ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА
Journal of Mining Institute
Сайт журнала: pmi.spmi.ru

Научная статья
Геотехнология и инженерная геология

О результатах крупномасштабной пешеходной магнитометрической съемки в пределах полуострова Брокнес (холмы Ларсеманн, Земля Принцессы Елизаветы, Восточная Антарктида)

Г.Д.Горелик✉, Н.П.Сенчина, Д.Е.Ушаков
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

***Как цитировать эту статью*:** Горелик Г.Д., Сенчина Н.П., Ушаков Д.Е. О результатах крупномасштабной пешеходной магнитометрической съемки в пределах полуострова Брокнес (холмы Ларсеманн, Земля Принцессы Елизаветы, Восточная Антарктида) // Записки Горного института. 2025. Т. 273. № 16735. С. 123-135. EDN TAUYJV

Аннотация
В ходе сезонных работ 70-й Российской антарктической экспедиции (РАЭ) в 2024-2025 гг. в рамках полевых геолого-геофизических исследований Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II на территории п-ова Брокнес (холмы Ларсеманн, Восточная Антарктида) выполнена площадная пешеходная наземная магнитная съемка в масштабе 1:10000. Изучаемая территория характеризуется высокой степенью обнаженности пород кембрийского и докембрийского возраста с локализацией в отдельных частях магнетитсодержащих комплексов. Работы включали опытно-методические исследования, съемку в двух режимах (дискретном и непрерывном) с контролем качества данных, а также последующую обработку и начальную интерпретацию полученных результатов. Построены детальная карта аномального магнитного поля, охватывающая площадь 17,5 км^2, и карты трансформант поля – вертикальной производной, модуля горизонтального градиента и др. Качественная интерпретация позволила выделить морфологически однородные участки исследуемой территории, характеризующиеся различными особенностями аномального магнитного поля. Результаты проведенных исследований будут использованы в дальнейшем для геологического истолкования аномалий и создания структурно-тектонической схемы региона.

Ключевые слова
Восточная Антарктида; холмы Ларсеманн; магнитные аномалии; наземная магниторазведка; обработка данных; докембрийские образования

Финансирование
Работа выполнена в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации FSRW-2024-0003 (Фундаментальные междисциплинарные исследования геологических образований Антарктиды в районе станции Восток).

Поступила: 30.04.2025 ***Принята: 05.06.2025*** ***Онлайн: 07.07.2025*** ***Опубликована: 07.07.2025***

Введение

Антарктический оазис – это территория, свободная от ледников и постоянного снежного покрова. В пределах континента оазисы составляют не более 0,03 % площади и распространены преимущественно у побережья [1]. Такие территории особенно ценны при изучении геологического строения Восточно-Антарктической плиты, так как предоставляют редкую возможность непосредственных геологических наблюдений и крупномасштабных геофизических съемок. Результаты геолого-геофизического изучения оазисов могут быть экстраполированы на ближайшие территории, покрытые ледниками, тем самым сообщая дополнительную информацию о геологическом строении прилегающих регионов Восточной Антарктиды [2, 3].

Холмы Ларсеманн расположены в восточной части залива Прюдс на побережье моря Содружества (берег Ингрид Кристенсен, Земля Принцессы Елизаветы). Территория оазиса была впервые нанесена на карту капитаном судна норвежской экспедиции Клариусом Миккельсеном в 1935 г.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© Г.Д.Горелик, Н.П.Сенчина, Д.Е.Ушаков, 2025

Границы территории четко очерчены ледниковыми структурами: на востоке оазис ограничивает выводной ледник Долк, на юге – обширное ледниковое плато, на западе – массивный ледник Поларарбокен. Ландшафт оазиса формируют невысокие холмы, разделенные фьордами и бухтами (Тала, Нелла, Клеменс, Долкой и Уилкок). В состав оазиса входят два крупных полуострова – Стурнес и Брокнес, три небольших – Гровнес, Браттневет, Стинир, а также около 130 островов. Среди последних выделяются относительно крупные – Фишер, Маннинг и Маклеод (рис.1). Исследования проводились на п-овах Брокнес и Стинир.

Отметки высот в пределах холмов Ларсеманн находятся в небольшом диапазоне значений и варьируются преимущественно от 0 до 120 м. Максимальная высота рельефа соотносится с пиком Бланделл и составляет 158 м над уровнем моря. Наличие складок и разломов в метаморфических коренных породах служит объяснением для продолговатых (вытянутых) морфологических форм крупных элементов рельефа. Присутствует значительное количество больших (около 150) и небольших по размерам озер, в ряде случаев распространены снежники, особенно на юге площади.

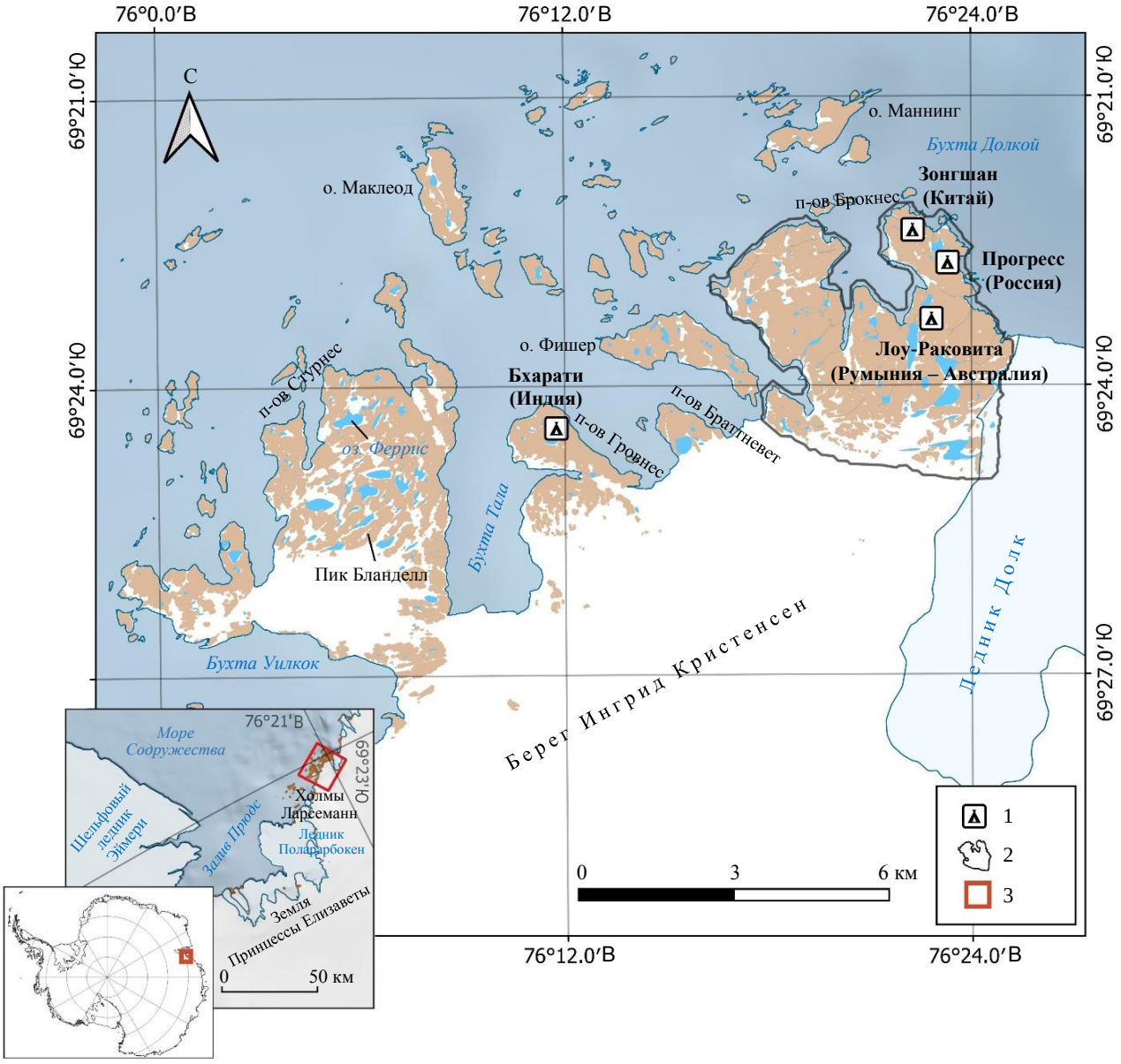


Рис.1. Обзорная схема холмов Ларсеманн и изучаемый район (врезка) на карте Антарктиды.
При составлении использованы материалы цифровой базы данных SCAR (ver. 7.0) международного ГИС-проекта Quantarctica 3.2. Здесь и далее система координат – EPSG: 4326 – WGS84

1 – научные станции и полевые базы; 2 – контур площади работ; 3 – границы схемы на врезке

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025. Т. 273. С. 123-135
© Г.Д.Горелик, Н.П.Сенчина, Д.Е.Ушаков, 2025

Холмы Ларсеманн являются Особо управляемым районом Антарктики № 6 [4], а п-ов Стурнес и прилегающие районы – Особо охраняемым районом Антарктики № 174 (геологическим заказником) [5]. В оазисе находятся три круглогодичные полярные станции – Прогресс (Россия), Зонгшан (Китай), Бхарати (Индия) и одна сезонная база Лоу-Раковита (Австралия – Румыния). В нескольких километрах к югу от станции Прогресс на ледовом плато находится аэродром Зенит (Россия), который используется для проведения логистических операций и геофизических работ как российскими, так и зарубежными исследователями [3, 6, 7].

Свободная от ледникового покрова территория представляет большой интерес для исследований ученых разных стран. Так, например, значительное число публикаций связано с исследованиями озер, которые часто служат источником информации о произошедших климатических изменениях в данном регионе Восточной Антарктиды. Донные отложения озер содержат сведения о динамике ледникового покрова за последние тысячелетия [8, 9]. Озера, расположенные в восточной части п-ова Брокнес, проясняют наиболее древнюю историю донных отложений среди всех поверхностных озер Антарктики [4]. В соответствии с представлениями, ледниковый щит никогда не продвигался дальше оз. Нелла и не выпахивал оз. Прогресс. По этой причине озера, расположенные в северной оконечности полуострова, представляют особую ценность для научного сообщества [4]. Интенсивное изучение выводного ледника и оз. Долк обусловлено тем, что в 2018 г. здесь случился прорыв, приведший к формированию огромного провала в леднике [10-12]. Большой интерес представляют работы, направленные на изучение рельефа и его динамики во времени [13], которые позволяют обнаружить следы ледниковой экзарации (борозды, шрамы) и аккумулятивные формы рельефа (моренные гряды), свидетельствующие о древней ледниковой активности, а также идентифицировать зоны ветровой и водной эрозии, формирующие микро- и мезорельеф территории.

Кроме того, существенный объем работ в пределах холмов Ларсеманн и на прилегающих территориях Земли Принцессы Елизаветы посвящен геофизическим методам изучения особенностей геологического строения региона [14]. Национальный центр исследований наук о Земле (NCESS) Индии успешно создал постоянную широкополосную сейсмологическую обсерваторию в оазисе холмы Ларсеманн [15]. Записи микросейсм позволяют получить новые данные о тектонической эволюции Восточной Антарктиды и динамических процессах внутри Земли. По результатам обработки и интерпретации данных метода рассеянных волн установлена структура земной коры и проведена оценка глубины границы Мохоровичича, составившая около 37 км [16].

Земная кора Восточной Антарктиды характеризуется магнитными свойствами, которые отражают возраст, литологический состав, степень переработки, деформации и метаморфические изменения горных пород. Для внутриконтинентальных территорий Восточной Антарктиды, скрытых ледниковым покровом, магнитометрические данные предоставляют уникальную возможность изучения геологии фундамента и его структуры, а также позволяют предположительно картировать границы между архейскими стабильными кратонами и протерозойскими подвижными поясами [17]. Весьма успешными представляются беспилотные аэромагнитные исследования в пределах Земли Уилкса, осуществленные впервые в мировой практике в рамках совместного проекта ВНИИОкеангеологии и Радар ммс в сезоне 2023-2024 гг. Выполненная съемка представила уникальные материалы об изменчивости аномального магнитного поля в районе оазиса Бангера и холмов Хайджамп. Результаты съемки информативны для дальнейшей геологической интерпретации и превышают по уровню детальности исследований имеющиеся геологические материалы [18].

Обобщающие сведения о магниторазведочных работах в Антарктиде опубликованы в статье А.В.Голынского и соавторов [19]. В этой работе приведены данные о магнитометрических исследованиях Антарктики, выполненных за более чем шестидесятилетний период работ представителями отечественных и зарубежных экспедиций, а также составлен второй вариант карты аномального магнитного поля Антарктики.

В период проведения 32-й Советской антарктической экспедиции 1987 г. в окрестностях холмов Ларсеманн выполнена аэромагнитная съемка по сети маршрутов через 5 км [2], но только четыре профиля наблюдений находились непосредственно над территорией оазиса, что не позволило дать объективное истолкование зарегистрированных магнитных аномалий. Кроме того, навигационная система 1987 г., базирующаяся на ДИСС-013 и фотокамере, не обеспечила необходимую точность в привязке маршрутов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

В результате съемки закартирован фрагмент интенсивной положительной аномалии, которая впоследствии названа линеамент Эймери, одной из наиболее протяженных (~700 км), зарегистрированных в Восточной Антарктиде [20].

В сезоне 2022-2023 гг. в северо-западной части Земли Принцессы Елизаветы реализована аэромагнитная съемка по сети маршрутов через 1 км, частично захватывающая и южную часть п-ова Брокнес. Цель съемки заключалась в выборе места заложения скважины в ледовой толще для бурения с отбором керна базального льда и подледниковых пород в рамках выполнения российско-китайского проекта [3]. Проект направлен на установление геологической природы высокоамплитудной линейной магнитной аномалии (линеамент Эймери), которая простирается параллельно побережью на протяжении более 700 км от Земли Принцессы Елизаветы до Земли Мак-Робертсона, пересекая зону рифта Ламберта [21].

В ходе наземных исследований аномального магнитного поля в районе индийской станции Бхарати, проведенных в 2007 г., выполнено 410 физических наблюдений, а зарегистрированные положительные аномалии приурочены к зонам развития гранат-магнетит-биотитовых гнейсов [22].

Таким образом, детальная магнитная съемка в районе п-ова Брокнес до сих пор не проводилась, несмотря на потенциально высокую геологическую информативность этого геофизического метода исследований. Выполнение подобных работ представляется актуальной задачей для изучения характера аномального магнитного поля над породами фундамента, зонами минерализации и интрузивными образованиями различного состава.

Геологическое строение участка исследований

Полуостров Брокнес, расположенный на побережье залива Прюдс в пределах холмов Ларсеманн, сложен характерными для Восточной Антарктиды докембрийскими метаморфическими породами, подвергшимися нескольким этапам регионального метаморфизма. В геологическом строении участвуют орто- и парагнейсы, принадлежащие к амфиболитовой и гранулитовой фациям метаморфизма [23] и включающие мезопротерозойские мафические гранулиты Нелла, неопротерозойские лейкогнейсы Зонгшан и парагнейсы, объединенные в формацию Браттстранд [24]. Последняя делится на несколько субформаций, среди которых выделяются метапелиты оз. Феррис, парагнейсы Брокнес, метапсаммиты Гентнер и лейкогнейсы Уайт-Хилл [24] (рис.2). В пределах территории исследования ортогнейсы, представленные мафическими гранулитами Нелла, картируются в северной части п-ова Зеркальный, где формируют отдельные выходы метаморфизованных мафических пород гранулитовой фации изометричной формы размером до 500 м в плане. Метаморфические породы прорваны дайками и штокобразными телами раннекембрийских гранитоидов формации Прогресс и кислых пегматитов [24].

Дайки микрогранита Прогресс представлены тонко-среднезернистым сиеногранитом от розового до оранжеватого, с акцессорными апатитом, цирконом и силлиманитом. Предположительно относятся к гранитному комплексу Прогресс. Граниты Прогресс, в свою очередь, распространены в виде оранжевого биотитового (сиено)гранита, акцессорные минералы которого представлены гранатом, магнетитом, шпинелью, монацитом, цирконом (около 515 млн лет). Лейкогнейсы Уайт-Хилл – светло-серые лейкократовые гнейсы (биотит, кварц и плагиоклаз), на территории холмов Ларсеманн отмечены сиплектиты кордиерита и кварца, жилы калиевого полевого шпата, редко гранат. Метапсаммиты Гентнер представлены кварц-полевошпатовыми псаммитами с гранатом и биотитом, могут содержать небольшие линзы силлиманита, шпинели/магнетита и линзы рогово-обманко-плагиоклазового метабазита. Парагнейсы Брокнес – неоднородный желтый гранатсодержащий кварц-полевошпатовый парагнейс с примесями силлиманита, шпинели и магнетита. Метапелиты оз. Феррис встречаются с темноцветным гранатом, силлиманитом, биотитом и с переменным содержанием шпинели и магнетита, редко кордиерита, также отмечены лейкосомы К-полевого шпата размерами до сантиметра. Гнейсы Зонгшан в пределах п-ова Брокнес распространены в виде лейкократовых кварц-полевошпатовых гнейсов с прожилками граната и редкого биотита (около 940 млн лет). Мафические гранулиты Нелла – темноокрашенный мафический гранулит, состоящий из ортопироксена, клинопироксена и плагиоклаза, местами содержащий хлорит, с незначительным количеством магнетита, биотита, титанита и циркона (около 1100 млн лет) [24].

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025. Т. 273. С. 123-135
© Г.Д.Горелик, Н.П.Сенчина, Д.Е.Ушаков, 2025

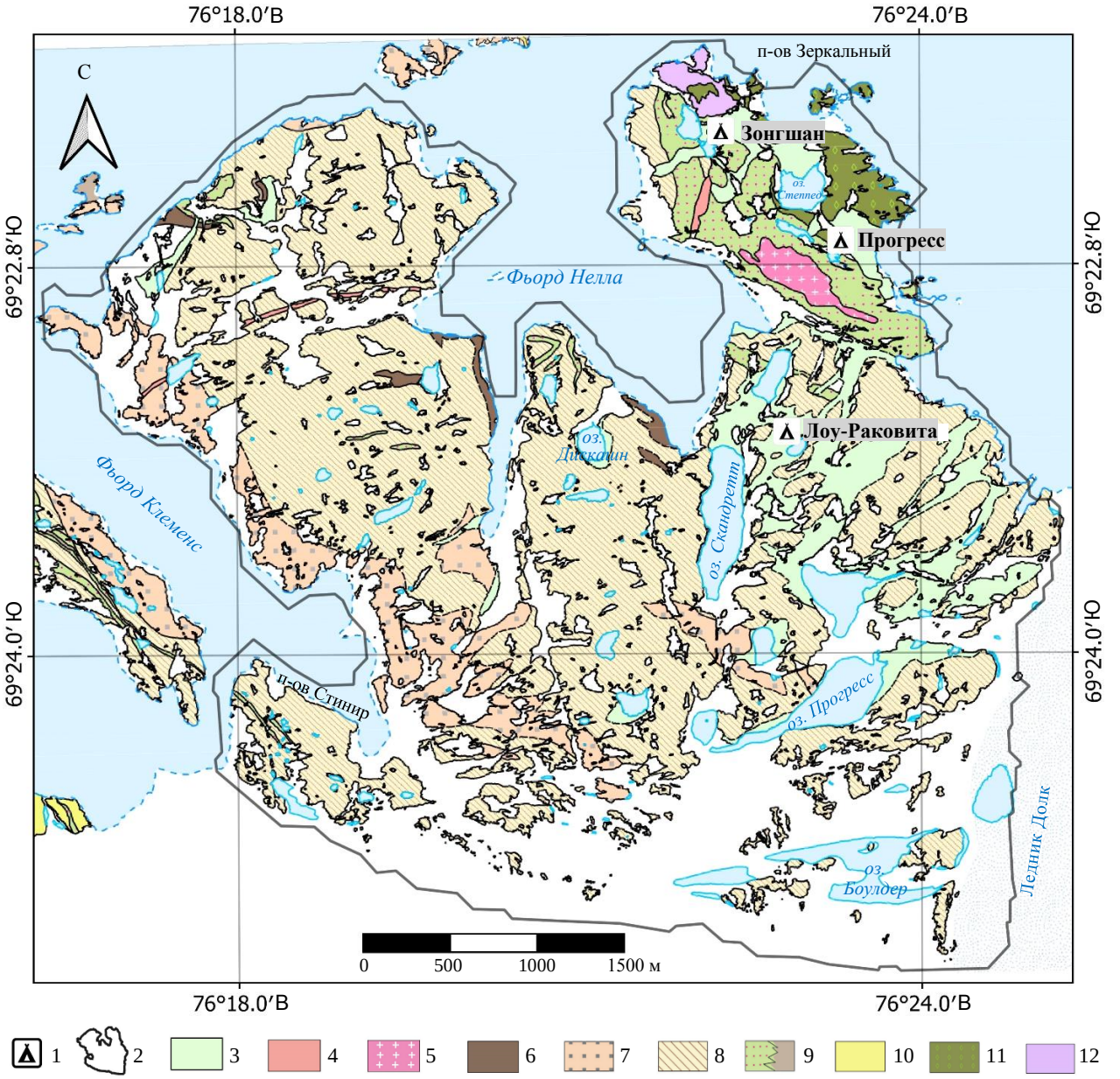


Рис.2. Геологическая схема п-ова Брокнес и окрестностей, холмы Ларсеманн [24]

1 – научные станции и полевые базы; 2 – контур площади работ; 3 – рыхлые осадки; 4 – дайка микрогранита Прогресс; 5 – граниты Прогресс; 6-9 – парагнейсы формации Браттстранд (6 – лейкогнейсы Уайт-Хилл, 7 – метапсаммиты Гентнер, 8 – парагнейсы Брокнес, 9 – метапелиты оз. Феррис/Стюве (метапелиты оз. Стюве – силлиманитовые пелиты с переменным количеством кордиерита, незначительные количества магнетита и шпинели, изоклинальные лейкосомы микроклина); 10 – ортогнейсы Бланделл (кремовые гранатовые салические ортогнейсы, местами с крупными кристаллами К-полевого шпата); 11 – гнейсы Зонгшан; 12 – мафические гранулиты Нелла

В ходе полевых геолого-геофизических исследований сотрудники Горного университета обнаружили, что темные разновидности метапелитов оз. Феррис состоят из агрегатов кордиерита, магнетита и в меньшей степени биотита. Магнетит представлен выделениями неправильной формы с синей побежалостью, что может говорить о примеси титана в минерале, вплоть до формирования титаномагнетита, характерного для пород гранулитовой фации. Более того, отдельные кордиерит-магнетитовые прослои и линзы северо-северо-западного простирания мощностью до 5 м при протяженности около первых десятков метров закартированы в парагнейсах Брокнес в центральной и северной частях полуострова. Магнетит в большом количестве отмечается в метаморфизованных гранитах формации Прогресс, образующих шток и серию дайкообразных тел в западной и восточной частях территории исследования. При этом на контактах со вмещающими парагнейсами Брокнес и метапелитами оз. Феррис наблюдается увеличение содержания железосодержащих минералов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© Г.Д.Горелик, Н.П.Сенчина, Д.Е.Ушаков, 2025

Аппаратура и методика работ

Программа сезонных работ полевого отряда Горного университета на п-ове Брокнес включала одновременную реализацию двух видов исследований – геологическое изучение площади, в рамках которого проводилась геологическая съемка и специализированные детальные исследования, а также геофизические работы, включающие пешеходную магнитную съемку, результаты которой представлены в работе.

Магнитное поле измерялось с помощью трех магнитометров MiniMag (Россия), два из которых использовались для рядовых измерений вдоль профилей, а третий в качестве магнитовариационной станции. Топогеодезическая привязка результатов каждого измерения осуществлялась с использованием встроенного в прибор GNSS-приемника, для ориентации на местности применялись GPS-приемники Garmin GPSMap 66st/66sr (США).

Наземная магнитная съемка в масштабе 1:10000 в пределах изучаемой площади (рис.3) выполнена в двух модификациях. Непрерывная пешеходная съемка проводилась по профилям, ориентированным под углом 53,4° к географическому меридиану 76°, с межпрофильным расстоянием 100 м, проложенным вдоль простирания основных топографических элементов местности и вкрест простирания известных геологических структур. Интервал записи составлял 2 с, что приблизительно соответствует расстоянию между точками наблюдения от 1 до 3 м. Дискретная – стационарные многократные измерения на пикетах, расположенных вдоль профилей с шагом, равным 100 м, с получением равномерной сети наблюдений.

Стоит отметить, что затраты труда в первом и втором случаях примерно одинаковые, поскольку пройдено одинаковое расстояние. Однако при съемке по отдельным пикетам более точно выполняется позиционирование оператора на рядовых и контрольных пунктах наблюдения. Каждое измерение произведено как минимум трижды с последующим расчетом погрешности на каждой точке дискретных наблюдений.

Общее число пикетов при дискретном способе съемки составляет 1697, в непрерывном режиме база данных включает более 140 тыс. строк, протяженность маршрутов – 169 км.

Другие элементы методики наблюдений стандартные – магнитовариационная станция с интервалом записи 1 с, измерения на контрольном пункте всеми приборами съемочной группы в начале и в конце рабочего дня.

При непрерывной съемке получена более детальная карта, что продемонстрировано на рис.4, для фрагмента карты аномального магнитного поля, расположенного в северо-западной части п-ова Брокнес. Карты графиков магнитных аномалий принято строить по непрерывным вдоль профилей записям значений магнитного поля, однако авторы предпочли площадной анализ карт изолиний с построением трансформаций поля, оставив возможность выполнения более детальной интерпретации по отдельным профилям.

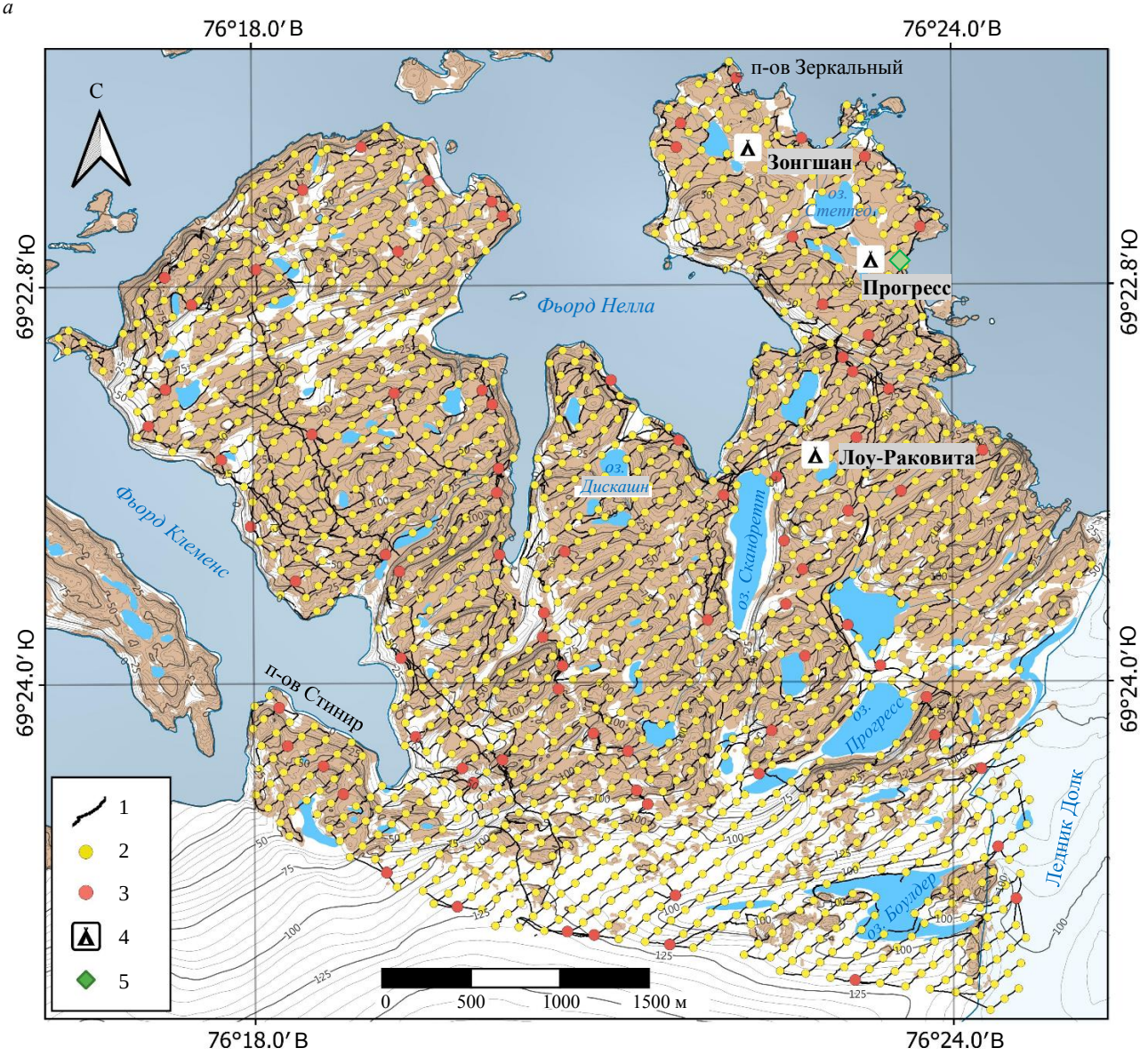
Основные этапы обработки данных включали учет магнитных вариаций путем вычитания значения магнитного поля, зарегистрированного магнитовариационной станцией, из измеренного на рядовой точке в тот же момент времени. Для расчета и ввода поправки за систематическую невязку между приборами выполнены анализ сходимости результатов на контрольном пункте, а также расчет средних квадратических отклонений (СКО) на рядовых и контрольных точках дискретных наблюдений. Общее число контрольных точек на участке работ равно 108 (~6 % от всех измерений). По результатам контрольных наблюдений СКО составило 1,7 нТл, что позволяет отнести результаты съемки к классу высокоточных (погрешность ниже 5 нТл). Средние значения модуля вектора магнитной индукции на участке работ варьируются около 54000 нТл, склонение и наклонение вектора составляют –81° и –71° соответственно. Размер участка работ – 17,5 км^2, поэтому нормальное магнитное поле в пределах площади исследований меняется незначительно [25].

Построение грида – цифровой модели поля в виде сети с равномерным распределением узлов, выполнено несколькими способами с анализом величины невязки грида с полученными в точках измерения значениями. Выбраны оптимальные метод и шаг гридирования – метод минимальной кривизны с размером ячейки грида 5×5 м и расстоянием интерполяции 100 м (для заполнения неизученных областей озер внутри исследованной области зона построения грида увеличена

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025. Т. 273. С. 123-135
© Г.Д.Горелик, Н.П.Сенчина, Д.Е.Ушаков, 2025

а



б



Рис.3. Схема фактического материала выполненных магниторазведочных работ на основе материалов цифровой базы данных SCAR (ver. 7.0) международного ГИС-проекта Quantarctica 3.2 (*а*) и полевые исследования (*б*) на п-ове Брокнес

1 – маршруты непрерывной съемки; 2 – точки дискретных измерений; 3 – точки контрольных измерений; 4 – станции и полевые базы; 5 – положение магнитовариационной станции и контрольного пункта

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

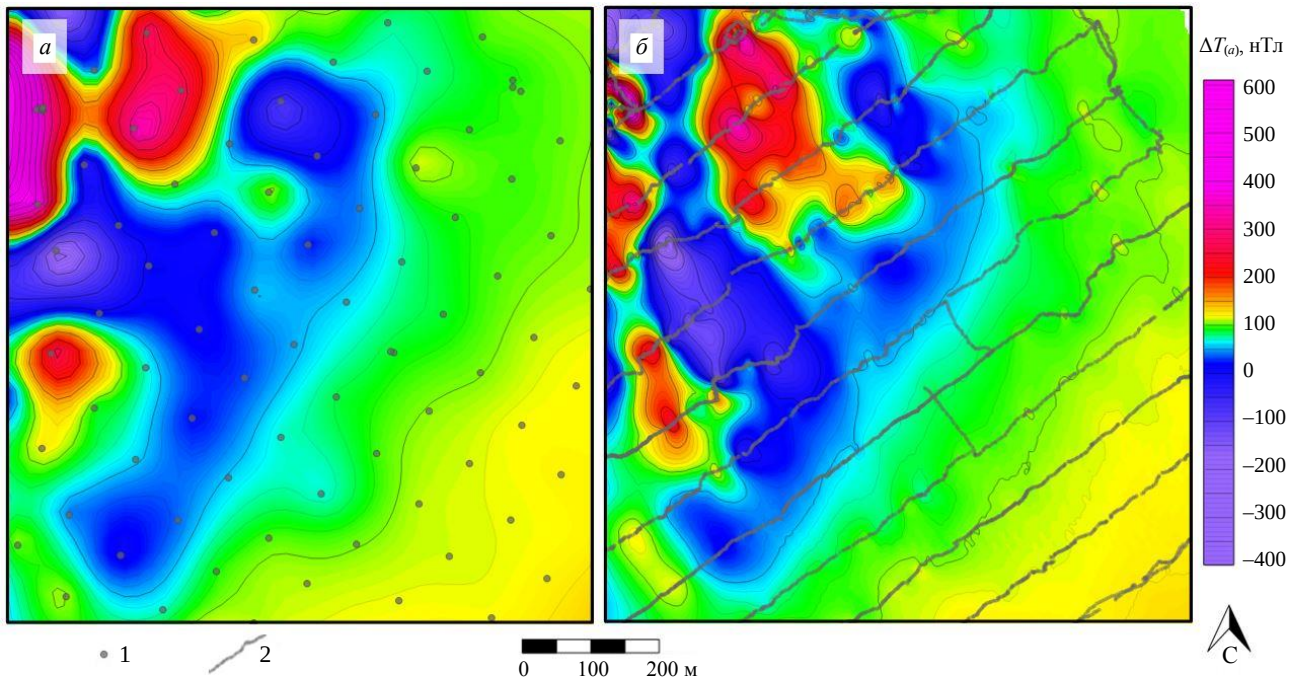


Рис.4. Фрагменты карты аномального магнитного поля северо-западной части п-ова Брокнес по данным дискретной съемки (*а*); по данным непрерывной съемки (*б*). Сечение изолиний 10 нТл

1 – точки дискретных измерений; 2 – маршруты непрерывной съемки

до 150 м от ближайшей точки измерений). Выбранный шаг гридирования позволил сохранить детальность исследований вдоль маршрутов, а выбранный метод обеспечил отсутствие ложных аномалий между профилями, что проконтролировано при построении карты. Участок съемки также характеризуется малым объемом помех, которые в основном представлены источниками антропогенного происхождения в пределах исследовательских станций и баз. На этапе обработки аномалии негеологической природы отбраковывались и отсутствуют на итоговой карте для интерпретации и дальнейшего анализа. Съемка частично не выполнялась в пределах крупных озер ввиду отсутствия устойчивого ледового покрова, на данные области поле было интерполировано.

Результаты

Итоговая карта аномального магнитного поля (АМП) для п-ова Брокнес представлена на рис.5. Диапазон изменения составляет около 10000 нТл, но более 80 % площади соответствуют диапазону ±500 нТл. Экстремальные значения АМП порядка 2000-5000 нТл зарегистрированы между станциями Прогресс и Лоу-Раковита, в области контакта гранитов Прогресс, метапелитов оз. Феррис и парагнейсов Брокнес. Характер АМП на участках различается по амплитудно-частотному составу, преобладающим направлениям осей аномалий или градиентных зон. Области наиболее короткопериодных и интенсивных аномалий в северной части исследуемой территории в большинстве случаев соответствуют наблюдаемым на поверхности выходам магнетитсодержащих горных пород.

Для более полного анализа связей зарегистрированных аномалий с данными сопутствующих наблюдений выполнены математические преобразования модели площадного распределения аномального магнитного поля. В первую очередь, спектральным методом рассчитана вертикальная производная поля (рис.6, *а*), подчеркивающая, как и все дифференциальные трансформации, локальные аномалии различного происхождения – геологического, либо связанного с дефектами съемки и обработки данных. Помимо этого, осуществлена редукция поля к магнитному полюсу (рис.6, *б*), дающая возможность скорректировать косую индуцированную намагниченность геологических тел, приводя ее к вертикальному положению. Также рассчитан угол наклона вектора градиента TDR (tilt derivative) (рис.6, *в*), позволяющий усилить проявленность низкоамплитудных

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025. Т. 273. С. 123-135
© Г.Д.Горелик, Н.П.Сенчина, Д.Е.Ушаков, 2025

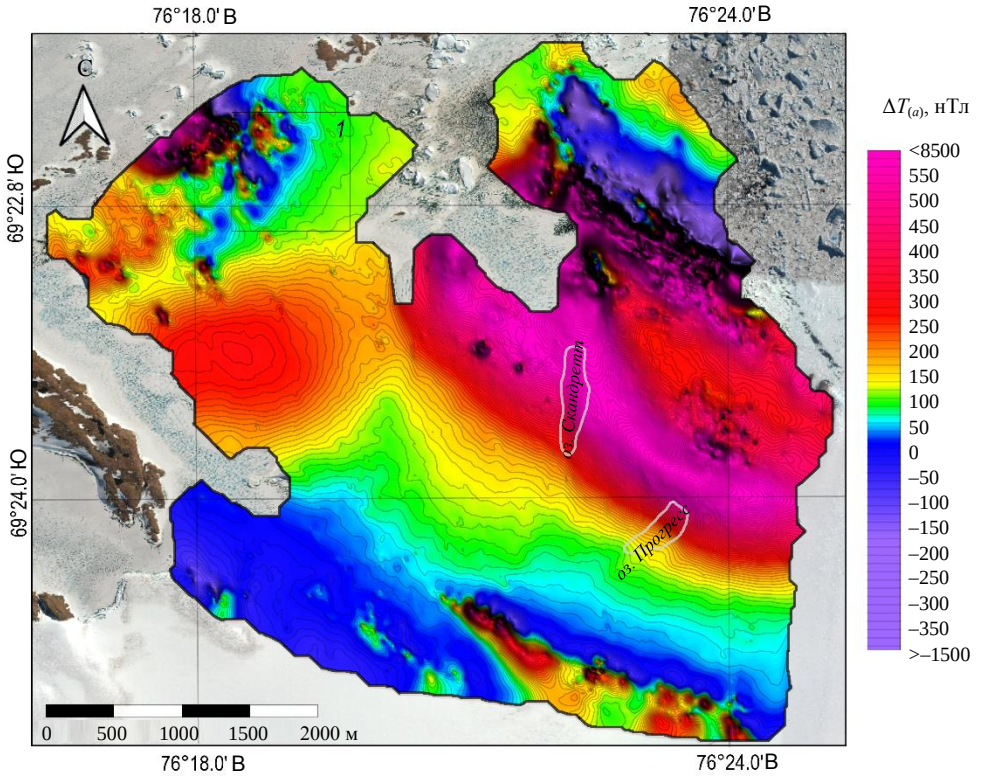


Рис.5. Карта АМП п-ова Брокнес на фоне космоснимка местности.
Сечение изолиний составляет 10 нТл. 1 – площадь, показанная на рис.4

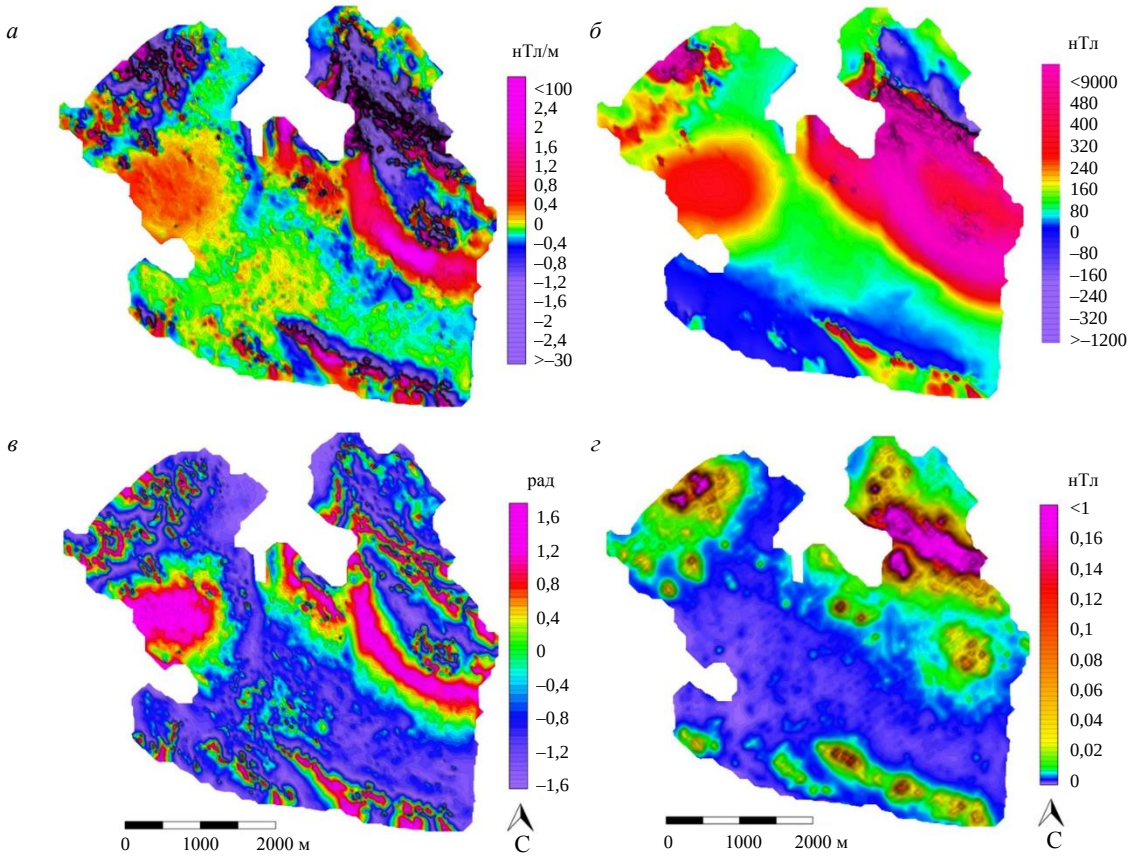


Рис.6. Схемы трансформаций АМП: вертикальной производной (*а*), редуцированного к полюсу магнитного поля (*б*), угла наклона вектора градиента TDR (*в*), осредненного модуля короткопериодной составляющей поля (*г*)

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

аномалий, например распространенных в центральной области исследуемой площади и не проявленных на прочих схемах. Трансформация (рис.6, *г*) – осредненные в скользящем окне значения модуля короткопериодной составляющей, является полезным преобразованием поля для решения задач районирования, характеризуя плотность локальных аномалий. Для расчета указанной трансформации на первом этапе в спектральной области выделена наиболее короткопериодная компонента поля (до 10 м, так называемая шумовая компонента, несущая геологическую информацию [26]), далее найдены ее абсолютные значения, а результат усреднен в скользящем окне диаметром 500 м. Параметры расчета трансформации установлены опытным путем.

Дискуссия

На основе анализа карты АМП и основных трансформаций выполнено районирование по характеру проявления магнитных аномалий. Это вариант качественной интерпретации, при которой площадь исследований подразделена на несколько крупных блоков, в пределах которых описывающий изменения магнитного сигнал представляется близким к стационарному по амплитудно-частотным характеристикам и направлению простирания аномалий (рис.7). Также приведена информация о геологической природе характерных аномалий поля.

Наиболее обширная часть полуострова характеризуется наличием низкоамплитудных (в основном до 50 нТл) региональных и локальных аномалий магнитного поля. Это позволяет сделать предположения о низких значениях магнитной восприимчивости парагнейсов Брокнес и метапсаммитов Гентнер, а также об отсутствии различия между ними по магнитным характеристикам.

Блок I расположен в северо-западной части площади, в области выхода на поверхность магнетитсодержащих горных пород, картируемых с помощью геологических наблюдений. Здесь среди доминирующих парагнейсов формации Брокнес в ходе работ зафиксированы мусковитовый и камерный миароловый пегматиты, содержащие вкрапления магнетита, над которыми наблюдаются интенсивные магнитные аномалии различной частоты. Наиболее выражены аномалии шириной около 60-100 м, амплитуда достигает 500 нТл.

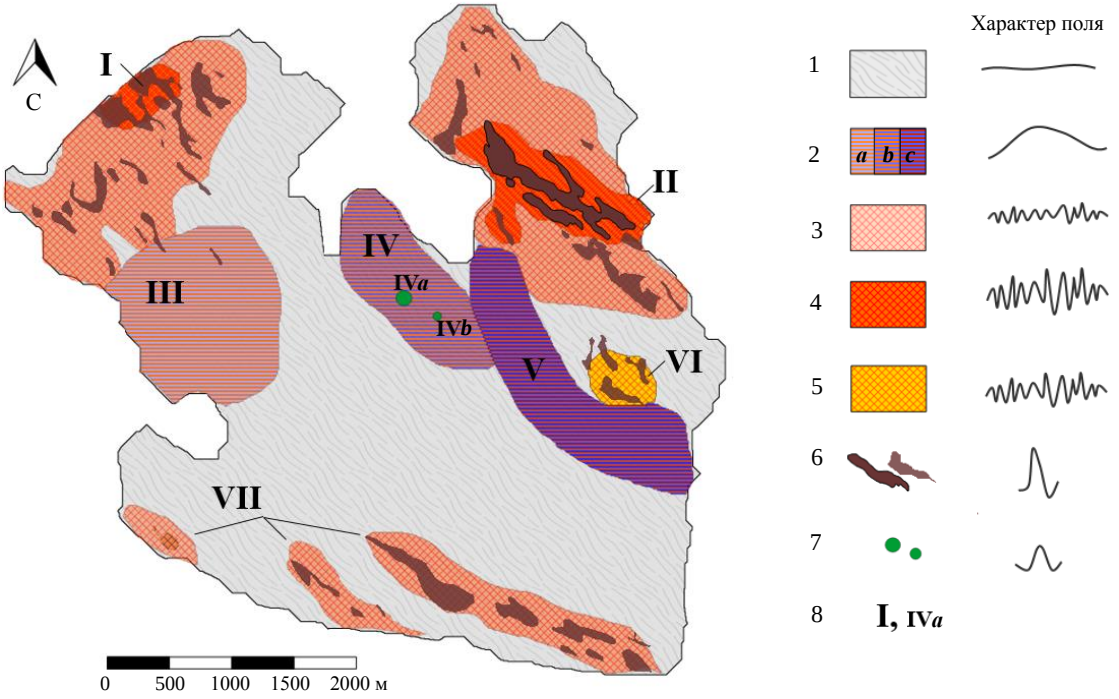


Рис.7. Схема районирования аномального магнитного поля

1 – зона низкоамплитудных региональных и локальных аномалий (в основном до 50 нТл), геологически соответствует вмещающим парагнейсам Брокнес и метапсаммитам Гентнер; 2 – блоки, характеризующиеся крупными широкими аномалиями амплитудой до 200 нТл (*a*), 400 нТл (*b*), 800 нТл (*c*), источники которых не установлены; 3 – зоны развития локальных аномалий (до 200 нТл); 4 – блоки интенсивных локальных аномалий магнитного поля (до 1000 нТл), проявленные по данным геологического картирования как выходы магнетитсодержащих горных пород; 5 – блок локальных аномалий магнитного поля (до 300 нТл), проявленный как область интенсивной мигматизации метаморфических пород; 6 – отдельные аномалии, связанные с приповерхностными намагниченными жильными объектами или прослоями (магнетит); 7 – изометричные знакопеременные аномалии дискуссионного происхождения; 8 – номера блоков и аномалий

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025. Т. 273. С. 123-135
© Г.Д.Горелик, Н.П.Сенчина, Д.Е.Ушаков, 2025

Блок II находится на северо-востоке площади вблизи антарктической круглогодичной станции Прогресс. Здесь закартированы интрузии гранитов и микрогранитов формации Прогресс, содержащие большое количество вкраплений магнетита в приконтактовых частях. В пределах блока II зарегистрированы наиболее выраженные высокоамплитудные знакопеременные аномалии величиной до 8000 нТл. Локальная составляющая поля позволяет выделить отдельные линейные аномалии шириной около 100 м, вытянутые в северо-западном направлении. Протяженность отдельных аномалий в блоке превышает 1000 м.

Блок III представляет собой относительно широкую, диаметром около 1500 м, изометричную в плане положительную аномалию величиной до 200 нТл. По всей вероятности, источник аномалии находится на глубине, поскольку на поверхности отсутствуют выходы каких-либо магнитных пород. Также нет убедительных предпосылок для предположения латеральной неоднородности магнитных свойств пород, слагающих верхнюю часть разреза.

Блок IV характеризуется широкой дугообразно вытянутой положительной аномалией, интенсивность которой достигает 400 нТл, на севере соотносящейся с закартированными метапелитами. Блок осложнен выраженными локальными аномалиями дискуссионного происхождения. Аномалия IV*a* приурочена к оз. Дискашн, однако ее природа пока не определена. Аномалия IV*b* соответствует локальному выходу так называемых синих гнейсов (предположительно, это метапелиты оз. Феррис).

По своей морфологии блок V представляет собой широкий дугообразный сегмент, простирающийся в северо-северо-западном направлении, интенсивность аномалий достигает 800 нТл, что наиболее вероятно соотносится с погребенным комплексом с высоким содержанием магнетита, о составе которого можно судить по результатам комплексного моделирования и бурения.

К рассмотренной аномалии примыкает округлый блок VI, проявленный в локальной компоненте аномального магнитного поля и связанный с закартированной зоной интенсивной мигматизации метаморфических пород [27].

Три вытянутых аномалии, две из которых вероятно можно проследить за пределами площади на юго-востоке под ледниковым покровом, обозначены цифрой VII. Эти аномалии находятся в поле отрицательных значений $\Delta T_{(a)}$, которое, возможно, является периферийным минимумом аномалиеобразующего объекта, находящегося за пределами площади исследования или проявлением латеральной неоднородности магнитных свойств пород, слагающих п-ов Брокнес. В виду наличия ледникового покрова геологические наблюдения в области выполнялись лишь на отдельных обнажениях, выходящих к поверхности, что затрудняло однозначную интерпретацию АМП без выполнения дополнительных видов исследований.

В дальнейшем планируется осуществить исследования п-ова Брокнес как в области развития относительно региональных аномалий, никак геологически не проявленных на поверхности, так и в зонах доминирования локальных аномалий, где присутствует возможность детального геологического изучения территории и получения данных опробования.

Решить вопрос определения основных характеристик предполагаемых погребенных намагниченных тел может геолого-геофизическое моделирование [28, 29], заверенное бурением с отбором и изучением керна. Для реализации планируется предварительная оценка магнитной восприимчивости и направления намагниченности ориентированных образцов горных пород [30]. Расширение области детальных магниторазведочных работ в окрестностях п-ова Брокнес возможно при помощи магнитометрии на беспилотных летательных аппаратах (БПЛА) [18, 31, 32].

Результаты количественной интерпретации наиболее достоверны при наличии априорной информации. Сопровождение материалами подробных геологических исследований и дополнение данными геофизических методов [33], таких как сейсморазведочные работы [34], магнитотеллурическое зондирование [35, 36], гамма-спектрометрия, гравиметрия, позволят снизить неоднозначность интерпретации при моделировании или использовании других приемов толкования магнитных аномалий [37, 38]. Продолжение исследований оазисов Антарктиды и прилегающих областей, покрытых ледниковым щитом, является ключом к расшифровке истории развития, геолого-структурной и тектонической эволюции континента [39].

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© Г.Д.Горелик, Н.П.Сенчина, Д.Е.Ушаков, 2025

Заключение

В рамках выполнения комплексных геолого-геофизических исследований п-ова Брокнес в сезоне 70-й Российской антарктической экспедиции выполнена наземная пешеходная магнитометрическая съемка территории в масштабе 1:10000. Общая протяженность профилей измерений составила 169 км. Параллельно выполнялись геологические исследования, в результате которых проведена площадная геологическая съемка в масштабе 1:50000, собрана обширная коллекция представительных образцов горных пород п-ова Брокнес, описаны и опробованы опорные обнажения с составлением 3D-моделей посредством использования БПЛА, а также подробно изучены пегматитовые образования на площади работ, в том числе с редкой минерализацией. В результате геофизических работ построены карты аномального магнитного поля и основных трансформант, а также выполнена предварительная геологическая интерпретация выявленных аномалий.

Доступ к данным

Полевые материалы к работе доступны по ссылкам:
Приложение 1, https://pmi.spmi.ru/pmi/article/download/16735/16638;
Приложение 2, https://pmi.spmi.ru/pmi/article/download/16735/16639;
Приложение 3, https://pmi.spmi.ru/pmi/article/download/16735/16640.

Авторы благодарны участникам научной антарктической партии «Горный» за неоценимый вклад в развитие работ Горного университета в Антарктиде, а также сотрудникам Российской антарктической экспедиции и начальнику станции Прогресс Д.В.Шепелеву за поддержку при проведении исследований в поле.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Сократова И.Н.* Антарктические оазисы. История и результаты исследований. СПб: Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, 2010. 274 с.
2. *Golynsky A.V., Masolov V.N., Volnukhin V.S., Golynsky D.A.* Crustal Provinces of the Prince Charles Mountains Region and Surrounding Areas in the Light of Aeromagnetic Data // Antarctica. Springer, 2006. P. 83-94. DOI: 10.1007/3-540-32934-X_10
3. *Leitchenkov G.L., Talalay P.G., Zhang N. et al.* First targeted geological sampling beneath the East Antarctic ice sheet: joint Russian-Chinese drilling project // Exploration & Protection of Mineral Resources. 2024. Special issue. P. 75-78.
4. Особо управляемый район Антарктики № 6 «Холмы Ларсеманн» (Восточная Антарктика): пересмотренный План управления // Заключительный отчет XLIII Консультативного совещания по Договору об Антарктике, 14-24 июня 2021, Париж, Франция. Буэнос-Айрес: Секретариат Договора об Антарктике, 2021. Т. 2. Мера 1. С. 19-59.
5. Особо охраняемый район Антарктики (ООРА) № 174 «Стурнес» (Холмы Ларсеманн, Земля Принцессы Елизаветы): План управления // Заключительный отчет XXXVII Консультативного совещания по Договору об Антарктике, 28 апреля – 7 мая 2014, Бразилиа, Бразилия. Буэнос-Айрес: Секретариат Договора об Антарктике, 2014. Т. 2. Мера 12, Приложение. С. 217-232.
6. *Xiangbin Cui, Greenbaum J.S., Shinan Lang et al.* The Scientific Operations of Snow Eagle 601 in Antarctica in the Past Five Austral Seasons // Remote Sensing. 2020. Vol. 12. Iss. 18. № 2994. DOI: 10.3390/rs12182994
7. *Поляков С.П., Попов С.В.* Исследование и разработка технологии строительства снежных аэродромов для приема колесных самолетов в Антарктиде // Записки Горного института. 2025. Т. 273. С. 159-168.
8. *Григорьева С.Д., Киньябаева Э.Р., Кузнецова М.Р., Кашкевич М.П.* Геофизические методы в составе комплекса работ по обследованию прорывоопасных ледниковых водоемов на примере озера Прогресс (оазис Холмы Ларсеманн, Восточная Антарктида) // Инженерная и рудная геофизика 2021: Материалы 17-й научно-практической конференции и выставки, 26-30 апреля 2021, Геленджик, Россия. М.: «ЕАГЕ Геомодель», 2021. 8 с. DOI: 10.3997/2214-4609.202152040
9. *Григорьева С.Д., Кузнецова М.Р., Шитов М.В. и др.* Аномальный рельеф дна малого озера в оазисе Ларсерманн (Восточная Антарктида) // Лед и Снег. 2022. Т. 62. № 3. С. 377-386. DOI: 10.31857/S2076673422030139
10. *Sukhanova A., Bantsev D., Popov S. et al.* The current state of Lake Dålk (Larsemann Hills, East Antarctica) // Polar Science. 2023. Vol. 38. № 101006. DOI: 10.1016/j.polar.2023.101006
11. *Mishra P., Tripathi N., Singh S.K. et al.* Comprehending the surface melt characteristics, calving processes, and seasonal ice velocity of Dålk glacier in Larsemann Hills, East Antarctica // Polar Science. 2024. Vol. 42. № 101081. DOI: 10.1016/j.polar.2024.101081
12. *Скрыпицына Т.Н., Захаров В.Г., Киселева А.С. и др.* Эволюция рельефа выводного ледника Долк (залив Прюдс, Восточная Антарктида) по данным беспилотных аэрофотосъемок 2017-2019 годов // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2021. Т. 65. № 5. С. 517-528. DOI: 10.30533/0536-101X-2021-65-5-517-528
13. *Флоринский И.В.* Геоморфометрическое моделирование и картографирование антарктического оазиса Холмы Ларсеманн // ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационная поддержка устойчивого развития регионов в условиях кризиса: Материалы Международной конференции, 12-14 сентября 2023, Улан-Удэ, Россия, 16-18 сентября 2023, Улан-Батор, Монголия. М.: Географический факультет МГУ, 2023. Т. 29. Ч. 1. С. 482-510. DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-482-510
14. *Lin Li, Enzhao Xiao, Xiaolong Wei et al.* Crustal Imaging across the Princess Elizabeth Land, East Antarctica from 2D Gravity and Magnetic Inversions // Remote Sensing. 2023. Vol. 15. Iss. 23. № 5523. DOI: 10.3390/rs15235523
15. *Padma Rao B, Krishna Jha, Suresh Kumar Thatikonda.* A broadband seismological observatory at Larsemann Hills, Antarctica: Noise characteristics and data quality // Polar Science. 2023. Vol. 38. № 100970. DOI: 10.1016/j.polar.2023.100970
16. *Rao B.P.* Imaging of crustal structure beneath the Larsemann Hills, Antarctica using scattered wave technique – First Results // Polar Science. 2023. Vol. 38. № 100980. DOI: 10.1016/j.polar.2023.100980

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

17. *Golynsky A.V.* Magnetic Anomalies in East Antarctica: A Window on Major Tectonic Provinces and Their Boundaries // Antarctica: A Keystone in a Changing World: Online Proceedings of the 10th International Symposium on Antarctic Earth Sciences, 26 August – 1 September 2007, Santa Barbara, CA, USA. U.S. Geological Survey and U.S. National Academy, 2007. USGS OF-2007-1047, Short Research Paper 006. DOI: 10.3133/of2007-1047.srp006

18. *Симаков А.Е., Гуторов Ф.Г., Лейченков Г.Л. и др.* О результатах беспилотной аэромагнитной съемки в районе оазиса Бангера и холмов Хайджамп, Земля Уилкса, Восточная Антарктида // Записки Горного института. 2025. Т. 273. С. 108-122.

19. *Golynsky A.V., Ferraccioli F., Hong J.K. et al.* New Magnetic Anomaly Map of the Antarctic // Geophysical Research Letters. 2018. Vol. 45. Iss. 13. P. 6437-6449. DOI: 10.1029/2018GL078153

20. *Golynsky A.V., Alyavdin S.V., Masolov V.N. et al.* The composite magnetic anomaly map of the East Antarctic // Tectonophysics. 2002. Vol. 347. Iss. 1-3. P. 109-120. DOI: 10.1016/S0040-1951(01)00240-2

21. *Голынский А.В., Голынский Д.А., von Frese R.R.* Compiling ship and airborne measurements for the Antarctic's second-generation magnetic anomaly map // Russian Journal of Earth Sciences. 2022. Т. 22. № 3. № ES3007 (in English). DOI: 10.2205/2022ES000801

22. *Reddy C.D., Dhar A.* Magnetic anomaly map for Bharati promontory, Larsemann Hills, East Antarctica // Current Science. 2008. Vol. 94. № 6. P. 715-717.

23. *Shi Zong, Yingchun Cui, Liudong Ren et al.* Geochemical Characteristics, Zircon U-Pb Ages and Lu-Hf Isotopes of Pan-African Pegmatites from the Larsemann Hills, Prydz Bay, East Antarctica and Their Tectonic Implications // Minerals. 2023. Vol. 14. Iss. 1. № 55. DOI: 10.3390/min14010055

24. Geology of the Larsemann Hills. Princess Elizabeth Land. Antarctica. 1:25 000 scale. First Edition. Canberra: Geoscience Australia, 2007.

25. *Brown W., Beggan C., Cox G., Macmillan S.* The new WMM2020 and IGRF-13 models, and a retrospective analysis of IGRF secular variation // EGU General Assembly 2020, 4-8 May 2020. № EGU2020-9775. DOI: 10.5194/egusphere-egu2020-9775

26. *Петров А.В.* Технология оценки и анализ шумовых компонент геофизических полей // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: Сборник научных трудов по материалам 46-й сессии Международного научного семинара им. Д.Г.Успенского, 20-25 января 2019, Пермь, Россия. Пермь: Горный институт УрО РАН, 2019. Вып. 1 (46). С. 297-299.

27. *Xuanhua Chen, Rongbao Jiang, Jinglin Wan et al.* Cenozoic Exhumation of Larsemann Hills, East Antarctica: Evidence from Apatite Fission-track Thermochronology // Acta Geologica Sinica – English Edition. 2010. Vol. 84. Iss. 2. P. 306-320. DOI: 10.1111/j.1755-6724.2010.00142.x

28. *Егоров А.С., Калинин Д.Ф., Секерина Д.Д.* Геотектоническая модель глубинного строения Змеиногорского рудного района Рудного Алтая по данным геологической интерпретации комплекса геофизических съемок // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2024. Т. 335. № 8. С. 148-160. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4431

29. *Мартышко П.С., Федорова Н.В., Рублев А.Л.* Результаты моделирования источников магнитных аномалий в земной коре Среднего Урала // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2022. Т. 507. № 2. С. 303-308. DOI: 10.31857/S2686739722601715

30. *Lowe M., Jordan T., Ebbing J. et al.* Comparing geophysical inversion and petrophysical measurements for northern Victoria Land, Antarctica // Geophysical Journal International. 2024. Vol. 239. Iss. 1. P. 276-291. DOI: 10.1093/gji/ggae272

31. *Садыкова З.И., Мовчан И.Б., Яковлева А.А., Гоглев Д.А.* Технология комплексной геолого-геофизической интерпретации данных, полученных при помощи БПЛА на примере участка в Мурманской области // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. 2023. Вып. 6 (43). С. 161-169.

32. *Мовчан И.Б., Шайгаллямова З.И., Яковлева А.А.* Выявление факторов структурного контроля коренных золоторудных проявлений методом беспилотной аэромагниторазведки на примере Нерюнгринского района Якутии // Записки Горного института. 2022. Т. 254. С. 217-233. DOI: 10.31897/PMI.2022.23

33. *Litvinenko V.S., Trushko V.L.* Modelling of geomechanical processes of interaction of the ice cover with subglacial Lake Vostok in Antarctica // Antarctic Science. 2025. Vol. 37. №. 1. P. 39-48. DOI: 10.1017/S0954102024000506

34. *Большунов А.В., Васильев Д.А., Дмитриев А.Н. и др.* Результаты комплексных экспериментальных исследований на станции Восток в Антарктиде // Записки Горного института. 2023. Т. 263. С. 724-741.

35. *Давыдкина Т.В., Янкилевич А.А., Наумова А.Н.* Особенности магнитотеллурических исследований в Антарктиде // Записки Горного института. 2025. Т. 273. С. 80-93.

36. *Murthy D.N., Veeraswamy K., Harinarayana T. et al.* Electrical structure beneath Schirmacher Oasis, East Antarctica: a magnetotelluric study // Polar Research. 2013. Vol. 32. № 17309. DOI: 10.3402/polar.v32i0.17309

37. *Калинин Д.Ф., Долгаль А.С., Ворошилов В.А.* Вероятностный анализ геолого-структурных перспектив нефтегазоносности Западной Якутии с применением трехмерной эмпирической модовой декомпозиции потенциальных полей // Георесурсы. 2024. Т. 26. № 2. С. 53-68. DOI: 10.18599/grs.2024.2.6

38. *Таловина И.В., Мангал Ф., Смук Г.В., Крикун Н.С.* Интерпретация геолого-геофизических данных для изучения глубинного строения Кабульского массива // Горный журнал. 2024. № 9. С. 68-77. DOI: 10.17580/gzh.2024.09.11

39. *Таловина И.В., Бабенко И.А., Илалова Р.К., Дурягина А.М.* Оливин-шпинелевая геотермометрия – индикатор формационной принадлежности пород и основа для геодинамических реконструкций в условиях Антарктиды // Горный журнал. 2024. № 9. С. 77-82. DOI: 10.17580/gzh.2024.09.12

***Авторы*: Глеб Дмитриевич Горелик,** *канд. техн. наук, доцент, gorelik_gd@pers.spmi.ru, https://orcid.org/0000-0002-9890-5275* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), **Наталия Петровна Сенчина,** *канд. геол.-минерал. наук, доцент, https://orcid.org/0000-0001-5458-648X* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), **Дмитрий Евгеньевич Ушаков,** *ведущий инженер, https://orcid.org/0009-0009-6882-3955* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0