

# ИЗУЧЕНИЕ МЕРЗЛЫХ РАЗРЕЗОВ ЯКУТИИ С ПОМОЩЬЮ ЗОНДИРОВАНИЯ СТАНОВЛЕНИЕМ ПОЛЯ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ И ВЕРТИКАЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ МЕТОДОМ ВЫЗВАННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ

## STUDYING FROZEN CROSS-SECTIONS IN YAKUTIA USING NEAR-FIELD TRANSIENT ELECTROMAGNETIC SOUNDING AND INDUCED POLARIZATION VERTICAL ELECTRICAL SOUNDING



### АГЕЕВ В.В.

Заведующий лабораторией взаимодействия электромагнитных полей и геологической среды Центра геоэлектромагнитных исследований (ЦГЭМИ) Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, к. ф.-м. н., г. Москва, ageevvv@yandex.ru

### AGEEV V.V.

Head of the Laboratory of Interaction between Electromagnetic Fields and the Geological Environment, Geoelectromagnetic Research Center, Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, PhD (Candidate of Science in Physics and Mathematics), Moscow, ageevvv@yandex.ru

### АГЕЕВ Д.В.

Аспирант кафедры геофизических методов исследования земной коры геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Simple1@yandex.ru

### AGEEV D.V.

Postgraduate student of the Department of Geophysical Methods of the Earth Crust Exploration, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Simple1@yandex.ru

### Ключевые слова:

Якутия; Среднеботуобинское нефтегазоконденсатное месторождение (СБ НГКМ); мерзлые породы; быстропотекающая вызванная поляризация; талик; зондирование становлением поля в ближней зоне (метод ЗСБ); вертикальное электрическое зондирование методом вызванной поляризации (метод ВЭЗ-ВП).

### Key words:

Yakutia; frozen soils; the Middle Botuobinsk oil and gas condensate field; fast-decaying induced polarization; talik; near-field transient electromagnetic sounding (NF-TEM method); induced polarization vertical electrical sounding (VES-IP method).

### Аннотация

Рассмотрены проявления быстропотекающей вызванной поляризации мерзлых пород Якутии при работе с индукционными (методом ЗСБ) и гальваническими (методом ВЭЗ-ВП) электроразведочными установками. С использованием результатов исследований на Среднеботуобинском нефтегазоконденсатном месторождении проиллюстрированы дополнительные информационные возможности метода вызванной поляризации в отношении криологических параметров разреза.

### Abstract

This paper considers manifestations of fast-decaying induced polarization in frozen soils in Yakutia, while operating with inductive (by the NF-TEM method) and galvanic (by the VES-IP method) electrical exploration equipment. Using the results of a study performed in the Middle Botuobinsk oil and gas condensate field, the authors illustrate the additional information possibilities of the induced polarization method relative to the cryological parameters of a cross-section.

## Введение

В настоящее время большой объем гидрогеологических и инженерно-геологических исследований выполняется в условиях распространения вечной мерзлоты. При этом помимо традиционных литологических и структурных построений важной задачей становится определение криологических параметров среды, таких как льдистость и температура. От объемной льдистости грунтов зависит устойчивость инженерных сооружений. Выделение талых зон в разрезе и выявление их связи с поверхностными водами являются целями гидрогеологических работ.

Однако для определения криопараметров недостаточно анализа только удельного сопротивления пород — необходимо привлекать другую независимую информацию. Ее источником может стать такое явление, как быстрая вызванная поляризация (БВП).

Если следовать принятому феноменологическому подходу описания вызванной поляризации (ВП) через частотную дисперсию электрических параметров, а для описания частотной зависимости проводимости использовать формулу Коула — Коула<sup>1</sup> (Cole-Cole), то ВП будет характеризоваться тремя параметрами — поляризуемостью  $\eta$ , постоянной времени  $\tau$  и степенным параметром  $C$ . Быстрой вызванной поляризацией будем называть интенсивный по величине (поляризуемость  $\eta$  составляет десятки процентов) поляризационный процесс с маленькими постоянными времени ( $\tau = 10 \div 100$  мкс). Следует обратить особое внимание на третий степенной параметр  $C$ . Для мерзлых пород он близок к единице, и в этом заключается специфика мерзлых пород. При этом формула Коула — Коула совпадает с выражением для эффективного значения проводимости двухкомпонентной гетерогенной, но монофазной среды (эффект Максвелла — Вагнера) [3]. Для талых пород проявление БВП в результатах зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ) — тоже довольно распространенное явление, особенно для высокоомных разрезов. Однако параметр  $C$  в этих случаях чаще близок к 0,5. Говорить об эффекте Максвелла — Вагнера в этих случаях можно, только представляя этот процесс в виде суммы элементарных дебаевских<sup>2</sup> процессов с величиной  $C$ , равной единице, характеризующих сложную иерархически устроенную структуру горной породы.

Процесс БВП проявляется при работе методом ЗСБ, а также может изучаться методом ВП с использованием некоторых методических приемов [1]. В настоящей статье продемонстрированы дополнительные информационные возможности быстрой вызванной поляризации при изучении криолитозоны на примере комплексных работ методами ЗСБ и ВЭЗ-ВП (вертикального электрического зондирования методом (с измерением) вызванной поляризации) на Среднеботуобинском нефтегазоконденсатном месторождении (НГКМ).

## Проявления быстрой вызванной поляризации при использовании метода ЗСБ

В последнее время для решения различных задач в криолитозоне все активнее применяются индукционные методы электроразведки, особенно зондирование становлением поля в ближней зоне. Это связано с техноло-

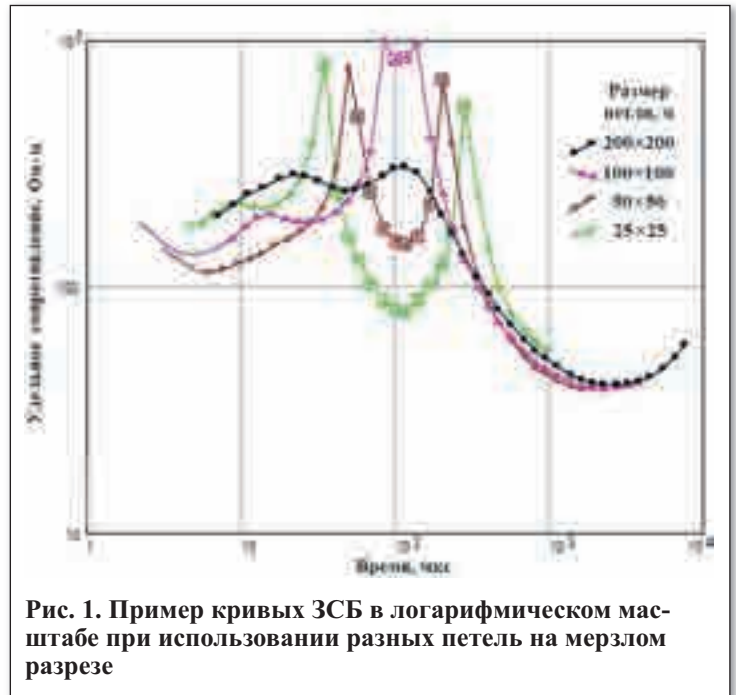


Рис. 1. Пример кривых ЗСБ в логарифмическом масштабе при использовании разных петель на мерзлом разрезе

гическими преимуществами метода ЗСБ — отсутствием гальванических заземлений, возможностью работы зимой, локальностью исследований, отсутствием экранирующего эффекта от верхнего высокоомного мерзлого горизонта.

Однако значительная часть зарегистрированных переходных процессов при этом часто осложняется влиянием специфической для мерзлых пород вызванной поляризации — как уже отмечалось, интенсивной по величине и с малой постоянной времени. Эти специфические поляризационные процессы могут исказить кривые становления поля вплоть до смены знака.

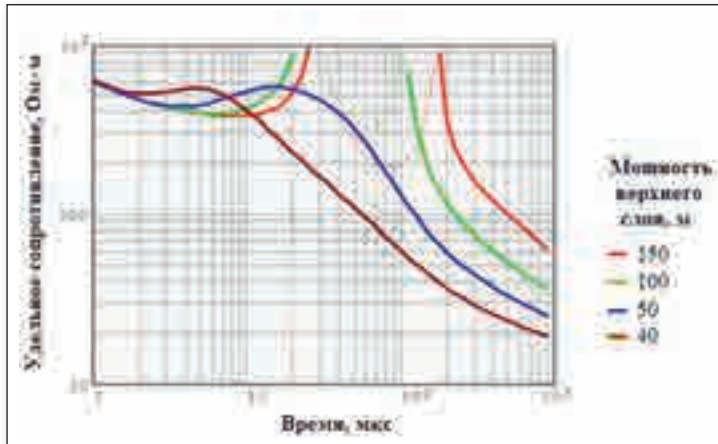
Многие существующие сейчас интерпретационные программы позволяют учитывать вызванную поляризацию. При этом электромагнитные параметры среды полагаются комплексными и частотно-зависимыми. Таким образом, уравнения Максвелла распространяются на поляризующиеся среды. Соответственно, число определяемых при инверсии параметров возрастает, а решение обратной задачи существенно усложняется.

Снизить неоднозначность инверсии позволяют измерения с разным размером петли для однопетлевой установки или с разным разносом для разнесенной установки [1, 4, 5]. При изменении геометрии установки меняется соотношение индукционных и поляризационных процессов и интерпретация становится более однозначной. На рисунке 1 приведен набор кривых ЗСБ, полученных при однопетлевой установке с разным размером петель на мерзлом разрезе. Видно, что кривые, полученные с маленькой петлей, искажены сильнее.

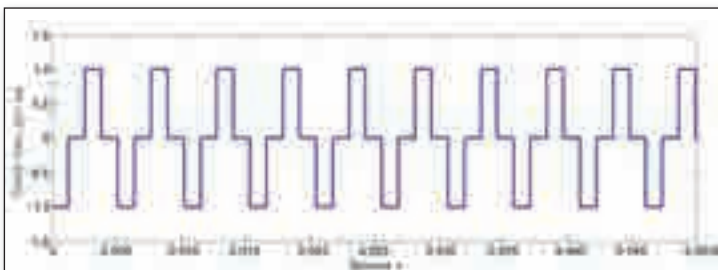
Однако при работах методом ЗСБ процесс БВП является не только искажающим фактором, с которым надо бороться, но и источником полезной информации. Исходя из этого, важно уметь выделять БВП на фоне измеряемого сигнала, потому что в проводящих разрезах поляризационный процесс проявляется гораздо слабее. Такая типичная ситуация приведена на рис. 2 для разрезов с разной глубиной до проводящего основания. Ин-

<sup>1</sup> По фамилиям авторов формулы К.С. Коула (K.S. Cole) и Р.Х. Коула (R.H. Cole).

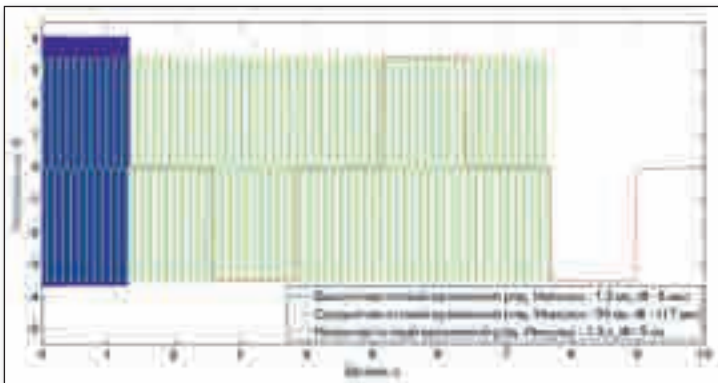
<sup>2</sup> По фамилии голландского физика П. Дебая (P. Debye).



**Рис. 2. Модельные кривые ЗСБ в логарифмическом масштабе для двухслойного разреза с переменной мощностью верхнего слоя. Для верхнего слоя: поляризуемость  $\eta = 30\%$ ; постоянная времени  $\tau = 50$  мкс; степенной параметр  $C = 1$ ; удельное сопротивление  $\rho = 500$  Ом·м. Для нижнего слоя:  $\rho = 10$  Ом·м**



**Рис. 3. Токковая последовательность «разнополярный меандр с паузой»**



**Рис. 4. Фрагменты записей сигналов на приемных электродах с различной длительностью токовых импульсов ( $dt$  — интервал дискретизации)**

формация о поляризуемости теряется при уменьшении мощности верхнего слоя, так как в хорошо проводящих разрезах индукционные процессы очень интенсивны по сравнению с поляризационными. На графике видно, что при маломощном верхнем поляризующемся слое и проводящем неполяризующемся основании кривая ЗСБ практически не искажена поляризационными процессами. В свою очередь, при большой мощности поляризующегося слоя вклад поляризационного процесса в измеряемый сигнал больше, а значит, и кривые искажены сильнее. Подобные результаты в полевых условиях наблюдаются, когда мерзлая толща подстилается засолен-

ными породами или тальми глинами. В таких ситуациях предпочтительнее использовать гальванические установки в комплексе с индукционными. Измерения методом ВЭЗ-ВП с ортогональной установкой позволяют существенно ослабить индукционную часть сигнала.

### **Изучение быстрой вызванной поляризации с помощью метода ВЭЗ-ВП**

Для того чтобы изучать явление БВП с помощью гальванических установок, необходимо регистрировать переходные процессы ВП начиная с очень ранних времен (от 10 мкс), что нереализуемо при использовании классической аппаратуры для метода ВП. С этой целью в Институте физики Земли РАН была разработана аппаратура ВПШ-6 [2]. Там же проводились лабораторные измерения вызванной поляризации на мерзлых образцах с регистрацией процесса спада с очень ранних времен.

Данная аппаратура работает в трех различных частотно-временных диапазонах с разной длительностью токовых импульсов (1,28; 30; 1280 мс) и разной дискретизацией измеряемого сигнала (5 мкс; 117 мкс; 5 мс).

При выполнении измерений через питающую линию пропускался ток, форма которого соответствует последовательности повторяющихся положительных и отрицательных прямоугольных импульсов одинаковой ширины и амплитуды, разделенных паузами такой же длительности («разнополярному меандру с паузой»). Совокупность импульсов образует периодический сигнал (рис. 3). Сила тока может меняться от 16 мА до 1 А. Токковая последовательность в зависимости от длительности импульса содержала 256, 64 или 8 периодов. Напряжение в приемной линии измерялось на протяжении всего интервала пропускания токовой последовательности. В результате были получены наборы из трех временных рядов напряжения. В качестве примера на рис. 4 приводится фрагмент всех трех записей и показано соотношение между ними.

Основные закономерности и зависимости поляризационных характеристик от криологических параметров были установлены в ходе лабораторных исследований мерзлых образцов. На рисунке 5 представлены переходные характеристики ВП в трех временных диапазонах (то есть для разной длительности пропускания тока) для образца песка при разных температурах. На графиках отчетливо различаются два независимых поляризационных процесса. Можно видеть, что по мере замерзания образца интенсивность процесса классической ВП электрокинетической природы, протекающего на больших временах, падает, что связано с замерзанием влаги, которая обеспечивает движение ионов. В свою очередь, на ранних временах появляется специфический очень интенсивный процесс БВП, который возрастает до очень больших значений по мере понижения температуры. Также в ходе лабораторных экспериментов было установлено, что интенсивность БВП увеличивается по мере роста льдистости и зависит от криологической текстуры, а природой этого процесса является так называемый эффект Максвелла — Вагнера [3]. Заметим, что процесс БВП, присущий мерзлым породам, попадает во временной диапазон ЗСБ.

Аппаратура ВПШ-6 позволяет проводить как лабораторные измерения на образцах, так и полевые измерения с гальваническими установками. Примеры полученных полевых данных будут приведены ниже.

## Результаты работ методами ЗСБ и ВЭЗ-ВП на Среднеботуобинском НГКМ

Электроразведочные работы на Среднеботуобинском месторождении проводились ООО «Центр электромагнитных исследований» в рамках гидрогеологических изысканий, выполняемых ЗАО «ГИДЭК». Решалась задача водоснабжения месторождения, которая сводилась к поиску и оконтуриванию талых зон. На рисунке 6, а представлен геоэлектрический разрез по данным ЗСБ для одного из профилей.

При интерпретации данных был выделен мощный высокоомный слой, связанный с мерзлотой, к которому была отнесена поляризуемость. Этот слой показан на разрезе (снизу) на рис. 6, а голубым цветом. Сверху на этом рисунке представлен график поляризуемости мерзлого слоя, подобранной при интерпретации. Величина поляризуемости возрастает по мере удаления от талика и предположительно по мере понижения температуры мерзлой толщи. Особенностью данного разреза с геокриологической точки зрения является то, что мерзлота наиболее развита в заболоченных низинах, а под условным водоразделом находится талик, хотя в большинстве случаев талики встречаются под водоемами.

Рассмотрим кривые ЗСБ, полученные на некоторых пикетах приведенного профиля, и особенности их интерпретации (рис. 7). Из рисунка 7 видно, что влияние поляризационных процессов на вид этих графиков разное. Уменьшение искаженности кривых может быть связано как со снижением поляризуемости, так и с погружением на глубину поляризующегося мерзлого слоя. Измерения с одной геометрией петли не позволяют однозначно ответить на этот вопрос.

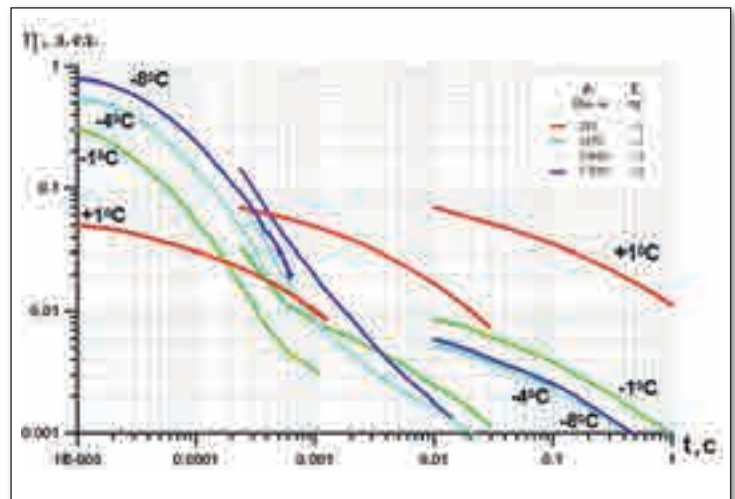


Рис. 5. Переходные характеристики вызванной поляризации в трех временных диапазонах для образца мерзлого песка с суммарной льдистостью 43% для разных температур [1]. Графики приведены в логарифмическом масштабе. Обозначения:  $\eta$  — поляризуемость;  $t$  — время;  $\rho$  — удельное сопротивление, измеренное на частоте 120 Гц;  $T$  — температура

Для прояснения ситуации проводились измерения меньшими петлями в тех же точках. Выше уже упоминался известный факт разного соотношения индукционного и поляризационного сигналов для установок разного размера. Но стоит отметить, что это относится только к случаям, когда поляризующийся слой расположен сверху. На рисунке 8, а отражена именно такая ситуация. Однако это правило не выполняется при погружении поляризующегося слоя на глубину. Так, на

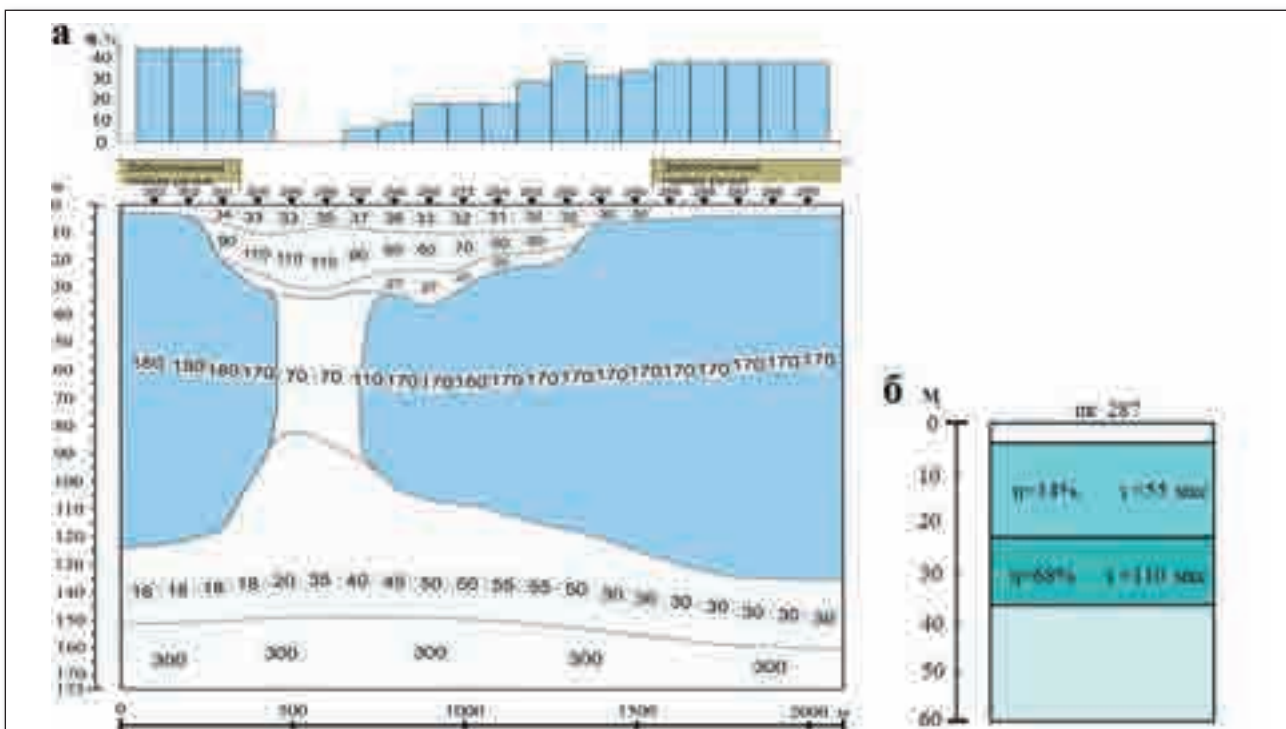


Рис. 6. Геоэлектрический разрез (снизу) по данным ЗСБ для одного из профилей, пересекающих заболоченные поймы ручьев, разделенные водоразделом с превышением 20–30 м (голубой цвет — мерзлая толща; сверху — график подобранной поляризуемости мерзлой толщи) (а); модель поляризационных параметров, подобранная по данным ВЭЗ-ВП для пикета 287 (б). Обозначения:  $\eta$  — поляризуемость;  $\tau$  — постоянная времени; пк — пикет

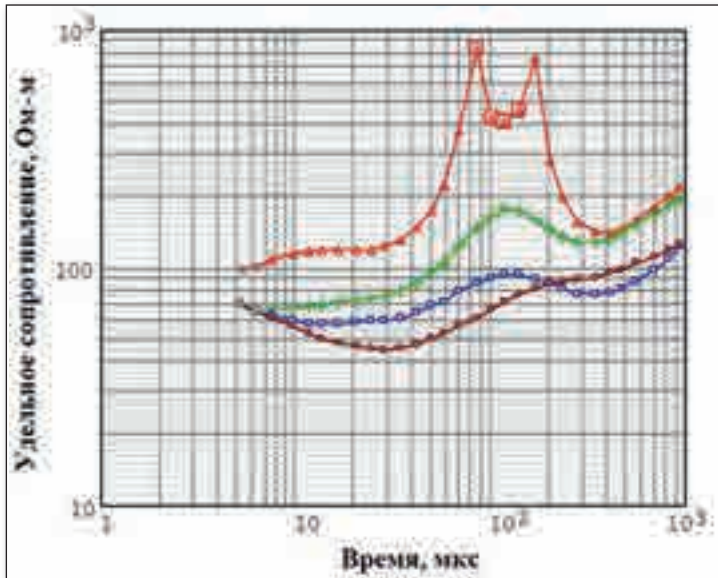


Рис. 7. Кривые ЗСБ в логарифмическом масштабе, полученные с 50-метровой петлей на четырех пикетах

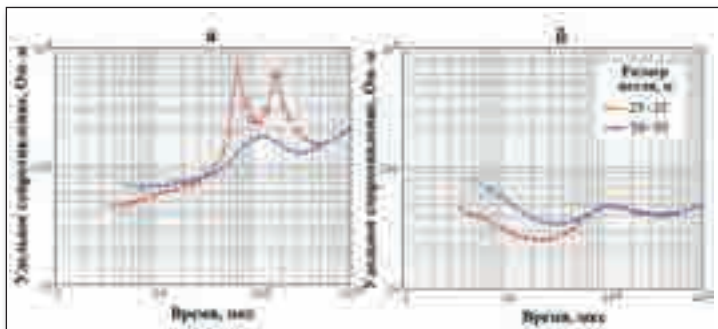


Рис. 8. Кривые ЗСБ в логарифмическом масштабе, полученные при измерениях: а — на пикете 288 (кровля мерзлоты — на глубине 3–5 м); б — на пикете 292 (кровля мерзлоты — на глубине 20 м)

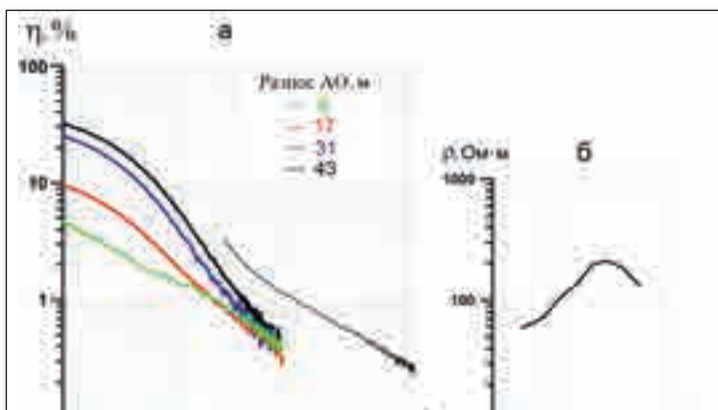


Рис. 9. Переходные характеристики вызванной поляризации в двух временных диапазонах для разных разносов (а) и кривая ВЭЗ (б). Графики приведены в логарифмическом масштабе. Обозначения:  $\eta$  — поляризуемость;  $t$  — время;  $\rho$  — удельное сопротивление; АО — разнос АО

рисунок 8, б видно, что кривые, полученные при использовании разных размеров петель, практически совпадают. Для такой ситуации при интерпретации была подобрана модель, в которой кровля мерзлого слоя находилась на глубине 20 м, в результате чего на

всем профиле была прослежена глубина кровли мерзлой толщи.

Для подтверждения идеи погружения кровли мерзлоты на глубину было проведено измерение ВЭЗ-ВП на пикете 292. На рисунке 9, а видно, что на разnose АО = 17 м на ранних временах поляризуемость достигает 10%, а по мере увеличения разносов возрастает до 30% и более. На кривой ВЭЗ (рис. 9, б) тоже выделяется сначала возрастание сопротивления до 150 Ом·м, а на разносах 30–40 м проявляется еще более высокоомный слой. Вероятно, глубинность, соответствующая первым разносам, меньше мощности верхнего талого слоя. Затем на разносах 10–20 м проявляется «вяломерзлый» переходный слой. Мерзлый горизонт с повышенной льдистостью проявляется в результатах измерений только начиная с разноса 31 м, о чем свидетельствует скачок поляризуемости. Именно этот мерзлый слой с повышенными льдистостью и поляризуемостью был выделен по данным ЗСБ.

Рассмотрим еще один набор кривых ЗСБ, полученных на заболоченном мерзлом участке (на пикете 287) с петлями разных размеров (рис. 10). Их совместная интерпретация в рамках модели с одним поляризующимся верхним высокоомным слоем дает близкие величины мощности и сопротивления этого слоя. Но одинаковые поляризационные параметры для разных петель подобрать не удастся. Это говорит о том, что реальный разрез отличается от упрощенного с одним поляризующимся слоем. Ситуация становится яснее при рассмотрении данных ВЭЗ-ВП.

На рисунке 11 приведены кривые спада вызванной поляризации при измерениях в той же точке для четырех разносов АО. Видно, что поляризуемость на ранних временах для разноса 6 м составляет 15% и постепенно возрастает до 70% на разносе 60 м. Это свидетельствует о том, что в разрезе есть несколько слоев с разными поляризационными, а значит, и криологическими параметрами.

Учтя полученную информацию, полученную с помощью метода ВЭЗ-ВП, и вернувшись к данным ЗСБ, удалось подобрать разрез, удовлетворяющий одновременно всем полевым кривым. Высокоомный мерзлый слой был разделен на три слоя с близкими сопротивлениями, но с разными поляризационными параметрами (см. рис. 6, б). Второй мерзлый горизонт характеризуется наибольшим значением поляризуемости  $\eta = 68\%$  и предположительно является наиболее льдистым. Ниже залегает мощный слой с незначительной поляризуемостью, изучить который более детально не получилось в связи с отсутствием измерений на больших разносах.

## Заключение

Изучение явления быстрой вызванной поляризации может дать дополнительную криологическую информацию о разрезе, которую нельзя получить из анализа удельного сопротивления пород.

Применение метода ЗСБ в комплексе с методом ВЭЗ-ВП с регистрацией процесса спада ВП с ранних времен позволяет успешно решать геологические, гидрогеологические и другие задачи в условиях распространения многолетнемерзлых пород. По данным ЗСБ (с учетом измерений с использованием петель разных размеров) можно достоверно определить мощности и сопротивления слоев. Задача же определения поляриза-

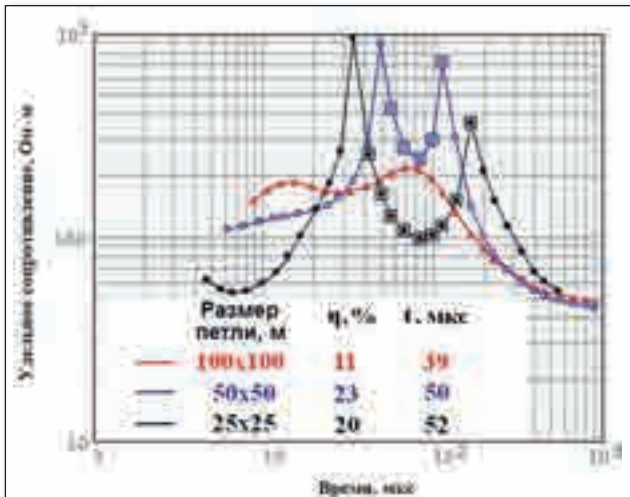


Рис. 10. Кривые ЗСБ в логарифмическом масштабе на пикете 287 на заболоченном мерзлом участке, полученные с петлями разных размеров

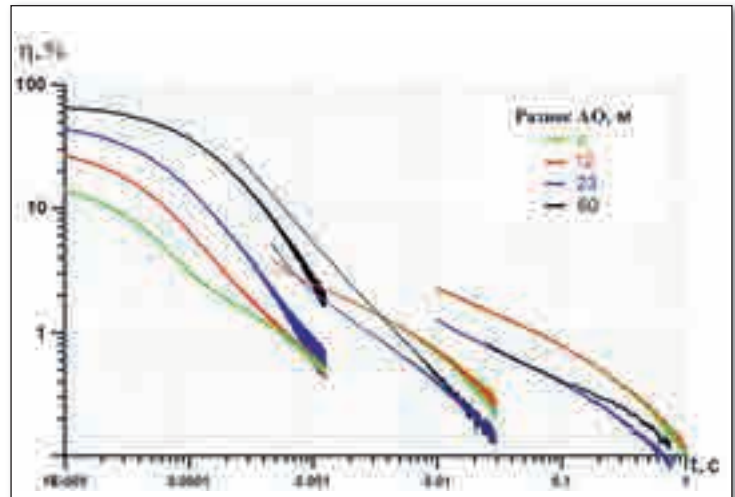


Рис. 11. Переходные характеристики ВП в трех временных диапазонах для четырех разносов. Графики приведены в логарифмическом масштабе

ционных параметров и самой поляризационной модели (то есть установления того, какие слои в разрезе поляризуются) только по данным ЗСБ очень неоднозначна. Метод ВЭЗ-ВП позволяет разделить мерзлую толщу на горизонты с разными криологическими параметрами. Но он является существенно более трудоемким, менее локальным и менее глубинным. Поэтому сейчас экономически может быть оправдан комплекс, в котором основной объем работ выполняется методом ЗСБ с оптимальным размером петель. А на выделенных участках, на которых требуется уточнить поляризационную модель и составить представление о параметрах ВП, желательнее выполнение ВЭЗ-ВП в ограниченном объеме.

Геологическая информативность предлагаемой методики комплексных работ проиллюстрирована в статье на примере данных, полученных при гидрогеологических изысканиях в Якутии. Показано, что в районе работ заболоченные низинные участки речных пойм характеризуются повышенными льдистостью и мощностью мерзлых пород. В свою очередь, на водоразделах встречаются талики, связанные с разломами и трещиноватыми зонами, по которым осуществляется инфильтрация атмосферных осадков. Такой результат исследований до этого не был очевидным, так как изначально работы были ориентированы на поиск подрусловых таликов. 🌐

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агеев В.В. Изучение процессов вызванной поляризации для решения геокриологических задач // Разведка и охрана недр. 2012. № 11. С. 46–49.
2. Агеев В.В., Светов Б.С., Амиантов А.С. Изучение вызванной поляризации в широком диапазоне времен (ВП-Ш) // Приборы и системы разведочной геофизики. 2006. № 2. С. 10–12.
3. Губатенко В.П. Эффект Максвелла — Вагнера в электроразведке // Физика Земли. 1991. № 4. С. 88–98.
4. Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю., Захаркин А.К., Корсаков М.А. Поиск таликов методом ЗСБ в условиях интенсивного проявления индукционно-вызванной поляризации // Геология и геофизика. 2014. Т. 55. № 12. С. 1815–1827.
5. Стогний В.В. Импульсная индуктивная электроразведка при изучении поляризующейся среды криолитозоны Якутской кимберлитовой провинции // Криосфера Земли. 2008. Т. 12. № 4. С. 46–56.

[www.geomark.ru](http://www.geomark.ru)