

ПРАВИТЕЛЬСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(СПбГУ)
Кафедра Физики Земли
Направление 011200 – «Физика»
Основная образовательная программа «Физика»



Выпускная квалификационная работа по теме:
«ВЫЗВАННАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ ПРИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ
ЗОНДИРОВАНИЯХ НА МЕРЗЛОТЕ»

Выполнил:
студент 4 курса, 417 группы
Крехов Алексей Константинович
Научный руководитель:
к. ф.-м. н., доцент Бобров Н.Ю.

Санкт-Петербург
2017

Оглавление

Введение.....	3
Глава 1. БВП при ЭМЗ на мерзлоте.....	6
1.1 История изучения проблемы,.....	6
1.2 Теоретические основы метода зондирований становлением поля.....	9
1.3 Явление БВП.....	16
1.4 Влияние БВП на переходную характеристику	19
Глава 2. Численное моделирование ЗСБ для геоэлектрических разрезов в дельте реки Лена.....	21
2.1 Исходные полевые данные.....	21
2.2 Геоэлектрическая модель разреза по данным геологической обстановки.....	26
2.3 Математическое моделирование кривых становления.....	28
Глава 3. Инверсия результатов ЗСБ с петлями разных размеров.....	37
3.1 Многоразносные зондирования.....	37
3.2 Результаты совместной инверсии.....	40
3.3 Анализ полученных параметров БВП и сравнение с ранее опубликованными данными	44
Заключение.....	46
Список литературы.....	47

Введение

Криосфера - одна из географических оболочек Земли, характеризующаяся наличием или возможностью существования льда. Криолитозона - часть криосферы, самый верхний слой земной коры, характеризующийся отрицательной температурой пород и почв и наличием или возможностью существования подземных льдов. Основным породообразующим минералом в криолитозоне является лед (в виде пластов, жил), а также лед-цемент, «связывающий» рыхлые осадочные породы. В криолитозоне выделяются слой кратковременного и сезонного промерзания-протаивания (т. н. активный, или деятельный слой, иногда СТС — сезонно-талый слой) и многолетняя криолитозона («вечная мерзлота» или ММП — многолетнемерзлые породы). Криолитозона включает в себя мерзлые породы, морозные породы и охлаждённые породы. Охлаждённые породы засолены или насыщены солёными водами и рассолами с температурами ниже 0 °С (криогалинными водами). Многолетняя мерзлота явление глобального масштаба, общая площадь вечной мерзлоты на Земле около 35 млн. км², она занимает не менее 25 % площади всей суши земного шара. Содержание льда в промерзлых породах варьируется от нескольких процентов до 90 %. Около двух третьих территории России - районы многолетней мерзлоты. Наиболее широко она распространена в Восточной Сибири и Забайкалье.

Геофизические методы являются эффективным инструментом для неразрушающего контроля состояния геологической среды, и широко используются при исследованиях мерзлых пород и инженерно-геологических исследованиях в северных регионах. Применение геофизических методов позволяет получать информацию о состоянии мерзлых пород в условиях их естественного залегания. Электрические свойства мерзлой породы определяются такими параметрами, как температура, влажность, криогенная текстура, литологический состав. Наиболее чувствительны к изменениям этих

параметров методы геоэлектрики. Так, если при изменении температуры от 0 до -20 °С скорость продольных сейсмических волн в глинистом материале (влажность 10-15%) возрастает в среднем в два раза, то удельное электрическое сопротивление увеличивается на два и более порядка [1]. При этом электрические характеристики мерзлых пород (электропроводность, диэлектрическая проницаемость) часто обладают частотной дисперсией. Ввиду этого наиболее эффективными оказываются методы, использующие переменные электромагнитные поля.

Промерзание резко увеличивает неоднородность горной породы, как на макро, так и на микроуровне, что повышает вероятность возникновения поляризационных явлений, приводящих к частотной дисперсии. Для большинства мерзлых пород характерно явление быстро протекающей вызванной поляризации (БВП) в килогерцовом диапазоне частот. Наиболее известным проявлением БВП являются переходные процессы со сменой знака сигнала при электромагнитных зондированиях (ЭМЗ) становлением поля в ближней зоне (ЗСБ). Подобные процессы неоднократно наблюдались в районах распространения вечной мерзлоты (Якутия, В.А.Сидоров, п-ова Ямал, Тазовский, В.Ю.Задорожная, Бурятия, Н.О.Кожевников, Аляска, G.Walker). В частности, такие процессы были зафиксированы сотрудниками кафедры физики Земли СПбГУ при работах в дельте р. Лена в 2016 г.

В последнее время сообщения о проявлениях БВП публикуются все чаще, в большинстве случаев БВП рассматривают как помеху, затрудняющую исследования электропроводности среды в неполяризованном состоянии. Количество публикаций, посвященных влиянию БВП на результаты ЗСБ, а также моделированию и инверсии переходных характеристик с учетом БВП невелико.

Целью настоящей работы являлась оценка электрических свойств и параметров вызванной поляризации мерзлых пород для некоторых типов

мерзлых разрезов по данным ЗСБ с индуктивным источником (горизонтальной петлей). Были поставлены следующие задачи:

1. Дать обзор исследований проявлений БВП при электромагнитных зондированиях на мерзлоте.
2. Провести математическое моделирование ЗСБ для разрезов мерзлых пород, характерных для дельты р. Лена.
3. Выполнить инверсию реальных данных ЗСБ, полученных с петлями разных размеров.

Глава 1. БВП при ЭМЗ на мерзлоте.

1.1 История изучения проблемы.

Первые упоминания об аномалиях переходных процессов при ЭМЗ методом становления поля на мерзлоте появились в геофизической литературе в начале 1970-х годов. Искажения кривых спада, включая смену знака, наблюдались в интервале времен 0,1-1 мс. Это не могло быть объяснено в контексте классической теории метода становления [2]. Проблема была решена путем введения частотно-зависимой электропроводности пород, которая является следствием вызванной поляризации [3,4]. С начала 1980-х годов многочисленные эксперименты с ЭМЗ в Западной Якутии показали наличие искажений сигналов становления, включая смену знака, которые имели место в интервале времени от нескольких десятков до нескольких сотен микросекунд. Было высказано предположение, что эти искажения вызваны быстро затухающими поляризационными процессами в мерзлом грунте [5]. Природа этой поляризации до сих пор остается неясной. Предложено несколько механизмов, объясняющих поляризацию мерзлых пород: наличие крупномасштабных неоднородностей мерзлых пород, приводящих к поляризации Максвелла-Вагнера [6], диэлектрическая релаксация во льду [7], фрактальная геометрия текстуры мерзлых пород [8], неоднородность мерзлой среды на микро-уровне в сочетании с диэлектрической релаксацией во льду и незамерзших пленках связанной воды [9].

В.В. Стогний проводил полевых электроразведочные работы методом ЗСБ на территории Якутской кимберлитовой провинции. Он показал, что зондирования с переходными характеристиками, осложненными влиянием индукционно вызванной поляризации, приурочены к участкам развития высокольдистых пород. Была предложена методика проведения полевых работ и обработки материалов электромагнитных зондирований, обеспечивающая разделение эффектов индукции и поляризации, и показано, что использование

разнесенных установок “незаземленная генераторная петля–приемный индукционный датчик” позволяет ослабить влияние индукционно вызванной поляризации. Наиболее технологичной методикой, которая обеспечивает разделение процессов индукции и поляризации, является комбинированное зондирование соосной и разнесенной установками. Для определения параметров латерально неоднородных поляризующихся сред необходимо выполнение площадной съемки. [10].

Gerald G. Walker и Koji Kawasaki наблюдали два процесса смены знака при исследованиях методом ЗСБ с соосной установкой на Аляске. В их работе мощность мерзлых пород была порядка 500 м, исследования проводились как над твердой землей, так и над озерами. Аномальные процессы (смены знака) были связаны с явлением БВП. Исчезновение более быстрого поляризационного процесса над озерами было объяснено протаиванием пород на 10-20 метров. Хотя однозначно определить параметры БВП, в том числе после математического моделирования, не удалось, были определены эффективные удельные электрические сопротивления пород в разрезах [11].

Н.О. Кожевников и Е.Ю. Антонов проводили математическое моделирование переходных характеристик и инверсию данных ЗСБ [12]. В результате были получены многочисленные зависимости поведения кривых становления от электрических параметров среды, от модели среды и от параметров БВП. При помощи специально спланированных компьютерных экспериментов в рамках приближенной теории БВП было подтверждено, что пространственное распределение индуктивных и поляризационных процессов можно использовать для усиления или ослабления, а в общем случае, для разделения этих процессов. По результатам инверсии было показано, что использование установок с разным размером индуктивных петель при отсутствии априорной информации приближает получаемые модели к реальной.

1.2 Теоретические основы метода зондирования становлением поля.

Метод зондирования становлением поля относится к методам с искусственным (контролируемым) источником. Зондирование методом становления поля основано на изучении становления (установления) электромагнитного поля в среде при подаче импульсов тока в незаземленную петлю или заземленную линию. Применение чисто индуктивного источника (петли) в условиях многолетней мерзлоты имеет ряд преимуществ, связанных с отсутствием необходимости устройства заземлений. Длительность и характер становления поля связаны с распределением удельного электрического сопротивления пород на разных глубинах. Для возбуждения поля переходных процессов необходимо создать импульсное переключение тока в питающей (генераторной) петле. Стандартными импульсными сигналами являются:

- 1) Кратковременный импульс бесконечно большой амплитуды, описываемый δ -функцией Дирака;
- 2) Импульс включения или выключения, описываемый χ -функцией Хэвисайда;

Создать токовый импульс, который удовлетворительно описывается δ -функцией Дирака, сложно, поэтому на практике обычно используют ступенчатое возбуждение поля. При мгновенном переключении силы тока в питающей петле (в частности при мгновенном выключении тока) измеряемое на зажимах приемной петли напряжение спадает до нуля не мгновенно, а постепенно исчезает, изменяясь достаточно сложным образом (рис. 1).

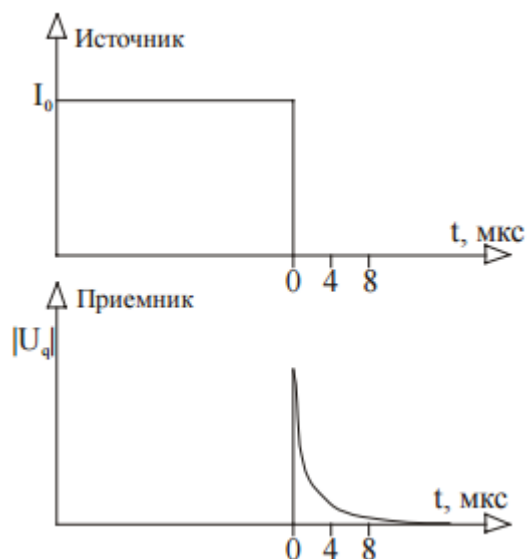


Рисунок 1. На верхнем графике представлена зависимость тока в генераторной петле от времени, соответствующая импульсу включения. На нижнем графике представлена зависимость напряжения, регистрируемого на зажимах приемной петли, от времени.

Это объясняется тем, что в момент выключения тока в проводящих областях разреза индуцируются вторичные токи (рис.2).

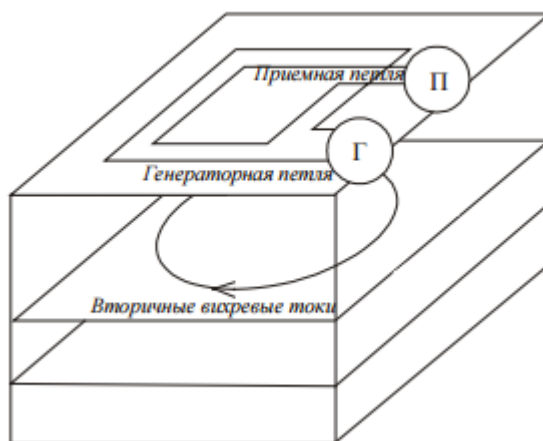


Рисунок 2. Модель возникновения вторичных(индуцированных) токов в среде при изменении магнитного потока.

Э.д.с. в приемной петле, в соответствии с законом электромагнитной индукции Фарадея, пропорциональна скорости изменения магнитного потока. В начальные моменты времени (на малых временах измерения после переключения тока в питающей петле), вторичные токи распределяются в

приповерхностной части разреза. Затем, с течением времени, (на больших временах измерения после переключения тока в питающей петле) токи начинают проникать в более глубокие слои, затухая с удалением от источника. Этот процесс носит название становления поля, а зависимость напряжения на зажимах измерительной петли от времени, прошедшего с момента переключения тока в питающей петле - кривой становления поля. Таким образом, глубина проникновения поля переходных процессов в землю определяется временем, прошедшим с момента выключения тока в генераторной петле, которое называется временем становления или задержки. Это свойство позволяет проводить зондирования, изучая зависимость компонент измеряемого электромагнитного поля от времени задержки. В зависимости от разности между питающими и приёмными установками, а также от изучаемых времён процесса становления поля, различают две модификации ЗС: в дальней (ЗСД) и в ближней (ЗСБ) зонах. В методе ЗСБ измерения проводятся вблизи источника, что приводит к увеличению локальности и детальности исследования. В этом состоит одно из важнейших преимуществ метода ЗСБ.

При геоэлектрических исследованиях - геологический разрез - обычно представляется в виде кусочно-однородного полупространства и называется геоэлектрической средой. Электрические свойства среды характеризуются электропроводностью σ , диэлектрической проницаемостью ε и магнитной проницаемостью μ . Базовой моделью при интерпретации данных зондирования обычно является модель горизонтально-слоистой среды, каждый слой которой характеризуется своим значением мощности и электрическими свойствами. Теоретическое изучение закономерностей поведения нестационарного электромагнитного поля [13] показало, что импульсное возбуждение передается в точку наблюдения двумя путями:

1. Возбуждение первого рода распространяется со скоростью электромагнитной волны в воздухе (со скоростью света) и достигает каждой точки пространства практически мгновенно. При этом

механизме амплитуда поля убывает с удалением от источника за счет геометрического затухания. Согласно принципу Гюйгенса, каждую точку земной поверхности можно при этом уподобить источнику вторичных волн, излучающему энергию синфазно с остальными источниками. Поле у земной поверхности, определяемое суммой полей вторичных источников, можно представить себе как суперпозицию плоских (неоднородных) волн, проникающих в землю практически по вертикали, поэтому можно считать, что распространяется плоская неоднородная волна. На достаточно большом расстоянии от источника или на очень малых временах задержки этот механизм является преобладающим.

2. Возбуждение второго рода распространяется от источника в земле, с поглощением и конечной скоростью, определяемой проводимостью разреза. Этот механизм можно описать как процесс диффузионного распространения вторичных вихревых токов, которые равномерно распределяются в пространстве с течением времени. При этом интенсивность вторичных вихревых токов с удалением от источника убывает.

На ранней стадии в спектре сигнала преобладают высокочастотные гармоники, поэтому вихревые токи концентрируются у поверхности земли. С увеличением времени становления высокочастотная часть поля затухает из-за омических потерь в проводящей среде и в спектре начинают преобладать низкочастотные гармоники. Вихревые токи проникают на большие глубины, а вследствие индукционного взаимодействия происходит выравнивание плотности токов в пределах всей проводящей толщи. Поэтому в поздней стадии процесса поле теряет волновые свойства и определяется суммарной продольной проводимостью разреза S . Переходный процесс завершается установлением стационарного поля (при включении тока в источнике) или затуханием поля до нулевого значения (при выключении тока). Итак, на ранней стадии переходного

процесса в земле доминирует возбуждение первого рода. Затем поля, распространяющиеся двумя путями (по воздуху и в земле и только в земле), накладываются одно на другое, и интенсивность вторичного поля достигает максимума. В поздней стадии переходного процесса возбуждение первого рода затухает полностью, и весь процесс определяется возбуждением второго рода.

Рассмотрим реакцию среды на ступенчатое возбуждение, которое можно задать, используя функцию Хевисайда. При включении ток в источнике j задается выражением $j(t) = j \cdot \chi(t)$, при выключении $j(t) = j \cdot [1 - \chi(t)]$, где $\chi(t)$ – функция Хевисайда:

$$\chi(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t \leq 0, \\ 1 & \text{при } t > 0. \end{cases}$$

Пусть исследуемая среда обладает вещественными, не зависящими от частоты и силы тока параметрами. Теоретически показано [Каменецкий, 1997], что чем больше время становления поля t , тем меньше роль токов смещения, вклад которых характеризует диэлектрическая проницаемость, и при условии $t \gg \varepsilon\rho$ ими можно пренебрегать. Тогда, для решения прямой задачи становления поля, то есть расчета компонент нестационарного поля над известным разрезом, нужно сначала решить уравнение Гельмгольца для вектор-потенциала \vec{A} в квазистационарной области для гармонического поля:

$$\Delta \vec{A} + k^2 \vec{A} = 0,$$

где k – волновое число, в квазистационарном случае $k = \sqrt{i\omega\mu/\rho}$, ω – круговая частота. Решение во временной области можно получить из решения в частотной области с помощью обратного преобразования Лапласа, с учетом спектра функции Хевисайда. Поскольку преобразование Лапласа функции Хевисайда

$$L\chi(t) = \chi(s) = \frac{1}{s},$$

при этом $s \equiv i\omega$, то в случае неустановившегося поля

$$\bar{A}(t) = L^{-1}(\bar{A}(s)\chi(s)) = \frac{1}{2\pi i} \int_{c-i\infty}^{c+i\infty} \frac{\bar{A}(s)}{s} e^{st} ds \quad .$$

Для примера рассмотрим векторный потенциал гармонического электрического диполя в однородной среде, который определяется выражением

$$\bar{A} = \frac{\vec{P} e^{ikr}}{4\pi r} ,$$

где $\vec{P} = \vec{j} \cdot l$ - момент диполя (l - расстояние между заземлениями, j - амплитуда тока в линии), r - расстояние до точки наблюдения.

Используя таблицы преобразования Лапласа, можно получить векторный потенциал во временной области:

$$L^{-1} \frac{\bar{A}}{s} = \frac{\vec{P}}{4\pi r} (1 - \Phi(u)) ,$$

где $u = r \sqrt{\frac{\mu}{2t\rho}}$, а $\Phi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^u e^{-\frac{x^2}{2}} dx$ - так называемый «интеграл вероятности».

Следует помнить, что в сигнале в любой момент времени присутствует весь спектр частот, только на ранних временах в нем преобладают высокие частоты, а на поздних - низкие.

Для методики электромагнитных зондирований существенно, что нестационарное поле по-разному ведет себя в разных зонах. В гармоническом поле понятие зоны определяется отношением расстояния r от источника к длине волны λ . В квазистационарном гармоническом поле длина волны $\lambda = 2\pi \sqrt{2\rho/(\mu\omega)}$. Во временной области аналогом длины волны является параметр $\tau = 2\pi \sqrt{2t\rho/\mu}$, называемый параметром становления и имеющий размерность длины (отметим, что связь с введенной ранее безразмерной

переменной u дается формулой $u = 2\pi r / \tau$. Большие значения отношения τ/r соответствуют ближней зоне (поздняя стадия становления, малые расстояния), а малые значения τ/r – дальней зоне (ранняя стадия, большие расстояния).

Зондирование в дальней зоне (ЗСД) основано на изучении нестационарного поля, индуцированного удаленным источником (возбуждение первого рода). В дальней зоне для описания поля можно пользоваться формулами для плоской волны, аналогично тому, как это делается при частотных зондированиях (ЧЗ) или магнитотеллурических зондированиях (МТЗ), необходимо только выполнить переход во временную область. Зондирование в ближней зоне (ЗСБ) использует неустановившееся поле, обусловленное возбуждением второго рода. Измерения выполняются вблизи источника или в середине генераторной петли. Для осесимметричной установки петля-петля в качестве параметра r принимают размер большой петли. Физика переходного процесса в ближней зоне определяет специфику проведения и интерпретации данных этих зондирований, которые часто выделяются в качестве отдельного метода индуктивной электроразведки. Как и в других методах электроразведки, в методе ЗСБ основным методом интерпретации кривых зондирования является метод подбора. Метод подбора заключается в последовательном изменении геоэлектрической модели разреза и расчете прямой задачи для нее до тех пор, пока экспериментальная и теоретическая кривые не совпадут с требуемой точностью.

В каждый момент времени после выключения тока в источнике вихревые токи в среде охватывают лишь некоторую ограниченную область полупространства, тогда как вне этой области электромагнитное возбуждение еще не распространилось. Поэтому измеряя э.д.с. становления в какой-то момент времени, мы получаем информацию о разрезе лишь до некоторой глубины. В индуктивной электроразведке принято характеризовать глубину исследований толщиной скин-слоя. Она определяется как толщина слоя

постоянных токов, создающих на поверхности магнитное поле, равное магнитному полю переменных токов, текущих во всем полупространстве, и применительно к зондированиям становлением поля оценивается по формуле [13]:

$$\delta = 2 \sqrt{\frac{\rho t}{\pi \mu}}$$

Нужно понимать δ как толщину той части полупространства, токи в пределах которой дают основной вклад в измеряемое на поверхности поле. В случае горизонтально-слоистого разреза в формулу будет входить кажущееся сопротивление и вычисляемая по ней толщина скин-слоя приобретает смысл эффективной глубины исследований.

Эффективная глубина – мгновенный параметр, характеризующий теоретическую глубину зондирования, достигнутую к моменту времени t . Если же говорить о предельной глубине исследований становлением поля, то она определяется прежде всего соотношением сигнал-шум и зависит от удельного электрического сопротивления среды, мощности источника, уровня собственных шумов аппаратуры и уровня внешних помех в районе исследований.

К аппаратуре, применяемой для измерения становления поля в ближней зоне, предъявляются следующие требования:

- большой динамический диапазон, связанный с необходимостью измерения сигнала, различающегося на 5-6 порядков;
- большая чувствительность и помехоустойчивость, так как улучшение детальности и производительности работ методом ЗСБ связано с уменьшением размеров петель, а значит и с уменьшением уровня измеряемого сигнала.

1.3 Явление БВП.

Поляризацией называется состояние вещества, при котором оно приобретает электрический момент. Электрический момент это векторная физическая величина, характеризующая электрические свойства системы заряженных частиц, в смысле создаваемого ею поля и действия на нее внешних полей. В классическом случае вызванную поляризацию можно определить как электрохимическое и электрокинетическое явление, происходящее под действием электрического тока и сопровождаемое возникновением вторичных электродвижущих сил. Классический метод ВП предполагает изучение поляризационных процессов, времена становления которых находятся в интервале 1-5 минут и более. Проявление поляризации в микро- и миллисекундном диапазоне часто называют быстрой вызванной поляризацией. Индукционные же процессы имеют времена становления на порядки меньше времен становления классических процессов ВП. Важной особенностью проявления БВП при ЗСБ, является присутствие в измеряемом сигнале процессов как поляризационной, так и индукционной природы.

Проще всего продемонстрировать процесс возникновения БВП на примере слабо поляризующейся, хорошо проводящей среды [12]. Эта модель подходит для описания любого однородного в отношении поляризуемости и удельного электрического сопротивления массива. На рис. 3, а изображена незаземленная петля 1, по которой протекает установившийся ток. Петля располагается на поверхности проводящей, неполяризующейся среды с удельной электропроводностью σ_0 . В момент времени $t = 0$ ток в петле мгновенно выключается, при этом первичное магнитное поле B_1 петли так же мгновенно убывает от установившегося значения до нуля. В этот момент в подстилающей петлю геологической среде возникают вихревые токи, создающие вихревое магнитное поле B_2 , которое на ранних временах не отличается от магнитного поля, существовавшего в среде до выключения тока в петле. Пусть в пределах некоторого элемента 2 среды плотность вихревых

токов составляет $j_{\text{вихр}}$. Эти токи представляют собой свободные заряды 3 (ионы), перемещающиеся под действием вихревого электрического поля $E_{\text{вихр}}$, которое контролируется омической удельной электропроводностью σ_0 :

$$E_{\text{вихр}} = \frac{j_{\text{вихр}}}{\sigma_0}.$$

Теперь предположим что область среды 2 содержит область или включения 4, в котором имеются связанные заряды, т. е. среда способна поляризоваться. Если, как предполагалось, поляризуемость невелика, распределение вихревых токов и, соответственно, $E_{\text{вихр}}$, по-прежнему контролируется распределением омической удельной электропроводности σ_0 . В этом случае нужно принять, что $E_{\text{вихр}}$ является воздействием, а поляризация включений со связанными зарядами - откликом на него.

Под действием $E_{\text{вихр}}$ в области 4, где имеются связанные заряды, возникает ток поляризации $I_{\text{пол}}$, или ток смещения, пропорциональный в соответствии с законом электромагнитной индукции Фарадея скорости изменения $E_{\text{вихр}}$. Токи поляризации, как и вихревые, создают магнитное поле, которое вносит вклад в суммарную переходную характеристику среды. Сначала поляризационные токи имеют такое же направление, как и вихревые (рис. 3, б) В какой-то момент времени, когда дальнейшее разделение связанных зарядов становится невозможным, процесс поляризации заканчивается, и $I_{\text{пол}} = 0$ (рис. 3, в).

После того как вследствие потерь интенсивность вихревых токов уменьшается на много порядков, внешнее воздействие на связанные заряды исчезает (рис. 3, г) и они возвращаются к равновесному распределению, т. е. возникает ток поляризации, протекающий в обратном направлении, противоположном первоначальному (см. рис. 3, б). На этой стадии вторичное магнитное поле имеет отрицательную полярность.

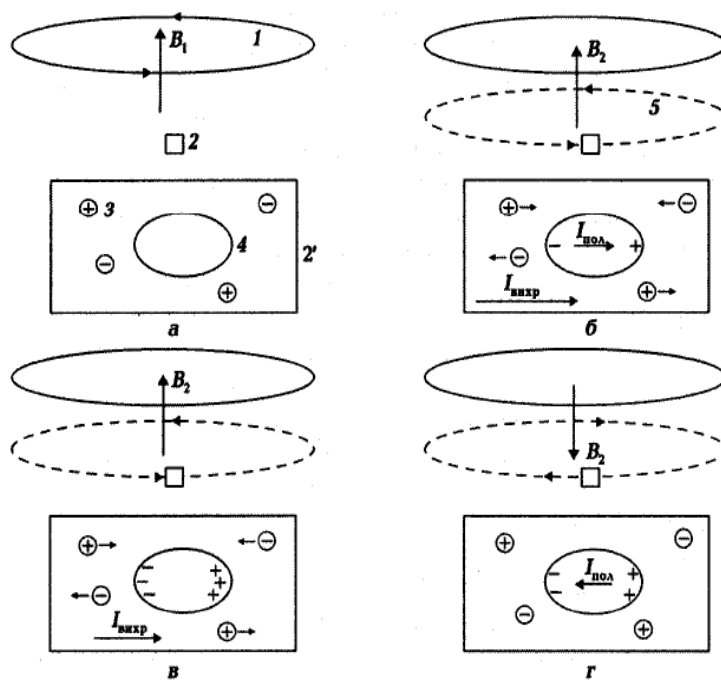


Рисунок 3. БВП в массиве горных пород: а – до выключения тока в генераторной петле свободные и связанные заряды распределены равномерно, токи в земле отсутствуют; б – при выключении и в течение некоторого времени после выключения тока в петле, как свободные, так и связанные заряды перемещаются, образуя ток, протекающий в положительном направлении; в – в некоторый момент времени разделение связанных зарядов прекращается, ток поляризации равен нулю; г – на поздних временах вихревое электрическое поле уменьшилось настолько, что уже не может поддерживать разделение связанных зарядов, которые возвращаясь в состояние равновесия, создают поляризационный ток, направленный в отрицательном направлении; 1 – генераторная петля; 2 – элемент среды; 2' – тот же элемент, показанный в более крупном масштабе; 3 – свободный заряд; 4 – поляризующееся включение; 5 – линия тока; B_1 – первичное поле; B_2 – вторичное поле; $I_{вихр}$ – вихревой ток; $I_{пол}$ – ток поляризации [12].

Области связанных зарядов могут быть представлены разными объектами – вкрапленными в ионопроводящую среду электронно-проводящими минералами, системами пор разного диаметра с содержащимися в них водными растворами электролитов, связанными со стенками пор и поверхности глинистых частиц двойными электрическими слоями и т. п.

1.4 Влияние БВП на переходную характеристику.

Влияние поляризационных токов на переходную характеристику проводящей и поляризующейся среды или объекта зависит от того, какие токи – вихревые или поляризационные – затухают быстрее. А значит необходимо составить по возможности полное представление о том, как проявления БВП изменяются в зависимости от параметров геологического разреза, установки, диапазона времен регистрации и других факторов. К сожалению, на сегодняшний день неизвестны природные объекты, электрические свойства которых были бы изучены настолько полно, чтобы упомянутую выше задачу можно было бы решить средством натурального моделирования. Поэтому при оценке возможных проявлений БВП приходится ориентироваться преимущественно на компьютерные эксперименты, основанные на математическом моделировании переходных процессов в горизонтально-слоистых проводящих поляризующихся средах. В большинстве случаев решение сначала ищется в частотной области, после преобразования Фурье оно трансформируется во временную область. Учет БВП осуществляется путем введения комплексно зависящей от частоты удельной электропроводности $\sigma(\omega)$. В большинстве случаев зависимость представляется формулой Коула – Коула [14]:

$$\sigma(\omega) = \sigma_0 \frac{1 + (i\omega\tau)^c}{1 + (1 + \eta)(i\omega\tau)^c},$$

где σ_0 – удельная электропроводность на постоянном токе, См/м; $i = \sqrt{-1}$; ω – частота; η – поляризуемость ($0 \leq \eta \leq 1$); τ – время релаксации, с; c – показатель степени. В данной работе численное моделирование и инверсия данных ЗСБ мерзлой поляризующейся среды проводились с использованием модели Коула – Коула. Расчеты переходных характеристик с учетом частотной дисперсии электропроводности позволяют выяснить, как проявления БВП изменяются в зависимости от параметров среды и размеров установки [13].

Глава 2. Численное моделирование ЗСБ для геоэлектрических разрезов в дельте реки Лена

2.1 Исходные полевые данные.

Полевые данные были получены сотрудниками кафедры физики Земли СПбГУ при работах в дельте р. Лена в апреле 2016 г [15]. Сам по себе такой объект, как дельта реки, и процесс меандрирования русла в известном смысле являются источниками неоднородностей. А ввиду того что дельта находится в зоне многолетней мерзлоты и разрез сложен в значительной мере глинистыми породами со шлировыми криотекстурами, складываются благоприятные условия для возникновения БВП. Одной из целей выполненных весной 2016 года геофизических работ была оценка мощности талика под протоками дельты Лены (Оленекская и Большая Туматская) в местах, где выполнялось бурение. Исследования проводилось двумя геофизическими методами – методом георадиолокации (георадар) и методом ЗСБ с вертикальным магнитным диполем в качестве источника. Работы методом ЗСБ выполнялись с аппаратурой TEM-FAST (производство компании АЕМР, Голландия), предоставленной Ресурсным центром «Геомодель» СПбГУ. Использовалась однопетлевая установка с квадратными петлями 25*25 и 50*50 метров. Георадарные работы выполнялись с радаром SIR (производство компании GSSI, США), который является частью оборудования, предоставляемого Арктическим Центром ИНГГ СО РАН на острове Самойловский. Основным инструментом при работах была антенна с центральной частотой 200 МГц.

Следует отметить, что минерализация воды в протоках Лены в зимний период довольно высока. Ввиду сильной минерализации, по георадарным данным можно точно определить лишь толщину льда. Электропроводность воды, определенная в лаборатории по пробам, взятым из лунок и майн, достигает 500 мкСм/см, что соответствует удельному электрическому сопротивлению воды 20 Ом*м. Это приводит к повышенному затуханию радарного сигнала и не позволяет определить положение дна протоков на

глубинах более 5 м с антенной 200 МГц. Мощность льда на протоке достигает 2 м. Мощность предполагаемого талика под протокой оценивается величиной порядка нескольких метров. Данные бурения в береговой части показали, что разрез до глубины около 20 м состоит из чередования глинистых и песчаных прослоев, с высоким содержанием древесного материала и многочисленными ледяными шлирами (данные М.Григорьева, Институт мерзлотоведения СО РАН). На радарограммах (рис. 4, а; б) в береговой части прослеживаются геологические границы, видны характерные отражения, которые, по данным бурения, связаны с ледяными шлирами (красные стрелки указывают на слои с повышенной льдистостью в буровых колонках).

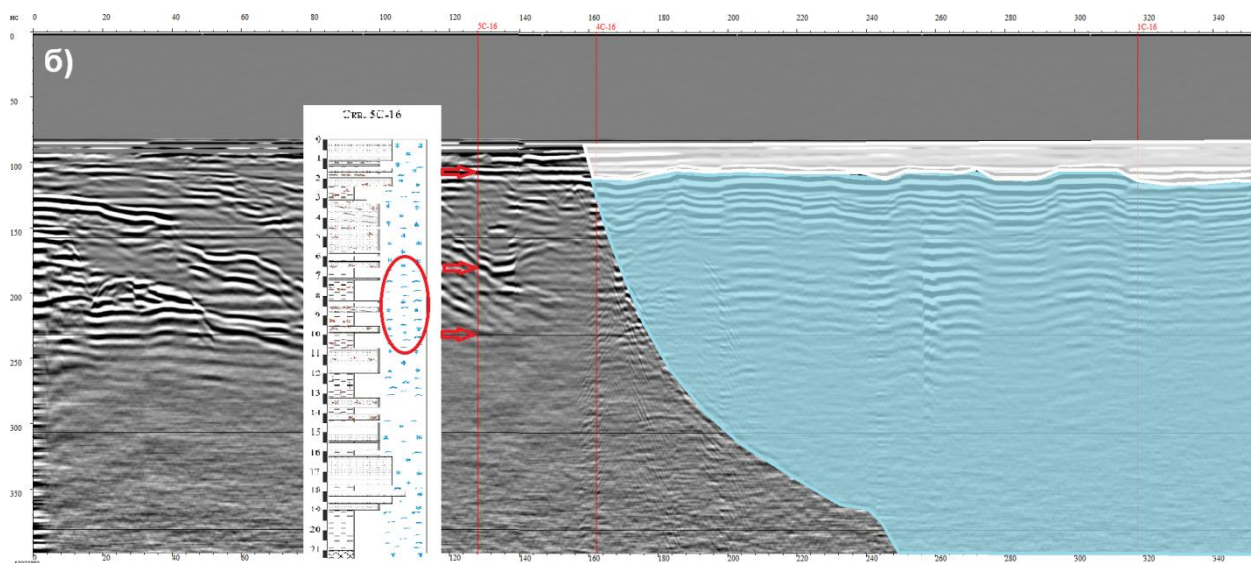
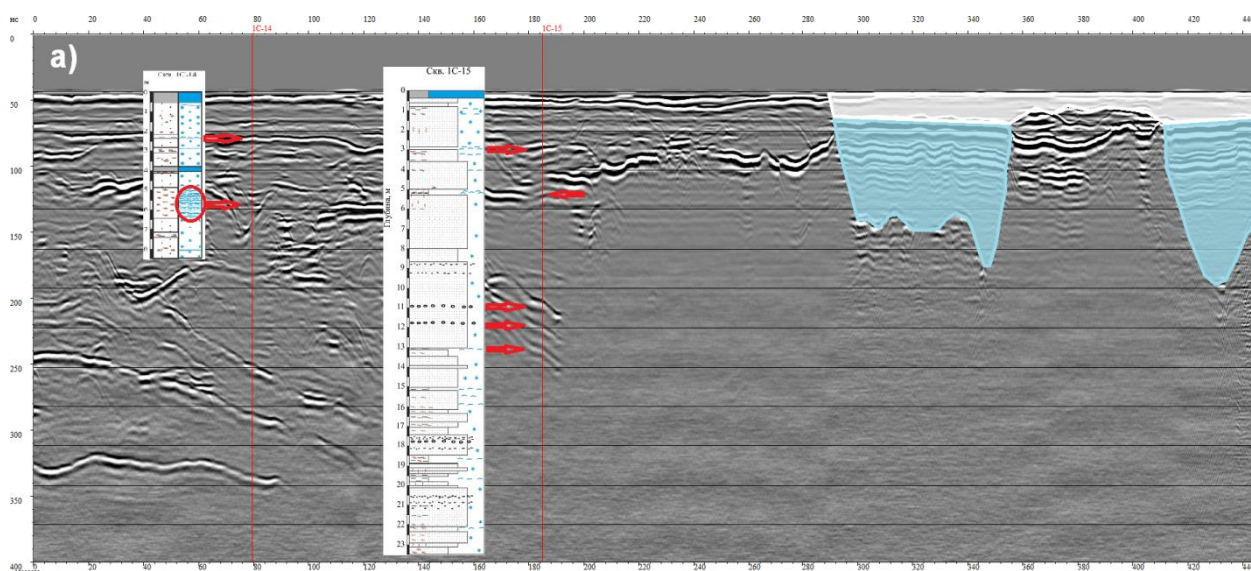


Рисунок 4. а, б – радарограммы, полученные с антенной 200 МГц на профилях, пересекающих берег Большой Туматской протоки, совмещенные с буровыми колонками. Красными стрелками отмечены характерные отражения на радарограммах, которым сопоставлены слои повышенной льдистости. Горизонтальная ось - расстояние, м; вертикальная ось – время, нс. Голубым и белым цветом выделены водная толща и ледяной покров.

Кривые спада э.д.с. становления (кривые зондирования), полученные в дельте Лены, повсеместно осложнены процессами БВП и неоднократно меняют знак. Для кривых зондирования, полученных в береговой зоне, характерны два поляризационных процесса с различными временами релаксации. Один процесс проявляется в диапазоне 10-100 мкс, другой – в диапазоне 100-1000 мкс (рис. 5).

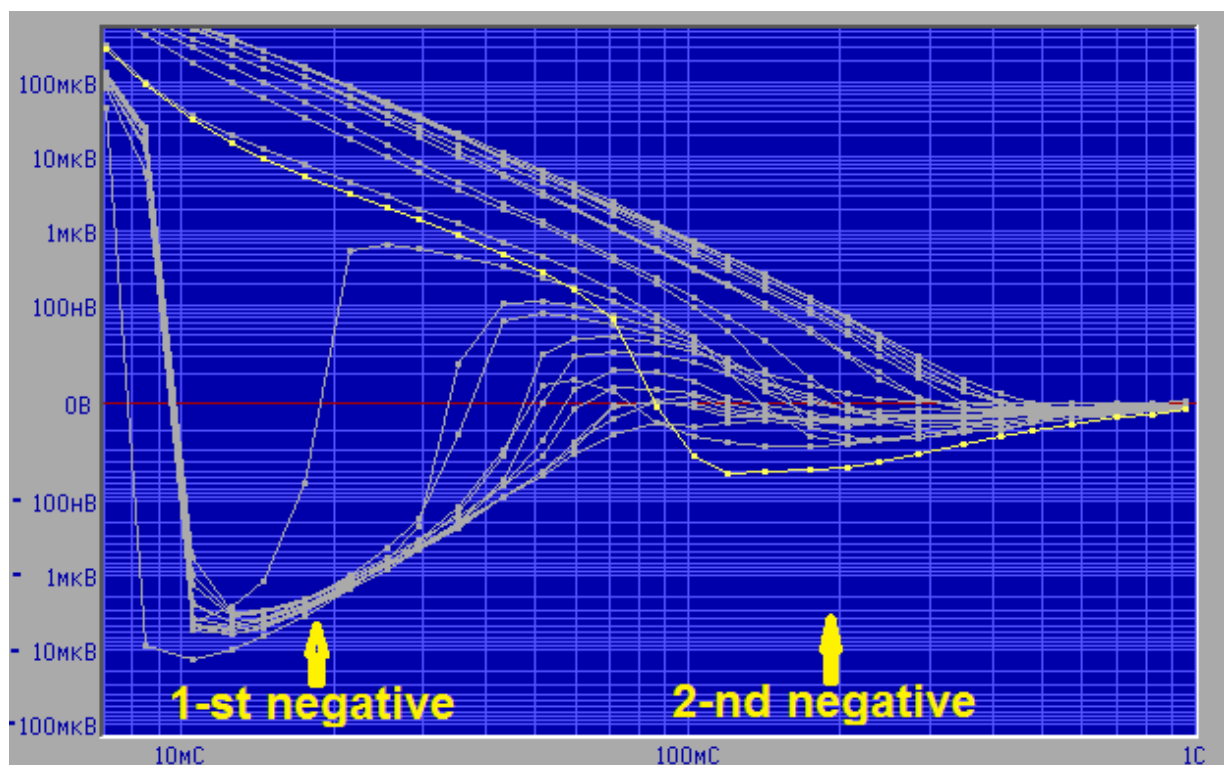


Рисунок 5. Набор кривых зондирования ЗСБ, полученных на профиле, пересекающем Оленекскую протоку (петли 50*50 м). Горизонтальная ось - время, с, вертикальная ось - напряжение, В. Можно выделить два процесса ВП, изменяющих знак э.д.с. становления.

Было выявлено, что когда установка ЗСБ приближается к берегу протоки со стороны суши, первый поляризационный процесс становится менее

выраженным и полностью исчезает при выходе на лед протоки. Второй процесс сохраняется на кривых, полученных на льду протоки (Рис. 6). Такое поведение кривых характерно для всех геофизических профилей, пересекающих исследованные протоки дельты (Б.Туматскую и Оленекскую). Это указывает на присутствие мерзлых пород под руслами, так как при отсутствии в разрезе признаков оруденения вызванная поляризация может быть связана только со специфическим криогенным строением мерзлой породы.

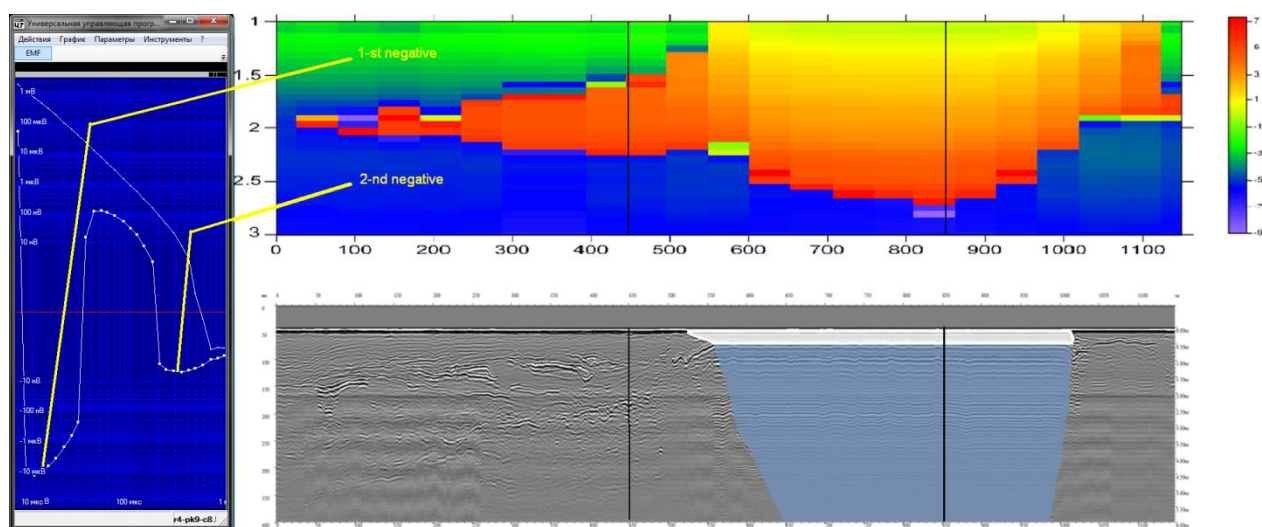


Рисунок 6. Слева - пример переходного процесса, записанного на профиле, пересекающем Оленекскую протоку, на двух участках, обозначенных вертикальными черными линиями на рисунках справа. Горизонтальная ось – время, с, вертикальная ось – напряжение, В. Справа: сверху – визуализация сигнала становления, измеренного на профиле, пересекающем Оленекскую протоку, с шагом 50 м. Горизонтальная ось – расстояние, м, вертикальная ось – логарифм времени, измеренного в мкс. Цветовая гамма: красный и желтый – положительный сигнал, зеленый и синий – отрицательный сигнал, связанный с поляризационными процессами в мерзлых породах. Внизу: радарограмма, снятая поперек протоки (антенна 200 МГц); вода выделена синим цветом, лед – белым.

Можно предположить, что отрицательный сигнал становления первого процесса уменьшается и исчезает над протокой либо из-за шунтирования хорошо проводящей водной толщей, либо ввиду протаивания мерзлых пород (наличие талика).

Связать БВП с какой-либо определенной структурной единицей в разрезе, или с определенным типом мерзлых пород, по имеющимся данным невозможно. Глубже 20 м данных о строении разреза пока нет. По этой причине при составлении обобщенного геоэлектрического разреза мы опирались исключительно на данные ЗСБ и литературные данные об электропроводности глинистых пород.

2.2 Геоэлектрическая модель разреза по данным геологической обстановки.

Первым шагом для построения моделей геоэлектрических разрезов стал подбор моделей для данных ЗСБ, полученных на профиле 3 с петлей 50*50 м, для берегового участка (150 м от берега) и участка на протоке (150 м от берега). Расчет прямой задачи производился с помощью программного обеспечения TEM-RES. Как будет показано ниже в гл.4, в верхней части разреза необходимо допустить существование неполяризующегося слоя. Первая модель была построена по вышеперечисленной информации. В разрез включили два поляризующихся слоя мощностью 10 м каждый с разными параметрами БВП. В рамках эквивалентности, была получена модель для берегового геоэлектрического разреза (таб. 1) и модель для геоэлектрического разреза на протоке (таб. 2):

Таблица 1. Модель для берегового разреза. Построена по результатам совместной инверсии для петель 50*50 м для разрезов на берегу и под протокой. Здесь и далее: N - номер слоя; ρ – эффективное удельное электрическое сопротивление пород слоя, Ом-м; h – мощность слоя, м; η – поляризуемость слоя ($0 \leq \eta \leq 1$); τ – постоянная времени, мкс; c – показатель степени экспоненты.

N	ρ , Ом-м	h , м	η	τ , мкс	c
1	500	16	0	-	-
2	700	10	0,67	23,4	1
3	1000	10	0,45	451	1
4	600	inf	0	-	-

Таблица 2. Модель разреза под протокой. Построена по результатам совместной инверсии для петель 50*50 м для разрезов на берегу и под протокой.

N	ρ , Ом-м	h , m	η	τ , мкс	c
1	500	2	0	-	-
2	25	10	0	-	-
3	100	4	0	-	-
4	700	10	0,67	23,4	1
5	1000	10	0,45	451	1
6	600	inf	0	-	-

На рис.7 приведено сравнение полевых данных и результатов подбора моделей.

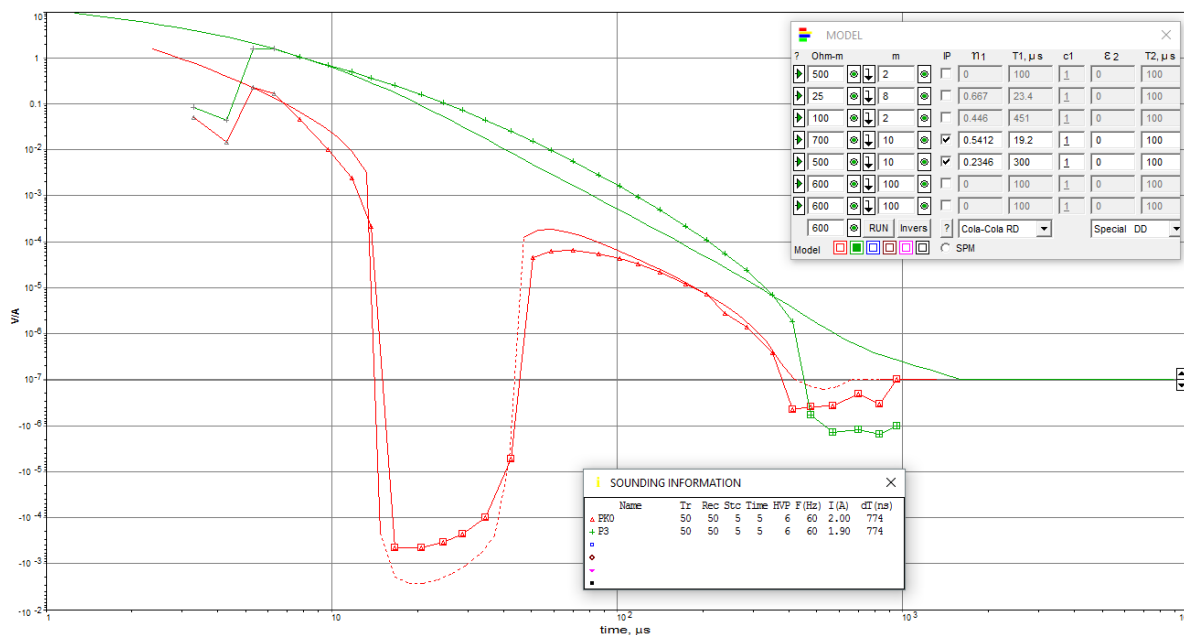


Рисунок 7. Результаты подбора для береговой зоны и зоны над протокой. Красные точки и сплошная линия – данные ЗСБ для берегового разреза. Красная штрихованная линия – расчетная кривая для берегового разреза. Зеленые точки и сплошная линия – данные ЗСБ для разреза на протоке. Зеленая штрихованная линия – расчетная кривая для разреза на протоке. По вертикальной оси э.д.с. становления, нормированная на ток в генераторной петле, В/А. По горизонтальной оси – время, с.

Параметры геоэлектрической среды, полученные лишь в результате подбора по данным для двух точек позволяют воспроизвести поведение более

раннего процесса смены знака на берегу и на протоке (процесс исчезает) и неудовлетворительно описывают поведение более позднего процесса смены знака на берегу (слабая амплитуда) и на протоке (исчезает).

2.3 Математическое моделирование кривых становления.

Для выяснения закономерностей поведения кривых становления в присутствии БВП для модели (таб. 1) выполнено математическое моделирование ЗСБ в зависимости от параметров поляризуемой среды (мощности слоев; их удельного электрического сопротивления; постоянной времени поляризационных процессов; поляризуемости). Первым поляризационным процессом был назван процесс, проявляющийся на более ранних временах и отнесенный ко второму слою модели. Вторым поляризационным процессом, соответственно, процесс, проявляющийся на более поздних временах. Моделирование производилось с помощью программы TEM-RES путем последовательного изменения одного из параметров разреза и построения серий кривых. Для совместного построения кривых и анализа зависимостей была написана вспомогательная программа в MatLab. Для наглядности из всех смоделированных кривых для каждого параметра выбирались по три кривые, наилучшим образом иллюстрирующие особенности изменения кривых при изменении параметров. Моделировались зондирования с совмещенными петлями 50*50 м.

Результаты моделирования кривых спада э.д.с. становления при изменении мощности второго слоя, содержащего первый поляризационный процесс, представлены на рис. 8. Изменение мощности представлено кривыми со значениями $h = 10, 30$ и 100 м. Здесь и далее: кружками будут обозначаться участки кривых с положительным знаком э.д.с. становления; окружностями будут обозначаться участки кривых с отрицательным знаком э.д.с. становления.

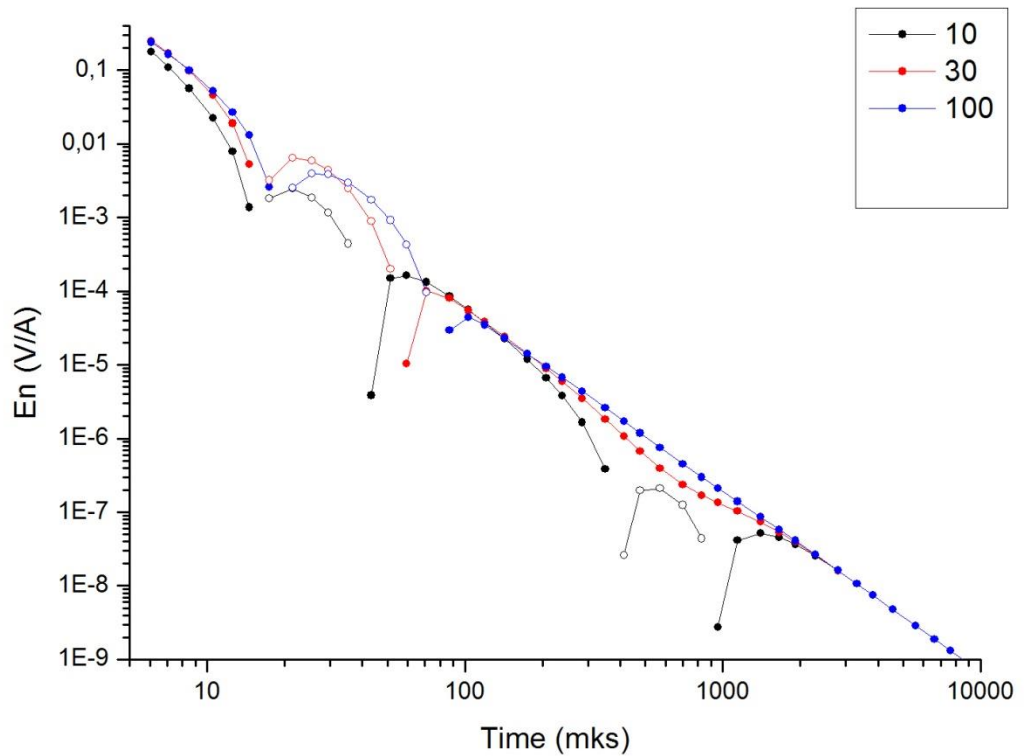


Рисунок 8. Кривые ЗСБ при изменении мощности 2-го слоя. Горизонтальная ось – время, мкс. Вертикальная ось – математически смоделированная э.д.с. становления, нормированная на силу тока в генераторной петле, В/А. В легенде указаны приведены значения h второго слоя, м.

Видно, что при увеличении мощности изменяемого слоя второй поляризационный процесс исчезает, а интервал смены знака, вызванный влиянием первого процесса, становится шире.

Результаты математического моделирования кривых спада э.д.с. становления при изменении удельного электрического сопротивления второго слоя (с первым поляризационным процессом) приведены на рис. 9. Изменение сопротивления представлено кривыми со значениями $\rho = 300, 500$ и 1200 Ом*м.

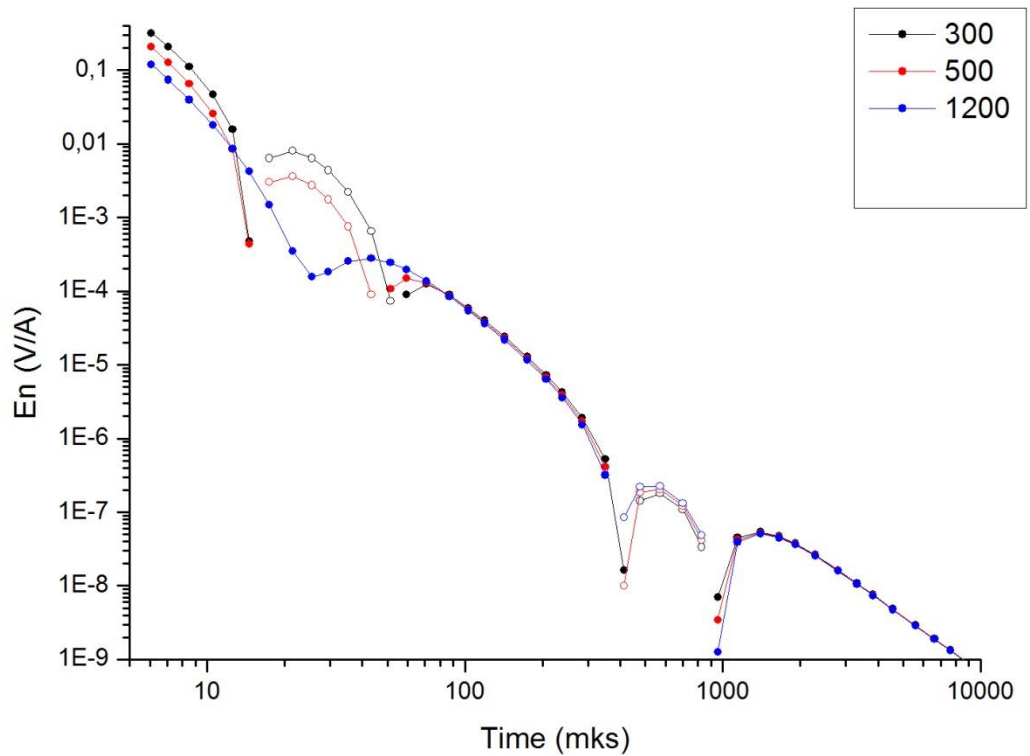


Рисунок 9. Кривые ЗСБ при изменении удельного электрического сопротивления 2-го слоя. В легенде приведены значения ρ второго слоя, Ом-м.

Видно, что при увеличении удельного электрического сопротивления пород второго слоя, амплитуда первого поляризационного процесса уменьшается, однако изменения слабо влияют на второй процесс.

Результаты математического моделирования кривых спада э.д.с. становления при изменении поляризуемости первого процесса во втором слое приведены на рис. 10. Изменение поляризуемости представлено кривыми со значениями $\eta = 0,1, 0,4$ и $0,8$.

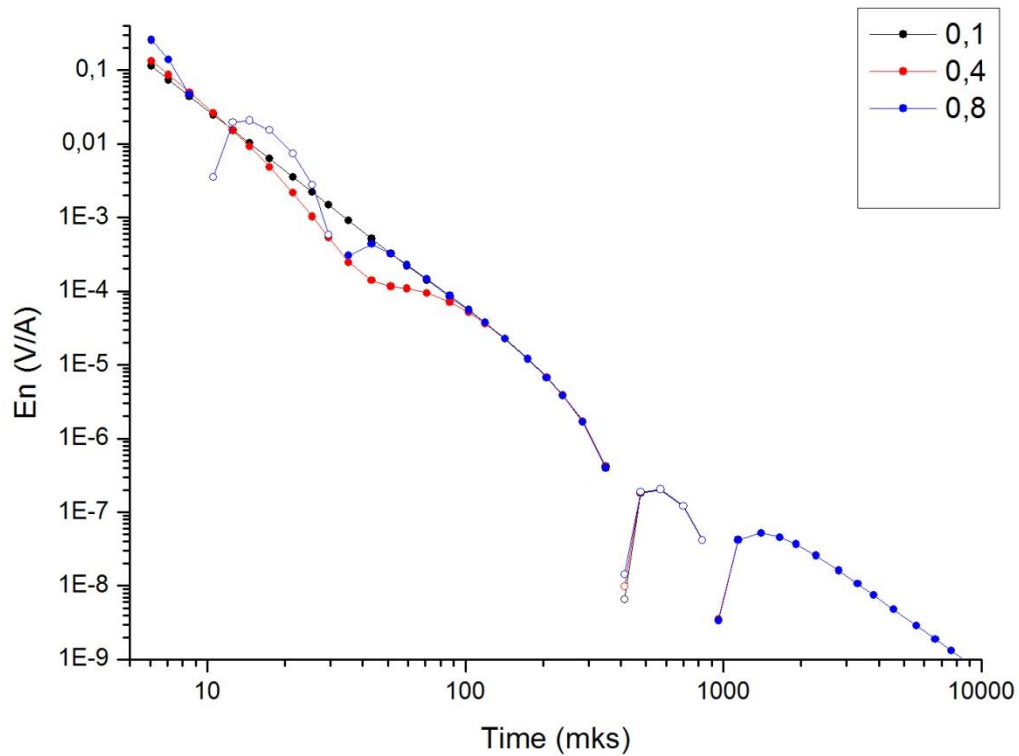


Рисунок 10. Кривые ЗСБ при изменении поляризуемости 2-го слоя. В легенде приведены значения η первого процесса.

Видно, что при уменьшении поляризуемости первого процесса его влияние на кривые спада уменьшается. Изменения не влияют на второй процесс.

На рис. 11 приведены результаты математического моделирования кривых спада э.д.с. становления при изменении постоянной времени поляризационного процесса во втором слое. Изменение постоянной времени представлено кривыми со значениями $\tau = 10, 30$ и 100 мкс.

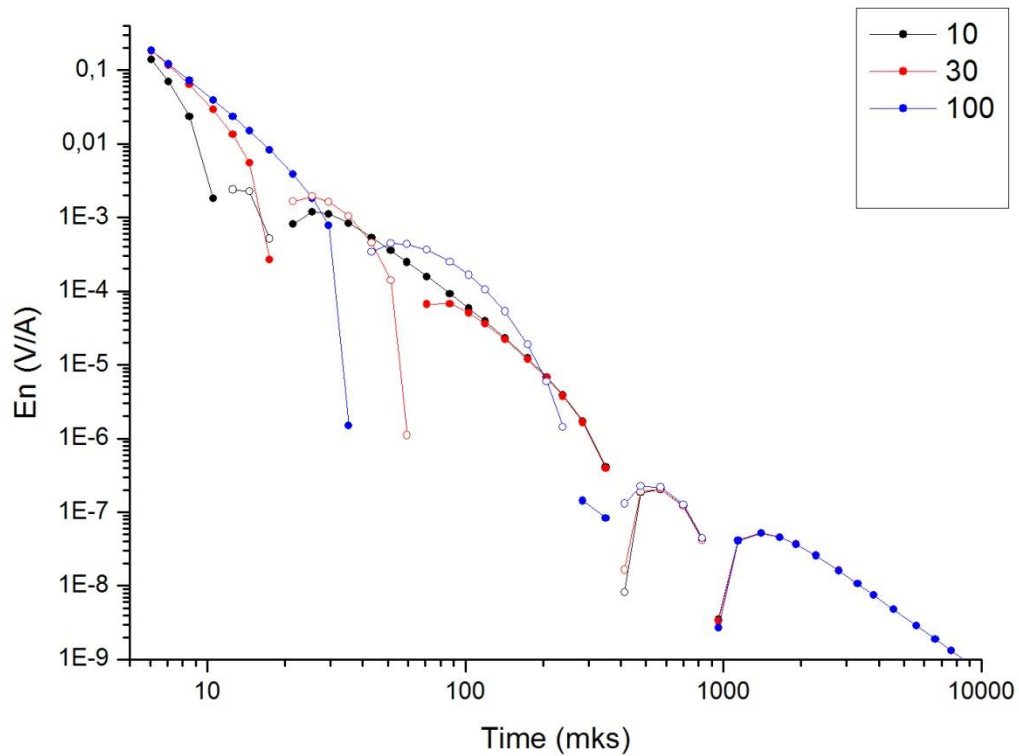


Рисунок 11. Кривые ЗСБ при изменении постоянной времени во 2-м слое. В легенде приведены значения τ первого процесса, мкс.

Видно, что по мере увеличения постоянной времени первый процесс сдвигается в область больших времен и растет ширина отрицательного участка кривой становления. Изменения слабо влияют на второй процесс.

На рис. 12 приведены результаты математического моделирования кривых спада э.д.с. становления при изменении мощности третьего слоя со вторым поляризационным процессом (рис. 12). Изменение мощности представлено кривыми со значениями $h = 10, 30$ и 100 м.

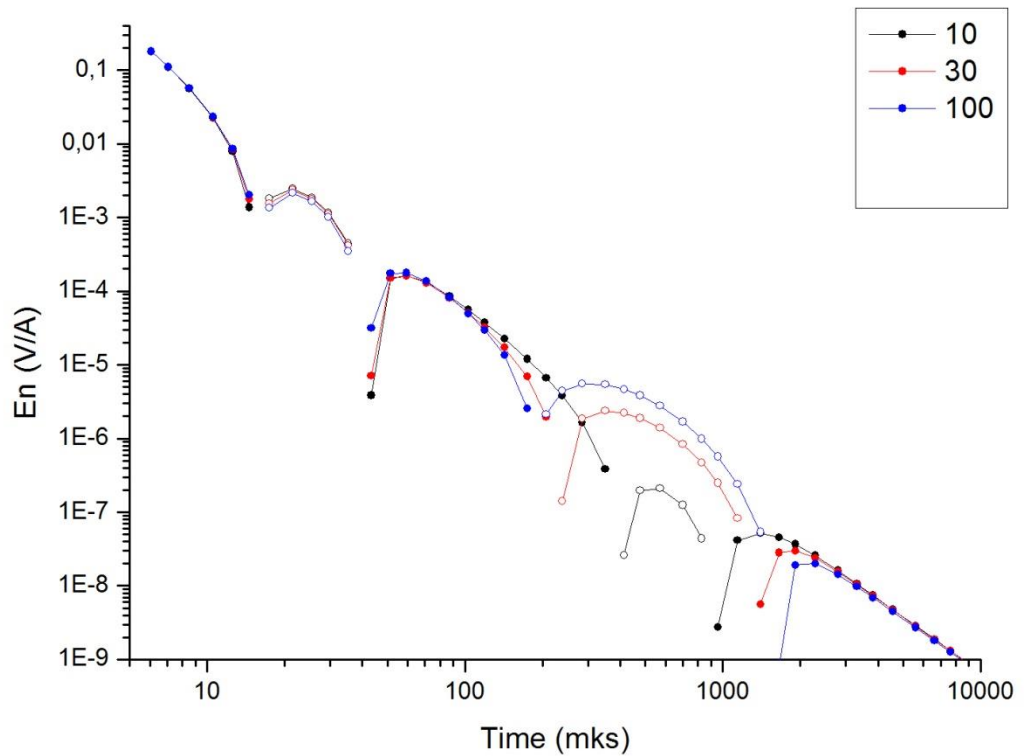


Рисунок 12. Кривые ЗСБ при изменении мощности 3-го слоя. В легенде значения h третьего слоя.

Видно, что с увеличением мощности третьего слоя растет и амплитуда второго процесса. На первый процесс изменения не влияют.

Результаты моделирования кривых спада э.д.с. становления при изменении поляризуемости второго поляризационного процесса приведены на (рис. 13). Изменение поляризуемости представлено кривыми со значениями $\eta = 0,1, 0,4$ и $0,8$.

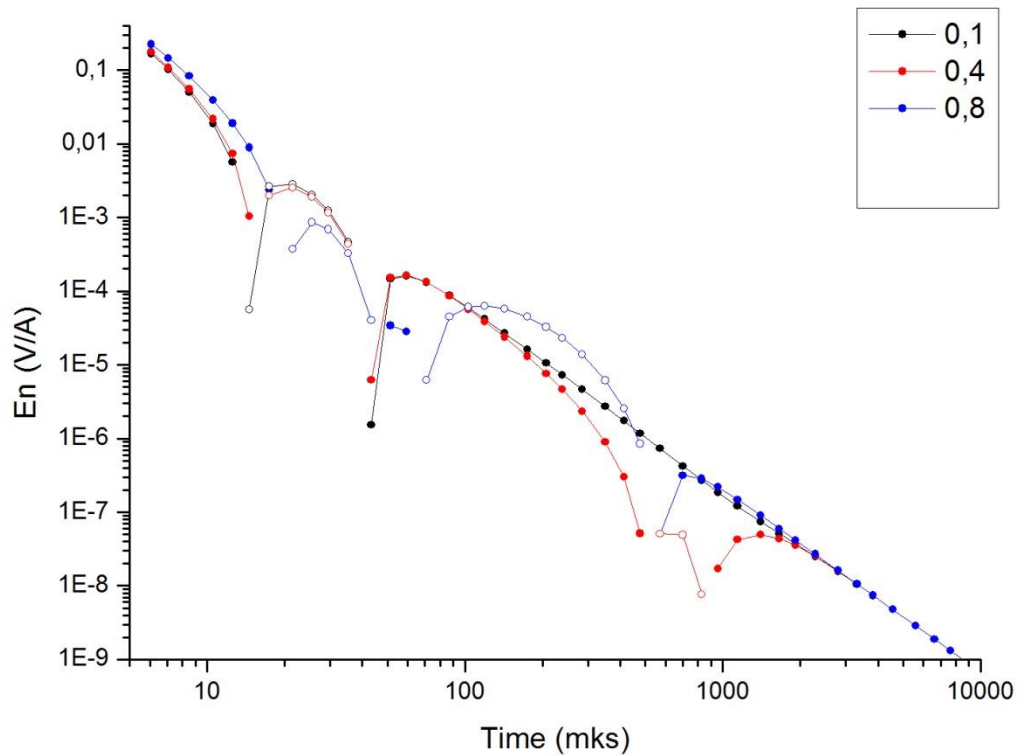


Рисунок 13. Кривые ЗСБ при изменении поляризуемости 3-го слоя. В легенде приведены значения η третьего слоя.

Видно, что увеличение поляризуемости увеличивает амплитуду и ширину второго участка смены знака сигнала, второй процесс сдвигается в область малых времен. При этом изменения также заметно влияют на первый процесс.

Результаты математического моделирования становления при изменении удельного электрического сопротивления третьего слоя со вторым поляризационным процессом представлены на рис. 14. Значения ρ третьего слоя 300, 600 и 1200 Ом*м.

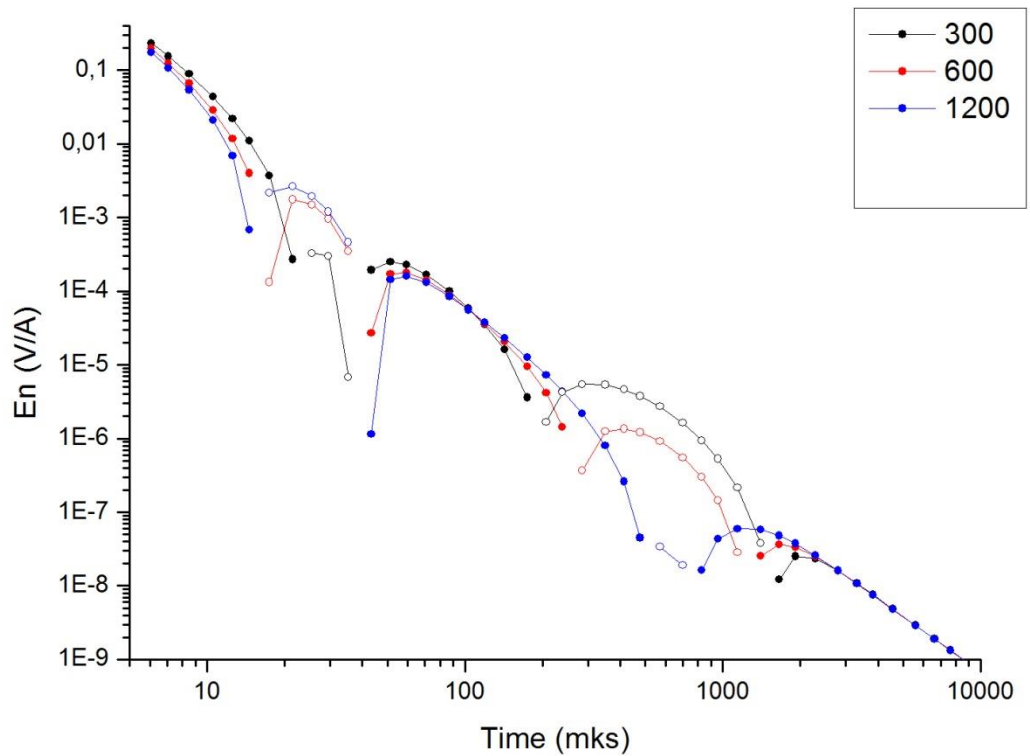


Рисунок 14. Кривые ЗСБ при изменении удельного электрического сопротивления 3-го слоя. В легенде приведены значения ρ .

Видно, что при уменьшении сопротивления третьего слоя амплитуда второго участка смены знака увеличивается, ширина его также увеличивается, и он сдвигается в область меньших времен. При этом изменения сильно влияют на первый процесс.

На рис.15 приведены результаты математического моделирования кривых спада э.д.с. становления при изменении постоянной времени второго поляризационного процесса. Значения $\tau = 300, 600$ и 1500 мкс.

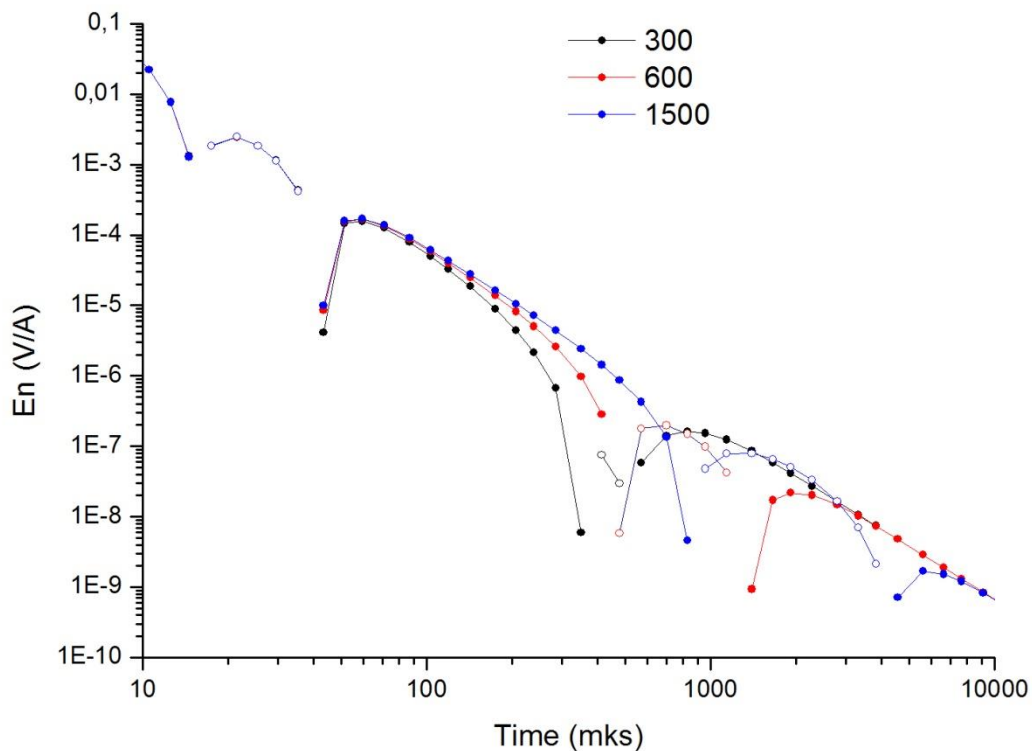


Рисунок 15. Кривые ЗСБ при изменении постоянной времени в 3-м слое. В легенде значения τ второго процесса.

Видно, что при увеличении постоянной времени второй участок смены знака сдвигается в область больших времен, становится шире и его амплитуда уменьшается. Изменения не оказывают влияния на первый поляризационный процесс.

Таким образом, изменение параметров 2-го и 3-го поляризующихся слоев модели, в общем, независимо влияют на форму кривой спада. Исключением являются изменения мощности 2-го слоя, а также удельного электрического сопротивления и поляризуемости 3-го слоя, приводящие к изменению индукционной составляющей переходного процесса в соседних слоях, а через нее – и на интенсивность индуктивно возбуждаемой вызванной поляризации.

Глава 3. Инверсия результатов ЗСБ с петлями разных размеров

3.1 Многоразносные зондирования¹.

При анализе полевых данных ЗСБ были выбраны профили 1 и 4, на которых съемка осуществлялась петлями разных размеров (25*25 и 50*50 м). При этом было замечено, что кривые ЗСБ, полученные на соседних пикетах на берегу, вдали от протоки, отличаются только уровнем шума (например, рис. 16), что говорит об однородности разреза.

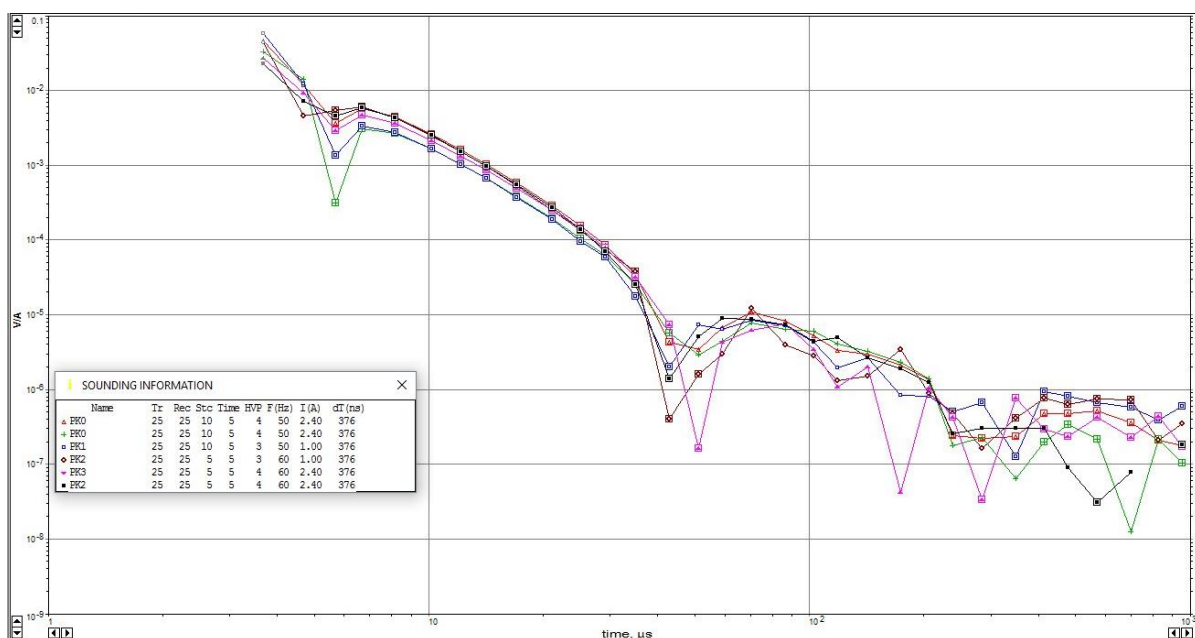


Рисунок 16. Кривые э.д.с. ЗСБ для петли 25*25 м на соседних пикетах до осреднения.

Данные зондирования на таких пикетах были осреднены, и были получены сглаженные кривые, характерные для береговой зоны (рис. 17).

¹ Использование устоявшегося термина многоразносные зондирования в нашем случае не совсем корректно потому что, строго говоря, разнос установки равен нулю. Под многоразносными зондированиями мы будем понимать зондирования с использованием петель разных размеров используя устоявшийся термин.

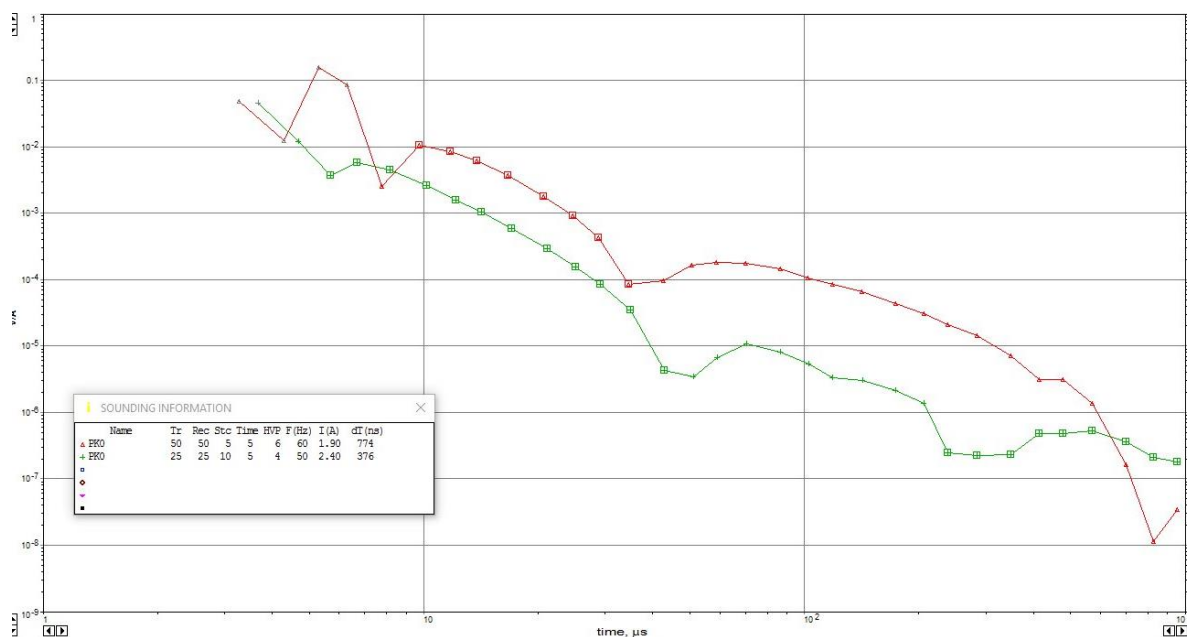


Рисунок 17. Кривые ЗСБ для петель 25*25 (зеленая) и 50*50 м (красная) для профиля 1 после осреднения. Квадратами обозначены отрицательные значения. По вертикальной оси э.д.с. становления, нормированная на ток в генераторной петле, В/А. По горизонтальной оси – время, с.

Подбор моделей осуществлялся путем последовательного усложнения, а именно, добавлением слоев и разнесением поляризационных процессов в разные слои. Переход к более сложной модели осуществлялся в случае невозможности подбора параметров БВП более простой модели в рамках эквивалентности. Параметры БВП подбирались одновременно для петель 25*25 и 50*50 метров.

Для модели однородного полупространства с двумя поляризационными процессами не удалось подобрать среду с параметрами, удовлетворяющими полевым данным. Далее перешли к двухслойной модели с одним слоем, содержащим два поляризационных процесса. Результаты инверсии параметров БВП для этой модели также не удалось соотнести с полевыми данными для многоэтажных зондирований. Следующим шагом стало разнесение поляризационных процессов в разные слои. В этом случае мы имели две модели: верхний слой содержит первый поляризационный процесс, а нижнее полупространство второй и наоборот, верхний слой содержит второй

поляризационный процесс, а нижнее полупространство первый поляризационный процесс. Для этих моделей также не удалось подобрать параметры БВП, удовлетворяющие данным многоразносных зондирований. Далее, в результате усложнения модели, она стала трехслойной. Для трехслойных моделей, содержащих два поляризационных процесса в одном слое, выполнить совместную инверсию для разных петель также не удалось. Для всех остальных вариантов трехслойной модели оказалось, что хорошие результаты инверсии для разных петель получаются только в случае, если приповерхностный слой мощностью несколько метров является не поляризующимся, а слой с поляризационным процессом, проявляющимся на ранних временах, находится над слоем с поляризационным процессом, проявляющимся на поздних временах.

3.2 Результаты совместной инверсии.

На основании найденных при помощи инверсии электрических параметров среды и закономерностей можно построить более точную модель геоэлектрического разреза (таб. 3) для береговой зоны дельты р. Лена. Конечно, следует понимать, что при отсутствии дополнительных независимых данных (бурения, или других геофизических методов) данная модель не может считаться окончательной и является лишь одной из множества эквивалентных моделей. Однако качественные закономерности, касающиеся относительного расположения в разрезе поляризующихся слоев, могут считаться надежно установленными.

Таблица 3. Уточненная модель берегового геоэлектрического разреза

N	ρ , Ом-м	h , м	η	τ , мкс	c
1	250	7	0	-	-
2	320	77	0,74	7	0,9
3	1000	inf	0,5	1000	1

Модель удовлетворительно описывает многоразностные зондирования (рис. 17), учитывая, что сигнал для малых петлей на временах, больших 200 мкс, находится на уровне шума, и результат усреднения мало достоверен.

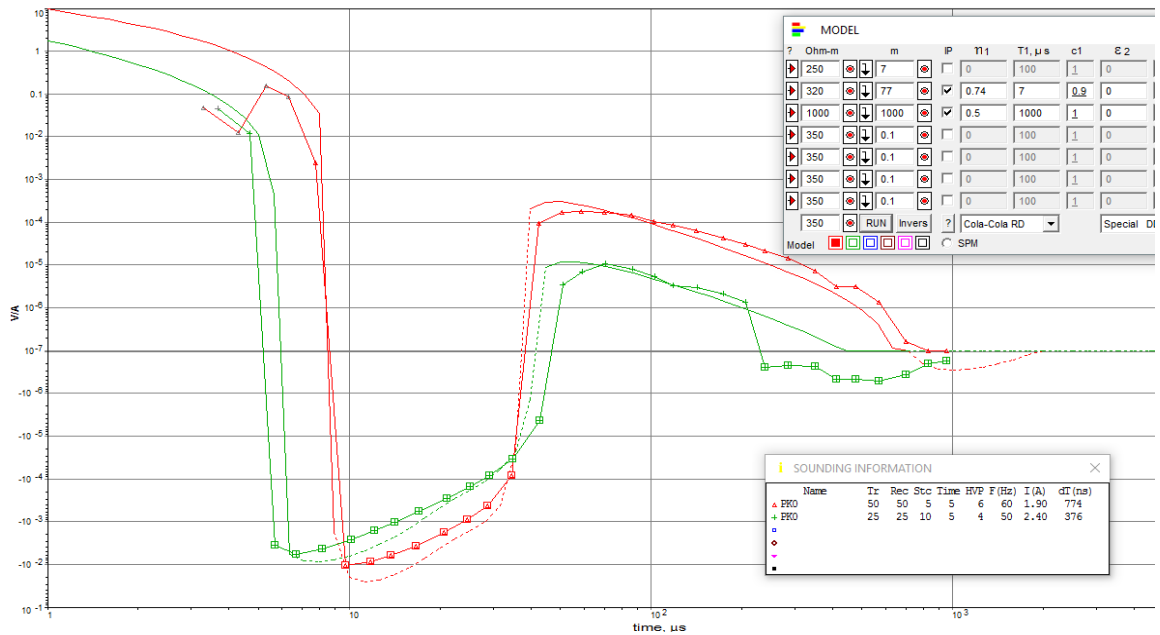


Рисунок 17. Результаты инверсии данных многоразностных зондирований. Красные точки и сплошная линия – данные ЗСБ, полученные с петлей 50*50 м. Красная штрихованная линия –результат инверсии. Зеленые точки и сплошная линия – данные ЗСБ, полученные с петлей 25*25 м. Зеленая штрихованная линия –результат инверсии. По вертикальной оси э.д.с. становления, нормированная на ток в генераторной петле, В/А. По горизонтальной оси – время, с.

Сформируем модель для разреза под протокой (таб. 4), как было сделано для предыдущей модели в гл.3, на основании результатов инверсии на береговых точках (рис. 17). Для этого заменим верхнюю часть разреза (12 м) двумя слоями – воды и льда (2 м сверху).

Таблица 4. Уточненная модель геоэлектрического разреза под протокой.

N	ρ , Ом-м	h , м	η	τ , мкс	c
1	500	2	0	-	-
2	25	10	0	-	-
3	100	4	0	-	-
5	320	61	0,74	7	0,9

6	1000	inf	0,5	1000	1
---	------	-----	-----	------	---

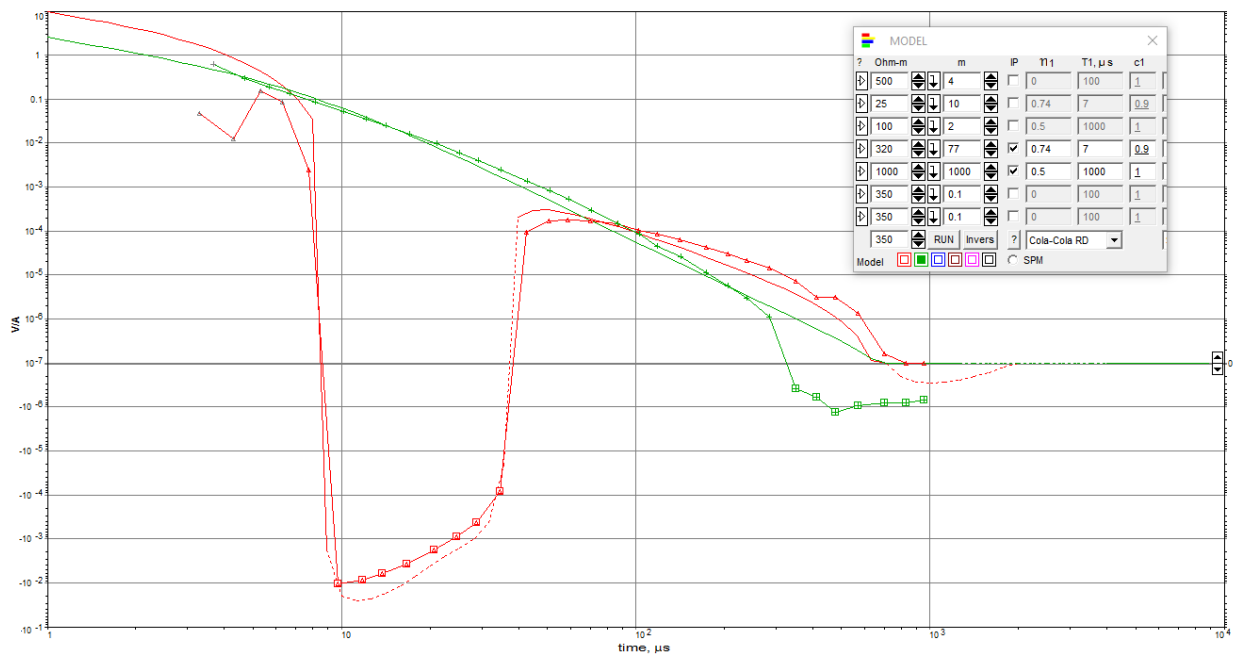


Рисунок 18. Результаты уточненной инверсии для береговой зоны и зоны над протокой. Красные точки и сплошная линия – данные ЗСБ для берегового разреза. Красная штрихованная линия – моделирование результатов уточненной инверсии для берегового разреза. Зеленые точки и сплошная линия – данные ЗСБ для разреза на протоке. Зеленая штрихованная линия – моделирование результатов уточненной инверсии для разреза на протоке. По вертикальной оси э.д.с. становления, нормированная на ток в генераторной петле, В/А. По горизонтальной оси – время, с.

На рис.18 приведены результаты расчета прямой задачи для установки с петлями 50*50 м для модели 3 (на берегу) и модели 4 (на протоке). Параметры вызванной поляризации заданы в соответствии с результатами совместной инверсии многоразносных зондирований. Видно, что модель воспроизводит исчезновение первого поляризационного процесса вследствие шунтирования хорошо проводящей водной толщей, однако второй процесс также не виден. Это означает, что параметры ВП в 6-м слое модели отличаются от параметров того же слоя в береговой части. Дополнительная инверсия сигнала над

протокой позволяет лучше подобрать значения поляризуемости и времени релаксации (таб. 5. рис. 19).

Таблица 5. Дополнительная модель для зоны над протокой.

N	ρ , Ом-м	h , м	η	τ , мкс	c
1	500	2	0	-	-
2	25	10	0	-	-
3	100	4	0	-	-
5	320	61	0,74	7	0,9
6	1000	inf	0,82	700	1

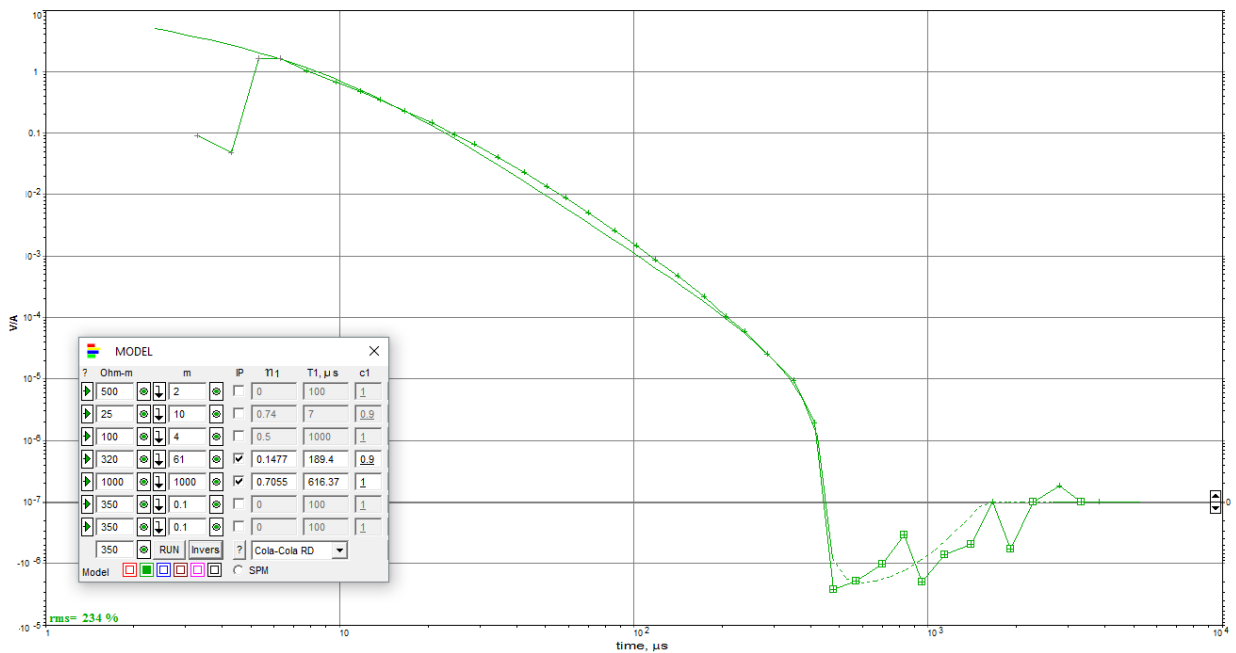


Рисунок 19. Результаты дополнительной инверсии для зоны над протокой. Зеленые точки и сплошная линия – данные ЗСБ для разреза на протоке. Зеленая штрихованная линия – моделирование результатов дополнительной инверсии для разреза на протоке. По вертикальной оси э.д.с. становления, нормированная на ток в генераторной петле, В/А. По горизонтальной оси – время, с.

Можно улучшить качество подбора кривых становления, если добавить в поляризующиеся слои частотную дисперсию с другими параметрами. Результаты представлены в таблице 6 и на рис. 20. Понятно, что закон

частотной дисперсии может быть более сложным, чем описываемый одной формулой Коула-Коула с одним временем релаксации, однако сделать заключение о количестве поляризационных процессов на основании только результатов ЗСБ невозможно.

Таблица 6. Более сложная модель для береговой зоны.

N	ρ , Ohm-m	h, m	η_1	τ_1	c1	η_2	τ_2	c2
1	380	7	0	-	-	-	-	-
2	600	77	0,74	7,7	0,9	0,31	3200	1
3	1200	inf	0,7	29	1	0	-	-

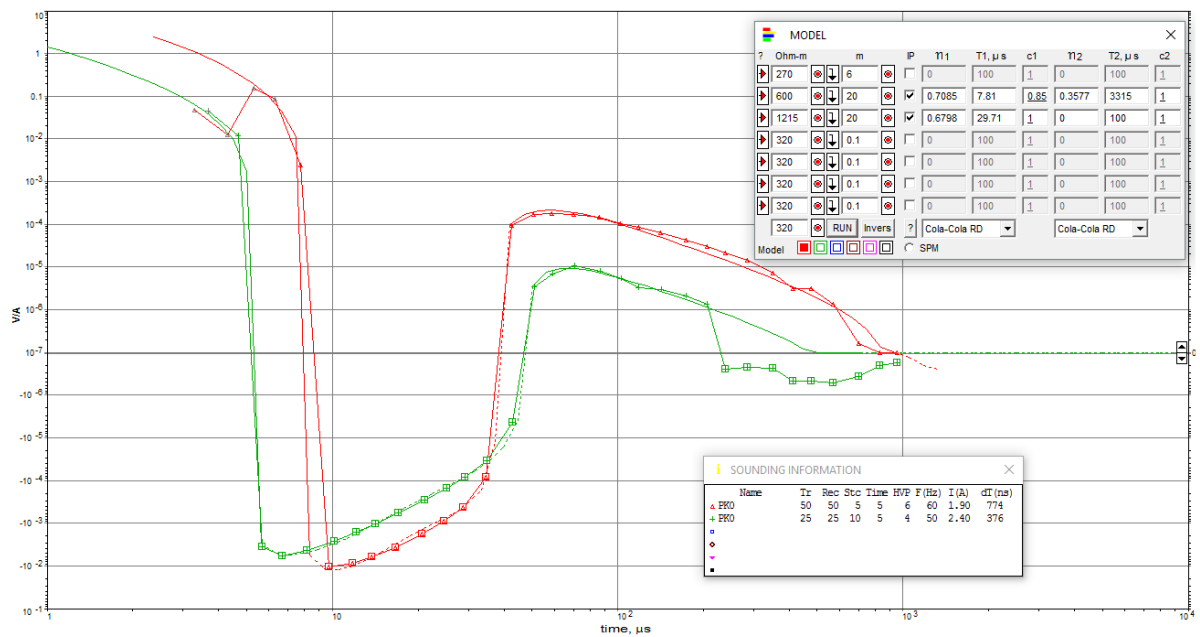


Рисунок 20. Результаты подбора более сложной модели для многоразностных зондирований. Красные точки и сплошная линия – данные ЗСБ, полученные с петель 50*50 м. Красная штрихованная линия –результат инверсии. Зеленые точки и сплошная линия – данные ЗСБ, полученные с петель 25*25 м. Зеленая штрихованная линия –результат инверсии. По вертикальной оси э.д.с. становления, нормированная на ток в генераторной петле, В/А. По горизонтальной оси – время, с.

4.3. Анализ полученных параметров БВП и сравнение с ранее опубликованными данными.

Составим сравнительную таблицу параметров частотной дисперсии по опубликованным данным разных авторов и результатам настоящей работы (таб. 7).

Таблица 7. Сравнение полученных результатов с ранее опубликованными.

	ρ , Ом-м	η	τ , мкс	c
Одна из моделей, рассмотренная В.В. Стогнием. [10]	200	0,55	110	0,85
Gerald G. Walker и Koji Kawasaki привели такие оценки параметров слоя, в котором возникает БВП [11]	1000	0,5	69	1
Н.О. Кожевников и Е.Ю. Антонов. [12]	42	0,4	10	1
Крылов С.С. и Бобров Н.Ю. [16]	70-200	0,15-0,6	15-80	1
Настоящая работа.	320	0,74	7	0,9
	1000	0,5	1000	1

Хотя полученные в результате работы параметры БВП мерзлых пород (ρ , η , τ) отличаются от параметров, полученных другими авторами, они лежат в одном временном (и частотном) диапазоне. Для всех выявленных процессов характерны достаточно большие (0.4-0.8) значения параметра поляризуемости. Наиболее близки параметрам первого поляризационного процесса, выявленного в дельте реки Лена, результаты Н.О. Кожевникова и Е.Ю. Антонова. В то же время вызванная поляризация, соответствующая второму поляризационному процессу, с постоянной времени порядка 1 мс, ранее не отмечалась в районах распространения многолетнемерзлых пород.

Важно заметить, что близость показателя c к 1 означает, что все наблюдаемые явления скорее всего были следствием одного и того же механизма возникновения ВП, связанного с эффектом Максвелла-Вагнера или подобным механизмом перераспределения связанных зарядов в закупоренных льдом капиллярах.

Заключение.

1. Необходимость изучения появления процессов БВП при ЗСБ на мерзлоте в контексте использования этого явления для интерпретации данных ЭМЗ, а не рассмотрения его как помехи, действительно интересует ученых. Для уверенного выявления БВП и оценки ее параметров необходимо проведение многоразносных зондирований (с петлями разных размеров).
2. В дельте р.Лена по результатам ЭМЗ методом ЗСБ были выявлены два поляризационных процесса с постоянными времени порядка 10 и 1000 мкс.
3. Проведение математического моделирования влияния параметров ВП на переходную характеристику показало сложное взаимодействие и взаимное влияние двух поляризационных процессов, однако некоторые параметры БВП независимо влияют на форму кривой спада.
4. В результате совместной инверсии данных многоразносных ЗСБ были получены оценки параметров двух поляризационных процессов в рамках модели Коула-Коула, которые согласуются с данными других авторов. Наиболее вероятной причиной БВП на мерзлоте является эффект Максвелла-Вагнера.

Список Литературы:

1. Фролов А.Д. Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов. // РАН. ОНТИ ПНЦ. Пушино, 1998 г.
2. P. Weidelt. The harmonic and transient electromagnetic response of a thin dike. // 1983. Geophysics.
3. James R. Wait. Theory of induced electrical polarization (quasi-static approach). 1982. Geo-Electromagnetism;
4. Spies B. R., Frischknecht F. C., Electromagnetic sounding in Nabighian // Electromagnetic methods in applied geophysics, 1991 Vol II, Part A: Soc. Expl. Geophys., 285-417.
5. Молчанов А.А., Сидоров В.А., Николаев Ю.В., Яхин А.М. Новые типы переходных процессов при электромагнитных зондированиях // Изв. АН СССР, Физика Земли. - 1984, N 1. - С. 100-103.].
6. Сидоров В.А. Об электрической поляризуемости неоднородных пород. // Физика Земли, 1987, № 10, с. 58—64.
7. Н.О.Кожевников. Исследование быстро протекающих процессов вызванной поляризации в мерзлых породах. // 1995 Инженерная геология.
8. Крылов С.С., Бобров Н.Ю. Частотная дисперсия электрических свойств мерзлых пород при электромагнитных зондированиях с вертикальным магнитным диполем. // Физика Земли, 1997, № 3, с. 64-70.
9. Моделирование эффекта Максвелла-Вагнера в мерзлых крупнодисперсных породах с порфировой структурой / И. В. Артеменко, Н. О. Кожевников // Криосфера Земли. - 1999. - Т. 3, N 1. - С. 60 - 68.]
10. В.В. Стогний. Импульсная индуктивная электроразведка при изучении поляризующейся среды криолитозоны якутской кимберлитовой. Криосфера Земли, 2008, т. XII, № 4, с. 46–56
11. Observation of Double Sign Reversals in Transient Electromagnetic Central Induction Soundings Gerald G. Walker and Koji Kawasaki Geophysical Institute, University of Alaska, Fairbanks, AK 99775-0800 (U.S.A.) March 24, 1988)
12. Н.О. Кожевников, Е.Ю. Антонов. Импульсная индуктивная электроразведка поляризующихся сред. Геофизический журнал №4, Т. 31, 2009
13. Ф.М. Каменецкий, Электромагнитные геофизические исследования методом переходных процессов. 1997. М.:ГЕОС, 162 с.
14. Уэйт Дж. Р., Геоэлектромагнетизм. // 1987 .: Недра.

15. Бобров Н.Ю., Крылов С.С. Исследование многолетнемерзлых пород в дельте р. Лены методами электроразведки. // Инженерные изыскания в строительстве. Материалы Двенадцатой Общероссийской конференции изыскательских организаций. М.: ООО «Геомаркетинг». 2016. — 665 с.
16. Крылов С.С., Бобров Н.Ю., Применение электромагнитных зондирований для исследования частотной дисперсии электрических свойств мерзлых пород. // 2002. Криосфера Земли, 6 (3), 59–68.