

УДК 550.834

ГЛУБИННАЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ АРХЕЙСКИХ БЛОКОВ КОЛЬСКОГО ПОЛУОСТРОВА В СВЕТЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА “МУРМАН-2018” (ОБЗОР)

© 2021 г. А. А. Жамалетдинов^{1,2,3,*}, Е. П. Велихов⁴, А. Н. Шевцов², В. В. Колобов³,
А. А. Скороходов², В. В. Ивонин³, М. Б. Баранник³, Т. Г. Короткова²

¹Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова (СПбФ ИЗМИРАН), г. Санкт-Петербург, Россия

²Геологический институт, обособленное подразделение федерального исследовательского центра
“Кольский научный центр РАН” (ГИ КНЦ РАН), г. Апатиты, Россия

³Центр физико-технических проблем энергетики Севера федерального исследовательского центра
“Кольский научный центр РАН” (ЦЭС КНЦ РАН), г. Апатиты, Россия

⁴Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, г. Москва, Россия

*E-mail: abd.zham@mail.ru

Поступила в редакцию 30.10.2019 г.

После доработки 17.04.2020 г.

Принята к публикации 27.05.2020 г.

Работа посвящена обзору результатов ранее выполненных глубинных электромагнитных зондирований на архейских блоках Кольского полуострова за последние 40–50 лет, описанию основных результатов эксперимента “Мурман-2018” и критическому анализу ранее выполненных работ с учетом новых данных. В первой части статьи рассмотрены результаты исследований с антенной сверхнизкочастотного (СНЧ) излучения “Зевс”, с МГД-источником “Хибины” мощностью 40 МВт, частотных зондирований с автомобильным генератором ЭРС-67 мощностью 29 кВт, зондирований на постоянном токе с установкой ВЭЗ и магнитотеллурических зондирований (МТЗ). В обзоре сделан акцент на дискуссионных элементах результатов, полученных ранее, для последующего их критического анализа на основе данных эксперимента “Мурман-2018”. Во второй части статьи описаны методика и результаты эксперимента “Мурман-2018”. В рамках эксперимента выполнены дистанционные зондирования на постоянном токе (ДЗ), частотные зондирования в поле контролируемого источника (Control Source AudioMagnetoTellurics, CSAMT) и аудиомангнитотеллурические зондирования (АМТЗ) в поле естественных вариаций электромагнитного поля Земли. Зондирования ДЗ и CSAMT выполнены с осевыми и экваториальными установками с использованием двух взаимно-ортогональных питающих линий АВ1 и АВ2 длиной 1.9 и 1.6 км. Главным элементом новизны в методике ДЗ явилось применение линейного шага изменения расстояния OO' между источником и приемником (2.5 и 5 км) в диапазоне разносов от 2.5 до 56 км. Линейный шаг изменения OO' применен с целью обнаружения и учета влияния на результаты наблюдений боковых и статических искажений. Зондирования ДЗ выполнены по трем лучам – на Запад, на Север и на Восток относительно питающих линий АВ1 и АВ2. Частотные зондирования (CSAMT) выполнены на удалениях до 105 км от источника в комплексе с АМТЗ. По результатам эксперимента “Мурман-2018” установлена трехслойная модель строения земной коры с градиентно-ступенчатым увеличением удельного сопротивления до глубины 20–30 км. Верхний слой характеризуется постепенным (градиентным) увеличением удельного сопротивления с глубиной – от 10^3 Ом·м у дневной поверхности до 10^4 Ом·м на глубине 1–2 км. Средний слой характеризуется постоянным сопротивлением порядка $(1–2) \times 10^4$ Ом·м в диапазоне глубин от 1–2 до 10 км и определяется как зона “компакции”. Он фиксируется на разносах от 2–3 до 30–40 км. В этом диапазоне разносов на дневной поверхности наблюдаются резкие перепады значений кажущегося сопротивления от 5×10^3 до 5×10^4 Ом·м на фоне среднего значения 2×10^4 Ом·м. Резкие перепады объясняются эффектом профилирования и связываются с влиянием зон трещиноватости и разломов, пересекаемых трассой зондирования. По геологическим оценкам разломы имеют крутое залегание у дневной поверхности и пологое на глубине. Их суммарное влияние “стабилизирует” сопротивление среднего слоя на уровне 2×10^4 Ом·м и приводит к появлению эффекта промежуточного проводящего слоя дилатантно-диффузионной природы (ДД-слоя) в интервале глубин от 3–5 до 7–10 км (в основании второго слоя) с продольной проводимостью порядка 1 См и удельным сопротивлением в пределах $5 \times 10^3–10^4$ Ом·м. Нижний, третий слой выделяется в виде резкого, ступенеобразного роста удельного электрического сопротивления до $10^5–10^6$ Ом·м и выше. Его верхняя кромка находится на глубине 10–15 км и условно интерпретируется как “граница непроницаемости” для постоянного тока. Она знаменует область

перехода горных пород из хрупкого в квазипластичное состояние (Brittle-Ductile Transition Zone, BDT). Критический анализ результатов предыдущих исследований выполнен в разделе “Дискуссия” с учетом полученных новых данных эксперимента “Мурман-2018”.

Ключевые слова: электропроводность, дистанционное зондирование, контролируемый источник, частотное зондирование, Мурманский блок, хрупкость, пластичность, граница непроницаемости, промежуточный проводящий слой.

DOI: 10.31857/S0002333721010117

1. ВВЕДЕНИЕ

Балтийский кристаллический щит сложен докембрийскими горными породами и считается идеальным полигоном для проведения электромагнитных зондирований с целью изучения природы глубинных геофизических границ [Jones, 2013]. Этому способствует среднее высокое удельное электрическое сопротивление горных пород и отсутствие проводящего осадочного чехла. Первые глубинные зондирования на Балтийском щите намечено было выполнить еще в 1938 году на Кольском полуострове, на базе горной станции Тьетта, возглавлявшейся академиком А.Е. Ферсманом. Для организации эксперимента в Ленинградский университет по инициативе академика Ф.Ю. Левинсона-Лессинга был приглашен известный французский ученый К. Шлюмберже (С. Schlumberger), основатель электроразведки на постоянном токе. Методика наблюдений и необходимая аппаратура готовились под руководством проф. А.П. Краева с участием проф. А.С. Семенова [Семенов, 1981]. Однако практической реализации проекта помешала война. Позднее, уже после окончания Великой Отечественной войны, эксперимент по сверхглубинному зондированию земной коры все же был осуществлен, но не на Кольском полуострове, а на южной окраине Балтийского щита – на акватории Финского залива и на Карельском перешейке [Краев, 1947]. Надо отметить, что результаты этого эксперимента вызвали широкий резонанс в отечественной и зарубежной научной литературе, наблюдаемый и по настоящее время. Главный интерес вызвало сообщение об обнаружении проводящего слоя в толще кристаллического фундамента на глубине около 10 км. Природу обнаруженного слоя проф. А.П. Краев, будучи физиком по образованию, объяснил влиянием температуры и присутствием флюидов на соответствующей глубине. В последующие годы этот “слой” обнаруживался практически повсеместно, где проводились глубинные электромагнитные зондирования – в России [Лазарева, 1964; Тихонов, 1967; Вагин, 1985; Ковтун, 1986; 2004], в Северной Америке [Keller, 1966; Samson, 1969], в Южной Африке [Zijl, 1975; Blohm, 1977] и в ряде других регионов. Исследования проф. А.С. Семенова [Семенов, 1970] и последующие работы А.А. Жамалетдинова

[Жамалетдинов, 1990] показали, что в большинстве случаев природа промежуточных проводящих слоев в земной коре на глубинах 10–15 км находит более логичное объяснение влиянием выходящих близко к дневной поверхности электронно-проводящих сульфидно-углеродистых образований, секущих трассы зондирований. Такая трактовка позднее была принята и опубликована в работе [Семенов, 1981] для объяснения природы проводящего слоя, обнаруженного на акватории Финского залива и на Карельском перешейке. С учетом отмеченных фактов, в последующие годы глубинные зондирования на Балтийском щите были сосредоточены главным образом в пределах выходов на дневную поверхность древнейшей, относительно однородной архейской кристаллической коры, где влиянием электронно-проводящих сульфидно-углеродистых пород можно было бы пренебречь. Однако обзор ранее выполненных работ показал, что, несмотря на относительную однородность архейских блоков земной коры, результаты разных исследователей и в этих условиях имеют противоречивый характер и сопровождаются обнаружением промежуточных проводящих слоев в земной коре на глубинах от единиц до первых десятков километров. Получение ответов на имеющиеся разногласия в результатах разных авторов являлось одной из задач эксперимента “Мурман-2018”. Прежде чем перейти к его описанию, в первой части данной работы выполнен обзор ранее выполненных глубинных зондирований на архейских блоках Кольского полуострова. Рассмотрены результаты исследований с антенной сверхнизкочастотного (СНЧ) излучения “Зевс” [Velikhov, 1994; Жамалетдинов, 2015], с МГД-источником “Хибины” [Геоэлектрические..., 1989], частотных зондирований с генератором ЭРС-67 [Жамалетдинов, 1991], зондирований на постоянном токе с установкой ВЭЗ [Семенов, 1978; Яковлев, 1993] и магнитотеллурических зондирований [Ковтун, 1986; 2004; Краснобаева, 1981]. Во втором разделе статьи описаны методика и результаты эксперимента “Мурман-2018”. В разделе “Дискуссия” проведен их анализ в сопоставлении с результатами предыдущих исследований, представленных в первом разделе статьи.

Эксперимент “Мурман-2018” по глубинному зондированию земной коры в поле естественных и контролируемых источников выполнен в июне

2018 г. на территории Мурманского блока при финансовой поддержке гранта РФФИ 18-05-00528. Целью эксперимента явилось решение трех задач. Первой и основной задачей явилось получение вспомогательных сведений к готовившемуся эксперименту “FENICS-2019” по сверхглубинному зондированию с применением промышленных линий электропередачи (ЛЭП). Предстояло получить сведения об электропроводности верхней части геоэлектрического разреза на разносах менее 100–200 км между источником и приемником. Актуальность этой задачи была обусловлена тем, что в эксперименте “FENICS-2019” зондирования на разносах меньше 100–200 км, в связи с низкочастотным характером поля (200 Гц и ниже) мало информативны, так как отражают преимущественно влияние условий ближней зоны [Жамалетдинов, 2012]. Вторая задача эксперимента “Мурман-2018” связана с изучением гипотетической границы резкого увеличения удельного электрического сопротивления пород на глубине около 10–15 км, предполагавшейся ранее по данным эксперимента “Хибины” [Жамалетдинов, 1990]. С этой границей связывается положение области перехода от верхней, хрупкой части земной коры (brittle zone), к нижней, квазипластичной части (ductile zone) [Жамалетдинов, 2014]. Известно, что при индукционных зондированиях (АМТ-МТЗ, CSAMT) слои высокого сопротивления при их мощности, меньшей длины электромагнитной волны в земле, попадают в область “прозрачности”, и обнаружение таких слоев становится проблематичным [Ваньян, 1997]. Поэтому в эксперименте “Мурман-2018” основные исследования выполнены с применением метода дистанционного зондирования на постоянном токе путем накопления периодических прямоугольных разнополярных сигналов в форме меандра. Кроме того, сами зондирования выполнены не с логарифмическим, как обычно принято, а с линейным шагом изменения расстояния между источником и приемником. Такой прием применен с целью более тщательного изучения влияния горизонтальной неоднородности (боковых и статических искажений) на результаты зондирования. Третьей задачей данной работы явился критический анализ результатов предыдущих исследований с учетом новейших данных, полученных в эксперименте “Мурман-2018”. Обзору предыдущих исследований, выполненных за последние 45–50 лет, посвящен следующий раздел 2. Хронология глубинных геоэлектрических исследований на территории Мурманского блока приведена в табличном виде в заключительной части работы.

2. ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ АРХЕЙСКИХ БЛОКОВ ЗЕМНОЙ КОРЫ НА ТЕРРИТОРИИ КОЛЬСКОГО ПОЛУОСТРОВА

2.1. Измерения в поле СНЧ-антенны “Зевс”

Положение Фенноскандинавского щита и Кольского полуострова с расположением архейских блоков земной коры показано на рис. 1а, рис. 1б. Здесь и далее под Кольским полуостровом понимается вся территория Мурманской области до границы с республикой Карелия.

Архейские блоки земной коры Кольского полуострова (рис. 1б) представляют собой монотонные в геологическом отношении провинции, сложенные древнейшими гранитогнейсовыми породами [Батиева, 1978]. Они отличаются в среднем высоким электрическим сопротивлением в десятки тысяч Ом · м и практически полным отсутствием рудоперспективных проводящих объектов. По этой причине архейские блоки долгое время оставались в стороне от интересов электроразведки. Только в начале 70-х годов прошлого века высокое сопротивление архейских пород Мурманского блока привлекло внимание связистов при выборе территории для размещения радиопередающей антенны сверхнизкочастотного (СНЧ) излучения “Зевс”, предназначенной для связи с подводными лодками [СНЧ радиопередающая..., 2015]. Первые зондирования с этой целью выполнены в 1972–1974 гг. А.В. Яковлевым (Ленинградский государственный университет) с установками вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) на постоянном токе с разносами АВ до 16 км [Яковлев, 1993]. Работы проводились в западном секторе Мурманского блока. Основное требование при выборе места расположения СНЧ-источника “Зевс” сводилось к тому, чтобы антенна располагалась на достаточно однородной территории высокого удельного электрического сопротивления, порядка 10^4 – 10^5 Ом · м. При выборе площадки выполнено около 100 зондирований ВЭЗ. Обобщение этих измерений выполнено в работе [Семенов, 1978]. Полученные результаты подтвердили среднее высокое сопротивление пород Мурманского блока. Это послужило основанием для размещения в районе Североморска СНЧ-антенны “Зевс”, которая действует по настоящее время и осуществляет связь с субмаринами, находящимися в подводном положении, на удалении до 10 тыс. км [Velikhov, 1994; СНЧ радиопередающая..., 2015].

В 1990-м году в поле СНЧ антенны “Зевс” выполнены дистанционные зондирования на постоянном токе путем подключения генераторной станции ЭРС-67 непосредственно к кабелю АВ антенны “Зевс”, минуя согласующие конденсаторы главной энергетической установки. Положение питающей линии АВ длиной 55 км и ближних

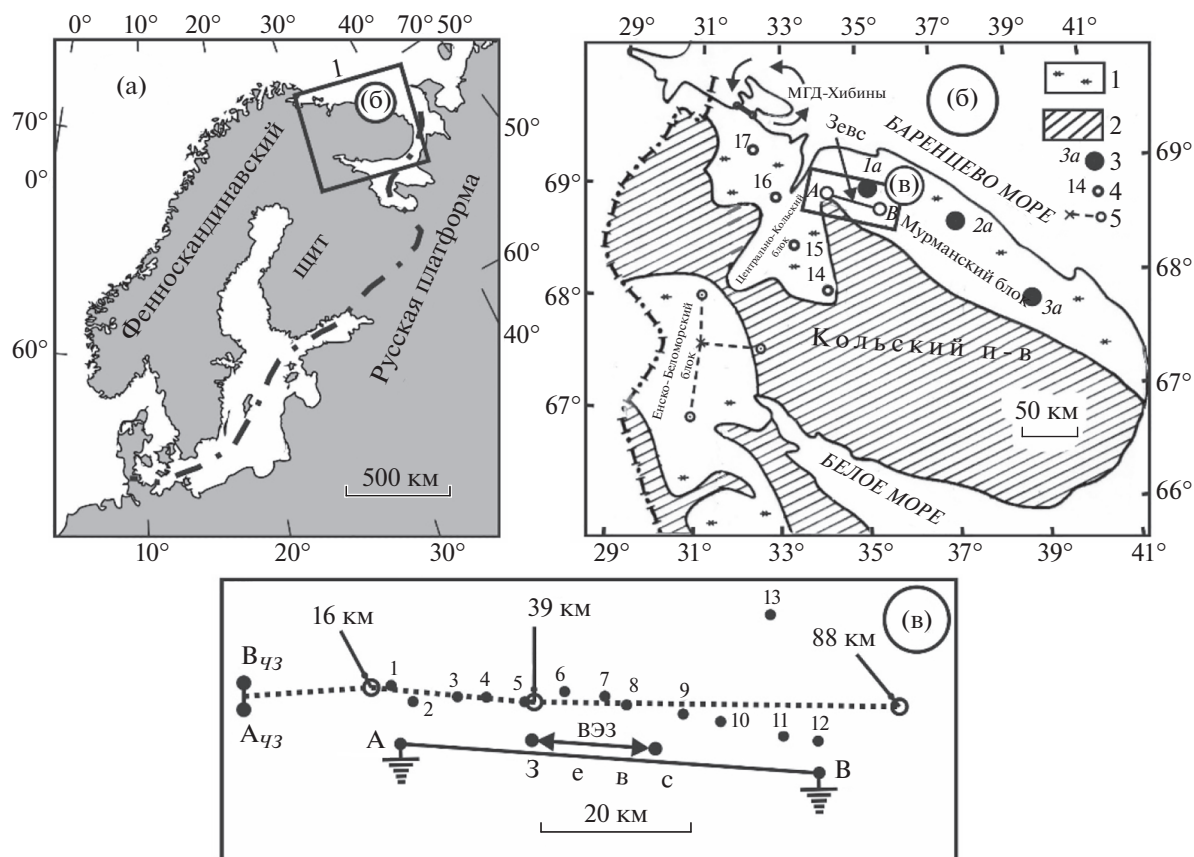


Рис. 1. Схема пунктов и трасс зондирования на территории архейских блоков земной коры Кольского полуострова: (а) – схема Фенноскандинавского (Балтийского) щита и примыкающей части Русской платформы; (б) – Кольский полуостров и схема расположения пунктов и трасс зондирования на геологической основе [Митрофанов, 1996], где: 1 – архейские блоки (Мурманский, Централно-Кольский, Енско-Беломорский); 2 – протерозойские блоки земной коры с развитыми в них сульфидно-графитистыми породами; 3 – пункты дистанционных зондирования в поле МГД-источника “Хибины” (точки 1а, 2а, 3а); 4 – дальние пункты дистанционных зондирования в поле СНЧ антенны “Зевс” (точки 14–17); 5 – трассы частотных и МГД-зондирования с источником “Хибины” на Енско-Беломорском блоке [Велихов, 1984]; (в) – положение пунктов и трасс зондирования в районе СНЧ-антенны “Зевс”, где: АВ – кабель СНЧ антенны “Зевс”; ВЭЗ – трасса зондирования на постоянном токе с разномом АВ до 16 км; (1–13) – ближние точки дистанционного зондирования в поле СНЧ-антенны “Зевс”; (16, 39 и 88 км) – пункты частотных зондирования в поле диполя (Аq3–Вq3) [Жамалетдинов, 1991].

пунктов зондирования (1–13) показано на рис. 1в. Положение дальних (на удалениях до 92 км) пунктов зондирования (14–17) показано на рис. 1б. В линию АВ подавались разнополярные прямоугольные импульсы тока с периодом следования 8 с от генераторной станции “Энергия-4” мощностью 29 кВт. Амплитуда тока, генерируемого по схеме удвоения, составляла 45–50 А при среднем выходном напряжении генераторной станции 600 В. Регистрация сигналов осуществлялась с помощью 6-канальной станции ЦАИС разработки СКБ РАН [Аскеров, 1989]. Все каналы станции гальванически развязаны между собой. Это позволяло дополнительно к трем магнитным компонентам H_x , H_y , H_z и двум взаимно ортогональным компонентам электрического поля E_x , E_y проводить измерения с диагональной линией E_{xy} путем

подключения дальних электродов линий E_x и E_y к шестому, гальванически отвязанному электрическому каналу U . Благодаря этому удавалось измерять не только амплитуду, но и направление полного горизонтального вектора электрического поля.

Результаты дистанционных наблюдений в поле СНЧ-антенны “Зевс” представлены на рис. 2 в трех форматах.

На рис. 2а приведен график ρ_k в линейно-логарифмическом масштабе, в формате профилирования. В нижней части рисунка штрихпунктирными линиями показаны разломные зоны. Буквами а, б, в, г, д обозначены гранито-гнейсовые породы различного состава, согласующиеся в отдельных случаях с поведением графика ρ_k . На рис. 2б показаны экспериментально измеренные вектора

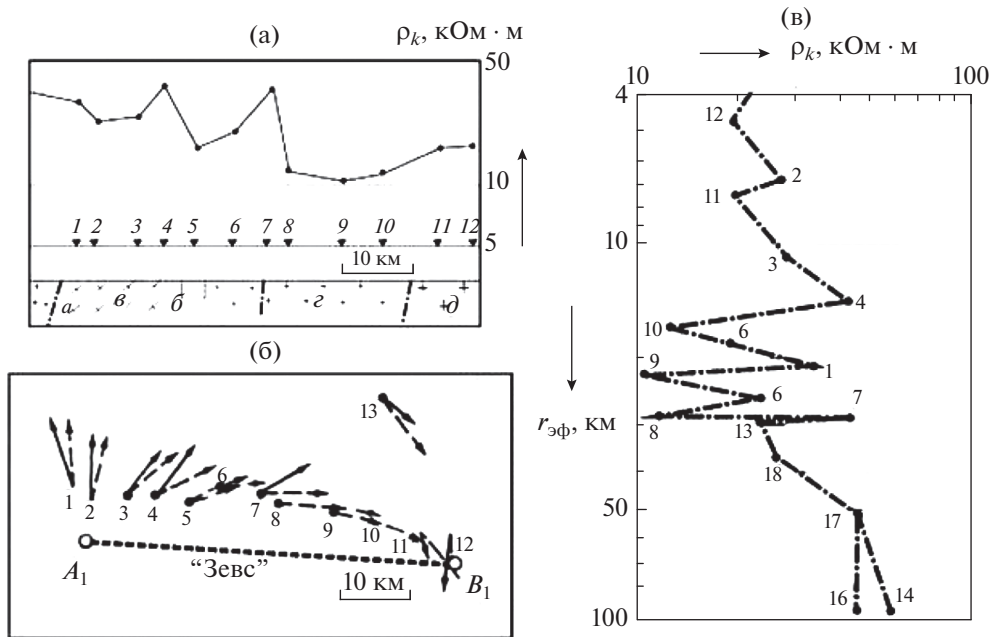


Рис. 2. Результаты дистанционных измерений на постоянном токе в поле СНЧ антенны “Зеус”: (а) – графики кажущегося сопротивления в линейно-логарифмическом масштабе (в формате профилирования); (б) – результаты наблюдений в векторном представлении. Сплошными стрелками показано положение измеренных векторов полного электрического поля $E_{\text{изм}}$, штриховыми стрелками – положение теоретически рассчитанных векторов ($E_{\text{теор}}$); (в) – графики ρ_k в билогарифмическом масштабе (в формате ВЭЗ). Положение питающей линии АВ и точек наблюдения 1–17 показано на рис. 1б, рис. 1в.

полного электрического поля (сплошные стрелки) и теоретически рассчитанные (штриховые стрелки). Удовлетворительное согласие положения экспериментально измеренных и теоретически рассчитанных векторов позволяет сделать вывод об отсутствии резкой горизонтальной неоднородности среды в районе СНЧ-антенны “Зеус” и о том, что наблюдаемые на рис. 2а резкие изменения ρ_k обусловлены локальными неоднородностями среды. На рис. 2в результаты наблюдений представлены в билогарифмическом масштабе, в формате вертикального электрического зондирования ВЭЗ. Можно видеть, что в диапазоне средних разносов (10–30 км) кривая ВЭЗ имеет изрезанный вид с перепадом значений ρ_k от 10 до 40 тыс. $\text{Ом} \cdot \text{м}$. При дальнейшем увеличении разносов до 92 км кривая кажущегося сопротивления на рис. 2в приобретает вид непрерывно восходящей кривой зондирования. Геологическая природа резких перепадов сопротивления в диапазоне разносов 10–30 км предположительно связывается с влиянием тектоники и с изменениями петрографического состава гранито-гнейсовых пород.

2.2. Глубинные зондирования в поле МГД-источника “Хибины”

В период с 1974 по 1990 гг. на территории восточной части Балтийского щита выполнены

зондирования в поле МГД-источника “Хибины” на удалении до 750 км от источника [Геоэлектрические..., 1989]. В настоящей работе рассмотрены результаты регистрации МГД-сигналов на территории Мурманского блока на удалении 110, 200 и 350 км от источника (точки 1а, 2а и 3а на рис. 1б) [Краснобаева, 1981; Дьяконов, 1982; Жамалетдинов, 1982]. Известно [Велихов, 1989], что в МГД-эксперименте “Хибины” применен источник в виде морского контура, заводненного в противоположные заливы между полуостровами Средний и Кольский. При расчетах кажущегося сопротивления по постоянному току принято, что на больших временах становления (свыше 2–3 с) ток заводненного МГД-источника “Хибины” стекает со всей поверхности заливов по разные стороны полуостровов Средний и Рыбачий (рис. 1б). Заливы при этом выполняют роль неэквипотенциальных заземлителей (электродов). Протекая по заливам, ток испытывает сопротивление морской воды и частично ответвляется гальваническим путем в земную кору через морское дно. Доля этого тока зависит от времени установления поля, от распределения электрического потенциала в морской воде и от сопротивления морского дна и морской толщи. По экспериментальным оценкам доля тока гальванической природы составляет в среднем 20% от полного тока МГД-генератора, достигающего величины 20–22 кА. Схема расчетов геометрических коэффициентов и кривых ка-

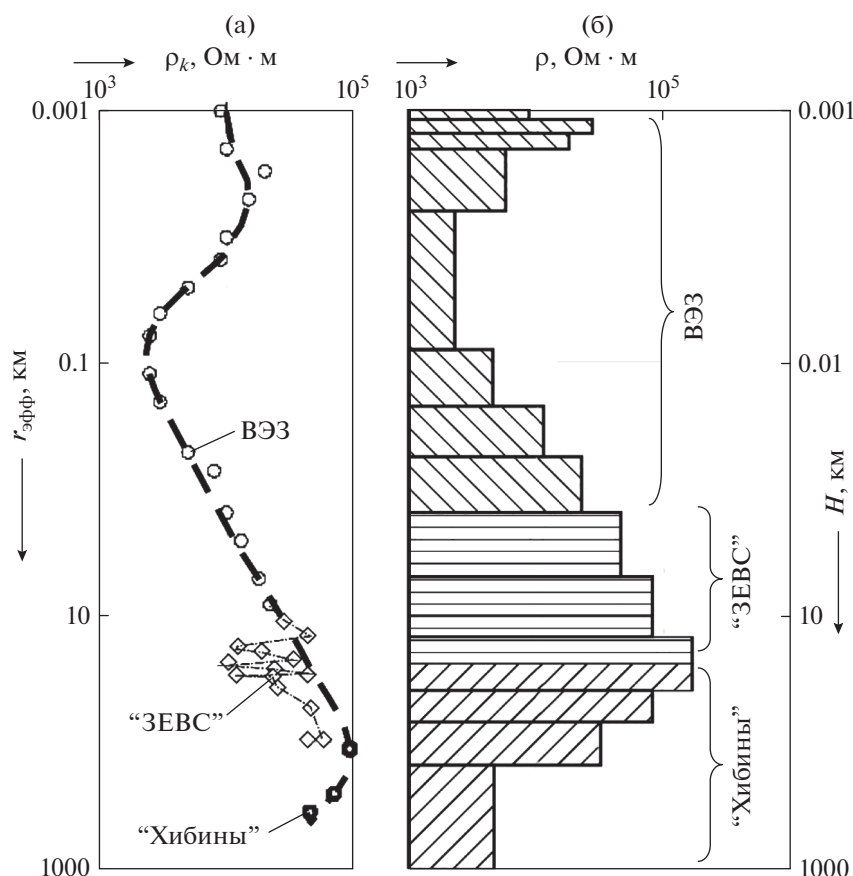


Рис. 3. Результаты дистанционного глубинного зондирования (ДЗ) на постоянном токе на Мурманском блоке по данным 1990 года [Жамалетдинов, 2015]: (а) – сводная кривая ρ_k дистанционного зондирования с тремя установками: ВЭЗ, СНЧ-антенны “Зевс” и МГД-источника “Хибины”; (б) – геоэлектрический разрез по результатам решения обратной задачи. Положение точек МГД-зондирования $1a$, $2a$ и $3a$, а также положение трассы ВЭЗ и точек зондирования с источником “Зевс” на разносах от 5 до 92 км (точки 1–17) показано на рис. 1б, рис. 1в.

жущегося сопротивления ρ_k в поле заводненного источника с примерами экспериментальных оценок и теоретических расчетов приведена в работе [Жамалетдинов, 1990]. Детальное рассмотрение результатов с построением сводного геоэлектрического разреза, совместно с данными ВЭЗ и измерений в поле СНЧ-антенны “Зевс”, выполненных в 1990 году, приведено в работе [Жамалетдинов, 2015] и показано ниже на рис. 3.

Сводная кривая ρ_k на рис. 3а выделена в виде жирной штрихпунктирной линии. При ее построении, как видно из рисунка, преимущественный вес отдан результатам зондирования с установками ВЭЗ и “Хибины”. Кривая зондирования в поле СНЧ-источника “Зевс” фактически изъята из внимания. Основанием для этого было предположение о том, что изрезанный вид кривой ρ_k установки “Зевс” в диапазоне разносов 10–30 км (рис. 2) обусловлен влиянием локальных приповерхностных элементов неоднородности разреза, не оказывающих существенного влияния на результаты зондирования.

Результаты решения обратной задачи на основе сводной кривой кажущегося сопротивления приведены на рис. 3б в виде геоэлектрического разреза. В верхней части разреза выделяется сухая морена мощностью 4 м и сопротивлением порядка 2.5×10^4 Ом·м. Ниже залегает обводненная морена сопротивлением порядка 2×10^3 Ом·м. Морену подстилают кристаллические породы, верхняя часть которых, сильно трещиноватая и обводненная, имеет низкое сопротивление – 3×10^3 Ом·м. Ниже глубины 0.2–0.3 км залегают плотные кристаллические породы сопротивлением порядка 10^4 Ом·м и выше. Далее с глубиной сопротивление кристаллических пород постепенно (градиентно) возрастает до значения 2×10^5 Ом·м на глубине 20–30 км.

При интерпретации результатов ВЭЗ-ДЗ на рис. 3 принято, вслед за автором работы [Семенов, 1978], что плавный рост сопротивления с глубиной связан с понижением пористости и трещиноватости пород и с соответствующим пони-

жением содержания в породах влаги. Если исключить из внимания область резких перепадов кажущегося сопротивления в диапазоне разносов 10–30 км, то можно заключить, что глубинный разрез характеризуется наличием плохо проводящей части земной коры сопротивлением до 200 тыс. Ом · м и мощностью 25–30 км. Наиболее резкий, скачкообразный рост сопротивления отмечен на глубине порядка 10–15 км. Глубже 25–30 км происходит постепенный спад кажущегося сопротивления под действием возрастающей с глубиной температуры. На глубине 100–150 км удельное сопротивление пород опускается до 5 тыс. Ом · м.

Представленный на рис. 3б вариант решения обратной задачи является результатом весьма грубого осреднения изрезанной части кривой кажущегося сопротивления, измеренной в поле источника “Зевс” в диапазоне средних разносов 10–30 км. В следующем разделе 3, посвященном эксперименту “Мурман-2018”, будет приведен новый вариант интерпретации результатов с учетом измерений в поле источника “Зевс”, проигнорированных на рис. 3.

2.3. Магнитотеллурические зондирования

В середине 80-х годов прошлого века появилось несколько научных сообщений, указывающих на существенную электрическую неоднородность строения Мурманского блока. В работах [Вагин, 1985; Ковтун, 1986] представлены результаты АМТ-МТ-зондирования с широкодиапазонной аналоговой аппаратурой. Зондирования выполнены в районе поселков Териберка, Дальние Зеленцы и на дороге Кола-Серебрянка. В упомянутых работах указывалось, что на территории Мурманского блока на глубине около 10 км существует промежуточный проводящий слой с продольной проводимостью 20–30 См и с удельным сопротивлением порядка 100 Ом · м. В последние годы наличие этого слоя было обнаружено и на других участках Карело-Кольского полуострова [Ковтун, 2004]. Более того, в работах [Vanuy, 2001; 2002] промежуточный проводящий слой на глубине 10 км был проинтерпретирован в комплексе с сейсмическими данными и распространен на всю территорию восточной части Балтийского щита. Был сделан вывод, что под верхней толщей земной коры на глубине 10 км располагается промежуточный проводящий слой, коррелируемый с сейсмическим волноводом и связываемый с существованием флюидов на этой глубине. Сводная диаграмма кривых кажущегося сопротивления и геоэлектрических разрезов по результатам магнитотеллурических зондирования на территории Кольского полуострова приведена на рис. 4б и рис. 4в по данным работы [Ковтун, 2004]. На рис. 4а приведена схема распро-

странения архейских блоков на территории Кольского полуострова и показано положение пунктов глубинного зондирования АМТ-МТЗ, а также пунктов ЧЗ-МГД-зондирования на территории Енско-Беломорского блока архейских пород. На рис. 4б представлены минимальные кривые ρ_T и на рис. 4в приведены соответствующие геоэлектрические разрезы для архейских блоков земной коры Кольского полуострова по результатам решения обратной задачи АМТ-МТ-зондирования.

Можно видеть, что на всех пунктах АМТ-МТЗ, расположенных в пределах архейских блоков земной коры, выделяется слой повышенной проводимости на глубине порядка 10 км и еще два проводящих слоя на глубинах 40 и 200 км. Полученные по результатам АМТ-МТЗ геоэлектрические разрезы на рис. 4в резко противоречат представленным на рис. 3б результатам глубинных зондирования с контролируруемыми источниками на Мурманском блоке в поле источников “Хибины” и “Зевс”, а также результатам ЧЗ-МГД-зондирования, выполненных на территории Енско-Беломорского (Ковдорского) блока архейских пород [Велихов, 1984] и результатам эксперимента “FENICS-2007” [Жамалетдинов, 2011], приведенным ниже, на рис. 5.

С целью поисков причины отмеченных расхождений нами в 2010 и 2018 гг. выполнено несколько АМТЗ в районе дорог на Териберку и на Серебрянку, где проводились АМТ-МТ-зондирования в работах [Вагин, 1985; Ковтун, 1986]. На рис. 5 приведен пример сопоставления разных результатов АМТЗ и результатов зондирования в поле контролируемых источников.

Рассмотрение кривых кажущегося сопротивления ρ_T АМТ-МТЗ на рис. 5а показывает, что на периоде 0.1 с низкочастотная асимптотика минимальной кривой ρ_T АМТЗ 2018 года (кривая 2) указывает на проводящий слой на глубине 10 км и этим как бы подтверждает гипотезу о существовании промежуточного проводящего слоя на глубине 10 км, обозначенную кривой (1) в работе [Ковтун, 2004]. Однако максимальная кривая ρ_T (3) того же АМТЗ 2018 г. на периоде 0.1 с восходит к уровню 10^5 Ом · м и полностью противоречит возможности существования проводящего слоя на глубине 10 км. Заметим, что на рис. 5а минимальная кривая ρ_T (2) 2018 г. не совпадает полностью с кривой ρ_T (1). Это обусловлено, с одной стороны, отсутствием точных координат пунктов АМТ-МТЗ в работах [Вагин, 1985; Ковтун, 1986] и, с другой стороны, разными типами приемной аппаратуры и программ обработки. Тем не менее, можно заметить, что максимальная кривая ρ_T АМТЗ 2018 г. (3) хорошо согласуется с кривыми ρ_ω (4) и (5), полученными по результатам зондирования с мощными контролируруемыми источниками.

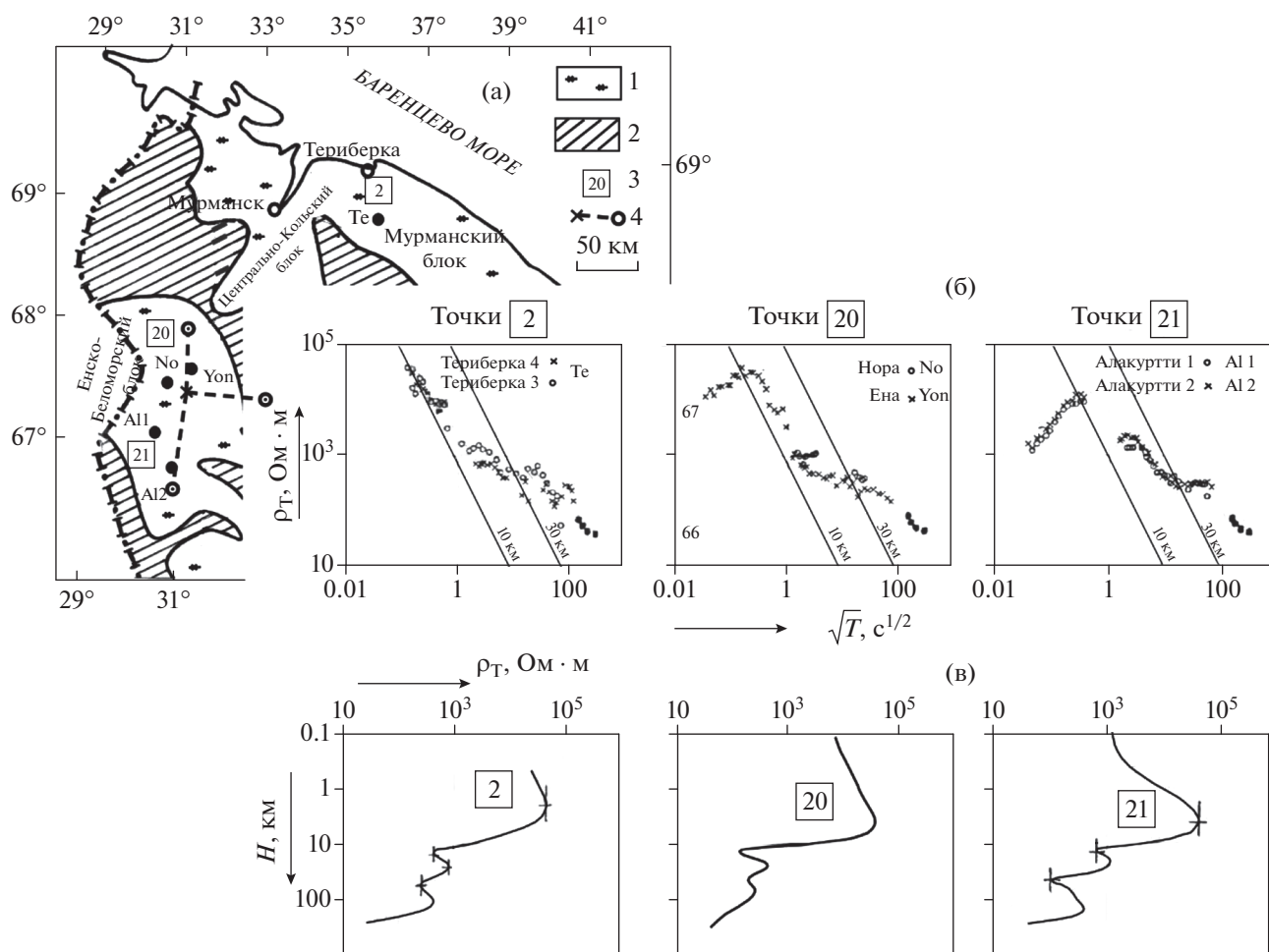


Рис. 4. Сводная диаграмма результатов АМТ-МТЗ на архейских блоках Кольского полуострова по данным работы [Ковтун, 2004]: (а) – схема расположения пунктов АМТ-МТЗ и пунктов и трасс ЧЗ-МГД-зондирования на архейских блоках Кольского полуострова [Велихов, 1984] (условные обозначения те же, что на рис. 1б); (б) – минимальные кривые АМТ-МТЗ в пунктах наблюдений 2, 20 и 21; (в) – геоэлектрические разрезы по результатам АМТ-МТЗ в пунктах наблюдений 2, 20 и 21.

Итоговые модели геоэлектрических разрезов представлены на рис. 5б кривыми 6, 7 и 8. Разрез 8 получен по результатам зондирования с промышленными ЛЭП в эксперименте “FENICS-2007” [Жамалетдинов, 2011]. Разрез 7 получен по результатам МГД-зондирования в комплексе с частотными зондированиями в Ковдорском районе [Велихов, 1984]. Можно видеть, что результаты зондирования с контролируемыми источниками, несмотря на разные районы исследований, хорошо согласуются между собой, но, в то же время, почти на 3 порядка отличаются от модели геоэлектрического разреза, полученной по минимальной кривой ρ_T АМТЗ (кривая 6 на рис. 5б). Выбор между минимальной и максимальной кривыми АМТ-МТЗ во многом определяется интуицией интерпретатора. В работах [Вагин, 1985; Ковтун, 2004] главным критерием в пользу выбора минимальных кривых ρ_T АМТ-МТЗ для интер-

претации параметров глубинного разреза явился наблюдаемый на них выход длиннопериодных асимптотик на периоде 10000 с на уровень глобальной кривой МВЗ с значениями ρ_T на уровне 100 Ом·м (рис. 4). Но это – сугубо качественный, феноменологический критерий, предложенный в работе [Рокитянский, 1971] для коррекции статических искажений МТЗ. В данном случае расхождение кривых МТЗ на минимальные и максимальные обусловлено, по-видимому, не столько двумерностью среды и влиянием предполагаемых статических искажений, сколько неоднородностью близко расположенного аврорального источника вариаций электромагнитного поля.

В заключение раздела отметим, что большой объем магнитотеллурических зондирования на территории Мурманского блока выполнен А.Г. Краснобаевой-Дьяконовой в 1978 г. в ходе реализации эксперимента по зондированию с

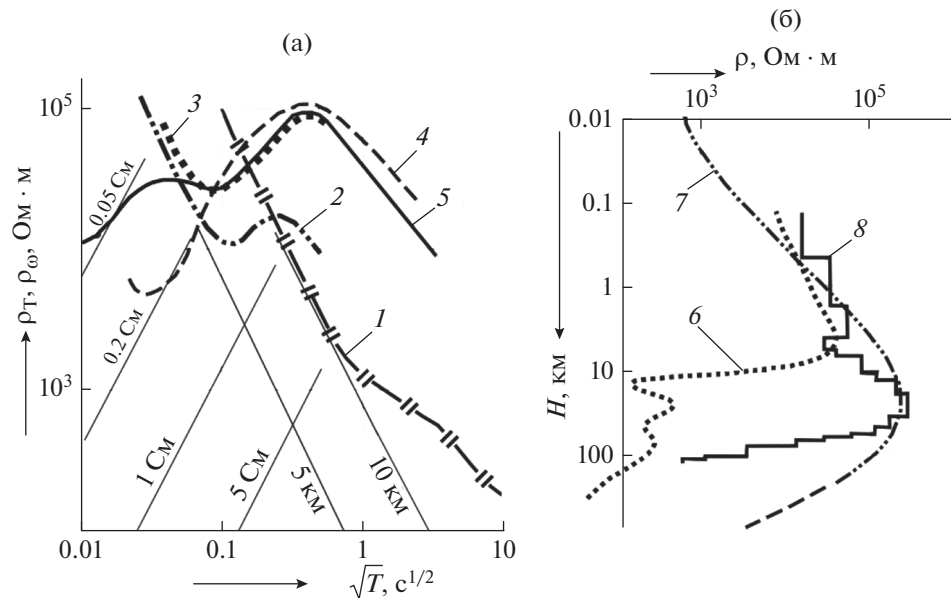


Рис. 5. Сводная диаграмма результатов электромагнитных зондирований с естественными и контролируемыми источниками на архейских блоках Кольского полуострова: (а) – сводная диаграмма кривых кажущегося сопротивления: 1 – минимальная кривая ρ_k АМТЗ по данным [Ковтун, 2004] (в точке 2 на рис. 4б); 2 – минимальная кривая ρ_k АМТЗ, измеренная в рамках эксперимента “Мурман-2018” (в районе точки 2 на рис. 4б); 3 – максимальная кривая ρ_k АМТЗ по тем же данным; 4 – кривая ρ_k по данным ЧЗ-МГД-зондирования в Ковдорском районе [Велихов, 1984]; 5 – кривая ρ_k CSAMT в эксперименте “FENICS-2007” [Жамалетдинов, 2011]; (б) – сводная диаграмма с решениями обратной задачи глубинных зондирований: кривая 6 – геоэлектрический разрез по результатам обработки кривой 1 на рис. 5а, по данным АМТ-МТЗ [Ковтун, 2004] (см. также рис. 4в); кривая 7 – разрез по результатам обработки кривой 4 на рис. 5а, по данным ЧЗ-МГД-зондирования в Ковдорском районе [Велихов, 1984]; кривая 8 – разрез по результатам обработки кривой 5 на рис. 5а, по данным CSAMT в эксперименте “FENICS-2007” [Жамалетдинов, 2011].

МГД-источником “Хибины” [Краснобаева, 1981; Дьяконов, 1982]. Измерения проводились с применением аналоговой аппаратуры МТЛ-71 в диапазоне частот 1–1000 Гц. По результатам обработки установлено среднее высокое сопротивление Мурманского блока (десятки тысяч Ом · м) и наличие промежуточного проводящего слоя на глубине 70–90 км, связываемого с сейсмическим волноводом. Тонкие особенности электропроводности верхней толщи земной коры (меньше 20–30 км) остались за пределами наблюдений вследствие низкочастотного характера приемной аппаратуры.

2.4. Частотные зондирования в поле контролируемого источника

В 1986 году на территории Мурманского блока проведены экваториальные частотные электромагнитные зондирования (ЧЗ) с использованием горизонтального электрического диполя длиной 2 км и автомобильного генератора ЭРС-67 мощностью 29 кВт. Измерения выполнены на расстояниях 16, 39 и 88 км вдоль дороги Кола-Серебрянка [Жамалетдинов, 1991] с целью проверки возможности существования промежуточного проводящего слоя на глубине 10 км, установленного ранее

[Вагин, 1985] и описанного в предыдущем разделе. Положение питающего диполя АВ и пунктов частотного зондирования показано на рис. 1в. Результаты ЧЗ в виде кривых кажущегося сопротивления ρ_0 приведены ниже на рис. 6.

На рис. 6 видно, что на разnose 16 км наблюдается высокое сопротивление земной коры – выше 10^5 Ом · м. На следующем разnose 39 км кажущееся сопротивление уменьшается до 5×10^3 Ом · м на частоте 8 Гц, указывая на существование гипотетического проводящего слоя на глубине 10 км по результатам формальной, одномерной интерпретации. При дальнейшем увеличении разноса до 88 км трасса частотного зондирования пересекала область АМТ-МТ-зондирований, выполненных в работе [Вагин, 1985] в районе пересечения дороги Кола-Серебрянка с дорогой на пос. Териберка. Кажущееся сопротивление ЧЗ здесь вновь увеличилось до уровня 10^5 Ом · м (рис. 6), указывая на среднее высокое сопротивление земной коры и отсутствие обнаруженного поданным МТЗ проводящего слоя на глубине 10 км. Тем не менее, тень сомнения в таком утверждении остается из-за нисходящей ветви кривой ЧЗ на разnose 39 км на рис. 6. В работе [Жамалетдинов, 1991] сделано предположение, что аномальный ход кривой ЧЗ на разnose 39 км обусловлен влиянием Чудзьявр-

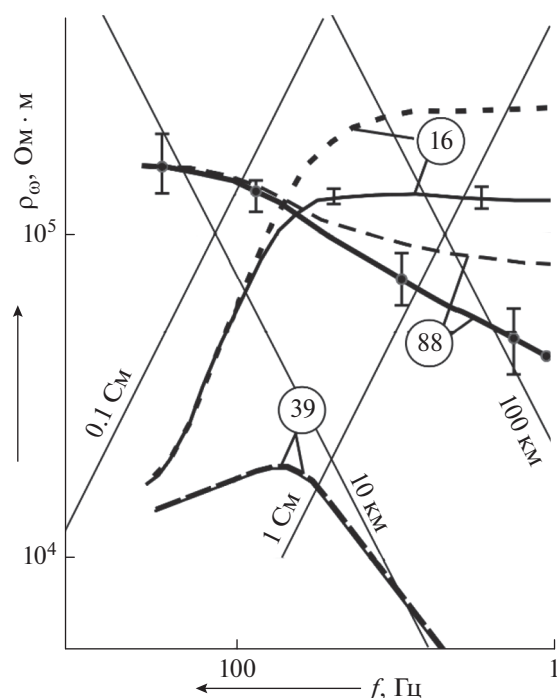


Рис. 6. Результаты частотного зондирования (ЧЗ) на Мурманском блоке. Положение питающей линии и пунктов зондирования показано на рис. 1в. Сплошные линии – измеренные кривые кажущегося сопротивления ρ_{ω} , штриховые – эффективные кривые $\bar{\rho}_{\omega}$, исправленные за влияние ближней зоны по методике [Вешев, 1980]. Цифрами в кружках указаны разности между источником и приемником в километрах.

ского разлома, пересеченного трассой зондирования.

3. ЭКСПЕРИМЕНТ “МУРМАН-2018”

3.1. Методика эксперимента “Мурман-2018”

Эксперимент “Мурман-2018” выполнен на территории распространения архейских кристаллических горных пород Мурманского блока, являющегося частью Фенноскандинавского щита (рис. 7а). Основной задачей эксперимента явилось изучение природы глубинных геофизических границ в условиях “нормального” разреза, не подверженного влиянию электроннопроводящих аномалий проводимости, сложенных сульфидно-углеродистыми породами [Жамалетдинов, 1982; 1990]. Схема расположения питающих и приемных линий в эксперименте “Мурман-2018” приведена на рис. 7б.

Основным методом в эксперименте “Мурман-2018” явилось дистанционное зондирование на постоянном токе (ДЗ). Зондирование осуществлялось путем линейного наращивания расстояния между источником и приемником со

средним шагом от 2.5 до 5 км в интервале разносов от 5 до 56 км. Измерения в каждой точке зондирования проводились с осевой и экваториальной установками, при субширотном и субмеридиональном расположении питающих линий (*AB1* и *AB2* на рис. 7б). Ток в форме меандра подавался в каждую линию поочередно на одной из трех частот (0.194, 0.382 или 0.942 Гц), выбиравшихся в зависимости от расстояния до источника и от соотношения “сигнал–шум” в точке приема. В зависимости от соотношения “сигнал–шум” выбиралась также длительность записи в каждой точке – от 2 до 10 мин. Наличие условий ближней зоны на этих частотах контролировалось по результатам частотных зондирований (рис. 12– рис. 14).

Запись компонент электрического поля велась при помощи широкополосной 32-битной магнитотеллурической измерительной станции VMTU-10 [Корутенко, 2010]. Для записи использовались два электрических канала (E_x и E_y). Датчиками поля служили две взаимно ортогональные симметричные заземленные линии М-0-Н длиной 2×50 м со средней точкой “0” для подавления некогерентных помех. Приемные линии М-0-Н ориентировались по магнитному меридиану (E_x) и по магнитной широте (E_y). Принятая ориентировка питающих и приемных линий дала возможность рассчитывать кажущееся сопротивление по полному полю для экваториальной и осевой установок.

Широкий динамический диапазон станции VMTU-10 (32 бита) избавляет от необходимости применения 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 Wi-Fi делают станцию VMTU-10 идеальным прибором для зондирования как с естественными, так и с контролируруемыми источниками [Корутенко, 2010; Жамалетдинов, 2012].

В качестве питающих диполей использовались две взаимно ортогональные (под углом 80°) заземленные линии – субширотная *AB1*, длиной ~ 1.9 км, и субмеридиональная *AB2*, длиной ~ 1.6 км. Положение питающих линий в укрупненном масштабе приведено на рис. 7б.

В качестве источника тока использовался автономный генератор “Энергия-4” мощностью до 29 кВт, разработанный в ЦЭС КНЦ РАН в 2014 году [Колобов, 2018; Баранник, 2019]. Для синтеза выходного напряжения генератора используется метод широтно-импульсной модуляции (ШИМ), что позволяет формировать в питающих линиях периодический ток произвольной частоты и формы (синус, меандр, модифицированный меандр и т.д.). Генератор “Энергия-4” разработан, прежде всего, для проведения элек-

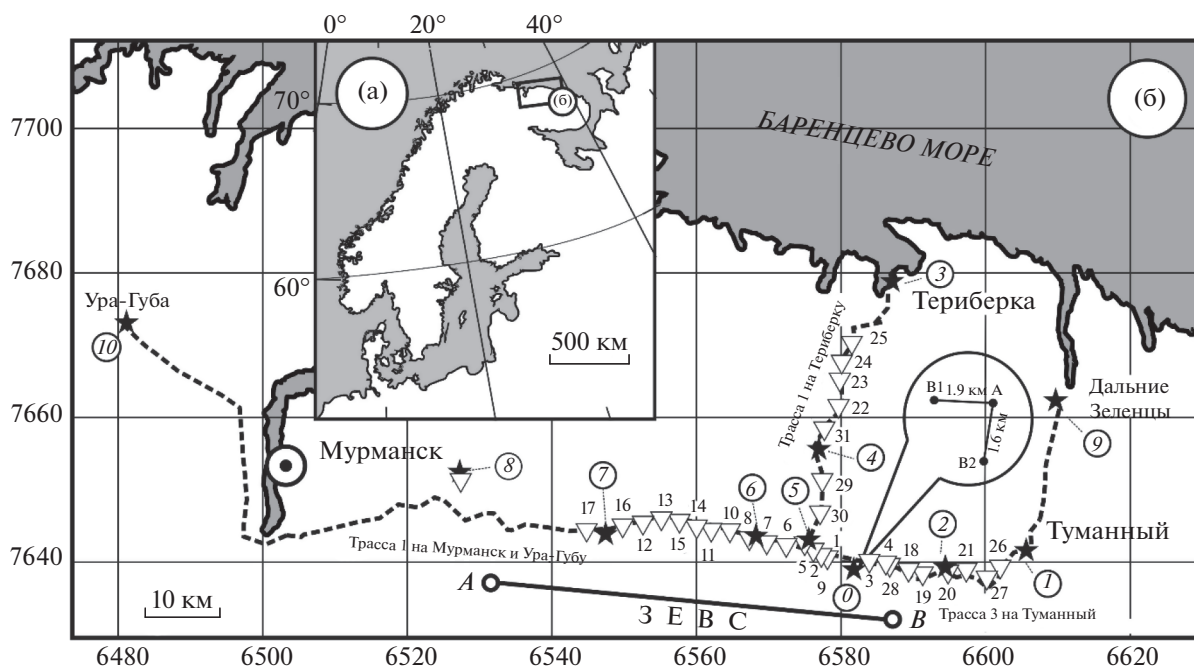


Рис. 7. Схема расположения пунктов и трасс зондирования в эксперименте “Мурман-2018” : (а) – положение района исследований (б) на территории Фенноскандинавского щита; (б) – схема расположения пунктов и трасс зондирования: *O* – место размещения питающих заземленных линий *AB1*, *AB2* и генератора “Энергия-4”; белые треугольники с номерами (1–31) – пункты дистанционных зондирований (ДЗ) на постоянном токе; звездочки, пронумерованные цифрами в кружках (1–10) – пункты частотных (CSAMT) зондирований в диапазоне частот 4–2000 Гц; *AB* – питающая линия СНЧ источника “Зевс”.

ромагнитных зондирований в аудио-диапазоне частот (2–2000 Гц). Максимальная амплитуда выходного напряжения в диапазоне частот 2–49 Гц составляет 1000 В, а в диапазоне 50–2000 Гц – 1200 В. Функциональная схема, принцип действия, силовая элементная база генератора, а также оригинальные схмотехнические решения, использованные при его проектировании, рассмотрены в работе [Колобов, 2017].

В ходе эксперимента “Мурман-2018” при зондированиях на постоянном токе в питающие линии подавался ток в форме разнополярных прямоугольных периодических сигналов (меандра) крайне низкой частоты – от 0.194 до 0.942 Гц. Соблюдение условий постоянного тока на этих частотах контролировалось по результатам частотных зондирований, приведенных на рис. 12. Кроме того, оно вытекает из прямых расчетов волнового параметра kr , который должен быть много меньше единицы. Здесь $kr = 2\pi r/\lambda$, где r – расстояние между источником и точкой приема в километрах и λ – длина электромагнитной волны в земле, $\lambda = \sqrt{10\rho T}$, км. Приняв $\rho = 10^5$ Ом · м, нетрудно определить, что на частоте 1 Гц длина волны λ составит 1000 км, а параметр kr на удалении 50 км составит величину 0.3, то есть будет много меньше единицы. Тем более условие постоянного тока

будет соблюдаться на частотах ниже 1 Гц и на удалениях, меньших 50 км.

Суммарное активное сопротивление излучающих контуров *AB1*, *AB2* составляло 55 и 57 Ом, соответственно. Максимальная амплитуда силы тока в питающих линиях во всем диапазоне частот находилась в пределах 20 А.

3.2. Методика обработки результатов дистанционных зондирований (ДЗ)

Обработка результатов измерений в режиме ДЗ осуществлялась тремя способами – спектральная обработка на основе быстрого преобразования Фурье (БПФ), спектральная обработка на основе прямого и обратного дискретного преобразования Фурье (ДПФ) с восстановлением формы сигнала и обработка в режиме традиционного накопления сигнала с предварительной фильтрацией [Скорыходов, Колобов, 2019]. Особое внимание, уделенное процедуре обработки, обусловлено тем, что по мере удаления от источника поля, амплитуда полезного сигнала убывает пропорционально кубу расстояния и его уверенная регистрация на фоне интенсивных помех, создаваемых высоковольтными промышленными ЛЭП и военными радарными установками, представляет сложную техническую задачу.

Спектральная обработка на основе БПФ сводилась к определению амплитуды первой гармоники сигнала на основной частоте, задаваемой генератором (f_1). Спектр определялся через процедуру расчета спектральной плотности мощности сигнала (СПМ). Далее амплитуда измеренного электрического поля определяется выражением:

$$\Delta U(f) = \sqrt{СПМ \cdot \Delta f} \text{ [В]}, \quad (1)$$

где Δf – шаг дискретизации по частоте.

Аналогичная процедура спектрального преобразования производилось с током источника. Далее выполнялась нормировка сигнала по источнику путем вычисления отношения амплитуд первых гармоник сигнала и тока.

Второй способ определения амплитуды сигнала основан на дискретном преобразовании Фурье. Он позволяет производить визуальный контроль формы электрического поля в земле. Для этого производится вычисление первой (основной) и высших гармоник. Далее сигнал восстанавливается во временном представлении путем проведения операция свертки (обратного преобразования Фурье):

$$S(t) = \sum_{i=1}^k A_i \sin\left(t \frac{2\pi}{T} + \phi_i\right). \quad (2)$$

Амплитуда сигнала определялась с использованием только нечетных гармоник $f_n = f_1(2n - 1)$. В условиях сильно зашумленного сигнала (на удалении 25–50 км и более) количество высших гармоник, используемых для определения амплитуды и для восстановления формы сигнала, ограничивалось числом $k = 5-9$. При относительно уверенном приеме сигнала (на малых и средних удалениях) количество высших гармоник увеличивалось до 21–31.

Третьим явился способ арифметического накопления (сложения сигналов). Он основан на том, что временной ряд делится на фрагменты, равные периоду полезного сигнала. Далее полезный сигнал накапливается в одной фазе. Случайные помехи при этом редуцируются. Дополнительно производилось накопление по четным гармоникам. Временной ряд в этом случае делится на фрагменты, равные двум периодам сигнала ($f = f_1 \times 2n$). Поскольку импульсы при этом складываются в противофазе, то влияние полезного сигнала исчезает, и измеренное поле по мере накопления становится равным естественному шуму. Отношение результатов накопления по нечетным и четным гармоникам дает количественную информацию о соотношения “сигнал–шум”, то есть о превышении полезного сигнала над шумами.

Результаты накопления сигналов ДЗ разными методами и при разных удалениях от источника (8 и 56 км) проиллюстрированы ниже на рис. 8.

Представленные на рис. 8 результаты определения амплитуды и формы сигнала при разных методах накопления в эксперименте “Мурман-2018” позволяют сделать следующие выводы. Накопление путем свертки результатов дискретного преобразования Фурье (ДПФ) может накапливать ошибку при восстановлении формы сигнала, поскольку на фоне шума сложно определить необходимое для этого количество гармоник. В условиях данного эксперимента для решения поставленной задачи наиболее быстрым и удобным способом определения амплитуды сигнала явилась спектральная обработка по первой гармонике БПФ. Таким же способом определялась и амплитуда силы тока, на которую осуществлялась нормировка измеренных по первой гармонике сигналов для последующего определения величины кажущегося сопротивления. Режим простого накопления в этих условиях дает менее уверенные результаты, особенно на больших удалениях от источника.

3.3. Интерпретация результатов дистанционных зондирований

Начальным этапом дистанционных зондирований явилось проведение вертикальных электрических зондирований (ВЭЗ) на постоянном токе. Измерения проводились с аппаратурой АНЧ-3 [Бобровников, 1974]. ВЭЗ выполнены в районе расположения питающих линий АВ1 и АВ2 (см. рис. 76) с применением коллинеарных четырехэлектродных установок с произвольным несимметричным расположением электродов. Расчеты геометрических коэффициентов и кажущегося удельного электрического сопротивления (ρ_k) выполнены по традиционным формулам [Жданов, 1986]. Результаты ВЭЗ совместно с результатами дипольных дистанционных зондирований с экваториальной (ДЭЗ) и осевой (ДОЗ) установками приведены на рис. 9.

Данные ВЭЗ для осевой и экваториальной установок привели к получению примерно одинаковых по виду и по абсолютным значениям кривых кажущегося сопротивления с расхождением значений ρ_k в пределах погрешности наблюдений (относительная погрешность – 5–7%). Отмеченный характер ВЭЗ свидетельствует о высокой горизонтальной однородности верхней части разреза в районе расположения питающих линий.

Наклон кривых ВЭЗ к оси ординат на рис. 9 составил примерно 30 градусов. Это указывает на постепенный (градиентный) рост удельного электрического сопротивления с глубиной, связанный с уменьшением пористости и влажности горных пород. Жирной штрихпунктирной линией показано гипотетическое продолжение кривой

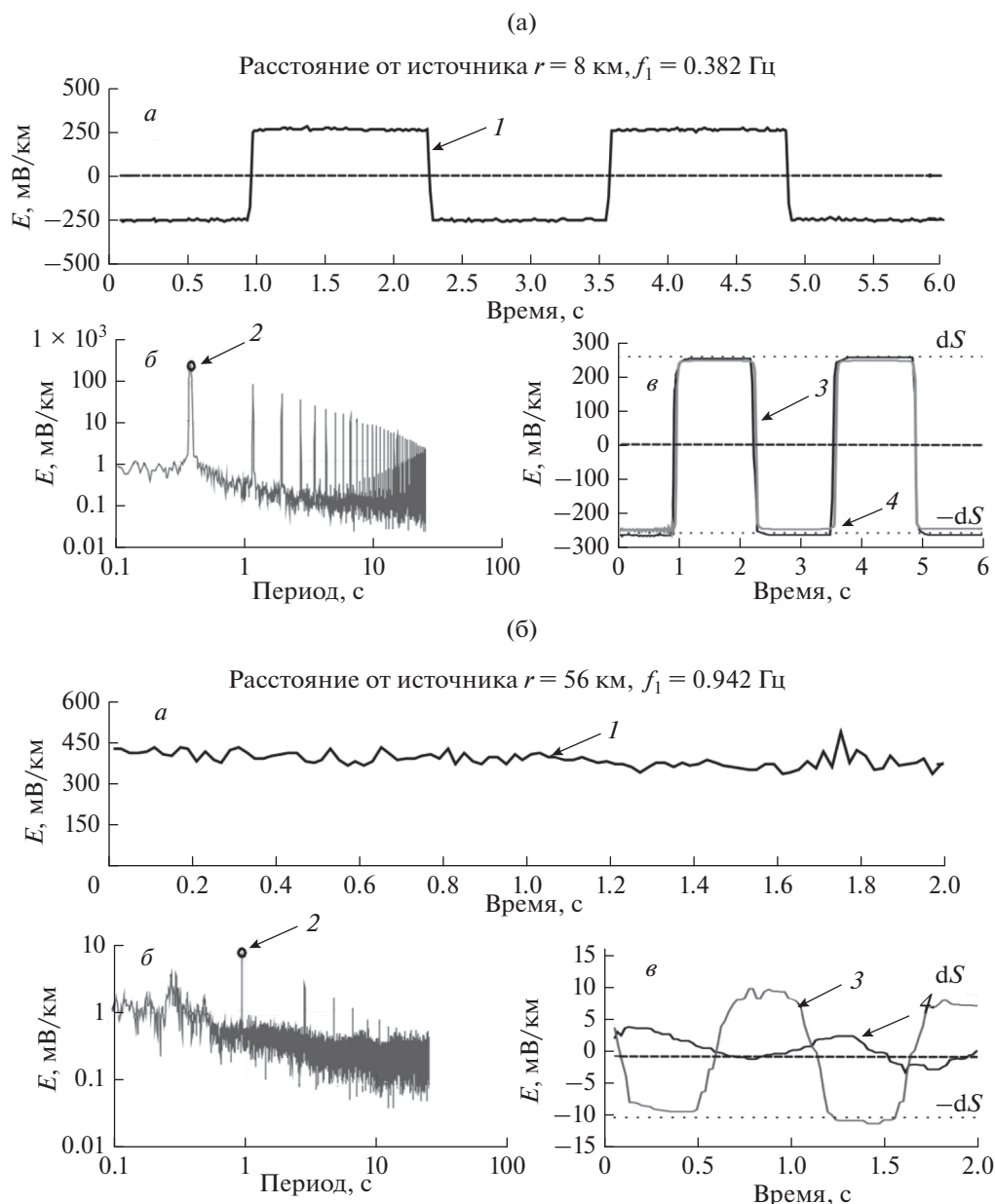


Рис. 8. Примеры применения трех методов накопления полезного сигнала ДЗ на разных удалениях r от источника (8 и 56 км) в поле субмеридиональной линии $AB2$ (экваториальная установка): (а) – измерения в точке № 6, на удалении $r = 8$ км (на рис. 7б показано цифрой 6 над белым треугольником); (б) – измерения в точке № 8, на удалении $r = 56$ км (на рис. 7б показано цифрой 8 в белом кружке и с белым треугольником, так как в этой точке делалось и частотное зондирование CSAMT, и накопление). Обозначения кривых: a – измеряемое поле (указывает стрелка с цифрой 1); b – спектр БПФ и амплитуда первой гармоники (черный кружок и стрелка с цифрой 2); c – сигнал, восстановленный после двойного дискретного спектрального преобразования (стрелка с цифрой 3) и сигнал, восстановленный после арифметического накопления (стрелка с цифрой 4).

ВЭЗ в область больших разностей (до 100 км) в предположении продолжающегося градиентного роста сопротивления с глубиной. Такая экстраполяция ВЭЗ принята в соответствии с прежними традиционными представлениями о строении кристаллической земной коры в виде модели типа “К” с мощным плохо проводящим средним слоем, характеризующимся градиентным увеличением

сопротивления вплоть до глубины 20–30 км [Keller, 1966; Семенов, 1978; Жамалетдинов, 1982]. Однако дистанционное зондирование 2018 года с линейным шагом изменения разностей привело к необходимости построения иной модели. В нижней части рис. 9 приведены результаты ДЭЗ и ДОЗ по трассе на Мурманск, показанной на рис. 7б. Неожиданной особенностью результатов ДЭЗ и

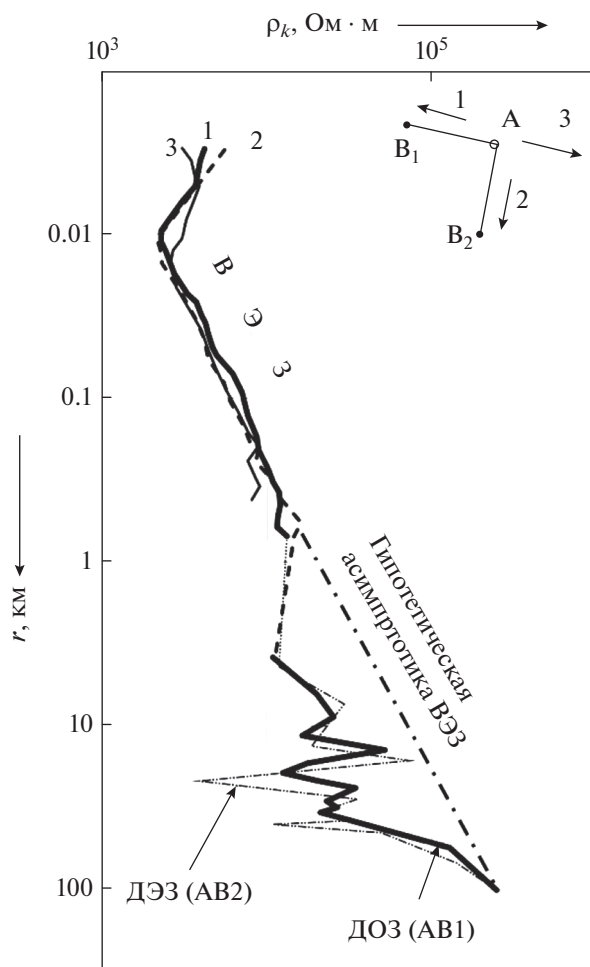


Рис. 9. Результаты ВЭЗ в районе питающих линий $AB1$, $AB2$ и дистанционных зондирований ДЭЗ–ДОЗ вдоль трассы на Мурманск: тонкой штрихпунктирной линией обозначена кривая ДЭЗ от диполя $AB2$; сплошной жирной линией обозначена кривая ДОЗ от диполя $AB1$. Положение линий $AB1$, $AB2$ и трассы на Мурманск показано на рис. 76. Жирной штрихпунктирной линией обозначена гипотетическая экстраполяция кривой ВЭЗ в область больших разносов (до 100 км) в предположении градиентного роста сопротивления с глубиной, намеченного по данным ВЭЗ.

ДОЗ явилось резкое изменение характера кривых ρ_k в диапазоне разносов от 2–3 до 30–40 км. Вместо ожидавшегося по данным ВЭЗ продолжения градиентного роста ρ_k по мере удаления от источника в область больших разносов на кривых ДЭЗ и ДОЗ наблюдается стабилизация значений ρ_k на уровне средней величины 2×10^4 Ом · м с резкими отклонениями в область больших и меньших значений ρ_k от 5×10^3 до 5×10^4 Ом · м.

Необходимо заметить, что на рис. 9, так же как и на последующих рис. 10–12, не показаны бары погрешности. Вызвано это тем, что они сливаются с шириной линии графиков вследствие незна-

чительной величины погрешности, которая, как правило, не превышала 10–15%. Это хорошо видно на рис. 8, где на максимальном (в режиме постоянного тока) разnose 56 км отношение “сигнал–шум” достигает 20 и, следовательно, погрешность не превышает 5–10%. На меньших разносах погрешность еще меньше. Однако на удалении 105 км влияние шума уже заметно, и для этого разноса на рис. 13 и рис. 14 бары погрешности показаны. При измерениях сигналов контролируемого источника они составляют 0.1–0.2 порядка, а на кривых ρ_T АМТЗ достигают 0.5–0.6 порядка.

Поведение кривых ρ_k в зависимости от рабочих разносов проиллюстрировано на рис. 10 в линейно-логарифмическом масштабе для всех трех трасс зондирования с установками ДЭЗ и ДОЗ. Можно отметить на рис. 10, что кривые зондирования по трассам на Мурманск–Ура-Губу (рис. 10а) и на п. Туманный (рис. 10б) имеют общие особенности. Вплоть до разносов 25–40 км на обеих трассах наблюдается изрезанный характер кривых ρ_k . Значения ρ_k изменяются симметрично в большую и в меньшую стороны относительно средней величины 20 кОм · м и затем резко возрастают на разносах, больших 40 км. В направлении на Туманный резкое возрастание значений ρ_k наблюдается несколько раньше, чем в направлении на Мурманск (на разnose свыше 20 км). Из общей тенденции выбиваются результаты зондирования по трассе на п. Териберка. На больших разносах (свыше 25 км), с приближением к побережью Баренцева моря, значения ρ_k опускаются до 10^3 Ом · м (рис. 10в), что объясняется влиянием прибрежных осолоненных осадков.

Резкие перепады значений ρ_k на всех трех трассах (рис. 10) могут быть связаны с влиянием субвертикальных зон трещиноватости и разломов. В этом отношении важно отметить, что наибольшая амплитуда изменений ρ_k , связываемых с эффектом профилирования, наблюдается не для осевой, как следовало бы предположить, а для экваториальной установки ДЭЗ с меридиональным расположением питающей линии AB и приемных линий М-0-N (рис. 9). Это указывает на возможное проявление на результатах ДЭЗ макроанизотропии с преимущественным влиянием зон трещиноватости и разломов субмеридионального простирания, поперечного относительно запад–северо-западной вытянутости Мурманского блока.

Можно предполагать, что влиянием субмеридиональных разломов, выполаживающихся с глубиной наподобие листрических зон трещиноватости [Давиденко, 1979; Горяинов, 1993], обусловлено существование на глубине 2–7 км промежуточного проводящего слоя дилатантно-диффузионной природы (ДД-слоя), описанного в работах [Жамалетдинов, 2002; 2017]. В этой ча-

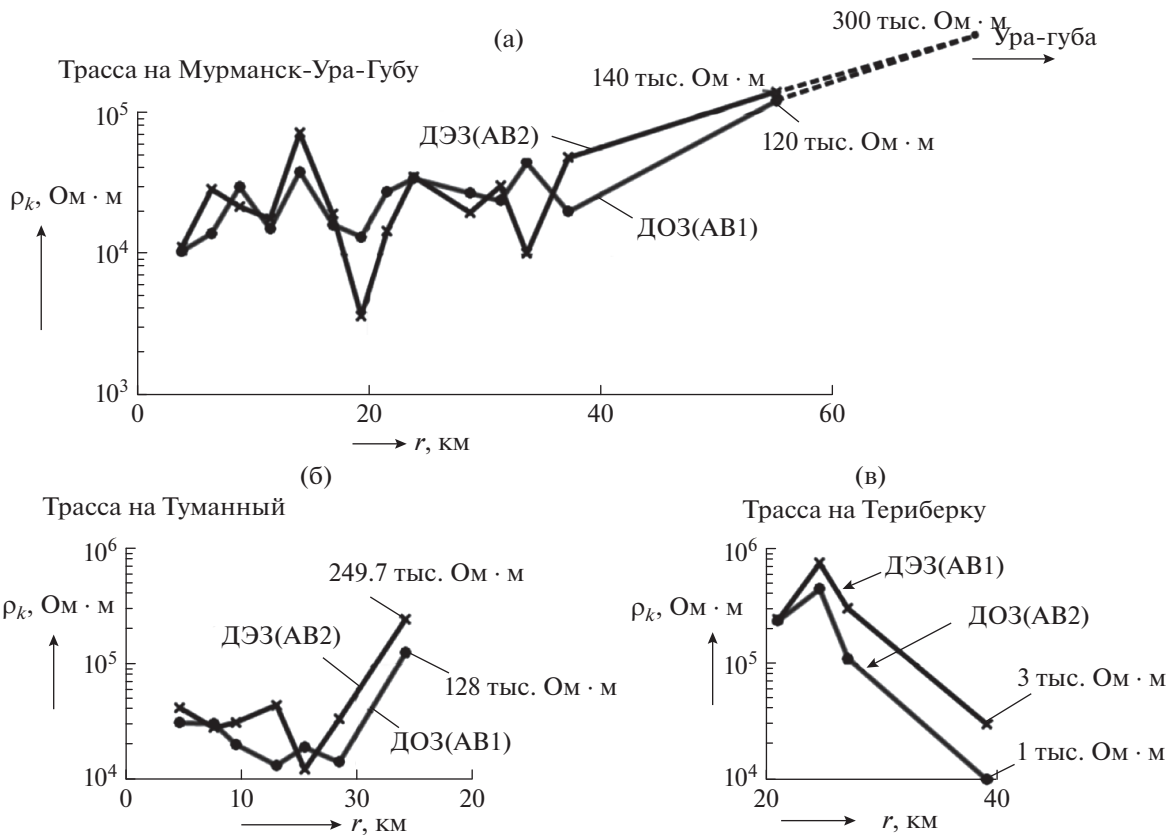


Рис. 10. Результаты дистанционного зондирования с установками ДЭЗ и ДОЗ на постоянном токе в линейно-логарифмическом масштабе. Положение трасс зондирования *а, б, в* показано на рис. 7б.

сти геоэлектрического разреза электропроводность горных пород определяется существованием свободных флюидов в открытых полостях, которые могут образовываться за счет явлений дилатансии при совместном воздействии и противоборстве литостатического и тангенциального давлений [Николаевский, 1986]. Верхняя толща земной коры до глубины 10–15 км, совместно с верхним слоем градиентного увеличения сопротивления пород с глубиной, может быть определена, вслед за автором [Ваньян, 1996], как область хрупкого состояния земной коры.

При дальнейшем увеличении разносов до 70–105 км значения ρ_k резко увеличиваются до 150–300 кОм · м, указывая на существование более плохо проводящего основания. Таким образом, качественный анализ поведения кривых ρ_k дистанционного зондирования, благодаря непрерывному (линейному) шагу изменения разносов, позволяет составить представление о градиентно-ступенчатом характере изменения параметров геоэлектрического разреза с глубиной.

Рассмотренные выше на рис. 9 и рис. 10 кривые ρ_k 2018 г. имеют много общих черт с результатами 1990 г., рассмотренными в самом начале ста-

тью на рис. 2 и рис. 3. Несмотря на то, что центры зондирований разных лет удалены между собой более чем на 30–40 км, а кривые ρ_k получены с применением разной измерительной аппаратуры и обработаны разными методами, тем не менее, они похожи между собой как по форме, так и по абсолютным значениям и повторяют согласный между собой градиентно-ступенчатый вид. Это послужило основанием к тому, чтобы провести заново инверсию результатов 1990 г. и представить их совместно с данными 2018 г., что и выполнено ниже, на рис. 11.

Обратная задача решалась методом подбора с применением одномерной программы на основе фильтров Андерсена [Anderson, 1979]. Результаты подбора приведены на рис. 11 для двух зондирований, выполненных в 1990 и 2018 гг. Подбор для работ 1990 г. на рис. 11а выполнен с учетом всех экспериментальных данных (ВЭЗ, “Зевс” и МГД-зондирование с установкой “Хибины”), без грубого сглаживания, в отличие от подбора, приведенного в начале статьи на рис. 3а. При подборе данных 2018 года (рис. 1б) кривая ρ_k на интервале разносов 2–8 км (ввиду недостаточного количества пунктов зондирования) нанесена путем экстраполяции градиентного поведения кривой ВЭЗ

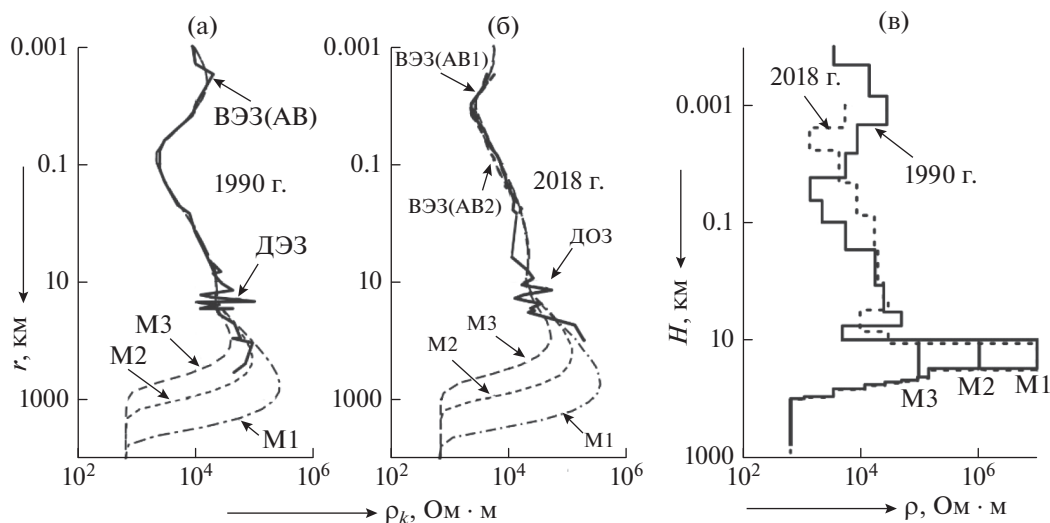


Рис. 11. Результаты решения обратной задачи дистанционного зондирования 1990 и 2018 гг. на Мурманском блоке методом подбора: (а) – подбор результатов 1990 г. (первичные данные приведены на рис. 2 и рис. 3); (б) – подбор результатов эксперимента “Мурман-2018” по трассе на Мурманск–Ура-Губу (положение трассы показано на рис. 7б, первичные данные приведены на рис. 9 и рис. 10); (в) – подобранные модели разрезов: жирная линия – 1990 г., штриховая линия – 2018 г. Глубже $H = 10$ км расчеты выполнены для трех моделей – М1, М2 и М3 (рис. 11в), рассчитанные кривые ρ_k показаны на рис. 11а и рис. 11б штрихпунктирными линиями.

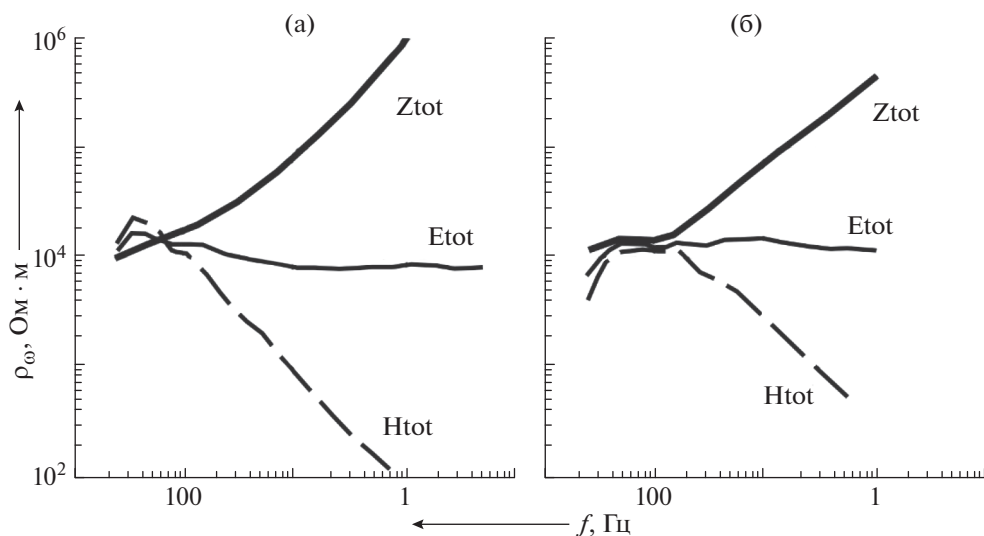


Рис. 12. Результаты частотного зондирования CSAMT по трассе в направлении на п. Туманный на удалениях 12 км (а) и на удалении 22 км (б) от диполя АВ2. Положение пунктов зондирования (а) и (б) показано на рис. 7б черными звездочками и обозначено цифрами в кружках (2) и (1) соответственно. Там же показано положение питающего диполя АВ2.

по аналогии с данными 1990 года (рис. 1а), где кривая ВЭЗ выполнена с разном $AB = 16$ км.

Сравнивая разрезы на рис. 11а и рис. 11б, можно отметить небольшие расхождения в моделях (около одного порядка), наблюдаемые в верхних частях разрезов на глубинах до первых сотен метров. В средней части разрезов (в диапазоне глубин от 0.2 до 10 км) значения удельного сопротивления в обоих пунктах зондирования практически

совпадают между собой и находятся в пределах 10–20 $\text{kOm} \cdot \text{m}$ (рис. 11в). Для получения более полного согласия с экспериментальными данными на всех трех моделях в обоих пунктах зондирования в геоэлектрические разрезы внесен промежуточный проводящий слой (порядка $10^4 \text{Om} \cdot \text{m}$) в интервале глубин от 3-х до 7–10 км (ДД-слой, описанный выше). Благодаря этому в теоретических расчетах на обоих разрезах получил подтвер-

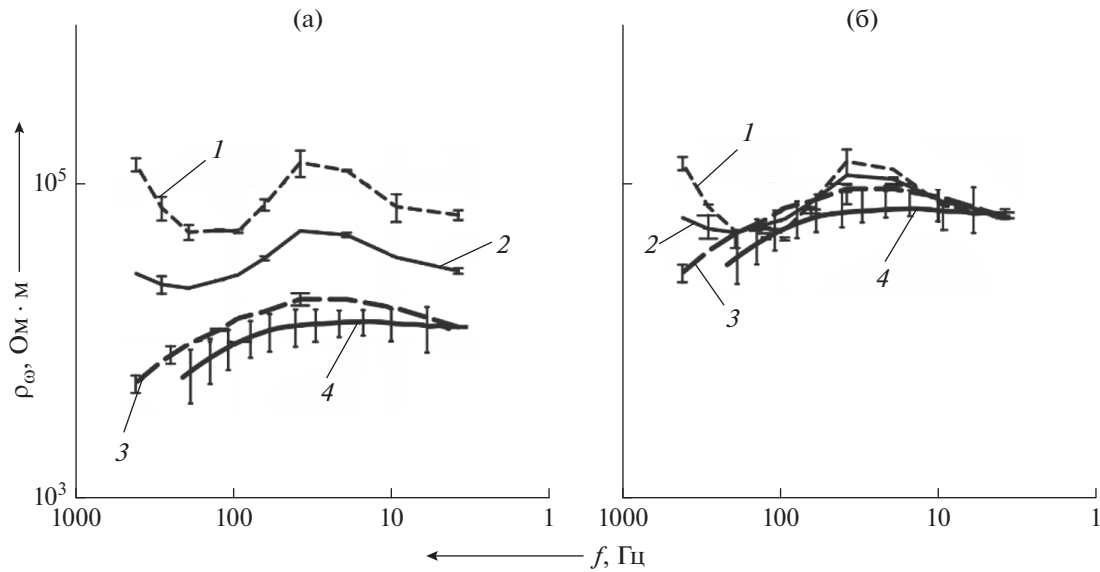


Рис. 13. Результаты экваториального частотного зондирования CSAMT в точке Ура-Губа на удалении 105 км от питающего диполя *AB2*. Положение диполя *AB2* показано рис. 7б: (а) — измеренные кривые кажущегося сопротивления по полному магнитному полю H_{tot} (1), по полному электрическому полю E_{tot} (2), по полному входному импедансу Z_{tot} (3) и по полному импедансу АМТ поля Z^{eff} (4); (б) — то же, исправленные за влияние статического сдвига кривые (2–4). Статический сдвиг учтен путем параллельного смещения кривых (2–4) вдоль оси кажущегося сопротивления. Описание и обоснование правила сдвига дано в тексте.

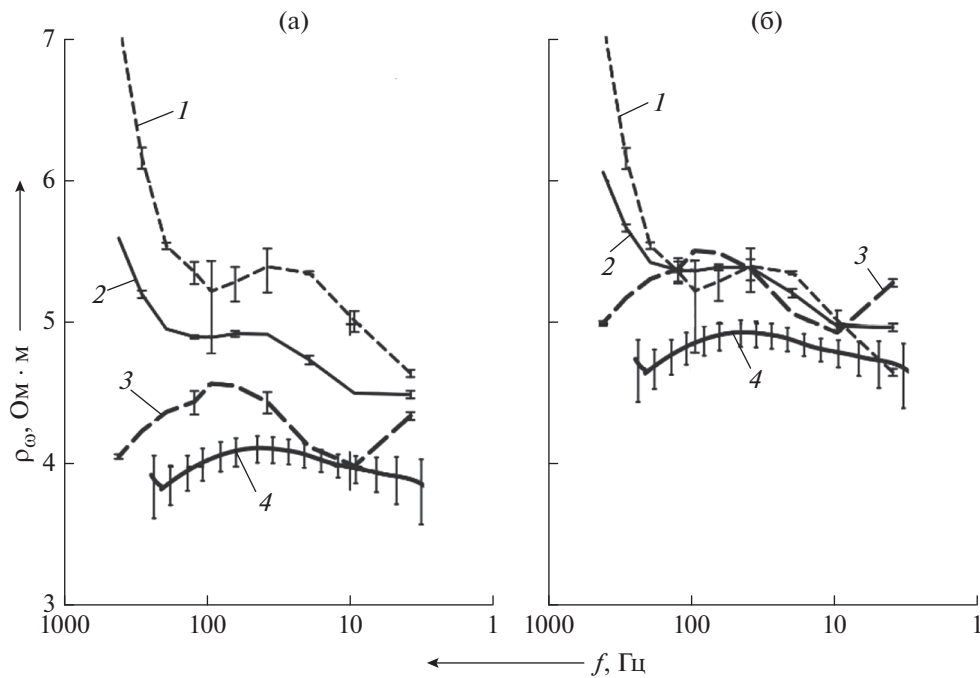


Рис. 14. Результаты осевого частотного зондирования CSAMT в точке Ура-Губа от питающего диполя *AB1*. Условные обозначения кривых ρ_ω 1–4 на рис. 14а и рис. 14б те же, что на рис. 13.

ждение перегиб кривой ρ_k в интервале разносов от 10 до 30–40 км.

Глубинные части разрезов на рис. 11 включают три возможных варианта моделей, отличающихся

между собой по величине удельного сопротивления промежуточного плохо проводящего слоя, помещенного на глубине 10 км. Его удельное сопротивление изменяется от 10^5 Ом · м для модели

М1 до 10^7 Ом · м для модели М3 (рис. 11в). Можно видеть из рис. 11, 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. С наибольшей долей вероятности, учитывая широкий диапазон эквивалентности, можно отдать предпочтение модели М2, на которой сопротивление кристаллических пород земной коры скачкообразно увеличивается на глубине 10 км с 2×10^4 до 10^6 Ом · м.

На кривой зондирования 2018 г. (рис. 11б) измерения выполнены только до разноса 105 км, тогда как на кривой 1990 года (рис. 11а) имеются измерения на разносах 110, 200 и 350 км. Причем значения кажущегося сопротивления в этом диапазоне разносов уменьшаются с увеличением глубины зондирования. Это уменьшение может быть связано с влиянием возрастающей с глубиной температуры. Возможны и другие, альтернативные варианты истолкования поведения кривой ρ_k МГД-зондирования на разносах 110–350 км на рис. 11а. В частности, понижение ρ_k на больших разносах на МГД-данных может быть вызвано влиянием расположенной в 30–40 км к северу береговой линии Баренцева моря, вдоль которой проходит трасса зондирования (см. рис. 7б) или влиянием слабо проводящих пород структуры Колмозеро-Воронья, расположенной южнее трассы зондирования. Наконец, понижение сопротивления может быть обусловлено недостаточным учетом геометрии заводненного источника “Хибины” на больших удалениях от него. Решение всех этих вопросов требует специальных расчетов и дополнительных наблюдений, которые выходят за рамки данной работы, нацеленной на изучение электропроводности верхней толщи земной коры до глубины 20–30 км. Сведения о параметрах электропроводности нижней толщи земной коры и о параметрах верхней мантии могут быть получены по результатам дистанционных зондирований на удалениях до 700–800 км от источника в рамках эксперимента “FENICS-2019”. С этой целью намечено выполнить прецизионную обработку прямоугольных сигналов низкой частоты (0.384 Гц и ниже) в условиях однородных плохо проводящих архейских пород Карельского мегаблока.

3.4. Частотные зондирования CSAMT в комплексе с АМТЗ

Частотные зондирования с контролируемым источником (Control Source Audio MagnetoTellurics, CSAMT) выполнены в 11 точках. Они обозначены звездочками и показаны номерами от 0

до 10 в кружках на рис. 7б. Расчеты геометрических коэффициентов и кажущегося сопротивления CSAMT выполнены по значениям модулей полных векторов электрического E_{tot} и магнитного H_{tot} поля, а также по значениям полного входного импеданса $Z_{tot} = E_{tot}/H_{tot}$ [Жданов, 1986; Шевцов, 2001; 2019].

Для полного электрического поля кажущееся сопротивление определяется выражением (3):

$$\rho_{\omega tot}^E = K_{tot}^E \frac{E_{tot}}{IL_{AB}}, \quad \text{где} \quad (3)$$

$$E_{tot} = \sqrt{E_x^2 + E_y^2},$$

где: I – амплитуда силы тока (A) в дипольном источнике; L_{AB} – длина (м) питающего диполя; E_{tot} – модуль полного вектора горизонтальной составляющей электрического поля (в В/м) с декартовыми компонентами вдоль (E_x) и поперек (E_y) питающего диполя AB .

Геометрический коэффициент K_{tot}^E определяется через геометрические коэффициенты для декартовых компонент в условиях квазистационарной дальней зоны источника по расстоянию r между центрами измерительной линии и питающего диполя и углом θ между осью питающего диполя (AB) и направлением из его центра O на центр измерительной линии O' :

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

$$K_y^E = \frac{2\pi r^3}{3 \times \cos\theta \sin\theta}.$$

Аналогично для модуля полного вектора горизонтальной составляющей магнитного поля имеем:

$$\rho_{tot}^H = 2\pi f \mu_0 \left(K_{tot}^H \frac{H_{tot}}{IL_{AB}} \right)^2, \quad (5)$$

где $H_{tot} = \sqrt{H_x^2 + H_y^2}$.

H_{tot} – модуль полного вектора горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля (A/m) с декартовыми горизонтальными компонентами H_x и H_y и геометрическими коэффициентами:

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

$$K_y^H = \frac{2\pi \cdot r^3}{3 \cos^2\theta - 2}.$$

Кажущееся сопротивление по полному импедансному отношению напряженностей электри-

ческого и магнитного поля: $Z_{tot} = E_{tot} / H_{tot}$, определяется как:

$$\rho_{\omega tot}^Z = \frac{|Z_{tot}|^2}{\omega \mu_0} = 0.127 \frac{1}{f} \left(\frac{|E_{tot}|}{|H_{tot}|} \right)^2, \quad (7)$$

где: $Z_{tot} = E_{tot} / H_{tot}$ (Ом); $\omega = 2\pi f$; $f = 1/T$ – частота тока в источнике (Гц); T – период (с); E_{tot} – напряженность электрического поля в мВ/км и H_{tot} – напряженность магнитного поля в мА/км.

Данные АМТЗ представлены в виде значений эффективного кажущегося сопротивления, полученных по определителю матрицы импеданса:

$$\rho_T^{eff} = 0.127T |Z^{eff}|^2, \quad (8)$$

где $Z^{eff} = \sqrt{Z_{xy}Z_{yx} - Z_{xx}Z_{yy}}$.

Для определения амплитуды и фазы измеренного поля использовались длины измерительных линий и амплитудно-частотные и фазово-частотные характеристики датчиков и измерительных каналов станции. Далее выполнялся спектральный анализ, и оценивалась автокорреляционная спектральная плотность мощности для каждой компоненты поля в точке наблюдений и для силы тока в источнике. Кроме того, вычислялись взаимнокорреляционные спектральные плотности мощности для сопряженных и анти сопряженных пар измеренных компонент поля (9) [Семенов, 1985; Шевцов, 2017] для вычисления компонент тензора импеданса:

$$\begin{aligned} S_{xx}(\omega) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_{xx}(\tau) \exp[-i\omega\tau] d\tau, \\ R_{xx}(\tau) &= \int_{-\infty}^{\infty} S_{xx}(\omega) \exp(i\omega\tau) d\omega, \\ S_{xy}(\omega) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_{xy}(\tau) \exp[-i\omega\tau] d\tau, \\ R_{xy}(\tau) &= \int_{-\infty}^{\infty} S_{xy}(\omega) \exp(i\omega\tau) d\omega. \end{aligned} \quad (9)$$

При спектральном анализе использовался метод Уэлча со скользящим окном Блэкмана–Харриса на основе БПФ [Engelberg, 2007] с перекрытием до 25% для АМТЗ и до 75% для CSAMT.

Кривые кажущегося сопротивления CSAMT (ρ_{ω}) приведены на рис. 12 на примере двух точек зондирования, расположенных вдоль трассы на п. Туманный при относительно небольших удалениях от источника (12 и 22 км).

Кривые кажущегося сопротивления ρ_{ω} CSAMT на рис. 12 имеют вид, согласный с теоретическими расчетами [Вешев, 1980]. Значения ρ_{ω} , рассчитанные по полному электрическому полю ($\rho_{\omega} E_{tot}$), по полному магнитному полю ($\rho_{\omega} H_{tot}$) и по полно-

му входному импедансу ($\rho_{\omega} Z_{tot}$) совпадают между собой только на высоких частотах (сотни герц), в пределах волновой зоны на уровне значений $(1-2) \times 10^4$ Ом · м. Можно отметить, что результаты CSAMT в пределах волновой зоны согласуются с результатами зондирования на постоянном токе по абсолютным значениям кажущегося сопротивления.

На частотах ниже 50–200 Гц условия дальней зоны нарушаются. Проявляется это в том, что кривые кажущегося сопротивления по электрическому полю с понижением частоты выходят на постоянные значения, кривые зондирования по полному входному импедансу воздымаются вверх по шкале сопротивлений под углом порядка 45°, а кривые по полному магнитному полю, наоборот, приобретают нисходящий вид под углом – 45°. При этом, по мере увеличения разносов от 12 до 22 км, область выхода кривых ρ_{ω} в зону постоянного тока смещается в сторону более низких частот – от 200 Гц на разное 12 км до 50–70 Гц на разное 22 км.

Более сложный вид имеют кривые CSAMT на больших удалениях от источника. В качестве иллюстрации на рис. 13 и рис. 14 приведены результаты дипольного экваториального и осевого зондирования CSAMT от диполей AB2 и AB1, соответственно, совместно с АМТЗ в точке Ура-Губа на удалении 105 км от диполя AB2. Измерения выполнены станцией VMTU-10 с индукционными датчиками IMS-007 и с двумя взаимно-ортогональными симметричными приемными электрическими линиями М-0-N длиной 2×50 м. На рис. 13 приведены результаты CSAMT-зондирования с экваториальной установкой в поле диполя AB2 (кривые 1–3). Там же приведены результаты АМТ-зондирования (кривая 4) с теми же приемными датчиками станции VMTU-10 и с теми же линиями М-0-N.

В поведении кривых кажущегося сопротивления на рис. 13а можно отметить ряд важных особенностей. Кривая (2) кажущегося сопротивления CSAMT, рассчитанная по полному электрическому полю ($\rho_{\omega}^{E_{tot}}$), смещена параллельно вниз относительно кривой (1), рассчитанной по полному магнитному полю ($\rho_{\omega}^{H_{tot}}$), примерно в 2.9 раз на частоте волновой зоны $f_{B3} = 100$ Гц. Обозначим это смещение как $\delta_{HE} = \rho_{\omega}^{H_{tot}} / \rho_{\omega}^{E_{tot}}$. Кривая (3), рассчитанная по полному входному импедансу ($\rho_{\omega}^{H_{tot}}$), смещена также параллельно вниз относительно кривой по полному магнитному полю $\rho_{\omega}^{H_{tot}}$, но на величину $\delta_{HZ} = \delta_{HE}^2$, то есть в 8.4 раза. Отмеченные смещения строго согласуются с уравнениями (3)–(8), приведенными выше. Результаты обработки АМТЗ в той же точке Ура-Губа пока-

Таблица 1. Хронология глубинных геоэлектрических исследований на территории Мурманского блока

Годы	Методы	Основные результаты	Литературные ссылки
1972–1974	ВЭЗы с АВ до 16 км в районе СНЧ антенны “Зевс”	Установлен градиентный рост УЭС* до глубины 2–3 км	[Семенов, 1978; Яковлев, 1993]
1976–1990	ДЭЗ в поле МГД-источника Хибины на удалении до 350 км	Установлено высокое УЭС земной коры (10^5 – 10^6 Ом · м) до глубины 30–40 км	[Жамалетдинов, 1982, 1990; Велихов, 1989]
1978	МТЗ в диапазоне частот 1 – 10^{-3} Гц	Изучено УЭС литосферы до глубины 200–300 км, установлен ППС** на глубине 70–90 км	[Краснобаева, 1981; Дьяконов, 1982]
1982–1983	АМТ-МТЗ в диапазоне частот от 10^3 до 10^{-3} Гц	Установлены ППС на глубинах 10, 40 и 120 км	[Вагин, 1985; Ковтун, 1986, 2004]
1986	Частотное CSAMT зондирование на частотах 1 – 10^3 Гц	Установлено общее высокое сопротивление земной коры (10^4 – 10^5 Ом · м) и фиктивный ППС на “глубине” 10 км	[Жамалетдинов, 1991]
1990	Дистанционные зондирования в поле источника “Зевс”	Изучен электрический разрез коры на профиле Кола-Серебрянка	[Жамалетдинов, 2015]
2018	Эксперимент “Мурман-2018” ДЗ, CSAMT и АМТ зондирования	Установлена градиентно-ступенчатая трехслойная модель типа “А” до глубины 20–30 км и “граница непроницаемости” на глубине 10–15 км	[Жамалетдинов, 2019]

*УЭС – удельное электрическое сопротивление;

**ППС – промежуточный проводящий слой.

Расшифровка аббревиатуры остальных обозначений дана в тексте статьи.

зывают, что кривая кажущегося сопротивления 4 на рис. 13а, рассчитанная по эффективному входному импедансу ($\rho_T^{Z_{\text{эф}}}$), имеет аномально низкое значение 10^4 Ом · м на частоте 100 Гц и близко совпадает (в пределах погрешности) с кривой CSAMT $\rho_{\omega}^{H_{\text{от}}}$, рассчитанной по полному входному импедансу в поле контролируемого источника. Учитывая общую физическую природу кривых (3) и (4) в пределах волновой зоны, можно заключить, что обнаруженные особенности кривых (2–4) на рис. 13 являются результатом статического искажения, которое можно количественно учесть путем параллельного смещения кривой (2) на величину δ_{HE} и кривых (3–4) на величину $\delta_{\text{HЗ}}$, то есть в 2.9 и 8.4 раза, соответственно. Принятая процедура количественного учета статических искажений обосновывается тем, что кажущееся сопротивление $\rho_{\omega}^{H_{\text{от}}}$ определяется по измерениям напряженности магнитного поля с помощью датчиков, не имеющих гальванической связи с землей (уравнения (5), (6)). Это, в свою очередь, означает, что результаты нормировки по полному магнитному полю CSAMT, выполняемой с уче-

том геометрических параметров установки и параметров тока, отражают истинное сопротивление верхней толщи земной коры в условиях одномерного разреза и в пределах действия квазистационарной волновой зоны. Под “квазистационарной волновой зоной” понимается относительно узкий частотный диапазон, ограниченный по частоте сверху и снизу. Снизу, со стороны низких частот (в зоне постоянного тока) он ограничен условием $k_1 r \ll 1$, где k_1 – волновое число в земле. Со стороны высоких частот, где начинают влиять токи смещения, квазистационарная волновая зона ограничена условием $k_0 r \ll 1$, где k_0 – волновое число в воздухе [Гасаненко, 1958; Shevtsov, 2019].

Учитывая отмеченные особенности, на рис. 13б приведены исправленные за статическое смещение кривые кажущегося сопротивления CSAMT (2, 3) и АМТЗ (4). Можно видеть, что после параллельного смещения по оси сопротивления кривые (2–4) практически сошлись между собой и с кривой (1) в пределах погрешности наблюдений, которая для АМТЗ достигает 0.5 порядка.

Аналогичные по виду параллельные смещения кривых кажущегося сопротивления кривых

CSAMT наблюдаются и в результатах осевого зондирования в точке Ура-Губа, приведенных на рис. 14.

На кривых ρ_{ω} CSAMT на рис. 14а наблюдаются те же признаки проявления статического искажения, что и на рис. 13а. Исправленные за статическое смещение кривые CSAMT и АМТЗ приведены на рис. 14б. Можно видеть, что кривые CSAMT (1–3) на рис. 14б практически слились между собой, тогда как кривая АМТЗ (4) смещена от них на 0.5 порядка вниз. Можно отметить также, что кривые осевого CSAMT (1–3) на рис. 14б характеризуются примерно на 0.5 порядка более высокими значениями кажущегося сопротивления в сравнении с экваториальным CSAMT на рис. 13б. Кроме того, можно отметить, что на осевой установке на рис. 14, в сравнении с экваториальной на рис. 13, наблюдаются более крутые восходящие ветви кривых кажущегося сопротивления по электрическому и магнитному полю на частотах выше 200 Гц. Такое поведение кривых ρ_{ω} , обусловленное влиянием токов смещения находится в согласии с общей теорией распространения электромагнитного поля заземленной электрической линии [Гасаненко, 1958; Bernstein, 1974; Вешев, 1980; Шевцов, 2001]. В области низких частот (ниже 10 Гц) на кривых ρ_{ω} осевого зондирования CSAMT четко проявлены признаки выхода их в ближнюю зону, отмеченные выше на рис. 12. Это проявляется в резком воздымании кривой $\rho_{\omega}^{Z_{tot}}$ по полному входному импедансу и в резко нисходящем виде кривой $\rho_{\omega}^{H_{tot}}$ по полному магнитному полю.

В целом результаты наблюдений CSAMT в точке Ура-Губа подтверждают резко восходящий вид кривой зондирования с увеличением разносов свыше 30–40 км, отмеченный по данным дистанционного зондирования в предыдущем разделе на рис. 9 и рис. 10.

4. ДИСКУССИЯ (ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ)

По результатам эксперимента “Мурман-2018” в верхней части земной коры Мурманского блока установлена трехслойная модель электрического разреза типа “А” с градиентно-ступенчатым увеличением удельного электрического сопротивления с глубиной. В пределах верхнего слоя сопротивление градиентно (постепенно) увеличивается с глубиной от 1–2 кОм · м вблизи дневной поверхности до 10–20 кОм · м на глубине 2–3 км в связи с уменьшением пористости и влажности горных пород. Средний слой – в интервале глубин от 2–3 км до 10–15 км – представляет собой зону компакций и имеет среднее сопротивление $(1–2) \times 10^4$ Ом · м. На дневной поверхности он фиксируется в диапазоне разносов от 2–3 до 30–

40 км между источником и приемником и характеризуется резкими перепадами кажущегося сопротивления ρ_k от 5×10^3 до 5×10^4 Ом · м на фоне среднего значения 2×10^4 Ом · м. Резкие перепады ρ_k создаются зонами трещиноватости, крутыми у дневной поверхности и пологими на глубине, так называемыми листрическими разломами [Давиденко, 1975; Горяинов, 1995]. Предполагается, что их влиянием вызвано существование промежуточного проводящего слоя дилатантно-диффузионной природы проводимости (ДД-слоя) с сопротивлением порядка 1 кОм · м в интервале глубин от 3–5 до 7–10 км [Николаевский, 1996; Жамалетдинов, 2019].

На глубине 10–15 км находится граница резкого возрастания сопротивления от 2×10^4 до $10^5–10^6$ Ом · м на кровле нижнего плохо проводящего слоя, граница “непроницаемости” для постоянного тока. Эта область интерпретируется как граница перехода горных пород из хрупкого в квазипластичное состояние (Brittle-Ductile Transition Zone, BDT). Вывод этот является дискуссионным, поскольку, согласно многим реологическим оценкам, граница BDT находится много глубже, возможно даже на уровне границы Мохо [Николаевский, 1986; Глазнев, 2003]. Решение этой дискуссионной темы заслуживает специального рассмотрения. Тем не менее, можно вынести на дискуссию вывод о том, что результаты эксперимента “Мурман-2018” позволили впервые обнаружить и количественно оценить по данным геоэлектрики положение границы между хрупким и пластичным состояниями вещества земной коры (границы BDT), определявшееся ранее только качественно по реологическим расчетам и петрофизическим (лабораторным) данным [Николаевский, 1996; Ronalli, 1997; Глазнев, 2003; Moisio, 2005; 2006]. В настоящей работе граница эта впервые получила количественную оценку по данным геоэлектрики в виде области резкого увеличения удельного сопротивления на глубине порядка 10–15 км (граница “непроницаемости” для гальванических токов). Для получения более надежных сведений о параметрах границы “непроницаемости” (границы BDT) необходимо выполнение дополнительных исследований в разных геотектонических блоках Фенноскандинавского щита путем проведения глубинных дистанционных и частотных зондирований повышенной точности в поле контролируемых источников и путем более полного решения обратной задачи с привлечением методов численного двухмерного и трехмерного моделирования.

Результаты обзора и критического анализа предыдущих геоэлектрических исследований в свете новых данных эксперимента “Мурман-2018” позволяют вынести следующие положения на дискуссию:

1. Выполнена повторная интерпретация материалов глубинных дистанционных зондирований 90-х годов прошлого века, выполненных с МГД-генератором “Хибины”, с СНЧ-антенной “Зевс” и методом ВЭЗ. Поводом для повторной интерпретации прежних данных послужил факт их качественного совпадения с результатами дистанционного зондирования в эксперименте “Мурман-2018”. В обоих пунктах зондирования, расположенных на Мурманском блоке на удалении 30–40 км между собой, получены необычного вида градиентно-ступенчатые кривые кажущегося сопротивления. Путем осреднения выполнен учет влияния многочисленных трещин и разломов, наблюдаемых в диапазоне разносов от 5–10 до 30–40 км, и выполнено решение одномерной обратной задачи методом подбора совместно с данными эксперимента “Мурман-2018”. Их удовлетворительное согласие позволяет с большим доверием воспринимать описанную в начале дискуссии трехслойную градиентно-ступенчатую модель строения верхней толщи земной коры.

2. По результатам дистанционных и АМТ-зондирований в эксперименте “Мурман-2018” с большой степенью надежности установлено, что на территории Мурманского блока не существует промежуточного проводящего слоя на глубине 10 км с продольной проводимостью в десятки сименсов, обнаруженного ранее по магнитотеллурическим данным. Расхождения в полученных результатах объясняются тем, что интерпретация МТ данных ранее была выполнена по минимальным кривым МТЗ для продольной Е-поляризации, обладающей повышенной чувствительностью к обнаружению фиктивных проводящих слоев на глубине [Бердичевский, 1992]. Переход к максимальной (или эффективной) кривой МТЗ позволяет устранить различия в результатах зондирования с естественными и контролируруемыми источниками.

3. В ходе эксперимента “Мурман-2018” не удалось подтвердить наличие отмеченного по данным частотного зондирования (ЧЗ) резкого понижения кажущегося электрического сопротивления до $10^3 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ в районе Чудзьявского разлома. Неудача может быть объяснена либо малой мощностью разлома (меньшей шага зондирования-профилирования, равного 5 км), либо явлением артефакта, приведшего к обнаружению фиктивного промежуточного проводящего слоя на глубине 10 км в результатах ЧЗ, опубликованных в работе [Жамалетдинов, 1991].

6. ВЫВОДЫ

1. Методические результаты:

1.1. Впервые на территории Мурманского блока выполнен эксперимент “Мурман-2018” по ди-

станционному глубинному электромагнитному зондированию с линейным шагом изменения разносов по трем лучам на удалениях до 56 км от источника;

1.2. Разработан передвижной генераторно-измерительный комплекс и выполнены частотные электромагнитные зондирования в поле контролируемого источника на удалениях до 105 км между передатчиком и приемником;

1.3. Оптимизирована методика обработки результатов дистанционных зондирований на постоянном (импульсном) токе путем спектральных преобразований и на основе прямого накопления периодических сигналов;

1.4. Разработана оригинальная методика количественного учета статических искажений CSAMT и АМТЗ путем параллельного смещения кривых кажущегося сопротивления, рассчитанных по полному электрическому полю и по полному входному импедансу CSAMT, а также по эффективному импедансу АМТЗ, вдоль шкалы сопротивлений до их совпадения с кривой кажущегося сопротивления, рассчитанной по полному горизонтальному магнитному полю в пределах действия квазистационарной волновой зоны.

2. Геолого-геофизические результаты:

2.1. Установлена трехслойная модель типа “А” строения верхней толщи кристаллической земной коры на территории Мурманского блока с градиентно-ступенчатым увеличением удельного электрического сопротивления горных пород до глубины 20–30 км.

2.2. Доказано отсутствие промежуточных проводящих слоев и региональных проводящих разломов с сопротивлением $10^2 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ и ниже в архейских комплексах земной коры Кольского полуострова.

2.3. Установлена новая геофизическая граница в континентальной земной коре на глубине 10–15 км, в виде области резкого увеличения удельного электрического сопротивления с $2 \times 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ до 10^5 – $10^6 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ (граница “непроницаемости” для постоянного тока);

2.4. Вынесена гипотеза о том, что граница “непроницаемости” на глубине 10–15 км может знаменовать собой переходную зону между верхней, хрупкой частью земной коры (brittle zone) и нижней, пластичной частью (ductile zone).

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 18-05-00528, а также в рамках госзадания Министерства образования и науки РФ – тема ГИ КНЦ РАН № 0226-2019-0052 и тема ЦЭС КНЦ РАН № 0226-2019-0067.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны В.В. Колесникову за помощь в топографической привязке материалов. Авторы выражают особую признательность двум анонимным рецензентам, чьи высокопрофессиональные замечания способствовали существенному улучшению рукописи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аскеров Э.Н., Багданкис Н.И., Багдасарова Н.Ю., Борисоглебский В.С., Букреев В.С., Жукаев Ю.В., Лисин А.С., Ковальчук Н.В., Колесник В.Е., Князев В.Н., Корневский Л.Н., Одицов В.И., Перунов Б.С., Усеинов С.З. Цифровая автоматическая измерительная станция ЦАИС // Геофизическая аппаратура. 1989. № 91. С. 3–12.
- Баранник М.Б., Данилин А.Н., Ефимов Б.В., Колобов, П.И. Прокопчук, В.Н. Селиванов, А.Н. Шевцов, Ю.А. Копытенко, Жамалетдинов А.А. Высоковольтный силовой инвертор генератора “Энергия-2” для электромагнитных зондирований и мониторинга очаговых зон землетрясений // Сейсмические приборы. 2009. Т. 45. № 2. С. 5–23.
- Баранник М.Б. Методика эксперимента “Мурман-2018” // Наука и технологические разработки. 2019. Т. 98. № 4. С. 50–56. [Тематический выпуск “Методические разработки для электромагнитных зондирований с управляемыми источниками”] <https://doi.org/10.21455/std2019.4-5>
- Батиева И.Д., Бельков И.В., Ветрин В.Р., Виноградов А.Н., Виноградова Г.В., Дубровский М.И. Гранитоидные формации докембрия северо-восточной части Балтийского щита. Л.: изд-во: Наука. 1978. 263 с.
- Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Магнитотеллурические зондирования горизонтально-однородных сред. М.: Недра. 1992. 250 с.
- Бобровников Л.З. Радиотехника и электроника. М.: Недра. 1974. 360 с.
- Вагин С.А., Варданянц И.А., Ковтун А.А. Коквина Е.Л., Моисеев О.Н., Савельев А.А., Успенский Н.И. “Береговой эффект” и сопротивление коры на Кольском полуострове // Геомagnetизм и аэрономия. М. 1985. Т. 25. № 3. С. 468–473.
- Ваньян Л.Л. Электромагнитные зондирования. М.: Научный мир. 1997. 218 с.
- Ваньян Л.Л., Хиндман Р.Д. О природе электропроводности консолидированной коры // Изв. РАН. Физика Земли. 1996. № 4. С. 5–11.
- Велихов Е.П., Жуков Б.П., Горбунов Г.И., Волков Ю.М., Жамалетдинов А.А., Лисин А.С., Токарев А.Д., Кукса Ю.И., Кириллов С.К., Полтанов А.Е. Глубинный электрический разрез фундамента по результатам МГД-зондирования на Кольском полуострове // ДАН СССР. 1984. Т. 274. № 5. С. 1061–1064.
- Вешев А.В. Электропрофилирование на постоянном и переменном токе. Л.: Недра. 1980. 391 с.
- Гасаненко Л.Б. Нормальное поле вертикального гармонического низкочастотного магнитного диполя // Уч. зап. ЛГУ. 1958. № 249. Вып. 10. С. 15–36.
- Геоэлектрические исследования с мощным источником тока на Балтийском щите / Е.П. Велихов. М.: Наука. 1989. 272 с.
- Глазнев В.Н. Комплексные геофизические модели литосферы Фенноскандии. Апатиты: КАЭМ. 2003. 252 с.
- Горяинов П.М. Нелинейная тектоника. Апатиты: КНЦ РАН. 1995. 44 с.
- Давиденко И.В., Горяинов П.М. Тектоно-кессонный эффект в массивах горных пород и рудных месторождений – важное явление геодинамики // Докл. АН СССР. 1979. Т. 247. № 5. С. 1212–1215.
- Дьяконов Б.П., Улитин Р.В. Земные приливы и вариации физических характеристик горных пород // ДАН СССР. 1982. Т. 264. № 2. С. 322–325.
- Жамалетдинов А.А. Модель электропроводности литосферы по результатам исследований с контролируемыми источниками поля (Балтийский щит, Русская платформа). Л.: Наука. 1990. 159 с.
- Жамалетдинов А.А. Нормальный электрический разрез кристаллического фундамента и его геотермическая интерпретация по данным МГД-зондирования на Кольском полуострове. Глубинные электромагнитные зондирования с применением импульсных МГД-генераторов / ред. Е.П. Велихов. Апатиты: изд-во КФАН СССР. 1982. С. 35–46.
- Жамалетдинов А.А. Теория и методика глубинных электромагнитных зондирований с мощными контролируемыми источниками. (Опыт критического анализа). СПб.: изд-во СПбГУ. 2012. 163 с.
- Жамалетдинов А.А. Электропроводность земной коры в районе СНЧ-антенны “Зевс” по результатам зондирования на постоянном и переменном токе (Мурманский блок). Взаимодействие электромагнитных полей КНЧ-СНЧ диапазона с ионосферой и земной корой // Материалы I-го Всероссийского (с международным участием) научно-практического семинара / Е.П. Велихов. Апатиты. 2015. С. 65–74.
- Жамалетдинов А.А., Велихов Е.П., Шевцов А.Н., Скороходов А.А., Колобов В.В., Ивонин В.В., Колесников В.В. Эксперимент “Мурман-2018” по дистанционному зондированию с целью исследования границы “непроницаемости” на переходе между хрупким и пластичным состояниями кристаллической земной коры // Докл. РАН. 2019. Т. 486. № 3. С. 359–364.
- Жамалетдинов А.А., Велихов Е.П., Шевцов А.Н., Колобов В.В., Колесников В.Е., Скороходов А.А., Короткова Т.Г., Ивонин В.В., Рязанцев П.А., Бируля М.А. Эксперимент “Ковдор-2015” по изучению параметров слоя дилатантно-диффузионной природы проводимости в архейском кристаллическом основании Балтийского щита // Докл. РАН. 2017. Т. 474. № 4. С. 477–482.
- Жамалетдинов А.А., Токарев А.Д., Васильев А.Н., Виноградов Ю.А., Колодин Г.Н., Казанцев Н.П. Частотное электромагнитное зондирование на Мурманском блоке. Проблемы комплексной интерпретации геолого-геофизических данных / Н.В. Шаров и В.А. Глебовицкий. Л.: Наука. 1991. С. 94–97.
- Жамалетдинов А.А., Шевцов А.Н., Короткова Т.Г., Копытенко Ю.А., Исмаилов В.С., Петрищев М.С., Ефимов Б.В., Баранник М.Б., Колобов В.В., Прокопчук П.И., Смирнов М.Ю., Вагин С.А., Пертель М.И., Терещенко Е.Д., Васильев А.Н., Григорьев В.Ф., Гохберг М.Б., Трофим-

- чик В.И., Ямпольский Ю.М., Колосков А.В., Федоров А.В., Корья Т. Глубинные электромагнитные зондирования литосферы восточной части Балтийского (Фенноскандинавского) щита в поле мощных контролируемых источников и промышленных ЛЭП (эксперимент "FENICS") // Физика Земли. 2011. № 1. С. 4–26.
- Жамалетдинов А.А. О природе границы Конрада в свете результатов бурения Кольской сверхглубокой скважины и данных глубинной геоэлектрики // Докл. РАН. 2014. Т. 455. № 3. С. 332–336.
- Жданов М.С. Электроразведка. М.: Недра. 1986. 316 с.
- 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 / Н.В. Шаров. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН. 2004. С. 102–130.
- Ковтун А.А., Моисеев О.Н., Вагин С.А., Варданянц И.Л., Коквина Е.Л., Савельев А.А., Успенский Н.И. МТ- и АМТ-зондирования на Кольском полуострове и в Карелии. Глубинная электропроводность Балтийского щита / Ваньян Л.Л., Хьелт С.Э. Петрозаводск: изд-во: Карельск. фил. АН СССР. 1986. С. 34–48.
- Колобов В.В., Баранник М.Б., Ефимов М.Б., Жамалетдинов А.А., Шевцов А.Н., Копытенко Ю.А. Генератор "Энергия-4" для мониторинга сейсмоактивных зон и электромагнитного зондирования земной коры: Опыт применения в эксперименте "Ковдор-2015" // Сейсмические приборы. 2017. Т. 53. № 3. С. 55–73.
- Колобов В.В., Баранник М.Б., Ивонин В.В., Селиванов В.Н., Жамалетдинов А.А., Шевцов А.Н., Скороходов А.А. Опыт применения генератора "Энергия-4" для дистанционных и частотных электромагнитных зондирований в эксперименте "Мурман 2018". Труды Кольского научного центра РАН. 2018. № 17. С. 7–20. <https://doi.org/10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.8.7-20>
- Краев А.П., Семенов А.С., Тархов А.Г. Сверхглубокое электроразведание // Разведка недр. 1947. № 3. С. 40–41.
- Краснобаева А.Г., Дьяконов Б.П., Астафьев П.Ф., Баталова О.В., Вишнев В.С., Гаврилова И.Е., Журавлева Р.Б., Кириллов С.К. Строение северо-западной части Балтийского щита по магнитотеллурическим данным // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1981. № 6. С. 65–73.
- Лазарева Н.В. Применение магнитотеллурических методов в Печенгском районе. Вопросы разведочной геофизики. М.: Недра. 1964. С. 105–107.
- Митрофанов Ф.П. (Гл. ред.). Геологическая карта Кольского региона в м-бе 1 : 500000. Апатиты. 1996.
- Николаевский В.Н. Дилатансионная реология литосферы и волны тектонических напряжений. Основные проблемы сейсмотектоники. М.: Наука. 1986. С. 51–68.
- Рокитянский 1971. Глубинные магнитотеллурические зондирования при наличии искажений от горизонтальных неоднородностей. Геофизический сборник. Киев.: Наукова думка. Вып.43. 1971. С. 71–78.
- Семенов А.С., Жамалетдинов А.А. Глубинные электрические зондирования // Вестник ЛГУ. Сер. Геол. и геогр. 1981. № 18. Вып. 3. С. 5–11.
- Семенов В.Ю. Обработка данных магнитотеллурического зондирования. М.: Недра. 1985. 133 с.
- Семенов А.С. Природа электрической проводимости древнего кристаллического фундамента // Вестник ЛГУ. 1970. № 12. С. 19–26.
- Семенов А.С. Электрический разрез кристаллических пород древних щитов // Вопросы геофизики. Л.: изд-во ЛГУ. 1978. № 27. С. 108–113.
- Скороходов А.А., Колобов В.В. Дистанционное зондирование и обработка данных в режиме накопления (эксперимент "Мурман-2018"). (Тематический выпуск "Методические разработки для электромагнитных зондирований с управляемыми источниками") // Наука и технологические разработки. 2019. Т. 98. № 4. С. 43–49. <https://doi.org/10.21455/std2019.4-4>
- СНЧ радиопередающая установка "ЗЕВС" двойного назначения в научно-популярных изданиях, докладах и в воспоминаниях участников // Материалы I Всероссийского (с международным участием) научно-практического семинара / Под ред. Е.П. Велихова, Ю.Л. Войтеховского, А.А. Жамалетдинова. Апатиты: изд-во: ГИ КНЦ РАН. 2015. 83 с.
- Тихонов А.Н., Эненштейн Б.С., Скугаревская О.А., Никитина В.Н. Изучение внутреннего строения кристаллического фундамента электромагнитными методами // ДАН СССР. 1967. Т. 173. № 5. С. 1062–1064.
- Шевцов А.Н. Метод частотного зондирования при изучении электропроводности верхней части земной коры Балтийского щита. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. СПб.: СПбГУ. 2001. 21 с.
- Шевцов А.Н., Жамалетдинов А.А., Колобов В.В., Баранник М.Б. Частотное электромагнитное зондирование с промышленными ЛЭП на Карело-Кольском геотраверсе // Записки Горного института. 2017. Т. 224. С. 178–188.
- Шевцов А.Н. Обработка и интерпретация данных глубинного частотного зондирования в комплексе с данными АМТЗ в эксперименте "Мурман-2018" // Наука и технологические разработки. 2019. Т. 98. № 4. С. 19–33. [Тематический выпуск "Методические разработки для электромагнитных зондирований с управляемыми источниками"]. <https://doi.org/10.21455/std2019.4-2>
- Яковлев А.В. Электрический разрез верхней части кристаллического фундамента // Строение литосферы Балтийского щита. М.: НГК РАН. 1993. С. 76–78.
- Anderson W.L. Numerical integration of related Hankel Transformation of orders 0 and 1 by adaptive digital filtering // Geophysics. 1979. V. 44. P. 1287–1305.
- Bernstein S.L., Barrouz M., Evans D.E., Griffiths E.S., McNeil D.A., Nissen C.U., Reacher A., White D.P., Willyam D.K. Long Range Communication at Extremely Low Frequencies // Proc. IEEE. 1974. V. 62. № 3. P. 292–312.
- Blohm E.K., Worzyk P., Scriba H. Geoelectrical deep soundings in Southern Africa using the Cabora Bassa power line // J. Geophysics. 1977. № 43. P. 665–679.
- Engelberg S. Random signals and noise: a mathematical introduction. Boca Raton // CRC Press. 2007. 216 p.
- Jones A. Imaging and observing the electrical Moho // Tectonophysics. 2013. № 609. P. 423–436.

- Keller G.V., Anderson L.G., Pritchard Y.I.* Geological survey investigation of the crust and upper mantle // *Geophysics*. 1966. № 6. P. 1078–1087.
- 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.
- Moisio K., Kaikkonen P.* Three-dimensional numerical thermal and rheological modelling in the central Fennoscandian Shield // *J. Geodynamics*. 2006. V. 42. № 4–5. P. 95–114.
- Moisio K.* Numerical lithospheric modelling rheology stress and deformation in the Central Fennoscandian Shield. Acad Dissert. University of Oulu. 2005. 39 p.
- Ranalli G.* Rheology and deep tectonics // *Annali di Geofisica* 1997. V. XL (3). P. 671–680.
- Samson J.C.* Deep resistivity measurements in the Fraser Valley, British Columbia // *Canadian Journal of Earth Sciences*. 1969. V. 6. № 5. P. 1129–1136.
- Shevtsov A.N.* Joint Interpretation of Magnetotelluric and CSAMT Data on the Kola Peninsula (Kovdor Area) / D. Nurgaliev, N. Khairullina (eds.). *Practical and Theoretical Aspects of Geological Interpretation of Gravitational, Magnetic and Electric Fields*. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences, Springer, Cham. 2019. P. 23–30. https://doi.org/10.1007/978-3-319-97670-9_3
- Vanyan L.L., Tezkan B., Palshin N.* Low electrical resistivity and seismic velocity at the base of the upper crust as indicator of rheologically weak layer // *Surveys in Geophysics* 2001. V. 22. P. 131–154.
- Vanyan L.L., Pavlenkova N.I.* Low Velocity and Low Electrical Resistivity Layer at the Base of the Upper Crust under the Baltic Shield // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2002. V. 38. № 1. P. 33–42.
- Velikhov E.P., Zhamaletdinov A.A., Sobchakov L.A., Veshev A.V., Saraev A.K., Tokarev A.D., Shevtsov A.N., Vasiliev A.V., Sonnikov A.G., Yakovlev A.V.* Experience with frequency electromagnetic sounding of the Earth's crust by using powerful ELF antenna // *Dokl. Akad. Nauk*. 1994. V. 338. № 1. P. 106–109.
- Zijl J.S.V., Joubert S.J.* A crustal geoelectrical model for the South African Precambrian granitic terrain based on deep Schlumberger soundings // *Geophysics*. 1975. V. 40. P. 657–663

Deep Electrical Conductivity of the Archaean Blocks of Kola Peninsula in the Light of the Results of Murman-2018 Experiment: A Review

A. A. Zhamaletdinov^{a, b, c, *}, E. P. Velikhov^d, A. N. Shevtsov^b, V. V. Kolobov^c, A. A. Skorokhodov^b, V. V. Ivonin^c, M. B. Barannik^c, and T. G. Korotkova^b

^a*St.-Petersburg Branch, Pushkov Institute of the Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences, St.-Petersburg, 199034 Russia*

^b*Geological Institute, Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences, Apatity, 184209 Russia*

^c*Northern Energetics Research Center, Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences, Apatity, 184209 Russia*

^d*National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, 123182 Russia*

*e-mail: abd.zham@mail.ru

In this paper, we review the results of the deep electromagnetic soundings on the Archaean blocks of the Kola Peninsula over the past 40–50 years, describe the main results of the Murman-2018 experiment, and present a critical analysis of the previous studies considering the new data. The first part of the paper addresses the results of the studies with the extremely low frequency (ELF) transmitter “Zeus” and a 40 MW MHD source “Khibiny”, frequency soundings with a 29 kW ERS-67 car generator, and the DC resistivity soundings with the vertical electrical sounding (VES) and magnetotelluric sounding (MTS) setups. The review focuses on the controversial issues of the previous results for their subsequent critical analysis based on the data from the Murman-2018 experiment. The second part of the paper describes the technique, procedure, and results of Murman-2018 experiment. The experiment included remote resistivity soundings (RS), controlled-source frequency soundings (Control Source AudioMagnetotellurics, CSAMT), and audio magnetotelluric soundings (AMT) using natural variations of the Earth's electromagnetic field. The RS and CSAMT soundings were carried out with axial and equatorial setup configurations using two mutually orthogonal current lines AB1 and AB2 with the lengths of 1.9 and 1.6 km, respectively. The key novelty of the RS measurements was the use of a linear step when changing the distance OO' between the source and the receiver (2.5 and 5 km) in the range of separations from 2.5 to 56 km. The linear step of changing the OO' distance was used for detecting and correcting the effect of lateral and static distortions on the results of the observations. The RS measurements were performed along three rays directed towards West, North, and East relative to the current lines AB1 and AB2. The CSAMT measurements were performed at a distance up to 105 km from the source in combination with AMTS. Based on the results of the Murman-2018 experiment, a three-layer model of the crustal structure with a gradient–stepwise increase in resistivity down to a depth of 20–30 km is established. The top layer is characterized by a gradual (gradient) increase in resistivity with depth from 10³ Ohm · m on the ground to 10⁴ Ohm · m at a depth of 1–2 km. The middle layer has a constant resistivity on the order of (1–2) × 10⁴ Ohm · m in the depth interval from 1–2 to 10 km and is identified as a “compaction” zone. It is detected at separations from 2–3 to 30–40 km. In this interval of separations, apparent resistivity on the sur-

face sharply varies from 5×10^3 to 5×10^4 Ohm \cdot m against the background average 2×10^4 Ohm \cdot m. The sharp variations are interpreted as the effect of profiling and associated with the influence of the fractured zones and faults intersected by the sounding profile. According to the geological estimates, the faults are steeply dipping at the surface and gently dipping at depth. The overall influence of the faults “stabilizes” the resistivity of the middle layer at a level of 2×10^4 Ohm \cdot m and leads to the emergence of the effect of intermediate conductive layer having a dilatancy-diffusion origin (DD-layer). The DD layer is observed in the depth interval from 3–5 to 7–10 km (at the base of the second layer), it has a longitudinal conductivity on the order of 1 S \cdot m and a resistivity within 5×10^3 – 10^4 Ohm \cdot m. The third (bottom) layer manifests itself by a sharp stepwise increase in electrical resistivity up to 10^5 – 10^6 Ohm \cdot m and higher. The top surface of this layer is located at a depth of 10–15 km and is conditionally interpreted as the “impenetrability boundary” for direct current. This boundary marks the Brittle–Ductile Transition Zone (BDT) of the rocks. The critical analysis of the results of the previous studies in the light of the new data obtained in the Murman-2018 experiment is conducted in the Discussion section.

Keywords: electrical conductivity, remote sounding, controlled source, frequency sounding, Murmansk block, brittleness, ductility, impenetrability boundary, intermediate conductive layer