ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА

Journal of Mining Institute

Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Обзорная статья *Геотехнология и инженерная геология*

Особенности магнитотеллурических исследований в Антарктиде

Т.В.Давыдкина✉, А.А.Янкилевич, А.Н.Наумова

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Как цитировать эту статью: Давыдкина Т.В., Янкилевич А.А., Наумова А.Н. Особенности магнитотеллурических исследований в Антарктиде // Записки Горного института. 2025. Т. 273. № 16335. С. 80-93. EDN XCUAZK

Аннотация

Одним из приоритетных направлений научных исследований Антарктиды является изучение ее глубинного строения. На большей части материка присутствует мощный ледовый покров, поэтому основную геолого-геофизическую информацию получают с помощью геофизических методов, среди которых магнитотеллурические (МТ) обладают наибольшей глубинностью и несущественным влиянием на экологию. Возможность получения качественных МТ-данных в условиях шестого континента долгое время ставилась под сомнение. Цель работы – исследование особенностей методики магнитотеллурических работ в условиях Антарктиды. Были поставлены задачи: обобщить мировой опыт исследования Антарктиды методами МТЗ; выявить факторы, негативно влияющие на получение качественных данных; определить методы минимизации влияния этих факторов. В статье анализируются геофизические исследования, проведенные методом магнитотеллурического зондирования в антарктическом регионе с 1964 г. по настоящее время. Применение метода осложнено следующими особенностями: экстремально низкая температура влияет на падение емкости элементов питания, замерзание раствора неполяризующихся электродов и изменение прочностных свойств материалов; во время сильного ветра возникает электромагнитный шум; близость к источнику магнитотеллурического поля может нарушить принцип плоской волны, на котором базируется метод; ледовый щит, покрывающий большую часть Антарктиды, не позволяет получить оптимальные значения контактного сопротивления заземления электродов; протяженная береговая линия искажает полученные данные. Исследования влияния факторов, осложняющих работу методом МТЗ в прибрежных и центральных частях Антарктиды, позволили сформулировать рекомендации по подготовке оборудования и адаптации технологии проведения работ, модификации графа обработки и комплекса мероприятий по обеспечению безопасности, реализация которых позволит не только безопасно выполнять геофизические работы, но и получать качественные данные.

Ключевые слова

геофизические исследования; магнитотеллурическое зондирование; электроджет; авроральная зона; плоская волна; контактное сопротивление; ледяной щит; Антарктида

Финансирование

Исследование выполнено в рамках Государственного задания FSRW-2023-0002.

Поступила: 31.10.2023 ***Принята: 07.11.2024*** ***Онлайн: 24.01.2025*** ***Опубликована: 07.07.2025***

Введение

Антарктида – самый южный и труднодоступный континент. Проблемы логистики, короткий полевой сезон, покрытие практически всей поверхности мощным ледником, который в центральной части континента превышает 4 км [1] – делают эту территорию сложной для геологического изучения [2-4]. Основная часть информации о строении Антарктиды и ледовых отложений получена с помощью бурения [5-7] и геофизики [8].

Одним из геофизических методов, применяемых для изучения Антарктиды, является метод магнитотеллурического зондирования (МТЗ), основанный на изучении вариаций естественного переменного электромагнитного поля Земли. Источниками полезного магнитотеллурического сигнала служат процессы в ионосфере и магнитосфере, происходящие при взаимодействии магнитного поля Земли с плазмой солнечного ветра, при которых отсутствует необходимость применения генераторов для возбуждения поля. Благодаря глубинности и экологичности различные модификации метода МТЗ получили широкое распространение по всему миру для изучения строения осадочных бассейнов [9], глубинного строения земной коры и верхней мантии [10], а также для поиска и разведки месторождений углеводородов и твердых полезных ископаемых [11, 12].

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025. Т. 273. С. 80-93
© Т.В.Давыдкина, А.А.Янкилевич, А.Н.Наумова, 2025

В антарктическом регионе существует ряд особенностей, осложняющих проведение геофизических работ методом МТЗ и влияющих на достоверность получаемых результатов: экстремальные климатические условия, мощный высокоомный ледовый покров и близость к магнитному полюсу Земли. Для исследования методики магнитотеллурических работ в условиях Антарктиды были поставлены задачи: обобщить мировой опыт исследования Антарктиды методами МТЗ, выявить факторы, негативно влияющие на получение качественных данных, определить методы минимизации влияния этих факторов.

Обзор исследований Антарктиды МТ-методами

Несмотря на сложности, проведено достаточно большое количество исследований в различных областях Антарктиды (рис.1, *а*).

Первые исследования проводились с целью выявления принципиальной возможности регистрации теллурического сигнала в условиях высоких сопротивлений антарктического льда. В 1964 г. на станции Восток были установлены две ортогональные электрические приемные линии длиной по 200 м. Электродами служили медные полосы размером 8×0,3 м, установленные в траншею глубиной 0,3 м, которая вместе с первым слоем засыпки пропитывалась 5 %-ным водным раствором хлорида натрия [13]. Полное сопротивление приемных линий составило 400 кОм, что в разы превышает значения, считающиеся оптимальными для магнитотеллурических методов. На полученных записях наблюдался сильный шум, однако была выявлена корреляция результатов измерений электрического и магнитного полей [14]. С той же целью в 1978-1980 гг. были проведены работы в районе купола *С* в Восточной Антарктиде [15]. В обоих случаях сделан вывод о возможности проведения магнитотеллурических измерений в подобных условиях.

Целью последующих исследований было изучение глубинного строения Антарктиды. Малое количество измерений (2-4 пикета) до 1993 г. не позволяло получить подробный геологический результат. Тем не менее, выполнение этих работ имело большое практическое значение для отработки технологии проведения магнитотеллурического зондирования. В 1984 г. на леднике Пристли в северной части Земли Виктории аппаратура помещалась в термоизолированный алюминиевый корпус, в котором она нагревалась за счет собственного тепла [16]. Использование латунных шпилек в качестве электродов не дало положительных результатов. Кроме того, была проанализирована суточная запись временных рядов и положение аврорального овала, отмечена связь с интенсивностью амплитуды сигнала.

На о-ве Росса в 1991-1992 гг. измерения выполнялись на участках, практически свободных от ледяного покрова [17]. По результатам работ, проведенных в 1992 и 1993 гг. в районе станций Чанчэн (п-ов Филдс) и Чжуншань (залив Прюдс), отмечалось, что вертикальная компонента магнитного поля H_z имеет большую амплитуду, что является либо влиянием высокой электропроводности морской воды [18], либо особенностью полярного региона [19].

С 1994 г. количество измерений магнитотеллурическим методом существенно увеличивалось, так, в полевом сезоне 1994-1995 гг. в центральной части Западной Антарктиды над подледниковым бассейном Берда выполнены 12 измерений методом МТЗ (рис.1, *б*). Для уменьшения влияния высокого контактного сопротивления льда использовалась специально разработанная электрометрическая система с предусилителями, которые располагались в непосредственной близости от приемных электродов [20]. Подробно эта система рассмотрена в статье P.E.Wannamaker, описывающей результаты работ, реализованных в 2004 г. в районе Южного полюса [21]. Их целью было исследование структуры и теплового режима в центральной части Антарктиды, а также возможности получения магнитотеллурических данных в экстремальных температурных условиях Южного полюса. При изучении влияния сильного ветра на качество данных было сделано предположение, что шум во время ветра более 8 м/с связан не с движением датчиков или проводов, а с возникновением электрических зарядов во время движения кристаллов льда в воздухе.

Упомянутая система предусилителей или ее модификация использовалась и в более поздних измерениях: в 2007-2008 гг. в районе подледникового бассейна Уилкса [22], в 2008-2009 гг. в районе холмов Вестфолд и группы островов Рауэр в заливе Прюдс (рис.1, *ж*) [23] и вблизи станции Ноймайер III (рис.1, *д*) [24]. Применение подобных систем предусилителей при МТЗ в Антарктиде стало стандартом после успешных масштабных работ, проведенных с 2010 по 2012 гг. вдоль профиля длиной 550 км, проходящего через центральную часть Трансантарктических гор [25], и исследований на о-ве Росса в 2014-2017 гг. [26], целью которых было изучение глубинного геологического строения Антарктиды.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

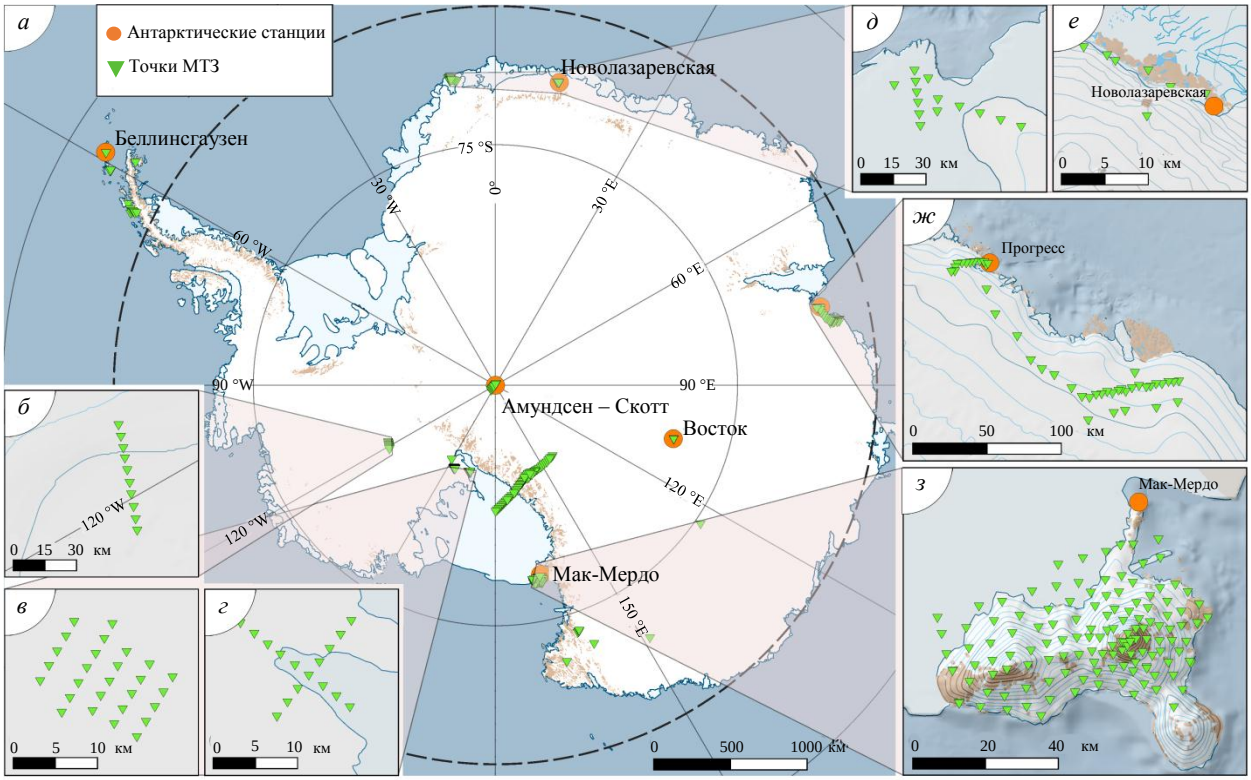


Рис.1. Районы работ методом МТЗ в Антарктиде:
а – расположение точек магнитотеллурического зондирования на карте Антарктиды; *б* – район подледникового бассейна Берда; *в* – район подледникового озера Уилланс; *г* – район предполагаемой зоны выхода в океан водотока из подледникового озера Уилланс; *д* – район станции Ноймайер III; *е* – район станции Майтри (оазис Ширмахера); *ж* – район холмов Вестфолд; *з* – район о-ва Росса

На свободных ото льда участках дополнительная модификация оборудования (предусилители) не требуется. В 2004-2006 гг. в районе оазиса Ширмахера (рис.1, *е*) изучалось строение земной коры с целью подтверждения непрерывности Мозамбикского подвижного пояса [27]. Пикеты располагались на прибрежном нунатаке. Были получены кривые магнитотеллурического зондирования удовлетворительного качества в диапазоне 10^{3}-10^{-3} Гц. Без предусилителей работали и в районе станции Чжуншань в 2019-2020 гг. [28]. Для уменьшения контактного сопротивления в лунки для электродов заливался соленый раствор, а неполяризующиеся электроды группировались для увеличения площади контакта.

В 2002 г. на станции «Академик Вернадский» была установлена мониторинговая магнитотеллурическая станция для изучения влияния аврорального электроджета [29]. В зимние месяцы (с июля по октябрь) раствор электродов замерзал. После оттаивания между согласованными парами значительно увеличилась разность потенциалов, но это не повлияло на результаты измерений. Отмечено, что приближение плоской волны справедливо на расстоянии не менее 600 км от оси аврорального электроджета.

Данные магнитотеллурического зондирования чувствительны к расплавам и повышенным температурам. В 2008 г. на активном вулкане о-ва Десепшен изучалась корреляция между магматической камерой и структурой трещин, связанных с обрушением кальдеры [30]. С 2014 по 2017 гг. проведены площадные геофизические работы, целью которых было изучение процессов мантийного магматизма и строения вулканов Эребус и Террор (рис.1, *з*) на о-ве Росса [26].

В 2018-2019 гг. выполнены комплексные геофизические работы с целью изучения систем подледниковых озер в районе озера Уилланс (рис.1, *в*, *г*). Работы подтвердили результаты моделирования, проводившегося для определения чувствительности магнитотеллурического метода к озерам под ледниковыми щитами [31, 32]. Сделано предположение, что подземные воды Антарктиды взаимосвязаны и влияют на поведение ледниковых потоков.

Параметры, характеризующие исследования МТЗ, такие как количество точек зондирований, время регистрации и технологии заземления электрических приемных линий, приведены в табл.1.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025. Т. 273. С. 80-93
© Т.В.Давыдкина, А.А.Янкилевич, А.Н.Наумова, 2025

Таблица 1

Параметры исследований МТЗ

Район работ (ф.т.з.)	Период проведения	Время регистрации	Система регистрации	Электроды	Предусилитель
Станция Восток (1)	1964	14 дней	Микровольтметр Medistor регистратор Esterline Angus	Медные полосы 800×30 см	*
Купол *C* (*)	1978-1980	~40 ч	Система, управляемая микропроцессором	*	*
Ледник Пристли (4)	1984-1985	4 дня	Цифровая система сбора данных, двухканальный электрограф	Медные пластины 50×50 см	Нет
Остров Джеймса Росса (3)	1991-1992	*	*	Неполяризующиеся электроды Cu-$CuSO_4$	Нет
Станция Чанчэн (3)	1992	4-6 дней	MMS-02 (Metronix)	*	*
Станция Чжуншань (2)	1994	*	MMS-02 (Metronix)	Свинцовые пластины и неполяризующиеся электроды Cu-$CuSO_4$	*
Подледниковый бассейн Берда (12)	1994-1995	*	*	Титановые пластины с перфорацией, 50 см	Да
Станция «Академик Вернадский» (1)	2002	*	Двухкомпонентный электрометр (ЛЦИКИ)	Неполяризующиеся электроды	*
Южный полюс (10)	2004	3 дня	Система Университета Юты	Титановые пластины 45×60 см	Да
Оазис Ширмахера (9)	2004-2006	3-4 дня	GMS-05 и ADU-06 (Metronix)	Неполяризующиеся электроды с твердым электролитом Cd-$CdCl_2$ и титановые электроды	Нет
Подледниковый бассейн Уилкса (3)	2007-2008	*	Narod Intelligent Magnetotelluric (NIMS)	Медные пластины 100×100 см	Да
Остров Десепшен (7)	2008	2-3 дня	*	*	*
Холмы Вестфолд и группа Рауэр (34)	2008-2009	5 дней	AuScope MT	Пластины из нержавеющей стали	Да
Трансантарктические горы (57)	2010-2012	4-11 дней	V-5 и V-5a (Phoenix Geophysics Ltd.)	Титановые пластины 45×60 см	Да
Вулкан Эребус и часть острова Росса (129)	2014-2017	3-12 дней	V5-2000 MT (Phoenix Geophysics Ltd.)	Титановые пластины 45×60 см	Да
Станция Чжуншань (8)	2017-2018	6-7 дней	Aether (Crystal Globe)	Неполяризующиеся электроды	Нет
Подледниковое озеро Уилланс (44)	2018-2019	> 20 ч	MTU-5C (Phoenix Geophysics Ltd.) Zen MT receiver (Zonge International Inc.)	Титановые электроды (цельные и с перфорацией)	Да
Станция Ноймайер III (14)	2019	3-13 дней	SPAM4 (The University of Edinburgh and GFZ Potsdam)	Неполяризующиеся электроды Ag-AgCl	Да
Станция Чжуншань (10)	2019-2020	1-6 дней	MTU-5A (Phoenix Geophysics Ltd.)	Группы неполяризующихся электродов с твердым электролитом Cd-$CdCl_2$	Нет

* Информация отсутствует.

Общее число магнитотеллурических зондирований, выполненных в антарктическом регионе с 1964 по 2022 гг., превышает 350 физических точек зондирования (ф.т.з.), большая часть имеет удовлетворительное качество. Основными задачами исследований являлись изучение возможности применения метода МТЗ в сложных антарктических условиях и совершенствование методики полевых работ с учетом особых требований, предъявляемых к логистическому обеспечению и безопасности. Работы выполнялись с использованием аппаратуры и программного обеспечения, разработанных в Австралии, Аргентине, Великобритании, Германии, Канаде и США. Существующие

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

российские аппаратно-программные комплексы для реализации метода МТЗ не уступают по техническим характеристикам современным зарубежным образцам и позволяют работать в различных климатических условиях, но для успешной работы в Антарктиде им требуется дополнительная модернизация.

Обсуждение результатов

По результатам обзора литературных источников выявлены основные проблемы, с которыми столкнулись исследователи в процессе деятельности. К основным факторам, оказывающим влияние на выполнение работ методом магнитотеллурического зондирования в Антарктиде, следует отнести (рис.2):

• экстремально низкую температуру (падение емкости элементов питания, замерзание раствора неполяризующихся электродов, изменение прочностных свойств материалов);

• электромагнитный шум от ветра (термоэлектрический эффект в частицах снега и льда);

• близость к источнику МТ-поля (нарушение принципа плоской волны);

• мощный ледовый щит, которым покрыта большая часть Антарктиды (высокое контактное сопротивление);

• протяженная береговая линия (аномалия берегового эффекта).

Задачи, которые вынуждены решать исследователи при работе методом МТЗ в Антарктиде, можно условно разделить на три группы: обеспечение работоспособности измерительной аппаратуры; разработка специального графа обработки данных; выполнение мероприятий по обеспечению безопасности.

Температурный и ветровой режимы. Температура окружающего воздуха «шестого континента» сильно меняется от прибрежных зон к центральной части. В табл.2 представлена среднемесячная температура воздуха на шести антарктических станциях, голубым цветом выделены станции, расположенные в центральной части Антарктиды, синим цветом – станции на побережье. Показатели температуры прибрежных районов в разы выше, чем в центральной части, где они достигают экстремально низких значений даже в летние месяцы (декабрь, январь, февраль). При этом основная часть осадков в виде снега (или дождя) выпадает на побережье.

Для оценки ветрового режима различных частей Антарктиды проведен статистический анализ скорости приземного ветра по архивным метеорологическим данным[1], полученным за 11 летних сезонов на станциях Восток и Прогресс, расположенных в центральной части и на побережье, соответственно. В качестве порогового значения использовалась скорость ветра 7 м/с, поскольку данные МТЗ, полученные в период, когда ветер превышал 6-8 м/с, оказывались низкого

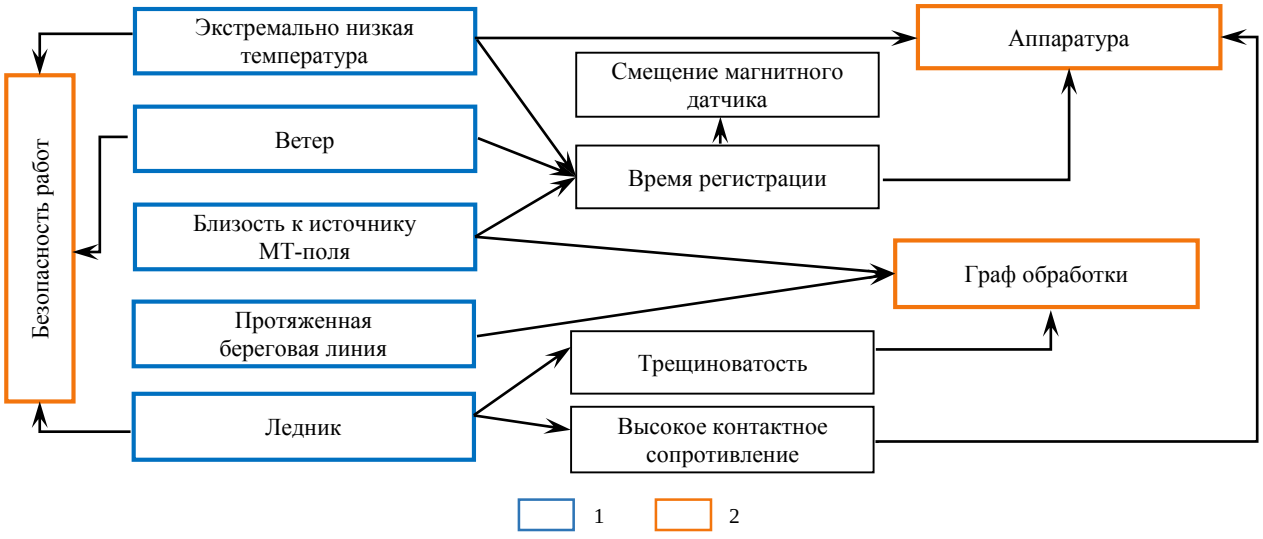


Рис.2. Основные факторы, влияющие на работы методом МТЗ в Антарктиде

1 – генерализованные особенности, оказывающие прямое или опосредованное влияние на выполнение магнитотеллурических исследований в регионе; 2 – обобщенные области исследований, наиболее подверженные влиянию особенностей Антарктиды

[1] Справочно-информационный портал «Погода и климат». URL: www.pogodaiklimat.ru (дата обращения 31.10.2023).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025. Т. 273. С. 80-93
© Т.В.Давыдкина, А.А.Янкилевич, А.Н.Наумова, 2025

качества [21, 23]. Статистическая выборка (рис.3) количества дней, в которые хотя бы одно измерение скорости ветра превышало пороговое, показывает, что ветровой режим центральной части более спокойный по сравнению с прибрежным районом. На станции Прогресс наблюдались метели продолжительностью до 7-10 дней, на станции Восток ветер такой силы фиксировался гораздо реже, например 1-2 дня за весь летний сезон, или ни разу, как в сезон 2017-2018 гг.

Таблица 2

Средняя температура воздуха на антарктических станциях[2]

Месяц	Средняя температура на станциях, °С					
	Восток	Амундсен-Скотт	Прогресс	Мак-Мердо	Беллинсгаузен	Новолазаревская
Январь	–31,8	–28,1	0,7	–2,6	1,6	–0,4
Февраль	–43,8	–40,7	–2,7	–8,8	1,6	–3,2
Март	–58,0	–53,6	–8,3	–17,4	0,5	–7,9
Апрель	–64,8	–57,4	–12,3	–21,1	–1,4	–11,7
Май	–65,7	–57,7	–14,3	–22,2	–3,0	–13,5
Июнь	–65,5	–58,1	–14,6	–22,6	–5,1	–14,5
Июль	–66,0	–60,2	–15,9	–24,7	–6,0	–17,0
Август	–66,8	–59,7	–15,5	–25,3	–5,7	–17,3
Сентябрь	–65,7	–58,9	–14,8	–22,9	–4,3	–16,5
Октябрь	–56,5	–50,9	–11,5	–16,8	–2,6	–12,1
Ноябрь	–41,5	–37,2	–4,5	–8,2	–1,1	–5,6
Декабрь	–31,4	–27,3	0,1	–2,6	0,3	–1,0

Помехи, возникающие во время сильного ветра, связаны не только с колебаниями проводов, но и с возникновением электрических зарядов в выдуваемых с поверхности частицах льда и снега. G.J.Hill [33] описывает три механизма электризации снежинок (термоэлектрический эффект).

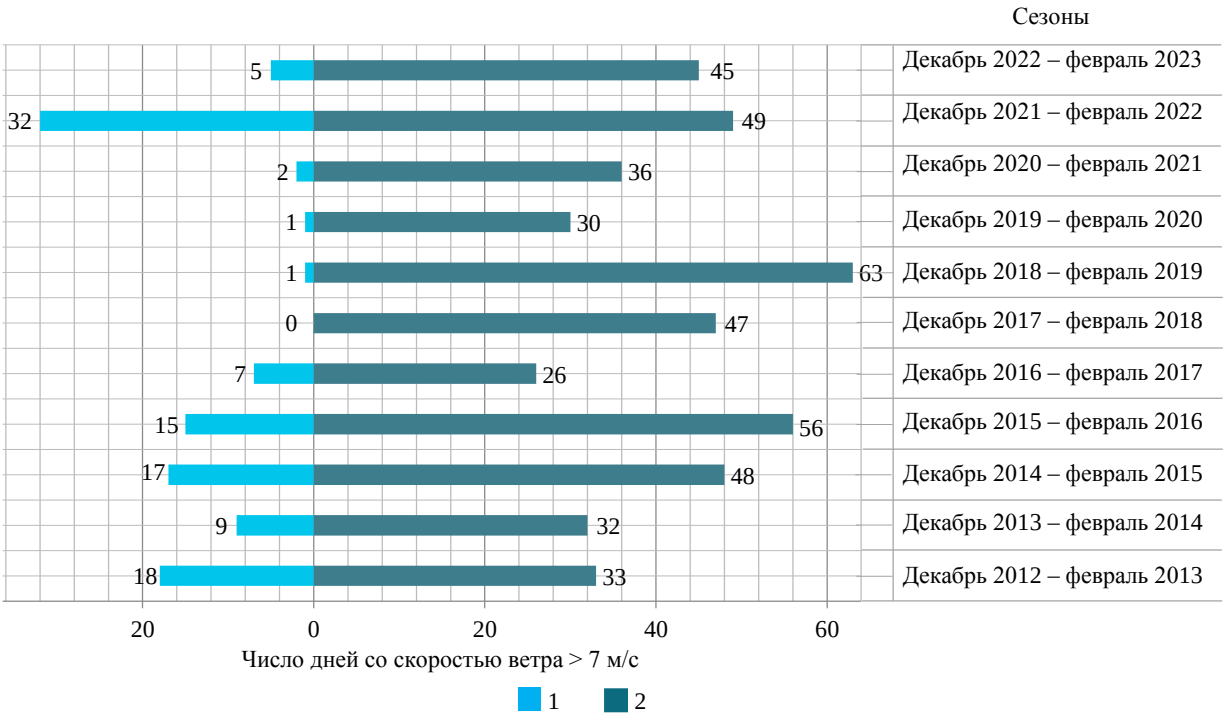


Рис.3. Количество дней со скоростью ветра более 7 м/с на побережье и континентальной части Антарктиды
1 – станция Восток; 2 – станция Прогресс

[2] Справочно-информационный портал «Погода и климат». URL: www.pogodaiklimat.ru (дата обращения 31.10.2023).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

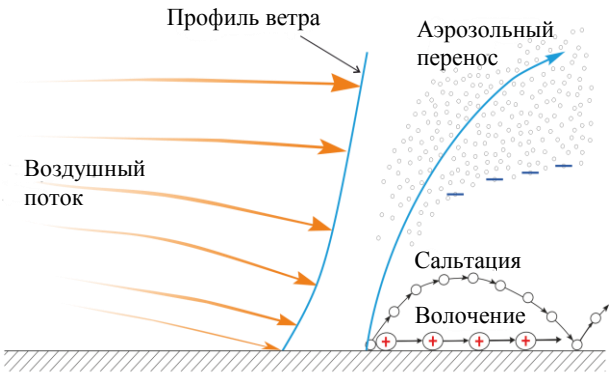


Рис.4. Движение ледяных частиц во время метели

Первый механизм связан с трением частиц льда во время сальтации. Мелкие частицы нагреваются сильнее поверхности, о которую трутся, и приобретают отрицательный заряд, при этом более холодная поверхность становится положительно заряженной.

Второй механизм связан с ситуацией, когда центр снежинки более теплый, а края холодные. В результате столкновения холодные положительно заряженные края отрываются, оставляя отрицательно заряженную центральную часть.

Третий механизм – воздух может оказаться более холодным или более теплым по сравнению с поверхностью ледника. Мелкие частицы в воздухе остывают или, наоборот, нагреваются, и в зависимости от этого приобретают положительный или отрицательный заряд.

Во время сильного ветра в летние месяцы (когда воздух теплее поверхности) более крупные частицы оседают и поверхность ледника приобретает положительный заряд, а облако мелких частиц, поднимающееся вверх и переносимое ветром, становится заряженным отрицательно (рис.4). В результате образуется градиент электрического потенциала, пропорциональный скорости ветра.

По мнению P.E.Wannamaker и др. [21], причиной основного источника ветровой помехи электрического поля являются большие облака взвешенных частиц, ширина которых сравнима с длиной приемных линий электрического поля, поэтому увеличение их до 300 м должно положительно повлиять на соотношение сигнал/шум. Результаты наблюдений позволили предположить, что ветровые помехи пространственно ограничены и не коррелируются ни между точками наблюдений, ни между ортогональными электрическими диполями север-юг (X) и запад-восток (Y). При этом диапазон зашумленных частот зависит от скорости, с которой движется заряд: на побережье Антарктиды, где наблюдались катабатические ветры, шум фиксировался на частотах 5-0,01 Гц, в районах холмов Вестфолд – 4-0,05 Гц [23], на ледяной равнине Уилланс – 75-0,02 Гц [31], а в районе Южного полюса – на частотах 0,1-0,01 Гц [21].

Проблема, связанная с ветровой помехой, решается в процессе удаления из временных рядов участков записи, полученных при скорости ветра, превышающей 7 м/с. Для этого измеряются скорости ветра непосредственно около пикета или в базовом лагере и время регистрации для получения достаточного количества данных увеличивают до 5-7 дней и более в зависимости от погодных условий [23, 25, 31]. Таким образом, при планировании работ в прибрежной зоне Антарктиды сбор данных может занять в разы больше времени, чем в районах низких и средних широт.

Экстремальные погодные условия влияют на работу геофизического оборудования и усложняют технологию его применения [34, 35]. Длительная регистрация ужесточает требования к системам питания измерительной аппаратуры. Для питания регистратора MTU-5A обычно используют два комплекта аккумуляторов с напряжением 12 В и емкостью до 65 А·ч. В условиях Антарктиды с продолжительностью регистрации данных до одной недели, необходимо применение батарей с большей емкостью и/или других источников питания (солнечные батареи), а также проведение мероприятий по улучшению температурных условий работы оборудования (утепление и/или обогрев).

Требуется более качественная установка магнитных датчиков для недопущения их смещения вследствие возможной деформации льда.

Для работ в суровых условиях Антарктиды необходимо предусмотреть использование специальных морозостойких кабелей. Особое внимание следует обратить на такую характеристику, как минимальная температура монтажа (например, для центральной части Антарктиды –40 °С и ниже).

Традиционные неполяризующиеся электроды представляют собой пластиковый сосуд с рабочей поверхностью в виде полупроницаемой керамической мембраны (дна) со стержнем исключительно чистого металла, заполненный раствором солей того же металла. В условиях низких температур раствор электрода, содержащий воду, может замерзнуть [29].

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025. Т. 273. С. 80-93
© Т.В.Давыдкина, А.А.Янкилевич, А.Н.Наумова, 2025

Добавление в раствор солей и незамерзающей жидкости обеспечивает стабильную работу электродов в течение нескольких дней при температуре до –25 °С [24], что позволяет использовать электроды в прибрежной части Антарктиды. В центральной части Антарктиды подобные погодные условия маловероятны даже в летние месяцы, там следует использовать неполяризующиеся электроды с твердым электролитом и металлические электроды (см. табл.1).

Контактное сопротивление на леднике. Наличие мощного ледника на большей части территории Антарктиды требует специальных мероприятий по снижению контактного сопротивления между электродами и льдом. Физические свойства фирна при этом могут меняться в зависимости от влажности и температуры. Чем ниже температура – тем выше удельное электрическое сопротивление (УЭС) льда. Значения УЭС, достигающие десятков мегаомов в центральных частях Антарктиды, неизбежно приведут к искажениям кривых МТЗ из-за емкостных утечек, особенно в высокочастотной области. По мнению G.J.Hill и P.E.Wannamaker [26], стандартом при магнитотеллурическом зондировании в Антарктиде является использование предусилителей с очень высоким входным сопротивлением, таких как разработанный J.A.Stodt буферный предусилитель Numeric Resources [21].

Буферные усилители имеют односторонний выход (выход сигнала и заземление), который подключается к соответствующей входной клемме и заземлению приемника через витую пару. Предполагается, что провода витой пары, изолированные полиэтиленом, имеют паразитную емкость примерно вдвое меньше, чем с изоляцией из поливинилхлорида, и лучше переносят низкие температуры. Провод заземления экрана подключается к заземлению на приемнике и остается неподключенным на буферном усилителе [25].

Питание буферных усилителей осуществляется локально от батарей типа АА. Для работы в полярных регионах предпочтительнее использовать одноразовые литий-железо-дисульфидные батареи, так как их эксплуатационные характеристики при низких температурах лучше по сравнению с другими химическими элементами, что для данной конструкции обеспечивает непрерывную работу в течение 10-14 дней. Питание от единственного источника (батареи или регистратора) гарантирует единое время работы предусилителей и характеристик входного напряжения, однако требует использования дополнительных экранированных жил в электрических приемных проводах.

Нарушение принципа плоской волны. Одним из условий применимости метода магнитотеллурического зондирования является допущение, что расстояние до источника намного больше длины электромагнитной волны на Земле. В этом случае магнитотеллурическое поле в точке наблюдения представляет собой плоскую вертикально падающую электромагнитную волну, в которой векторы поля расположены в горизонтальной плоскости.

Внешним источником магнитотеллурического сигнала считаются токовые системы, которые образуются в околоземном космическом пространстве при взаимодействии солнечного ветра и магнитосферы Земли. В низких и средних широтах, за исключением узкой полосы экваториальной области, условие плоской волны соблюдается. В высоких широтах близость к постоянно существующим электроджетам – токам, текущим на высоте 100-150 км (рис.5), может исказить результаты МТ-зондирования, нарушив условие дальнего источника.

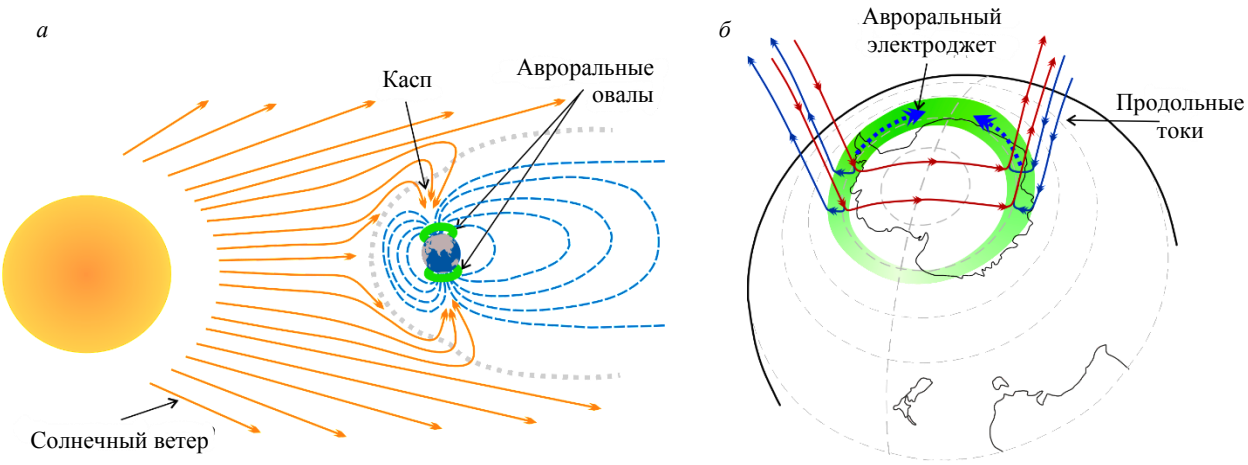


Рис.5. Схематическое изображение магнитного поля Земли (*а*) и продольных токов в авроральной зоне (*б*)

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Для учета влияния эффектов источника на МТ-данные используют различные подходы: моделирование, определение возмущенных периодов магнитосферы и сравнение с амплитудой сигнала, выявление выбросов значений вертикального магнитного поля, а также применение различных методов робастной обработки.

Происходящие в магнитосфере физические процессы на данный момент не изучены до той степени, чтобы можно было построить точную математическую модель. Упрощенная модель И.Л.Осиповой и др. [36] показала, что участки кривых с частотами менее 0,001 Гц слабо зависят от подстилающей среды. При сравнении экспериментальных данных с практическими отмечено резкое уменьшение кажущегося сопротивления на частотах ниже $2{,}7 \cdot 10^{-4}$ Гц, что может быть ошибочно принято за проводник в верхней мантии или за доказательство наличия фазового перехода на глубине 410 км. При этом участки до 0,001 Гц могут отвечать плосковолновому условию. Более сложные модели показывают, что нарушение условий Тихонова – Каньяра может наблюдаться с частот ниже 1 Гц, причем эффект наиболее заметен в высокоомных средах. Исходя из этих соображений, E.Xiao и др. во время работ вблизи залива Прюдс не использовали данные ниже 0,001 Гц [37].

В исследовании M.Beblo и V.Liebig [16] зафиксирована связь электроджета и изменения амплитуды сигнала, однако, несмотря на видимое его влияние, рассчитанные в работе кажущиеся электрические сопротивления и построенный геоэлектрический разрез не противоречат геологическим представлениям.

В 1998 г. в рамках международного проекта SVEKALAPKO был проведен эксперимент BEAR (Baltic Electromagnetic Array Research) [38], одной из задач которого было изучение влияния сложных токовых систем на данные глубинных магнитотеллурических и магнитовариационных зондирований. Анализ временной изменчивости передаточных функций показал, что резким минимумам амплитуды на отдельных отрезках записи, сопровождаемым заметными фазовыми искажениями, соответствуют минимумы множественной когерентности. Эти участки коррелируют с параметрами геомагнитной активности. Большое количество синхронных записей в эксперименте позволило разработать метод многоточечного робастного оценивания передаточных операторов – импеданса и типпера (метод мульти-RR оценивания), который учитывает несколько удаленных точек с синхронными магнитными наблюдениями и помогает подавить искажающие эффекты неоднородного электромагнитного поля. Методы робастной обработки отбраковывают участки с минимумом когерентности, оставляя записи с умеренной и низкой геомагнитной активностью. Алгоритм мульти-RR оценивания в дальнейшем был реализован в программной системе PRC_MTMV [39].

Кроме метода мульти-RR, положительные примеры применения робастной обработки отмечены и в других работах, P.E.Wannamaker и др. [21] предложили убирать помехи от неплоских волн с помощью робастной процедуры Jackknife, в которой особое внимание уделяется удалению выбросов из записей вертикального магнитного поля [21, 26]. После расчета передаточных функций возможна отбраковка смещенных оценок с помощью метода амплитудно-фазовой коррекции данных [40].

Учет геомагнитной обстановки может проводиться с помощью геомагнитных индексов, наряду с анализом передаточных функций. Признаком магнитной бури является уменьшение горизонтальной и возрастание вертикальной составляющих магнитного поля. Для предварительной оценки можно использовать прогнозы аврорального электроджета на сутки[3].

N.L.B.Lauritsen [41] построила почасовые значения реальной и мнимой частей импеданса и сравнила с геомагнитными индексами: планетарным индексом геомагнитной активности K_p и индексом геомагнитной активности авроральной зоны, являющимся показателем суббуревой активности AE. Корреляции между параметрами не было.

Анализ вариации индекса магнитной активности A_p, спектральной мощности сигнала, наличия суббурь, а также деление записей на 12-часовые сегменты при изучении вулкана Эребус [26] привели к выводу, что либо влияние неплоской (непланарной) волны было пренебрежимо мало, либо подобные участки были удалены с помощью методов робастной обработки.

[3] Aurora – 30 Minute Forecast. URL: https://www.swpc.noaa.gov/products/aurora-30-minute-forecast (дата обращения 31.10.2023).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025. Т. 273. С. 80-93
© Т.В.Давыдкина, А.А.Янкилевич, А.Н.Наумова, 2025

A.G.Jones и J.Spratt использовали гистограммы распределений вертикальной составляющей магнитного поля H_z и выбирали участки, которые оставались в заданных пределах [36]. Такой метод применим при одномерной среде, когда H_z стремится к нулю.

J.R.Peacock и K.Selway [23] оценивали данные по четырем параметрам, изменяемым по времени и по частоте, и отбраковывали их в случае несоблюдения условий: кажущееся удельное электрическое сопротивление – инвариантность во времени; количество главных компонент магнитного поля ≤ 2; когерентность между измеренным электрическим полем и рассчитанным по магнитному полю > 0,5; модуль вертикальной компоненты магнитного поля

$$1{,}5\sigma \le \frac{B_z(\omega,t)}{\sqrt{B_x(\omega,t)^2 + B_y(\omega,t)^2}},$$

где B_x, B_y, B_z – компоненты магнитного поля; σ – стандартное отклонение амплитуды B_z; ω – угловая частота.

Основываясь на идее, что, используя лишь один геомагнитный индекс, учитывается только один из аспектов активности в магнитосфере, J.E.Borovsky и M.H.Denton [42] предложили применять для описания магнитосферных событий составной индекс, точность которого существенно выше. Однако на данный момент опыта применения составных индексов недостаточно.

Без анализа влияния сложных токовых систем, постоянно присутствующих в районе полярных широт, можно получить непредсказуемые результаты. Опыт предыдущих исследователей показывает, что успешно побороть эффекты источника помогает использование методики работы с одной или несколькими (предпочтительнее) удаленными базовыми станциями, применение методов современной робастной обработки (особенно отмечаются мульти-RR оценивание и метод Jackknife), а также анализ временных рядов и передаточных функций.

Влияние океана. Большая часть магнитотеллурических исследований сосредоточена на побережье Антарктиды (см. рис.1, *а*). На качество МТ-данных может влиять аномалия берегового эффекта, возникающая под воздействием вихревых токов, возбуждаемых магнитным полем в океане, благодаря существенной разнице сопротивлений проводящего океана и высокоомного континента. Согласно трудам М.Н.Бердичевского и В.И.Дмитриева [43], эта аномалия имеет две компоненты.

Электрический ток, направленный перпендикулярно к берегу, вызывает гальваническую аномалию и делится на две составляющие. Одна втекает в осадочный чехол и канализируется на достаточно большое расстояние, медленно просачиваясь в глубокие слои литосферы – эффект континентальной ловушки. Размер континентальной ловушки зависит от средней интегральной проводимости осадочного чехла и среднего интегрального сопротивления высокоомной коры. Вторая просачивается через дно океана в глубинные проводящие зоны континента. Соотношение двух составляющих определяет степень искажения и чувствительность поперечных кривых МТЗ (ТМ-моды магнитотеллурического поля).

Электрический ток, направленный вдоль берега, вызывает индукционную аномалию, которая связана с взаимодействием океанических и континентальных продольных токов (горизонтальный скин-эффект). Эти токи создают интенсивное магнитное поле, в результате чего вертикальная компонента магнитного поля по амплитуде может превышать горизонтальные компоненты.

В Антарктиде береговой эффект проявляется в разной степени. Интенсивность аномалии зависит от глубины прибрежной части и значения УЭС суши. Чем больше контраст сопротивления и больше глубина – тем ярче береговой эффект. При изучении геологического строения о-ва Десепшен влияние берегового эффекта на МТ-кривые слабое, так как разница УЭС между проводящими вулканическими породами и морской водой невелика, а рельеф подводной части кальдеры плавный [30]. В районе залива Прюдс [37] контраст между сопротивлением морской соленой воды и пород, слагающих берег, большой, и МТ-кривые, полученные в северной части профиля, отличаются на пять порядков от остальных. Одной из возможных причин искажения может быть действие берегового эффекта. Влияние океана на передаточные функции отмечено и в других исследованиях [23, 26, 41], при этом эффект сильнее выражается для ТМ-моды [27]. Изучая влияние аномалии берегового эффекта, N.L.B.Lauritsen [41] выяснила, что вихревые токи сильно искажают кривые импеданса и индукционные векторы.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Береговой эффект при моделировании учитывается при помощи включения тонкого слоя и данных батиметрии с изменяющейся проводимостью [43, 44].

Статический сдвиг в районах с развитой трещиноватостью. Горизонтальные неоднородности в верхней части разреза могут вносить сильные искажения в тензор импеданса во всем диапазоне частот, которые проявляются в конформном смещении кривых магнитотеллурического зондирования.

Исследования ледяного керна показывают, что ледниковый покров по физическим свойствам неоднороден [45-47]. Стандартные значения удельного сопротивления ледника находятся в диапазоне от $4 \cdot 10^4$ до $4 \cdot 10^5$ Ом·м [31]. В зависимости от температуры приповерхностного фирна, примесей, базального таяния, плотности льда или наличия трещин электрические свойства льда могут меняться. С большей вероятностью неоднородности будут встречаться в прибрежной части, где температура поднимается к нулевым значениям и трещины могут быть заполнены смесью снежно-фирновой массы и замерзшей морской воды [32]. Неоднородности могут вызвать статическое смещение кривых МТЗ. J.R.Peacock и K.Selway предлагают применять любую из стандартных процедур коррекции статических сдвигов [23]. Например, они применили пространственный медианный фильтр, предположив, что на расстоянии 20 км загрязнение пылью будет подобным. Используя дополнительную информацию (магнитовариационное зондирование [48], метод фазового тензора), возможно локализовать приповерхностные неоднородности.

Безопасность проведения работ. Антарктида – это самый холодный и высокий континент на планете. Погодные условия здесь меняются очень быстро. В центральной части зимой температуры опускаются до –89,2 °С. Воздух на большей части территории очень сухой, разреженный, атмосферное давление низкое, уровень солнечной радиации повышен. На материке сосредоточены сложные условия, поэтому при планировании и проведении работ необходимо учитывать правила техники безопасности в горной местности [49]. Экстремальные климатические условия влияют на безопасность работ (сбор данных может занять значительно больше времени, чем при работах в средних широтах).

Непогода в Антарктиде может длиться более недели, поэтому, если группа находится далеко от лагеря, надо быть готовым к ситуации, что вернуться будет физически невозможно и возникает необходимость обеспечивать автономную жизнедеятельность в течение нескольких дней.

Расширение площади исследования за счет увеличения длины приемных электрических линий повышает вероятность наличия в зоне проведения работ трещин и других угроз, связанных со строением ледового покрова. В опасных зонах необходима организация страховки – связки (движения по веревке).

Исследователи должны пройти обучение безопасному движению по леднику, иметь специальное оборудование и навыки спасения человека из трещины, распознавания опасных состояний для здоровья, которые возникают в горной местности и резко меняющихся экстремальных погодных условиях (обморожение, гипотермия, отек мозга, отек легких, травмы), а также уметь оказывать первую помощь [50].

Работа в условиях изоляции влияет не только на физическое, но и психологическое состояние человека [51]. Для минимизации травмоопасного поведения М.В.Туманов и др. [52] предлагают оценивать особенности психофизиологических показателей с помощью индекса персонального риска.

Заключение

Анализ проведенных исследований показал, что метод магнитотеллурического зондирования успешно применяется как для уточнения геологического строения земной коры и верхней мантии, так и для решения гидрогеологических задач.

Выделен ряд факторов, которые усложняют получение качественных МТ-данных: экстремально низкая температура, сильный ветер, близость к источнику, протяженная береговая линия, покрытие ледником большей части территории.

Определены методы, реализация которых позволит снизить влияние перечисленных факторов и получить качественные данные МТЗ в условиях Антарктиды.

1. Подготовка оборудования и адаптация технологии проведения работ, включающая:

• мероприятия по минимизации влияния высокого контактного сопротивления между электродами и поверхностным льдом посредством использования пластинчатых электродов с предусилителями с высоким входным сопротивлением;

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

• обеспечение непрерывной работы оборудования в продолжительный интервал времени от нескольких дней до двух недель с учетом низких температур при помощи батарей большой емкости и солнечных батарей;

• утепление аппаратуры и использование проводов арктического исполнения с температурой монтажа не выше –40 °С;

• подбор длины приемных электрических линий для обеспечения достаточного уровня полезного сигнала;

• увеличение времени регистрации для получения достаточного числа накоплений.

2. Разработка или адаптация графа обработки, предусматривающего:

• использование одной или нескольких удаленных базовых станций и методов робастной обработки – решает проблему близости к геомагнитным полюсам (нарушение принципа плоской волны);

• удаление из временных рядов участков записи, полученных при скорости ветра, превышающей 7 м/с, – снижает влияние ветровой помехи (широкополосный электромагнитный шум);

• учет берегового эффекта и статического сдвига.

3. Обеспечение безопасности работ предполагает комплекс мероприятий:

• снабжение антарктической экспедиции специальным оборудованием и снаряжением для работ на ледниках и в высокогорной местности;

• обучение персонала безопасному движению по леднику, а также навыкам спасения человека из трещин, распознавания опасных состояний для здоровья, которые возникают в горной местности и резко меняющихся экстремальных погодных условиях, и оказания первой помощи.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Литвиненко В.С.* Уникальные техника и технологии бурения скважин во льдах Антарктиды // Записки Горного института. 2014. Т. 210. С. 5-10.

2. *Михальский Е.В., Лейченков Г.Л.* История геологического изучения Антарктиды: роль и достижения отечественных геологических исследований // Вопросы географии. 2020. Сборник 150. С. 150-174.

3. *Mikhalsky E.V., Skublov S.G.* First data on U-Pb age of mafic dyke in the Mirny Station area (Pravdy Coast, East Antarctica) // Geochemistry. 2020. Vol. 80. Iss. 3. № 125480. DOI: 10.1016/j.chemer.2018.10.001

4. *Гульбин Ю.Л., Михальский Е.В.* Моделирование минеральных парагенезисов и термобарометрия метавулканических пород серии Рукер, Южные горы Принс-Чарльз, Восточная Антарктида // Записки Российского минералогического общества. 2019. Т. 148. № 5. С. 24-44. DOI: 10.30695/zrmo/2019.1485.01

5. *Litvinenko V.* Foreword: Sixty-year Russian history of Antarctic sub-glacial lake exploration and Arctic natural resource development // Geochemistry. 2020. Vol. 80. Iss. 3. № 125652. DOI: 10.1016/j.chemer.2020.125652

6. *Litvinenko V.S., Leitchenkov G.L., Vasiliev N.I.* Anticipated sub-bottom geology of Lake Vostok and technological approaches considered for sampling // Geochemistry. 2020. Vol. 80. Iss. 3. № 125556. DOI: 10.1016/j.chemer.2019.125556

7. *Большунов А.В., Васильев Н.И., Тимофеев И.П. и др.* Перспективное технологическое решение по отбору проб донных отложений подледникового озера Восток: актуальность и постановка задач исследований // Записки Горного института. 2021. Т. 252. С. 779-787. DOI: 10.31897/PMI.2021.6.1

8. *Адамович О.О., Горелик Г.Д., Грохотов Е.И.* Геофизические исследования в районе станции Восток: история, особенности проведения, перспективы // Бурение и нефть. 2023. Спец. вып. 2. С. 124-125.

9. *Пальшин Н.А., Алексанова Е.Д., Яковлев А.Г. и др.* Опыт и перспективы использования магнитотеллурических зондирований в осадочных бассейнах // Геофизические исследования. 2017. Т. 18. № 2. С. 27-54. DOI: 10.21455/gr2017.2-2

10. *Thiel S., Goleby B.R., Pawley M.J., Heinson G.* AusLAMP 3D MT imaging of an intracontinental deformation zone, Musgrave Province, Central Australia // Earth, Planets and Space. 2020. Vol. 72. № 98. DOI: 10.1186/s40623-020-01223-0

11. *Варенцов И.М., Куликов В.А., Яковлев А.Г., Яковлев Д.В.* Возможности методов магнитотеллурики в задачах рудной геофизики // Физика Земли. 2013. № 3. С. 9-29. DOI: 10.7868/S0002333713030174

12. *Ермолин Е.Ю., Ингеров О., Янкилевич А.А., Покровская Н.Н.* Особенности сигнала АМТ в мертвом частотном диапазоне на Чукотке (Дальний Восток России) // Записки Горного института. 2019. Т. 236. С. 125-132. DOI: 10.31897/PMI.2019.2.125

13. *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

14. *Bentley C.R., Jezek K.C., Blankenship D.D. et al.* Geophysical investigation of the dome C area // Antarctic Journal of the United States. 1979. Vol. 14. № 5. P. 98-100.

15. *Shabtaie S., Bentley C.R., Blankenship D.D. et al.* Dome C geophysical survey, 1979-80 // Antarctic Journal of the United States. 1980. Vol. 15. № 5. P. 2-5.

16. *Beblo M., Liebig V.* Magnetotelluric measurements in Antarctica // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1990. Vol. 60. Iss. 1-4. P. 89-99. DOI: 10.1016/0031-9201(90)90251-R

17. *Mamaní M.J., Borzotta E., Fournier H.G. et al.* Magnetotelluric Study in James Ross Island, Antarctic Peninsula // Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica. 1998. Vol. 33. Iss. 2-4. P. 155-166. DOI: 10.1007/BF03325533

18. *Xiangru Kong, Jianjun Zhang.* Deep electrical conductivity structure in the Great Wall Station area, Fildes Peninsula, West Antarctica // Antarctic Research. 1994. Vol. 5. № 1. P. 11-20.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

19. *Xiangru Kong, Jianjun Zhang.* Magnetotelluric sounding study in the region of Zhongshan Station, East Antarctica // Advances in Polar Science. 1995. Vol. 6. № 1. P. 24-29.

20. *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

21. *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

22. *Armadillo E., Bozzo E., Caneva G. et al.* Imaging deep and shallow structures by electromagnetic soundings moving from the Transantarctic Mountains to the Wilkes Subglacial Basin // Terra Antartica Reports. 2007. Vol. 13. P. 65-74.

23. *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

24. *Ritter O., Fromm T., Weckmann U.* MT_ANT2 – Magnetotelluric Measurements Around Neumayer Station III, Antarctica. GFZ Data Services, 2020. 20 p. DOI: 10.5880/GIPP-MT.201922.1

25. *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

26. *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

27. *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

28. *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. 2021. Vol. 47. Iss. 1. P. 695-707. DOI: 10.1007/s13369-021-05793-3

29. *Korepanov V., Maksymchuk V., Ladanivskyy B.* Earth Crust Deep Structure and Dynamics Study at the «Vernadsky Station» Region by Geoelectromagnetic Methods – Present State and Perspectives // Terra Antartica Reports. 2006. Vol. 12. P. 155-166.

30. *Pedrera A., Ruiz-Constán A., Heredia N. et al.* The fracture system and the melt emplacement beneath the Deception Island active volcano, South Shetland Islands, Antarctica // Antarctic Science. 2012. Vol. 24. Iss. 2. P. 173-182. DOI: 10.1017/S0954102011000794

31. *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. Iss. 6593. P. 640-644. DOI: 10.1126/science.abm3301

32. *Key K., Siegfried M.R.* The feasibility of imaging subglacial hydrology beneath ice streams with ground-based electromagnetics // Journal of Glaciology. 2017. Vol. 63. Iss. 241. P. 755-771. DOI: 10.1017/jog.2017.36

33. *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

34. *Двойников В.М., Бурылов Д.А., Шпенст В.А. и др.* Исследование работы измерительной микроэлектроники в низкотемпературных климатических условиях // Бурение и нефть. 2023. Спец. вып. 2. С. 127.

35. *Сербин Д.В., Дмитриев А.Н.* Экспериментальные исследования теплового способа бурения плавлением скважины в ледовом массиве с одновременным контролируемым расширением ее диаметра // Записки Горного института. 2022. Т. 257. С. 833-842. DOI: 10.31897/PMI.2022.82

36. The Magnetotelluric Method: Theory and Practice / Ed. by A.D.Chave, A.G.Jones. Cambridge University Press, 2012. 552 p. DOI: 10.1017/CBO9781139020138

37. *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

38. *Петрищев М.С.* Обратная задача магнитотеллурического зондирования в эксперименте «BEAR» на Фенноскандинавском щите // Наука и технологические разработки. 2020. Т. 99. № 1. С. 15-30. DOI: 10.21455/std2020.1-3

39. *Варенцов Ив.М.* Развитие программной системы PRC_MTMV многоточечной обработки данных синхронных MT/MB-зондирований // Вопросы естествознания. 2016. № 3 (11). С. 48-52.

40. *Юнусов А.И.* Амплитудно-фазовая коррекция как инструмент повышения качества полевого материала (на примере стационарного пункта магнитотеллурического мониторинга Чункурчак) // Современные техника и технологии в научных исследованиях: сборник материалов XII Международной конференции молодых ученых и студентов, 22-24 апреля 2020, Бишкек, Кыргызстан. Бишкек: Научная станция РАН в г. Бишкеке, 2020. С. 177-182.

41. *Lauritsen N.L.B.* Magnetotelluric investigation in West Greenland – considering the polar electrojet, ocean and fjords: Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy. Kongens Lyngby: Technical University of Denmark, 2016. 163 p. URL: https://findit.dtu.dk/en/catalog/587f9f1ade4c81b16300003e (дата обращения 31.10.2023).

42. *Borovsky J.E., Denton M.H.* Exploration of a Composite Index to Describe Magnetospheric Activity: Reduction of the Magnetospheric State Vector to a Single Scalar // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2018. Vol. 123. Iss. 9. P. 7384-7412. DOI: 10.1029/2018JA025430

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

44. *Мороз Ю.Ф., Самойлова О.М.* Особенности регионального и локального береговых эффектов в магнитотеллурическом поле Камчатки // Геофизические исследования. 2017. Т. 18. № 3. С. 81-94. DOI: 10.21455/gr2017.3-7

45. *Крикун Н.С., Грохотов Е.И., Волкова В.И.* Первичные результаты исследований петроструктурных особенностей приповерхностной части ледового купола Антарктиды и планы на перспективу // Бурение и нефть. 2023. Спец. вып. 2. С. 128.

46. *Игнатьев А.С., 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

47. *Ekaykin A.A., Bolshunov A.V., Lipenkov V.Ya. et al.* First glaciological investigations at Ridge B, central East Antarctica // Antarctic Science. 2021. Vol. 33. Iss. 4. P. 418-427. DOI: 10.1017/S0954102021000171

48. *Ермолин Е.Ю., Ингеров А.И., Шаабан Х.М.* Использование вертикальной магнитной компоненты в магнитотеллурическом методе для оценки параметров аномальных объектов, находящихся в стороне от профиля измерений // Записки Горного института. 2015. Т. 212. С. 95-100.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

49. *Gendler S., Prokhorova E.* Risk-Based Methodology for Determining Priority Directions for Improving Occupational Safety in the Mining Industry of the Arctic Zone // Resources. 2021. Vol. 10. Iss. 3. № 20. DOI: 10.3390/resources10030020

50. *Байков А.В., Ткаченко Ю.А.* Организационно-технические мероприятия повышения безопасности граждан Российской Федерации в Антарктиде // ГосРег: государственное регулирование общественных отношений. 2020. № 3. С. 145-149.

51. *Ильин Е.А.* Психологический статус полярников и его фармакокоррекция в условиях годовой изоляции на станции «Восток» в Антарктиде // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2017. Т. 51. № 4. С. 5-14. DOI: 10.21687/0233-528X-2017-51-4-5-14

52. *Туманов М.В., Гендлер С.Г., Кабанов Е.И. и др.* Индекс персонального риска, как перспективный инструмент управления человеческим фактором в охране труда // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2022. № 6-1. С. 230-247. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_61_0_230

***Авторы*: Татьяна Васильевна Давыдкина,** *инженер 1 категории, davydkina_tv@pers.spmi.ru, https://orcid.org/0000-0001-8950-5555* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), **Андрей Александрович Янкилевич,** *канд. техн. наук, ведущий инженер, https://orcid.org/0000-0002-6677-0812* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), **Анна Николаевна Наумова,** *инженер 2 категории, https://orcid.org/0000-0003-1112-1679* (*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