

УДК 550 834

## ЭКСПЕРИМЕНТ “МУРМАН-2018” ПО ДИСТАНЦИОННОМУ ЗОНДИРОВАНИЮ С ЦЕЛЬЮ ИССЛЕДОВАНИЯ ГРАНИЦЫ “НЕПРОНИЦАЕМОСТИ” НА ПЕРЕХОДЕ МЕЖДУ ХРУПКИМ И ПЛАСТИЧНЫМ СОСТОЯНИЯМИ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ

А. А. Жамалетдинов<sup>1,\*</sup>, академик РАН Е. П. Велихов<sup>2</sup>, А. Н. Шевцов<sup>3</sup>, А. А. Скороходов<sup>3</sup>,  
В. В. Колобов<sup>4</sup>, В. В. Ивонин<sup>4</sup>, В. В. Колесников<sup>3</sup>

Поступило 29.01.2019 г.

Описан эксперимент “Мурман-2018” по дистанционному электромагнитному зондированию в комплексе с частотными и аудиоманнитотеллурическими зондированиями. Результаты эксперимента позволили впервые в научной литературе количественно оценить положение предполагаемой границы резкого увеличения сопротивления пород на глубине 10–15 км.

*Ключевые слова:* дистанционное зондирование, Мурманский блок, граница непроницаемости, хрупкая земная кора, пластичная земная кора.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524863359-364>

### ВВЕДЕНИЕ

Идею о хрупком состоянии земной коры первым начал развивать академик М.А. Садовский в своих работах, посвящённых проблеме “кусковатости” горных пород, наблюдаемой при крупных взрывах [1]. “Кусковатость” он рассматривал как многомерную отдельность структурных звеньев земной коры по типу самоподобных, фрактальных структур. Эта идея нашла своё продолжение в работах, посвящённых анализу напряженно-деформированного состояния среды [2]. В последующем на основе геологических исследований [3] сложилось представление о двухслойном строении земной коры, состоящей из верхнего, хрупкого слоя (brittle layer) и нижнего пластичного слоя (ductile layer). Граница между ними получила обозначение “Brittle-Ductile Transition Zone” (граница BDT) [3]. Глубина границы BDT является важным для фундаментальной науки и в то же время трудно определяемым параметром,

варьирующим в пределах десятков километров, поскольку величина его зависит от множества факторов, задаваемых качественно, на основе априорных данных (вязкость, скорость деформации, теплогенерация, температура на глубине и др.). В качестве единственного количественного показателя положения границы BDT принимаются данные сейсмологии, указывающие на то, что эпицентры короткофокусных землетрясений сконцентрированы в пределах верхнего слоя земной коры мощностью 10 км, который на этом основании считается хрупким [3–5].

Согласно результатам МГД-эксперимента “Хибины” [6] земная кора на территории Балтийского щита также состоит из двух толщ, разделённых между собой условной границей “непроницаемости”, проходящей на глубине 10–15 км [7]. Верхняя толща земной коры обладает высокой горизонтальной неоднородностью и умеренным высоким удельным электрическим сопротивлением порядка  $10^4$  Ом·м. Нижняя толща, наоборот, отличается горизонтальной однородностью электрических свойств и аномально высоким сопротивлением порядка  $10^5$ – $10^6$  Ом·м. Считается, что верхняя толща представляет хрупкую кору, а нижняя — пластичную [8]. Граница “непроницаемости” между ними является естественным препятствием для проникновения постоянного тока на глубину и идентифицируется с сейсмической границей Конрада [8].

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн

<sup>2</sup>Научный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва

<sup>3</sup>Геологический институт Кольского научного центра Российской Академии наук, Апатиты Мурманской обл.

<sup>4</sup>Центр энергетики Севера Кольского научного центра Российской Академии наук, Апатиты Мурманской обл.

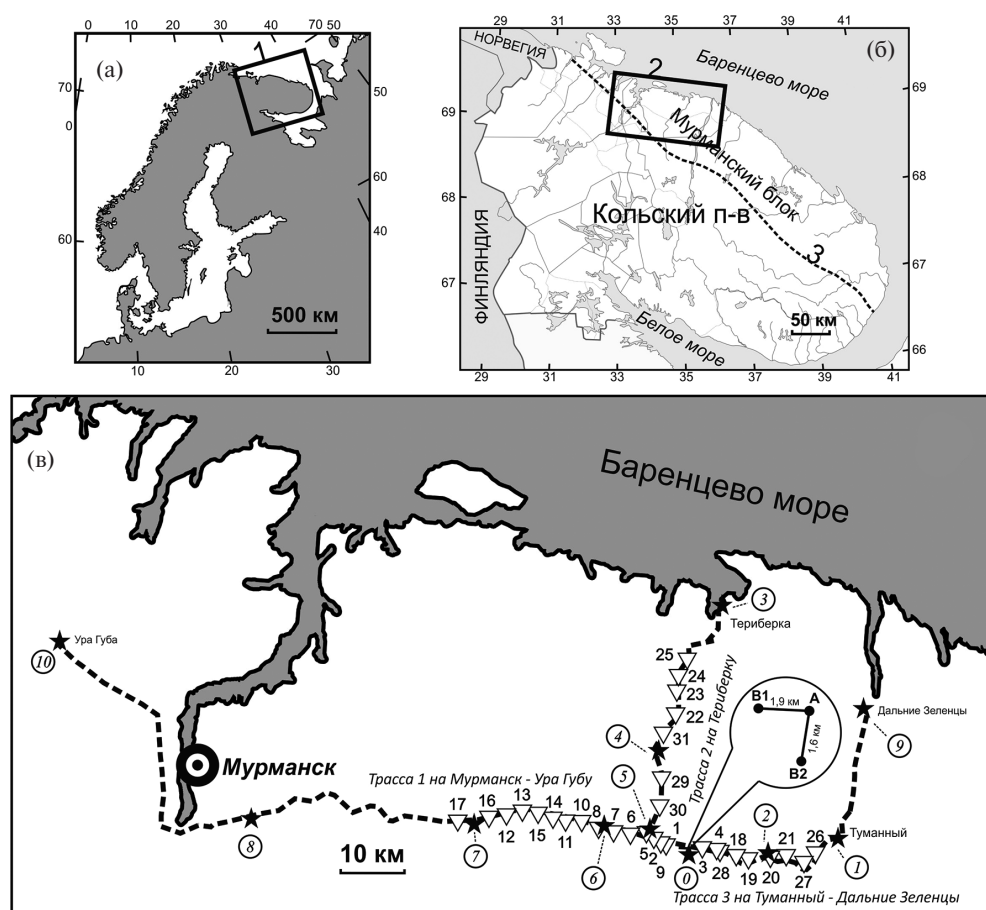
\*E-mail: [abd.zham@mail.ru](mailto:abd.zham@mail.ru)

## МЕТОДИКА

Однако до настоящего времени количественных оценок положения границы “непроницаемости” не получено. Объясняется это тем, что основным способом исследования глубинной электропроводности Земли является индукционное зондирование. В то же время известно, что при индукционных зондированиях слои высокого сопротивления, мощность которых меньше длины электромагнитной волны в земле, попадают в область “прозрачности” и их обнаружение и тем более разделение между собой становится проблематичным [9]. С целью восполнить пробел и исследовать предполагаемую границу “непроницаемости” выполнен эксперимент “Мурман-2018” по дистанционному (на постоянном токе) зондированию на территории Мурманского блока, сложенного древними кристаллическими породами архейского возраста.

Схема эксперимента “Мурман-2018” приведена на рис. 1. Зондирования выполнены по трём трассам — на Мурманск–Ура-губу, на Териберку и на Туманный–Дальние Зеленцы (рис. 1в). Максимальные разности достигали 105 км. Основным методом явилось дистанционное зондирование на постоянном токе (DC). Зондирования DC выполнены в 31 точке с линейным шагом изменения разностей между источником и приемником (5 км). Линейный шаг применён с целью обнаружения влияния горизонтальной неоднородности и для отслеживания характера кривой зондирования в зависимости от расстояния до источника.

Питающими линиями служили два взаимно ортогональных заземлённых электрических диполя длиной 1,9 и 1,6 км (рис. 1в). Ток в линии подавался с помощью автомобильного генератора “Энер-



**Рис. 1.** Схема эксперимента “Мурман-2018”. а — Балтийский щит с границей Мурманской области (1); б — район работ (2) и юго-западная граница Мурманского блока (3); в — положение питающих линий и трасс зондирования: АВ1 и АВ2 — питающие диполи; треугольники с цифрами от 1 до 31 — точки зондирования на постоянном токе; звездочки с цифрами в кружках от 0 до 10 — точки частотных зондирований (CSAMT).

гия-4” [10] мощностью 29 кВт с выходным напряжением до 1200 В в диапазоне частот от 1 до 2000 Гц.

ДС зондирования выполнялись на частотах  $f = 0,194; 0,388; 0,942$  Гц, выбравшихся в зависимости от удалённости от источника и соотношения “сигнал–шум”. Ток подавался в виде разнополярных импульсов прямоугольной формы без пауз между ними. Запись велась при помощи широкополосной 32-разрядной магнитотеллурической станции VMTU-10 [11]. Измерения проводились по магнитному меридиану ( $E_x$ ) и по широте ( $E_y$ ) с применением линий  $MN = 2 \times 50$  м со средней точкой. Длительность записи изменялась от 2 до 10 мин. Обработка сигналов осуществлялась двумя методами — в спектральном режиме и в режиме накопления.

Спектральная обработка сводилась к определению амплитуды первой гармоники. Спектр определялся через процедуру расчёта спектральной плотности мощности сигнала.

Накопление велось по первой гармонике с периодом  $T = 1/f$  и по второй гармонике с периодом  $T = 2/f$ . Накопление по второй гармонике выполнялось для оценки уровня шумов. Различие в оценках амплитуды сигнала двумя методами составляло единицы процентов.

Кажущееся удельное электрическое сопротивление рассчитывали с помощью геометрического коэффициента (1) для полного вектора напряжённости электрического поля [12]:

$$k = 2\pi \left[ r_{AO}^{-4} + r_{BO}^{-4} - \frac{r_{OB}^2 + r_{AO}^2 - r_{AB}^2}{(r_{AO} \cdot r_{BO})^3} \right]^{-1/2}, \text{ М}^2, \quad (1)$$

где  $r_{AO}$  и  $r_{BO}$  — расстояние до центральной точки приёма  $O$  от заземлений  $A$  и  $B$  соответственно,  $r_{AB}$  — длина питающей линии  $AB$ .

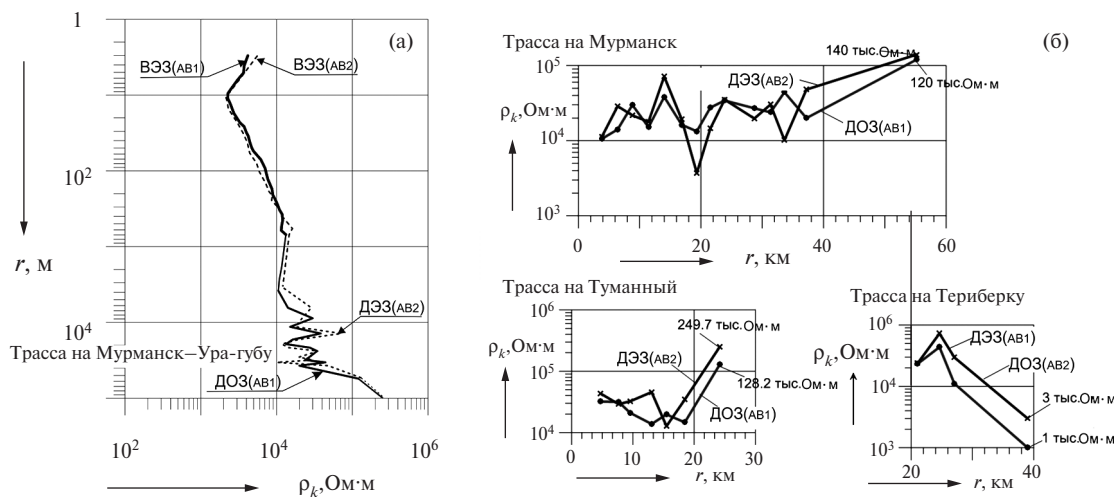
Кажущееся удельное сопротивление рассчитывали по формуле

$$\rho_k = k \frac{\sqrt{E_x^2 + E_y^2}}{I}, \text{ Ом} \cdot \text{ м}. \quad (2)$$

### ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

В районе питающих линий выполнено вертикальное электрическое зондирования в разных направлениях на разносах до 2 км. Получены примерно одинаковые по виду и по абсолютным значениям кривые кажущегося сопротивления ( $\rho_k$ ) в пределах точности наблюдений 5–7% (рис. 2а). Наклон кривых  $\rho_k$  ВЭЗ к оси ординат составляет примерно 30°, что указывает на градиентный рост удельного электрического сопротивления с глубиной. Рост сопротивления связан с уменьшением пористости и влажности горных пород. Эту часть геоэлектрического разреза можно определить как зону уплотнения.

Важной особенностью результатов дистанционного зондирования на средних разносах в первые десятки километров является резкое изменение поведения кривых  $\rho_k$  (рис. 2в). Вместо ожидавшегося



**Рис. 2.** Сводная диаграмма кривых кажущегося удельного электрического сопротивления по результатам дистанционных зондирований на территории Мурманского блока в билогарифмическом (а) и в линейно-логарифмическом (б) масштабах. ВЭЗ — вертикальное электрическое зондирование, ДЭЗ — дипольное экваториальное зондирование, ДОЗ — дипольное осевое зондирование. В скобках указаны питающие линии АВ1 и АВ2, относительно которых выполнены зондирования. Положение линий АВ и трасс зондирования показано на рис 1в.

продолжения градиентного роста  $\rho_k$  с глубиной, на разносах от 2–3 до 20–40 км наблюдается стабилизация значений  $\rho_k$  на уровне  $2 \cdot 10^4$  Ом·м с перепадами от  $10^4$  до  $4 \cdot 10^4$  Ом·м. На примере Мурманской трассы (рис. 2) можно видеть, что перепады значений  $\rho_k$  более резко проявлены на экваториальной установке, измеренной с меридиональной линией *AB2* (рис. 1в). Этот факт, а также некогерентное, иногда противофазное поведение кривых осевого и экваториального зондирования указывают на двумерный характер разреза и на преимущественное влияние субмеридиональных зон трещиноватости и разломов. Перепады значений Рока связаны с влиянием субвертикальных зон трещиноватости и разломов, выполаживающихся с глубиной. Можно предполагать, что их влиянием обусловлено существование на глубине 2–7 км промежуточного проводящего слоя дилатантно-диффузионной природы (ДД-слоя) описанного в [12]. Эту область геоэлектрического разреза в диапазоне разносов от 10 до 30–40 км, отвечающую интервалу глубин от 2–3 до 10–15 км, мы назвали зоной компакции. В этой части геоэлектрического разреза электропроводность горных пород определяется существованием свободных флюидов в открытых полостях, которые могут образовываться за счёт явления дилатансии при совместном воздействии и противоборстве литостатического и тангенциального давлений [2]. Совместно с верхним слоем градиентного увеличения сопротивления с глубиной верхняя толща земной коры до глубины 10–15 км может быть определена как область хрупкого состояния земной коры.

При дальнейшем увеличении разносов до 70–100 км значения Рока резко возрастают до 150–

300 тыс. Ом·м, указывая на существование более плохо проводящего основания. Эту границу резкого роста сопротивления с глубиной можно определить условно как границу “непроницаемости”, с которой может быть связана граница перехода горных пород из хрупкого в квазипластичное состояние [7].

Таким образом, благодаря непрерывному (линейному) шагу изменения разносов удаётся составить качественное представление о характере геоэлектрического разреза и отнести его к типу “А” с градиентно-ступенчатым увеличением сопротивления с глубиной. Количественное представление о геоэлектрическом разрезе позволяют получить результаты решения обратной задачи (рис. 3). Результаты подбора отражают три возможных варианта геоэлектрического разреза, различающиеся величиной удельного сопротивления плохо проводящего слоя в основании. Его сопротивление изменяется от  $10^5$  Ом·м для модели М1 до  $10^6$  Ом·м для модели М2 и до  $10^7$  Ом·м для модели М3. Для получения более полного согласия с экспериментальными данными на всех трёх моделях в геоэлектрический разрез внесён промежуточный слой пониженного сопротивления ( $10^4$  Ом·м) в интервале глубин от 2 до 7 км. Благодаря этому перегиб в интервале разносов от 10 до 30–40 км получил подтверждение в теоретических расчётах. Можно видеть из рис. 3, что разрешающая способность дистанционных зондирований к параметрам плохо проводящего основания невелика. Изменения сопротивления на моделях М1–М3 от  $10^5$  до  $10^7$  Ом·м (на три порядка) привели к изменениям кажущегося сопротивления менее чем на 1 порядок. Из трёх моделей предпочтение можно отдать модели М2 с сопротивлением осно-

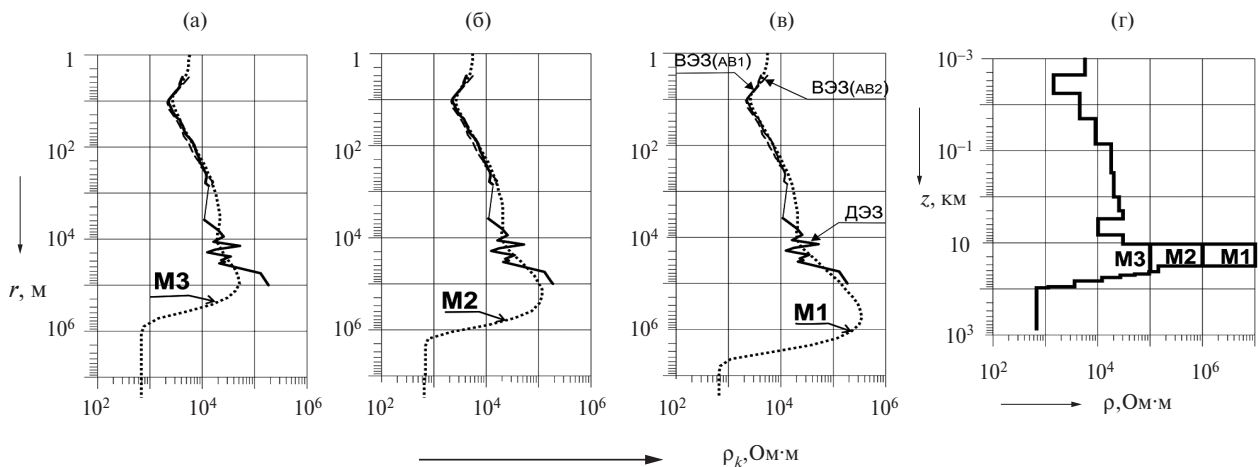


Рис. 3. Результаты решения методом подбора обратной задачи дистанционных зондирований в эксперименте “Мурман-2008” на примере зондирований на трассе Мурманск–Ура-губа (положение трассы зондирований показано на рис. 1в).



вания в  $10^6$  Ом·м. Однако полное решение обратной задачи в эксперименте “Мурман-2018” требует проведения дополнительных исследований с учётом анизотропии промежуточного слоя пониженного сопротивления и с привлечением двухмерных моделей, учитывающих выполаживание разломов и трещин с глубиной.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, по результатам эксперимента “Мурман-2018” в пределах верхней 20-ти километровой толщи земной коры на территории Мурманского блока установлена трёхслойная, модель электрического разреза типа “А” с градиентно-ступенчатым увеличением сопротивления с глубиной. Верхние два слоя до глубины 10–15 км рассматриваются как область хрупкого состояния горных пород. Глубже находится граница резкого возрастания сопротивления до  $10^6$  Ом·м на кровле нижнего плохо проводящего слоя. Эта область интерпретируется как граница перехода горных пород из хрупкого в квазипластичное состояние. Вопрос этот является дискуссионным, тем не менее следует отметить, что в этом же диапазоне глубин (12 км  $\pm$  10%) произошли все четыре аварии Кольской сверхглубокой скважины СГ-3, причина которых связывается с увеличением плотности и вязкости горных пород [7].

**Благодарности.** Авторы глубоко признательны ведущему программисту Т.Г. Коротковой за помощь в обработке и интерпретации результатов.

**Источники финансирования.** Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 18–05–00528 (экспедиция) и частично при поддержке Госзадания ГИ КНЦ РАН, тема НИР 0226–2019–0052 (интерпретация).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Садовский М.А.* Труды сейсмологического ин-та АН СССР. М.-Л., 1945. № 116.
2. *Николаевский В.Н.* Геомеханика и флюидодинамика. М.: Недра, 1996. 446 с.
3. *Moisio K., P. Kaikkonen* // J. Geodyn. V. 42. Iss. 4–5, 2006. P. 95–114.
4. *Шаров Н.В.* Литосфера Северной Европы по сейсмическим данным. Петрозаводск: Ид-во КарНЦ РАН, 2017. 160 с.
5. *Korhonen H., Porkka M.T.* // Pure and Appl. Geophys. 1981. V. 19. № 6. P. 1093–1099.
6. *Velikhov Ye.P., Zhamaletdinov A.A., Bel'kov I.V., Gorbunov G.I., Hjelt S.E., Lisin A.S., Vanyan L.L., Zhdanov M.S., Demidova T.A., Korja T., Kirillov S.K., Kuksa Yu.I., Poltanov A.Ye., Tokarev A.D., Yevstigneev V.V.* // J. Geodyn. 1986. V. 5. P. 237–256.
7. *Жамалетдинов А.А.* Модель электропроводности литосферы по результатам исследований с контролируруемыми источниками поля (Балтийский щит, Русская платформа). Л.: Наука, 1990. 159 с.
8. *Жамалетдинов А.А.* // ДАН. 2014. Т. 455. № 3. С. 332–336.
9. *Ваньян Л.Л.* Основы электромагнитных зондирований. М.: Недра, 1965. 108 с.
10. *Колобов В.В., Баранник М.Б., Жамалетдинов А.А.* Генераторно-измерительный комплекс “Энергия” для электромагнитного зондирования литосферы и мониторинга сейсмоактивных зон. СПб.: Соло, 2013. 240 с.
11. *Kopytenko E.A., Palshin N.A., Poljakov S.V., Schennikov A.V., Reznikov B.I., Samsonov B.V.* IAGA WG 1.2 on Electromagnetic Induction in the Earth 20th Workshop Abstract. Еgypt, 2010.
12. *Жамалетдинов А.А.* Теория и методика глубинных электромагнитных зондирований с мощными контролируруемыми источниками. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2012. 163 с.

## THE MURMAN-2018 EXPERIMENT ON REMOTE SENSING IN ORDER TO STUDY THE BOUNDARY OF “IMPENETRABILITY” AT THE TRANSITION BETWEEN THE BRITTLE AND PLASTIC STATES OF THE CRYSTALLINE EARTH'S CRUST

A. A. Zhamaletdinov<sup>1</sup>, Academician of the RAS E. P. Velikhov<sup>2</sup>, A. N. Shevtsov<sup>3</sup>,  
A. A. Skorokhodov<sup>3</sup>, V. V. Kolobov<sup>4</sup>, V. V. Ivonin<sup>4</sup>, V. V. Kolesnikov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Sankt-Petersburg affiliated Branch of the Institute of the Earth's Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation, Sankt-Petersburg, Russian Federation*

<sup>2</sup>*Scientific Research Center “Kurchatov Institute”, Moscow, Russian Federation*

<sup>3</sup>*Geological Institute of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Murmansk district, Apatity, Russian Federation*

<sup>4</sup>*North Center of the Energetics of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Murmansk district, Apatity, Russian Federation*

Received January 29, 2019

The article describes the experiment “Murman-2018” on remote electromagnetic sounding in combination with frequency and audio magnetotelluric soundings. The current from 29 kW power car-generator was fed into the ground using two mutually orthogonal grounded electric dipoles 1.6 and 1.9 km long. The measurements were carried out along three traces with maximum distances from the source up to 105 km in the mode of frequency sounding (in the range of 4–1000 Hz) and up to 56 km in the mode of remote sensing at direct current. The data processing was performed in the spectral mode and in the accumulation mode. The results of the experiment made it possible to quantify for the first time in the scientific literature the position of the boundary of a sharp increase in rock resistance at a depth of 10–15 km. The nature of the established boundary (the boundary of the “impenetrability” for direct current) is associated with the transition of the properties of the rocks of the Earth's crust from the fragile state in the upper crust to a plastic state at depths of 10–15 km and more. In foreign literature, this boundary is defined as the BDT-zone (brittle-ductile transition zone).

*Keywords:* Remote sensing, Murmansk block, impenetrability boundary, brittle earth crust, ductile earth crust.