

УДК 550.372: 550.379: 550.834

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭЛЕКТРОПРОФИЛИРОВАНИЯ НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ В КОМПЛЕКСЕ С АМТЗ ПО ПРОФИЛЮ, ПЕРЕСЕКАЮЩЕМУ ЛАДОЖСКУЮ АНОМАЛИЮ

**А. А. Жамалетдинов^{1,2}, В. Е. Колесников¹, А. А. Скороходов¹,
А. Н. Шевцов¹, М. Ю. Нилов³, П. А. Рязанцев³, Н. В. Шаров³,
М. А. Бируля⁴, И. А. Киряков⁵**

¹ Геологический институт Кольского научного центра РАН, Апатиты, Мурманская обл., Россия

² Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН, Россия

³ Институт геологии Карельского научного центра РАН, ФИЦ КарНЦ РАН, Петрозаводск, Россия

⁴ ОАО «ВЕГА», Санкт-Петербург, Россия

⁵ Санкт-Петербургский государственный университет, Россия

Статья посвящена результатам электроразведочных работ, выполненных в Северном Приладожье в 2015 и 2017 годах объединенным отрядом Геологического института Кольского научного центра РАН и Института геологии Карельского научного центра РАН. Комплекс методов включал электропрофилеирование на постоянном токе и аудиоманнителлурическое зондирование (АМТЗ). Основной объем работ составило электропрофилеирование методом внешнего скользящего диполя (МВСД) с шагом 500 м по профилю протяженностью 130,5 км, пересекающему Ладожскую аномалию электропроводности от п. Хийтола на западе до пос. Суйстамо на востоке. Средняя глубинность профилирования МВСД составила 150–200 м. Результаты МВСД позволили выявить два хорошо проводящих объекта. Один из них, шириной 200 м, расположен на восточном краю Ладожской аномалии, в районе Янисъярвинской разломной зоны, приуроченной к области контакта между протерозойскими образованиями Северного Приладожья и архейскими породами восточного обрамления. Второй проводящий объект имеет видимую мощность 7 км (Гранд-аномалия). Он расположен в средней части профиля, на траверсе поселков Элисенваара и Ихала. На обоих объектах значения кажущегося сопротивления опускаются до единиц и десятых долей Ом·м. Это позволяет отнести их к электронно-проводящему типу проводников, связываемых с присутствием графит- и сульфидсодержащих пород. В районе аномалий электропроводности выполнены детализационные работы методами внутреннего скользящего контакта (МВСК), срединного градиента (СГ) и аудиоманнителлурического зондирования (АМТЗ). На отдельных обнажениях выполнен отбор образцов для определения удельного электрического сопротивления пород. В статье приведено последовательное описание методики наблюдений и полученных результатов, а также их обсуждение.

Ключевые слова: Фенноскандинавский щит; Ладожская аномалия; электропроводность; электропрофилеирование; постоянный ток; аудиоманнителлурическое зондирование; метод внешнего скользящего диполя; метод внутреннего скользящего контакта.

A. A. Zhamaletdinov, V. E. Kolesnikov, A. A. Skorokhodov, A. N. Shevtsov, M. Yu. Nilov, P. A. Ryazantsev, N. V. Sharov, M. A. Birulya, I. A. Kiryakov.
RESULTS OF ELECTRIC PROFILING USING DIRECT CURRENT IN COMBINATION WITH AMT SOUNDING ALONG THE PROFILE ACROSS THE LAKE LADOGA ANOMALY

The article is devoted to the results of electrical surveying carried out in the Northern Ladoga region in 2015 and 2017 by a joint team of the Geological Institute of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences and the Institute of Geology of the Karelian Research Centre RAS. The set of methods included DC electrical profiling and audio-magnetotelluric sounding (AMTS). A major part of the work was electrical profiling by the method of external sliding dipole (MESD) with a 500 m step along a 130.5 km long profile crossing the entire width of the Lake Ladoga conductivity anomaly from the village of Hijtola in the west to the village of Suistamo in the east. The average depth of penetration of the MESD profiling was 150–200 m. The MESD output has enabled identification of two well conducting objects. One of them, 200 m wide, is located in the eastern margin of the Ladoga anomaly, in the area of the Janisjarvi fault zone, situated at the contact of the Northern Ladoga Proterozoic formations and Archaean rocks of the eastern frame. The second conducting object with a visible thickness of 7 km Grand anomaly is located in the middle part of the profile, on the traverse line of the settlements Elisenvaara and Ikhala. At both objects the apparent resistivity goes down to few ohm-meters or even decimal fractions. They can therefore be classified into the electronically conducting type of conductors associated with the presence of graphite- and sulfide-bearing rocks. The area of the revealed electrical conductivity anomalies was surveyed in detailed by the methods of internal sliding contact (MISK), median gradient (MG), and audio-magnetotelluric sounding (AMTS). Some outcrops were sampled for determination of the specific electrical resistance of the rocks. The article gives a consistent description of the observation technique, the results of observations and their discussion.

Key words: Fennoscandian Shield; Lake Ladoga anomaly; electrical conductivity; electric profiling; direct current; audio-magnetotelluric sounding; method of external sliding dipole; method of internal sliding contact.

1. Исторический очерк изучения Ладожской аномалии электропроводности

Аномалия электропроводности Северного Приладожья (Ладожская аномалия) приурочена к системе долгоживущих разломов, ориентированных в северо-западном направлении и располагающихся в области сочленения двух крупных тектонических блоков – Карельского и Свекофеннского. Аномальное поведение магнитотеллурического поля в Северном Приладожье впервые было обнаружено Н. В. Лазаревой на профиле Лахденпохья-Сортавала-оз. Кайтониярви общей протяженностью 150 км [Лазарева, 1967]. Ею по данным магнитотеллурических зондирований (МТЗ) в диапазоне периодов от 10 до 500 с были зафиксированы резкие изменения значений кажущегося сопротивления ρ_T от 10 до 600 000 Ом·м. Причину резких изменений ρ_T она связывала с влиянием тектоники. Позднее в этом районе были выполнены исследования методом магнитовариационного профилирования (МВП) [Рокитянский и др., 1981]. По результатам МВП, выполненного по редкой, нерегулярной сети наблюдений,

был сделан вывод о существовании в этом районе аномалии электропроводности (рис. 1).

Аномалия располагается на глубине 10 км и имеет параметр наполнения $G = \sigma \cdot S = 10^8$, м/Ом, где σ – удельная электропроводность в 1/Ом·м и S – поперечное сечение аномального тела в м². Положение проводящего тела в плане показано на рис. 1. Аномалия имеет северо-восточное падение под углом около 45 градусов. Природу ее И. И. Рокитянский объясняет наличием на глубине 10 км флюидов, выделяющихся под действием процессов дегидратации. Отсутствие над проводящим объектом аномалии теплового потока он объясняет тем, что тепловые процессы еще не достигли дневной поверхности.

По следам этой работы глубинные электромагнитные исследования развернулись на территории Финляндии. Первые аудио- и магнитотеллурические исследования были выполнены в 1980 году финскими и венгерскими геофизиками вдоль регионального сейсмического профиля «Свека», пересекающего центральную часть ЛБЗ [Adam et al., 1982]. Зондирования выполнены в диапазоне частот от 8 кГц до

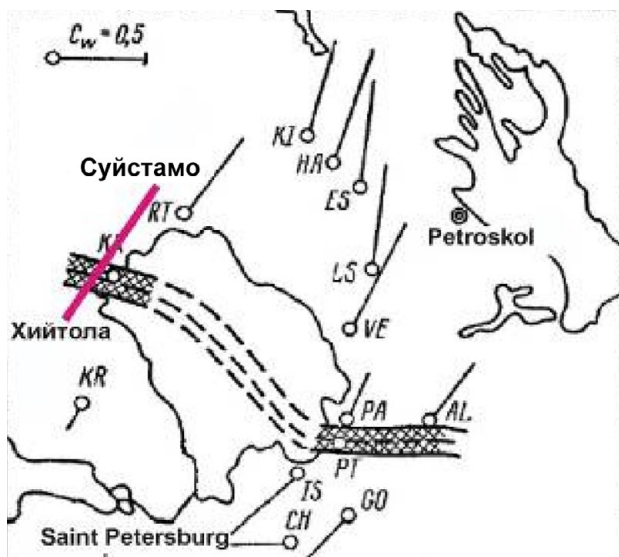


Рис. 1. Положение Ладожской аномалии электропроводности, впервые обнаруженной И. И. Рокитянским на юге Карелии [Рокитянский и др., 1981]. Сплошной линией показано положение профиля Хийтола-Суйстамо

Fig. 1. Location of the Ladoga electrical conductivity anomaly which was first detected by Igor Rokityansky after [Rokityanskii et al., 1981] in the southern part of Karelia. The solid line shows the Hiytola-Suistamo profile

0,001 Гц. Низкочастотные МТ-зондирования (10–1000 с) выполнены в 5 пунктах с применением аналоговой аппаратуры. Высокочастотные АМТ-зондирования выполнены в 64 пунктах с применением французской скалярной аппаратуры. По результатам наблюдений установлено, что земная кора по линии профиля разделяется на ряд чередующихся блоков разного сопротивления – от $2 \cdot 10^5$ до 10^2 Ом·м. При этом сделан вывод, что верхняя часть земной коры относительно однородна, тогда как нижняя часть коры в интервале глубин от 20 до 50 км имеет вертикально-слоистый характер и отличается высокой анизотропностью, что согласуется с данными сейсморазведки [Hjelt, 1984]. Позднее на территории Центральной и Южной Финляндии силами университета Оулу выполнены площадные магнитовариационные наблюдения с магнитометрами системы Гофа – Рейцеля [Rajunpaa, 1984]. Установлено, что впервые обнаруженная в России Ладожская аномалия является частью Ладожско-Ботнической зоны (ЛБЗ) и прослеживается более чем на 1000 км до северной оконечности Ботнического залива. Далее на северо-западе, на территории Норвегии, аномалия, предположительно, уходит под метаморфические образования каледонского возраста. Благодаря широкому распространению на территории ЛБЗ месторождений и рудопроявлений

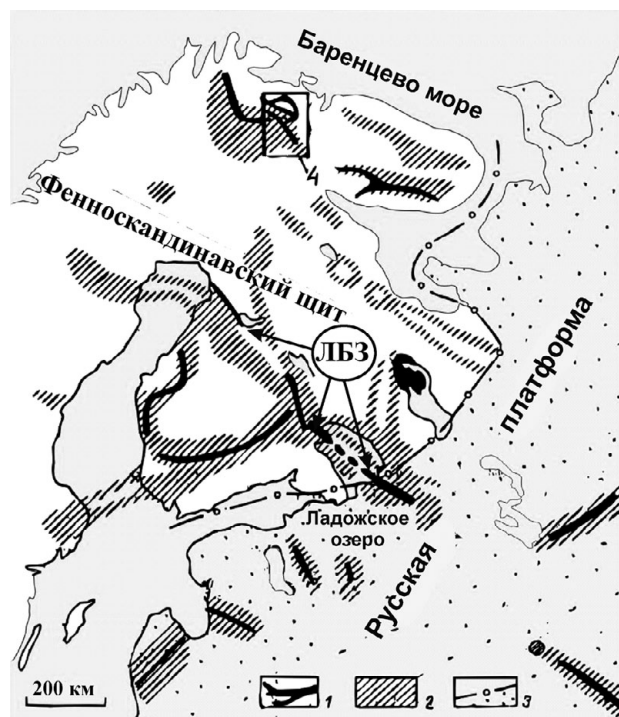


Рис. 2. Положение проводящих структур Ладожско-Ботнической зоны (ЛБЗ) на общей схеме коровых проводников Фенноскандинавского щита [Жамалетдинов, Ковтун, 1993]:

1 – оси проводящих зон с продольной проводимостью S до 1000 См и более, 2 – области повышенной электропроводности S , от 10 до 100 См и более, 3 – граница осадочного чехла Русской платформы

Fig. 2. Position of the conductive structures of the Ladoga-Bothnian zone (LBZ) on the overall scheme of crustal conductors of the Fennoscandian shield after [Zhamaletdinov, Kovtun, 1993]:

1 – axes of the conductive zones with the longitudinal conductivity S up to 1000 S or more, 2 – areas of higher electrical conductivity S from 10 to 100 S or more, 3 – boundary of the sedimentary cover of the Russian platform

полиметаллических руд она получила название «Цветной пояс Финляндии». Установлено, что Ладожская аномалия на территории Финляндии имеет перерывы и ответвления. Это хорошо видно на рис. 2.

Первые профильные (с шагом 10 км) исследования методом МТЗ в Северном Приладожье выполнены Ленинградским горным институтом в начале 80-х годов [Васин, 1988]. Примерно в это же время высокочастотные исследования методом АМТЗ в комплексе с длиннопериодными МТЗ над ЛБЗ выполнены группой А. А. Ковтун [1989]. Низкочастотные магнитотеллурические зондирования, проводившиеся группой А. А. Ковтун на территории Русской платформы, позволили обнаружить под покровом осадочных отложений на глубинах 3–10 км продолжение ЛБЗ к югу от Ладожского озера более чем на 100 км [Ковтун и др., 2004].

Несмотря на большой объем выполненных МТ-АМТ-зондирований, представления о глубинном строении Ладожской аномалии оставались неясными и спорными. В связи с этим в 2013–2015 годах по инициативе ИФЗ РАН были выполнены магнитотеллурические и магнитовариационные зондирования по региональному профилю Выборг-Суоярви. Исследования проводились с применением современных технологий комплексного МТ-МВ-зондирования рабочей группой ЛАДОГА с целью построения геоэлектрических моделей и последующего геотектонического районирования [Соколова и др., 2016]. По результатам этой работы уточнены параметры Ладожской аномалии и сделан вывод о ее юго-западном падении. Кроме того, разработаны новые геотектонические концепции о строении региона путем комплексирования данных глубинной геоэлектрики с результатами сейсморазведки ОГТ и потенциальной геофизики [Соколова и др., 2016].

Одним из слабых мест в изученности Ладожской аномалии является отсутствие более или менее полных сведений об электропроводности горных пород, выходящих близко к дневной поверхности. Это наблюдается как на территории России, так и в зарубежной части ЛБЗ. Имеющиеся электроразведочные работы на постоянном токе носят фрагментарный характер и не дают представления об электропроводности пород приповерхностных горизонтов по всей ширине Ладожской аномалии. В то же время специфика геоэлектрических условий Фенноскандинавского кристаллического щита требует обязательного учета электропроводности пород вблизи расположения приемных линий при проведении глубинных зондирований как с естественными, так и с контролируруемыми источниками [Жамалетдинов, 1990]. Основными причинами отсутствия протяженных профильных электроразведочных работ в Северном Приладожье явились сложные условия рельефа и крайняя извилистость береговой линии Ладожского озера и прилегающих к ней дорог. С целью восполнить образовавшийся пробел объединенным отрядом Геологического института Кольского научного центра РАН и Института геологии Карельского научного центра РАН в 2015 году выполнено электрическое профилирование на постоянном токе в комплексе с АМТ-МТЗ по профилю Хийтола-Суйстамо. Дополнительные исследования выполнены в 2017 году с целью детализации результатов, полученных на аномальных участках. Положение профиля наблюдений показано на рис. 1.

2. Методика работ

2.1. Техника и методика электропрофилирования методом внешнего скользящего диполя (МВСД)

Методика электропрофилирования по схеме МВСД разработана специально для наблюдений по извилистым дорогам Северного Приладожья. Схема установки МВСД приведена ниже на рис. 3. Принцип работы основан на дипольно-осевом зондировании-профилировании с измерением модуля полного вектора напряженности горизонтального электрического поля (векторные наблюдения). В центральной части установки располагается питающая линия АВ длиной 500 м. Ток силой до 1 А подается от генератора ЭМАК мощностью 1 кВт на частоте 4,88 Гц. Измерения напряженности

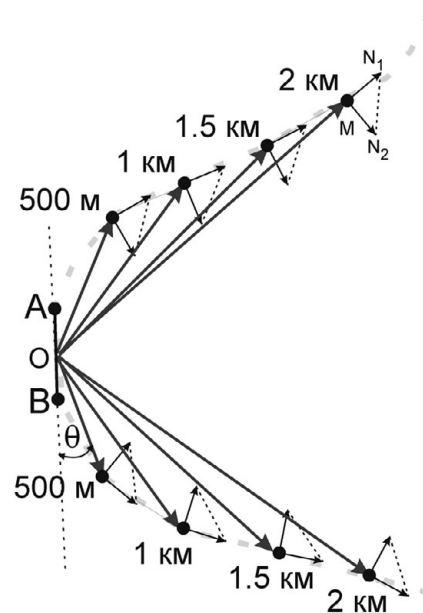


Рис. 3. Схема электропрофилирования с установкой МВСД (методом внешнего скользящего диполя):

АВ – положение питающей линии длиной 500 м. Черные точки – положение центров приемных линий и заземлений АВ. Тонкими стрелками показано положение измерительных линий вдоль и поперек дороги. Тонкий пунктир – положение диагональных измерительных линий N1-N2. θ – угол между линией АВ и линиями OM_i , соединяющими центры приемных линий MN_i с центром АВ. Светлая штриховая линия – дорога

Fig. 3. Scheme of electric profiling by the MESD (the method of external sliding dipole):

AB – position of the current line of 500 m length. The black points show the position of the centers of the receiving lines and AB groundings. Thin arrows show the position of measuring lines along and across the road. A thin dotted line shows the position of the N1-N2 diagonal measuring lines. θ – angle between the AB line and the OM_i lines connecting the centers of the receiving MN_i lines with the center of AB. A road is shown by the light dashed line

электрического поля выполняются с аппаратурой АНЧ-3. Измерительные линии располагаются последовательно в двух противоположных направлениях с шагом 500 м на удалении до 2 км от ближайшего питающего заземления (рис. 3). В центре каждой питающей линии АВ проводятся малоглубинные зондирования на постоянном токе с разносами от 3 до 250 м. За пределами питающей линии АВ в каждой приемной точке раскладываются по два взаимно ортогональных приемных диполя MN длиной от 50 до 200 м (рис. 3). Длины диполей MN увеличиваются с удалением от питающей линии АВ в связи уменьшением напряженности поля и соответствующим уменьшением соотношения «сигнал-помеха». В каждой точке приема производятся два замера электрического поля в двух взаимно ортогональных направлениях и третий замер на диагональной линии N₁N₂ путем подключения дальних концов ортогональных линий MN₁ и MN₂ к измерителю АНЧ-3, обладающему гальванической развязкой от земли. Третий замер позволяет оценивать направление полного вектора для получения суждений о степени влияния на результаты наблюдений горизонтальной неоднородности пород. Для этого осуществляется расчет теоретического направления вектора над однородным полупространством и сравнивается его положение с положением экспериментально зафиксированного вектора.

Вся методика МВСД опирается на использование спутниковой системы позиционирования (GPS) и полную компьютеризацию, начиная от цифрового ввода координат питающих и приемных линий и результатов наблюдений в память компьютера и завершая обработкой данных и графическим отображением полученных результатов непосредственно в полевых условиях. Применение GPS-навигации полностью избавляет от необходимости заранее размечать профили наблюдений и положение питающих и приемных заземлений.

Главная особенность методики МВСД и теории обработки результатов заключается в том, что значения кажущегося сопротивления рассчитываются по величине полного горизонтального вектора напряженности электрического поля в точках приема. Это не только упрощает процедуру нормирования поля, но и снижает роль неизбежных ошибок, возникающих за счет неточности определения геометрических параметров и за счет влияния локальных неоднородностей, изменяющих направление полного вектора, но, как правило, не влияющих на его амплитуду. Формула для расчета значений модуля полного вектора напряженности

электрического поля приведена ниже [Жамалетдинов, 2012].

$$|\vec{E}_{tot}^{theor}| = \frac{\rho \cdot I}{2\pi} \left[r_A^{-4} + r_B^{-4} - \frac{r_A^2 + r_B^2 - l_{AB}^2}{(r_A \cdot r_B)^3} \right]^{1/2}, \quad (1)$$

где l_{AB} – длина линии АВ, r_A и r_B – расстояния от точки наблюдения до заземлений А и В соответственно (рис. 3). Расчет значений ρ_k^{tot} выполнялся по формуле

$$\rho_k^{tot} = K_{tot} \cdot \frac{E_{tot}^{exp}}{I},$$

где $E_{tot}^{exp} = \sqrt{E_{MN1}^2 + E_{MN2}^2}$, I – сила тока в линии АВ, геометрический коэффициент $K_{tot} = 1/E_{tot}^{theor}$, $E_{MN} = \Delta U_{MN} / l_{MN}$.

При расчете геометрического коэффициента K_{tot} по формуле (1) принято

$$\rho = l = 1.$$

Эффективное (действующее) расстояние \tilde{r} , аналогичное величине АВ/2 в методе ВЭЗ, определяется по формуле

$$\tilde{r} = r_A + 0,5 \cdot (r_B - r_A) \cdot (r_A / r_B)^2, \quad (2)$$

где $r_A \leq r_B$. В случае, если $r_A > r_B$, значения r_A и r_B меняются местами в (1) и (2).

При удалении измерительных линий MN от питающей линии АВ наряду с эффектом профилирования происходит зондирование разреза на глубине, возрастающей с удалением от АВ. Одновременно при этом смещается точка записи. Необходимо также отметить, что глубинность установки МВСД изменяется с изменением угла Θ между осью питающей линии АВ и направлением на центр приемной линии (рис. 3). Для экваториальной установки ($\Theta = 90^\circ$) глубинность имеет тот же порядок, что для установки ВЭЗ, и составляет 0,5·00', где 00' – расстояние между центром питающей линии и центром приемных линий. Для осевой установки ($\Theta = 0^\circ$) глубинность уменьшается вдвое и составляет 0,25·00', но при этом увеличивается разрешающая способность процесса зондирования [Заборовский, 1963]. Отмеченные особенности учитываются при обработке и экспресс-интерпретации результатов МВСД.

2.2. Техника и методика

электропрофилирования методом внутреннего скользящего контакта (МВСК)

Методика МВСК, как и МВСД, основана на сочетании принципов зондирования и профилирования [Zhamaletdinov et al., 1995]. Сама установка МВСК изготавливается в виде «косы»

Направление движения установки МВСК

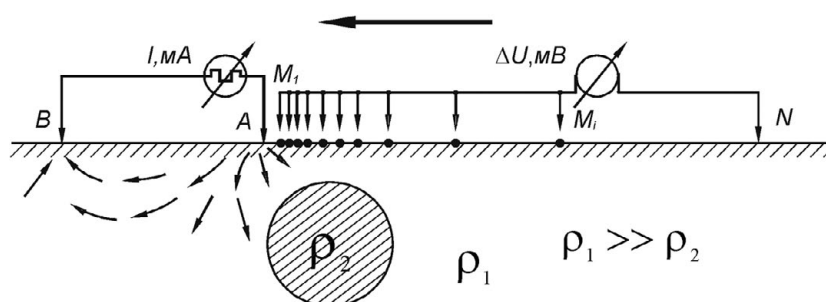


Рис. 4. Схема электропрофилеирования с установкой МВСК (методом внутреннего скользящего контакта). Пояснения к рисунку даны в тексте

Fig. 4. Scheme of electric profiling by the MISC (the method of internal sliding contact). See the text for the explanations to the figure

(рис. 4). В голове «косы» располагается питающая линия АВ. Длина линии АВ в варианте, использованном в данной работе, равна 50 м, длина AN – 100 м. Линия М₁N составляет приемную часть «косы» с несколькими линиями М₁N, как это показано на рис. 4.

«Коса» включает в себя приемный электрод N, постоянно подключенный к клемме N измерителя АНЧ-3, и приемные электроды М_i, заземленные на разных расстояниях от ближайшего питающего электрода А и поочередно подключаемые к клемме М измерителя. На каждой паре «электрод М_i – электрод N» регистрируется сигнал, подаваемый через питающую линию. Изменение расстояния между питающим электродом А и приемным электродом М_i («внутренний скользящий контакт» в приемной линии) дает информацию об изменении свойств среды с глубиной (зондирование). Перемещение всей установки МВСК с фиксированными расстояниями между электродами вдоль профиля с регулярным шагом позволяет проводить исследования электропроводности вдоль дневной поверхности (профилеирование). Таким образом обеспечивается двумерное исследование (сканирование) верхней части геoeлектрического разреза.

Расстояния АМ_i приняты равными 5, 7, 10, 14, 20, 30, 50 и 70 м. По мере переключения контактов М_i изменяются и геометрические параметры установки зондирования от потенциальной (двухэлектродной) при М₁N >> АМ₁ << АВ до близкой к дипольно-осевой на максимальном разnose АМ_i = 70 м. На этом разnose длина приемной линии М₁N = 30 м, что намного меньше расстояния между центрами питающей и приемной линий (110 м).

Обработка данных осуществляется в две стадии. На первом этапе вычисляются значения кажущегося сопротивления, строятся

графики сопротивления ρ_k в формате профилеирования (в зависимости от расстояния по профилю) и графики зондирования в формате ВЭЗ (в зависимости от эффективного разноса $r_{эфф}$). Далее выполняется качественный анализ полученных данных. Кажущееся сопротивление вычисляется с помощью выражения (3):

$$\rho_k = K \cdot \frac{\Delta U}{I} = \frac{2\pi \cdot AM \cdot AN \cdot BM \cdot BN}{MN \cdot (BM \cdot BN - AM \cdot AN)}, \text{ Ом} \cdot \text{ м}, \quad (3)$$

где расстояния АМ, АN и другие соответствуют расстояниям, показанным на рис. 4.

Эффективный разнос (эффективная глубина зондирования) определяется с применением эмпирической формулы

$$r_{эфф} = AM + 0.5MN \cdot \left(\frac{AM}{AN}\right)^2 + 0.5AB \cdot \left(\frac{AM}{BM}\right)^2. \quad (4)$$

Количественная интерпретация осуществляется путем одномерной и двухмерной инверсии. Одномерная обратная задача решается с применением процедуры Зоhди [Zohdy, 1989]. Стартовая модель при этом задается в виде многослойного разреза с количеством слоев, равным числу разносов АМ_i. Глубины до подошвы слоев и их удельное сопротивление принимаются равными соответствующим значениям АМ_i и ρ_{ki} . Далее для принятой установки зондирования происходит итерационный подбор теоретической модели среды до получения согласия с экспериментальными данными в пределах погрешности наблюдений.

Двухмерная задача решалась путем численного моделирования методом конечных элементов по программе А. Е. Каминского [2010]. Для обеспечения корректной работы с экспериментальными данными была проведена адаптация программы к методике МВСК [Колесников, 2016]. Для этого определена оптимальная структура файлов данных, выбран

корректно считываемый формат вводимых чисел, найдено численное выражение оценки качества наблюдаемого материала. Пример расчетов приведен в разделе 3.2.

2.3. Методика аудиоманнитотеллурического зондирования (АМТЗ)

Аудиоманнитотеллурические зондирования выполнялись с применением двух комплектов аппаратуры – КВВН-7 и VMTU-10. Семиканальная цифровая аппаратура КВВН-7 изготовлена в КНЦ РАН [Колобов и др., 2009] путем последовательной модернизации станций серии СЧЗ-61 [Эненштейн, Иванов, 1961] и СЧЗ-95 [Токарев и др., 1997]. Станция КВВН-7 имеет 3 магнитных канала и 4 электрических. Главной особенностью станции является наличие режекторных фильтров, подавляющих первые пять гармоник промышленной частоты, и применение многоступенчатой системы усиления. Это позволяет ограничиться динамическим диапазоном в 20 разрядов. Существенным неудобством является необходимость записи временных рядов на полевой компьютер, входящий в комплект станции КВВН-7. От упомянутых и других неудобств КВВН-7 избавлена современная станция VMTU-10, изготовленная компанией ОАО «ВЕГА» (Восточно-Европейская геофизическая ассоциация) [Корытенко et al., 2010]. Запись результатов в ней осуществляется на встроенный data-logger. Регистрация сигналов осуществляется в 32-разрядном динамическом диапазоне с частотой до 1000 Гц. Широкий динамический диапазон избавляет от необходимости применения в станции фильтров для подавления промышленной частоты. Полная автономность, низкое энергопотребление, наличие GPS-синхронизации и дистанционный контроль за параметрами записи во время процесса регистрации АМТ-сигналов с помощью системы WiFi делают станцию VMTU-10 идеальным прибором для зондирования как с естественными, так и с контролируруемыми источниками [Жамалетдинов, 2012, 2014].

Принципиально важным техническим показателем качества магнитотеллурических станций является уровень собственных шумов магнитных индукционных датчиков. На рис. 5 представлена диаграмма спектральных характеристик собственных шумов магнитных датчиков станций КВВН-7 и VMTU-10 в сопоставлении с Львовскими станциями серии LEMI, принимаемыми в качестве эталона на международном уровне [Когерапов, 2002].

На рис. 5 приведены также частотные характеристики шумов, создаваемых естественными

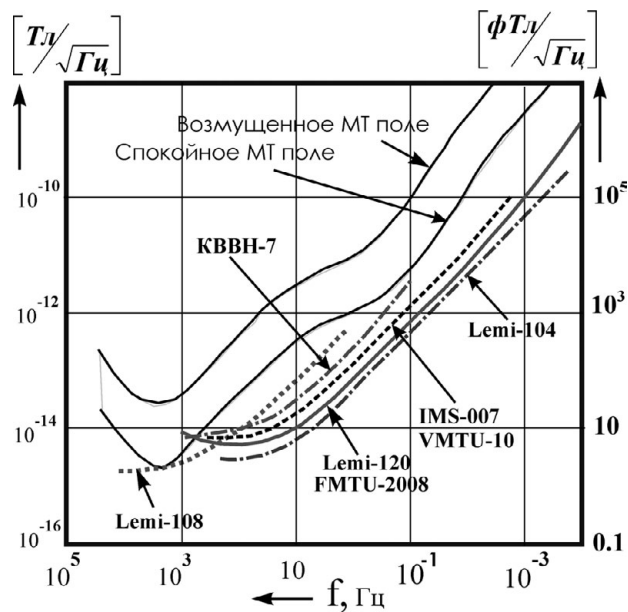


Рис. 5. Диаграмма спектральных характеристик собственных шумов индукционных датчиков в станциях КВВН-7 и VMTU-10 в сопоставлении с индукционными датчиками серии LEMI

Fig. 5. Diagram of the inner noise spectral characteristics of the induction sensors in the KVVN-7 and VMTU-10 stations in comparison with the induction sensors of the LEMI series

вариациями в режимах спокойного и возмущенного МТ-поля. Чем ниже под естественными шумами находятся шумы магнитных датчиков, тем с большей надежностью они позволяют регистрировать амплитуду и фазу полезного сигнала и решать задачу МТ-АМТ-зондирования. Можно видеть, что наиболее близко к датчикам серии LEMI располагается шумовая характеристика датчиков серии IMS-007 станции VMTU-10. Индукционные датчики станции КВВН-7 имеют несколько худшие характеристики. Тем не менее они отвечают необходимым условиям для регистрации АМТ-поля в диапазоне частот от 0,5 кГц до 0,1 Гц. Станция VMTU-10 позволяет регистрировать вариации МТ-АМТ-поля в диапазоне от 1 кГц до 0,001 Гц.

Известно, что МТ-АМТ электромагнитное зондирование выполняется путем статистической обработки шумового (случайного) поля, создаваемого ионосферно-магнитосферными и грозowymi источниками вариаций естественного электромагнитного поля Земли (ЕЭМПЗ). Расположение и параметры источников неизвестны. Поэтому главным условием для получения устойчивых функций отклика среды является применение корректных способов обработки, позволяющих выявлять полезные сигналы, отвечающие модели Тихонова – Каньяра. В настоящей работе

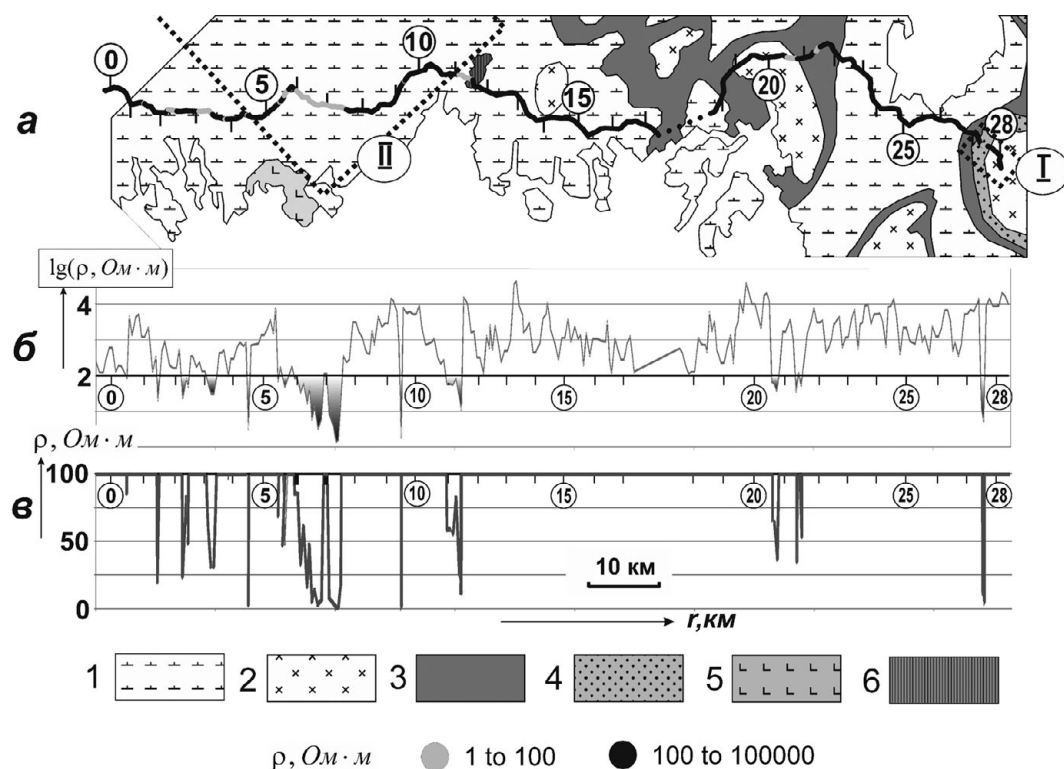


Рис. 6. Результаты электропрофилирования с установкой МВСД над Ладожской аномалией электропроводности:

а – положение профиля МВСД на геологической схеме [Свириденко и др., 2017]. Светлыми полосами на профиле обозначены аномалии электропроводности (менее 100 Ом·м); б – график кажущегося сопротивления МВСД в логарифмическом масштабе; в – то же в линейном масштабе.

Цифрами в кружках обозначены номера стоянок питающих линий АВ установки МВСД, показанной на рис. 3. Римские цифры в кружках: I – контур участка Янисъярви (рис. 11), II – фрагмент контура участка Гранд-аномалия – Ихала (рис. 8).

Легенда к геологической схеме: 1 – слюдяные гнейсы, сланцы, песчаники, алевролиты; 2 – гнейсы, диорито-гнейсы, 3 – лавы, амфиболитизированные базальты; 4 – осадочно-вулканогенные толщи; 5 – граниты рапакиви; 6 – габбро-нориты

Fig. 6. Results of MESD electric profiling of the Ladoga electrical conductivity anomaly:

а – position of the MESD profile on the geologic scheme after [Sviridenko et al., 2017]. Anomalies of electrical conductivity (less than 100 Ohm · m) are indicated by bright lines on the MESD profile; б – graph of the MESD apparent resistivity in a logarithmic scale; в – same in a linear scale.

The numbers in the circles indicate the numbers of AB lines of the MESD unit shown in Fig. 3. Roman numerals in the circles: I – contour of the Janisjarvi section (Fig. 11), II – fragment of the contour of the Grand anomaly-Ikhala section (Fig. 8).

Legend to the geological scheme: 1 – mica gneisses, shales, sandstones, siltstones; 2 – gneisses, diorite-gneisses, 3 – lavas, amphibolized basalts; 4 – sedimentary-volcanogenic strata; 5 – rapakivi granites; 6 – gabbro-norites

применена программа обработки, составленная А. Н. Шевцовым [2006] на основе работы В. Ю. Семенова [1985]. При отбраковке данных главными условиями их удовлетворительного качества приняты устойчивое наблюдение шумановских резонансов (не менее первых двух гармоник на частотах 7,5 и 15 Гц) на спектрограммах всех компонент поля и высокая когерентность сопряженных компонент электромагнитного поля $E_x H_y$ и $E_y H_x$ (не ниже 70 %) при низкой когерентности антисопряженных компонент поля $E_x H_x$ и $E_y H_y$ (не выше 30 %).

Техника и методика АМТ-МТ-зондирований достаточно полно описана в классических трудах М. Н. Бердичевского [1968].

3. Результаты

3.1. Результаты электропрофилирования МВСД

Результаты электрического профилирования МВСД на профиле Хийтола-Суйстамо приведены на рис. 6.

В верхней части рис. 6 показано положение профиля наблюдений МВСД на упрощенной геологической основе (рис. 6, а). Ниже (рис. 6, б, в) приведены графики кажущегося сопротивления МВСД в логарифмическом и линейном масштабах соответственно. На графике ρ_k в линейном масштабе (рис. 6, в) отражены только аномальные значения кажущегося сопротивления, ниже среднего уровня 100 Ом·м.

Общее рассмотрение результатов электропрофилирования МВСД на рис. 6 показывает, что верхняя часть геоэлектрического разреза над Ладожской аномалией характеризуется сильной изрезанностью и в среднем высокими значениями сопротивления, изменяющимися в пределах от сотен до десятков тысяч Ом·м. На этом фоне наблюдаются отдельные, как правило, слабые (в десятки Ом·м) и довольно узкие зоны пониженного сопротивления. Среди них выделяются лишь две контрастные аномалии электропроводности, где кажущееся сопротивление опускается до единиц и десятых долей Ом·м, что указывает на их явную связь с присутствием электронно-проводящих пород, сульфидно-графитовых сланцев. Одна из аномальных зон, наиболее мощная и хорошо проводящая (она получила условное название Гранд-аномалия), установлена в восточной части профиля между 6-м и 8-м пунктами МВСД. Ее видимая мощность на дневной поверхности достигает 7 км. Гранд-аномалия располагается к югу от поселка Элисенваара. Пространственно она довольно точно совпадает с эпицентром Ладожской аномалии (рис. 1), установленной по данным МВП в работе [Рокитянский и др., 1981]. В геологическом отношении Гранд-аномалия располагается в сравнительно однородном поле распространения гнейсофицированных и гранитизированных песчаников, слюдяных гнейсов, сланцев, песчаников и алевролитов свиты Наатселька [Свириденко и др., 2017]. Вторая аномалия электропроводности расположена на восточной оконечности профиля, в районе 28-го пункта МВСД (рис. 6). Пространственно она приурочена к Янисьярвинской разломной зоне, сложенной нерасчлененными осадочно-вулканогенными толщами людиковийско-ятулийского возраста. Более детально строение и геологическая позиция выделенных аномальных зон будет рассмотрена в разделах 3.2 и 3.3. Пока остановимся на сопоставлении результатов электропрофилирования МВСД с результатами численного моделирования МТ-АМТ-зондирования над Ладожской аномалией (рис. 7).

В верхней части рис. 7 приведен график удельного электрического сопротивления по

отдельным блокам земной коры, выявленным на основе одномерной интерпретации (рис. 7, а). При построении этого графика за основу приняты значения удельного сопротивления на максимальной глубине зондирования-профилирования (150–200 м). Поэтому на графике видно в целом высокое сопротивление пород, около 10 тысяч Ом·м. В целом рис. 7, а является осредненной (сглаженной) копией графика МВСД, приведенного на рис. 6, б.

Ниже, на рис. 7, б, приведен квазидвухмерный разрез удельного сопротивления по профилю Хийтола-Суйстамо по результатам МВСД для верхней части разреза до глубины 200 м. Квазидвухмерная интерпретация осуществлялась на основе решения одномерной обратной задачи. Результаты решения одномерной задачи наносились на разрез путем симметричного смещения глубинных центров зондирования относительно питающей линии АВ на юго-запад и на северо-восток по мере перемещения приемных диполей MN в противоположных направлениях (рис. 3). При рассмотрении квазидвухмерного геоэлектрического разреза на рисунке 7, б можно отметить преимущественное падение пород в юго-западном направлении. Заметим, что горизонтальный масштаб много мельче вертикального, поэтому углы падения границ сильно завышены. Фактически они составляют единицы градусов, а большей частью горизонтальны. На приведенном разрезе можно отметить также общую тенденцию к увеличению удельного сопротивления пород с глубиной от первых сотен Ом·м у дневной поверхности до десятков тысяч Ом·м на глубинах 150–200 м. На общем фоне плохо проводящих пород отчетливо выделяются аномально-проводящие зоны, описанные выше. Определение их элементов залегания требует проведения специальных теоретических исследований с применением численного двухмерного и, по возможности, трехмерного моделирования.

В нижней части рис. 7 приведена двухмерная модель вертикального электрического разреза Ладожской аномалии по результатам численного моделирования данных АМТ-МТ-зондирования [Васин и др., 1993]. На представленной модели наблюдается общая тенденция к уменьшению удельного сопротивления пород с глубиной от сотен Ом·м вблизи дневной поверхности до 5–25 Ом·м на глубинах 10–40 км. Наряду с этим выделяются три эпицентра повышенной электропроводности, подходящие близко к дневной поверхности. Первый эпицентр (западный) примерно совпадает с положением

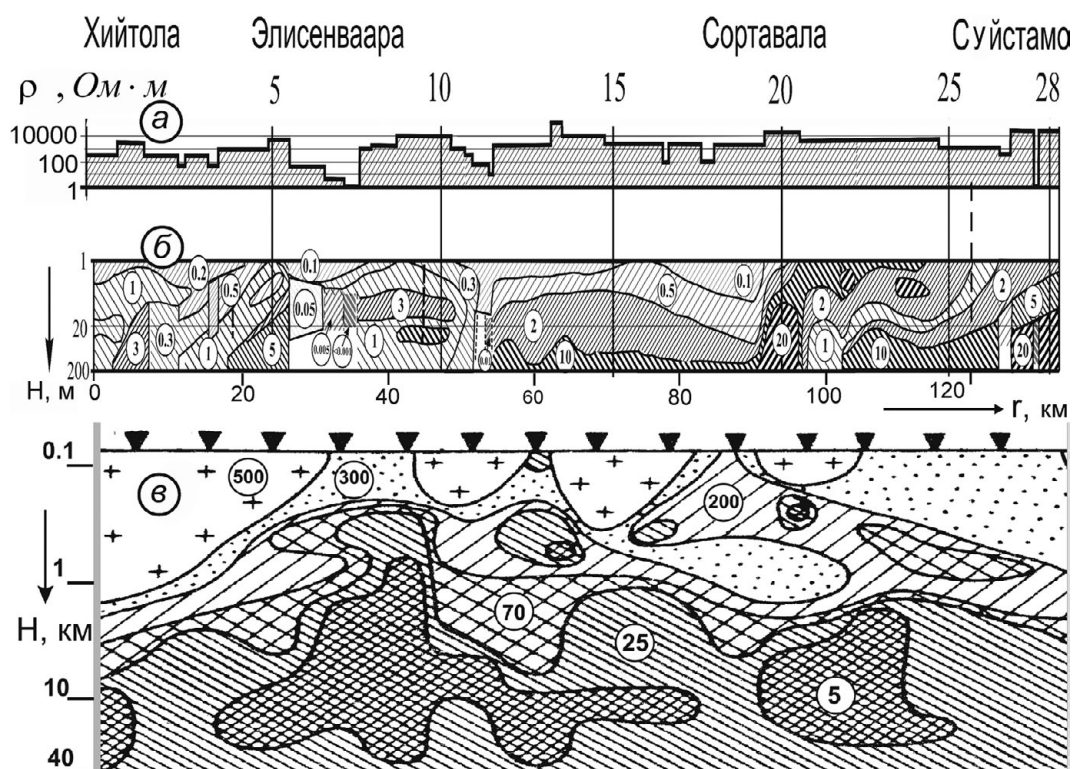


Рис. 7. Сопоставление результатов электропрофилеирования МВСД и модели глубинного строения Ладожской аномалии по результатам численного моделирования МТ-АМТ зондирований:

а – график кажущегося сопротивления по результатам МВСД; б – квазидвухмерный разрез МВСД по результатам одномерной интерпретации (цифры в кружках – удельное сопротивление в $\text{k}\Omega\cdot\text{м}$); в – двухмерная модель распределения удельного сопротивления в Ладожской аномалии по результатам численного моделирования АМТЗ [Васин и др., 1993] (цифры в кружках – сопротивление в $\Omega\cdot\text{м}$)

Fig. 7. Comparison between the MESD profiling results and the deep structure model of the Ladoga anomaly based on the results of MT-AMT digital modelling:

а – chart of apparent resistivity according to the MESD results; б – quasi-2D section of the MESD profiling according to the 1D inversion results. The numbers in the circles indicate the resistivity in $\text{k}\Omega\cdot\text{m}$; в – 2D model of the resistivity distribution in the Ladoga anomaly based on the results of AMTS numerical simulation after [Vasin et al., 1993]. The numbers in the circles indicate the resistivity in $\Omega\cdot\text{m}$

Гранд-аномалии, выделяемой между пикетами 6 и 7.5 на профиле МВСД на траверсе поселка Элисенваара (рис. 7, а). Второй эпицентр аномалии АМТ-МТЗ (средний) находится в 10 км восточнее пос. Лахденпохья и в 5 км к востоку от незначительной аномалии МВСД шириной 2 км с значениями кажущегося сопротивления, опускающимися до нескольких десятков $\Omega\cdot\text{м}$ (пикеты 11–11.5 на рис. 6, в). В геологическом отношении эта аномалия отвечает области распространения пироксеновых гранитоидов и габброидных пород. Третий, восточный эпицентр аномалии электропроводности на рис. 7, в располагается в районе г. Сортавала. Наблюдения МВСД здесь не проводились в связи с интенсивной застройкой территории жилыми и промышленными корпусами. Восточнее города Сортавала, в районе пункта 20 отмечено два незначительных понижения сопротивления

до десятков $\Omega\cdot\text{м}$, связываемых с известняками и доломитами. Они видны только на рис. 6, б, в. Результаты инверсии показывают, что эти понижения сопротивления и связанные с ними известняки и доломиты имеют приповерхностное положение. На глубинах 100–200 м они сменяются плохо проводящими породами основания (рис. 7, а).

Таким образом, результаты электропрофилеирования МВСД позволили получить общее представление о характере электропроводности приповерхностного среза Ладожской зоны. В следующих двух разделах представлены результаты детализационных работ на двух наиболее контрастных и хорошо проводящих объектах. Детализация проводилась путем электропрофилеирования МВСК и срединного градиента (СГ) в комплексе с аудиоманнителлурическими зондированиями.

3.2. Детализация результатов МВСД на участке Гранд-аномалия – Ихала

Положение профиля МВСД на участке детальных работ Гранд-аномалия – Ихала показано на рис. 8. Геологическая основа приведена путем совмещения двух работ – карты Л. П. Свириденко [Свириденко и др., 2017] и фрагмента детальной геологической производственной схемы, любезно переданной авторам Н. С. Бискэ, специализирующейся в области изучения углеродистых формаций Карелии [Бискэ, 2017].

Совмещение этих двух геологических схем с положением профиля МВСД на рис. 9 позволило по-новому увидеть характер Гранд-аномалии. На первом этапе работ, в 2015 году, пользуясь упрощенной схемой, приведенной на рис. 6, мы предполагали, что профиль на аномальном участке между пунктами 6 и 8 проходит вкрест ее простираения. Но рассмотрение материалов на рис. 8 показало, что МВСД-профиль прошел в межкупольном пространстве не вкрест, а вдоль простираения структур. Природа высокой электропроводности связана с вулканогенно-осадочными породами, представленными 3-й и 4-й толщами питкяррантской серии (Pr_1pt_{3-4}). В состав этих толщ входят графитсодержащие и графитовые биотитовые сланцы, гранат-биотитовые гнейсо-сланцы и амфиболиты разного состава. Породы эти пользуются широким распространением в Северном Приладожье и залегают в виде овоидных структур, облекающих гранитизированные купольные структуры, своего рода «стада куполов» на карте Л. П. Свириденко [Свириденко и др., 2017]. На исследуемой территории к этим породам приурочен целый ряд месторождений и рудопроявлений графита. Одно из них находится в районе поселка Ихала. С любезного согласия владельцев лицензии в 2017 году нами выполнено электропрофилирование МВСК по одному из буровых профилей месторождения Ихала. Результаты электропрофилирования на участке Ихала представлены на рис. 9 в сопоставлении с электропрофилированием МВСК над Гранд-аномалией. По техническим причинам профилирование МВСК на Ихале было выполнено только до разноса 30 м. Но и на таком малом разносе кажущееся сопротивление почти в 100 раз меньше, чем над Гранд-аномалией на разносе 70 м. Сравнивая рис. 9, а с рис. 6, б, в, можно заметить, что значения кажущегося сопротивления на результатах МВСК почти в 10 раз выше, чем на результатах МВСД. Это объясняется большей глубиной принятой установки МВСД. Отсюда следует вывод, что в

пределах Гранд-аномалии электропроводность пород увеличивается с глубиной.

С целью определения параметров глубинного разреза в пределах Гранд-аномалии выполнены АМТ-зондирования с аппаратурой КВВН-7 в четырех точках, показанных на рис. 8. Результаты АМТЗ представлены на рис. 10.

АМТЗ, снятые в точке 3К (западнее аномалии, в точке 5 МВСД) и в точке 6К (восточнее аномалии, в точке 8 МВСД), имеют разный характер, но в целом указывают на высокое сопротивление пород (порядка 10^4 Ом·м) без признаков высокой электропроводности до

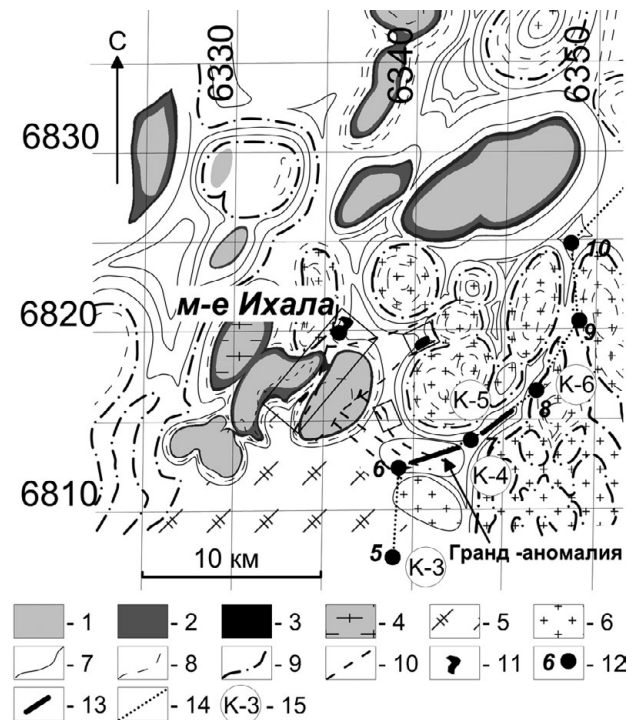


Рис. 8. Участок детальных работ «Гранд-аномалия – Ихала» (контур участка показан на рис. 6):

5–10 – номера центров установок АВ на профиле МВСД. Красная линия между пунктами 6–7.5 – положение Гранд-аномалии, показанной на рисунках 6 и 7. Шифрами К-3, К-4, К-5, К-6 в белых кружках обозначены пункты АМТЗ. Результаты АМТЗ приведены на рис. 10.

Геологическая легенда: 1 – нерасчлененная свита Наатселька, гнейсофицированные песчаники, алевролиты, 2 – свита Pr_1pt_{3-4} графитсодержащие и графитовые биотитовые сланцы; 3 – гранитизированные куполовидные структуры

Fig. 8. Section of the Grand anomaly – Ikhala detailed study (see Fig. 6 for the contour of the site):

5–10 – numbers of the AB current lines on the MESD profile. The red line between points 6 and 7.5 is the position of the Grand anomaly shown in Fig. 6 and 7. The K-3, K-4, K-5, K-6 symbols in white circles indicate AMTS points. See Fig. 10 for the results of AMTS.

Geological legend: 1 – undivided suite of Naatselka, gneissociated sandstones, siltstones, 2 – Pr_1pt_{3-4} formation graphite-containing and graphite biotite schists; 3 – granitized dome structures

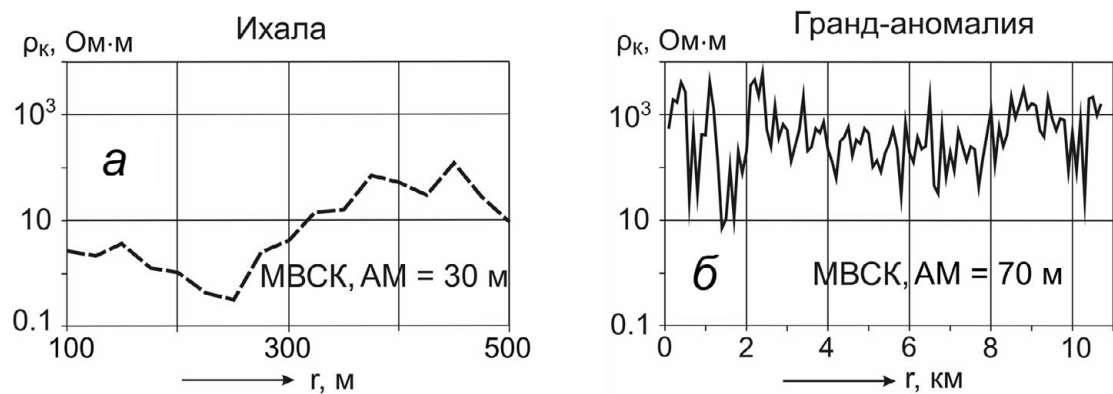


Рис. 9. Графики кажущегося сопротивления по результатам профилирования МВСК на участках Ихала (а) и Гранд-аномалия (б). Пояснения – в тексте

Fig. 9. Graphs of apparent resistivity based on the results of MISC profiling in Ikhala (a) and the Grand anomaly (б) sites. See the text below for the explanations

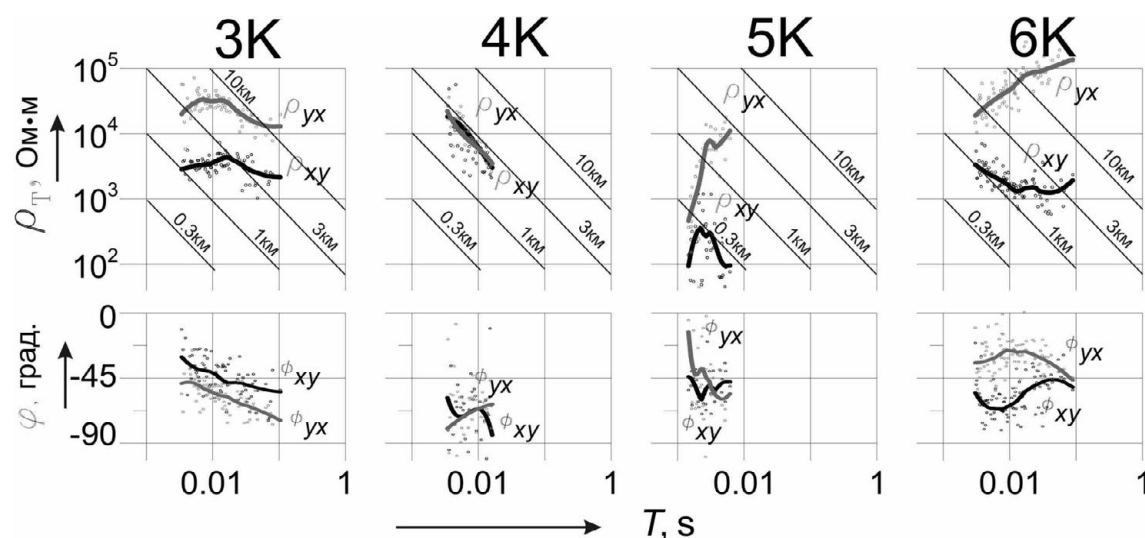


Рис. 10. Результаты АМТЗ в окрестности Гранд-аномалии. Положение точек 3К–6К показано на рис. 8

Fig. 10. Results of AMT3 near the Grand anomaly. See Fig. 8 for the location of K3, K4, K5, K6 sites

глубины порядка 10 км. Кривая АМТЗ в точке 4К носит черты одномерного разреза с проводящим слоем на глубине 3 км. Однако совершенно другой характер кривых на соседних точках не позволяет применять процедуру одномерной интерпретации в точке 4К. Результаты АМТЗ в точке 5К указывают на двухмерный характер разреза. Но слишком крутое положение восходящих и нисходящих ветвей кривых (много круче предельных 45 градусов) делает такое предположение сомнительным. Таким образом, результаты АМТ-детализации Гранд-аномалии не позволяют сделать каких-либо уверенных суждений о характере глубинного разреза. Возможно, это связано с тем, что профиль фактически проходит вдоль простирания аномалии. Это означает, что аномалия может состоять из серии сближенных относительно

тонких проводников. Для получения более точных суждений о ее параметрах и ее вкладе в общую картину электропроводности Ладожской аномалии необходимо выполнить несколько секущих профилей. В этом отношении более обнадеживающие результаты получены на втором объекте, расположенном на восточном окончании профиля и описанном в разделе 3.3.

3.3. Янисъярвинский участок детальных работ

Янисъярвинская аномалия электропроводности, обнаруженная по данным МВСК, расположена на восточном окончании профиля в районе поселка Суйстамо. Положение аномалии показано на рис. 11 – фрагменте геологической карты Л. П. Свириденко [Свириденко и др., 2017].

Правую (восточную) часть участка занимают архейские образования (AR), представленные диорито-гнейсами и гранито-гнейсами. С запада к архейским породам примыкают более молодые протерозойские образования (PR) – гнейсофицированные и гранитизированные породы разнообразного состава. На контакте между археем и протерозоем залегает янисъярвинская разломная зона, сложенная нерасчлененными осадочно-вулканогенными образованиями. В ее пределах методом МВСД зафиксирована электронно-проводящая аномалия низкого сопротивления (рис. 6, 7). Детализация аномалии выполнена методами МВСК с шагом 50 м, срединного градиента (СГ) с шагом 25 м и методом АМТЗ с неравномерным шагом. Результаты детализации приведены на рис. 12.

Результаты электропрофилирования методом срединного градиента (рис. 12, а) уверенно подтвердили аномалию МВСД. Она проявилась в виде одного объекта мощностью около 200 м. С данными СГ хорошо согласуются результаты определения кажущегося сопротивления по данным АМТЗ на частоте 100 Гц (точки T1, T2 и T4 на рис. 12, а). Более детально строение аномалии позволили выяснить результаты МВСК. Профилирование МВСК выполнено с прямой и обратной установками. Это позволяет получать более устойчивую картину двумерного моделирования. Псевдоразрез кажущегося сопротивления, построенный с использованием программных средств решения прямых и обратных задач метода сопротивлений ZondRes^{2D} [Каминский, 2010], приведен на рис. 12, б. На нем можно отчетливо видеть, что аномальный объект состоит из двух сближенных проводящих тел субвертикального положения. Сопротивление проводников уменьшается с глубиной и на отметке 70 м достигает единиц Ом·м. В центре проводящего объекта выполнено измерение анизотропии с применением потенциальной двухэлектродной установки. Полученная диаграмма анизотропии приведена на рис. 11. Можно видеть, что коэффициент анизотропии, определяемый как отношение полуосей эллипса анизотропии, составляет небольшую величину – 1,25. Видимо, это обусловлено малой величиной радиуса измерительной установки (AM = 25 м).

Основной интерес при детализации Янисъярвинской аномалии представляет оценка ее влияния на результаты АМТ-зондирования. С этой целью выполнено шесть АМТЗ, расположенных по возможности симметрично относительно центра (рис. 11). В центре аномалии СГ выполнено АМТЗ под номером 1 (рис. 11). АМТ-зондирования проводились с аппаратурой

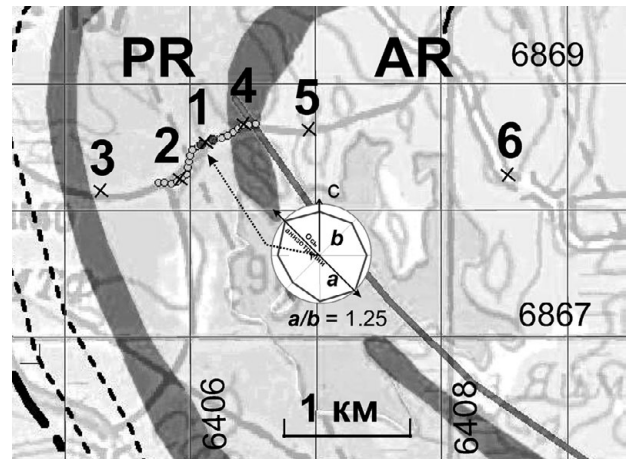


Рис. 11. Янисъярвинский участок детальных работ (контуры участка – на рис. 6):

1–6 – точки АМТ-зондирования. Мелкие кружки между пунктами 2–4 – профиль МВСК. Два красных кружка в районе точки 1 – аномалия электропроводности МВСК. Белая встроенная диаграмма – эллипс анизотропии в изолиниях потенциала. Пояснения – в тексте.

Fig. 11. Janisjarvi site of detailed study (see Fig. 6 for the contours of the site):

1–6 – AMT sounding sites. Small cups between 2–4 sites – the MISC profile. Two red circles around the site 1 – the MISC conductivity anomaly. The white built-in chart is the ellipse of anisotropy. See the text for the detailed explanation

VMTU-10 с частотой дискретизации 1000 Гц в динамическом диапазоне 32 бита. Электрические линии (4 линии по 50 м) раскладывались в магнитных азимутах С-Ю и З-В. Заземлителями служили латунные шпильки. Сопротивление заземлений, благодаря влажной осенней погоде, не превышало 10–15 кОм. Индукционные датчики IMS-007 прикапывались в канавки. Для датчиков вертикального магнитного поля откапывались ямы. В каждой точке проводилось два цикла измерений: основной – 45 минут и контрольный – 15 минут. Обработка данных и построение кривых кажущегося сопротивления и фазы импеданса производились непосредственно в поле. На основании этих результатов делались выводы о целесообразности проведения дополнительных измерений или перемещения на новое место наблюдений. Результаты АМТЗ приведены на рис. 13.

Рисунок 13 необходимо рассматривать, сравнивая характер и положение кривых кажущегося сопротивления ρ_T^{xy} (рис. 13, а) и ρ_T^{yx} (рис. 13, б) с расположением соответствующих точек АМТЗ относительно центра аномалии (рис. 11). Точки АМТЗ располагались на удалении 200 м (точки 2 и 4), 800 м (точки 2 и 5) и точка 6 – на удалении 2 км от точки 1 (от центра). Левые колонки с точками 1, 2, 3 на фрагментах а и б рис. 13 соответствуют удалению

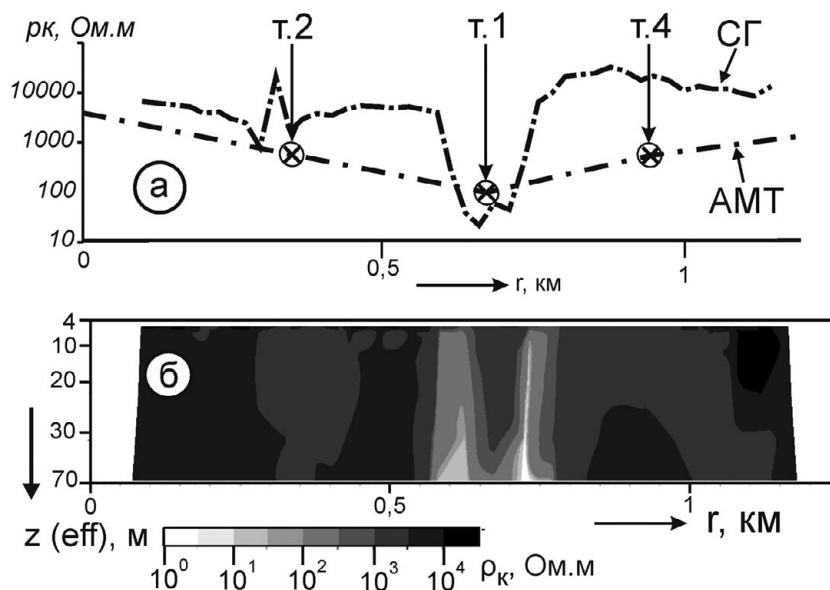


Рис. 12. Результаты детализации Янисъярвинской аномалии МВСД:

а – графики профилирования методом срединного градиента (СГ) и АМТЗ на частоте 100 Гц в точках Т1, Т2 и Т4 (положение точек АМТЗ показано на рис. 11); б – 2D разрез по результатам моделирования МВСК

Fig. 12. Results of the detailed examination of the Janisjarvi anomaly with the use of MISC method:

а – graphics of profiling by the method of median gradient (MG) and AMT measurements at 100 Hz in points T1, T2 and T4 (see Fig. 11 for AMTS points); б – 2D cross section based on the results of MISC modelling

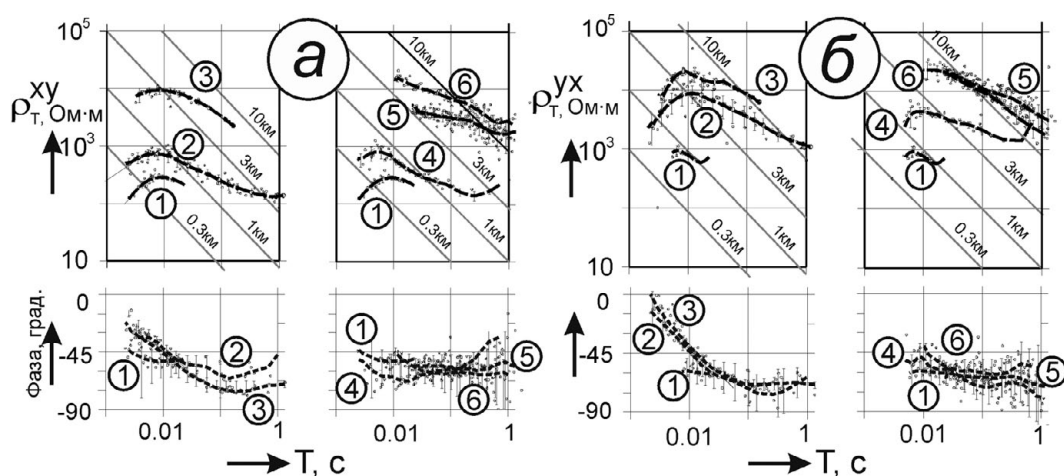


Рис. 13. Результаты АМТЗ над Янисъярвинской аномалией электропроводности:

а – амплитудные и фазовые кривые АМТЗ для меридиональной поляризации E_xH_y ; б – то же для широтной поляризации E_yH_x . Цифры в кружках – номера точек АМТЗ, показанных на рис. 11.

Fig. 13. Results of AMTS of the Janisjarvi anomaly of electrical conductivity:

а – AMTS amplitude and phase curves for meridional polarization E_xH_y ; б – same for latitudinal polarization E_yH_x . The numbers in the circles – the numbers of AMTS sites shown in the Fig. 11

на запад, в сторону протерозойских пород. Правые колонки с точками 1, 4, 5, 6 соответствуют удалению на восток, в сторону архейских пород. При этом нетрудно обнаружить главную закономерность – с удалением от аномально проводящей зоны в любую сторону кривые

кажущегося сопротивления закономерно поднимаются вверх по шкале сопротивлений, тогда как кривые фазы импеданса фактически не изменяются ни по форме, ни по положению на градусной сетке. Формальная интерпретация кривых ρ_T^{xy} и ρ_T^{yx} , например, по асимптотикам

показывает увеличение глубины до некоторого фиктивного проводящего слоя от сотен метров над аномалией до примерно 10 км на удалении от нее. Явление это наблюдается одинаково устойчиво над протерозойскими породами (на западе от аномалии) и над архейскими породами (на востоке). По своей физической основе наблюдаемый эффект напоминает явление горизонтального скин-эффекта, описанного Л. Л. Ваньяном [1996]. Из рассмотрения рис. 13 можно предположить, что при дальнейшем удалении от аномалии проводимости кривые кажущегося сопротивления примут вид «нормальной» кривой с проводящим слоем на глубинах в первые сотни километров.

Надо заметить, что описанный эксперимент был предпринят главным образом для того, чтобы оценить падение Янисъярвинской проводящей зоны и протяженность ее на глубину по асимметрии кривых АМТЗ, зафиксированных по разные стороны от нее. Предварительный, сугубо качественный анализ позволяет сделать предположение, что зона имеет субвертикальное положение, аналогичное тому, которое зафиксировано по данным 2D-моделирования результатов МВСК (рис. 12, б). Однако более надежные выводы по этому вопросу могут быть получены только после проведения численного 2D-моделирования результатов АМТЗ.

4. Дискуссия

Наиболее дискуссионным является вопрос о природе Ладожской аномалии. Самое простое решение – это объяснить ее природу влиянием электронно-проводящих графит- и сульфидсодержащих пород. На это указывают многие российские и зарубежные ученые [Adam et al., 1982; Ковтун и др., 1984; Rajunpää, 1984; Жамалетдинов, 1990; Жамалетдинов, Ковтун, 1993; Клабуков, 2006]. Выполненная и описанная в настоящей статье работа в целом подтверждает взгляды предыдущих исследователей и вроде бы ничего нового не вносит. Но благодаря непрерывной, за исключением интервала Сортавала, протяженности профиль позволил получить общую картину изменения сопротивления на всей ширине Ладожской зоны и установить два наиболее контрастных объекта электронно-проводящей природы. С ними могут быть связаны реликты Ладожско-Ботнической зоны проводимости, уходящей на глубину. В этом случае мы приходим к гипотезе Б. Н. Клабукова [2006] о двухъярусном строении Ладожско-Ботнической зоны, являющейся сложением проводников двух типов – электронно-проводящих пород у дневной поверхности и

флюидных зон на глубине 10–30 км. Такая трактовка хорошо согласуется с результатами МВП (магнитовариационного профилирования). Первый опыт МВП, полученный И. И. Рокитянским на редкой сети наблюдений, позволил ему сделать вывод о наличии линейной проводящей зоны на глубине 10 км, вытянутой в северо-западном направлении и имеющей юго-восточное падение. Наиболее обширные наблюдения МВП в комплексе с МТЗ выполнены в 2013–2015 гг. [Соколова и др., 2016]. По этим работам сделан вывод о наличии проводящей линзы на глубине 10–30 км.

Решить вопрос о природе Ладожской зоны могут только детальные исследования АМТ-МТЗ и МВП в тесном сочетании с зондированиями на постоянном токе. Это особенно очевидно на примере Гранд-аномалии, которая показывает, что выходящие на дневную поверхность электронно-проводящие породы не вписываются в 2-мерные объекты. Более того, они распространены спорадически в пределах большей части Северного Приладожья, в составе овоидных супракrustальных толщ, обрамляющих куполовидные структуры гранитизированных гнейсов и гнейсо-сланцев, согласно схеме Л. П. Свириденко [Свириденко и др., 2017] и работам Н. С. Бискэ [1987]. В этих условиях спонтанная постановка магнитотеллурических зондирований приводит только к необходимости волюнтаристских решений при отборе материала, пригодного для интерпретации. Не зря в работе [Васин и др., 1993] из 29 кривых АМТ-МТЗ отобраны только 15, отличающихся «наилучшим согласием» при построении двухмерной численной модели строения Ладожской зоны до глубины 30–40 км.

Завершая дискуссию, можно сделать вывод о необходимости совместных исследований глубинной электропроводности Ладожской зоны электропроводности на основе конкретного фактического материала. И в заключение уместно заметить, что белым пятном в истории изучения Ладожской аномалии является вопрос о возможности ее интерполяции между юго-восточным и северо-западным обнажениями по дну Ладожского озера.

5. Заключение

В Северном Приладожье выполнено электропрофилирование на постоянном токе методом МВСК на профиле Хийтола-Суйстамо протяженностью 130,5 км, пересекающем всю ширину Ладожской аномалии электропроводности. На профиле выявлены две контрастные зоны аномальной проводимости,

расположенные в приповерхностных горизонтах. Обе аномалии, вероятнее всего, имеют электронно-проводящую природу и, по-видимому, связаны с присутствием углеродистых пород, возможно, графита, пирита, пирротина. Наибольший вклад вносит западная Гранд-аномалия, прослеженная вдоль простирания на 7 км. Положение аномалии довольно точно совпадает с эпицентром проводящего тела, отмеченного по данным МВП на глубине 10 км [Рокитянский и др., 1981]. Восточная аномалия приурочена к Янисъярвинскому разлому и имеет мощность 200 м. В районе обеих аномалий выполнены АМТ-зондирования. Результаты АМТЗ не позволяют сделать однозначных суждений о природе и характере глубинной электропроводности Ладужской аномалии. Необходимы дополнительные исследования в комплексе с результатами МТЗ-МВП, полученными в 2013–2015 годах по проекту «Ладога» [Соколова и др., 2016].

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 13-05-12044-офи-м.

Авторы выражают глубокую благодарность программисту первой категории Т. Г. Коротковой за неоценимую помощь при проведении расчетов и при оформлении рукописи. Авторы благодарны также генеральному директору ОАО «ВЕГА» Б. В. Самсонову и гл. инженеру Е. А. Копытенко за помощь в подготовке аппаратуры VMTU-10.

Литература

Бердичевский М. Н. Электрическая разведка методом магнитотеллурического профилирования. М.: Недра, 1968. 255 с.

Бискэ Н. С. Биогенные микроструктуры в шунгитовых породах Карелии // Труды КарНЦ РАН. 2017. № 2. С. 96–110. doi: 10.17076/geo336

Бискэ Н. С. Графитовое оруденение Северного Приладожья (геология и генетические особенности). Петрозаводск: Кар. Ф. АН СССР, 1987. 172 с.

Ваньян Л. Л. О роли вертикального и горизонтального скин-эффекта в методе частотных зондирований // Физика Земли. 1996. № 1. С. 45–47.

Васин Н. Д. Геоэлектрическая характеристика разреза юго-западной Карелии // Зап. Горного института. 1988. Т. 113. С. 57–63.

Васин Н. Д., Ковтун А. А., Попов М. К. Ладужская аномалия электропроводности // В кн: Строение литосферы Балтийского щита / Ред. Н. В. Шаров. М.: ВИНТИ, 1993. С. 69–71.

Жамалетдинов А. А. Модель электропроводности литосферы по результатам исследований с контролируруемыми источниками поля (Балтийский щит, Русская платформа). Л.: Наука, 1990. 159 с.

Жамалетдинов А. А. Теория и методика глубинных электромагнитных зондирований с мощными контролируруемыми источниками (опыт критического анализа). СПб.: СПбГУ, 2012. 163 с.

Жамалетдинов А. А., Ковтун А. А. Схема электропроводности северо-восточной части Балтийского щита. Параметры «нормального» разреза // Строение литосферы Балтийского щита / Под ред. Н. В. Шарова. М.: МГК РАН, 1993. С. 86–88.

Жамалетдинов А. А. Магнитотеллурический метод изучения строения массивов горных пород. Учебное пособие. Апатиты: Кольск. фил. ПетрГУ, 2014. 103 с.

Заборовский А. И. Электроразведка. М.: Гостоптехиздат, 1963. 423 с.

Каминский А. Е. ZondRes^{2D}. Программа двумерной интерпретации данных метода сопротивлений и вызванной поляризации / Ред. А. Е. Каминский. СПб.: Zond Geophysical Software, 2010. 139 с.

Клабуков Б. Н. Возможности петроэлектрики в изучении земной коры Карелии // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 9. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2006. С. 127–134. URL: igkrc.ru/assets/publication/Geologia-i-pol-isk/Vypusk92006-p127-134.pdf (дата обращения: 20.10.2016)

Ковтун А. А. Строение коры и верхней мантии на северо-западе Восточно-Европейской платформы по данным магнитотеллурических зондирований. Л.: ЛГУ, 1989. 284 с.

Ковтун А. А., Вагин С. А., Коквина Е. П., Порохова Л. Н., Чичерина Н. Д. Ладужская и Чудская аномалии электропроводности земной коры // Коровые аномалии электропроводности. М.: Наука, 1984. С. 71–72.

Ковтун А. А., Варданянц И. Л., Легенькова Н. П., Смирнов М. Ю., Успенский Н. И. Особенности строения Карельского региона по данным геоэлектрических исследований // Глубинное строение и сейсмичность Карело-Кольского региона и его обрамления / Ред. Н. В. Шаров. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2004. С. 102–130.

Колесников В. Е. Многоэлектродная электроразведка с применением методики внутреннего скользящего контакта – опыт численного 2D-моделирования // Сейсмические приборы. 2016. Т. 52, № 3. С. 27–34.

Колобов В. В., Куклин Д. Н., Шевцов А. Н. Семиканальная цифровая станция частотного зондирования КВВН-7 // Комплексные геолого-геофизические модели древних щитов: Труды Всерос. (с между. участием) конф. Апатиты: ГИ КНЦ РАН, 2009. С. 70–173.

Лазарева Н. В. Некоторые особенности поведения естественного электромагнитного поля на южном склоне Балтийского щита // Вопросы разведочной геофизики. Вып. 6. Л.: Недра, 1967.

Попов М. К. Геоэлектрическая модель земной коры в районе Ладужской аномалии электропроводности по данным АМТ-зондирования: Автореф. дис. ... канд. г.-м. наук. Л.: ЛГУ, 1988. 14 с.

Рокитянский И. И., Кулик С. Н., Рокитянская Д. А. Ладужская аномалия электропроводности // Геофиз. журнал. Киев: Укр. АН, 1981. Т. 3, № 2. С. 97–99.

Свириденко Л. П., Исанина Э. В., Шаров Н. В. Глубинное строение, вулканоплутонизм и тектоника

Приладожья // Труды КарНЦ РАН. 2017. № 2. С. 73–85. doi: 10.17076/geo336

Семенов В. Ю. Обработка данных магнитотеллурического зондирования. М.: Недра, 1985. 133 с.

Соколова Е. Ю., Голубцова Н. С., Ковтун А. А., Куликов В. А., Лозовский И. Н., Пушкарев П. Ю., Рокитянский И. Н., Таран Я. В., Яковлев А. Г. Результаты синхронных магнитотеллурических и магнитовариационных зондирований в районе Ладожской аномалии электропроводности // Геофизика. 2016. № 1. С. 48–61.

Токарев А. Д., Жамалетдинов А. А., Васильев А. Н. Измерительный комплекс СЧЗ-95 для глубинных электромагнитных зондирований Земной коры с контролируруемыми источниками поля // Приборы и методика геофизического эксперимента. Мурманск: КНЦ РАН, 1997. С. 85–90.

Шевцов А. Н. Прямая и обратная задачи частотного электромагнитного зондирования с промышленными линиями электропередачи. Теория и методика глубинных электромагнитных зондирований на кристаллических щитах. Апатиты: КНЦ РАН, 2006. С. 171–181.

Эненштейн Б. С., Иванов А. П., Иванов М. А. Станция для частотного зондирования // Вопросы теории и практики электрометрии. М.: АН СССР, 1961.

Adam A., Kaikkonen P., Hjelt S. E., Pajunpää K., Szarka L., Vero J., Wallner A. Magnetotelluric and

audiomagnetotellurics measurements in Finland // Tectonophysics. 1982. Vol. 90. P. 77–90.

Gough D. The geophysical significance of geomagnetic variation // Phys. Earth, Planets, Interiors. Vol. 7. 1973. P. 379–388.

Hjelt S. E. Deep electromagnetic studies of the Baltic shield // J. Geophys. 1984. Vol. 55, no. 3. P. 144–152.

Kopytenko E. A., Palshin N. A., Poljakov S. V., Schennikov A. V., Reznikov B. I., Samsonov B. V. New portable multifunctional broadband MT System // IAGA WG 1.2 on Electromagnetic Induction in the Earth 20th Workshop Abstract, Egypt, 2010.

Korepanov V. Ye. Electromagnetic sensors for microsatellites // Sensors 2002. Proceedings of IEEE, 2002. P. 1718–1722.

Pajunpää K. Magnetometer array studies in Finland – determination of single station transfer functions // J. Geophys. 1984. Vol. 55. P. 153–160.

Zhamaletdinov A. A., Ronning J. S., Vinogradov Yu. A. Electrical profiling by the MISC and Slingram methods in the Pechenga-Pasvik area // Norges Geologiske Undersøkelse, Special publication, 1995. No. 7. P. 333–338.

Zohdy A. A. R. A new method for the automatic interpretation of Schlumberger and Wenner sounding curves // Geophysics. 1989. Vol. 54, no. 2. P. 245–253.

Поступила в редакцию 27.04.2017

References

Berdichevskii M. N. Elektricheskaya razvedka metodom magnetotelluricheskogo profilirovaniya [Electrical prospecting by means of telluric profiling]. Moscow: Nedra, 1968. 255 p.

Biske N. S. Biogennye mikrostruktury v shungitovykh porodakh Karelii [Biogenic microstructures in shungite rocks of Karelia]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. of KarRC of RAS]. 2017. No. 2. P. 96–110. doi: 10.17076/geo336

Biske N. S. Grafitovoe orudnenie Severnogo Priladozh'ya (geologiya i geneticheskie osobennosti) [Graphite mineralization in Northern Ladoga area (the geology and genetic characteristics)]. Petrozavodsk: Kar. f. AN SSSR, 1987. 172 p.

Enenshtein B. S., Ivanov A. P., Ivanov M. A. Stantsiya dlya chastotnogo zondirovaniya [A station for frequency sounding]. *Voprosy teorii i praktiki elektrometrii* [Theor. and Pract. Iss. of Electrometry]. Moscow: AN SSSR, 1961.

Kaminskii A. E. ZondRes²D. Programma dvumernoi interpretatsii dannykh metoda soprotivlenii i vyzvannoi polarizatsii [ZondRes²D. A program for two-dimensional interpretation of data obtained by resistivity and induced polarization methods]. St. Petersburg: Zond Geophysical Software, 2010. 139 p.

Klabukov B. N. Vozmozhnosti petroelektriki v izuchenii zemnoi kory Karelii [On the possible use of petroelectrical analysis for studying the earth's crust in Karelia]. *Geologiya i poleznye iskopaemye Karelii* [Geol. and Miner. Resour. of Karelia]. Iss. 9. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2006. P. 127–134. URL: <http://igkr.ru/assets/publication/Geologia-i-pol-isk/Vypusk92006-p127-134.pdf> (accessed: 20.10.2016)

Kovtun A. A. Stroenie kory i verkhnei mantii na severo-zapade Vostochno-Evropeskoj platformy po dannym magnetotelluricheskikh zondirovaniy [The structure of the crust and upper mantle in the northwestern part of the East European Platform according to magnetotelluric sounding data]. Leningrad: LGU, 1989. 284 p.

Kovtun A. A., Vagin S. A., Kokvina E. P., Porokhova L. N., Chicherina N. D. Ladozhskaya i Chudskaya anomalii elektroprovodnosti zemnoi kory [The Ladoga and Peipus electrical conductivity anomalies of the earth's crust]. *Korovy anomalii elektroprovodnosti* [Crustal Anomalies of the Electrical Cond.]. Moscow: Nauka, 1984. P. 71–72.

Kovtun A. A., Vardanyants I. L., Legen'kova N. P., Smirnov M. Yu., Uspenskii N. I. Osobennosti stroeniya Karel'skogo regiona po dannym geoelektricheskikh issledovaniy [Features of the Karelian region structure according to geoelectrical studies data]. *Glubinnoe stroenie i seismichnost' Karelo-Kol'skogo regiona i ego obramleniya* [The Deep Structure and Seismicity of the Karelian and Kola Peninsula Region and its Margins]. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2004. P. 102–130.

Kolesnikov V. E. Mnogoelektrodnaya elektrorazvedka s primeneniem metodiki vnutrennego skol'zyashchego kontakta – opyt chislennogo 2D modelirovaniya [Multi-electrode electrical prospecting by the method of inner sliding contact: a test of numerical 2D modeling]. *Seismicheskie pribory* [Seismic Instrum.]. 2016. Vol. 52, no. 3. P. 27–34.

Kolobov V. V., Kuklin D. N., Shevtsov A. N. Semikanal'naya tsifrovaya stantsiya chastotnogo zondirovaniya KVVN-7 [The KVVN-7 seven-channel digital station

of frequency sounding]. *Kompleksnye geologo-geofizicheskie modeli drevnikh shchitov: Trudy Vserossiiskoi (s mezhdunarodnym uchastiem) konferentsii* [Complex geological and geophysical models of ancient shields. Proceed. of the All-Russ. (with Int. Part.) Conf.]. Apatity: GI KNTs RAN, 2009. P. 70–173.

Lazareva N. V. Nekotorye osobennosti povedeniya estestvennogo elektromagnitnogo polya na yuzhnom sklone Baltiiskogo shchita [Some features of natural electromagnetic field conduct at the southern slope of the Baltic Shield]. *Voprosy razvedochnoi geofiziki* [Iss. of Explor. Geophys.]. Leningrad: Nedra, 1967. Iss. 6.

Popov M. K. Geoelektricheskaya model' zemnoi kory v raione Ladozhskoi anomalii elektroprovodnosti po dannym AMT-zondirovaniya [A geoelectrical model of the earth's crust within the Ladoga electrical conductivity anomaly according to AMT sounding data]: Summary of PhD (Cand. of Geol.-min.) thesis. Leningrad: LGU, 1988. 14 p.

Rokityanskii I. I., Kulik S. N., Rokityanskaya D. A. Ladozhskaya anomalija elektroprovodnosti [The Ladoga electrical conductivity anomaly]. *Geofiz. Zhurnal* [Geophys. Journal]. Kiev: Ukr. AN, 1981. Vol. 3, no. 2. P. 97–99.

Semenov V. Yu. Obrabotka dannykh magnetotelluricheskogo zondirovaniya [Processing magnetotelluric sounding data]. Moscow: Nedra, 1985. 133 p.

Shevtsov A. N. Pryamaya i obratnaya zadachi chastotnogo elektromagnitnogo zondirovaniya s promyshlennymi liniyami elektroperedachi. Teoriya i metodika glubinnykh elektromagnitnykh zondirovaniy na kristallicheskiykh shchitakh [Direct and inverse tasks of frequency electromagnetic sounding in the field of commercial power lines. A theory and methods of deep electromagnetic sounding on crystalline shields]. Apatity: KNTs RAN, 2006. P. 171–181.

Sokolova E. Yu., Golubtsova N. S., Kovtun A. A., Kulikov V. A., Lozovskii I. N., Pushkarev P. Yu., Rokityanskii I. N., Taran Ya. V., Yakovlev A. G. Rezul'taty sinkhronnykh magnetotelluricheskikh i magnetovariatsionnykh zondirovaniy v raione Ladozhskoi anomalii elektroprovodnosti [The results of synchronous magnetotelluric and magnetic-variation surveys within the Ladoga electrical conductivity anomaly]. *Geofizika* [Geophys.]. 2016. No. 1. P. 48–61.

Sviridenko L. P., Isanina E. V., Sharov N. V. Glubinnoe stroenie, vulkanoplutonizm i tektonika Priladozh'ya [Deep structure, volcano-plutonism, and tectonics of the Lake Ladoga region]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. of KarRC of RAS]. 2017. No. 2. P. 73–85. doi: 10.17076/geo336

Tokarev A. D., Zhamaletdinov A. A., Vasil'ev A. N. Izmeritel'nyi kompleks SChZ-95 dlya glubinnykh elektromagnitnykh zondirovaniy Zemnoi kory s kontroliruemymi istochnikami polya [The SChZ-95 measuring complex for deep electromagnetic sounding of the earth's crust with controlled field sources]. *Pribory i metodika geofizicheskogo eksperimenta* [Instrum. and Methods of Geophys. Exp.]. Murmansk: KNTs RAN, 1997. P. 85–90.

Van'yan L. L. O roli vertikal'nogo i gorizontalnogo skin-effekta v metode chastotnykh zondirovaniy [On the role of vertical and horizontal skin effect in the method of frequency sounding]. *Fizika Zemli* [Phys. of the Solid Earth]. 1996. No. 1. P. 45–47.

Vasin N. D. Geoelektricheskaya kharakteristika razreza yugo-zapadnoi Karelii [Geoelectrical description

of the southwestern Karelia section]. *Zap. Gornogo instituta* [Journal of Mining Inst.]. 1988. Vol. 113. P. 57–63.

Vasin N. D., Kovtun A. A., Popov M. K. Ladozhskaya anomalija elektroprovodnosti [The Ladoga electrical conductivity anomaly]. *Stroenie litosfery Baltiiskogo shchita* [The Structure of the Baltic Shield Lithosphere]. Moscow: VINITI, 1993. P. 69–71.

Zhamaletdinov A. A. Model' elektroprovodnosti litosfery po rezul'tatam issledovaniy s kontroliruemymi istochnikami polya (Baltiiskii shchit, Russkaya platforma) [An electrical conductivity model of lithosphere based on the results of the studies with controlled field sources (Baltic Shield, Russian Platform)]. Leningrad: Nauka, 1990. 159 p.

Zhamaletdinov A. A. Teoriya i metodika glubinnykh elektromagnitnykh zondirovaniy s moshchnymi kontroliruemymi istochnikami (opyt kriticheskogo analiza) [A theory and methods of deep electromagnetic soundings with powerful controlled sources (a case study)]. St. Petersburg: SPbGU, 2012. 163 p.

Zhamaletdinov A. A., Kovtun A. A. Skhema elektroprovodnosti severo-vostochnoi chasti Baltiiskogo shchita. Parametry "normal'nogo" razreza [The scheme of the electrical conductivity of the northeastern part of the Baltic Shield. The parameters of a "normal" section]. *Stroenie litosfery Baltiiskogo shchita* [The Structure of the Baltic Shield Lithosphere]. Moscow: MGK RAN, 1993. P. 86–88.

Zhamaletdinov A. A. Magnitotelluricheskii metod izucheniya stroeniya massivov gornyykh porod [A magnetotelluric method for studying rock masses structure]. Apatity: Kol'sk. fil. PetrGU, 2014. 103 p.

Zaborovskii A. I. Elektrorazvedka [Electrical prospecting]. Moscow: Gostoptekhizdat, 1963. 423 p.

Adam A., Kaikkonen P., Hjelt S. E., Pajunpää K., Szarka L., Vero J., Wallner A. Magnetotelluric and audiomagnetotelluric measurements in Finland. *Tectonophysics*. 1982. Vol. 90. P. 77–90.

Gough D. The geophysical significance of geomagnetic variation. *Phys. Earth, Planets, Interiors*. Vol. 7. 1973. P. 379–388.

Hjelt S. E. Deep electromagnetic studies of the Baltic shield. *J. Geophysics*. 1984. Vol. 55, no. 3. P. 144–152.

Kopytenko E. A., Palshin N. A., Poljakov S. V., Schennikov A. V., Reznikov B. I., Samsonov B. V. New portable multifunctional broadband MT System. IAGA WG 1.2 on Electromagnetic Induction in the Earth 20th Workshop Abstract. Egypt, 2010.

Korepanov V. Ye. Electromagnetic sensors for microsatellites. *Sensors. 2002. Proceedings of IEEE*, 2002. P. 1718–1722.

Pajunpää K. Magnetometer array studies in Finland – determination of single station transfer functions. *J. Geophys.* 1984. Vol. 55. P. 153–160.

Zhamaletdinov A. A., Ronning J. S., Vinogradov Yu. A. Electrical profiling by the MISC and Slingram methods in the Pechenga-Pasvik area. *Norges Geologiske Undersøkelse*, Special publication, 1995. No. 7. P. 333–338.

Zohdy A. A. R. A new method for the automatic interpretation of Schlumberger and Wenner sounding curves. *Geophysics*. 1989. Vol. 54, no. 2. P. 245–253.

Received April 27, 2017

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Жамалетдинов Абдулхай Азымович

главный научный сотрудник, д. г.-м. н.
Геологический институт Кольского научного центра РАН
ул. Ферсмана, 14, Апатиты, Мурманская область, Россия,
184209

старший научный сотрудник
Санкт-Петербургский филиал Института земного
магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н. В. Пушкова РАН (СПбФ ИЗМИРАН)
Мучной пер., 2, Санкт-Петербург, Россия, 191023
эл. почта: abd.zham@mail.ru
тел.: (81555) 79208, (812) 3253369

Колесников Владимир Егорович

младший научный сотрудник, аспирант
Геологический институт Кольского научного центра РАН
ул. Ферсмана, 14, Апатиты, Мурманская область, Россия,
184209
эл. почта: vk51@list.ru
тел.: (81555) 79208

Скороходов Алексей Андреевич

инженер-исследователь
Геологический институт Кольского научного центра РАН
ул. Ферсмана, 14, Апатиты, Мурманская область, Россия,
184209
эл. почта: sammicne@yandex.ru
тел.: (81555) 79208

Шевцов Александр Николаевич

научный сотрудник, к. ф.-м. н.
Геологический институт Кольского научного центра РАН
ул. Ферсмана, 14, Апатиты, Мурманская область, Россия,
184209
эл. почта: shevtsov@geoksc.apatity.ru
тел.: (81555) 79208

Нилов Михаил Юрьевич

младший научный сотрудник
Институт геологии Карельского научного центра РАН,
Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр РАН»
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185910
эл. почта: mnilov@rambler.ru
тел.: (8142) 780602

Рязанцев Павел Александрович

старший научный сотрудник, к. г.-м. н.
Институт геологии Карельского научного центра РАН,
Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр РАН»
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185910
эл. почта: chthonian@yandex.ru
тел.: (8142) 780602

Шаров Николай Владимирович

заведующий лаб. геофизики, д. г.-м. н.
Институт геологии Карельского научного центра РАН,
Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр РАН»
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185910
эл. почта: sharov@krc.karelia.ru
тел.: (8142) 780602

CONTRIBUTORS:

Zhamaletdinov, Abdulhai

Geological Institute, Kola Science Centre,
Russian Academy of Sciences
14 Fersman St., 184209 Apatity, Murmansk Region, Russia

Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and
Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences
(IZMIRAN), St. Petersburg Branch
2 Muchnoy Per., 191023 St. Petersburg, Russia
e-mail: abd.zham@mail.ru
tel.: (81555) 79208, (812) 3253369

Kolesnikov, Vladimir

Geological Institute, Kola Science Centre,
Russian Academy of Sciences
14 Fersman St., 184209 Apatity, Murmansk Region, Russia
e-mail: vk51@list.ru
tel.: (81555) 79208

Skorokhodov, Aleksey

Geological Institute, Kola Science Centre,
Russian Academy of Sciences
14 Fersman St., 184209 Apatity, Murmansk Region, Russia
e-mail: sammicne@yandex.ru
tel.: (81555) 79208

Shevtsov, Alexander

Geological Institute, Kola Science Centre,
Russian Academy of Sciences
14 Fersman St., 184209 Apatity, Murmansk Region, Russia
e-mail: shevtsov@geoksc.apatity.ru
tel.: (81555) 79208

Nilov, Mikhail

Institute of Geology, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: mnilov@rambler.ru
tel.: (8142) 780602

Ryazancev, Pavel

Institute of Geology, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: chthonian@yandex.ru
tel.: (8142) 780602

Sharov, Nikolai

Institute of Geology, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: sharov@krc.karelia.ru
tel.: (8142) 780602

Бируля Михаил Александрович

инженер
ООО «ВЕГА»
Мучной пер., 2, Санкт-Петербург, Россия, 191023
тел.: (812) 3808454

Киряков Илья Александрович

студент
Санкт-Петербургский государственный университет,
Институт наук о Земле
Университетская наб., 7/9, Санкт-Петербург, Россия,
199034
эл. почта: reactorlights@yandex.ru

Birulya, Mikhail

ООО «VEGA»
2 Muchnoy Per., 191023 St. Petersburg, Russia
tel.: (812) 3808454

Kiryakov, Il'ya

Saint Petersburg State University
7/9 Universitetskaya Nab., 199034 St. Petersburg, Russia
e-mail: reactorlights@yandex.ru