

УДК 550.83.01

СОВМЕСТНАЯ ТРЕХМЕРНАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ТЕНЗОРНЫХ ДАННЫХ АМТЗ И РМТ-К В РАЙОНЕ, ПЕРСПЕКТИВНОМ НА ОБНАРУЖЕНИЕ КОРЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ АЛМАЗОВ (КАРЕЛЬСКИЙ ПЕРЕШЕЕК)

© 2023 г. А. А. Шлыков¹*, А. К. Сараев¹, Н. Ю. Бобров¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, г. Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: a.shlykov@spbu.ru

Поступила в редакцию 20.07.2022 г.

После доработки 10.02.2023 г.

Принята к публикации 15.02.2023 г.

Рассмотрены методика и результаты совместной интерпретации тензорных данных методов АМТЗ и РМТ-К на участке Карельского перешейка около пос. Яблоновка, перспективном на обнаружение коренных источников алмазов. Ранее по данным бурения здесь были выявлены флюидно-катакластические брекчии – флюидолиты, которые по современным геологическим представлениям могут быть коренными источниками алмазов. Участок расположен в прибортовой части Пашско-Ладожской рифтогенной зоны и характеризуется сложным трехмерным строением. В этих условиях при наличии системы разнонаправленных разломов совместная интерпретация тензорных данных АМТЗ и РМТ-К была выполнена в рамках 3D-модели среды. Для сокращения времени выполнения инверсии предложены подход и процедура трансформации данных РМТ-К, полученных в промежуточной зоне контролируемого источника, к кривым зондирования, соответствующим модели плоской волны. Трансформированные кривые кажущегося сопротивления РМТ-К также были использованы для коррекции статических смещений кривых АМТЗ. Совместная трехмерная инверсия была выполнена с учетом рельефа. Полученная модель хорошо согласуется с геологическими данными, полученными по скважинам, пробуренным ранее недалеко от участка работ. На геоэлектрических разрезах проявляются зоны относительно повышенного удельного сопротивления, которые могут быть связаны с флюидолитами. Разработанные подходы к совместной трехмерной интерпретации тензорных данных АМТЗ и РМТ-К и получаемые сведения о строении и свойствах пород фундамента, вмещающих флюидолиты породах и перекрывающих осадочных отложениях, могут быть использованы при проведении поисковых работ на алмазы на Карельском перешейке и прилегающих территориях.

Ключевые слова: Карельский перешеек, АМТЗ, РМТ-К, совместная трехмерная интерпретация тензорных данных, коренные источники алмазов, флюидолиты.

DOI: 10.31857/S0002333723050113, **EDN:** WACJHN

ВВЕДЕНИЕ

Северо-Запад России является перспективным регионом для поиска месторождений алмазов. Ранее здесь было обнаружено более 100 кимберлитовых тел, включая расположенные в Архангельской обл. промышленные месторождения алмазов им. М.В. Ломоносова и им. В.П. Гриба [Устинов и др., 2018]. Один из перспективных районов Северо-Запада для обнаружения коренных источников алмазов расположен в северо-восточной части Карельского перешейка (рис. 1). Данный район является прибортовой частью Пашско-Ладожской рифтогенной зоны и представляет собою систему грабенообразных впадин и горстовых поднятий, разделенных тектоническими нарушениями северо-восточного и северо-

западного направлений. По данным бурения около пос. Яблоновка выявлены флюидно-катакластические брекчии, в которых обнаружены минералы-спутники алмаза, характерные для месторождений Архангельской обл. [Афанасов, Николаев, 2003].

Учитывая перспективность рассматриваемого района на обнаружение коренных источников алмазов нами были выполнены площадные исследования методами аудиоманнитотеллурических зондирований (АМТЗ) и радиоманнитотеллурических зондирований с контролируемым источником (РМТ-К) на участке Карельского перешейка около пос. Яблоновка (рис. 1). Данный участок является закрытым, он характеризуется наличием перекрывающих осадочных отложений мощно-

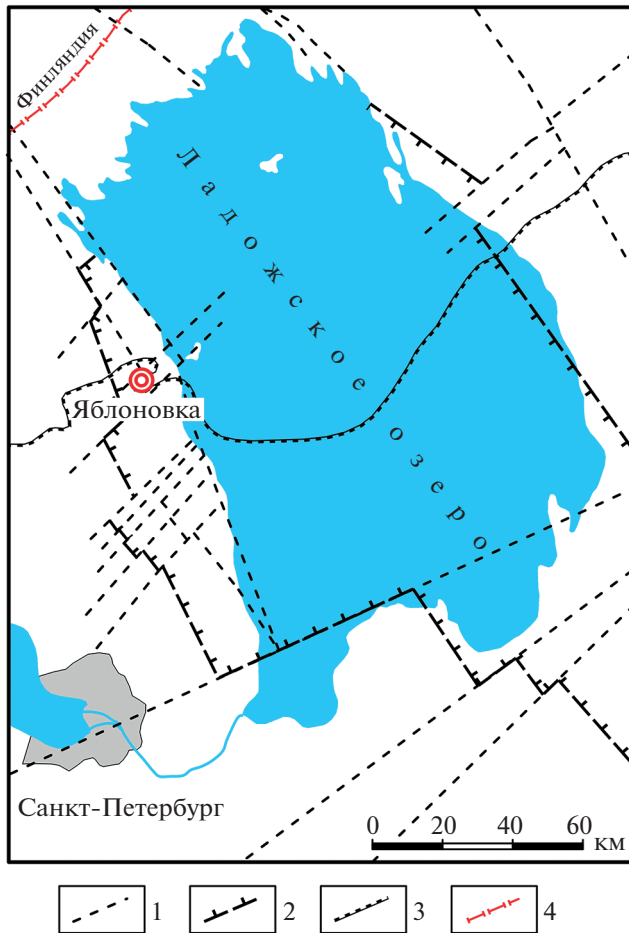


Рис. 1. Пашко-Ладожская рифтогенная зона и положение района работ [Афанасов, Николаев, 2003]: 1 – разломы; 2 – граница Пашко-Ладожской зоны; 3 – граница платформенных пород; 4 – граница с Финляндией.

стью несколько десятков метров. Поиски коренных месторождений алмазов на закрытых территориях геофизическими методами являются сложной задачей из-за слабой контрастности объектов поисков по отношению к вмещающим породам и значительной неоднородности перекрывающих пород.

К настоящему времени накоплен опыт поисков коренных месторождений алмазов электромагнитными методами в Якутской и Архангельской алмазоносных провинциях [Saraev et al., 2010; Stogny, Korotkov, 2010; и др.]. Наряду с выявлением аномалий коренных месторождений алмазов используются подходы, связанные с картированием косвенных признаков, связанных с особенностями вмещающих и перекрывающих пород [Saraev et al., 2022].

Целью работ была разработка подходов к совместной интерпретации данных АМТЗ и РМТ-К

в диапазоне глубин от первых метров до нескольких сотен метров для выявления аномалий, потенциально связанных с коренными месторождениями алмазов и их косвенными признаками, охватывая перекрывающие осадочные отложения, вмещающие карбонатно-терригенные породы и верхнюю часть кристаллического фундамента. При сложном геологическом строении участка, наличии системы разнонаправленных разломов и вертикальных смещений блоков фундамента интерпретацию необходимо было выполнить в рамках 3D-модели среды.

В настоящее время трехмерная инверсия данных магнитотеллурических зондирований (МТЗ) и АМТЗ стала достаточно широко распространенной практикой благодаря работам [Siripunvaraporn et al., 2004; Kelbert et al., 2014]. Достигнутый уровень компьютерных мощностей потребительского сегмента позволяет в течение приемлемого времени выполнить достаточное количество итераций при решении обратной задачи, по крайней мере для конечно-разностных сеток небольшого объема в 100–500 тыс. ячеек. Разработанные программы также были применены для трехмерной инверсии скалярных данных метода радиоманнитотеллурических (РМТ) зондирований [Newman et al., 2003] и тензорных данных РМТ [Bastani et al., 2012].

Трехмерная инверсия данных электромагнитных зондирований, полученных в промежуточной зоне контролируемого источника, является существенно более ресурсоемкой задачей и требует использования мощных компьютерных кластеров [Grayver et al., 2013], недоступных обычным пользователям. Насколько известно авторам, на сегодняшний день нет публикаций по трехмерной инверсии данных РМТ-К зондирований с учетом промежуточной зоны контролируемого источника. В методе РМТ-К зачастую приходится иметь дело с измерениями в промежуточной зоне источника из-за малой мощности используемого источника поля и недостаточно низкого удельного сопротивления пород, что приводит к увеличению размеров промежуточной зоны.

В настоящей статье рассмотрены результаты совместной трехмерной интерпретации данных АМТЗ и данных РМТ-К в промежуточной зоне контролируемого источника. Для сокращения времени инверсии предложен подход, основанный на трансформации тензорных данных РМТ-К и их преобразовании к виду, эквивалентному отклику плоской волны. Полученный геоэлектрический разрез отражает особенности строения кровли кристаллического фундамента, вмещающих и перекрывающих потенциальные коренные месторождения алмазов осадочных отложений.

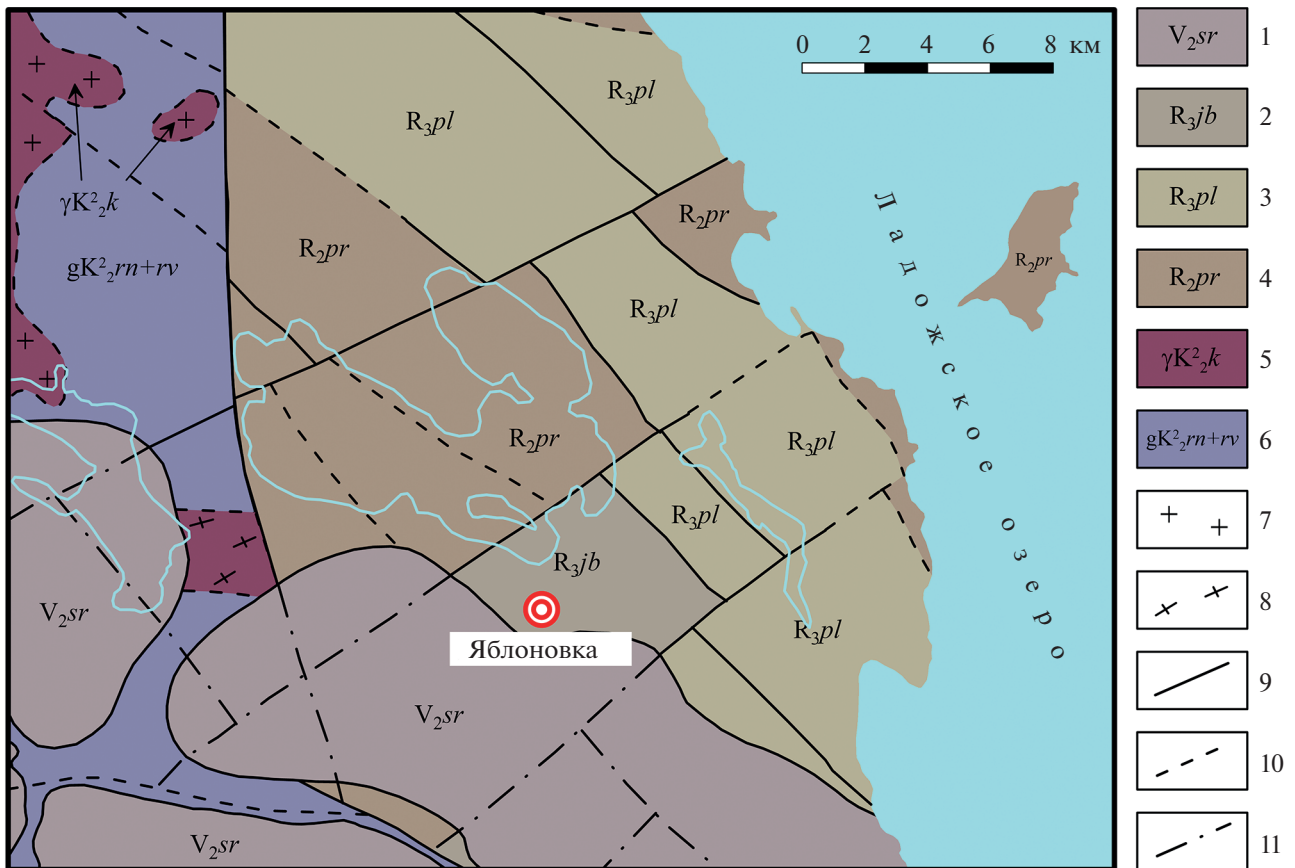


Рис. 2. Обзорная геологическая карта дочетвертичных пород северо-восточной части Карельского перешейка и положение участка работ [Афанасов, 2002]: 1 – старорусская свита – аргиллиты и песчаники венда; 2 – яблоновская свита – галечно-гравийно-песчаные породы рифея; 3 – приладожская свита – известняки и аргиллиты рифея; 4 – приозерская свита – метапесчаники рифея; 5 – кузнеченский гранитный комплекс; 6 – ринтальская и ровненская гнейсовые формации; 7 – граниты; 8 – граниты порфириобластические; 9 – достоверные разломы, выходящие на дневную поверхность; 10 – предполагаемые разломы, выходящие на дневную поверхность; 11 – достоверные разломы, скрытые под вышележащими образованиями.

ГЕОЛОГИЯ РАЙОНА РАБОТ

Участок работ находится в западной части Ладожского грабена (части Пашско-Ладожской рифтогенной зоны), ось которого проходит по акватории Ладожского озера. Геологический разрез северо-восточной части Карельского перешейка сложен карбонатно-терригенными породами рифея, аргиллитами и песчаниками венда. Выше по разрезу залегают четвертичные осадочные отложения мощностью несколько десятков метров. Кровля кристаллического фундамента, представленного гнейсами, расположена на глубинах 200–300 м. Тектонические нарушения, выявленные в районе работ по данным дешифрирования аэроснимков, сейсморазведки и электромагнитного профилирования методом переменного естественного электрического поля (ПЕЭП), ориентированы в основном в северо-западном и северо-восточном направлениях (рис. 2) [Афанасов, Николаев, 2003]. Наличие системы разнонаправ-

ленных разломов является одной из предпосылок, благоприятных для внедрения высокотемпературных глубинных флюидов.

По данным бурения четырех скважин около пос. Яблоновка (рис. 3а) были вскрыты карбонатно-терригенные отложения рифея, в которых наблюдались жилы с породами брекчиевой текстуры, названные авторами публикации [Афанасов, Николаев, 2003] флюидно-катакластическими брекчиями или флюидолитами. При этом выявленные тела флюидолитов локализованы в отложениях яблоновской и приладожской свит. При шлиховом анализе этих брекчий в них были выявлены минералы – спутники алмаза, характерные для месторождений Архангельской обл. По результатам выполненных исследований авторами указанной публикации была построена модель структуры с предполагаемым положением кимберлитовой трубки (рис. 3б). В этой модели флюидолиты расположены около кимберлитовой

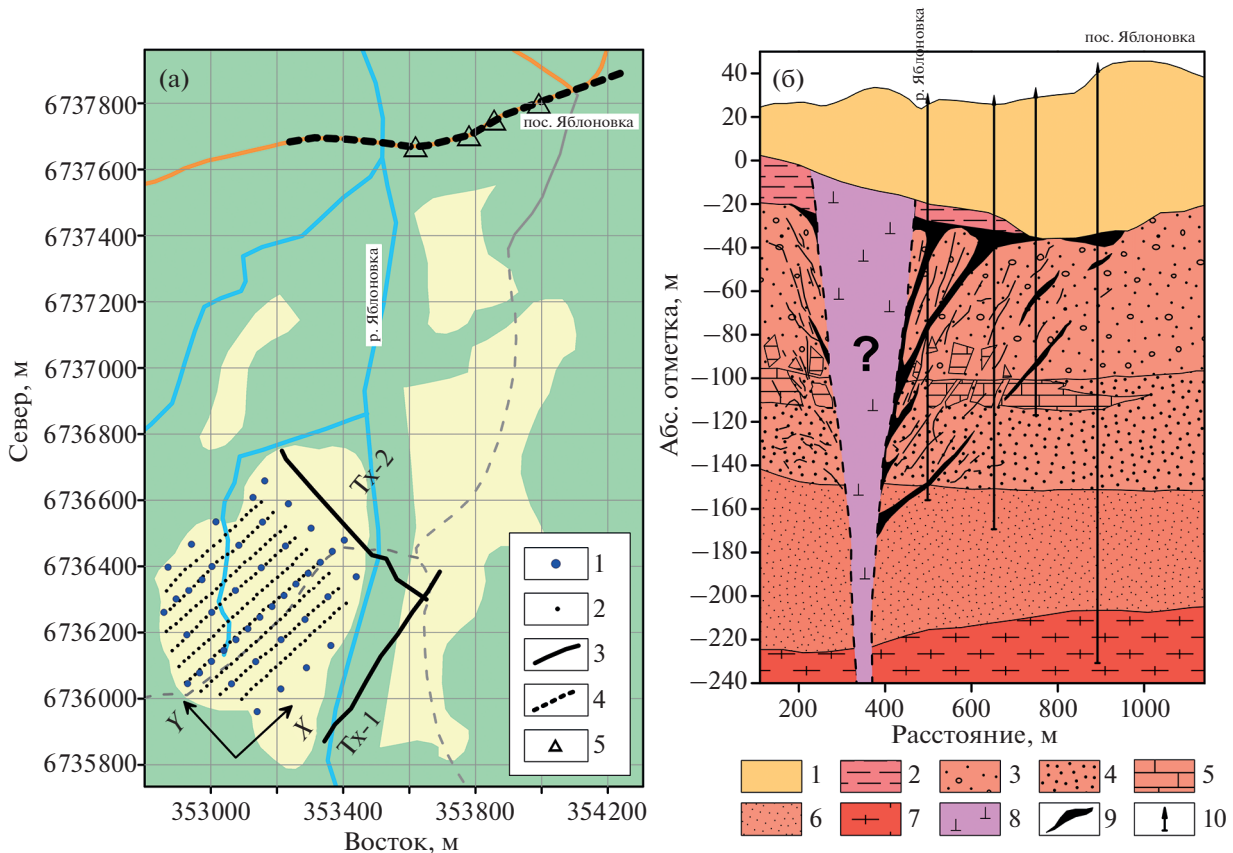


Рис. 3. Схема расположения участка работ и положения скважин (а) и разрез по данным бурения с предполагаемым положением кимберлитового тела (б); (а) – схема расположения генераторных линий РМТ-К и точек АМТЗ и РМТ-К: 1 – точки АМТЗ; 2 – точки РМТ-К; 3 – генераторные линии РМТ-К; 4 – линия разреза по данным бурения; 5 – скважины. Стрелками на схеме показано направление осей локальной системы координат; (б) – разрез по данным бурения [Афанасов, Николаев, 2003]: 1 – четвертичные отложения; 2 – старорусская свита – аргиллиты и песчаники венда; 3 – яблонювская свита – галечно-гравийно-песчаные породы рифея; 4 – приладожская свита – песчаники и алевролиты рифея; 5 – приладожская свита – известняки рифея; 6 – приозерская свита – метапесчаники рифея; 7 – ринтальская и ровненская гнейсовые формации; 8 – предполагаемая кимберлитовая трубка; 9 – флюидно-катаклизические брекчи; 10 – скважины.

трубки, образуя структуру “ветвистого дерева”. Подобные структуры характерны для кимберлитовых трубок Архангельской обл. [Харьков и др., 1998]. По данным каротажа сопротивлений (КС) с градиент-зондом А2.0М0.1N флюидолиты отмечаются повышенными значениями кажущегося сопротивления (150–250 Ом м) среди более проводящих (20–60 Ом м) отложений (данные Н.Н. Орлова).

По рассмотренным геологическим данным северо-восточная часть Карельского перешейка является перспективной для обнаружения коренных источников алмазов. Ряд признаков, характерных для Архангельской алмазоносной провинции, выявлен на рассматриваемой территории. Кроме того, в последнее время возрастает внимание к флюидолитам, как потенциальным коренным источникам алмазов. По современным геологическим представлениям [Афанасов и др., 2012] открытые

на севере Урала промышленные коренные месторождения алмазов относятся к флюидолитовому типу. До этого алмазы там добывались только из россыпей, а найденные в коренных отложениях алмазы считались палеороссыпными. Разработка подходов и методов выявления флюидолитов на рассматриваемой территории является актуальной задачей.

ИЗМЕРЕНИЯ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

При работах методом РМТ-К использовались генератор ГТС-1 с горизонтальным электрическим диполем (заземленным на концах проводом) и приемная аппаратура РМТ-5, позволяющая измерять две горизонтальные компоненты электрического поля (E_x , E_y) и три компоненты магнитного поля (H_x , H_y , H_z) в диапазоне частот 1–1000 кГц [Сараев и др., 2014]. Для получения

полного тензора импеданса применялись две взаимно перпендикулярные генераторные линии длиной 600–650 м каждая. Генераторная линия Тх-1 была ориентирована вдоль профилей или вдоль локальной оси X с географическим азимутом 48° , генераторная линия Тх-2 – вкост профилей или вдоль локальной оси Y (рис. 3а). Каждая генераторная линия подключалась к независимому генератору ГТС-1. При регистрации электромагнитных полей контролируемого источника регистратор и используемые датчики позволяли проводить измерения на более низких, чем рабочий диапазон, частотах до 500 Гц при выполнении калибровочных процедур.

Схема расположения точек зондирования приведена на рис. 3а. На каждой точке последовательно измерялся сигнал сначала от генератора Тх-1 на частотах 0,5, 5 и 50 кГц при выключенном генераторе Тх-2, затем измерения повторялись на тех же частотах при включенном генераторе Тх-2 и выключенном генераторе Тх-1. Так как форма тока генератора ГТС-1 представляет собой прямоугольный меандр, вместе с каждой основной частотой тока измерялись также нечетные субгармоники до 9-го порядкового номера. Например, для основной частоты 5 кГц измерялись субгармоники на частотах 15, 25, ..., 95 кГц. Измерения электрического поля выполнялись симметричными незаземленными (емкостными) линиями с геометрической длиной 20 м, что соответствует действующей длине 10 м [Вешев, 1980].

На этапе обработки данных временные ряды, записанные при одной и той же частоте тока, подаваемого в разные генераторные линии, объединялись в один временной ряд. Далее на каждой из субгармоник основной частоты выполнялось робастное оценивание тензора импеданса по трехкомпонентной схеме, аналогичной описанной в работе [Egbert, Booker, 1986]. Обработка данных проводилась в программе EMP (автор Шлыков А.А., www.csrmt.info). Расстояние между точками зондирования методом РМТ-К вдоль профиля составляло 20 м, расстояние между профилями – 40–50 м. Расстояние от точек зондирования до генераторных линий варьировало от 140 до 670 м.

При работах методом АМТЗ использовалась приемная аппаратура АКФ-4М, позволяющая измерять две горизонтальные компоненты электрического поля (E_x , E_y) и две горизонтальные компоненты магнитного поля (H_x , H_y) в диапазоне частот 0,1–1000 Гц [Сараев и др., 2011]. Измерения методом АМТЗ выполнялись с частотой дискретизации 3200 Гц в течение 10–20 мин на каждой точке зондирования. Учитывая, что глубина кровли фундамента на данном участке составляет первые сотни метров, а задачей работ

было изучение толщи перекрывающих пород и верхней части фундамента, при проведении работ методом АМТЗ диапазон частот составлял первые герцы – первые сотни герц. Это наиболее стабильный частотный диапазон при измерениях естественного электромагнитного поля Земли [Garcia, Jones, 2002], поэтому необходимости в применении удаленной базовой станции не было.

Точки АМТЗ были расположены по сетке 100×100 м за исключением центрального профиля, выполненного с шагом 50 м. Электрическое поле измерялось симметричными заземленными линиями с геометрической длиной 40 м. Обработка данных АМТЗ произведена также в программе EMP. Тензор импеданса оценивался независимо для каждой из частот логарифмически равномерной сетки с 16 точками на декаду частот в четырехкомпонентном варианте по алгоритму [Московская, 2007]. Этот алгоритм минимизирует влияние шумов как в электрических, так и в магнитных каналах с гарантией сопряженности получаемых оценок тензора импеданса и адмитанса.

В качестве примера приведем сводные кривые зондирования для точек, расположенных вдали и вблизи от генераторных линий (рис. 4). На максимальном удалении от генераторных линий кривые АМТЗ и РМТ-К хорошо согласуются между собой и сливаются в единую кривую. Исключения составляют две самые низкие частоты ($f = 0,5$ и $1,5$ кГц) на фазовых кривых РМТ-К, для которых не выполняется условие дальней зоны. На точке зондирования, расположенной вблизи генераторных линий, отчетливо наблюдается влияние промежуточной зоны в виде увеличения кажущегося сопротивления и уменьшения фазы импеданса кривой РМТ-К относительно уровня кривых АМТЗ. Это иллюстрирует необходимость учета промежуточной зоны источника и геометрии генераторных линий в процессе инверсии данных. По кривым АМТЗ на низких частотах отчетливо выделяется высокоомное основание геоэлектрического разреза, отвечающее кристаллическому фундаменту. Кривые РМТ-К характеризуются величинами кажущегося сопротивления в десятки, первые сотни Ом м.

АНАЛИЗ ДАННЫХ

Так как фаза импеданса практически свободна от влияния статических искажений [Бердичевский, Дмитриев, 2009], а также, в отличие от амплитуды импеданса (кажущегося сопротивления), является несмещенной оценкой [Семенов, 1980] начнем с анализа частотных срезов фазы основных компонент тензора импеданса. На рис. 5 приведены частотные срезы фазы основных ком-

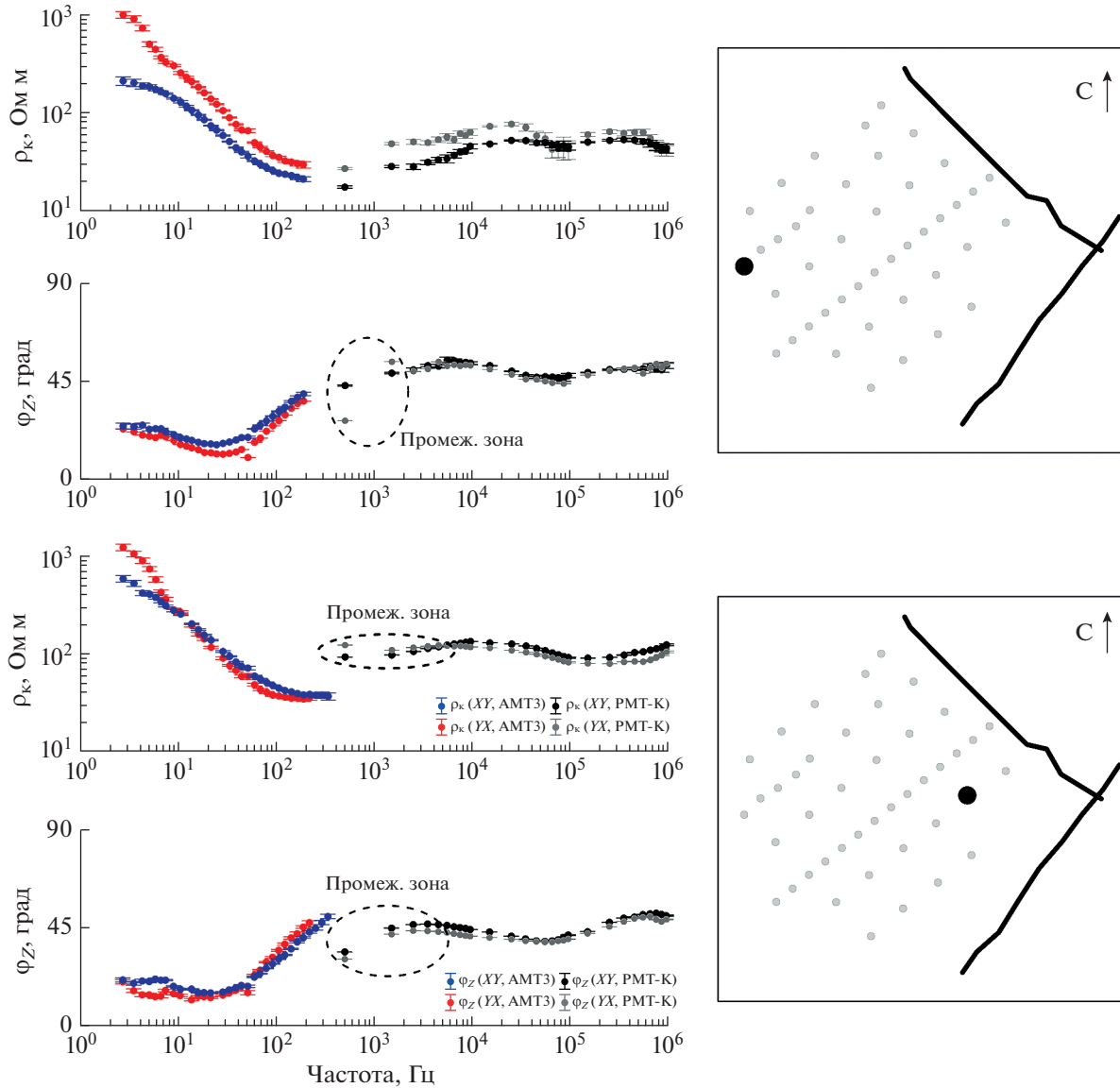


Рис. 4. Пример сводных кривых кажущегося сопротивления и фазы импеданса (данные АМТЗ и РМТ-К) для точек зондирования, расположенных вдали и вблизи от генераторных линий. Справа на схемах отмечены рассматриваемые точки зондирования. Компоненты XY соответствуют направлению приемной линии электрического поля вдоль оси X (вдоль профилей), а компоненты YX – вдоль оси Y (вкrest профилей).

понент тензора импеданса для частот 14 и 190 Гц (по данным АМТЗ) и 7.5, 75 и 750 кГц (по данным РМТ-К). На частоте 14 Гц фаза компоненты Z_{XY} в пределах всей исследованной площади практически остается постоянной (меняется в пределах 14° – 17°). Фаза компоненты Z_{YX} меняется в несколько более широких пределах 9° – 15° и на соответствующем срезе можно выделить сублинейную проводящую (повышенные значения фазы) зону северо-восточного направления, возможно отвечающую глубинному разлому. На частоте 190 Гц фаза компоненты Z_{XY} в пределах площади также меняется незначительно, а на срезе фазы

Z_{YX} наблюдается закономерное увеличение фазы в восточном направлении. Это может быть обусловлено плавным погружением кристаллического фундамента с запада на восток по направлению к Ладожскому грабену.

На частоте 7.5 кГц в данных РМТ-К на срезах фазы обоих основных компонент тензора импеданса в западной части участка отчетливо выделяется проводящая зона, ориентированная с севера на юг. На срезе фазы компоненты Z_{YX} наблюдается закономерное уменьшение фазы по направлению к генераторной линии Тх-2, соответствующее эффекту промежуточной зоны. На частоте

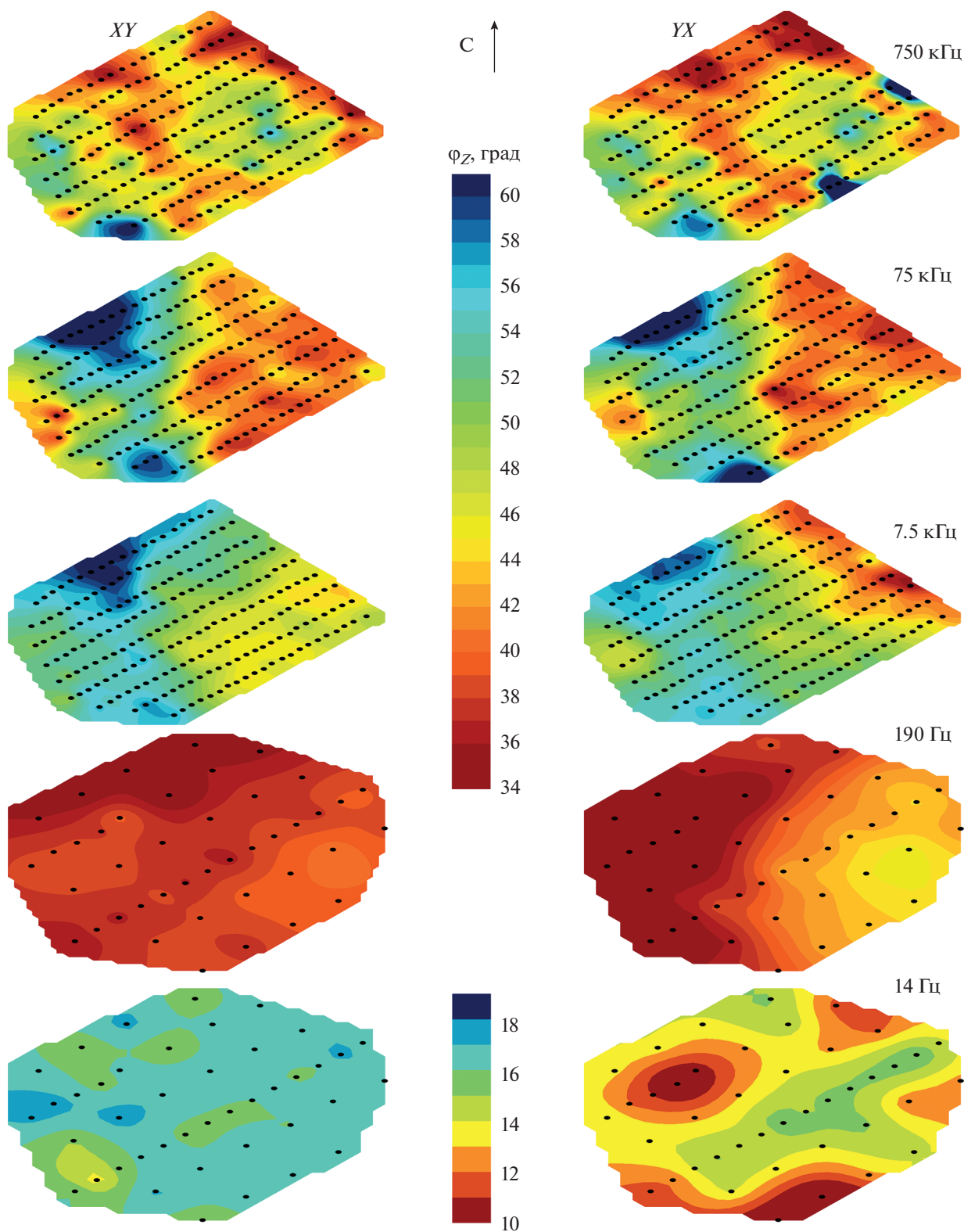


Рис. 5. Частотные срезы фазы главных компонент тензора импеданса на разных частотах. Срезы для частоты 14 Гц имеют независимую цветовую шкалу (показана внизу), ввиду малого диапазона изменения фазы импеданса по площади. Срезы на остальных частотах имеют одну цветовую шкалу (показана сверху). Черными точками показаны точки зондирования: для частот 14 и 190 Гц –АМТЗ, для частот 7.5, 75 и 750 кГц–РМТ-К.

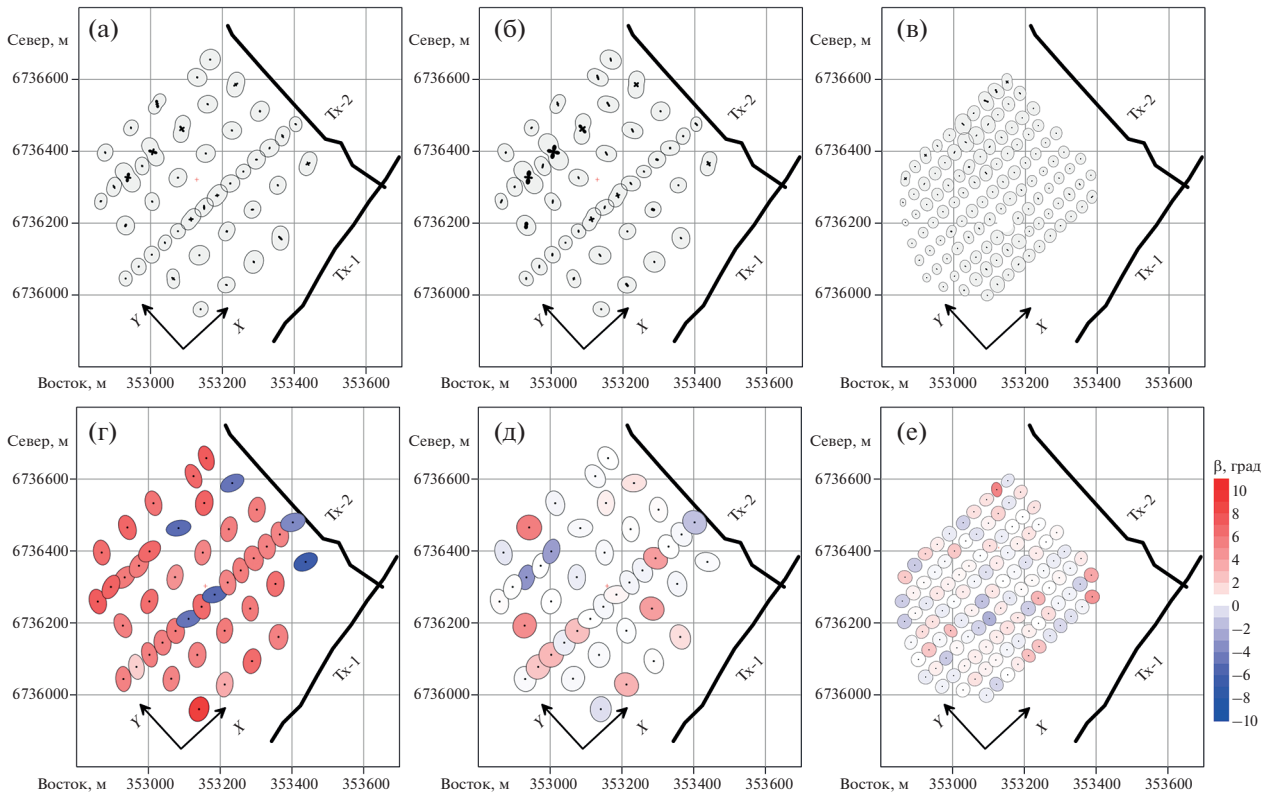


Рис. 6. Амплитудные полярные диаграммы на частотах 14 Гц (а); 190 Гц (б); 55 кГц (в); эллипсы фазового тензора на частотах 14 Гц (г); 190 Гц (д); 55 кГц (е).

75 кГц проводящая зона становится более контрастной и участок разделяется на два блока: более проводящим на востоке и менее проводящим — на западе. При этом отметим весьма схожий характер распределения фазы обеих компонент Z_{XY} и Z_{YX} по площади. На частоте 750 кГц отчетливо выделяются приповерхностные элементы разреза с повышенным удельным сопротивлением (низкие значения фазы). Это обусловлено большей горизонтальной неоднородностью самой верхней части разреза.

Для оценки размерности неоднородностей геоэлектрического разреза проанализируем амплитудные полярные диаграммы тензора импеданса и эллипсы фазового тензора (рис. 6). На низких частотах (14 Гц) фазовый тензор имеет отчетливо трехмерную структуру: максимальные и минимальные значения заметно отличаются и угол β имеет значительные величины в 5° – 8° , что указывает на несимметричность фазового тензора [Caldwell et al., 2004]. Полярные диаграммы тензора импеданса показывают менее выраженную трехмерность и более тяготеют к двумерному виду. Величины компонент на главной диагонали в большинстве случаев существенно меньше ан-

тидиагональных компонент [Бердичевский, Дмитриев, 2009].

На высокой частоте (55 кГц), начиная с которой все данные РМТ-К гарантированно удовлетворяют условию дальней зоны, амплитудные полярные диаграммы и эллипсы фазового тензора имеют преимущественно одномерный характер. Частотные срезы фазы импеданса на близких частотах отчетливо демонстрируют неоднородность участка по удельному сопротивлению. Это обусловлено тем, что масштаб неоднородности значительно превосходит характерную величину скин-слоя и при рассмотрении отдельных точек зондирования данные РМТ-К на высоких частотах имеют одномерную структуру, хотя при рассмотрении всего ансамбля точек зондирования трехмерность строения участка не вызывает сомнений. На средних частотах (190 Гц) отклик электромагнитного поля отражает некоторый промежуточный случай размерности геоэлектрического разреза.

Отметим, что совокупный анализ частотных срезов фазы импеданса и эллипсов фазового тензора на частотах АМТЗ позволяет сделать вывод о том, что трехмерность данных АМТЗ в основном обусловлена неоднородностью верхней части

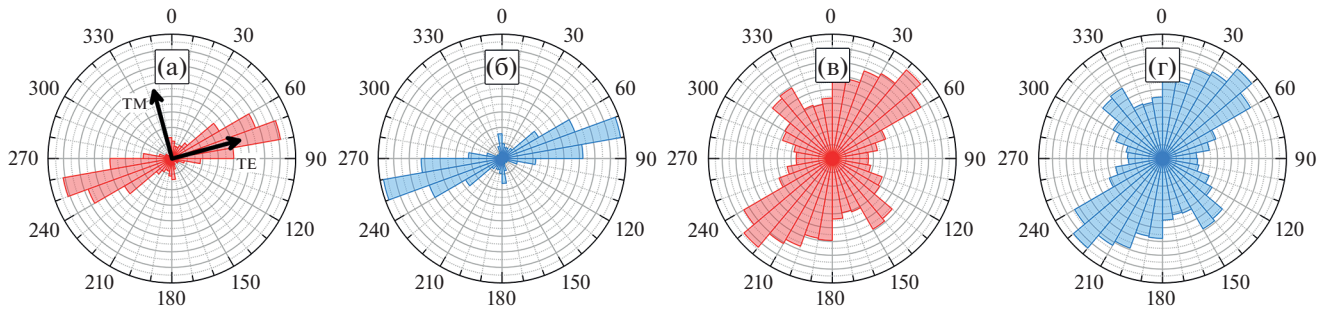


Рис. 7. Розы главных направлений тензора импеданса и фазового тензора по данным АМТЗ и РМТ-К: (а) – главные направления тензора импеданса по данным АМТЗ; (б) – главные направления фазового тензора по данным АМТЗ; (в) – главные направления тензора импеданса по данным РМТ-К без учета данных в промежуточной зоне источника; (г) – главные направления фазового тензора по данным РМТ-К без учета данных в промежуточной зоне источника.

разреза, а нижняя его часть имеет незначительную горизонтальную неоднородность. Это подтверждается малой изменчивостью фазы в плане на низких частотах. Трехмерность фазового тензора в данном случае обусловлена влиянием неоднородной верхней части разреза. Аналогичный эффект показан, например, в работе [Rase et al., 2022]. Анализ размерности данных АМТЗ, выполненный на основе инвариантов тензора импеданса [Martí et al., 2009] показывает, что доля данных с трехмерной структурой поля составляет 64%, двумерной – 32% и лишь 4% приходится на одномерную структуру отклика электромагнитного поля.

Для определения ориентировки региональных геоэлектрических структур и выбора соответствующих ТМ- и ТЕ-мод тензора импеданса проанализированы ансамбли главных направлений тензора импеданса [Weaver et al., 2000] и главных направлений фазового тензора [Caldwell et al., 2004], рассчитанные для каждой точки АМТЗ и для каждой частоты. Соответствующие розы главных направлений показаны на рис. 7. В случае данных АМТЗ главное направление или ось однородности геоэлектрического разреза, соответствует азимуту 60°–80°.

По данным РМТ-К, соответствующим условию дальней зоны, выбор главного направления не так очевиден. Это подтверждает вывод о преимущественной одномерности отклика электромагнитного поля на высоких частотах, сделанный на основании анализа амплитудных полярных диаграмм и эллипсов фазового тензора. Отметим, что розы главных направлений, построенные по тензору импеданса и фазовому тензору, весьма близки. Это говорит о небольшом влиянии эффекта гальванических искажений. На основании анализа главных направлений за ТЕ-моду прием измерения вдоль профилей, а за ТМ-моду – измерения вкрест профилей.

Важным вопросом при обработке данных АМТЗ является проверка полученных кривых кажущегося сопротивления на предмет наличия или отсутствия влияния статических смещений и проведение коррекции этих смещений. Известны и широко применяются на практике подходы к коррекции статических смещений, основанные на использовании данных зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ) [Яковлев и др., 2021]. Здесь мы предлагаем новый подход, основанный на использовании кривых кажущегося сопротивления, полученных по данным РМТ-К. Опыт наших работ [Saraev et al., 2022] показывает, что влияние статических смещений обычно мало сказывается в радиочастотном диапазоне (десятки-сотни килогерц). К таким же выводам пришли и зарубежные исследователи, выполняющие зондирования на высоких частотах. В монографии [Roy, 2020] говорится о том, что статических смещений в диапазоне частот 100 кГц–1 МГц не наблюдается. Это также подтверждается материалами монографии [Бердичевский, Дмитриев, 2009], в которой отмечено, что на данные, полученные на высоких частотах при минимальном отношении толщины скин-слоя и размера неоднородности, статические смещения влияют незначительно.

Кроме того, использование незаземленных (емкостных) приемных электрических линий в методе РМТ-К и их интегрирующее действие дополнительно сглаживает влияние мелких приповерхностных неоднородностей. Отметим, что при работах методами АМТЗ и РМТ-К использовались электрические приемные линии разной действующей длины. При использовании заземленных линий для АМТЗ геометрическая и действующая длина равны 40 м. В аппаратуре метода РМТ-К применялись незаземленные (емкостные) приемные линии с геометрической длиной 20 м (действующей длиной 10 м). Как отмечено в

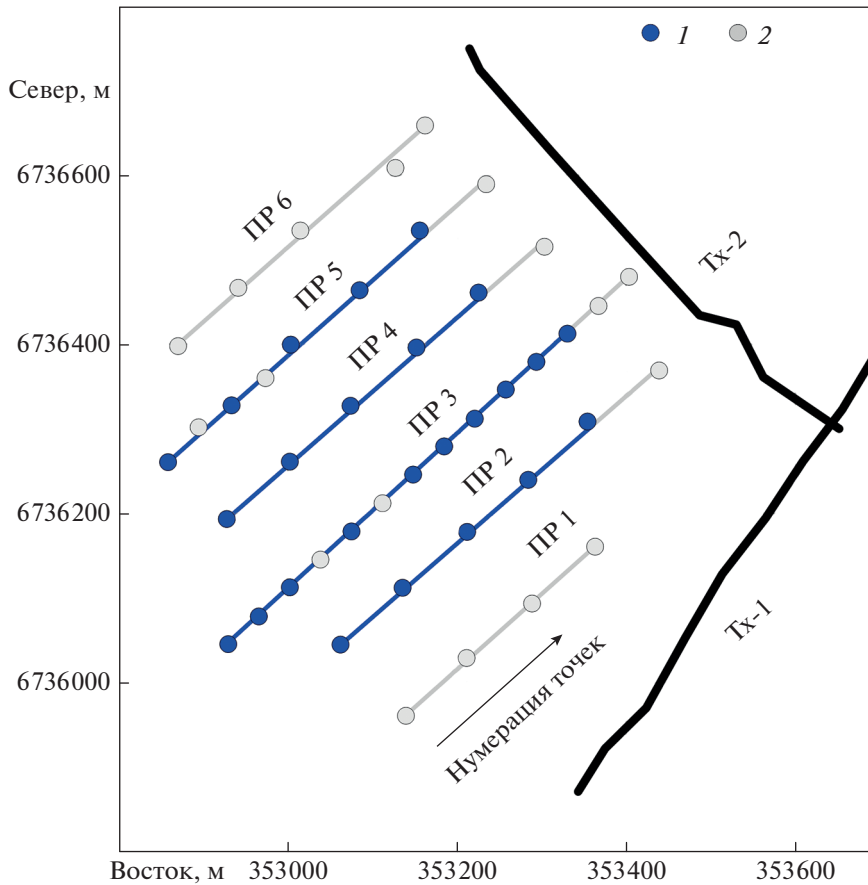


Рис. 8. Схема точек АМТЗ, положение которых с точностью 5 м попадает на положение точек РМТ-К: 1 – точки АМТЗ, имеющие близкую пару РМТ-К; 2 – остальные точки АМТЗ.

работах [Вешев, 1980; Зорин, Яковлев, 2021] действующая длина незаземленной линии равна половине ее геометрической длины. Разница в длинах приемных линий не препятствует использованию кривых кажущегося сопротивления метода РМТ-К для коррекции кривых метода АМТЗ. В этом случае главным фактором является частотный диапазон (глубина исследования разреза) и соотношение размера неоднородности и толщины скин-слоя.

Правомерность поиска новых подходов к коррекции статических смещений подтверждается материалами монографии [Бердичевский, Дмитриев, 2009, с. 486], в которой говорится: “Успех магнитотеллурического зондирования существенно зависит от коррекции смещенных ветвей кривых кажущегося сопротивления. Универсального рецепта не существует, поэтому лучший результат можно получить, комбинируя различные способы коррекции”. Использование наиболее распространенного подхода к коррекции статических смещений по данным ЗСБ не всегда дает положительный результат. Как отме-

чено в работах [Яковлев и др., 2021; Yakovlev, Yakovlev, 2022] возможности этого подхода ограничены при неоднородном строении верхней части разреза, крутом рельефе и проявлении процессов вызванной поляризации.

Мы использовали следующий подход к коррекции статических смещений. Были выбраны пары близко расположенных точек АМТЗ и РМТ-К, местоположение которых совпадает с точностью 5 м. Такие точки показаны на рис. 8 синим цветом. Для каждой из основных компонент тензора импеданса данных РМТ-К была выполнена одномерная инверсия с учетом промежуточной зоны и геометрии генераторных линий [Шлыков, Сараев, 2015] с точностью подбора (RMS) 1–2% по кажущемуся сопротивлению и менее 1°–2° по фазе. Для полученных моделей были вычислены кривые зондирования, соответствующие модели плоской волны, и уровень полученных кривых кажущегося сопротивления принимался за опорный для кривых кажущегося сопротивления АМТЗ. Множитель статического смещения, полученный для компоненты Z_{XY} ,

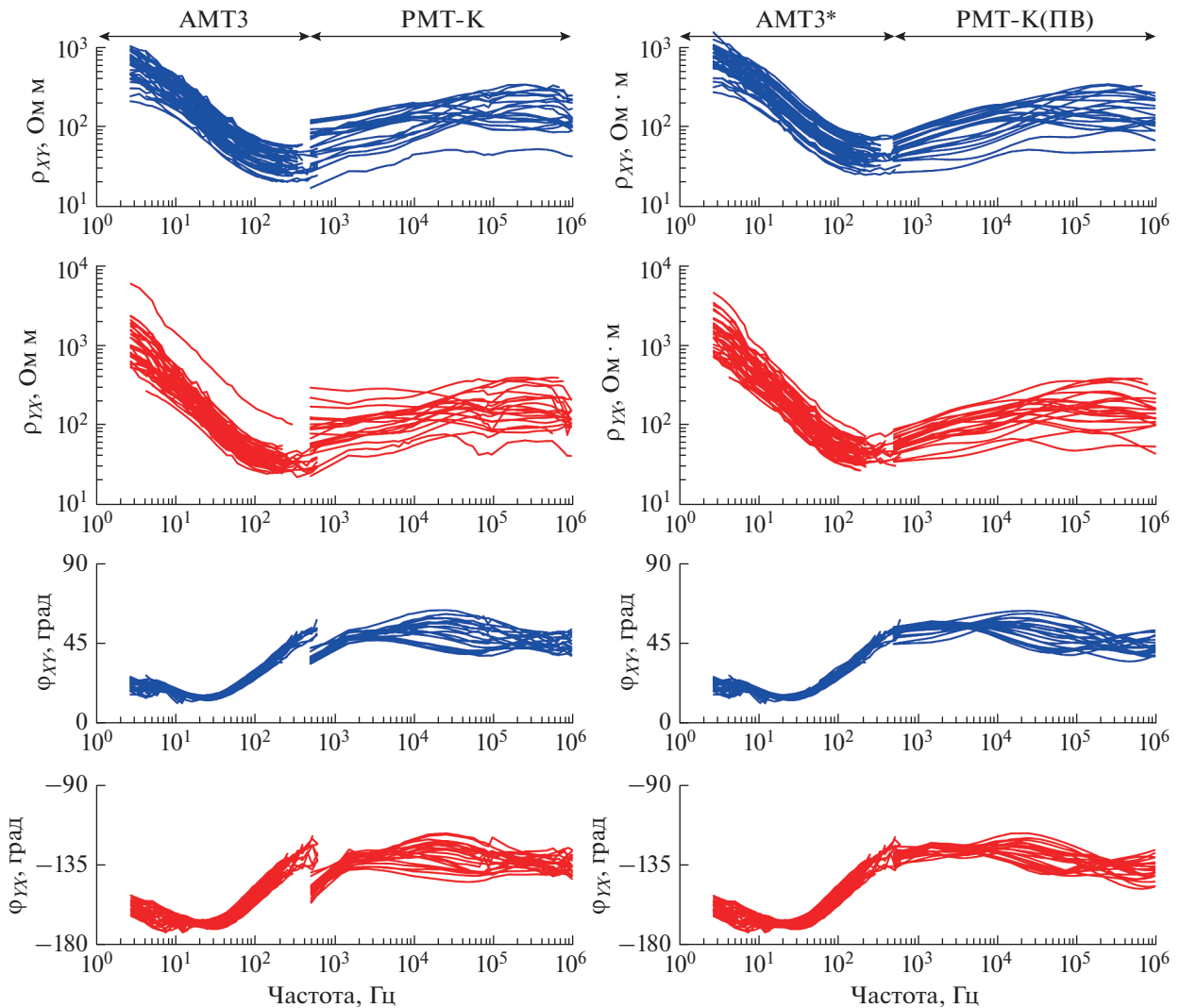


Рис. 9. Сводные кривые зондирования по главным компонентам тензора импеданса. Слева исходные кривые АМТЗ и кривые РМТ-К. Справа скорректированные за статический сдвиг кривые АМТЗ* и эквиваленты кривых РМТ-К для плоской волны (ПВ), полученные после 1D-инверсии данных РМТ-К с учетом промежуточной зоны.

применялся также и для компоненты Z_{XX} данных АМТЗ, а множитель, полученный для компоненты Z_{YX} применялся также и для компоненты Z_{YY} .

Кривые до коррекции и после коррекции показаны на рис. 9. На рисунке видно, что некорректированные кривые фазы импеданса данных АМТЗ хорошо согласуются с аналогичными кривыми данных РМТ-К, а точнее с их эквивалентом для плоской волны, рассчитанном в результате одномерной инверсии. Скорректированные кривые кажущегося сопротивления АМТЗ также хорошо дополняют кривые зондирования РМТ-К. При этом важно отметить, что высокочастотные части кривых РМТ-К осталась практически неизменными. Так как в данном случае требуется найти лишь кривую для модели плоской волны, экви-

валентную кривой, измеренной в поле контролируемого источника, а не модель среды, размерность применяемой модели среды не имеет значения, а важна лишь точность подбора синтетических кривых относительно измеренных.

ОДНОМЕРНАЯ ИНВЕРСИЯ

Анализ частотных срезов фазы импеданса по данным АМТЗ показывает, что нижняя часть разреза (глубина более одного километра) имеет незначительную латеральную изменчивость. Традиционная гладкая инверсия не позволяет получить контрастную границу между осадочными породами и кристаллическим фундаментом. Поэтому перед выполнением трехмерной инверсии необходимо определить глубину до кровли фун-

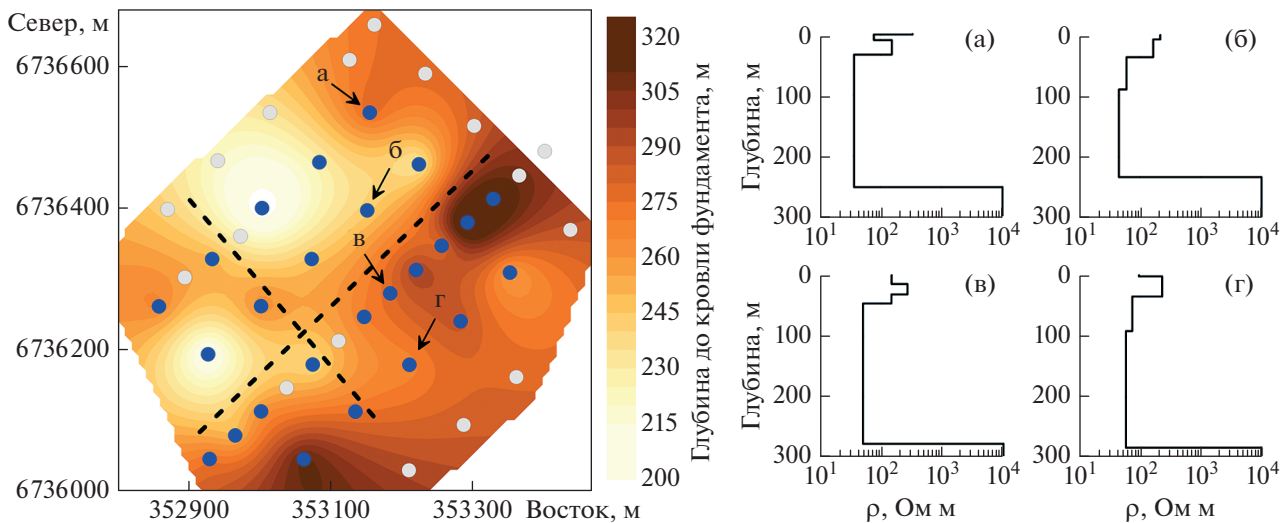


Рис. 10. Карта глубины до кровли фундамента по результатам совместной 1D-инверсии для ТМ моды и некоторые модели для точек, обозначенных буквами на карте. Цветовое обозначение точек зондирования соответствует рис. 8: а – пикет 7 на профиле 5; б – пикет 4 на профиле 4; в – пикет 8 на профиле 3; г – пикет 3 на профиле 2 (см рис. 8). Черным пунктиром отмечены неоднородности северо-восточного и северо-западного направлений.

дамента в рамках слоистой модели с небольшим числом слоев и использовать эту информацию в качестве априорной при трехмерной инверсии. Для этого была выполнена совместная одномерная инверсия данных АМТЗ и РМТ-К для точек зондирования, отмеченных синим цветом на рис. 8. Как отмечено выше, ТМ-мода соответствует направлению вкрест профилей измерения (кривые УХ). Так как низкочастотный отклик ТЕ-моды в данном случае практически не несет информации о латеральных изменениях удельного сопротивления (рис. 5), для картирования рельефа кровли кристаллического фундамента выбраны кривые ТМ-моды.

Совместная 1D-инверсия данных АМТЗ и РМТ-К с учетом промежуточной зоны источника выполнялась в рамках пятислойной модели с фиксированным удельным сопротивлением основания, равным 10000 Ом м. Результат 1D-инверсии для ТМ-моды показан на рис. 10. Наблюдается общее погружение кровли фундамента с запада на восток от глубин 210–220 до 270–280 м с локальными погружениями до 310 м. При этом в кровле фундамента прослеживаются неоднородности северо-восточного и северо-западного направлений (рис. 10), отмеченные понижениями в глубине кровли фундамента примерно на 50–80 м. Направления этих неоднородностей коррелирует с направлениями главных разломов района (рис. 2).

Ошибка подбора кривых зондирования в ходе 1D-инверсии (RMS) не превышает 1% для кажущегося сопротивления и 2° для фазы импеданса. Пример полевых и расчетных кривых зондирова-

ния для точек наблюдения, отмеченных на рис. 10 буквами а, б, в, г, показан на рис. 11

ТРЕХМЕРНАЯ ИНВЕРСИЯ

В трехмерной инверсии использовался полный тензор данных АМТЗ и главные компоненты тензора импеданса данных РМТ-К, пересчитанные для случая плоско-волнового возбуждения. Предлагаемый способ трансформации наблюдаемых данных РМТ-К к данным РМТ, соответствующим плоской волне, заключается в следующем. Для каждой из главных компонент тензора импеданса РМТ-К проводится независимая одномерная инверсия с учетом промежуточной зоны источника. Затем по полученным моделям рассчитываются теоретические кривые зондирования РМТ. Таким образом, мы получаем приближенный отклик плоской волны, который можно ожидать в случае натуральных измерений на той же точке в тех же условиях, в которых получены данные РМТ-К в промежуточной зоне источника. Сопоставление измеренных кривых зондирования фазы импеданса по данным АМТЗ и трансформированных кривых фазы РМТ-К показывает хорошее их согласие и состоятельность такого подхода.

Для оптимизации вычислительных затрат кривые АМТЗ были прорежены до 7 точек на декаду частот: использовалась каждая вторая частота. За порог ошибки оценки компонент тензора импеданса (*error floor*) принималось значение в 2% для амплитуды основных компонент и 15% от амплитуды эффективного импеданса для диагональных

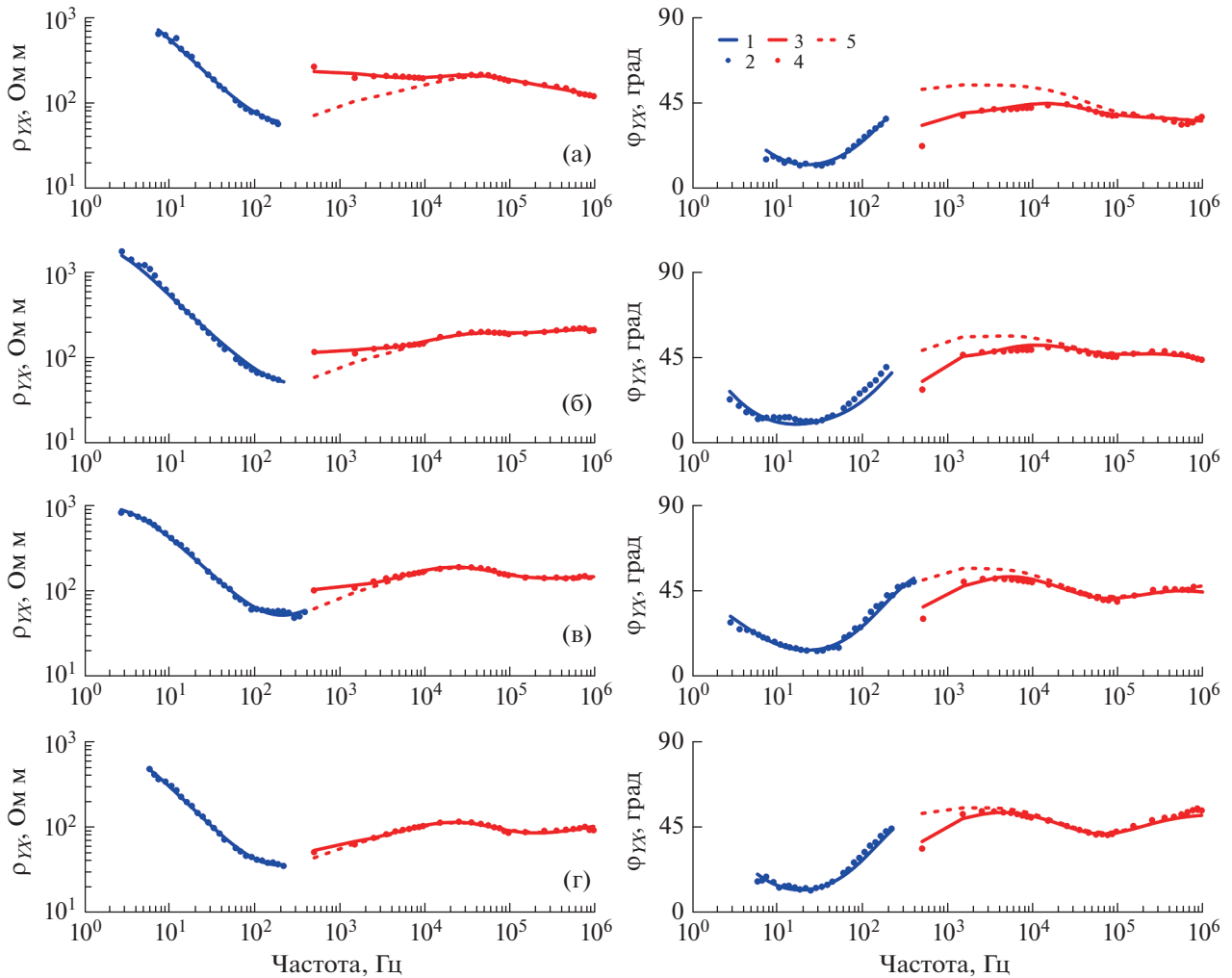


Рис. 11. Пример полевых и расчетных кривых зондирования после 1D-инверсии: 1 – рассчитанные данные АМТЗ; 2 – измеренные данные АМТЗ; 3 – рассчитанные данные РМТ-К; 4 – измеренные данные РМТ-К; 5 – кривые, рассчитанные для плоской волны, эквивалентные данным РМТ-К. Буквенные обозначения точек зондирования соответствуют рис. 10.

(дополнительных) компонент. Из данных РМТ-К были исключены субгармоники с номерами 9, 13, 17 и 19 ввиду избыточной плотности кривых зондирования. Для основной частоты генератора 5 кГц эти субгармоники соответствуют частотам 45, 65, 85 и 95 кГц. За порог ошибки для данных РМТ-К принималось значение в 2% от амплитуды импеданса. Всего в инверсии участвовало 9433 значения тензора импеданса.

Трехмерная инверсия выполнялась в программе ModEM [Kelbert et al., 2014], основанной на конечноразностном решении прямой задачи. Соответственно, модель задавалась в виде прямоугольных призм. Горизонтальный размер центральной области модели составил 700×540 м с шагом 20×20 м. В связи с необходимостью дискретизации рельефа с перепадом высот от 30 до 40 м

верхняя часть модели до глубины 10 м имела одинаковый шаг по глубине равный 1.5 м. Далее до глубины 190 м мощность каждого нижележащего слоя ячеек увеличивалась в 1.2 раза. С глубины 190 до 310 м шаг по глубине вновь был уменьшен до 15 м и сохранялся постоянным для более подробной дискретизации рельефа кровли кристаллического фундамента, полученного по результатам 1D-инверсии импеданса $Z_{УХ}$. Далее мощность каждого нижележащего слоя ячеек вновь увеличивалась в 1.2 раза. Для соблюдения граничных условий общая мощность составила 68 км, а в горизонтальном направлении модель была продолжена пятнадцатью ячейками в каждом направлении с увеличением ширины в 1.5 раза. Общий размер модели составил $65 \times 58 \times 62$ ячейки и соответственно $53 \times 53 \times 68$ км. В стартовой модели

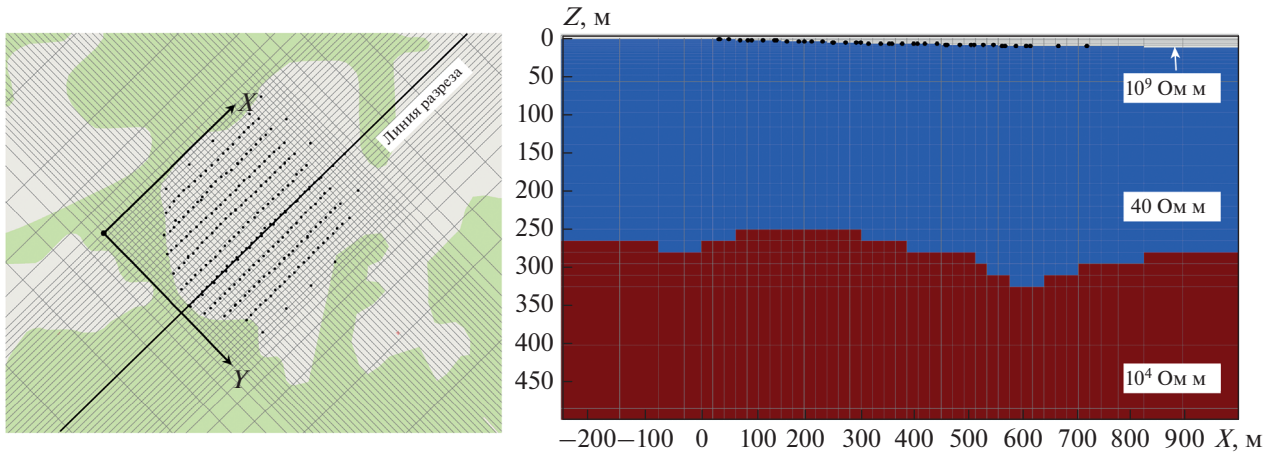


Рис. 12. Сетка дискретизации модели в плане в разрезе и разрез стартовой модели.

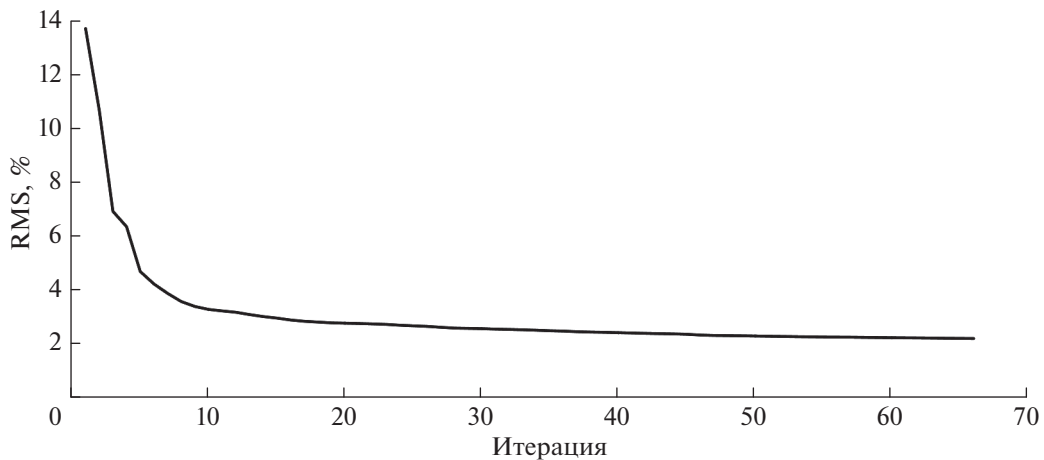


Рис. 13. Изменение общей невязки подбора в ходе 3D-инверсии.

удельное сопротивление верхнего слоя принято равным 40 Ом м, и удельное сопротивление фундамента— 10000 Ом м. Сетка центральной части модели и один из разрезов стартовой модели показаны на рис. 12.

Для заданной стартовой модели общая невязка составила 13.8%. В ходе 66 итераций инверсии методом нелинейных сопряженных градиентов (*nonline arconjugate gradients*, NLCG [Rodi, Mackie, 2001]) общая невязка подбора уменьшилась до 2.1%. При этом основное уменьшение невязки до величины 3% выполнено в течение первых 10 итераций (рис. 13).

На рис. 14 показаны карты суммарных невязок подбора для каждой из точек зондирования. Отдельно показаны невязки подбора только главных компонент тензора импеданса. Невязка от точки к точке варьирует в пределах 0.7–12% для

кажущегося сопротивления и 1° – 5° для фазы импеданса, что является приемлемыми величинами.

Для наглядности рассмотрим более подробно соответствие измеренных кривых зондирования и рассчитанных для точки, отмеченной на рис. 14 черным кружком, на которой отмечается высокая невязка подбора для кажущегося сопротивления (рис. 15). В случае использования главных компонент тензора импеданса основной вклад в высокое значение невязки вносят самые высокочастотные и самые низкочастотные значения на кривой. В данном случае отклонение измеренных значений на частотах 150–300 Гц на кривой АМТЗ связано с невысоким качеством данных, а значительное отклонение на частотах первые герцы не оказывает в данном случае существенного влияния на результат, так как это диапазон частот отвечает глубинам порядка нескольких километров для выбранного значения удельного сопро-

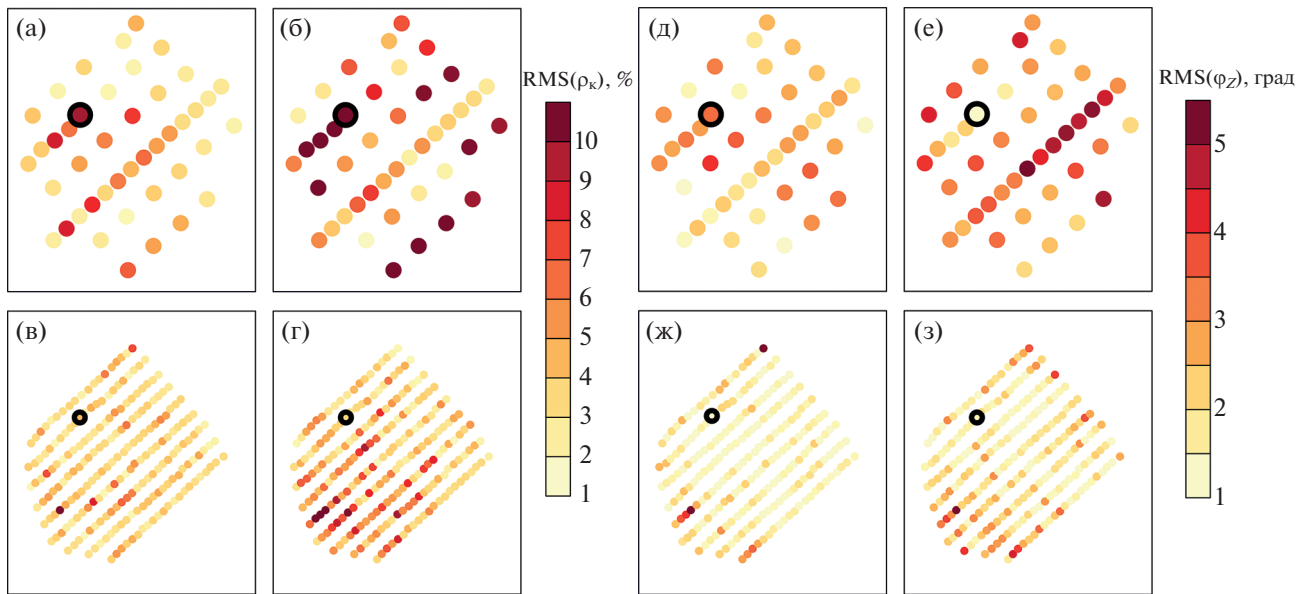


Рис. 14. Карты распределения среднеквадратической ошибки подбора модельных кривых в результате 3D-инверсии: (а) – ρ_{XY} АМТЗ; (б) – ρ_{YX} АМТЗ; (в) – ρ_{XY} РМТ-К; (г) – ρ_{YX} РМТ-К; (д) – φ_{XY} АМТЗ; (е) – φ_{YX} АМТЗ; (ж) – φ_{XY} РМТ-К; (з) – φ_{YX} РМТ-К. Черным кружком отмечена точка зондирования, для которой приводится сопоставление измеренных и рассчитанных кривых зондирования на рис. 15.

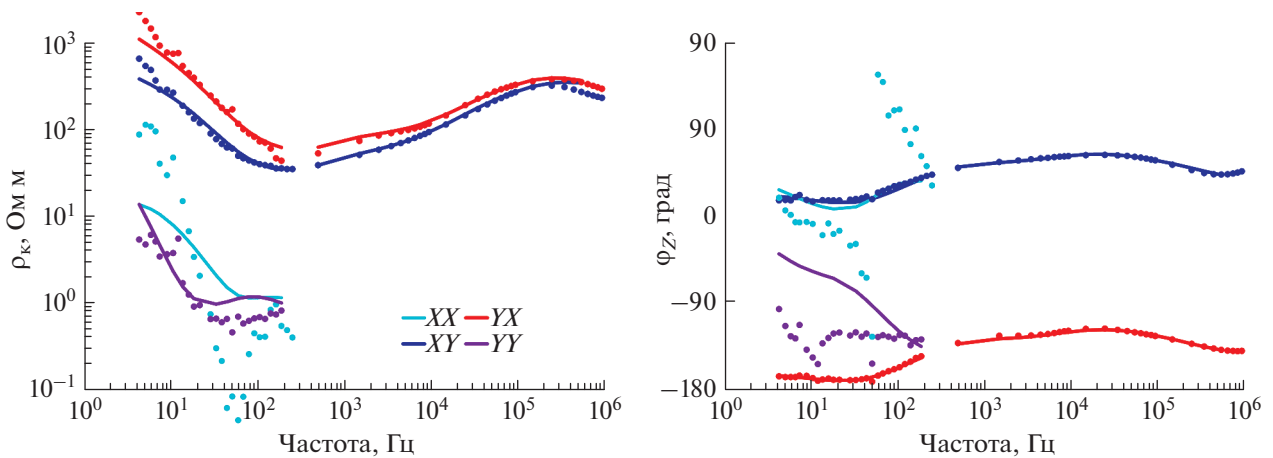


Рис. 15. Пример сопоставления измеренных и рассчитанных кривых зондирования для точки, отмеченной на рис. 14.

тивления фундамента, что далеко выходит за пределы зоны интереса настоящих исследований.

Остальные же части кривых главных компонент тензора импеданса подобраны вполне точно как для данных АМТЗ, так и для данных РМТ-К. Амплитудные кривые дополнительных компонент тензора импеданса данных АМТЗ также хорошо согласуются с расчетными значениями. Существенное отклонение наблюдается лишь для фазовых кривых. В данном случае этим можно пренебречь, так как амплитуды дополнительных

компонент на один-два порядка меньше амплитуды главных компонент, а значит основная информация о геоэлектрическом строении содержится именно в главных компонентах. В целом же рис. 14 показывает, что суммарная оценка невязки оценена верно и подобранная модель хорошо описывает наблюдаемые данные.

Полученные по результатам 3D-инверсии геоэлектрические разрезы по некоторым профилям участка приведены на рис. 16. При общей тенденции погружения кровли фундамента в СВ на-

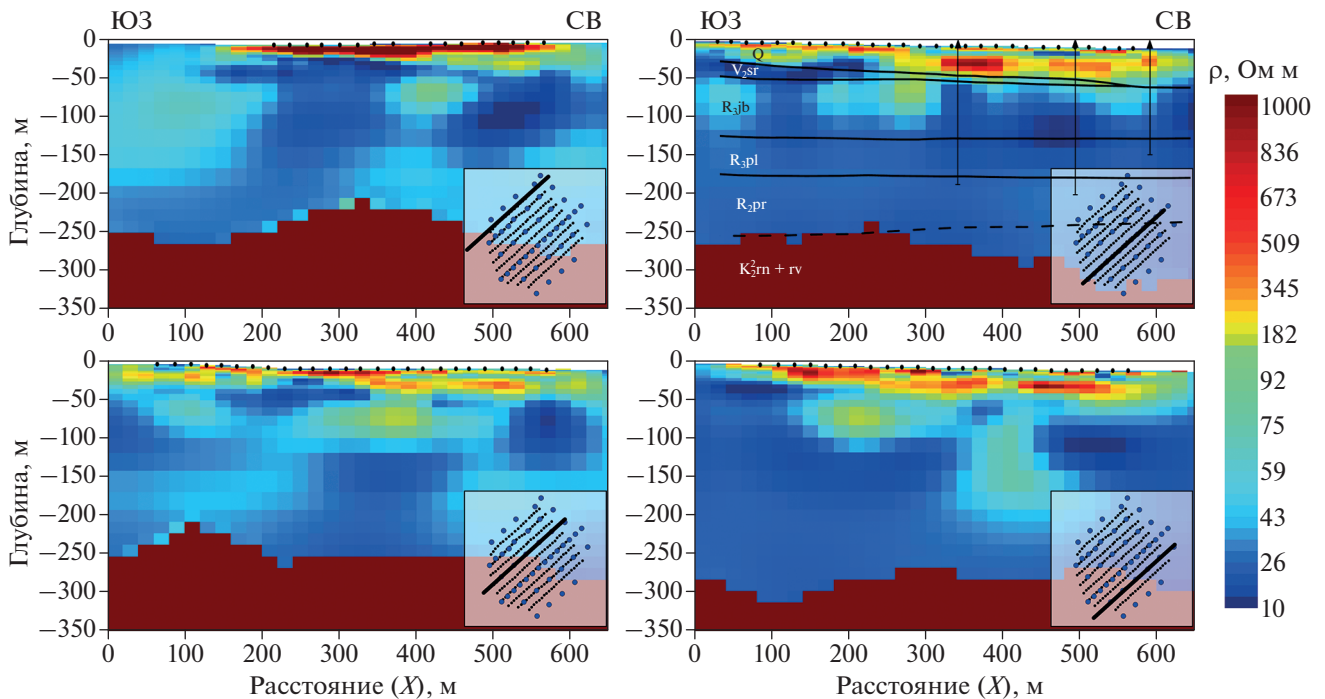


Рис. 16. Геоэлектрические разрезы трехмерной модели. На одном из разрезов вынесены геологические границы и скважины с рис. 3б. На схемах черной жирной линией показана линия разреза. Черными точками на разрезах показаны точки зондирования РМТ-К.

правлении наблюдаются локальные подъемы и погружения отдельных блоков фундамента, что согласуется с имеющимися представлениями о геологии Ладожского грабена [Афанасов, Николаев, 2003]. Четвертичные отложения в верхней части разреза характеризуются существенной неоднородностью и наличием локальных тел высокого удельного сопротивления (сотни омметров). Нижележащие отложения старорусской, яблоньской, приладожской и приозерской свит, которые являются потенциально кимберлитовмещающей толщей, в целом достаточно однородны и характеризуются низкими значениями удельного сопротивления (первые десятки омметров). Вместе с тем, на геоэлектрических разрезах по результатам 3D-инверсии в интервалах яблоньской и приладожской свит проявляются зоны повышенного удельного сопротивления (десятки — первые сотни омметров), которые могут быть связаны с флюидолитами. Как отмечено выше и показано на рис. 3, в отложениях яблоньской и приладожской свит по данным бурения выявлен данный тип пород, который по современным геологическим представлениям может быть коренным источником алмазов. Полученные по результатам интерпретации значения удельного сопротивления пород близки к приведенным выше данным каротажа КС.

На одном из геоэлектрических разрезов вынесены границы с геологического разреза, представленного на рис. 3б. Стоит отметить хорошую корреляцию увеличения мощности четвертичных отложений в СВ направлении по априорным геологическим данным (бурение) с полученными результатами совместной интерпретации тензорных данных АМТЗ и РМТ-К. Также отметим хорошее соответствие предполагаемого положения кровли фундамента по геологическим данным с полученными нами результатами. Эта граница существенно уточнена по результатам выполненных работ.

Приведенные результаты демонстрируют высокую информативность методов АМТЗ и РМТ-К и эффективность совместной трехмерной интерпретации полученных данных. Информация о строении и свойствах пород фундамента, вмещающих флюидолиты в породах и перекрывающих осадочных отложениях может быть использована при проведении поисковых работ на алмазы на Карельском перешейке и прилегающих территориях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрены результаты совместной интерпретации данных методов АМТЗ и РМТ-К на участке Карельского перешейка около

пос. Яблоновка, перспективном на обнаружение коренных источников алмазов. Ранее по данным бурения здесь были выявлены флюидно-катаклические брекчи — флюидолиты, которые по современным геологическим представлениям могут быть коренными источниками алмазов.

При поисках коренных месторождений алмазов электромагнитными методами в настоящее время используются подходы, связанные с выявлением аномалий, непосредственно связанных с коренными месторождениями алмазов, с картированием косвенных признаков, связанных с особенностями вмещающих и перекрывающих пород. Поэтому задачей работ было изучение разреза в диапазоне глубин от первых метров до нескольких сотен метров, включая верхнюю часть кристаллического фундамента. Участок расположен в прибортовой части Пашско-Ладожской рифтогенной зоны и характеризуется сложным трехмерным строением. В этих условиях при наличии системы разнонаправленных разломов интерпретация данных АМТЗ и РМТ-К была выполнена в рамках 3D-модели среды.

Рассмотрены результаты совместной трехмерной интерпретации тензорных данных методов АМТЗ и РМТ-К. В ходе анализа первичных данных было установлено, что нижняя часть разреза (кровля кристаллического фундамента) имеет близкую к одномерной структуру. Это позволило с помощью совместной слоистой одномерной инверсии данных АМТЗ и РМТ-К определить глубину до кровли фундамента и использовать эту информацию как априорную при трехмерной инверсии.

Для совместной трехмерной инверсии данных АМТЗ и данных РМТ-К в промежуточной зоне источника с помощью программы ModEM предложены подход и процедура трансформации данных РМТ-К к кривым зондирования, соответствующим модели плоской волны. Этот подход нацелен на сокращение времени выполнения трехмерной инверсии данных, полученных в промежуточной зоне контролируемого источника. Предложенная процедура основана на одномерной инверсии данных РМТ-К с учетом промежуточной зоны источника. Сопоставление измеренных кривых фазы импеданса по данным АМТЗ и трансформированных кривых фазы для РМТ-К показывает хорошее их согласие и состоятельность такого подхода.

Полученные трансформированные кривые кажущегося сопротивления РМТ-К также были использованы для коррекции статического сдвига кривых АМТЗ, поскольку данные РМТ-К обла-

дают минимальным соотношением толщины скин-слоя к размеру неоднородностей и проявление смещения в этом случае минимальное. В местах с близко расположенными точками АМТЗ и РМТ-К была выполнена одномерная инверсия данных РМТ-К с учетом промежуточной зоны и геометрии генераторных линий. Для полученных моделей были вычислены кривые зондирования, соответствующие модели плоской волны, и уровень полученных кривых кажущегося сопротивления принимался за опорный для кривых кажущегося сопротивления АМТЗ.

Трехмерная инверсия была выполнена с учетом рельефа и априорной информации в виде стартовой модели, содержащей рельеф кровли кристаллического фундамента и его удельное сопротивление. Полученная модель хорошо согласуется с геологическими данными, полученными по скважинам, пробуренным ранее недалеко от участка работ. На геоэлектрических разрезах по результатам 3D-инверсии в интервалах яблоновской и приладожской свит проявляются зоны относительно повышенного удельного сопротивления (десятки—первые сотни омметров), которые могут быть связаны с флюидолитами. Разработанные подходы к совместной трехмерной интерпретации тензорных данных АМТЗ и РМТ-К позволяют получать детальную информацию о строении и свойствах пород в диапазоне глубин от первых метров до сотен метров при наличии системы разнонаправленных разломов и вертикальных смещений блоков фундамента. Получаемые данные о строении и свойствах пород фундамента, вмещающих флюидолиты породах и перекрывающих осадочных отложениях, могут быть использованы при проведении поисковых работ на алмазы на Карельском перешейке и прилегающих территориях.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Представленные результаты получены при поддержке гранта РФФ № 21-47-04401 и ресурсного центра “Геомодель” Научного парка СПбГУ.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Н.Н. Орлову за предоставленные данные каротажа по участку работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Афанасов М.Н. Отчет о проведении работ по геологическому доизучению площади Карельского перешейка. Территориальные фонды геологической информации по Северо-Западному федеральному округу Российской федерации. СПб. 2002.

- Афанасов М.Н., Николаев В.А.* Перспективы алмазности Карельского перешейка // Региональная геология и металлогения. 2003. № 18. С. 116–121.
- Афанасов М.Н.* Флюидолиты и полезные ископаемые на северо-западе России: поисково-прогнозные исследования на основе детального геолого-минералогического анализа / М.Н. Афанасов, А.П. Казак, К.Э. Якобсон (ред.). 2012. Saarbrücken: LAP LAMBERT. 98 с.
- Бердичевский М.Н., Кузнецов В.А.* Метод псевдорельефа – новый подход к анализу магнитовариационных и магнитотеллурических данных // Физика Земли. 2006. № 8. С. 66–77.
- Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И.* Модели и методы магнитотеллурики. М.: Научный мир. 2009. 680 с.
- Вешев А.В.* Электропрофилирование на постоянном и переменном токе. Л.: Недра. 1980. 391 с.
- Зорин Н.И., Яковлев А.Г.* Гибридная приемная линия для измерения электрического поля в широкой полосе частот // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2021. № 5. С. 54–60.
- Московская Л.Ф.* Импедансно-адмитантный регрессионный анализ магнитотеллурических полей // Физика Земли. 2007. № 2. С. 51–65.
- Сараев А.К., Анташук К.М., Пертель М.И., Еремин И.С., Головенко В.Б., Ларионов К.А.* Аппаратурно-программный комплекс аудиомангнитотеллурических зондирований АКФ-4М. Материалы Пятой всероссийской школы-семинара имени М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна по электромагнитным зондированиям Земли. ЭМЗ-2011. В двух книгах. Книга 2. СПб.: СПбГУ. 2011. С. 475–478.
- Сараев А.К., Симаков А.А., Шлыков А.А.* Метод радиомангнитотеллурических зондирований с контролируемым источником // Геофизика. 2014. № 1. С. 18–25.
- Стогний В.В., Коротков Ю.В.* Поиск кимберлитовых тел методом переходных процессов. Новосибирск: Издательство “Малотиражная типография 2D”. Новосибирск. 2010. 121 с.
- Устинов В.Н., Анташук М.Г., Загайный А.К., Кукуй И.М., Лобкова И.П., Микоев И.И., Антонов С.А.* Перспективы выявления месторождений алмазов на севере Восточно-Европейской платформы // Руды и металлы 2018. № 1. С. 11–26.
- Харькив А.Д., Зинчук Н.Н., Крючков А.И.* Коренные месторождения алмазов Мира. М.: Недра. 1998. 554 с.
- Шлыков А. А., Сараев А. К.* Оценка макроанизотропии горизонтально-слоистого разреза по данным радиомангнитотеллурических зондирований с контролируемым источником // Физика Земли. 2015. № 4. С. 128–147.
- Яковлев Д.В., Яковлев А.Г., Валясина О.А.* Статический сдвиг магнитотеллурических кривых в осадочных бассейнах. VIII Всероссийская школа-семинар ЭМЗ-2021. Москва, 4–9 октября 2021. С. 1–7.
- Bastani M., Hubert J., Kalscheuer T., Pedersen L.B., Godio A., Bernard J.* 2D joint inversion of RMT and ERT data versus individual 3D inversion of full tensor RMT data: an example from Trecate site in Italy // Geophysics. 2012. V. 77(4). P. WB233–WB243.
- Caldwell T.G., Bibby H.M., Brown C.* The magnetotelluric phase tensor // Geophys. J. Int. 2004. V. 158. P. 457–469.
- Egbert G.D., Booker J.R.* Robust estimation of geomagnetic transfer functions // Geophys. J. R. astr. Soc. 1986. V. 87. P. 173–194.
- Garcia X., Jones A. G.* Atmospheric sources for audio-magnetotelluric (AMT) sounding // Geophysics. 2002. V. 67(2). P. 448–458.
- Grayver A.V., Streich R., Ritter O.* Three-dimensional parallel distributed inversion of CSEM data using a direct forward solver // Geophysical J. Int. 2013. V. 193(3). P. 1432–1446.
- Kelbert A., Meqbel N., Egbert G.D., Tandon K.* ModEM: a modular system for inversion of electromagnetic geophysical data // Computers & Geosciences. 2014. V. 66. P. 40–53.
- Marti A., Queralt P., Ledo J.* WALDIM: A code for the dimensionality analysis of magnetotelluric data using the rotational invariants of the magnetotelluric tensor // Computers & Geosciences. 2009. V. 35. P. 2295–2303.
- Newman G.A., Recher S., Tezkan B.* 3D inversion of a scalar radio magnetotelluric field data set // Geophysics. 2003. V. 68(3). P. 791.
- Pace F., Marti A., Queralt P., Santilano A., Manzella A., Ledo J., Godio A.* Three-Dimensional Magnetotelluric Characterization of the Travale Geothermal Field (Italy) // Remote Sens. 2022. V. 14. P. 542.
- Rodi W.L., Mackie R.* Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2D magnetotelluric inversion // Geophysics. 2001. V. 66(1). P. 174–187.
- Roy K.K.* Natural Electromagnetic Fields in Pure and Applied Geophysics. Springer Geophysics. Springer Nature Switzerland AG 2020. 589 p.
- Saraev A.K., Antaschuk K.M., Nikiforov A.B., Romanova N.E., Denisov R.V.* Audiomagnetotelluric soundings for the diamond exploration // Chin. J. Geophys. 2010. V. 53. P. 657–676.
- Saraev A.K., Shlykov A.A., Tezkan B.* Application of the Controlled Source Radiomagnetotellurics (CSRMT) in the Study of Rocks Overlying Kimberlite Pipes in Yakutia/Siberia // Geosciences. 2022. V. 12. P. 34.
- Siripunvaraporn W., Uyeshima M., Egbert G.* three-dimensional inversion for Network-Magnetotelluric data // Earth, Planets and Space. 2004. V. 56. P. 893–902.
- Weaver J.T., Agarwal A.K., Lilley F.E.M.* Characterization of the magnetotelluric tensor in terms of its invariants // Geophys. J. Int. 2000. V. 141. P. 321–336.
- Yakovlev D., Yakovlev A.* Static shift correction in sedimentary basins. Abstract. 25th EM Induction Workshop. Turkey: Çeşme. September 11–17. 2022. P. 163.

Joint Three-Dimensional Interpretation of AMTS and RMT-C Tensor Data in a Region Promising the Discovery of Primary Diamond Sources (Karelian Isthmus)

A. A. Shlykov^{a, *}, A. K. Saraev^a, and N. Yu. Bobrov^a

^a*Institute of Earth Sciences, St. Petersburg State University, St. Petersburg, 199034 Russia*

**e-mail: a.shlykov@spbu.ru*

Abstract—The paper presents the techniques and results of the joint interpretation of AMTS and RMT-C tensor data in the area of the Karelian Isthmus near the village of Yablonovka, promising the discovery of primary diamond sources. Earlier, according to drilling data, fluid-cataclastic breccias, fluidolites, were identified here, which, according to modern geological concepts, can be primary diamond sources. The site is located in the marginal part of the Pash-Ladoga rift zone and is characterized by a complex three-dimensional structure. Under these conditions, in the presence of a system of multidirectional faults, the joint interpretation of the AMTS and RMT-C tensor data was performed within a 3D model of the medium. To reduce the inversion execution time, an approach and a procedure for transforming the RMT-C data obtained in the intermediate zone of a controlled source to sounding curves corresponding to the plane wave model are proposed. The transformed RMT-C apparent resistivity curves were also used to correct the static shifts of the AMTS curves. A joint 3D inversion was performed taking into account the relief. The resulting model is in good agreement with the geological data obtained from the wells previously drilled near the work site. The geoelectric sections show zones of relatively increased resistivity, which may be associated with fluidolites. The developed approaches to the joint 3D interpretation of AMTS and RMT-C tensor data and the obtained information about the structure and properties of the basement rocks, rocks hosting fluidolites, and overlying sedimentary deposits, can be used in prospecting works for diamonds on the Karelian Isthmus and adjacent territories.

Keywords: Karelian Isthmus, AMTS, RMT-C, joint 3D interpretation of tensor data, primary diamond sources, fluidolites