ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

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



Научная статья *Геология*

Опыт проведения магнитотеллурических исследований с использованием активных электродов с предусилителями в районе залива Прюдс, Восточная Антарктида

Н.Н.Покровская, И.А.Шуклин✉, А.С.Егоров, Т.В.Давыдкина, А.А.Янкилевич, А.Н.Наумова, Г.Д.Горелик
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

***Как цитировать эту статью*:** Покровская Н.Н., Шуклин И.А., Егоров А.С., Давыдкина Т.В., Янкилевич А.А., Наумова А.Н., Горелик Г.Д. Опыт проведения магнитотеллурических исследований с использованием активных электродов с предусилителями в районе залива Прюдс, Восточная Антарктида // Записки Горного института. 2026. С. 1-11. EDN NHXXNT

Аннотация
Статья посвящена результатам опытно-методических работ по применению магнитотеллурического зондирования в районе российской станции Прогресс (Земля Принцессы Елизаветы, Восточная Антарктида). Исследования выполнены полевым отрядом Санкт-Петербургского горного университета в ходе 71-й Российской антарктической экспедиции (2025-2026 гг.) и являются продолжением комплексных геолого-геофизических работ по изучению Восточной Антарктиды. Основное внимание уделено особенностям практического применения метода в условиях высоких полярных широт. Рассмотрены вопросы обеспечения работоспособности аппаратуры, логистики полевых работ, а также влияния физико-географических условий на измерения. Изучение геологического строения Антарктического континента затруднено в связи с наличием мощного ледникового покрова, что обеспечивает ведущую роль геофизических методов в решении этой проблемы. Представлены результаты практического использования российского электроразведочного аппаратурно-программного измерительного комплекса Nord и канадского MTU-5A, в том числе совместно с предусилителями, предназначенными для компенсации высокого контактного сопротивления заземления. Опытно-методический профиль заложен вкрест «линеамента Эймери» – крупной линейной магнитной аномалии, простирающейся в субширотном направлении на расстояние более 500 км. Выполнена комплексная интерпретация магнитотеллурических данных и аномального магнитного поля. Построен разрез удельного электрического сопротивления посредством двумерной инверсии, а также решена прямая задача для магнитного поля. В результате предложена модель строения протерозойской шовной зоны, породы которой создают положительную аномалию в магнитном поле. На разрезе электрического сопротивления этой структуре соответствуют аномалии повышенной проводимости на глубинах более 10 км. Полученные данные открывают новые возможности для изучения глубинного строения и геодинамики восточной части Антарктиды.

Ключевые слова
магнитотеллурическое зондирование; складчатый пояс залива Прюдс; двумерная инверсия; Восточная Антарктида; глубинное строение; высокое контактное сопротивление; активные электроды с предусилителем

Финансирование
Исследования проведены с помощью субсидии на выполнение Государственного задания в сфере научной деятельности на 2024 г. (№ FSRW-2024-0003).

Поступила: 15.06.2026 ***Принята: 31.08.2026*** ***Онлайн: 02.09.2026***

Введение

Складчатый пояс залива Прюдс содержит следы гренвильского и неопротерозойско-кембрийского орогенеза, что делает его изучение ключевым в понимании эволюции суперконтинентов Родинии и Гондваны [1-3]. В районе станции Прогресс, в субширотном направлении, расположена крупная линейная магнитная аномалия, получившая название «линеамент Эймери» [4]. Ближайшие выходы коренных пород расположены на территории оазиса Холмы Ларсеманн, в пределах

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

которого обнажены орто- и парагнейсы амфиболитовой и гранулитовой фаций [5-7]. Результаты подледникового бурения показали, что магнитная аномалия вызвана преимущественно мафическими гранулитами, протолиты которых образовались в обстановке островной дуги примерно 970 млн лет назад при столкновении провинции Рэйнер с Индийским кратоном. Впоследствии данные породы подверглись метаморфизму гранулитовой и амфиболитовой фаций. Отмечается содержание пирротина, пирита, халькопирита, магнетита и ильменита в отобранных образцах горных пород [8].

Метод магнитотеллурического зондирования (МТЗ) успешно применяется в Антарктиде для уточнения глубинного строения земной коры и верхней мантии с 1964 г. [9, 10]. Анализ распределения аномалий электропроводности пород земной коры позволяет выделять глубинные разломы, оконтурить крупные геологические структуры, а также помогает в изучении тектонической эволюции исследуемого региона. Проведение МТЗ в данном районе осложняется экстремально низкими температурами, трещинами в прибрежных частях ледника, нарушениями принципа плоской волны, наличием «берегового эффекта», мощным ледниковым покровом до 4 км (в районе работ мощность ледника составляет до 800 м [11]) с высоким контактным сопротивлением, а также ветровыми помехами и связанной с ними поземкой – движением заряженных частиц при переносе снега под воздействием ветра [10, 12]. Для минимизации искажающих эффектов выполнена адаптация графа обработки регистрируемых данных, а также специальная подготовка аппаратуры, например использование активных электродов с предусилителями позволяет минимизировать влияние высокого контактного сопротивления ледника [13, 14], а удлиненные приемные электрические линии позволяют уменьшить влияние ветровой помехи [15]. Увеличение длительности регистрации данных до 5-7 дней позволяет устранить проблему, связанную с ветровой помехой [16-18].

Предыдущие магнитотеллурические исследования складчатого пояса залива Прюдс, проведенные в ходе 36-й Китайской национальной исследовательской экспедиции (2019-2020 гг.) с использованием неполяризующихся электродов, позволили получить представление о характере геоэлектрического разреза от побережья до центральной части «линеамента Эймери» на глубину до 60 км [19-21]. Тела высокой электрической проводимости, соответствующие положению положительных магнитных аномалий, по мнению китайских ученых, связаны с аномальным эффектом неопротерозойской шовной зоны между Индо-Антарктидой и Восточной Антарктидой. Повышенная проводимость тел объяснялась возможным наличием графита и сульфидов, связанных с метаморфизмом при образовании шовных зон.

Важнейшей исследовательской целью полевого отряда Санкт-Петербургского горного университета в ходе 71-й Российской антарктической экспедиции (РАЭ) являлась отработка методики магнитотеллурического зондирования в условиях высоких полярных широт в районе станции Прогресс (Земля Принцессы Елизаветы, Восточная Антарктида) на поверхности ледника с использованием активных электродов с предусилителями. Данные исследования направлены на изучение глубинного строения в районе структуры предполагаемой протерозойской шовной зоны между Восточной Антарктидой и Индо-Антарктидой и являются продолжением программы комплексных работ Санкт-Петербургского горного университета по изучению Восточной Антарктиды [22-24]. Опытный профиль был задан вкрест простирания линейной положительной магнитной аномалии (рис.1).

Методы

В сезон 71-й РАЭ получены данные магнитотеллурических съемок на 13 точках зондирования, из которых 11 расположены вдоль профиля, заложенного вкрест «линеамента Эймери», с полным его пересечением. Исследуемый профиль имеет общую протяженность 25 км, проходит вдоль снежной трассы Прогресс – Восток, расстояние между точками зондирования составило 2,5 км (рис.1).

Опытно-методические работы (ОМР) выполнялись с использованием двух видов аппаратно-программных комплексов: MTU-5A производства Phoenix Geophysics Ltd и Nord Plus производства ООО «Северо-Запад». Для измерений на точке зондирования использовалась пятиканальная крестообразная установка, азимуты электрических линий и индукционных датчиков магнитного поля Hx и Hy составляли 0° и 90°соответственно. В каждой точке измерялись пять компонент

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© Н.Н.Покровская, И.А.Шуклин, А.С.Егоров, Т.В.Давыдкина, А.А.Янкилевич, А.Н.Наумова, Г.Д.Горелик, 2026

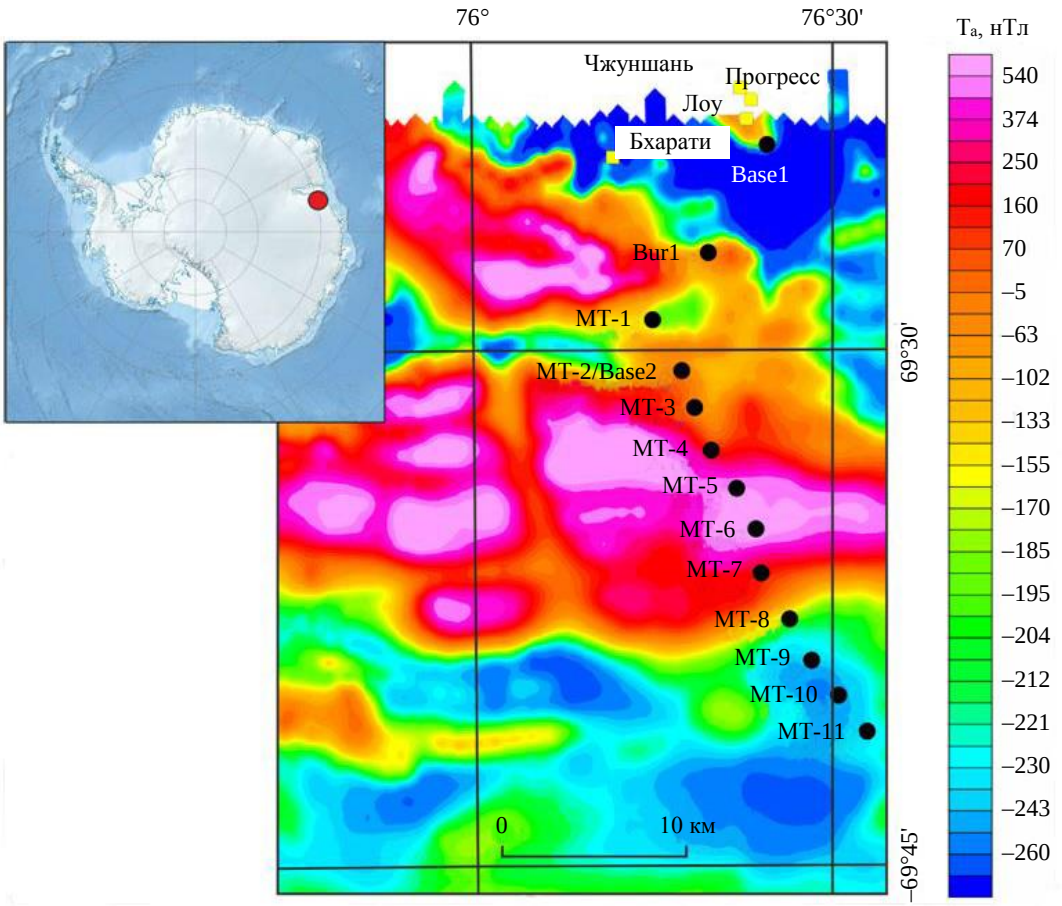


Рис.1. Аномальное магнитное поле западной части Земли Принцессы Елизаветы [4]
MT – точки МТЗ; Bur – точка бурения; Base – базовая станция

электромагнитного поля – электрические (Ex, Ey) и магнитные (Hx, Hy, Hz) (рис.2). Для уменьшения влияния ветровой помехи использовались приемные электрические линии длиной 300 м. Регистрация вариаций электрического поля в условиях мощного ледового покрова осуществлялась с помощью активных электродов с предусилителями (ООО «Северо-Запад»). Основные характеристики предусилителей: частотный диапазон 0,0001-1000 Гц, входное сопротивление 1 МОм, внешнее биполярное питание 12 В. Электроды выполнены из нержавеющей стали, габаритные размеры 350×450×1,2 мм. На начальном этапе ОМР заземление металлических пластинчатых электродов проводилось путем закапывания в снег как в горизонтальном положении на глубину около 30 см, так и в вертикальном. Различий при разных вариантах установки в параметрах контактного сопротивления, величине постоянной составляющей напряжения между электродами (DC) и качестве кривых сопротивления не обнаружено. В дальнейшем для измерений вариаций электрического поля в точках зондирования пластина активных электродов закапывалась вертикально, так как это сокращало время установки и сбора оборудования после завершения съемок. Контактные сопротивления снежно-фирновой толщи

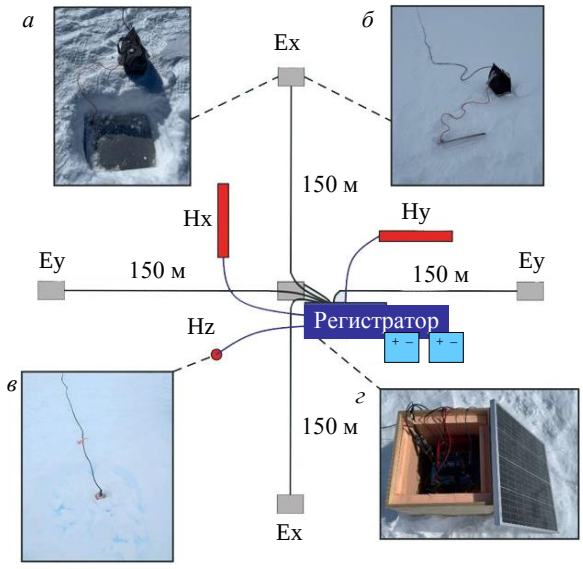


Рис.2. Схема измерительной установки МТЗ
На врезках показаны варианты установки электродов горизонтально (*а*) и вертикально (*б*), рабочее положение вертикального датчика магнитного поля (*в*), использование термобокса с системой солнечного электропитания (*г*)

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

в районе работ варьировалось в пределах от 0,4 до 2 МОм со средними значениями 0,6-0,8 МОм. Магнитное поле регистрировалось низкочастотными индукционными датчиками МТС-50 (Phoenix Geophysics ltd.) и широкополосными индукционными датчиками IMS-015 (ООО «Vega»).

Индукционные датчики Hx и Hy для уменьшения влияния ветровой помехи и перепада температур устанавливались в снежно-фирновую толщу на глубину 30-40 см, сверху засыпались снегом. Вертикальный датчик магнитного поля Hz также полностью закапывался в снег, поверхность над ним выравнивалась. Солнечная радиация в условиях полярного лета может существенно нагревать поверхность пластинчатых электродов, индукционных датчиков и кабелей, вследствие чего снег вокруг них активно тает. Это может негативно сказываться на качестве регистрируемых данных из-за существенного изменения положения индукционного датчика, а также уменьшения площади контакта пластины электрода со снегом.

Среднее время установки оборудования при работе в точке зондирования МТЗ с удлиненными 300-метровыми линиями силами двух человек составило 1,5-2 ч. Время, необходимое для сбора станции МТЗ с точки регистрации, – 1 ч. При многодневной записи в сочетании с продолжительными метелями, протаиванием на глубину более 20 см и последующим заметанием магнитных и электрических линий время снятия оборудования с точки зондирования увеличивалось до двух часов.

Передвижение по профилю МТЗ осуществлялось на снегоболотоходе «Бурлак». Время передвижения между точками профиля (2,5 км) составляло около 10 мин. Скорость движения по дорогам на леднике при хорошей погоде и видимости может достигать 40 км/ч. В метель, при низкой облачности, влажном снеге движение по леднику может быть затруднено.

Перед началом опытных работ были выполнены калибровки измерительных комплексов МТЗ, проведен тест на идентичность записи. Регламентные работы выполнялись непосредственно на леднике в районе профиля МТЗ. Для проведения работ было задействовано шесть комплектов аппаратуры МТЗ, для рядовых измерений по профилю использовалось три комплекта.

Использование удаленной базовой точки. Для подавления некоррелируемых шумов и повышения качества регистрируемых данных измерения проводились в синхронном режиме с двумя удаленными базовыми станциями (в дальнейшем для обработки выбиралась одна). Первая базовая станция (Base1) была установлена в зоне, частично свободной от ледника, на обнажении горных пород в 9 км от профиля МТЗ, измерения проводились с помощью аппаратно-программного комплекса MTU-5A. Длина электрических диполей составляла 90 м, заземления осуществлялись в грунт неполяризующимися графитовыми электродами NW-4 (ООО «Северо-Запад»). Сопротивления заземления составили 3,2-5,5 кОм. Индукционные датчики магнитного поля Hx и Hy закапывались в грунт, вертикальный индукционный датчик Hz устанавливался на штативе Agcos.

Вторая базовая станция (Base2) была установлена на профиле на леднике, измерения проводились аппаратно-программным комплексом Nord Plus. Параметры установки Base2 идентичны рядовым точкам зондирования на профиле.

Ветровые помехи. В связи с сильными длительными ветрами на леднике время регистрации данных МТЗ приходилось увеличивать. Ветровая помеха и связанная с ней поземка существенно влияют на качество получаемых полевых данных. Вызванная поземкой помеха на кривой сопротивления наблюдается в диапазоне частот 0,5-100 Гц. На временных рядах по электрическим каналам она проявляется значениями за пределами динамического диапазона аналого-цифрового преобразователя – «зашкалами». Количество «зашкалов» по электрическим каналам при записях на профиле в разные дни варьировалось от 17,1 до 33,4 %, на магнитные каналы поземка влияет меньше. Ветровая помеха, связанная с механическим колебанием проводов, не оказывает сильного влияния на качество записи, так как электрические и магнитные провода втаивают в снег и остаются неподвижными.

Полевые работы проводились с 29 декабря 2025 г. по 4 февраля 2026 г. В конце декабря и до середины января дневные температуры в районе полигона ОМР – точки бурения – в солнечную погоду держались от +5 до +10 °С, ночные от 0 до –5 °С, снег был мягким и влажным. В это время поземка не наблюдалась. На профиле МТЗ, начало которого расположено южнее на 5 км,

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

температуры на 3-5 °С ниже, чем на полигоне. Поземку при хорошей погоде можно было наблюдать в вечерние часы до утра следующего дня. На полигоне ОМР в это время поземки могло не быть. С похолоданием (с середины января), когда дневные температуры стали снижаться до –5 °С, ночью столбик температуры опускался до отметки от –10 до –15 °С, скорость ветра усилилась, начались метели, поземка на профиле стала появляться днем, на точке бурения – реже.

Для минимизации влияния ветровых помех и получения качественных данных МТЗ время записи на точке было увеличено до 3-7 дней. В результате работ было определено рекомендуемое время записи, позволяющее получить значения удельного электрического сопротивления до глубины 50-100 км. При благоприятных метеорологических условиях для получения качественных данных необходимо 36-48 ч непрерывной синхронной записи. При неблагоприятной погоде, поземке, чтобы поймать погодное окно, рекомендуется проводить измерения более 72 ч.

Термобоксы. Для продолжительных записей на точке МТЗ при минусовых температурах измерительные станции вместе с аккумулятором располагались в специальных термобоксах, стенки которых были дополнительно утеплены. Для длительных записей использовались две аккумуляторные гелевые батареи емкостью 90 А·ч. Использование термобокса показало, что он должен быть максимально герметичным, чтобы не допускать попадания внутрь снега во время сильного ветра и метелей. Для того, чтобы бокс лучше прогревался на солнце и был заметен на снегу, желательно окрасить его в темный цвет. Закапывать бокс в снег, чтобы сохранить тепло, не требуется, в том числе при работах в условиях Центральной Антарктиды и станции Восток, где температура снега на глубине около одного метра не поднимается выше –40 °С [25]. Для увеличения длительности записи без замены аккумуляторной батареи возможно использование системы солнечного электропитания. Отсутствие необходимости постоянной замены батареи оптимизирует полевые работы – снижает общий вес оборудования при транспортировке и минимизирует затраты на зарядку батарей.

Оперативная оценка качества полевого материала. Оперативная оценка качества материалов МТЗ проводилась каждые несколько дней для принятия решения о возможности переноса аппаратуры на следующую точку зондирования. Проверялись данные с базовой точки Base2 – данные с регистратора Nord скачивались на смартфон по Wi-Fi без остановки записи. Предварительная обработка данных и оценка качества кривых кажущегося сопротивления происходила на смартфоне через Web-браузер. В случае выявления высокого уровня помех на рассчитанной кривой базовой точки дальнейшая проверка рядовых точек не проводилась, все станции оставались на месте для продолжения регистрации.

Оценка качества зарегистрированных данных с регистратора MTU-5A осуществлялась с использованием программы EPI-KIT и MT-Corrector (ООО «Северо-Запад»), входящих в состав аппаратурно-программного электроразведочного измерительного комплекса Nord Plus.

Обработка полевых данных с регистраторов Nord Plus и MTU-5A проводилась в программе EPI-KIT. Для каждой точки зондирования кривые удельного электрического сопротивления рассчитывались последовательно с двумя разными базовыми станциями, после чего полученные результаты сравнивались, для дальнейшей работы принимался один оптимальный вариант.

При расчете кривых МТЗ участки временных рядов с сильной ветровой помехой вырезались. Кривые сопротивления с ветровыми помехами, рассчитанные совместно с базовой точкой, установленной в районе, частично свободном от ледника (Base1), имеют лучшее качество по сравнению с кривыми, рассчитанными с базовой точкой, установленной на профиле (Base2). Для кривых сопротивления, не имеющих явных ветровых помех, разницы в качестве при расчете с разными базовыми точками не обнаружено. Для получения качественного теллурического тензора преимущество имеет использование базовой точки, расположенной на грунте.

Для учета и оценки эффекта источника (неплоской волны) расчет кривых проводился с использованием варианта робастной обработки Jackknife [26] и анализа временной изменчивости рассчитанных передаточных функций по участкам записи.

В результате работ были получены кривые сопротивления и фазы импеданса в диапазоне 0,0015-286 Гц комплексом MTU-5A и 0,0015-1065 Гц комплексом Nord Plus (рис.3). Далее проводилась отбраковка зашумленных участков записи по каждой частоте в ручном режиме и сплайн

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© Н.Н.Покровская, И.А.Шуклин, А.С.Егоров, Т.В.Давыдкина, А.А.Янкилевич, А.Н.Наумова, Г.Д.Горелик, 2026

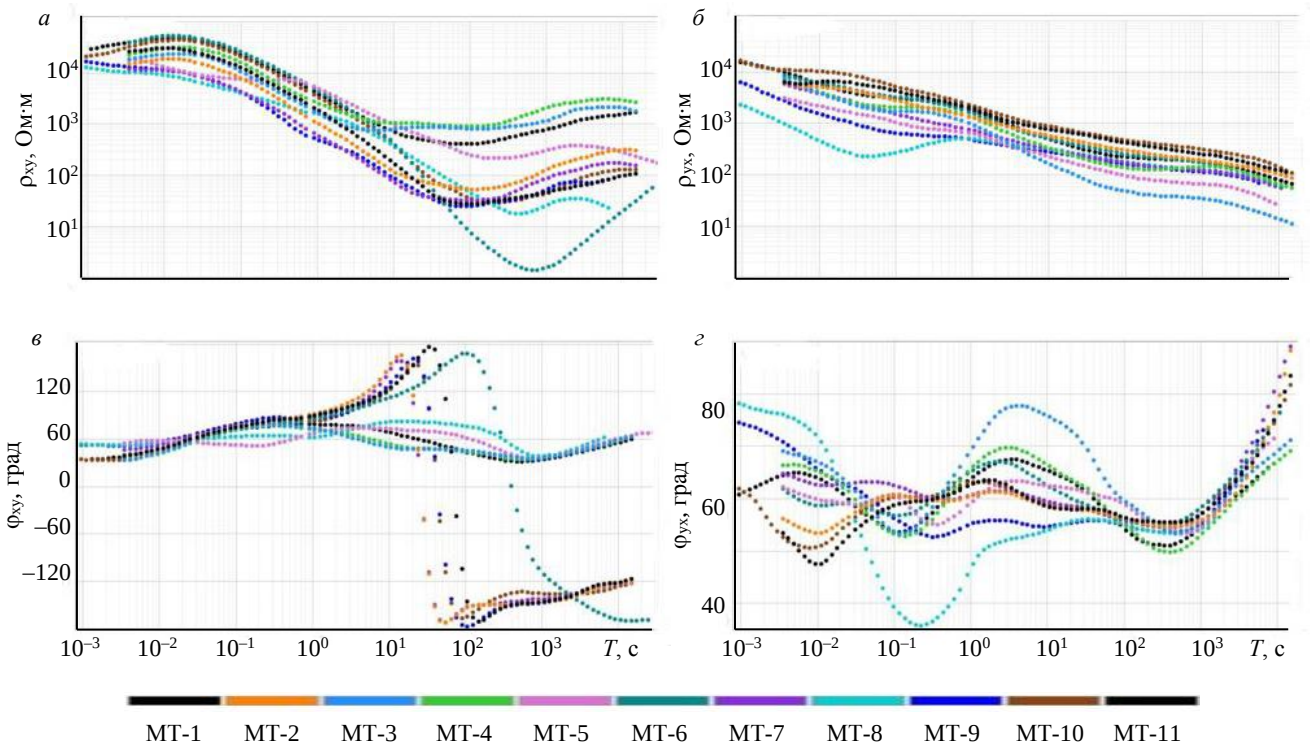


Рис.3. Кривые удельного электрического сопротивления xy (*а*) и yx (*б*) и фазы импеданса xy (*в*) и yx (*г*) в точках MT-1-MT-11

по осредненным данным с использованием дисперсионных соотношений второго рода, алгоритм которого реализован в программе MT-Corrector [27-29].

На кривых MT-2-MT-8 фаза импеданса Zxy выходит из своего квадранта в средне- и низкочастотном диапазоне (ниже 0,035 Гц), это может быть связано с существованием глубинного анизотропного проводника.

Обсуждение результатов

Размерность геоэлектрической среды оценивалась по магнитотеллурическому тесту [30] с помощью инвариантных параметров *N*, $Skew_B$ и β. Пороговые значения для безразмерных величин *N* и $Skew_B$ заданы равными 0,2, для β – 3°. Параметр *N* оконтуривает одномерные области, $Skew_B$ – двумерные или осесимметричные, а β – трехмерные геоэлектрические структуры.

Псевдоразрезы параметров неоднородности указывают на отклонение геоэлектрической среды от одномерной, так как параметр *N* превышает пороговое значение на всем частотном диапазоне. В центральной части профиля параметр $Skew_B$ принимает высокие значения на частотах ниже 10 Гц, что свидетельствует о наличии трехмерного объекта в глубинной части разреза. Параметр β, характеризующий степень асимметрии среды, также имеет высокие значения на частотах ниже 10 Гц, однако их область локализована в двух отдельных интервалах – до 0,01 Гц и ниже 10^{-3} Гц (рис.4), что может свидетельствовать об ограниченном по глубине трехмерном объекте.

Азимут простирания геоэлектрических структур с неоднозначностью 90° определялся на основе анализа диаграмм главных направлений и эллипсов фазового тензора (рис.4, *г*, *д*), построенных в программе Inversio (НТЦ «Северо-Запад»). Окончательный выбор угла осуществлялся с учетом априорной информации. Геоэлектрический разрез характеризуется двумя различными простираниями. Для верхней части разреза (частотный диапазон до 100 Гц) одно из главных направлений определяется как 10°. Учитывая субширотное простирание магнитной аномалии, этот азимут принят за поперечное направление. Для полного частотного диапазона и для глубинной части угол меняется, что может свидетельствовать о региональной структуре или влиянии океана на данные МТЗ. В этом случае за продольное направление был принят угол 45° – параллельно береговой линии.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© Н.Н.Покровская, И.А.Шуклин, А.С.Егоров, Т.В.Давыдкина, А.А.Янкилевич, А.Н.Наумова, Г.Д.Горелик, 2026

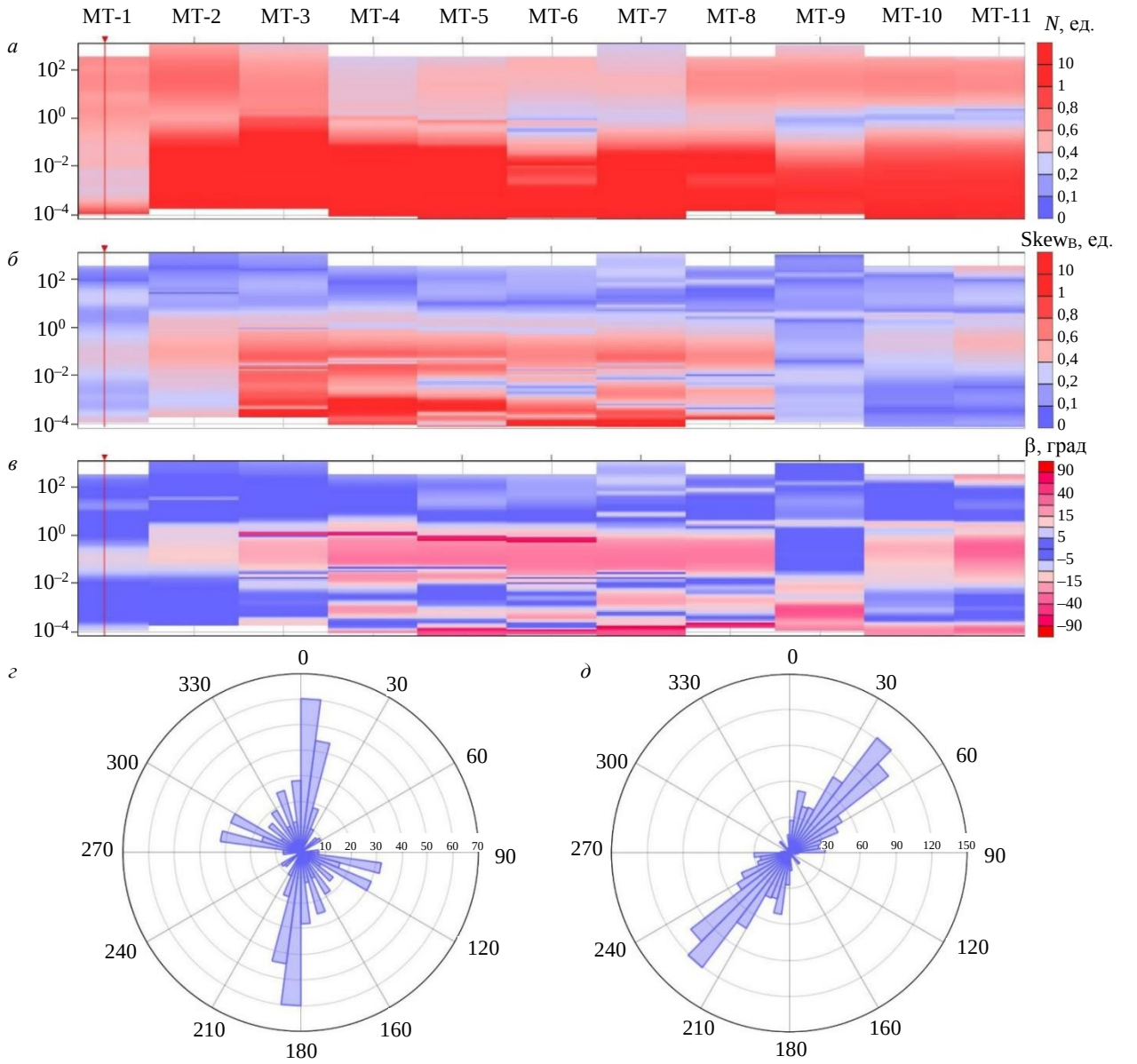


Рис.4. Параметры неоднородности среды *N* (*а*), Skewв (*б*), β (*в*) и диаграммы главных направлений фазового тензора для диапазона 1-100 Гц (*г*) и полного частотного диапазона (*д*)

Для комплексной интерпретации геофизических данных [31, 32] в работе использованы результаты аэромагнитных съемок, выполненных в ходе 68-й Российской антарктической экспедиции (2022-2023 гг.) [4]. Данные аномального магнитного поля традиционно используются для изучения глубинного строения различных тектонических структур [33-35]. Выполнено моделирование разреза земной коры с использованием алгоритма решения прямой задачи магниторазведки в программе Oasis montaj (Geosoft Inc.). Моделируемый разрез заложен вдоль магнитотеллурического профиля. При построениях авторы исходили из предположения о приуроченности крупной линейной магнитной аномалии к протерозойской шовной зоне [8]. Структура магнитного поля может быть объяснена индуцированной намагниченностью клиновидной сутуры глубинного заложения с магнитной восприимчивостью $\chi = 70 \cdot 10^{-3}$ и двумя телами в верхней коре с магнитной восприимчивостью $\chi = 35 \cdot 10^{-3}$, интерпретируемых как проявление тектонического покрова на фоне вмещающих пород консолидированного кристаллического фундамента с магнитной восприимчивостью $\chi = 6{,}3 \cdot 10^{-3}$ (рис.5) с использованием значения нормального поля T = 54130 нТл, наклонения I = –71,64°, склонения D = –81,75°. Моделирование обеспечило сходимость между наблюденными и расчетными данными магнитного поля с ошибкой менее 15 нТл.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

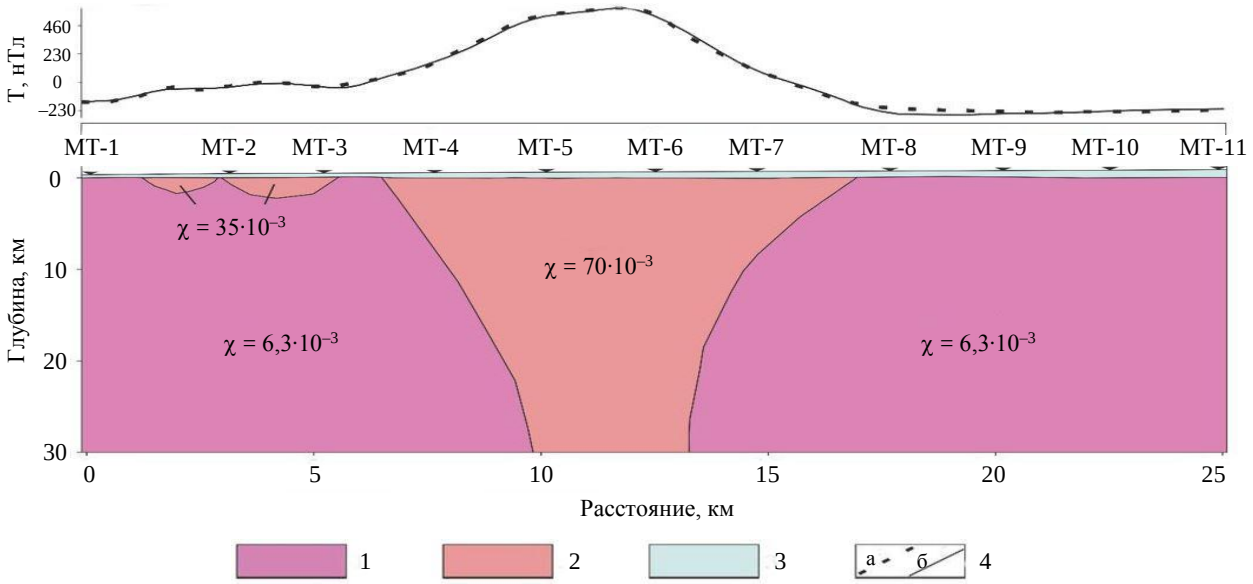


Рис.5. Моделируемый разрез земной коры вдоль исследуемого профиля по данным аномального магнитного поля
1 – континентальная кора; 2 – породы шовной зоны; 3 – ледник; 4 – наблюденное (а) и рассчитанное (б) магнитное поле

В связи с небольшим количеством точек наблюдений и их линейным расположением принято решение проводить двумерную инверсию, несмотря на возможные искажения от трехмерных объектов. Двумерная инверсия магнитотеллурических данных осуществлялась в специализированном программном обеспечении WinGLink (Geosystem Srl). В качестве стартовой модели был использован результат одномерной инверсии. Сетка для магнитотеллурической инверсии создана с учетом рельефа, так как в районе работ наблюдается значительный перепад высот (около 470 м). Размер сетки составляет 77 строк и 37 столбцов, ячейки имеют прямоугольную форму. Вертикальное разбиение частично задавалось вручную – сначала автоматическое разделение с постепенным увеличением размера ячеек с глубиной, затем дополнительное разбиение для большей детальности. Горизонтальный шаг сетки выбран таким образом, чтобы минимальный размер ячейки составлял не менее половины расстояния между соседними точками измерения.

При построении глубинного геоэлектрического разреза ось *x* была повернута на 45°. Для инверсии использовались последовательно продольная и поперечная компоненты магнитотеллурического зондирования и типпер, так как они имеют различную чувствительность к геоэлектрическим неоднородностям [30]. Параметр регуляризации τ варьировался от 30 до 3. На первом этапе проводилась инверсия только по продольной компоненте, так как она более чувствительна к глубинным структурам. Результат инверсии служил стартовой моделью для второго этапа – инверсии по поперечной компоненте, которая лучше восстанавливает верхнюю часть разреза, и типперу, чувствительному к неоднородностям среды. На финальном этапе использовалась бимодальная инверсия на основе предыдущего этапа. В результате получен геоэлектрический разрез, ошибка подбора модели составила около 3 % (рис.6). В дальнейшем планируется уточнение разреза при получении дополнительной информации.

Анализ общей структуры геоэлектрического разреза показывает, что среднее удельное сопротивление в северной части, примыкающей к океану, ниже, чем в южной, уходящей вглубь антарктического континента. На разрезе электрического сопротивления выделяются зоны повышенной электрической проводимости (С1 и С2) на глубинах более 10 км. Их природа может объясняться проявлением глубинных тектонических разломов, оперяющих протерозойскую шовную зону, положение которой выделено по результатам моделирования данных аномального магнитного поля, а также высокой проводимостью сульфидных пленок, встречающихся при данном типе метаморфизма. В верхней части разреза положению сутуры соответствует зона повышенного электрического сопротивления (R1), что может объясняться сочетанием низких температур и разрывом пленок на границах зерен при низком давлении [16]. В южной части разреза наблюдается повышение

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© Н.Н.Покровская, И.А.Шуклин, А.С.Егоров, Т.В.Давыдкина, А.А.Янкилевич, А.Н.Наумова, Г.Д.Горелик, 2026

удельного электрического сопротивления (R2), которое ассоциируется с высокоомными породами континентальной коры Восточной Антарктиды. В северной части разреза на глубинах 22-35 км выделяется зона повышенной проводимости, которая авторами интерпретируется как возможное влияние океана.

Заключение

В ходе работ, выполненных сотрудниками Санкт-Петербургского горного университета в составе 71-й Российской антарктической экспедиции, успешно апробирована методика магнитотеллурического зондирования в условиях высоких полярных широт с использованием активных электродов с предусилителями. Полученные результаты подтверждают возможность проведения МТЗ на поверхности снежно-фирновой толщи с высоким значением контактного сопротивления.

Выполнено сравнение многодневных записей магнитотеллурического поля, полученных с помощью оборудования канадской компании Phoenix Geophysics ltd. и российской ООО «Северо-Запад». Качество кривых, полученных комплексами разных производителей, не различается. При продолжении работ возможно использование как зарубежного, так и российского оборудования. В целях оптимизации технологии полевых работ рекомендуется использовать только один вид геофизического оборудования – здесь российское оборудование имеет ряд преимуществ, таких как наличие универсального широкодиапазонного индукционного датчика магнитного поля, что позволяет в процессе одной записи получать данные в аудиомагнитотеллурическом и магнитотеллурическом диапазонах одновременно, возможность оценивать качество данных, не останавливая их регистрацию, а также более компактные размеры.

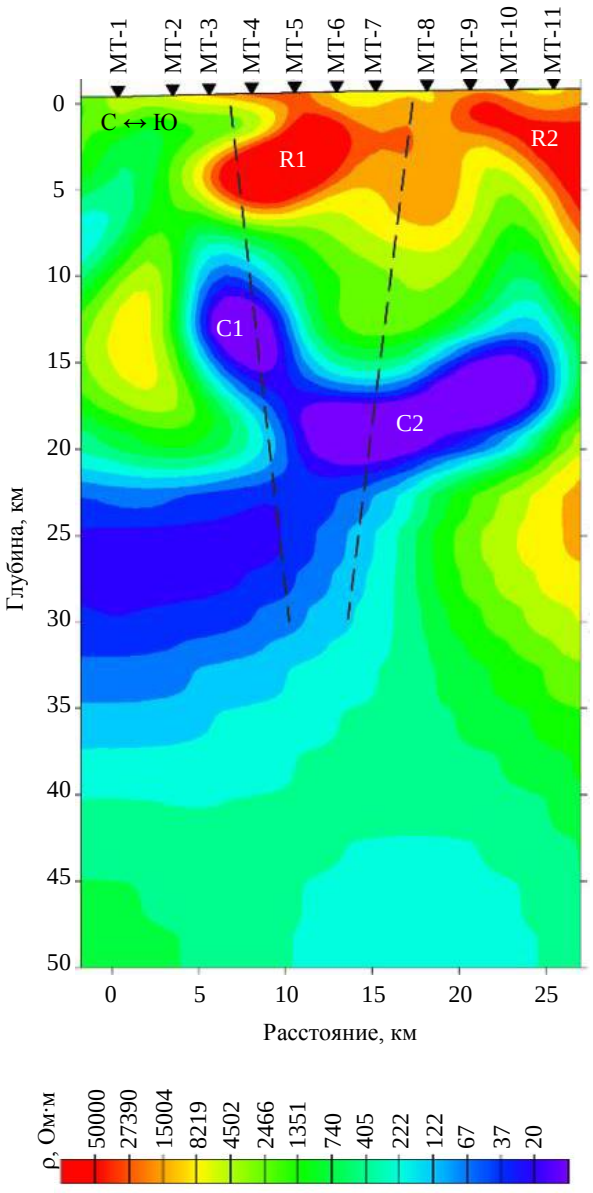


Рис.6. Геоэлектрический разрез вдоль исследуемого профиля. Пунктирными линиями показаны предполагаемые глубинные разломы

Интерпретация полученного геоэлектрического разреза позволила выявить особенности глубинного строения исследуемого района. Глубинные зоны повышенной проводимости могут быть аномальным эффектом протерозойской шовной зоны и ограничивающих ее разломов. Совместный анализ данных МТЗ и магнитного поля подтверждает сложное строение исследуемой структуры и перспективность дальнейшего комплексного изучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Gupta S., Chatterjee S., Arora D. et al.* Locating the Indo-Antarctica suture – Correlating the Rengali, Rauer and Ruker terranes in Gondwana // Polar Science. 2021. Vol. 30. № 100689. DOI: 10.1016/j.polar.2021.100689

2. *Fitzsimons I.C.W.* Grenville-age basement provinces in East Antarctica: Evidence for three separate collisional orogens // Geology. 2000. Vol. 28. № 10. P. 879-882. DOI: 10.1130/0091-7613(2000)28<879:GBPIEA>2.0.CO;2

3. *Wei-(Rz) Wang, Yue Zhao, Chunjing Wei et al.* High-Ultrahigh Temperature Metamorphism in the Larsemann Hills: Insights into the Tectono-Thermal Evolution of the Prydz Bay Region, East Antarctica // Journal of Petrology. 2022. Vol. 63. Iss. 2. № egac002. DOI: 10.1093/petrology/egac002

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

4. *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

5. *Stüwe K., Braun H.-M., Peer H.* Geology and structure of the Larsemann Hills area, Prydz Bay, East Antarctica // Australian Journal of Earth Sciences. 1989. Vol. 36. Iss. 2. P. 219-241. DOI: 10.1080/08120098908729483

6. *Sadiq M., Bhandari A., Arora D. et al.* Late Neoproterozoic metamorphic evolution of Larsemann Hills, East Antarctica: Insights from pseudosection modelling and monazite-zircon geochronology of Easther Island porphyroblastic gneiss // Journal of Earth System Science. 2024. Vol. 133. Iss. 4. № 238. DOI: 10.1007/s12040-024-02434-9

7. *Бабенко И.А., Таловина И.В., Ушаков Д.Е., Крикун Н.С.* Пегматиты оазиса Холмы Ларсеманн, Восточная Антарктида: новые полевые геологические и геофизические данные // Записки Горного института. 2025. Т. 273. С. 65-79.

8. *Abdrakhmanov I., Leitchenkov G., Skublov S. et al.* Neoproterozoic crustal evolution of Rayner province, East Antarctica: New insight from subglacial drilling // Polar Science. 2026. Vol. 47. № 101314. DOI: 10.1016/j.polar.2025.101314

9. *Hessler V.P., Jacobs J.* A Telluric Current Experiment on the Antarctic Ice Cap // Nature. 1966. Vol. 210. P. 190-191. DOI: 10.1038/210190a0

10. *Hill G.J.* On the Use of Electromagnetics for Earth Imaging of the Polar Regions // Surveys in Geophysics. 2020. Vol. 41. Iss. 1. P. 5-45. DOI: 10.1007/s10712-019-09570-8

11. *Pritchard H.D., Fretwell P.T., Fremand A.C. et al.* Bedmap3 updated ice bed, surface and thickness gridded datasets for Antarctica // Scientific Data. 2025. Vol. 12. № 414. DOI: 10.1038/s41597-025-04672-y

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

13. *Hill G.J., Wannamaker P.E., Maris V. et al.* Trans-crustal structural control of CO_2-rich extensional magmatic systems revealed at Mount Erebus Antarctica // Nature Communications. 2022. Vol. 13. № 2989. DOI: 10.1038/s41467-022-30627-7

14. *Wannamaker P.E., Stodt J.A., Olsen S.L.* Dormant state of rifting below the Byrd Subglacial Basin, West Antarctica, implied by magnetotelluric (MT) profiling // Geophysical Research Letters. 1996. Vol. 23. Iss. 21. P. 2983-2986. DOI: 10.1029/96GL02887

15. *Wannamaker P.E., Stodt J.A., Pellerin L. et al.* Structure and thermal regime beneath the South Pole region, East Antarctica, from magnetotelluric measurements // Geophysical Journal International. 2004. Vol. 157. Iss. 1. P. 36-54. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2004.02156.x

16. *Peacock J.R., Selway K.* Magnetotelluric investigation of the Vestfold Hills and Rauer Group, East Antarctica // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2016. Vol. 121. Iss.4. P. 2258-2273. DOI: 10.1002/2015JB012677

17. *Wannamaker P., Hill G., Stodt J. et al.* Uplift of the central transantarctic mountains // Nature Communications. 2017. Vol. 8. № 1588. DOI: 10.1038/s41467-017-01577-2

18. *Gustafson C.D., Key K., Siegfried M.R. et al.* A dynamic saline groundwater system mapped beneath an Antarctic ice stream // Science. 2022. Vol. 376. № 6593. P. 640-644. DOI: 10.1126/science.abm3301

19. *Lei Fu, Jingxue Guo, Weisen Shen et al.* Geophysical Evidence of the Collisional Suture Zone in the Prydz Bay, East Antarctica // Geophysical Research Letters. 2024. Vol. 51. Iss. 2. № e2023GL106229. DOI: 10.1029/2023GL106229

20. *Jingxue Guo, Enzhao Xiao, Juzhi Deng et al.* Electrical Structures of the Lithosphere Along the Prydz Belt: Magnetotelluric Study at Chinese Zhongshan Station, East Antarctica // Arabian Journal for Science and Engineering. 2022. Vol. 47. Iss.1. P. 695-707. DOI: 10.1007/s13369-021-05793-3

21. *Enzhao Xiao, Feng Jiang, Jingxue Guo et al.* 3D Interpretation of a Broadband Magnetotelluric Data Set Collected in the South of the Chinese Zhongshan Station at Prydz Bay, East Antarctica // Remote Sensing. 2022. Vol. 14. Iss. 3. № 496. DOI: 10.3390/rs14030496

22. *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

23. *Игнатьев С.А., Васильев Д.А., Большунов А.В. и др.* Экспериментальные исследования переноса ледяного шлама воздухом при бурении снежно-фирновой толщи // Лед и Снег. 2023. Т. 63. № 1. С. 141-152. DOI: 10.31857/S2076673423010076

24. *Litvinenko V., Trushko V.* Modelling of geomechanical processes of interaction of the ice cover with subglacial Lake Vostok in Antarctica // Antarctic Science. 2025. Vol. 37. Iss. 1. P. 39-48. DOI: 10.1017/S0954102024000506

25. *Шибаев Ю.А., Чихачев К.Б., Липенков В.Я. и др.* Сезонные вариации температуры снежной толщи и теплопроводность снега в районе станции Восток, Антарктида // Проблемы Арктики и Антарктики. 2019. Т. 65. № 2. С. 169-185. DOI: 10.30758/0555-2648-2019-65-2-169-185

26. *Епишкин Д.В.* Развитие методов обработки данных магнитотеллурического зондирования // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2016. № 4. С. 40-46. DOI: 10.33623/0579-9406-2016-4-40-46

27. *Фельдман И.С., Ермолин Е.Ю.* Амплитудно-фазовая коррекция кривых магнитотеллурического зондирования // Записки Горного института. 2011. Т. 194. С. 200-210.

28. *Zorin N., Aleksanova E., Yakovlev D., Shimizu H.* Validity of the dispersion relations in magnetotellurics: Part I – theory // Earth, Planets and Space. 2020. Vol. 72. № 9. DOI: 10.1186/s40623-020-1133-4

29. *Zorin N., Alekseev D., Epishkin D. et al.* Validity of the dispersion relations in magnetotellurics. Part II: synthetic and field data // Earth, Planets and Space. 2020. Vol. 72. № 139. DOI: 10.1186/s40623-020-01273-4

30. *Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И.* Модели и методы магнитотеллурики. М.: Научный мир, 2009. 680 с.

31. *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

32. *Яковлева А.А., Мовчан И.Б., Мединская Д.К., Садыкова З.И.* Количественные интерпретации потенциальных полей: от параметрических пересчетов к геоструктурным // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334. № 11. С. 198-215. DOI: 10.18799/24131830/2023/11/4152

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

33. *Zharkov A.M., Peskov D.V., Martynov A.V.* Identification of Hydrocarbon Accumulation Zones on Ancient Platforms in the Northern Part of Eurasian Lithospheric Plate // International Journal of Engineering, Transactions B: Applications. 2025. Vol. 38. Iss. 11. P. 2713-2727. DOI: 10.5829/ije.2025.38.11b.19

34. *Секерина Д.Д., Саитгалеев М.М., Сенчина Н.П. и др.* Роль сдвиговых дислокаций и грабен-рифтов в контроле нефтегазоносности глубинных горизонтов Русско-Часельского вала (Западно-Сибирская провинция) // Горные науки и технологии. 2025. Т. 10. № 2. С. 109-117. DOI: 10.17073/2500-0632-2025-02-399

35. *Prischepa O.M., Sinitsa N.V.* Prospects for Oil and Gas Bearing Potential of Paleozoic Basement of West Siberian Sedimentary Basin // International Journal of Engineering, Transactions B: Applications. 2025. Vol. 38. Iss. 5. P. 1098-1107. DOI: 10.5829/ije.2025.38.05b.12

***Авторы*: Нина Николаевна Покровская,** *инженер 2 категории* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), *https://orcid.org/0000-0001-8632-4134*, **Илья Алексеевич Шуклин,** *аспирант* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), *shuklinilya2007@gmail.com, https://orcid.org/0009-0009-6917-087X*, **Алексей Сергеевич Егоров,** *д-р геол.-минерал. наук, заведующий кафедрой* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), *https://orcid.org/0000-0002-3501-9145*, **Татьяна Васильевна Давыдкина,** *инженер 1 категории* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), *https://orcid.org/0000-0001-8950-5555*, **Андрей Александрович Янкилевич,** *канд. техн. наук, ведущий инженер* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), *https://orcid.org/0000-0002-6677-0812*, **Анна Николаевна Наумова,** *инженер 2 категории* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), *https://orcid.org/0000-0003-1112-1679*, **Глеб Дмитриевич Горелик,** *канд. техн. наук, доцент* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), *https://orcid.org/0000-0002-9890-5275*.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0