} ед. СИ.

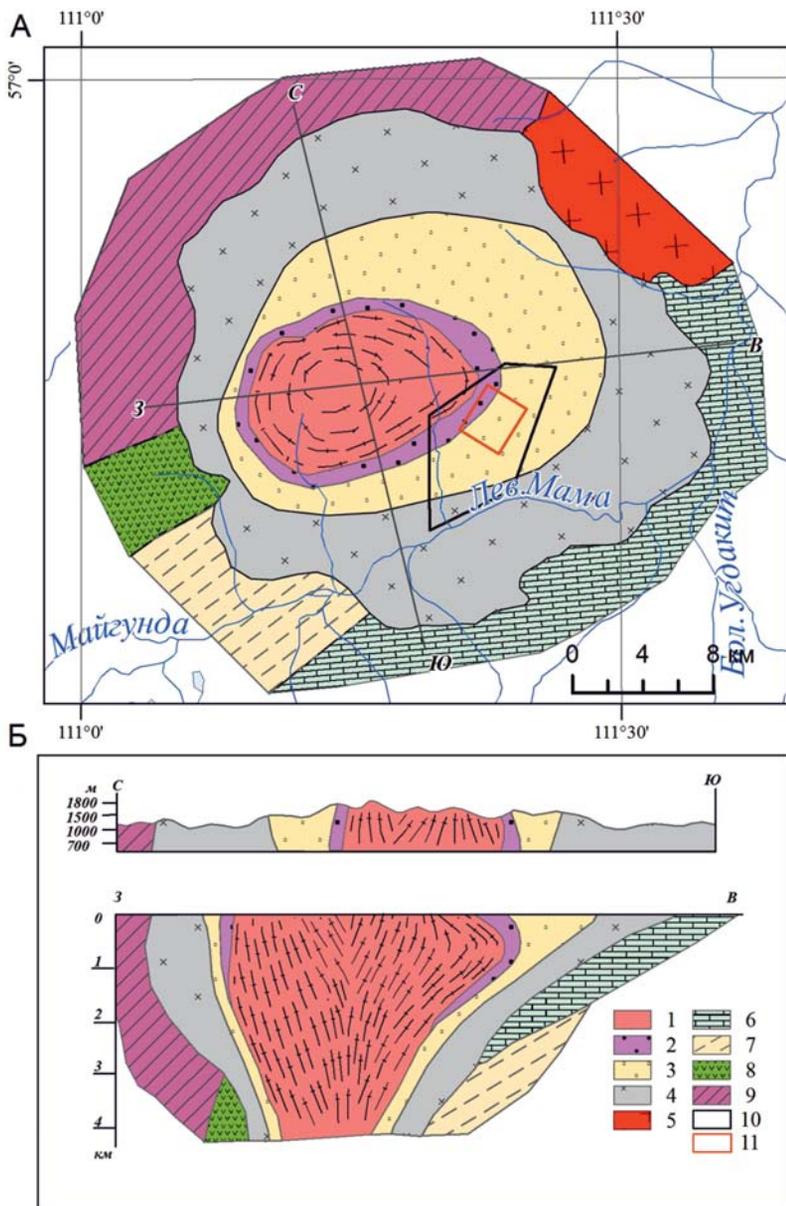


Рис. 2. Геологическое строение Сыннырского ультракальциевого массива (по материалам В.П. Костюка и др., 1990). А — схематическая геологическая карта массива; Б — геологические разрезы через массив. Условные обозначения: 1 — диапировый шток щелочных и нефелинсодержащих сиенитов типа пуласкитов, вторая интрузивная фаза; 2–4 — лакколито-подобная интрузия нефелиновых и кальсилитовых сиенитов первой фазы: 2 — полосчато-гнейсовидные и трахитоидные преимущественно кальсилит-калишпатовые псевдолейцитовые сиениты-сынныриты и светло-слюдистые калишпатовые метасоматиты внутренней зоны, 3 — псевдолейцитовые и пойкилитово-зернистые нефелиновые сиениты промежуточной или переходной зоны, 4 — нефелиновые сиениты, фойяиты, иногда псевдолейцитовые и щелочные сиениты внешней зоны; 5 — гранитоиды витимканского комплекса позднего палеозоя (Шаманский массив); 6 — известняки кооктинской свиты среднего кембрия; 7 — песчаники, гравелиты, алевролиты и конгломераты холоднинской свиты раннего кембрия; 8–9 — эффузивы основного (8) и среднего (9) состава сыннырской свиты протерозоя; 10 — контур лицензионной площади (уч. «Калюмный»); 11 — площадь аэромагнитной съемки

Технические характеристики магнитометра Geoscan QM-Rb-1

Чувствительность	10 нТл/√Гц
Диапазон измерения	20000 нТл–100000 нТл
Общая девиационная ошибка	< 0.3 нТл
Полоса пропускания петли обратной связи	30 Гц
Диапазон допустимых углов датчика	± 45°
Диапазон рабочих температур	от –20 до +40 °С

Высокая контрастность магнитных свойств пород является основанием для применения детальной магниторазведки для картирования их петрографического состава. Учитывая горный ландшафт и сложное геологическое строение участка для решения задач геолого-структурного картирования в 2018 г. было решено использовать детальную аэромагнитную съемку с БПЛА.

Методика съемки и первичная обработка

Аэромагнитная съемка была проведена в центральной части лицензионного участка, где в течение летнего сезона 2018 г. велись горные работы. Общая площадь аэромагнитной съемки составила 8 км². Аэромагнитная съемка выполнялась с использованием аэрокомплекса ГЕОСКАН-401-Геофизика, состоящего из беспилотного летательного аппарата (БПЛА), в данном случае это квадрокоптер ГЕОСКАН-401, и квантового рубидиевого аэромагнитометра Geoscan QM-Rb-1, который смонтирован на выносной гондole с длиной троса 20 м. Данная система позволяет выполнять аэромагнитную съемку на низких высотах (30 м от поверхности) с детальным огибанием рельефа. Удаленное от БПЛА расположение магнитометра гарантирует отсутствие влияния БПЛА на магнитные измерения. Технические характеристики магнитометра представлены в таблице.

Магнитометр Geoscan QM-Rb-1 (s/n 0130.0004.17), использованный для проведения съемки, прошел метрологическую поверку в феврале 2018 г. Поверка проводилась в отраслевом научно-методическом центре по стандартизации, метрологическому обеспечению и сертификации на базе АО «Геологоразведка» (Санкт-Петербург). По результатам поверки был получен соответствующий сертификат (№ 9 от 20.02.2018) исследований метрологических характеристик.

Гондola с магнитометром оснащена независимым от квадрокоптера GNSS приемником, непрерывно фиксирующим пространственное положение датчика магнитометра. Определение фактических координат БПЛА и магнитометра производилось с

использованием дифференциального режима RTK, базовая станция при этом располагалась в месте взлета и посадки. Частота измерения модуля вектора магнитной индукции (|T|) составила 1000 Гц при средней скорости полета квадрокоптера 10 м/с. Запись величины |T|, времени регистрации и координат магнитного датчика осуществлялась на флеш-память, установленную в гондole с магнитометром.

Полеты выполнялись по проектной сети вдоль маршрутов, ориентированных вкрест предполагаемого простираения геологических структур (рис. 3) по азимуту 312°. Для контроля качества съемки и увязки маршрутов были пройдены опорные и секущие маршруты. Рядовые маршруты располагались через 40 м,

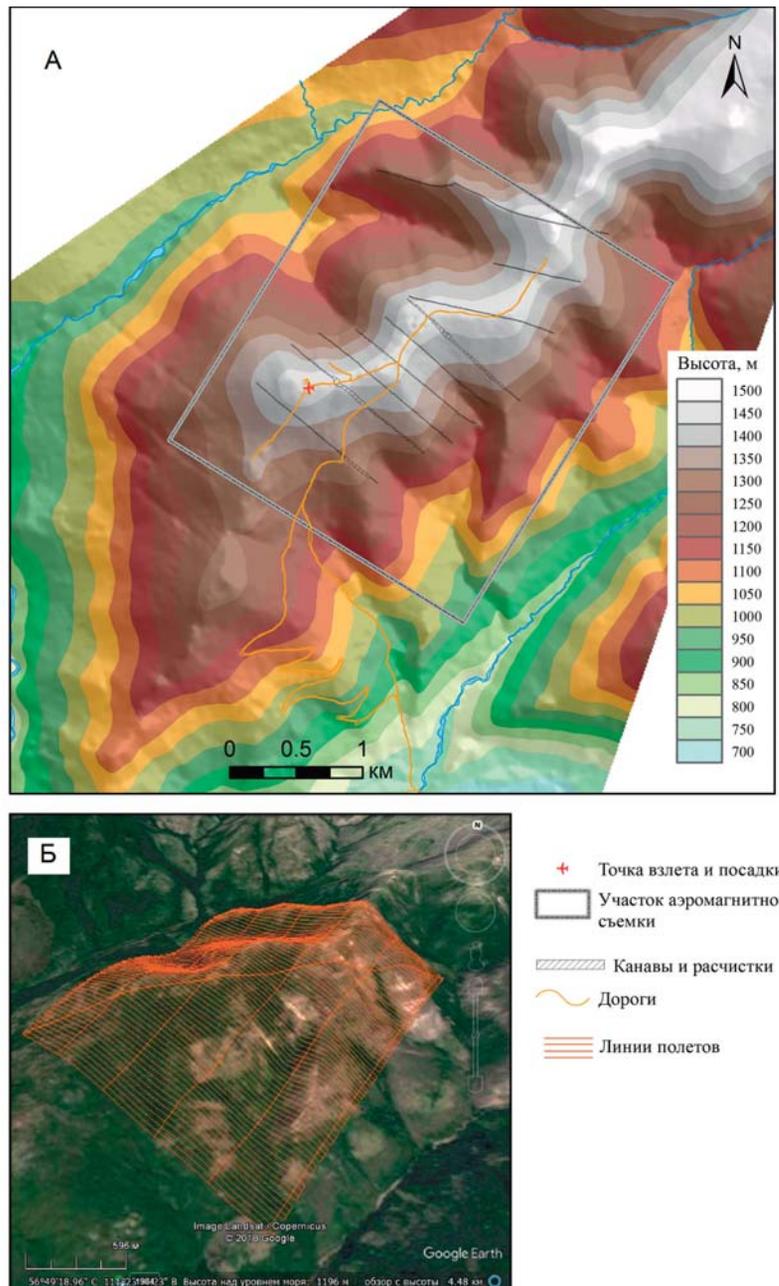


Рис. 3. Ландшафтные условия проведения аэромагнитной съемки. А — цифровая модель рельефа по данным фотограмметрии; Б — проектные линии полетов на ландшафтной модели Google Earth (вид с юга)

а опорные — через 500 м. Общая длина полетных маршрутов 225 км.

Для расчета высоты полета по маршрутам была использована фотограмметрическая цифровая модель рельефа, полученная ранее при выполнении топогеодезических работ. Надо отметить, что в пределах участка съемки отсутствуют деревья, кроме низкорослого кедрового стланика на склонах, поэтому фотограмметрия позволяет в данных условиях получить высоты рельефа с довольно высокой точностью.

Высота полета БПЛА была задана 50 м от поверхности рельефа. Учитывая длину троса и скорость движения БПЛА, высота полета измерительной гондолы составила около 30,5 м. Взлет и посадка БПЛА выполнялись непосредственно на участке съемки для сокращения времени полета. Точка взлета и посадки не менялась в течении всей съемки.

Для выполнения съемки на всем участке потребовался 21 вылет с учетом повторных залетов и съемки по опорным и секущим маршрутам. Средняя продолжительность полета составила около 30 мин с учетом полета. Полеты выполнялись в течение двух рабочих дней 16 и 17 октября. При выполнении съемки была относительно благоприятная для середины октября погода со слабым ветром и температурой около 0°.

Одновременно с выполнением съемки проводились измерения вариаций геомагнитного поля с помощью отечественного протонного оверхаузерского магнитометра MMPOS-1 с частотой измерений магнитного поля 3 сек.

Магнитовариационная станция (МВС) была установлена вблизи полевого лагеря в 3 км от центра участка съемки (в долине р. Левая Мама). Магнитное поле в месте установки МВС спокойное. Вариации вычислялись относительно среднесуточного значения магнитного поля Земли в месте установки МВС. Максимальный суточный размах вариаций не превышал 35 нТл.

Перед началом съемки был выполнен тестовый вылет для оценки девиационной погрешности. Девиационная погрешность определялась по стандартной методике путем залета «звездочки» в области спокойного поля на встречных курсах. Величина девиации на рабочих курсах не превысила 0.5 нТл и в маршрутные данные не вводилась.

После завершения съемки был выполнен стандартный граф обработки аэромагнитных материалов:

1) введение поправки за вариации магнитного поля;

2) вычисление аномального магнитного поля (поправка за нормальное поле с учетом высоты полета) по модели IGRF;

3) оценка качества измерений (вычисление погрешности съемки и точности позиционирования);

4) увязка рядовых маршрутов по опорным маршрутам;

5) дополнительное микроуравнивание рядовых маршрутов.

Все операции по первичной обработке материалов были выполнены в программе GEOSOFT Oasis Montaj.

Оценка погрешности съемки выполнялась по повторным залетам рядовых маршрутов, а также по пересечениям опорных маршрутов с рядовыми. Итоговая погрешность съемки составила ± 3.45 нТл, что, учитывая высокоградиентный характер наблюдаемого магнитного поля на участке работ, говорит о достаточно высоком качестве выполненной съемки. Среднеквадратическое отклонение фактических линий полета от проектных линий составило ± 1.7 м. Однако на отдельных участках, в глубоких распадках, точность определения координат резко падала до ± 10 м из-за экранирующего эффекта на GNSS сигнал крутых и высоких склонов. На таких участках потребовалась дополнительная фильтрация пространственных координат для выравнивания фактических линий полетов.

В результате первичной обработки материалов съемки и интерполяции профильных наблюдений на равномерную пространственную сетку (5×5 м) была получена цифровая модель (ЦМР) аномального маг-

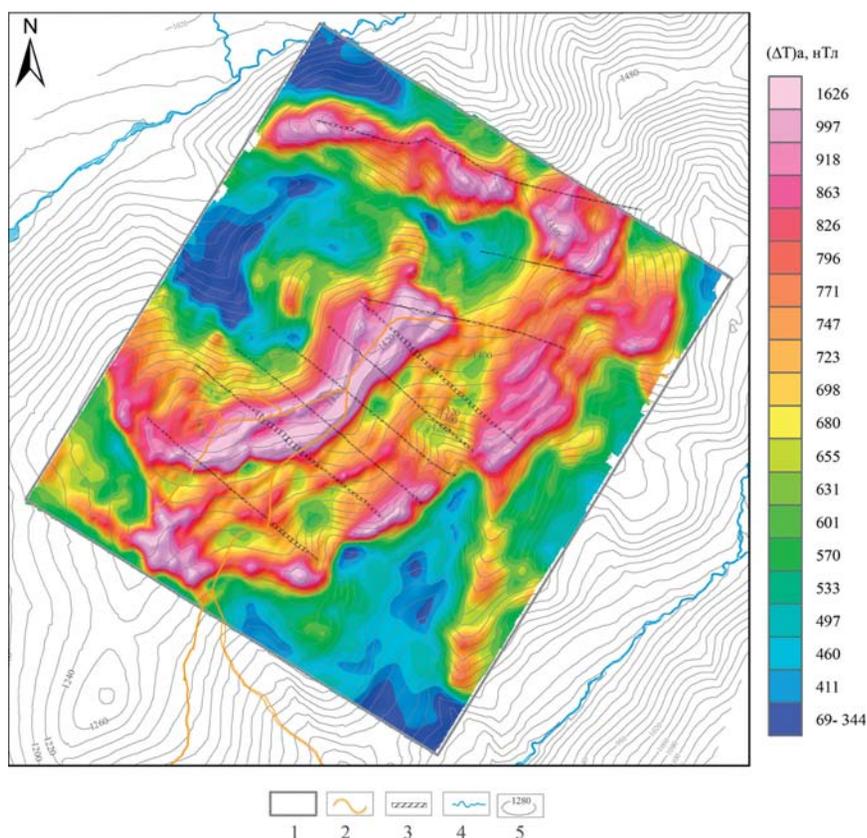


Рис. 4. Карта аномального магнитного поля: 1 — контур участка аэросъемки; 2 — технологические дороги; 3 — бульдозерные каналы; 4 — крупные ручьи; 5 — изолинии рельефа через 20 м

нитного поля (ΔT)а, которая представлена в виде карты изолиний с теневой отмывкой на рис. 3. По ЦМР (ΔT)а были также рассчитаны две трансформации: вертикальный градиент $\partial(\Delta T)_a/\partial z$ и полный градиент (или аналитический сигнал AS (от англ. *analytical signal*)), представленные на рис. 4 и 5).

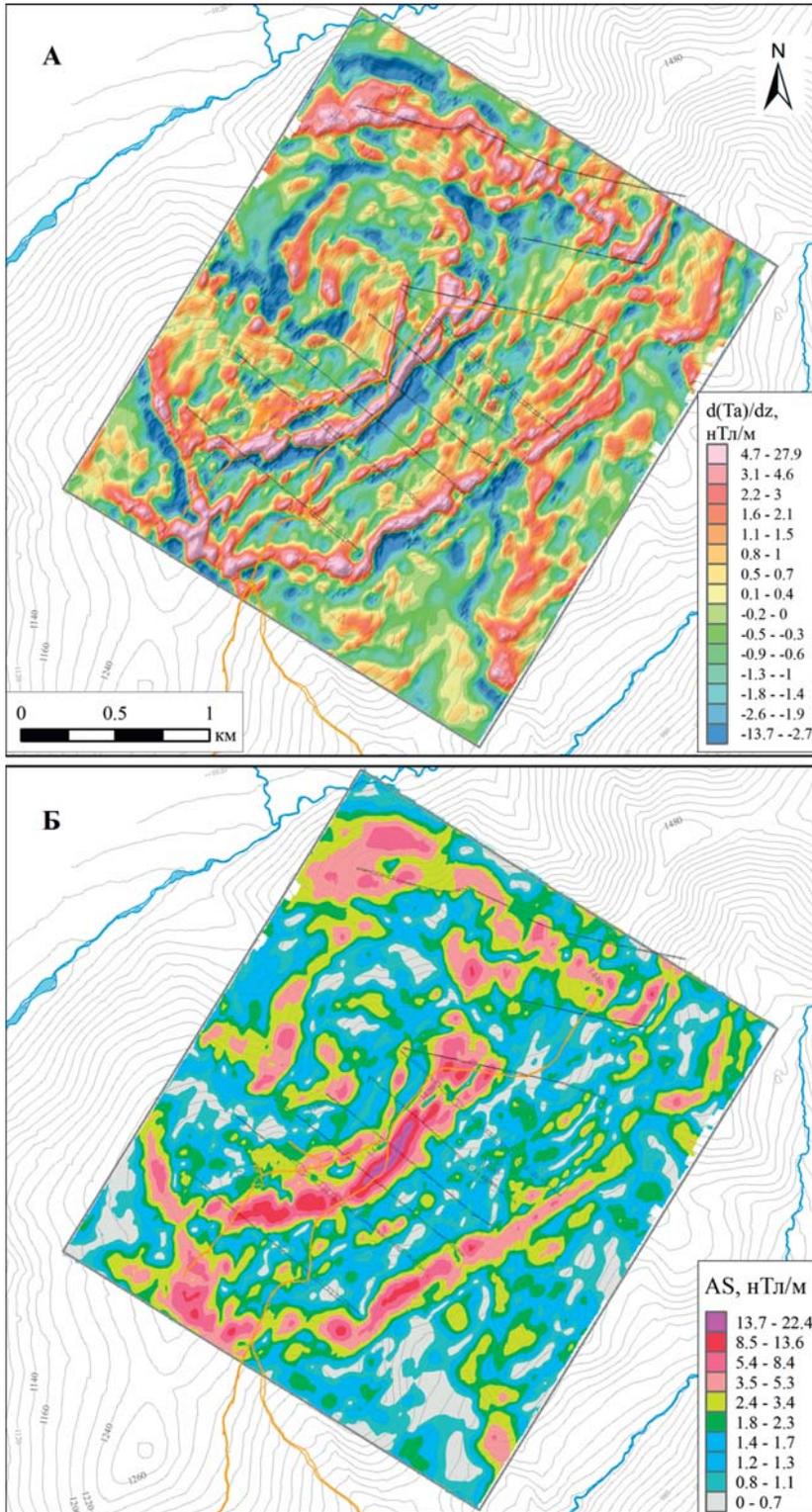


Рис. 5. Трансформации аномального магнитного поля: А — карта вертикального градиента аномального магнитного поля; Б — карта аналитического сигнала (полного градиента)

Анализ наблюдаемого аэромагнитного поля

На площади съемки выявлен высокий уровень аномального поля. Средний уровень наблюдаемого поля после учета вариаций превышает нормальное, вычисленное по модели IGRF, магнитное поле на 500 нТл, что, вероятно, обусловлено повышенной намагниченностью пород Сыннырского массива.

В центральной части площади выделяются локальные линейные аномалии северо-восточного направления, в южных и северных флангах площади некоторые аномалии разворачиваются в северо-западном и широтном направлениях. В целом структура поля (ΔT)а имеет сложный линейно-полосчатый характер. При некотором желании можно увидеть и элементы кольцевой структуры.

Более ярко структурный рисунок магнитного поля, обусловленный изменением магнитных свойств пород вблизи поверхности рельефа, проявляется на карте вертикального градиента (рис. 5 А). Структурный рисунок вертикального градиента имеет более сложный характер по сравнению с (ΔT)а. Положительные аномалии сопряжены с отрицательными, что осложняет выделение границ магнитных тел на поверхности рельефа.

Более однозначно о положении выходов магнитных пород на поверхность рельефа можно судить по полному градиенту магнитного поля (AS).

Основным преимуществом полного градиента является отсутствие зависимости формы аномалий от направления намагниченности. Форма аномалий AS зависит только от геометрических параметров магнитных геологических тел [13]. Величина AS всегда положительна, а максимум аномалии AS находится над верхней кромкой дайкообразного тела.

При внимательном сопоставлении линейных аномалий с формами рельефа можно отметить определенные закономерности, которые говорят о том, что магнитные породы образуют что-то вроде маркирующих горизонтов. Эти горизонты «срезаются» поверхностью рельефа. При этом по геометрии выходов магнитных горизонтов на поверхность рельефа с помощью геолого-структурного моделирования можно определить направление и угол падения этих горизонтов.

Повышенная намагниченность пород, слагающих рельеф, подразумевает, что часть аномалий магнитного поля обусловлена не только локальным изменением магнитных свойств пород, но и

геометрическим эффектом при выполнении съемки с обтеканием рельефа.

Аномальный эффект от магнитного рельефа известен давно [2, 3, 10]. Обычно рельефные аномалии рассматривались как помехи, существенно осложняющие геологическую интерпретацию магниторазведки. Аномалии от рельефа возникают как за счет возмущающего действия намагниченных пород, слагающих верхнюю часть геологического разреза и выходящих на поверхность, так и за счет криволинейного характера самой поверхности, на которой выполняются измерения. Перепады высот при выполнении съемки влияют на расстояния между точками наблюдений и аномалеобразующими объектами, что и влияет на интенсивность регистрируемых аномалий.

Даже при выполнении съемки над однородно намагниченным рельефом будут наблюдаться существенные по величине положительные и отрицательные аномалии. При доминировании нормальной индуцированной намагниченности пород в относительно высоких широтах северного полушария будет наблюдаться прямая корреляция между относительными высотами рельефа и (ΔT_a).

Действительно, если внимательно сопоставить структуру магнитного поля и формы рельефа на участке работ (рис. 4), можно отметить, что над положительными формами (водоразделами) наблюдается повышение, а над отрицательными формами (распадками) — понижение уровня ΔT_a .

Для иллюстрации этого эффекта мы выполнили расчет прямой задачи над однородно намагниченным рельефом участка (рис. 6). При расчете было задано одно значение магнитной восприимчивости пород ($\chi = 0.01$ ед. СИ) для всего объема пород под поверхностью рельефа. При этом направление намагниченности соответствовало направлению вектора нормального поля Земли (наклонение поля 75.5° , склонение -8.3° , интенсивность 61010 нТл). Как видно на рис. 6, наблюдается почти прямая корреляция между величиной (ΔT_a) и высотами рельефа. Хотя максимумы и минимумы магнитного поля несколько смещены относительно максимумов и минимумов рельефа из-за немного наклонного намагничивания.

Учет влияния форм магнитного рельефа в магниторазведке является более сложной задачей по сравнению с учетом гравитационного влияния масс рельефа в гравитразведке [3]. По сути, процедура полного учета влияния рельефа в магниторазведке является частью решения обратной задачи. Для полноценного удаления эффектов, связанных с формами рельефа, надо знать объемное распределение намагниченности.

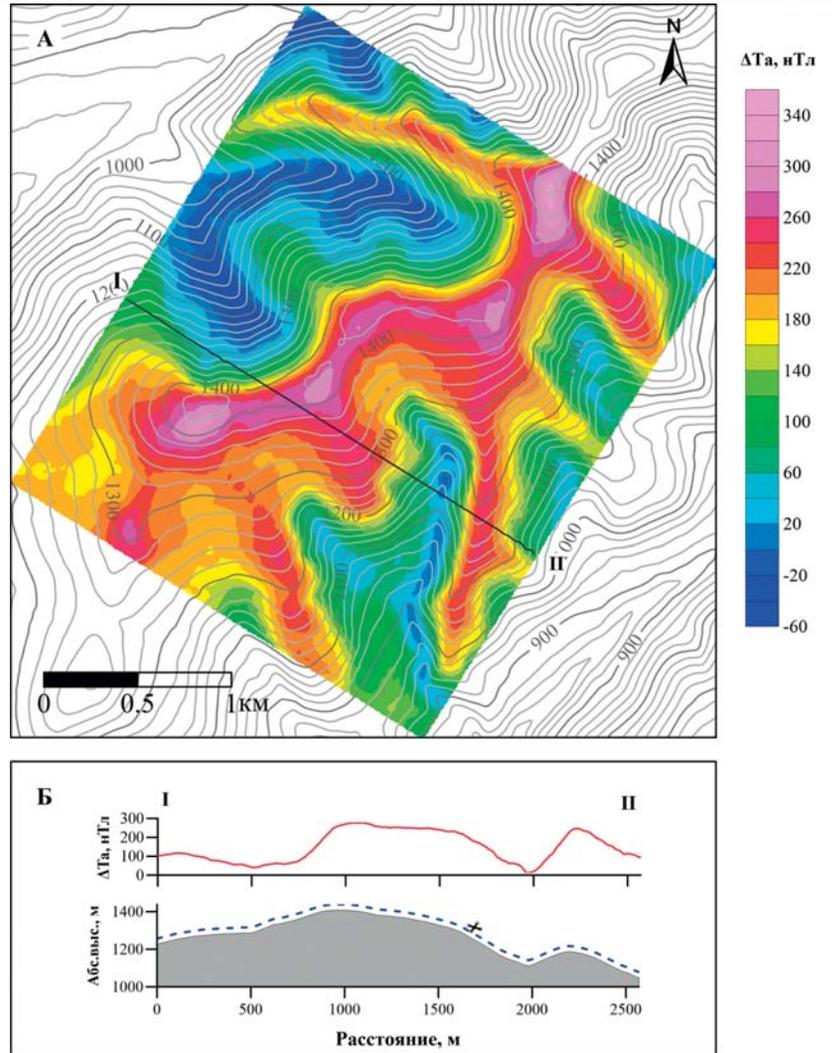


Рис. 6. Аномальное магнитное поле над однородно намагниченным рельефом: А — карта изолиний аномального магнитного поля; Б — график аномального магнитного поля вдоль профиля I-II

Решение обратной задачи магниторазведки

Хорошо известно, что обратная задача магниторазведки является крайне неоднозначной [1, 4]. Существует большое количество разных подходов к ее решению [1, 14]. Однако наиболее гибким и универсальным является метод итерационного подбора или метод регуляризации, который требует огромного количества вычислений, но позволяет учитывать априорную геологическую и геофизическую информацию. Именно такой подход реализован в программе MAG3D, позволяющей получить объемное распределение магнитной восприимчивости (χ) по наблюдениям ΔT_a , полученным в любой точке пространства. Программа MAG3D разработана в Ванкуверском университете (Канада, UBC-GIF, www.eos.ubc.ca) и протестирована на многочисленных математических моделях и полевых данных (Li, Oldenburg, 1998) [15].

В MAG3D объемная модель строится из огромного количества небольших прямоугольных блоков. В нашем случае блоки в верхней части модели имели размер $10 \times 10 \times 5$ м. Для моделирования эффектов от магнитного

рельефа блоки, находящиеся выше поверхности рельефа, были исключены из расчета. Для уменьшения количества блоков в модели и соответственно для уменьшения затрат времени на решение обратной задачи, планшет съемки был развернут на 31.5° против часовой стрелки. Полетные маршруты были развернуты вдоль оси X. После получения решения модель разворачивалась в обратном направлении. Это позволило уменьшить на 20 % количество блоков по сравнению с моделью, построенной в реальных координатах. Всего для построения модели было использовано 6 992 700 блоков. Каждому блоку первоначально было присвоено значение магнитной восприимчивости 0.001 ед. Си.

В качестве наблюдаемых были использованы данные вдоль полетных маршрутов. Для уменьшения количества входных данных была выполнена интерполяция вдоль маршрутов так, чтобы точки наблюдения следовали с шагом 10 м. Такой шаг позволяет сохранить практически все особенности аномального магнитного поля, но при этом сократить количество наблюдаемых данных в 10 раз, что, в свою очередь, также уменьшило время решения обратной задачи. Всего была использована 19601 точка наблюдения.

Построение 3D модели магнитной восприимчивости в MAG3D выполняется на основе формализованного решения обратной задачи методом регуляризации при следующих допущениях:

1. Намагниченность пород по направлению совпадает с направлением современного магнитного поля, то есть отсутствует остаточная намагниченность или она незначительна по сравнению с индукционной намагниченностью (Q -фактор < 0.1).

2. χ пород не превышает значение 0.1 ед. СИ. В этом случае можно пренебречь размагничивающим эффектом.

3. Магнитная восприимчивость всегда является положительной величиной. Данное допущение правомерно для подавляющего большинства горных пород. Для обеспечения этого условия выполняется подбор не χ , а ее логарифма ($\lg(\chi)$).

4. Пространственное распределение имеет $\lg(\chi)$ гладкий характер, то есть в соседних блоках изменения $\lg(\chi)$ должны быть минимальными.

При принятии этих допущений неоднозначность решения обратной задачи магниторазведки существенно уменьшается. Кроме того, при решении обратной задачи вводятся специальные числовые веса, уменьшающие вклад приповерхностных ячеек модели (Li, Oldenburg, 1998).

Геологическая интерпретация результатов решения обратной задачи

Результаты решения обратной задачи представлены на рис. 7 в виде распределения χ на поверхности рельефа и в виде блочной модели χ , и двух разрезов на рис. 8. Относительная точность подбора наблюдаемого магнитного поля после десяти итераций составила около 1.5 %.

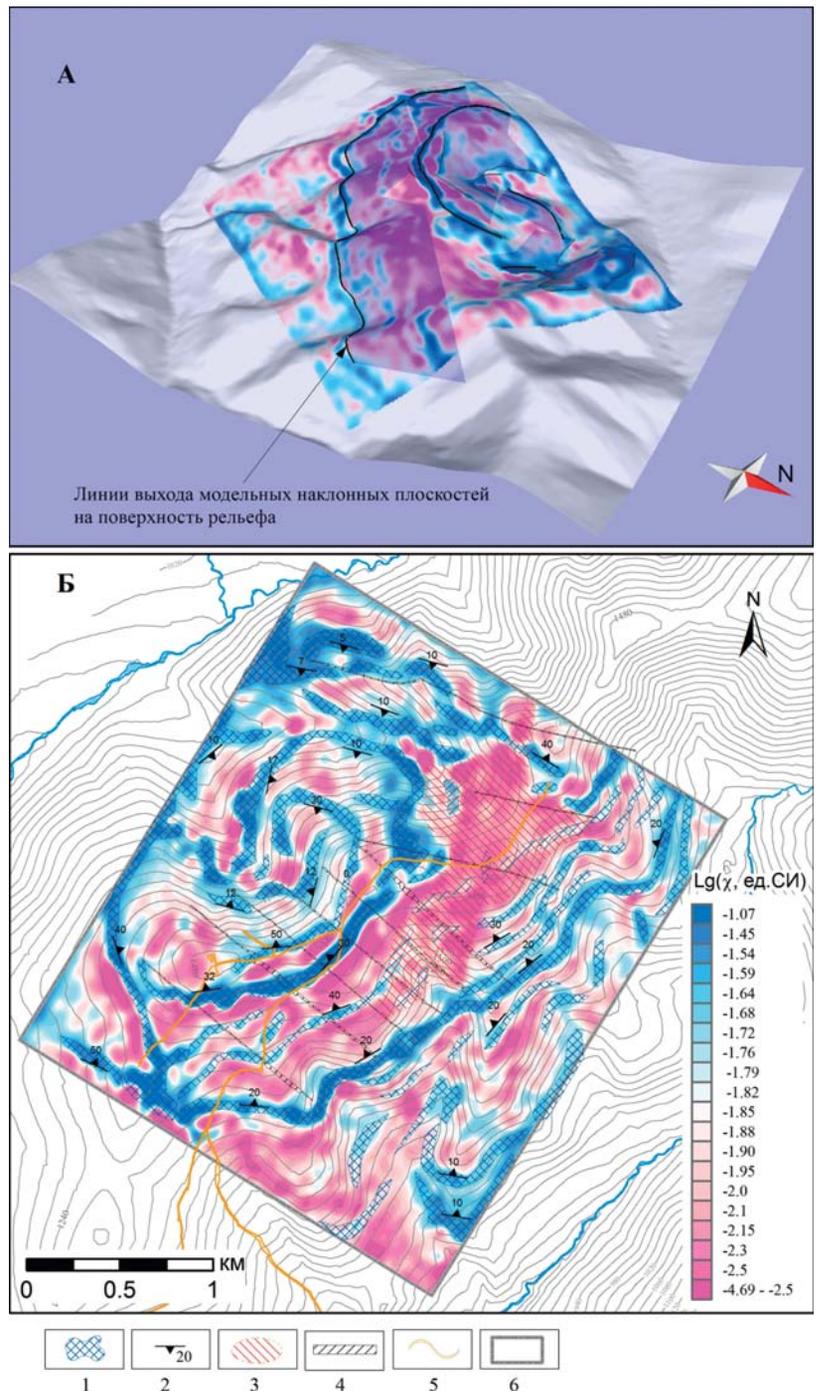


Рис. 7. Распределение магнитной восприимчивости на поверхности рельефа: А — моделирование выходов магнитных горизонтов на поверхность рельефа с помощью наклонных плоскостей; Б — структурная интерпретация. Условные обозначения: 1 — выходы субпластовых тел шонкинитов на поверхность рельефа; 2 — элементы залегания (направление падения и угол падения), установленные в результате структурного моделирования; 3 — участок резкого понижения намагниченности, вероятно, зона метасоматических изменений; 4 — бульдозерные канавы; 5 — дороги; 6 — контур аэромагнитной съемки

Карта χ на поверхности рельефа (рис. 7) лучше отражает состав пород по сравнению с картами поля (ΔT)а (рис. 4) и его трансформаций (рис. 5). На карте χ отсутствуют искажения, связанные с влиянием форм рельефа. Поэтому полосчатые структуры, образованные выходами магнитных пород на поверхность, прослеживаются четко.

Средняя логарифмическая χ в объемной модели довольно высокая ($\chi_{\text{ср}} = 20 \times 10^{-3}$ ед. СИ). На поверхности (на глубине 10 м) $\chi_{\text{ср}} = 14 \times 10^{-3}$ ед. СИ. С глубиной магнитная восприимчивость пород повышается, что позволяет выбрать высокий уровень аномального магнитного поля. Точно установить границу глубинного магнитного тела не представляется возможным из-за относительно небольшой площади съемки. Однако можно уверенно говорить о поднятии кровли глубинного магнитного блока в восточном направлении. Скорее всего, это повышение χ с глубиной обусловлено присутствием на глубине ультращелочных габброидов с высоким содержанием акцессорного титаномагнетита. Хотя нельзя исключить того, что в подошве лакколита на контакте с рамой массива могут находиться тела высокомагнитных нефелин-пироксен-биотит-магнетит-апатитовых руд [7].

Полосы высокой χ представляют собой горизонты фельдшпатоидных габброидов с биотитом и пироксеном, содержащие повышенное количество акцессорного титаномагнетита — шонкинитов. Магнитная восприимчивость таких пород достигает (0.01–0.1 ед. СИ), что эквивалентно содержанию приблизительно 1–5 % рассеянного титаномагнетита. Горизонты шонкинитов образуют полосчато-ритмичную структуру, что говорит о расслоенности Сыннырского интрузива, во всяком случае в его внешней лакколитовой части.

При этом горизонты шонкинитов могут локально распадаться на цепочки шпиров линз, что может быть обусловлено как физико-химическими условиями кристаллизации пород при образовании Сыннырского массива, так и наложенными гидротермально-метасоматическими процессами, в результате которых разрушаются главным образом темноцветные и рудные минералы. Надо отметить, что в ходе документирования полотна бульдозерных канав были выявлены многочисленные зоны трещиноватости пород, вдоль которых преимущественно развиваются микроклин-слюдястые метасоматиты с пониженной χ .

Из рис. 7, 8 хорошо видно, что выходы магнитных горизонтов шонкинитов закономерно изгибаются в зависимости от форм рельефа. По характеру взаимодействия выходов на поверхность магнитных тел с по-

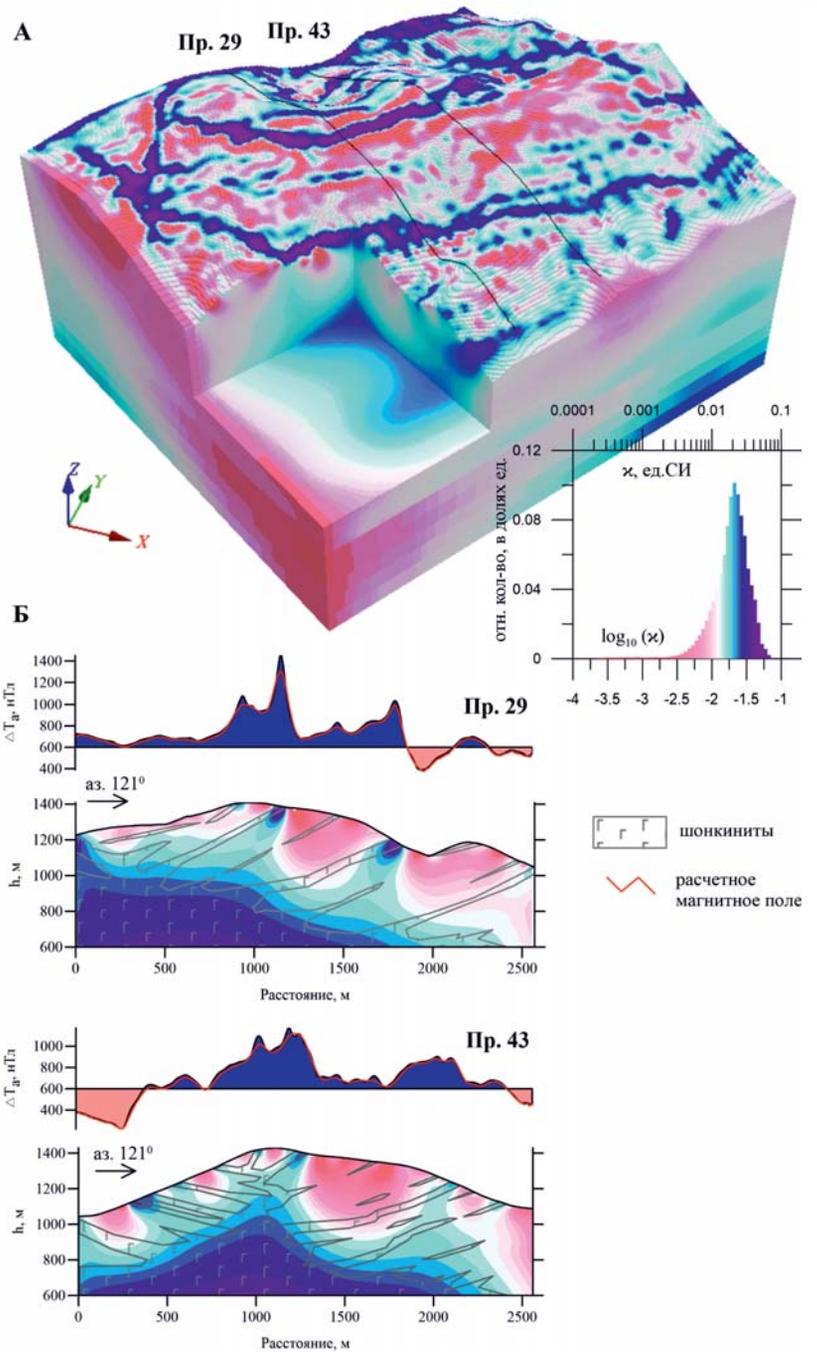


Рис. 8. 3D модель распределения магнитной восприимчивости: А — объемная модель и гистограмма магнитной восприимчивости; Б — разрезы магнитной восприимчивости по линиям профилей 29 и 43 и предполагаемое положение шонкинитов

верхностью рельефа, пользуясь общими геометрическими принципами, можно однозначно установить и направление падения, и угол падения магнитных горизонтов, что было выполнено с помощью программы структурно-геологического моделирования Move v.17 (<https://www.mve.com/>). Методика выявления элементов залегания горизонтов шонкинитов заключалась в следующем. На поверхность рельефа была спроецирована карта $\lg(\chi)$ (рис. 7А). Затем строилась плоскость, ориентация которой в пространстве определялась тремя угловыми величинами (азимут простираия, ази-

мут падения и угол падения). На следующем шаге строилась линия пересечения поверхности рельефа и этой плоскости. Итерационным подбором углов ориентации плоскости в пространстве добивались максимального совпадения линии пересечения плоскости с рельефом и осевой линии магнитного горизонта. Так как горизонты магнитных шонкинитов испытывают изменения элементов залегания, то таких плоскостей пришлось строить много. В результате подбора была получена схема элементов залегания основных шонкинитовых горизонтов (рис. 7Б).

В целом о структурном положении магнитных горизонтов можно сказать следующее:

1. На юго-восточном склоне горы, в пределах которой расположен участок съемки, магнитные породы довольно полого (20°) падают на северо-запад (в склон). На самом юго-восточном фланге участка шонкиниты залегают почти горизонтально (10°).

2. В южной части участка простираение шонкинитов меняется с северо-западного на широтное, а затем на северо-восточное. Вблизи водораздельной части угол падения увеличивается до 40° .

3. На северо-западном склоне горы и на западном фланге участка направление падения магнитных горизонтов меняется на противоположное, т.е. на юго-восток — восток.

При сравнении положения модельных плоскостей в разрезе с положением аномалий χ в разрезе (рис. 8Б) наблюдается лишь качественное совпадение направлений их падения. Из-за требования получения гладких пространственных распределений χ при решении обратной задачи пространственное разрешение в 3D модели резко падает с глубиной. Поэтому говорить что-либо о положении относительно маломощных и полого залегающих магнитных горизонтов на глубинах более 50 м практически невозможно.

Можно предположить, что шонкиниты образуют иньекционную структуру с синмагматическим внедрением силлоподобных тел, которые, возможно, имеют общий подводный канал (рис. 8Б).

Пологое залегание шонкинитовых горизонтов и линз в совокупности с резко расчлененным рельефом визуально создает псевдокольцевую структуру и соответственно такую же структуру аномального магнитного поля.

При анализе структурного рисунка как трансформаций магнитного поля, так и распределения магнитной восприимчивости на поверхности рельефа, можно заметить «размытие» структурного рисунка в центральной части участка (рис. 7Б). При этом магнитная восприимчивость пород в этом месте понижается. Это можно интерпретировать как результат гидротермально-метасоматической проработки пород.

Основные выводы и заключение

По данным магниторазведки в Сыннырском массиве выявлены элементы расслоенности. Магнитные разности сынныритов—шонкинитов образуют маломощные горизонты, которые, вероятно, собраны в ритмы. По выходам магнитных горизонтов на поверхность рельефа с помощью структурно-геологического моделирования

было установлено, что горизонты шонкинитов имеют относительно пологое залегание в пределах участка. Данный вывод заставил пересмотреть представления о геологическом строении участка и перспективы распространения высококалийных кальсилитовых руд на глубину. В итоге это позволило скорректировать программу горнобуровых работ, нацеленных на оценку запасов калийных руд. В дальнейшем предполагается провести аэромагниторазведку с БПЛА на большей площади, чтобы расширить представление о структуре Сыннырского массива в непосредственной близости от рудопроявления. Возможно, это позволит выявить критерии прогнозирования высококалийных руд по геофизическим и геолого-структурным признакам.

По нашему мнению, именно низковысотная аэромагнитная съемка с БПЛА является наиболее оптимальным вариантом магниторазведки в пределах Сыннырского массива по двум причинам. Во-первых, проведение измерений на некоторой высоте от поверхности рельефа позволяет ослабить аномальный эффект от магнитных объектов, выходящих на поверхность. При этом удастся не потерять информацию о структуре аномального магнитного поля при межпрофильной интерполяции магнитного поля. Такая потеря информации неизбежна при проведении наземной съемки в условиях сложно построенной сугубо трехмерной среды, как правило, из-за недостаточно густой сети профилей. При шаге между профилями съемки, примерно равном высоте съемки, потери структурной информации не происходит. Во-вторых, очевидное преимущество аэросъемки в производительности перед наземной съемкой позволяет быстро выполнять детальные съемки на больших площадях. Это дает возможность извлекать из результатов магниторазведки принципиально новую и более глубокую геолого-структурную информацию.

Высокое содержание калия в породах Сыннырского массива предполагает их повышенную естественную радиоактивность. Поэтому прогнозно-поисковую эффективность аэромагнитной съемки можно было бы повысить за счет проведения аэро-гамма-спектрометрии. Опытную гамма-съемку с БПЛА предполагается провести в ближайшее время.

Комплекс ГЕОСКАН 401-Геофизика показал свою высокую работоспособность и надежность в условиях резкорасчлененного рельефа со значительным перепадом высот и почти зимних условиях. Это позволяет рекомендовать его для выполнения детальных низковысотных аэромагнитных съемок почти в любых ландшафтах. Квантовый магнитометр Geoscan QM-Rb-1, размещенный в гондоле и находящийся от БПЛА на расстоянии 20 м, показывает высокую стабильность и очень слабые девиационные погрешности, даже при съемке высокоградиентного магнитного поля. Это позволяет получать цифровые модели магнитного поля высокого разрешения при минимальной внутренней увязке первичных материалов съемки.

В условиях резкорасчлененного рельефа, сложенного магнитными породами, возникает ряд методических проблем с интерпретацией данных магниторазведки,

обусловленных влиянием форм рельефа на структуру аномального магнитного поля. Искажения, обусловленные рельефом, можно эффективно удалить только при решении обратной задачи, то есть при переходе от магнитного поля к модели магнитной восприимчивости (χ). Для решения этой проблемы мы предлагаем использовать решение 3D обратной задачи на основе метода регуляризации с подбором χ сразу во всем кубе модели. При этом необходимым условием получения адекватной модели с геологической точки зрения является положительность значений (χ).

Мы надеемся, что представленные в данной статье материалы убедительно доказывают необходимость более широкого включения низковысотной магнитной съемки с БПЛА в геологоразведочный процесс.

ЛИТЕРАТУРА

1. Блох, Ю.И. Интерпретация гравитационных и магнитных аномалий: Учеб. пособие для вузов / Ю.И. Блох. — М.: РГГРУ, 2009. — 232 с.
2. Долгаль, А.С. Учет влияния рельефа при обработке магниторазведочных данных / А.С. Долгаль, Л.А. Христенко // Геофизика. — 1997. — № 1. — С. 51–57.
3. Долгаль, А.С. Компьютерные методы обработки и интерпретации данных гравиметрической и магнитной съемок в горной местности / А.С. Долгаль. — Абакан: ООО «Фирма Март», 2002. — 188 с.
4. Жданов, М.С. Теория обратных задач и регуляризации в геофизике / М.С. Жданов. — М.: Науч. Мир, 2007. — 710 с.
5. Коротков, В.В. Съемки с использованием беспилотных летательных аппаратов — новый этап развития отечественной геофизики / В.В. Коротков, Н.А. Глинский, В.Н. Кирсанов, Н.Б. Клепер, А.В. Кузнецова, В.С. Цирель // Российский геофизический журнал. — 2014. — № 53–54. — С. 122.
6. Кортунов, В.А. Методические указания к изучению курса «Интерпретация гравитационных и магнитных аномалий» / В.А. Кортунов, Е.Н. Суховеев. — Владивосток: ДВГТУ, 2004. — 47 с.
7. Костюк, В.П. Калиевый щелочной магматизм Байкало-Становой рифтогенной системы / В.П. Костюк, Л.И. Панина, А.Я. Жидков и др. — Новосибирск: Наука. Сиб. отд.-ние, 1990. — 239 с.

8. Паршин, А.В. Низковысотная беспилотная аэромагниторазведка в решении задач крупномасштабного структурно-геологического картирования и поисков рудных месторождений в сложных ландшафтных условиях / А.В. Паршин, А.Е. Будяк, А.В. Блинов, А.Н. Костерев, В.А. Морозов, А.О. Михалев, С.Н. Просекин, Ю.И. Тарасова, А.М. Спиридонов // География и природные ресурсы. — 2016. — № 6. — С. 150–155.

9. Паршин, А.В. Первые результаты методических работ по применению беспилотных аэрогеофизических технологий на стадии поисков месторождений урана / А.В. Паршин, Н.А. Гребенкин, В.А. Морозов, А.К. Ржевская, Ф.Н. Шикаленко // Разведка и охрана недр. — 2017. — № 11. — С. 59–64.

10. Методические рекомендации по средне- и крупномасштабной магнитной картографии / Под. ред. Глебовского Ю.С. — Л.: НПО «Рудгеофизика», 1990. — 84 с.

11. Barnard, J. The use of unmanned aircraft in oil, gas and mineral E+P activities / J. Barnard // SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2008. — P. 1132–1136.

12. Macharet, D.G. Autonomous Aeromagnetic Surveys Using a Fluxgate Magnetometer / D.G. Macharet, H.I.A. Perez-Imaz, P. A.F. Rezeck, G.A. Potje, L. C.C. Benyosef, A. Wiermann, G.M. Freitas, L. G.U. Garcia, M. F.M. Campos // Sensors, 2016. — № 1. — 2169 p.

13. Nabighian, M.N. The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section — Its properties and use for automated anomaly interpretation / M.N. Nabighian // Geophysics. — 1972. — V. 37. — P. 507–517.

14. Nabighian, M.N. 75th anniversary — The historical development of the magnetic method in exploration / M.N. Nabighian, V.J.S. Grauch, R.O. Hansen, T.R. LaFehr, Y. Li, J.W. Peirce, J.D. Phillips, M.E. Ruder // Geophysics. — 2005. — V. 70. — P. 33–61.

15. Spicer, B. Structure of the Rambler Rhyolite, Baie Verte Peninsula, Newfoundland: Inversions using UBC-GIF Grav3D and Mag3D / B. Spicer, B. Morris, H. Ugalde // Journal of Applied Geophysics. — 2011. — V. 75. — P. 9–18.

16. Wood, A. Experimental aeromagnetic survey using an unmanned air system / A. Wood, I. Cook, B. Doyle, M. Cunningham, C. Samson // The Leading Edge. — 2016. — N 35(3) — P. 270–273.

© Коллектив авторов, 2019

Тарасов Андрей Вячеславович // tarsaov@virg-npp.ru
Ихина Эльвина Радиковна // ihina.elvina@mail.ru
Каюков Александр Евгеньевич // ak@bngeo.com
Гоглев Дмитрий Алексеевич // d.goglev@geoscan.aero

ГИДРОГЕОЛОГИЯ И ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ

УДК: 556

Гавеиш В.Р.^{1,2}, Мараев И.А.¹, Эль-Дееб М.А.-С.², Эль-Барбари С.М.² (1 — МГРИ-РГГРУ, 2 — Национальный Исследовательский Институт Астрономии и Геофизики (NRIAG), г. Каир, Египет)

ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ АНАЛИЗЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВОДОНОСНОГО ГОРИЗОНТА ПОДЗЕМНЫХ ВОД В ОАЗИСЕ ЭЛЬ-БАХАРИЯ (ЗАПАДНАЯ ПУСТЫНЯ, ЕГИПЕТ)

Район исследования расположен в оазисе Эль-Бахария, Западная пустыня, Египет. Население этого района употребляет для питья и сельского хозяйства некачественную воду из поверхностных источников. Кроме того, эта вода загрязнена отходами, расположенного недалеко от района исследования, рудника Эль-Гедида, поэтому важно изучить качество подземных вод для

целей орошения. Из открытых скважин было взято 11 проб грунтовых вод. Многие геохимические диаграммы были построены программой AquaChem для определения типа и качества проб воды, собранных в исследуемом районе. **Ключевые слова:** подземный водоносный горизонт, гидрохимический анализ, оазис Эль-Бахария, Египет.

Gaveish V.R.^{1,2}, Maraev I.A.¹, El-Deeb M.A.-S.², El-Barbary S.M.² (1 — MGRI-RGGRU, 2 — National Research Institute of Astronomy and Geophysics (NRIAG), Cairo, Egypt)

HYDROCHEMICAL ANALYSES FOR ASSESSMENT OF GROUNDWATER AQUIFER IN EL-BAHARIYA OASIS (WESTERN DESERT, EGYPT)

The study area is located in El-Bahariya Oasis, Western desert, Egypt. It is located near from El-Gedida Mine for iron exploration, so this mine maybe polluted the groundwater in the study area. Therefore, it's important to study