

Электромагнитные зондирования в радиоволновом диапазоне

А.А. Шлыков¹, А.К. Сараев²

¹СПбГУ, Институт наук о Земле, a.shlykov@spbu.ru

²СПбГУ, Институт наук о Земле, a.saraev@spbu.ru

АННОТАЦИЯ

В докладе представлен обзор использования электромагнитных полей радиочастотного диапазона в геоэлектрике. Кратко изложена более чем столетняя история развития этого направления как в нашей стране, так и за рубежом. Описывается развитие методики и аппаратуры. Обсуждаются некоторые специфические для радиочастот особенности электромагнитного поля и приведен пример использования полей радиочастотного диапазона для решения инженерно-геологической задачи задач.

Ключевые слова: Электромагнитные зондирования; Радиоволновой диапазон; Поле радиостанции; Контролируемый источник; Ток смещения

ВВЕДЕНИЕ

Идея использования радиоволн в геоэлектрике возникла практически сразу вслед за изобретением А.С. Попова, а именно с появлением первых технических средств, передающих и принимающих радиоволны. В настоящее время электромагнитное поле радиочастотного диапазона используется в электроразведке для решения широкого круга задач от поиска и разведки полезных ископаемых до решения инженерно-геологических и экологических задач. Цель настоящего доклада – обзор основных этапов истории развития методов электромагнитных зондирований, основанных на использовании полей радиочастотного диапазона.

Исторический обзор

Одна из первых попыток использовать радиоволны при решении геологических задач была осуществлена в 1901 году немецким инженером Трүстедтом (Trüstedt, 1912), который в г. Питкяранте (Карелия) применил так называемый лучевой метод. В этом опыте по обе стороны от предполагаемого места расположения рудного тела располагались передающая и приемная антенны, подключенные к зеркалам с совмещенными фокальными плоскостями. Поворотом зеркал в вертикальной плоскости определялся такой угол, при котором преломленная электромагнитная (ЭМ) волна от источника активирует регистратор. При этом между приемной и передающей антеннами располагался экран, препятствующий прохождению прямой ЭМ волны. По углу наклона зеркал и расстоянию между ними

определялась глубина залегания верхней кромки рудного тела.

Уже в 1925 году профессором А.А. Петровским в работе (Петровский, 1925) дано описание пяти различных методов изучения геоэлектрических свойств горных пород с помощью радиоволн. Среди них лучевой метод, теневой метод (прообраз метода радиоволнового просвечивания), интерференционный, возвратный и волномерный методы. Все эти методы подразумевали использование управляемых портативных радиогенераторов и приемных антенн.

Одной из первых публикаций на тему количественной оценки удельного электрического сопротивления (ρ) и относительной диэлектрической проницаемости ($\epsilon^{\text{отн}}$) горных пород в их естественном залегании являлась статья А.А. Петровского (Петровский, 1930). В этой работе было дано теоретическое обоснование интерференционного метода определения длины ЭМ волны в горной породе. Также описан способ измерения ρ и $\epsilon^{\text{отн}}$, основанный на регистрации картины интерференции прямой ЭМ волны, проходящей от источника, помещенного в горной выработке, к приемнику на дневной поверхности, и «обходной» волны, скользящей от источника до приемника через ствол шахты вдоль границы земля-воздух.

Несколькими годами позже результаты работ подобной направленности публикуются в западных журналах (Feldman, 1933; Smith-Rose, 1933; Barfield, 1934; Cloos, 1934). В указанных работах рассматриваются вопросы изучения электрических свойств почвы и верхних горизонтов земной коры как для

геологических целей, так и для задач радиосвязи.

В 50-х годах 20-го века исследования Петровского А.А. по развитию теневого метода или метода радиопросвечивания были продолжены в МГУ В.К. Хмелевским (Хмелевской, 1959) и в МГРИ Д.С. Даевым (Даев, 1959), М.И. Плюсниным и А.Д. Петровским (Плюснин, Петровский, 1959). Обобщение накопленного к концу 60-х годов опыта по развитию метода радиопросвечивания было выполнено А.Д. Петровским в монографии (Петровский, 1971).

Одним из методов геоэлектрики, основанных на регистрации ЭМ полей ширококвещательных радиостанций, является метод радиокомпарирования и пеленгации (сокращенно радиокип), авторское свидетельство на который было получено в 1948 году А.Г. Тарховым (Способ геофизической..., 1959). Метод радиокип основан на изучении ЭМ поля радиостанций, работающих в диапазоне длинных волн (30-300 кГц). В отличие от использовавшихся в то время методов высокочастотного переменного тока, таких как метод индукции и метод радиоволнового просвечивания, измерения в методе радиокип ведутся в дальней зоне источника. Это позволяет использовать простую модель первичного поля в виде плоской волны.

В 1961 году была опубликована монография А.Г. Тархова, посвященная методу радиокип (Тархов, 1961). В ней рассматриваются вопросы распространения радиоволн вдоль земной поверхности, особенности аномального ЭМ поля, связанного с телами простой формы, методика измерений и обработки данных метода радиокип. В предложенном варианте метода радиокип использовались отдельные составляющие магнитного поля (преимущественно вертикальная составляющая H_z) и отношение вертикальной и горизонтальной составляющих H_z/H_h . Кроме того, в указанной работе рассмотрены методика и результаты полевых экспериментов с использованием составляющих электрического поля и отношений горизонтальной и вертикальной составляющих электрического поля E_h/E_z .

В конце 50-х и в 60-х годах прошлого столетия исследования в этой области были продолжены В.К. Хмелевским и А.Д. Фроловым (Хмелевской, Фролов, 1958; Фролов, 1961), А.В. Вешевым и В.А. Егоровым (Вешев, Егоров, 1966), О.М. Мясницким и В.М. Тимофеевым (Мясницкий, Тимофеев, 1971) и рядом других геофизиков. Описание разработанной

аппаратуры метода радиокип «Руда» и ПИНП-1 (полевой измеритель напряженности поля) приведено в работе (Тархов, 1961). В это же время в СССР под руководством Б.В. Рогачева был разработан сверхдлинноволновый вариант метода радиокип – СДВР (Рогачев и др., 1965).

Подобные исследования по разработке метода VLF (Very Low Frequency) проводились за рубежом начиная с 1963 года Г. Паалом и В. Ронка (Paal, 1965; Paal, 1968; Ronka, 1970). В частности, в 1964 г. В. Ронка разработал регистратор VLF-EM.

В 60-х годах прошлого столетия в СССР и в зарубежных странах проводятся работы по развитию подходов к измерению и интерпретации данных метода СДВР (VLF), аналогично тому, как это делается в методе магнитотеллурических зондирований – измерение горизонтальных компонент электрического и магнитного поля с последующей оценкой поверхностного импеданса, его фазы и кажущегося сопротивления (Вешев, Егоров, 1966; Collett, Beker, 1967). В СССР этот метод получил название РЭМП (радиоэлектромагнитное профилирование), в зарубежных странах – Radiohm или VLF-R (Very Low Frequency – Resistivity).

В 1981 году вышла книга С.Г. Гордеева, Е.С. Седельникова и А.Г. Тархова (Гордеев и др., 1981), обобщающая предшествующий опыт исследований по разработке и практическому применению метода радиокип как в наземном, так в аэровариантах. Затем были опубликованы разработанные в НПО «Рудеогофизика» (Ленинград) методические рекомендации по применению аэроэлектроразведки методом СДВР (Методические..., 1984). В 1989 году американским обществом геофизиков-исследователей SEG (Society of Exploration Geophysics) был опубликован сборник по электромагнитным методам в прикладной геофизике с разделом (McNeill, Labson, 1989), с изложением основ и обобщения опыта применения методов VLF и VLF-R при решении задач геологического картирования.

На протяжении 70-90-х годов прошлого столетия методы VLF и VLF-R интенсивно развивались в наземном и аэровариантах. При этом реализовывались измерения различных характеристик поля, от угла наклона эллипса поляризации магнитного поля до тензорных VLF съемок (Pedersen et al, 1994). В это время появились такие измерительные приборы, как Радиофаза и Е-фаза EM-16 канадской фирмы Geonix, ориентированные на работы методом

VLF-R, прибор EM-16R, предназначенный для работ методом VLF-R и др.

С 80-х годов 20-го века начинает развиваться направление электромагнитных зондирований с измерением поверхностного импеданса в диапазоне частот от 10 до 250-1000 кГц (Пертель, Круль, 1983; Muller, 1983; Парфентьев, Пертель, 1991; Turberg et al., 1994). В настоящее время наиболее часто употребляемым названием таких зондирований является термин «метод радиоманнитотеллурических (PMT) зондирований» (Turberg et al., 1994; Tezkan, 2008). Аппаратура метода PMT для диапазона частот 10-1000 кГц была разработана в 2000-х годах (Tezkan, Saraev, 2008).

В начале 2000-х годов появилась более широкополосная модификация метода PMT, в которой частотный диапазон был расширен вниз за счет использования контролируемого источника в виде вертикальной петли (Bastani, 2001) и заземленного провода (Simakov et al., 2010) – метод радиоманнитотеллурических зондирований с контролируемым источником (PMT-K). Глубина исследования методом PMT-K составляет 70-100 метров (Shlykov et al., 2020), а в случае достаточно высокого удельного сопротивления изучаемых горных пород может достигать нескольких сотен метров (Linde, Pedersen, 2004). Особенности аппаратуры PMT-K, разработанной в 2010-х годах, рассмотрены в статье (Saraev et al., 2017). В последние десятилетия накоплен значительный опыт по применению методов PMT и PMT-K для решения самого широкого круга малоглубинных задач от экологических и инженерно-геологических до рудных.

Особенности ЭМ поля радиодиапазона

Диапазон радиочастот, наиболее часто используемых в геоэлектрике (10-1000 кГц), во многих геоэлектрических обстановках является пограничным между диффузионным и волновым распространением ЭМ поля. Поэтому, в общем случае, при анализе ЭМ поля в этом диапазоне частот следует учитывать как токи проводимости, так и токи смещения.

При анализе задач геоэлектрики имеет смысл разделять эффекты от токов смещения в проводящей земле и токов смещения в воздухе. При анализе токов смещения в земле, оценивая отношение плотности токов проводимости и смещения, говорят о низкочастотном и высокочастотном поле. Для низкочастотного поля пренебрегают токами смещения в проводящей земле. Для высокочастотного поля

такая аппроксимация неприменима. При анализе токов смещения в воздухе или эффектов запаздывания ЭМ поля (propagation effects) рассматриваются квазистационарное и волновое поля (Шлыков, Сараев, 2014). В случае квазистационарного поля предполагают, что электромагнитное поле распространяется мгновенно от источника до приемника. Для волнового поля необходим учет вклада токов смещения в воздухе в процесс распространения электромагнитного поля.

Одни из первых работ по исследованию высокочастотного волнового поля дипольных источников были выполнены в 70-х - 80-х годах 20-го века (Dey, Ward, 1970; Ryu et al., 1970; Вешев и др., 1971; Егорова, Сапожников, 1983; Вешев и др., 1983). Во этих работах отмечается значительное увеличение амплитуды и запаздывание фазы компонент ЭМ поля при существенном влиянии токов смещения относительно квазистационарного случая. В работах (Алексев и др., 1978; Егорова, Сапожников, 1983) обсуждались вопросы распределения волн силы тока и напряжения в проводе питающей линии для случаев, когда длина ЭМ волны в проводе сравнима с длиной самого провода применительно к методу длинного кабеля (ДК) и методу бесконтактного измерения электрического поля (БИЭП). Очевидно, это в значительной степени имеет место и в случае использования контролируемых источников в радиочастотном диапазоне. В этом случае амплитуда и фаза компонент ЭМ поля значительно зависят от волнового сопротивления провода, высоты его укладки над землей, сопротивлений заземлений и может существенно отличаться от модельных значений, рассчитанных в традиционном предположении о мгновенном распространении тока вдоль провода.

В работах (Linde, Pedersen, 2004; Kalscheuer et al., 2008) обсуждается вопрос учета токов смещения в земле (высокочастотное поле) для решения практической задачи инверсии данных PMT зондирований для 1D и 2D случая соответственно. В обеих работах отмечается, что при достаточно высоких удельных сопротивлениях изучаемых горных пород в тысячи и десятки тысяч омметров на частотах порядка десятков и сотен килогерц влияние токов смещения в земле сказывается достаточно существенно. Проявляется такое влияние в уменьшении амплитуды и фазы поверхностного импеданса относительно низкочастотного эквивалента и появления дополнительных аномалий в реальной части типпера вокруг главной аномалии, создаваемой неоднородностью геоэлектрического разреза.

В работе (Шлыков, Сараев, 2014) выполнен анализ нормального поля горизонтального электрического диполя применительно к методу РМТ-К с учетом токов смещения в земле и воздухе. Было показано, что при переходе из квазистационарной зоны в волновую зону, в которой влияние токов смещения в воздухе не может быть проигнорировано, скорость убывания поля источника замедляется, существенно меняется диаграмма направленности источника и поле имеет эллиптическую поляризацию в горизонтальной плоскости. Кроме этого показано, что при измерении на поверхности земли токи смещения в воздухе не оказывают влияния на величину поверхностного импеданса. Это позволяет использовать более эффективные численные методы, разработанные для квазистационарных полей, для инверсии поверхностного импеданса, в том числе для высокочастотных полей.

В работе (Хмелевской и др, 2010) рассматриваются интерференционные электромагнитные зондирования на частотах 100 кГц–100 МГц. Авторами показано, что в случае контрастного по удельному сопротивлению геоэлектрического разреза для этих частот характерно интерференционное осциллирующее поведение частотных кривых поверхностного импеданса, по характеру которых можно оценивать как удельное сопротивление, так и диэлектрическую проницаемость разреза.

Пример применения методов РМТ-К

Рассмотрим пример применения метода РМТ-К для изучения геологического разреза в условиях развития многолетнемерзлых пород на участке строительства ж/д моста через реку недалеко от пос. Лабитнанги, Ямало-Ненецкий АО (Shlykov et al., 2020). В данном случае задачей являлось получение достоверного разреза для выбора длины свай, которые должны достигать в разрезе слоев плотных песков. Предварительный анализ типичных разрезов показал, что наряду с песками в них имеются слои тиксотропных глин с выраженной анизотропией и слабой несущей способностью.

Ввиду сложных логистических условий метод РМТ-К был применен в зимнее время года в скалярном варианте с одним источником в виде заземленной линии. При этом работы проводились с использованием незаземленных электрических приемных линий. Схема взаимного расположения генераторной линии и профиля наблюдений приведены на Рисунке 1. Измерения методом РМТ-К были выполнены в диапазоне частот 1.5 – 950 кГц.

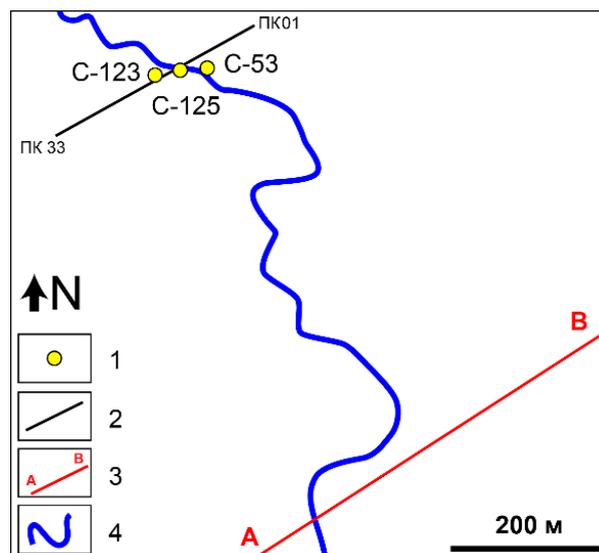


Рисунок 1. Схема измерений методом РМТ-К. 1 – скважины, 2 – профиль РМТ-К, 3 – генераторная линия, 4 – река. ПК01, ПК 33 – точки измерения РМТ-К и их номера.

Геоэлектрический разрез, полученный в результате 2D инверсии данных РМТ-К, показан на Рисунке 2. По данным РМТ-К выделяется верхний относительно проводящий горизонт и подстилающие относительно высокоомные породы. Приповерхностное тело, сложенное гравийно-щебенистым грунтом **А** мощностью порядка 3 м, четко выделяется по данным РМТ-К. Также прослеживается изменчивость его мощности. Это тело вскрыто скважиной С-125.

Высокоомное тело **В** также хорошо выделяется по данным РМТ-К. Эти данные подтверждаются скважинами С-125 и С-123. Колонка по скважине С-123 смещена вниз относительно уровня рельефа, так как положение скважины смещено от линии профиля к берегу ручья, находящегося примерно на 5 м ниже по высоте. Наличие проводящего слоя суглинков под телом **В** по данным РМТ-К подтверждается скважинами С-125, С-123 и С-53.

Также можно выделить проводящий блок **С** в приповерхностном высокоомном слое и отметить хорошее разрешение верхней границы высокоомного слоя **Е**. В левой части профиля геоэлектрический разрез имеет горизонтально-слоистое строение. Данные РМТ-К хорошо согласуются с данными бурения.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (номер проекта 21-47-04401).

ЛИТЕРАТУРА

- Алексеев ЕП, Вешев АВ, Яковлев АВ, 1978, Экспериментальное определение электрических параметров и оптимальный режим работы питающих линий. Геофизическая аппаратура, №66, с. 49-59.
- Вешев АВ, Ладатко ОН, Морозова ОМ, 1983, Нормальное поле вертикального магнитного диполя. Вопросы геофизики. Вып. 30. с. 159-204.
- Вешев АВ, Редько ГВ, Пертель МИ, 1971, Нормальное поле вертикального электрического диполя. Вопросы геофизики, №361, с. 26-42.
- Вешев АВ, Егоров ВА, 1966, О методе наблюдений и интерпретации результатов изучения полей радиовещательных станций. Вопросы геофизики, 329, с. 172-189.
- Гордеев СГ, Седелников ЕС, Тархов АГ, 1981, Электроразведка методом радиокип. М. Недра, – с. 132.
- Даев ДС, 1959, Об обработке и истолковании данных радиоволнового просвечивания. Изв. вузов «Геология и разведка», №6.
- Егорова ЛВ, Сапожников БГ, 1983, Оценка границ квазистационарного приближения для низкочастотного нормального электрического поля. Методы разведочной геофизики. НПО «Рудгеофизика», сборник научных трудов, с. 85-97.
- Методические рекомендации по применению аэроэлектроразведки методом СДВР, 1984, Л.: Рудгеофизика, с. 108.
- Мясницкий ОМ, Тимофеев ВМ, 1971, Радиоволновые методы геологического картирования. – Образ. Сер. геофиз. М., изд. ВИЭМС.
- Парфентьев ПА, Пертель МИ, 1991, Измеритель поверхностного импеданса на СВ-СДВ диапазоне. Низкочастотный волновод земля – ионосфера. Тезисы докладов на XV межведомственном семинаре по распространению километровых и более длинных радиоволн, Алма-Ата, с. 17-21.
- Пертель МИ, Круль ЭЛ, 1984, Применение метода РЭМП при проверке результатов дешифрирования аэро- и космоснимков. Вестн. Ленингр. ун-та. Сер. 7: Геология, география. Вып. № 6, с. 85-89.
- Петровский АА, 1925, Радио в горной разведке. Известия ИПГ, вып. 1, с. 135–152.
- Петровский АА, 1930, О непосредственном измерении длины электромагнитных волн и их поглощения в горных породах. Вестник электротехники, № 11-12, с. 329 – 339
- Петровский АД, 1971, Радиоволновые методы в подземной геофизике. М., Недра, с. 224.
- Плюснин МИ, Петровский АД, 1959, Радиоволновое просвечивание из разведочных скважин на поверхность. Тр. МГРИ, с. 36.
- Рогачев БВ, Седелников ЭС, Тархов АГ, 1965, Использование полей сверхдлинноволновых радиостанций при геофизической съемке методом радиокип. Изв. вузов. Сер. геология и разведка, № 6, с. 104–114.
- Способ геофизической разведки с помощью электромагнитных волн: а.с. 81529 СССР. № 374517/26-25; заявл. 31.03.48; опубл. в "Бюллетень изобретений" №1 за 1959 г.
- Тархов АГ, 1961, Основы геофизической разведки методом радиокип. М., Госгеолтехиздат, с. 215.
- Фролов АД, 1961, Об использовании полей ширококвещательных радиостанций при картировании контактов многолетнемерзлых толщ. Мерзлотные исследования, вып. 1. изд. МГУ, с. 227–235.
- Хмелевской ВК, Фролов АД, 1958, Измерения напряженности радиоволнового поля ширококвещательных станций для геологического картирования. Разведка и охрана недр, №5, с. 38-44.
- Хмелевской ВК, 1959, Радиоволновое просвечивание пород, расположенных между горными выработками. Вестн. МГУ, №3.
- Хмелевской ВК, Петрухин БП, Пушкарев ПЮ, 2010, Магнитотеллурика и радиоволновые интерференционные зондирования. Физика Земли, №9, с. 11-14.
- Шлыков АА, Сараев АК, 2014, Волновые эффекты в поле высокочастотного горизонтального электрического диполя. Физика Земли, №2, с. 100-113.
- Barfield RH, 1934, Some measurements of the electrical constants of the ground at short wavelength by the wave tilt method. Proc Inst. Electr. Electron. Eng., 75. P. 214 – 220.
- Bastani M, 2001, EnviroMT – a new Controlled Source/ Radio Magnetotelluric System. ACTA Universitatis Upsaliensis, Uppsala, p.179.
- Cloos E, 1934, Auto radio; an aid in geologic mapping. American Journal of. Science, №28(5), p. 255-268.
- Collett LS, Becker A, 1967, Radiohm method for earth resistivity surveying: Canada Patent

795919.

Dey A, Ward SH, 1970 Inductive sounding of a layered earth with a horizontal magnetic dipole. *Geophysics*, Vol. 35(4), p. 660-703.

Feldman CB, 1933, The optical behavior of the ground for short radio waves. *Proc. Inst. Electr. Electron. Eng.*, №21, p. 764 – 801.

Kalscheuer T, Pedersen LB, Siripunvaraporn W, 2008, Radiomagnetotelluric two-dimensional forward and inverse modelling accounting for displacement currents. *Geophys. J. Int.*, №175, p. 486-514.

Linde N, Pedersen LB, 2004, Characterization of a fractured granite using radio magnetotelluric (RMT) data. *Geophysics*, Vol. 69(5), p. 1155-1165.

McNeill, JD, Labson VF, 1989, Geological mapping using VLF radio fields, in *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*, Vol. 2, 521 – 640, edited by M. N. Nabighian, SEG.

Müller I, 1983, Anisotropic properties of rocks detected with electromagnetic VLF: *Int. symp. Field Measurements in Geomechanics*.

Paal G, 1965 Ore prospecting based on VLF-radio signals, *Geoexploration*, №3, p. 139-147.

Paal G, 1968, Very low frequency measurements in northern Sweden. *Geoexploration*, №6, p. 141-149.

Pederson L, Oian W, Dynesius L, Zhang P, 1994, An airborne tensor VLF system. From concept to realization. *Geophysical Prospecting*, №42, p. 863 – 883.

Ronka V, 1970, Electromagnetic prospecting apparatus utilizing VLF radio fields. *United States Patent 3.500.175*.

Ryu J, Morrison HF, Ward SH, 1970, Electromagnetic fields about a loop source of current. *Geophysics*, Vol. 35(5), p. 862-896.

Saraev, A., Simakov, A., Shlykov, A., Tezkan, B., 2017. Controlled-source radiomagnetotellurics: a tool for near surface investigations in remote regions. *Journal of Applied Geophysics*, №146, p. 228–237.

Shlykov A, Saraev A, Tezkan B, 2020, Study of a permafrost area in the Northern part of Siberia using controlled source radiomagnetotellurics. *Pure and applied geophysics*, №177, p. 5845-5859.

Simakov A, Saraev A, Antonov N, Shlykov A, Tezkan B, 2010, Mobile and controlled source modifications of the radio magnetotelluric method and prospects of their applications in the near-surface geophysics. *IGA WG 1.2 on Electromagnetic Induction in the Earth. 20th Workshop*, Giza, Egypt, September 18-24.

Smith-Rose RL, 1933, The electrical properties of soil for alternating currents at radio frequencies. *Proc. Roy. Soc. London*, №140, p. 359 – 377.

Tezkan B, 2008, Radiomagnetotellurics. *Groundwater geophysics: a tool for hydrogeology*. Reinhard Kirsch (ed.), Berlin, Heidelberg: Springer, p. 295-318.

Tezkan B, Saraev A, 2008, A new broadband radiomagnetotelluric instrument: application to near surface investigations. *Near Surface Geophysics*, p. 245-252.

Trüstedt, 1912, Ueber ersuchen mittels elektrizität. *Zs. F. prakt. Geologie*, №20, p. 159 – 162.

Turberg P, Müller I, Flury F, 1994, Hydrogeological investigation of porous environments by radiomagnetotelluric resistivity. *Journal of Applied Geophysics*, №31, p. 133-143.

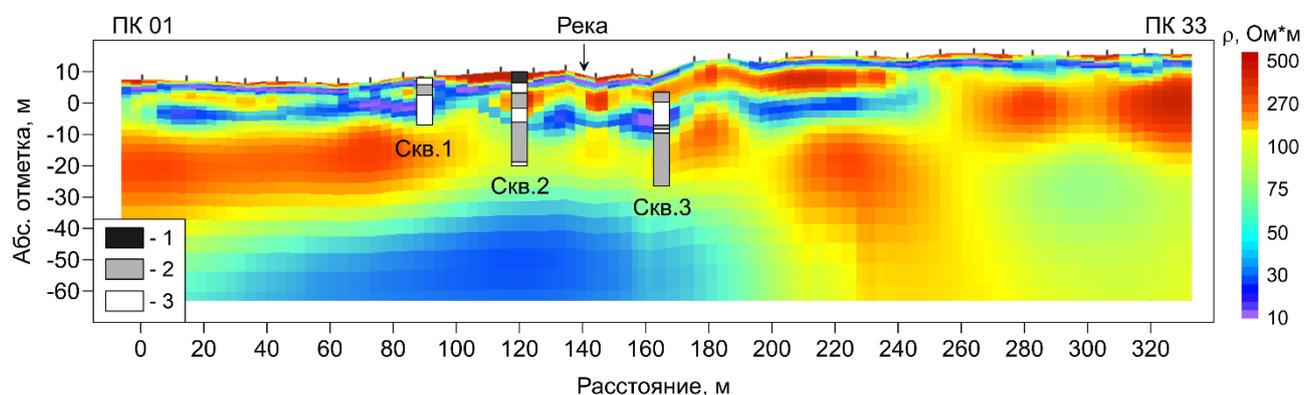


Рисунок 2. Геоэлектрический разрез, полученный по результатам 2D инверсии данных метода PMT-K. 1 – гравийно-щебенчатый грунт с песчаным заполнителем, 2 – мерзлый песок, 3 – суглинок с видимой льдистостью 2-10%.