



## Эксперимент «Ковдор-2023» по глубинному электромагнитному зондированию литосферы Беломорского блока Фенноскандинавского щита

А.А.Скороходов<sup>1</sup>✉, А.Н.Шевцов<sup>1</sup>, А.Е.Ганнибал<sup>1</sup>, В.В.Колобов<sup>2</sup>, В.В.Ивонин<sup>2</sup>, Т.Г.Короткова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты, Россия

<sup>2</sup> Центр физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН, Апатиты, Россия

**Как цитировать эту статью:** Скороходов А.А., Шевцов А.Н., Ганнибал А.Е., Колобов В.В., Ивонин В.В., Короткова Т.Г. Эксперимент «Ковдор-2023» по глубинному электромагнитному зондированию литосферы Беломорского блока Фенноскандинавского щита // Записки Горного института. 2026. Т. 278. С. 153-162. [EDN FAZCPB](#)

### Аннотация

Представлены результаты эксперимента «Ковдор-2023» по глубинному электромагнитному зондированию земной коры в пределах архейского основания юго-западной части Кольского региона с применением естественного источника – магнитотеллурического зондирования (МТЗ) и контролируемого источника – аудиоманнитотеллурического зондирования с контролируемым источником (CSAMT). Целью эксперимента было исследование электропроводности верхней части земной коры Беломорского блока Фенноскандинавского щита. Эксперимент являлся продолжением работ 1995 г., а также эксперимента «Ковдор-2015», по результатам которого был сделан вывод, что существование неоднородного промежуточного проводящего слоя (ДД-слоя) с продольной проводимостью в десятки доли и единицы сименсов в верхней части докембрийской кристаллической земной коры на глубинах до десяти километров является региональной характеристикой, закономерно присущей Фенноскандинавскому щиту. В ходе эксперимента 2023 г. применены новейшие технологии в области генераторно-измерительной техники и новые методы обработки данных. По результатам предыдущих исследований выявлена необходимость расширения частотного диапазона в сторону высоких частот для измерительной аппаратуры, а также улучшенной синхронизации между источником и приемником. Для выполнения эксперимента были созданы новая генераторная группа и новое электронное устройство – блок управления генератором и регистрации выходного тока источника, а также разработана методика синхронной обработки временных рядов силы тока в источнике и компонент электромагнитного поля в точке наблюдений. Эксперимент «Ковдор-2023» выполнен с применением нового генератора и новой измерительной системы, что позволило получить дополнительные сведения о верхней части исследуемого объекта. Проведена синхронная обработка новых данных с учетом материалов и опыта предыдущего эксперимента, включающая учет статических искажений и токов смещения. Построен геоэлектрический разрез по совокупным данным МТЗ и CSAMT с применением программы MARE2DEM.

### Ключевые слова

электропроводность; магнитотеллурические зондирования; частотные зондирования; статические искажения; дилатантно-диффузионный слой

### Финансирование

Работа поддержана грантом РФФИ № 22-17-00208.

Поступила: 14.10.2024

Принята: 24.12.2025

Онлайн: 27.04.2026

Опубликована: 12.05.2026

### Введение

Электромагнитные исследования земной коры включают множество методов, направленных на решение глобальных и инженерных задач. Совершенствуются теоретическая база, технологии измерения, обработки и интерпретации данных. Объектами исследования электромагнитными методами являются различные структуры, начиная с простых горизонтально-слоистых сред и неоднородностей простых геометрических форм, заканчивая сложными неоднородными асимметричными средами. Высокое удельное сопротивление и неоднородность приповерхностных слоев на щитах, таких как Фенноскандинавский, предъявляют свои требования к электромагнитным методам исследования [1, 2].



Магнитотеллурическое зондирование (МТЗ) – один из самых распространенных методов электромагнитного исследования земных недр [3-5]. Основным преимуществом метода является отсутствие необходимости применения генераторных устройств для возбуждения электромагнитного поля в земле. Источниками магнитотеллурического поля являются процессы естественного происхождения в ионосфере и магнитосфере, их природа достаточно хорошо изучена [6]. МТЗ имеют и недостатки – искажения сигнала, вызванные неоднородностями вблизи точки наблюдений; чувствительность к помехам, особенно вблизи искусственных источников электромагнитного поля, таких как линии электропередачи, недетерминированность естественного источника [7]. Тем не менее магнитотеллурические зондирования могут применяться и в таких условиях [8].

Магнитотеллурический метод с контролируемым источником (CSAMT) доказал свою эффективность в подавлении внешних шумов, что привело к относительно высокому соотношению сигнал/шум [9-11]. Современные источники позволяют создавать мощный сигнал в широком диапазоне частот [12], а измерительные установки обладают высокой разрешающей способностью. Эта особенность делает метод особенно эффективным для разведки полезных ископаемых [13, 14], геотермальных исследований, разведки углеводородов, обнаружения длинных и глубоких туннелей, а также для решения проблем загрязнения грунтовых вод [15-17].

Развитие методов МТЗ и CSAMT шло параллельно, первый метод позволял получать данные с больших глубин, второй – с верхних слоев подстилающего пространства. По мере совершенствования технологий и методов обработки данных стало возможно получать информацию с одного диапазона глубин обоими методами [17, 18]. Кроме того, развитие вычислительных технологий позволило перейти от одномерного к двумерному приближению обоих методов. Однако результаты электромагнитных методов не всегда согласуются между собой [18].

В 1997 г. методом частотного зондирования на территории Центрально-Финляндского гранитоидного массива был обнаружен промежуточный проводящий слой [19]. Он располагается в верхней части земной коры на глубинах до 10 км и имеет незначительную продольную проводимость – доли и единицы сименсов. Природа слоя получила истолкование в рамках гипотезы дилатантно-диффузионной природы проводимости (ДД-слой) [20]. Согласно этой гипотезе считается, что под действием тангенциальных напряжений направление трещин в хрупкой горной породе меняется с субвертикального на субгоризонтальное. Ионно-проводящие флюиды проникают на глубину с дневной поверхности по этой системе трещин. Явления дилатансии, т.е. необратимого разуплотнения, возникают за счет хрупкого разрушения горных пород в условиях взаимодействия тангенциального и литостатического давлений. Это способствует появлению свободных флюидов в открывающихся полостях и повышению электропроводности горных пород в довольно узком диапазоне глубин (от 2 до 10 км) в виде промежуточного проводящего слоя. ДД-слой представляет собой не сплошную однородную область, а неоднородную зону пониженного сопротивления, обусловленную влиянием множества мелких токопроводящих трещин. Интерес к нему определяется тем, что с ДД-слоем связывается возможное присутствие флюидов в верхней толще земной коры на глубинах от 2-3 до 7-10 км.

В 2015 г. были выполнены зондирования в пределах Ковдорско-Енского сегмента Беломорского блока. Целью эксперимента «Ковдор-2015» являлось исследование параметров ДД-слоя. Результатом стала серия геоэлектрических одномерных разрезов с наличием промежуточного проводящего слоя на глубинах от 2 до 10 км.

Район работ сложен преимущественно различными по составу и структуре архейскими гранито-гнейсами, амфиболитами, а также рудными зонами мусковита и апатит-магнетитовых руд [21].

Цель данной работы – изучение глубинной электропроводности земной коры Беломорского блока Фенноскандинавского щита на территории Кольского региона. Исследование является продолжением эксперимента 2015 г. [1]. Были поставлены задачи, во-первых, повысить синхронизацию источника и приемника, во-вторых, получить информацию в более высокочастотной области. Для решения задач были введены новые системы сбора данных и создана новая генераторная установка. Это позволило повысить информативность данных, полученных в ходе измерений 2023 г., и дополнить результаты эксперимента «Ковдор-2015».

Архейские породы имеют высокое удельное сопротивление до  $10^6$  Ом·м, зоны пониженного сопротивления могут быть связаны с концентрацией ионно-проводящих флюидов в зонах повышенной



трещиноватости, а также с разломными зонами, содержащими электронно-проводящие сульфиды и графиты.

Рассмотрение данных обоих экспериментов вдоль одного профиля выполнено в двумерном приближении с применением современных методов обработки и инверсии данных.

### Методика измерений

Измерения проведены вдоль субширотного профиля Ковдор – Полярные Зори с шагом 12-15 км с применением взаимно ортогональной питающей установки в виде Г-образных заземленных линий (диполей) длиной 1,5-1,8 км (рис.1). Исследования проведены в семи точках.

По сравнению с предыдущими исследованиями в этом эксперименте был расширен частотный диапазон в высокочастотной части. Оценка эффективной глубины исследования электромагнитных частотных методов (глубины, с которой вносится максимальный вклад в отклик электромагнитного поля на поверхности для конкретной частоты) производится по формуле скин-эффекта [10]

$$H_s = \frac{\sqrt{10\rho T}}{2\pi}, \quad (1)$$

где  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление подстилающей породы, Ом·м;  $T$  – период колебаний электромагнитного поля, с.

В ходе эксперимента 2015 г. верхняя частота сигнала составляла около 2000 Гц. Это позволило получать сигнал с глубин первых километров. Для увеличения частоты сигнала и уменьшения минимальной глубины исследования требовалась модификация источника и приемника.

Электромагнитное поле создавалось генератором «Энергия-5», который был разработан для данного эксперимента на основе генератора «Энергия-4» [12]. Силовым блоком генератора является однофазный мостовой инвертор на основе силовых биполярных транзисторов с изолированным затвором модулей, позволяющий методом трехуровневой широтно-импульсной модуляции формировать в излучающей линии ток произвольной формы в диапазоне частот 0,001-2000 Гц,

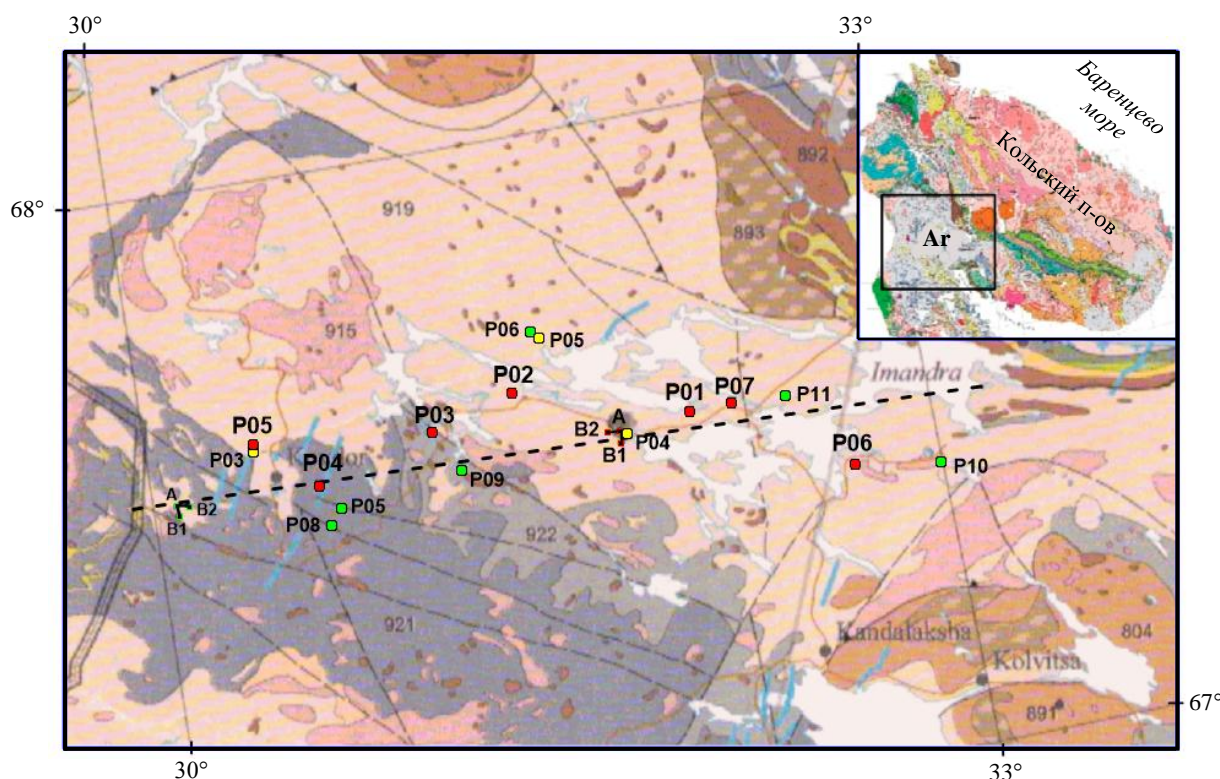


Рис.1. Схема расположения питающих линий и точек наблюдений на геологической карте Фенноскандии [22]

Красные точки – пункты наблюдений в эксперименте «Ковдор-2023», зеленые точки – пункты наблюдений эксперимента «Ковдор-2015», черные линии – питающие линии, желтые точки – пункты наблюдений МТЗ 2016 г., пунктирная линия – положение профиля Ковдор – Полярные Зори  
 Ar – Ковдорско-Енский сегмент Беломорского блока, сложенный преимущественно архейскими породами



а также двухполярный сигнал меандровой формы с переменной скважностью формы в диапазоне частот 0,07-10000 Гц.

Генератор «Энергия-5» смонтирован в кунге автомобиля КамАЗ-43101 и питается от дизель-генераторной установки АЗИМУТ ЭД 100-Т400-1РКМ11 с выходным напряжением 380 В и мощностью 100 кВт. Генератор «Энергия-4» питался от генератора мощностью 29 кВт, смонтированного в кунг автомобиля ЗИЛ-131 и соединенного с двигателем через вал отбора мощности.

Применение новых транзисторов и более современной мощной силовой установки в генераторе «Энергия-5» позволило увеличить амплитуду выходного сигнала, особенно на высоких частотах, что привело к увеличению верхней частоты сигнала с 2 кГц в 2015 г. до 4 кГц в 2023 г. Это позволило уменьшить минимальную глубину исследования [1] в 1,4 раза (менее 1 км).

Регулируемая форма выходного тока генератора обеспечивает его универсальность, т.е. возможность применения для различных методов глубинных электромагнитных зондирований. В частности, синусоидальная форма или меандр могут использоваться для частотных зондирований, а модифицированный меандр с изменяемой скважностью – для зондирований в ближней зоне источника методом становления поля.

Для обеспечения более высокого излучающего магнитного момента необходимо выбирать установку генераторного оборудования и самих диполей в геологических зонах с высоким удельным сопротивлением грунта, что обеспечивает большую глубину протекания обратного тока диполей. С другой стороны, это приводит к сложностям построения заземляющих устройств и более высокому полному сопротивлению излучающих диполей. Расположение питающих линий источника в данном эксперименте выбрано с учетом азимута профиля исследования и обеспечения наименьшего сопротивления заземлителей. В эксперименте «Ковдор-2015» были развернуты две питающие установки – в восточном и западном секторах района работ (рис.1). В 2023 г. применялась установка, практически полностью совпадающая с восточной установкой 2015 г.

В работе 2023 г. использовались две измерительные станции – широкополосная магнитотеллурическая VMTU-10 (пятого поколения) и КВВН-7 (четвертого поколения) [23], совместно разработанная сотрудниками ЦЭС КНЦ РАН и ПГИ КНЦ РАН. Станция VMTU-10 имеет внутренний логгер, синхронизирующийся по GPS, работающий в пятиканальном режиме с частотой дискретизации до 1000 Гц и до 32 разрядов чувствительности, а также имеет возможность подключения внешнего логгера. Станция КВВН-7 регистрирует сигнал на семи каналах через внешний регистратор и имеет режекторные фильтры первых пяти нечетных гармоник промышленной частоты 50 Гц.

Для выполнения задач эксперимента «Ковдор-2023» частотный диапазон станции VMTU-10 был недостаточен. Необходимость измерения сигналов в диапазоне от 1 Гц до 4 кГц требовала модификации системы регистрации сигнала. Для решения проблемы измерения проводились с помощью внешнего аналого-цифрового преобразователя (АЦП) серии QMBox17-16. С помощью АЦП QMBox станция VMTU-10 записывала сигнал на частоте 20 кГц. На станции КВВН-7 и генераторе «Энергия-5» также были применены данные АЦП, работавшего в том же режиме. В эксперименте «Ковдор-2015» использовались АЦП 14-битной разрядности без синхронизации. Таким образом, в работе 2023 г. в сравнении с работой 2015 г. удалось расширить диапазон исследуемых частот до 10 кГц, повысить точность измерений с 14 до 16 бит и обеспечить синхронность данных по меткам GPS с точностью до 0,00001 с.

Измерения проводились идентично магнитотеллурическим зондированиям – измерялись горизонтальное электрическое и полное магнитное поля. Электрические компоненты поля измерялись с помощью взаимно ортогональных заземленных линий длиной 200 м. Магнитное поле измерялось с помощью индукционных датчиков. Собственные шумы магнитных датчиков станций КВВН-7 [23] и VMTU-10 составляют 20-30 фТл/Гц<sup>1/2</sup> в области частотного диапазона 10-300 Гц, что на порядок ниже шумов естественного поля. Благодаря режекторным фильтрам станция КВВН-7 могла регистрировать сигнал в условиях высоких промышленных помех (точка Р06). Магнитные датчики VMTU-10 имеют более ровные амплитудно- и фазово-частотные характеристики, поэтому результаты измерений в условиях отсутствия помех оказались качественнее (все точки, кроме Р06). Запись велась во время сеанса работы генератора, а также измерялись вариации естественного поля после сеанса для измерения МТЗ в отсутствии сигнала источника.



## Результаты

Поскольку измерения идентичны магнитотеллурическим исследованиям, то обработка данных выполнена как по методике МТЗ [24, 25], так и по методике CSAMT [10, 26]. Задача обработки данных эксперимента «Ковдор-2023» заключается в получении значений модулей полных векторов электрического и магнитного полей и значения модуля полного импеданса.

Поиск полезного сигнала CSAMT во временных рядах измеренных компонент электромагнитного поля проводился в автоматическом режиме, синхронно с обработкой временных рядов сигнала источника. Эта схема была реализована для обработки данных серии экспериментов FENICS [27]. Расчеты кажущегося удельного сопротивления и геометрических коэффициентов выполнены по следующим формулам [10]:

- для электрического поля

$$\rho_{\text{tot}}^E = K_{\text{tot}}^E \frac{E_{\text{tot}}}{IL}; \quad E_{\text{tot}} = \sqrt{E_x^2 + E_y^2};$$

$$K_{\text{tot}}^E = \frac{K_x^E K_y^E}{\sqrt{K_x^{E2} + K_y^{E2}}}; \quad K_x^E = \frac{2\pi r^3}{3\cos^2\theta - 2}; \quad K_y^E = \frac{2\pi r^3}{3\cos\theta\sin\theta}; \quad (2)$$

- для магнитного поля

$$\rho_{\text{tot}}^H = 2\pi f \mu_0 \left( K_{\text{tot}}^H \frac{H_{\text{tot}}}{IL} \right)^2; \quad H_{\text{tot}} = \sqrt{H_x^2 + H_y^2};$$

$$K_{\text{tot}}^H = \frac{K_x^H K_y^H}{\sqrt{K_x^{H2} + K_y^{H2}}}; \quad K_x^H = \left( \frac{2\pi r^3}{3\cos\theta\sin\theta} \right)^2; \quad K_y^H = \left( \frac{2\pi r^3}{3\cos^2\theta - 2} \right)^2, \quad (3)$$

где  $E_x$  – напряженность электрического поля вдоль оси  $x$ , В/м;  $E_y$  – напряженность электрического поля вдоль оси  $y$ , В/м;  $H_x$  – напряженность магнитного поля вдоль оси  $x$ , А/м;  $H_y$  – напряженность магнитного поля вдоль оси  $y$ , А/м;  $I$  – амплитуда тока, А;  $L$  – длина питающего диполя, м;  $r$  – расстояние между источником и приемником, м;  $\theta$  – угол между осью источника и направлением  $r$ , град;  $f$  – частота сигнала, Гц.

Расчет кажущегося удельного сопротивления по импедансу

$$\rho_{\text{tot}}^Z = \frac{|Z_{\text{tot}}|^2}{2\pi f \mu_0}; \quad Z_{\text{tot}} = \frac{E_{\text{tot}}}{H_{\text{tot}}}. \quad (4)$$

Обработка данных по методике МТЗ была выполнена с помощью программы VMTU-1d, разработанной для обработки и одномерной интерпретации данных станции VMTU-10. В ней реализована стандартная процедура обработки магнитотеллурических данных, предложенная В.Ю.Семеновым в 1985 г. [28]. Измеренные через АЦП QMBox данные со станций КВВН-7 и VMTU-10 переформатировались для обработки в этой программе.

Для каждой измеренной компоненты поля рассчитываются усредненные спектры и корреляционные соотношения между сопряженными и антисопряженными компонентами электромагнитного поля. Затем по частотам, удовлетворяющим критериям отбора, определяется отклик среды  $Z_{xx}, Z_{xy}, Z_{yx}, Z_{yy}$  (компоненты тензора импеданса, Ом) из соотношений

$$E_x = Z_{xx} H_x + Z_{xy} H_y; \quad E_y = Z_{yx} H_x + Z_{yy} H_y.$$

Далее рассчитываются кажущееся удельное сопротивление, фаза импеданса и параметр асимметрии [29]:

$$\rho_{xy} = \frac{1}{2\pi f \mu_0} |Z_{xy}|^2; \quad \varphi_{xy} = \arg(Z_{xy}); \quad (5)$$



$$\rho_{yx} = \frac{1}{2\pi f \mu_0} |Z_{yx}|^2; \quad \varphi_{yx} = \arg(Z_{yx}); \quad (6)$$

$$\text{skew} = \frac{|Z_{xx} + Z_{yy}|}{|Z_{xy} - Z_{yx}|}. \quad (7)$$

В каждой точке определены направления главных компонент поля относительно магнитного меридиана, значения кажущегося удельного сопротивления  $\rho_{xy}$ ,  $\rho_{yx}$  (рис.2, а), фазы импеданса  $\varphi_{xy}$ ,  $\varphi_{yx}$  (рис.2, б) по формулам (5), (6) в диапазоне частот порядка 1-300 Гц. Дополнительно по формуле (7) рассчитывается параметр асимметрии skew (рис.2, в), определяющий размерность нижнего полупространства.

Согласно формуле (1), эффективная глубина исследования для исследуемого участка варьируется от 1 до 40-60 км в зависимости от удельного сопротивления подстилающего пространства и нижней частоты полезного сигнала.

Магнитотеллурические зондирования, помимо влияния региональных неоднородностей [30], подвержены статическим искажениям, вызванным приповерхностными неоднородностями, как правило, пониженного удельного сопротивления [31-33]. Существуют разные способы учета этих искажений [34, 35]. В данной работе используется метод, предложенный А.А.Жамалетдиновым [36]. Для учета искажений статического сдвига по этому методу проводится анализ кривых кажущегося удельного сопротивления частотного зондирования с искусственным источником (рис.3).

Кривые, рассчитанные по магнитной составляющей (3), не подвержены влиянию статических искажений, но подвержены влиянию ионосферы и токов смещения в высокочастотной ветви. Горизонтальное магнитное поле не подвержено статическим искажениям, поскольку не имеет гальванической связи с землей и отражает истинное сопротивление верхней толщии земной коры. Коррекция искажений проводится путем параллельного смещения электрических  $\rho^E$  и импедансных  $\rho^Z$  кривых по оси сопротивлений до их совпадения с уровнем кривой  $\rho^H$  по горизонтальному магнитному полю в пределах действия квазистационарной волновой зоны [35].

На низких частотах при зондировании с искусственным источником происходит переход в ближнюю зону, когда длина волны становится сопоставима с расстоянием между источником и приемником. Переход из квазистационарной волновой в ближнюю зону может быть приблизительно

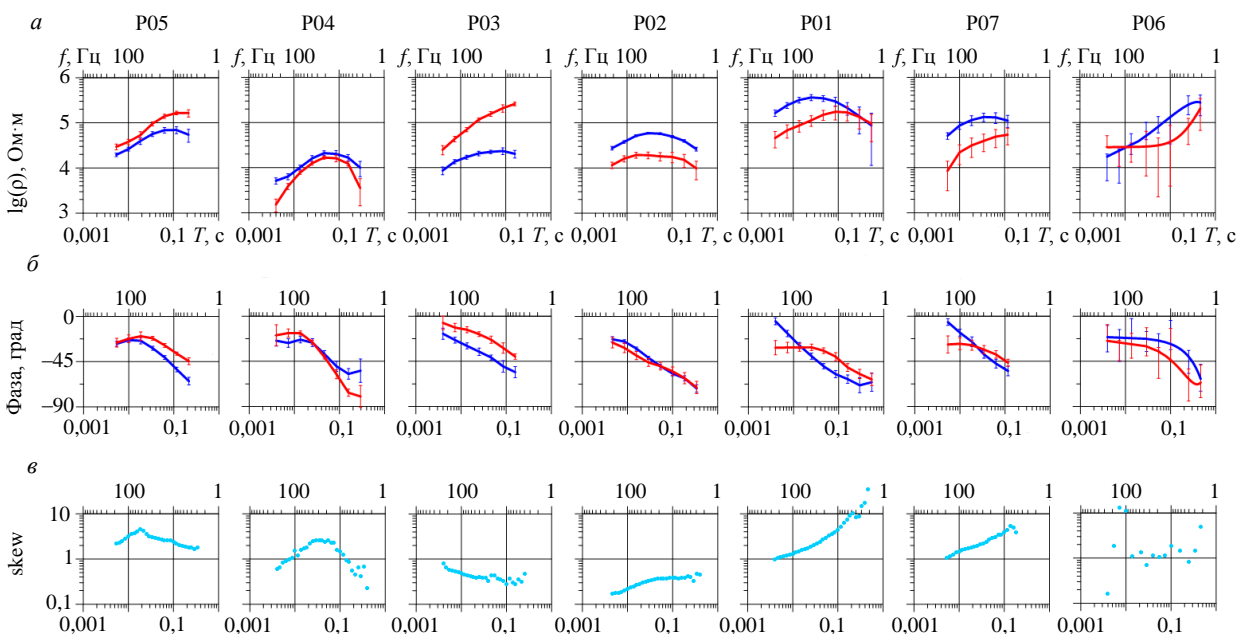


Рис.2. Результаты измерений МТЗ на профиле Ковдор – Полярные Зори: а – кривые кажущегося удельного сопротивления (синие – поперечные, красные – продольные); б – кривые фазы импеданса (синие – поперечные, красные – продольные); в – параметр асимметрии skew

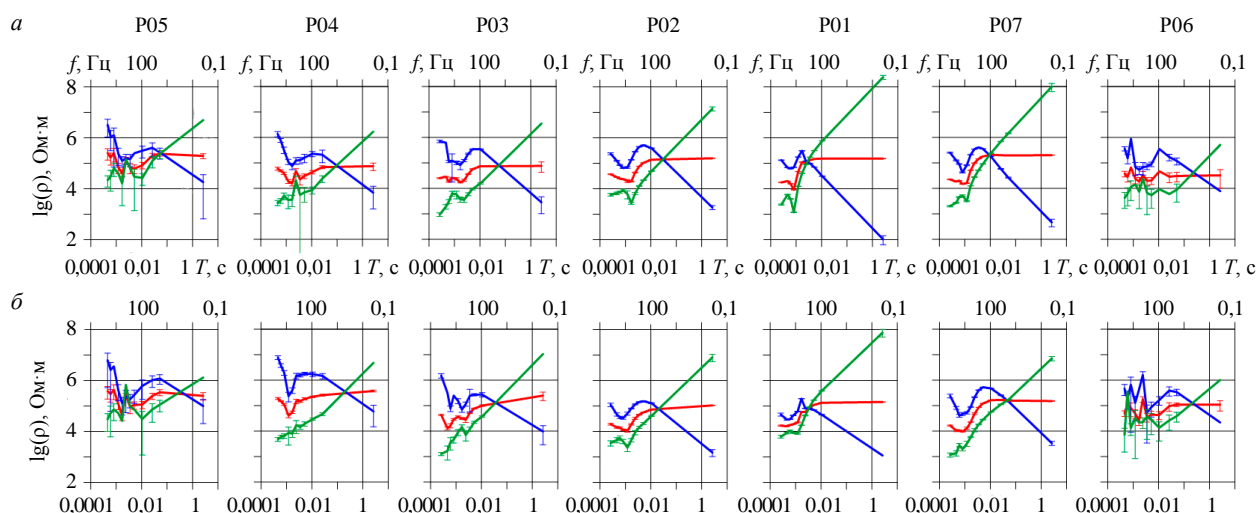


Рис.3. Кривые кажущегося сопротивления CSAMT, полученные по профилю Ковдор – Полярные Зори по данным от источников АВ1 (а) и АВ2 (б)

Синие линии –  $\rho^H$ , красные –  $\rho^E$ , зеленые –  $\rho^Z$

определен с помощью параметра  $kr$ , где  $k$  – волновое число в квазистационарном приближении,  $m^{-1}$ ,  $k = \pi/\lambda$ ;  $\lambda$  – длина волны, м;  $r$  – расстояние между источником и приемником, м.

Для ближней зоны выполняется условие  $kr \geq 1$ , а для дальней квазистационарной зоны –  $kr \leq 1$ . Между ними находится диапазон частот, относящийся к промежуточной зоне [18].

В ближней зоне «магнитная» кривая удельного сопротивления (3) сохраняет информацию о глубинном распределении электропроводности с понижением частоты. Кривая удельного сопротивления, рассчитанная по электрическому полю (2), становится независимой от частоты, а кривая удельного сопротивления, рассчитанная по импедансу (4), соответственно, растет с понижением частоты. Это расхождение экспериментальных кривых в низкочастотной части на всех точках измерений можно наблюдать на рис.3.

Для учета статического искажения используется импедансная кривая кажущегося удельного сопротивления частотного зондирования, скорректированная по уровню с «магнитной» кривой в квазистационарной зоне. Для промежуточной и ближней зон используется низкочастотная часть «магнитной» кривой кажущегося удельного сопротивления.

Волновая квазистационарная зона наблюдается в интервале частот от 100 до 500 Гц (рис.3). На более высоких частотах кривые кажущегося сопротивления, рассчитанные по электрическому и магнитному полям, вследствие влияния токов смещения искажаются, а импедансные кривые  $\rho^Z$  не подвержены влиянию ионосферы и токов смещения.

### Обсуждение результатов

Основное различие экспериментов «Ковдор-2015» и «Ковдор-2023» заключается в том, что точки наблюдений эксперимента 2015 г. были расположены на участках с однородным плохопроводящим основанием для максимального проникновения поля на глубину и избежания влияния боковых неоднородностей, а точки наблюдений 2023 г. располагались примерно на одинаковом расстоянии вдоль одного профиля (см. рис.1).

Результаты «Ковдор-2023» предоставляют информацию для построения двумерной модели распределения электропроводности земной коры Беломорского блока вдоль профиля Ковдор – Полярные Зори. Также были использованы результаты эксперимента «Ковдор-2015» и дополнительные МТЗ 2016 г.

Параметр симметрии skew является показателем размерности среды [25, 26]. Анализ параметра показывает, что измеренные данные можно аппроксимировать двумерной средой лишь частично, однако они также могут быть интерпретированы как двумерные [37].

Инверсия данных производилась с помощью программного обеспечения MARE2DEM, разработанного К.Кейем (Обсерватория Земли Ламонт-Доэрти, Колумбийский университет, США) для двумерной инверсии как частотных зондирований с искусственным источником, так и



магнитотеллурических зондирований [38]. Программа разработана для исследований морского дна, но может быть применена и в условиях щита. MARE2DEM использует полигональную модель и метод конечных элементов решения прямой задачи.

Процедура инверсии данных требует значительных вычислительных ресурсов, поэтому для решения обратной задачи необходимо аккуратно подходить к выбору начальной модели. На рис.4 приведен результат 14-й итерации, где априорной моделью является усредненная модель, полученная по результатам эксперимента «Ковдор-2015» [1], в которой присутствует промежуточный проводящий.

Совмещение методов электромагнитного зондирования CSAMT и МТЗ с новой системой источник – приемник позволило получить более полную информацию для каждой точки измерений. Новые данные в целом согласуются с результатами предыдущих исследований в этом районе. За счет расширения частотного диапазона обоих методов исследования получена дополнительная информация для верхней части разреза (1-3 км) в семи точках, что позволяет выявлять неоднородности близ поверхности, но несильно влияет на глубинную часть разреза.

Наличие приповерхностных неоднородностей удельного электрического сопротивления приводит к статическому искажению измеренных данных. Чем больше информации в высокочастотной области, тем больше возможность учесть это влияние. Согласно полученной модели (рис.4), на глубинах до 2-4 км наблюдаются неоднородности удельного сопротивления диапазоном в один порядок ( $10^4$ - $10^5$  Ом·м), что в целом соответствует породам, слагающим этот район. Магнитотеллурические данные (см. рис.2) также от точки к точке имеют разброс в один порядок.

Профиль по отношению к источнику условно разделяется на две области – западную, сложенную преимущественно протерозойскими породами, и восточную, сложенную архейскими породами (см. рис.1). Области отличаются не только возрастом и составом пород, но и преимущественным простиранием разломов, субширотным для западной области и субмеридианальным для восточной области. Различие между частями выражено в магнитотеллурических данных (см. рис.2), согласно которым западная часть имеет больший разброс данных от точки к точке.

Новые данные подтверждают наличие промежуточного проводящего слоя. В частности, на всех кривых кажущегося удельного сопротивления CSAMT (см. рис.3) наблюдается минимум в районе периода 0,001 с, что в одномерном и двумерном приближениях может быть интерпретировано как промежуточный проводящий слой. Наличие этого слоя сложно объяснить наличием электронно-проводящих зон на исследуемой территории [21]. На разрезе такая зона находится на глубине от 4 до 10 км, ее удельное сопротивление варьируется от точки к точке, но в целом на один-два порядка ниже, чем окружающие породы. Природа данного слоя, по всей видимости, объясняется дилатантно-диффузионными явлениями в верхней, хрупкой части земной коры [1, 20].

Полученный разрез зависит от априорной модели, требуется ее детализация. Для создания более корректной начальной модели [38, 39] необходим учет данных других геофизических методов и дополнительной информации.

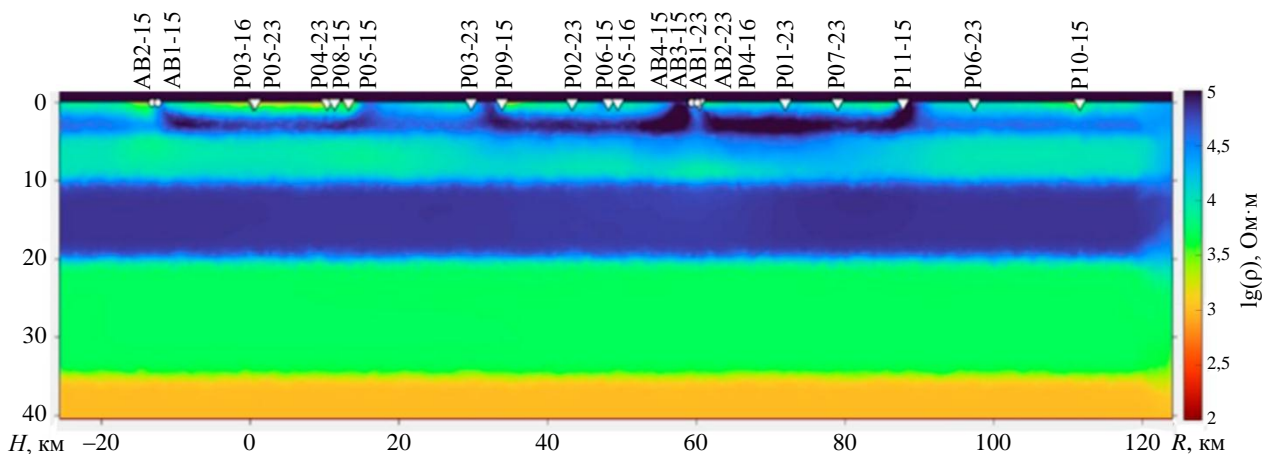


Рис.4. Геоэлектрический разрез по профилю Ковдор – Полярные Зори по данным МТЗ и CSAMT, полученный с помощью программы MARE2DEM



## Заключение

Проведен эксперимент «Ковдор-2023» по электромагнитному зондированию литосферы Беломорского блока вдоль профиля Ковдор – Полярные Зори до глубины 40 км. По сравнению с предыдущим экспериментом [1] была изменена схема измерений. За счет нового источника и модификации системы регистрации данных повышена чувствительность и расширен рабочий диапазон частот. Впервые на данном участке Беломорского блока получен геоэлектрический разрез с помощью двумерной инверсии данных. Для верхней части блока выделяются неоднородности удельного электрического сопротивления.

Полученные данные подтверждают наличие проводящей области на глубине от 4 до 10 км. Данный слой был обнаружен в ходе предыдущих исследований, его природа объясняется дилатантно-диффузионным явлением в верхней части земной коры.

В результате эксперимента «Ковдор-2023» получен двумерный геоэлектрический разрез в диапазоне 0,1-40 км по профилю Ковдор – Полярные Зори. В отличие от эксперимента 2015 г., в котором была получена серия одномерных разрезов с наличием промежуточного проводящего слоя на глубинах от 2 до 10 км [1], в данном случае этот слой находится на одной глубине вдоль всего профиля с переменной электропроводностью.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Жамалетдинов А.А., Велихов Е.П., Шевцов А.Н. и др. Эксперимент «Ковдор-2015» по изучению параметров слоя дилатантно-диффузионной природы проводимости в архейском кристаллическом основании Балтийского щита // Доклады Академии наук. 2017. Т. 474. № 4. С. 477-482. DOI: [10.7868/S0869565217160174](https://doi.org/10.7868/S0869565217160174)
2. Жамалетдинов А.А., Велихов Е.П., Шевцов А.Н. и др. Глубинная электропроводность архейских блоков Кольского полуострова в свете результатов эксперимента «Мурман-2018» (обзор) // Физика Земли. 2021. № 1. С. 69-94. DOI: [10.31857/S0002333721010117](https://doi.org/10.31857/S0002333721010117)
3. Сысоев Б.К., Ягафаров А.К., Арсан Ш.А. и др. Особенности магнитотеллурического сканирования земной коры при поисках и разведке месторождений углеводородов // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2019. № 5. С. 40-45. DOI: [10.31660/0445-0108-2019-5-40-45](https://doi.org/10.31660/0445-0108-2019-5-40-45)
4. Berdichevsky M.N., Bubnov V., Aleksanova E. et al. Magnetotelluric Studies in Russia: Regional-Scale Surveys and Hydrocarbon Exploration // Electromagnetic Sounding of the Earth's Interior. Theory, Modeling, Practice. Elsevier, 2015. P. 379-401. DOI: [10.1016/B978-0-444-63554-9.00013-1](https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63554-9.00013-1)
5. 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](https://doi.org/10.21455/gr2017.2-2)
6. Garcia X., Jones A.G. Atmospheric sources for audio-magnetotelluric (AMT) sounding // Geophysics. 2002. Vol. 67. № 2. P. 448-458. DOI: [10.1190/1.1468604](https://doi.org/10.1190/1.1468604)
7. Ермолин Е.Ю., Ингерлов О., Янкиевич А.А., Покровская Н.Н. Особенности сигнала АМТ в мертвом частотном диапазоне на Чукотке (Дальний Восток России) // Записки Горного института. 2019. Т. 235. С. 125-132. DOI: [10.31897/PMI.2019.2.125](https://doi.org/10.31897/PMI.2019.2.125)
8. Hao Xu, Xiaodong Yang, Xiangyang Cai et al. Exploring geothermal resources with the CSAMT and microtremor methods: a case study in Tangquan, Jiangsu Province, China // Frontiers in Earth Science. 2024. Vol. 12. № 1437850. DOI: [10.3389/feart.2024.1437850](https://doi.org/10.3389/feart.2024.1437850)
9. Xian Zhang, Diqian Li, Jin Li et al. Magnetotelluric Signal-Noise Separation Using IE-LZC and MP // Entropy. 2019. Vol. 21. Iss. 12. № 1190. DOI: [10.3390/e21121190](https://doi.org/10.3390/e21121190)
10. Younis A., El-Qady G., Abd Alla M. et al. AMT and CSAMT methods for hydrocarbon exploration at Nile Delta, Egypt // Arabian Journal of Geosciences. 2015. Vol. 8. Iss. 4. P. 1965-1975. DOI: [10.1007/s12517-014-1354-6](https://doi.org/10.1007/s12517-014-1354-6)
11. Cao Yan-ling, Cheng Gang-jian, Zhao Cheng-liang et al. Application of CSAMT in hydrogeology exploration in Shandong Province – An example from geothermal exploration in Changdao County (south four islands) // Journal of Groundwater Science and Engineering. 2018. Vol. 6. № 1. P. 58-64. DOI: [10.19637/j.cnki.2305-7068.2018.01.007](https://doi.org/10.19637/j.cnki.2305-7068.2018.01.007)
12. Колобов В.В., Баранник М.Б., Ивонин В.В. и др. Опыт применения генератора «Энергия-4» для дистанционных и частотных электромагнитных зондирований в эксперименте «Мурман-2018» // Труды Кольского научного центра РАН. Энергетика. 2018. Т. 9. № 8 (17). С. 7-20. DOI: [10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.8.7-20](https://doi.org/10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.8.7-20)
13. Жамалетдинов А.А., Шевцов А.Н., Колобов В.В., Петрищев М.С. Опыт электромагнитного зондирования в поле промышленной ЛЭП «Уренгой – Пангоды» в комплексе с АМТ-МТ-зондированиями // Записки Горного института. 2015. Т. 212. С. 101-112.
14. Peng-liang Yu, Ting Qu, Ri-zheng He et al. Application of tensor CSAMT with high-power orthogonal signal sources in Jiama porphyry copper deposit, South Xizang // China Geology. 2023. Vol. 6. Iss. 1. P. 37-49. DOI: [10.31035/cg2021065](https://doi.org/10.31035/cg2021065)
15. Su Chao, Hou Yanwei, Wang Cheng, Li Dan. CSAMT phase correction and its application in detection of water-accumulating area of goaf in coal mine // Coal Geology & Exploration. 2019. Vol. 47. Iss. 6. № 28. DOI: [10.3969/j.issn.1001-1986.2019.06.027](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2019.06.027)
16. Zhu Yunqi, Li Diqian, Liu Zoiliang, Zhang Xin. Processing of coal mine CSAMT data with wide field electromagnetic method // Coal Geology & Exploration. 2023. Vol. 51. Iss. 4. № 15. DOI: [10.12363/issn.1001-1986.22.09.0676](https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.22.09.0676)
17. Chuantao Yu, Suoliang Chang, Yu Han et al. Characterization of Geological Structures Under Thick Quaternary Formations with CSAMT Method in Taiyuan City, Northern China // Journal of Environmental and Engineering Geophysics. 2019. Vol. 24. № 4. P. 621-628. DOI: [10.2113/JEEG24.4.621](https://doi.org/10.2113/JEEG24.4.621)
18. Куликов В.А., Каминский А.Е., Яковлев А.Г. Совместная двумерная инверсия данных электротомографии и аудио-магнитотеллурических зондирований при решении рудных задач // Записки Горного института. 2017. Т. 223. С. 9-19. DOI: [10.18454/PMI.2017.1.9](https://doi.org/10.18454/PMI.2017.1.9)



19. Zhamaletdinov A.A., Shevtsov A.N., Tokarev A.D. et al. Electromagnetic Induction on the Earth. 14-th Workshop in Sinaia (Romania). Mexico, 1998. P. 83.
20. Жамалетдинов А.А. О флюидной природе промежуточных проводящих слоев в земной коре по результатам электромагнитных зондирований и каротажа сверхглубоких скважин // Физика Земли. 2011. № 2. С. 53-63.
21. Миллер Ю.В. Беломорский подвижный пояс Балтийского щита // Региональная геология и металлогения. 2006. № 27. С. 5-14.
22. Geological map of the Fennoscandian Shield. Scale 1:2000000. Geological Surveys of Finland, Norway and Sweden and the North-West Department of Natural Resources of Russia, 2001.
23. Колобов В.В., Куклин Д.В., Шевцов А.Н., Жамалетдинов А.А. Многофункциональная цифровая измерительная станция КВВН-7 для электромагнитного мониторинга сейсмоактивных зон // Сейсмические приборы. 2011. Т. 47. № 2. С.44-58.
24. Lilley F.E.M. The distortion tensor of magnetotellurics: a tutorial on some properties // Exploration Geophysics. 2016. Vol. 47. Iss. 2. P. 85-99. DOI: [10.1071/EG14093](https://doi.org/10.1071/EG14093)
25. Berdichevsky M.N., Dmitriev V.I. Models and Methods of Magnetotellurics. Springer, 2008. 564 p. DOI: [10.1007/978-3-540-77814-1](https://doi.org/10.1007/978-3-540-77814-1)
26. Tao Wang, Kun-Peng Wang, Han-Dong Tan. Forward modeling and inversion of tensor CSAMT in 3D anisotropic media // Applied Geophysics. 2017. Vol. 14. Iss. 4. P. 590-605. DOI: [10.1007/s11770-017-0644-7](https://doi.org/10.1007/s11770-017-0644-7)
27. Ганнибал А.Е. Программа обработки первичных данных в эксперименте «FENICS» // Наука и технологические разработки. 2020. Т. 99. № 1. С. 5-14. DOI: [10.21455/std2020.1-2](https://doi.org/10.21455/std2020.1-2)
28. Семенов В.Ю. Обработка данных магнитотеллурического зондирования. М.: Недра, 1985. 133 с.
29. Gómez-Treviño E., Muñoz Y., Cuellar M., Calderón-Moctezuma A. Invariant TE and TM magnetotelluric impedances: application to the BC87 dataset // Earth, Planets and Space. 2018. Vol. 70. № 133. DOI: [10.1186/s40623-018-0900-y](https://doi.org/10.1186/s40623-018-0900-y)
30. Иванов П.В., Пушкарев П.Ю. Возможности интерпретации магнитотеллурических данных, полученных на одиночном профиле при изучении трехмерно-неоднородной среды // Физика Земли. 2010. № 9. С. 3-10.
31. Суконкин М.А., Пушкарев П.Ю. Приповерхностные искажения в магнитотеллурических данных на примере грабена // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: Материалы 50-й юбилейной сессии Международного семинара им. Д.Г.Успенского – В.Н.Страхова, 29 января – 2 февраля 2024, Москва, Россия. М.: Перо, 2024. С. 324-328.
32. Skorokhodov A.A., Zhamaletdinov A.A. Computer Modeling of Lateral Influence of the Ladoga Anomaly (Janisjarvy Fault Zone) on the AMT Sounding Results // Practical and Theoretical Aspects of Geological Interpretation of Gravitational, Magnetic and Electric Fields. Springer, 2019. P. 181-186. DOI: [10.1007/978-3-319-97670-9\\_21](https://doi.org/10.1007/978-3-319-97670-9_21)
33. Фельдман И.С., Ермолин Е.Ю. Амплитудно-фазовая коррекция кривых магнитотеллурического зондирования // Записки Горного института. 2011. Т. 194. С. 200-210.
34. Ермолин Е.Ю., Ингерров А.И., Шаaban X.M. 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.
35. Жамалетдинов А.А. Способ количественного учета статических искажений по магнитному полю контролируемого источника CSAMT // Наука и технологические разработки. 2019. Т. 98. № 4. С. 5-18. DOI: [10.21455/std2019.4-1](https://doi.org/10.21455/std2019.4-1)
36. Shevtsov A.N. Joint Interpretation of Magnetotelluric and CSAMT Data on the Kola Peninsula (Kovdor Area) // Practical and Theoretical Aspects of Geological Interpretation of Gravitational, Magnetic and Electric Fields. Springer, 2019. P. 23-30. DOI: [10.1007/978-3-319-97670-9\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-97670-9_3)
37. Susilawati, Mustopa E.J. 2D Interpretation Of Controlled Source Audio Magnetotelluric (CSAMT) Data Integrated With Borehole Data In Kamojang Geothermal Field West Java, Indonesia // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1127. № 012021. DOI: [10.1088/1742-6596/1127/1/012021](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1127/1/012021)
38. Key K. MARE2DEM: a 2-D inversion code for controlled-source electromagnetic and magnetotelluric data // Geophysical Journal International. 2016. Vol. 207. Iss. 1. P. 571-588. DOI: [10.1093/gji/ggw290](https://doi.org/10.1093/gji/ggw290)
39. Rung-Arunwan T., Siripunvaraporn W., Utada H. The effect of initial and prior models on phase tensor inversion of distorted magnetotelluric data // Earth, Planets and Space. 2022. Vol. 74. № 51. 2022. DOI: [10.1186/s40623-022-01611-8](https://doi.org/10.1186/s40623-022-01611-8)

**Авторы:** Алексей Андреевич Скороходов, ведущий инженер (Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты, Россия), [sammicne@yandex.ru](mailto:sammicne@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-3258-8844>, Александр Николаевич Шевцов, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник (Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты, Россия), <https://orcid.org/0000-0002-1360-9937>, Андрей Евгеньевич Ганнибал, младший научный сотрудник (Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты, Россия), <https://orcid.org/0000-0002-8921-8481>, Виталий Валентинович Колобов, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник (Центр физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН, Апатиты, Россия), <https://orcid.org/0000-0002-7541-3219>, Виктор Владимирович Ивонин, научный сотрудник (Центр физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН, Апатиты, Россия), <https://orcid.org/0000-0001-9154-5599>, Тамара Геннадьевна Короткова, ведущий программист (Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты, Россия), <https://orcid.org/0000-0003-3379-8728>.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.