

Санкт-Петербургский государственный университет

**РИНАС Григорий Александрович**

**Выпускная квалификационная работа магистра**

**Вызванная поляризация вкрапленных руд в мерзлом состоянии**

Направление 05.04.01 «Геология»

Образовательная программа ВМ. 5796 «Геофизика»

Научный руководитель:

доцент кафедры геофизики

кандидат геолого-минералогических наук

Гурин Григорий Владимирович

Рецензент:

Симаков Александр Евгеньевич

Старший научный сотрудник АО "НПП "Радар ММС"

Санкт-Петербург

2022

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1. Криолитозона как объект геофизического исследования .....	4
1.1. Криолитозона и особенности ее строения.....	4
1.2. Типы мерзлотных разрезов и особенности их строения.....	8
1.3. Применение геофизических методов для изучения строения и процессов в вечномерзлых породах .....	10
2. Строение и свойства мерзлых пород.....	13
2.1. Состав и строение мерзлых пород .....	13
2.2. Физические и физико-химические процессы в промерзающих, мерзлых и оттаивающих породах .....	14
2.3. Электрические свойства мерзлых пород .....	15
2.3.1. Удельное электрическое сопротивление.....	15
2.3.2. Поляризуемость .....	17
3. Общие положения теории вызванной поляризации .....	19
3.1. Вызванная поляризация во временной и частотной области .....	19
3.2. Спектральная вызванная поляризация.....	22
4. Материалы и методы .....	24
4.1. Аппаратура и лабораторное оборудование .....	24
4.2. Синтетические образцы горных пород и их характеристика .....	27
4.3. Методология экспериментальных работ .....	27
4.4. Компьютерная рентгеновская микротомография.....	30
5. Результаты и их обсуждение .....	31
5.1. Удельное электрическое сопротивление .....	31
5.2. Фазовые спектры.....	33
5.3. Параметры модели Коул-Коул .....	35
5.3.1. Стационарная поляризуемость.....	36
5.3.2. Время релаксации .....	38
5.3.3. Показатель степени модели Коул-Коула .....	40
5.3.4. Взаимосвязь параметров ВП .....	41
5.4. Микро – КТ.....	44
ВЫВОДЫ .....	48
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	49
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	51

## ВВЕДЕНИЕ

В мерзлой зоне располагается большинство горнорудных районов России. Тенденция поиска и разведки рудных месторождений также направлена на северные регионы нашей страны (Дальний Восток, Якутия, Сибирь).

Одним из основных геофизических методов при поиске рудных месторождений, представленных вкрапленными рудами или сопровождаемых рассеянной рудной минерализацией, является метод вызванной поляризации (ВП). В то же время, для мерзлых пород особенности и физико-химические процессы, порождаемые ВП, изучены плохо. Последнее может приводить к ошибкам при проектировании поисковых работ и/или геологической интерпретации результатов полевых работ методом ВП.

Изучением особенностей ВП в мерзлых породах в настоящее время занимаются несколько авторов (Duvillard, 2018., Revil, 2019., Агеев, 2019 и др.). К подобным работам можно отнести проведение измерений ВП при высушивании образцов (Gao et al., 2019), учитывая, что появление воздуха аналогично появлению льда в породе, где оба являются изоляторами. Однако, полученные к настоящему времени данные не позволяют описать особенности ВП в мерзлых породах, содержащих электропроводящие включения.

Настоящая работа направлена на экспериментально изучение особенностей ВП вкрапленных руд при их переходе из талого состояния в мерзлое. Данная цель предполагала проведение измерений на синтетических смесях песка с зернами криптомелана. Образцы отличались различным объемным содержанием криптомелана и электропроводностью поровой влаги. Достижение цели основывалось на выполнении нескольких задач:

- Сбор, анализ и обобщение литературы
- Тестирование лабораторной установки, аппаратуры, технологии измерений
- Подготовка синтетических образцов
- Оценка петрофизических свойств
- Лабораторные измерения СВП
- Рентгеновская микротомграфия образцов при температурах от +5 до -10 °С

## 1. Криолитозона как объект геофизического исследования

### 1.1. Криолитозона и особенности ее строения

Криолитозоной называется часть литосферы, которая постоянно либо временно существует при отрицательных температурах. Криолитозона является частью криосферы, включающая верхние слои земной коры и нижнюю часть ионосферы. Криолитозона занимает около 25% поверхности суши Земли и 2/3 территории России (Рис.1). Выделяют области сплошной, прерывистой и островной мерзлоты (Калиничева, 2019). Изучение криолитозоны и слагающих ее пород, имеющих ряд особых свойств, является одной из задач современной геофизики.

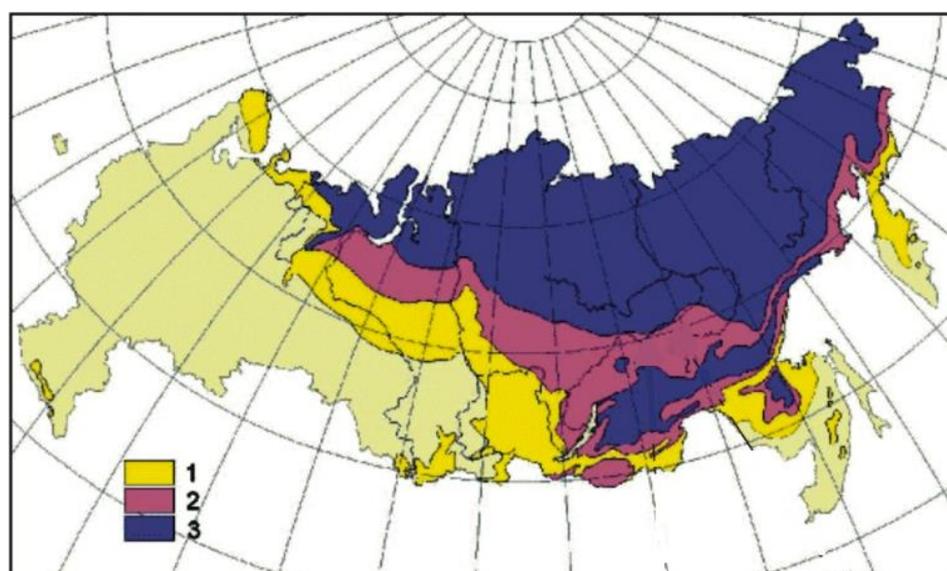


Рис.1 Карта распространения мерзлоты на территории России: Зоны 1 – островной, 2 – прерывистой, 3 – сплошной мерзлоты (Калиничева, 2019)

Основное влияние на свойства пород, в том числе физико-механические, электрические, тепловые и фильтрационные оказывает промерзание воды и переход ее в кристаллическое состояние (Кудрявцев и др., 1978).

Породы, грунты, почвы криолитозоны называют *мерзлыми*, если они обладают нулевой или отрицательной температурой, а часть воды в них кристаллизовалась. Если порода не содержит воду, однако имеет отрицательную температуру, то ее называют *морозной*. Таковыми являются магматические монолиты, грубообломочные отложения в

воздушно-сухих условиях и пр. Породы, содержащие в себе высокоминерализованную воду и имеющие отрицательную температуру, называют *охлажденными*.

В зависимости от того, как долго порода, грунт, почва находится в мерзлом состоянии, их делят на *кратковременно мерзлые, сезонномерзлые* и *многолетнемерзлые (ММП)*.

Для территорий, где температура пород, грунтов и почв остается от нуля и ниже на протяжении более двух лет за рубежом применяют термин *вечная мерзлота (permafrost)*. Таким образом, различий между многолетнемерзлыми, охлажденными и морозными не проводится (Харрис, 2020).

Кратковременно мерзлые почвы распространены в южных широтах, где среднесуточная температура воздуха редко опускается ниже нуля. Такие почвы пребывают в мерзлом состоянии от нескольких часов до нескольких суток.

Сезонномерзлые почвы и грунты характеризуются мерзлым состоянием на период в несколько месяцев. Продолжительность промерзания зависит от глубины, высоты над уровнем моря, широты, долготы и прочих географических условий.

Основную часть криолитозоны составляют многолетнемерзлые породы, для которых характерно мерзлое состояние на протяжении более двух лет. В некоторых регионах этот период составляет века и даже тысячелетия. В этих регионах часто встречаются сезонномерзлые грунты или породы, полностью не оттаявшие в теплый период, а в течение зимнего периода находящиеся в мерзлом состоянии. Слой таких пород или грунта называют перелетком. Встречаются перелетки, существующие несколько лет.

С юга на север мощность многолетнемерзлой криолитозоны варьирует от единиц до сотен метров. В настоящее время, наибольшая вскрытая мощность криолитозоны составляет 1450 метров (Западная Якутия, бассейн р.Мархи). Предполагается, что в высокогорьях или на территории Антарктического щита глубина промерзания пород может быть еще больше.

Температура криолитозоны изменяется с южной границы распространения многолетнемерзлых пород до арктического побережья от 0 до -15 °С.

Развитие криолитозоны на территории России можно разделить на четыре этапа.

Первый этап включает в себя оледенение Полярного бассейна, которое существует непрерывно уже около 3 млн. лет. Предположительно, оледенение приурочено к плиоцен-эоплейстоценовому времени. Данный период характеризуется общей тенденцией к похолоданию и кратковременными отрезками потепления. В пределах Крайнего Севера в плиоцене и плейстоцене на остальной территории формируются многолетнемерзлые грунты.

Второй этап связан с формированием криогенных толщ на севере Сибири, где преобладали отрицательные температуры грунтов. Оледенение на данной территории началось в среднем плейстоцене и не прерывалось до настоящего времени. Изучая следы мерзлоты плейстоценового времени в соседних районах, можно предположить, что мерзлые породы были распространены южнее нынешних границ.

Третий этап оледенения начался в позднем плейстоцене. Резкое и глубокое похолодание приводит к оледенению грунтов почти на всей территории нашей страны. Сегодня мы можем видеть наличие двухслойной мерзлой толщи в Западной Сибири и на северо-востоке европейской части России, где современные мерзлые толщи отделены от реликтовой мерзлоты талыми грунтами. Основываясь на этом факте, можно сказать о наличии мощных толщ многолетнемерзлых пород в плейстоценовое время.

Последний, четвертый этап, который связывают с голоценовым периодом, характеризуется оттаиванием многолетнемерзлых толщ на территории России до 100-250 м., однако, в поздний голоцен часть этих толщ снова подверглась оледенению. К позднеголоценовому периоду относится новообразование мерзлоты на большей части Сибири и Крайнего Севера, между которыми произошло слияние реликтовых мерзлых толщ (Пендин, 2008).

Большинство горнорудных районов на территории России (Дальний Восток, Якутия, Сибирь), в пределах которых активно ведутся поиски и разведка рудных месторождений, находятся в зоне развития сплошной или островной мерзлоты. При поиске и разведке руды в этих регионах необходимо учитывать особенности строения и свойств пород криолитозоны.

Ближе к южным широтам многолетнемерзлые породы представлены отдельными участками в виде линз, залегающими среди талых пород. Выделяют сквозные, несквозные, над-, под-, межмерзлотные и другие виды таликов. Далее, на север, зона несплошного распространения многолетнемерзлых пород увеличивается по мощности и переходит в зону сплошного распространения мерзлоты.

Особенностью строения криолитозоны является изменчивость залегания ее кровли и подошвы. В зависимости от времени года верхние слои мерзлой зоны подвергаются оттаиванию или промерзанию, тогда как на ее подошву могут влиять эндогенные, гидрологические и прочие процессы. Также кровля ММП чувствительна к техногенному воздействию, что чаще всего приводит к её оттаиванию. Изучение техногенного влияния в зонах распространения мерзлоты является одной из задач инженерной геофизики.

Изменение температуры пород на поверхности в течение года (Рис.2) и по глубине (Рис.3) также является особенностью мерзлых зон (Харрис, 2020).

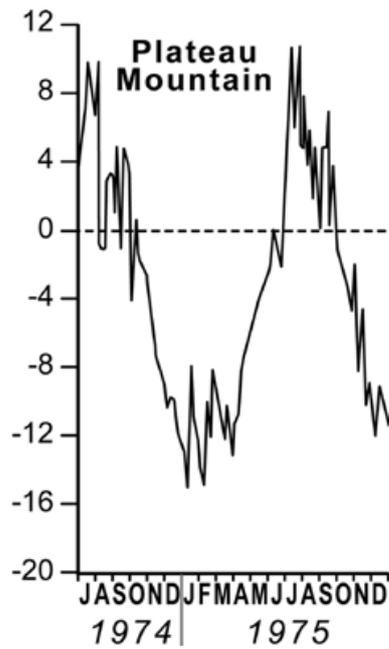


Рис.2 Изменение температуры пород в течении года на горе Плато в провинции Альберта, Канада (глубина 20см.) (Харрис, 2020)

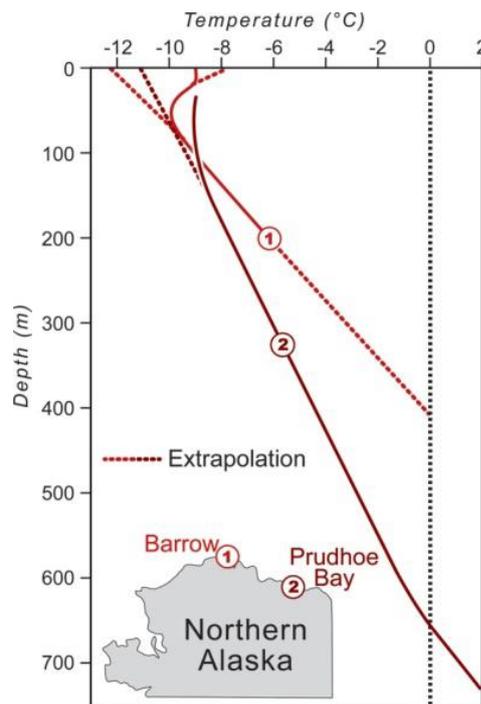


Рис.3 Изменение температуры пород с глубиной с экстраполяцией в скважине. Залив Прудо и Барроу, Аляска, США (Харрис, 2020)

В связи с оттаиванием и промерзанием пород, вода в них испытывает фазовые переходы, что сказывается на изменении некоторых свойств самих пород. С целью наблюдения изменения свойств пород в таких регионах проводится геофизический мониторинг.

На сегодня изучение криолитозоны представляет интерес в силу развития строительства, добычи полезных ископаемых и общего мониторинга состояния ММП в экологическом аспекте в этих регионах.

## 1.2. Типы мерзлотных разрезов и особенности их строения

Мерзлые породы в разрезе могут быть представлены слоями от нескольких сантиметров до первых сотен метров. Как правило, температура увеличивается с глубиной, вследствие чего мерзлые породы редко встречаются на глубинах более 1 км. Иногда встречаются двухслойные мерзлые толщи, где реликтовые мерзлые породы отделены от современной мерзлоты слоем талых пород. Возникновение двухслойных толщ связано с частичным оттаиванием кровли реликтовой мерзлоты и образованием поверх нее новой мерзлой толщи. Там, где температурные условия были более стабильны на протяжении геологического времени, мерзлая толща не испытывала оттаивания, в результате современная мерзлота сливается с реликтовой (Рис.4) (Пендин, 2008).

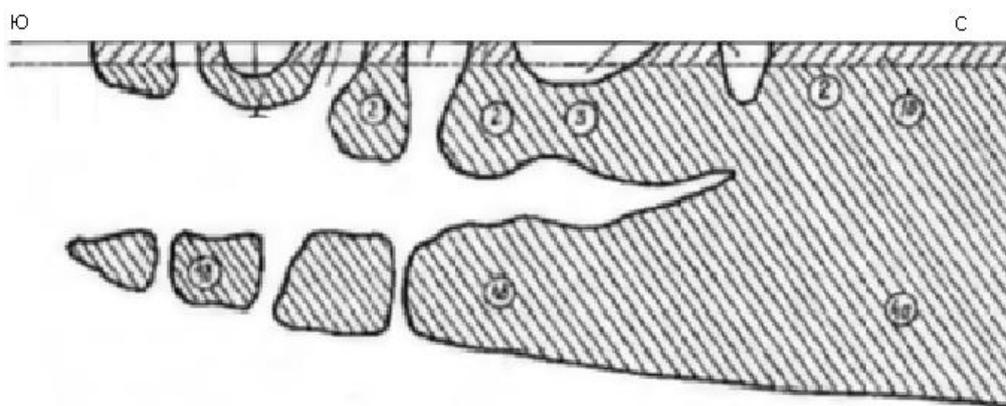


Рис.4 Двухслойная мерзлая толща в Западной Сибири (Пендин, 2008)

Строение сезонномерзлых толщ зависит как от климатических условий, так и от дисперсности осадочного материала (Харрис, 2020). Чем больше контактов зерен присутствует на единицу объема, тем больше теплопроводность, что влияет на строение мерзлой толщи (Рис.5).

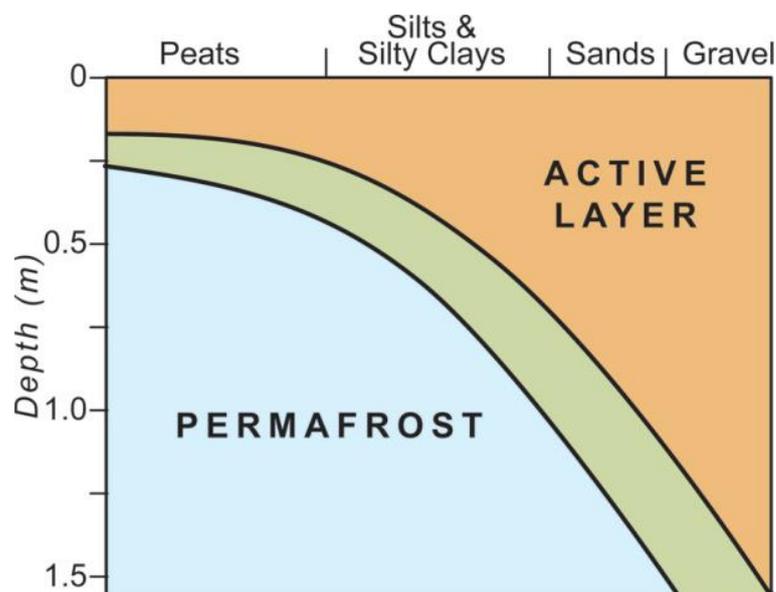


Рис.5 Строение слоя сезонного протаивания и мерзлой толщи в породах различного состава: торф (peat), суглинки и пылеватые глины (silts & silty clays), пески (sands) и гравий (gravel) (Харрис, 2020)

На рисунке 6 представлен типичный слой сезонного протаивания и мерзлой толщи в породах различного состава. В верхней части разреза выделяется активный слой или слой сезонного оттаивания, замерзающий и оттаивающий в течении года (Active Layer). В малопористых отложениях активный слой представлен зоной, свободной ото льда (Ice Free). Активный слой подстилает зона вечной мерзлоты, границу между ними называют «кровлей мерзлоты» (Permafrost Table). В случае, если разрез представлен высокопористыми отложениями, например – торфом, между зоной, свободной ото льда и зоной вечной мерзлоты выделяется промежуточный слой, именуемый оттаивающей каймой (Thawing Fringe). Возникает он за счет проникновения грунтовой воды через верхний горизонт, которая частично влияет на оттаивание этого слоя. Если более 50% активного слоя сложено высокопористыми отложениями, то также выделяется оттаивающий фронт (Thawing Front) (Харрис, 2020).

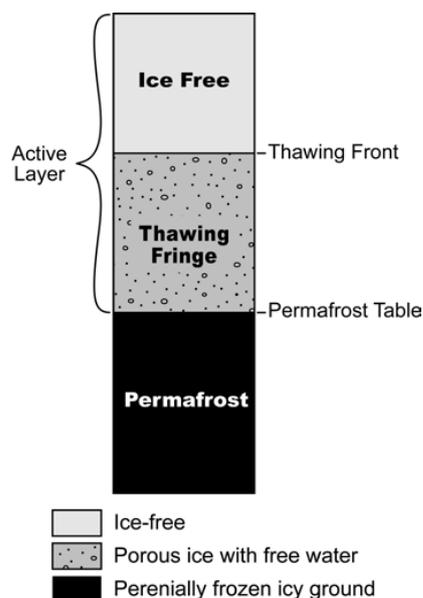


Рис.6 Типичный разрез в области распространения вечной мерзлоты для дисперсных отложений (Харрис, 2020)

### 1.3. Применение геофизических методов для изучения строения и процессов в вечномёрзлых породах

Отечественный опыт применения методов геофизики помогает выявлять закономерности строения криолитозоны, обнаруживать зоны таликов, а также выделять зоны тектонических и карстовых нарушений.

Для изучения криолитозоны в последнее время привлекаются разнообразные геофизические методы, у каждого из которых есть свои преимущества и недостатки.

Метод георадиолокации имеет ограничение по глубине исследования. Методы гравиразведки и магниторазведки характеризуются наличием низкоамплитудных аномалий, вследствие чего, разделять талые и мерзлые породы с их помощью весьма проблематично. Иногда для изучения строения мерзлых зон используют сейсморазведку. Причиной применения сейсморазведки является дифференциация плотностных свойств мерзлых, талых и свободных от льда пород. Сейсморазведка в комплексе с геоэлектрическими методами может применяться для определения строения мерзлотных толщ (Яковлев, 2018). Однако, методы сейсморазведки весьма трудозатратны, относительно электроразведки. Также минусом сейсморазведки является определение мощности мерзлых пород, т.к. нижняя граница представляется нечеткой на сейсморазрезе. Если учесть, что нижняя граница является контрастной, то выделить можно только при помощи метода отраженных волн, к тому же, она должна быть на достаточной глубине

(Зыков, 2019). Наиболее эффективными методами изучения криолитозоны являются методы электроразведки (МПП, постоянного тока).

В работе (Зыков, 2019) выполнена электротомография для выявления верхней границы мерзлых пород на Северной железной дороге под Воркутой.

На геоэлектрических разрезах, построенных по данным метода электротомографии, зонами пониженного сопротивления хорошо выделяются талые породы. Высокоомные области, как правило, отвечают мерзлым породам (Рис.7).

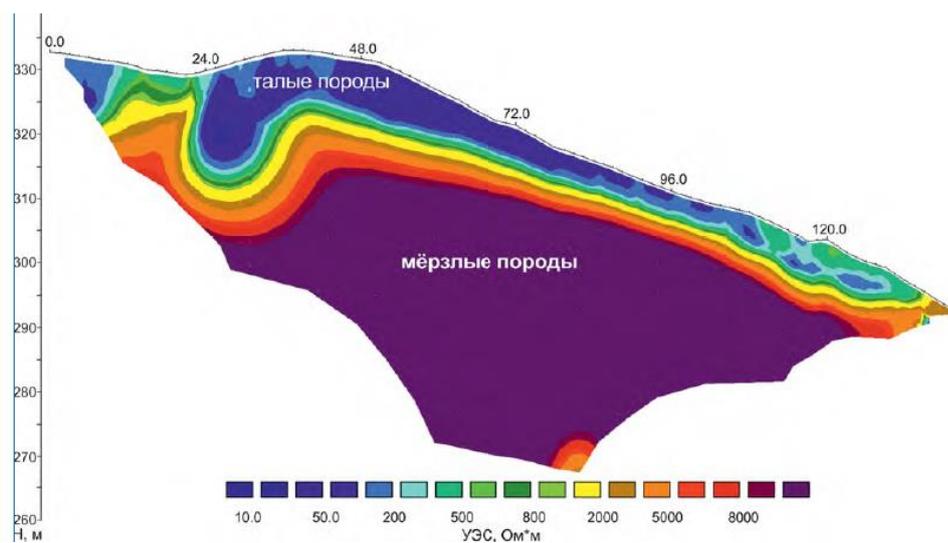


Рис.7 Геоэлектрический разрез в области распространения МПП (Зыков, 2019)

Для изучения строения таликовых зон часто применяют метод электротомографии кажущегося сопротивления. При стационарных измерениях (мониторинг) имеется возможность проследить динамику оттаивания (Шеин, Оленченко 2019). Отмечается успешность применения метода электротомографии при оконтуривании таликовых зон в области распространения палеозера в Ямало-Ненецком автономном округе. На геоэлектрических разрезах по двум профилям, расположенным перпендикулярно, отчетливо выделяется зона распространения многолетнемерзлых, талых и охлажденных пород (Рис.8). Выделенные аномалии заверены несколькими скважинами.

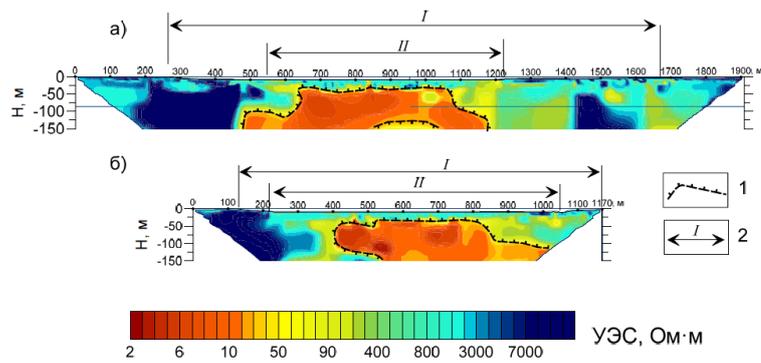


Рис.8 Геоэлектрические профили 1(а) и 2(б) по данным электротомографии:  
1 – предполагаемая граница МПП; 2 – размеры палеозёр (Шейн, Оленченко, 2019)

При поиске таликов, литологических контактов, зон трещиноватости, тектонических нарушений, подземных льдов также применяется метод переходных процессов (МПП).

Зондирования МПП позволяют расчленять мерзлые и талые зоны по глубине, в том числе: определять кровлю и подошву многолетнемерзлых пород, определять строение мерзлых толщ в плане и на глубине и, что немаловажно, изучать мерзлотные процессы и явления, таких как динамика сезонного промерзания и оттаивания, процессов пучения, морозобойного растрескивания и тд. В работе (Павленко, 2012) отмечается успешность применения МПП в районах Севера. На рисунке 9 приведен пример геоэлектрического среза электрического сопротивления в слое 45-50 м, на котором проводящими областями выделены таликовые зоны.

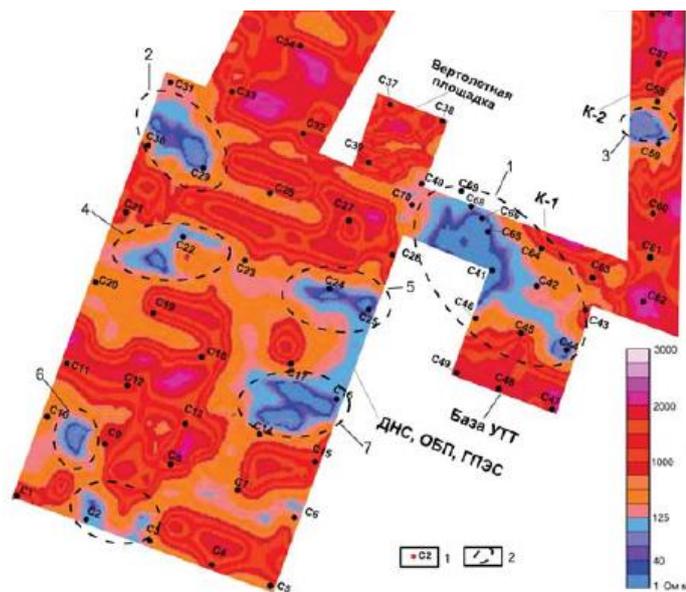


Рис.9 Геоэлектрический срез-инверсия для глубины 45-50 метров по результатам измерений МПП: 1 – пробуренные скважины, 2 – участки таликовых зон с возможным подтоком глубинных вод (Павленко, 2012)

## 2. Строение и свойства мерзлых пород

### 2.1. Состав и строение мерзлых пород

Мерзлые и бывшие в мерзлом состоянии горные породы являются объектом исследования криолитологии. Главной особенностью мерзлых пород является наличие льда в составе, причем лед в них рассматривается как породообразующий минерал. Строение льда в породе зависит от условий формирования мерзлой породы и ее генезиса. Лед может находиться в порах и образовывать прослой, линзы и криогенные конгломераты. Также лед может быть представлен мономинеральной породой в виде подземного льда.

Чаще всего, породы водонасыщены. Кристаллизация воды и переход ее в лед зависит от различных факторов, в частности, от ее минерализации. Гравитационная, капиллярная и слабосвязанная пресная вода кристаллизуется при близких к  $0^{\circ}\text{C}$  температурах. Прочносвязанная или «пленочная» вода при этом замерзает в широком диапазоне отрицательных температур. Морские воды с минерализацией более 30 г/л кристаллизуются при температурах от  $-1,5$  до  $-20^{\circ}\text{C}$ , а рассолы могут не замерзать даже при температуре  $-20^{\circ}\text{C}$ . Причем замерзание воды обычно сопровождается резко выраженной дифференциацией солей между твердой и жидкой фазами. Часть солей, растворенных в воде, оказывается вовлеченной в лед, часть наиболее труднорастворимых – выпадает в осадок, а часть легкорастворимых – отжимается в нижележащие слои воды (Алванян, 2020).

Породу с вкрапленной рудой можно изобразить схемой (Рис.10).

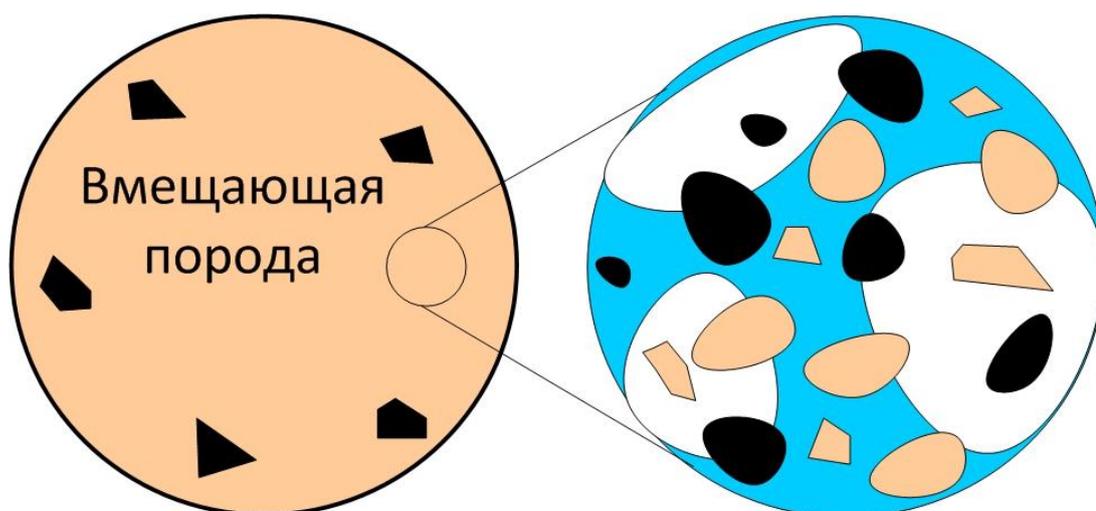


Рис.10 Схематическая модель вкрапленной руды в мерзлом состоянии.

Рудные вкрапления (черный цвет); лед (белый цвет); вода (синий цвет); зерна породообразующих минералов (бежевый)

## 2.2. Физические и физико-химические процессы в промерзающих, мерзлых и оттаивающих породах

Процесс образования льда обусловлен термодинамическим и физико-химическим уравниванием системы. В области отрицательных температур вода кристаллизуется и переходит в лед, т.е. из неуровновешенного состояния переходит в уравновешенное.

При промерзании (оттаивании) породы в ней происходят структурные изменения за счет возникновения (разрушения) льда. Такие изменения влияют на форму, размер, соотношение и ориентацию структурных элементов. В то же время, в породах формируются специфические типы контактов и структурные связи. В магматических, метаморфических части хорошо сцементированных осадочных пород формируются связи преимущественно химической природы. В тонкодисперсных породах преобладают молекулярные и ионно-электростатические связи между структурными элементами (Алванян, 2020).

В зависимости от генезиса, формы, условий накопления и др., лед можно классифицировать (по А. И. Попову и Н. И. Толстихину, 1974 г.):

1. Льды, формирующиеся в земной коре (эндогенные)
  - повторно-жильные, жильные, инъекционные;
  - сегрегационные, лед-цемент;
  - пещерные;
  - горных выработок.
2. Льды, погребенные (экзогенные)
  - снежные (глетчерные, фирновые);
  - водные (наледные, речные; озерные и болотные; морские).

В промерзающих, мерзлых и оттаивающих породах протекают теплофизические, физико-химические и механические процессы. В свою очередь, процессы делятся на три группы:

К первой группе относятся непосредственно криогенные процессы, связанные с тепло- и массообменом в связи с сезонными и многолетними колебаниями. Такие процессы ведут к морозобойному растрескиванию, криогенному выветриванию, морозному пучению, наледообразованию и термокарстам.

Вторая группа включает флювиальные, абразионные и водно-балансовые процессы. Данные процессы связаны с механическими и тепловыми воздействиями водных масс на породы. В таких случаях возникает термоабразия, термоэрозия и заболачивание, чему

предшествует оттаивание пород. Нарушаются структурные связи, физико-механические и тепловые свойства пород.

Третья группа объединяет гравитационные процессы. К ним относятся: солюфикация, сплывы, осыпание, оползание и др. Формируется специфический состав склоновых отложений (Алванян, 2020).

### 2.3. Электрические свойства мерзлых пород

Электрические свойства горных пород - совокупность свойств, характеризующих способность минералов и горных пород проводить электрический ток. К основным электрическим свойствам относятся: удельное электрическое сопротивление (электропроводность) и поляризуемость.

#### 2.3.1. Удельное электрическое сопротивление

На удельное электрическое сопротивление (УЭС) породы чаще всего влияют следующие факторы:

- Влагонасыщенность;
- Минерализация поровой влаги;
- Пористость и структура порового пространства;
- Состав минеральной фазы;
- Температура;
- Давление.

УЭС породы резко возрастает при понижении температуры до точки кристаллизации свободной воды. Диапазон УЭС мерзлых пород колеблется от единиц до  $10^6$  Ом·м. При условии, что в породе находится только связанная вода, УЭС породы возрастает в 2-3 раза. Однако, если вся вода в породе – прочно связанная, УЭС породы почти не изменяется при заморозке. Минерализация поровой воды влияет на температуру замерзания (с ростом минерализации температура замерзания понижается), а также на внутреннюю криоструктуру (расположение льда и незамерзшей воды в породе (Тихонов, 2015)).

В общем случае, поведение электропроводности породы от температуры может быть описано следующим уравнением (Duvillard, 2020):

$$\sigma(T) = \sigma(T_0) [1 + \alpha_T (T - T_0)], \quad (1)$$

где  $T_0$  – комнатная температура ( $25^{\circ}\text{C}$ ),  $\sigma(T_0)$  – проводимость породы при  $25^{\circ}\text{C}$ ,  $T$  – температура породы,  $\alpha_T = 0.021^{\circ}\text{C}^{-1}$  – постоянная величина, определяемая как зависимость изменения проводимости на каждые  $2^{\circ}\text{C}$ , и не зависящая от содержания воды в породе.

При переходе температуры ниже точки заморзания ( $T_F$ ) выражение (1) принимает следующий вид:

$$\sigma(T) = [(\varphi - \theta r)\exp((-T - T_F)/T_C) + \theta r] (\sigma(T_0) / \varphi)[1 + \alpha_T (T - T_0)], \quad (2)$$

где  $\varphi$  – пористость,  $\theta r$  – свободная вода,  $T_F$  – температура, соответствующая точке заморзания,  $T_C$  – температура, соответствующая переходу породы из талого в мерзлое состояние.

Теоретическая зависимость УЭС от температуры, предсказываемая выражениями (1) и (2) приведена на рисунке 11.

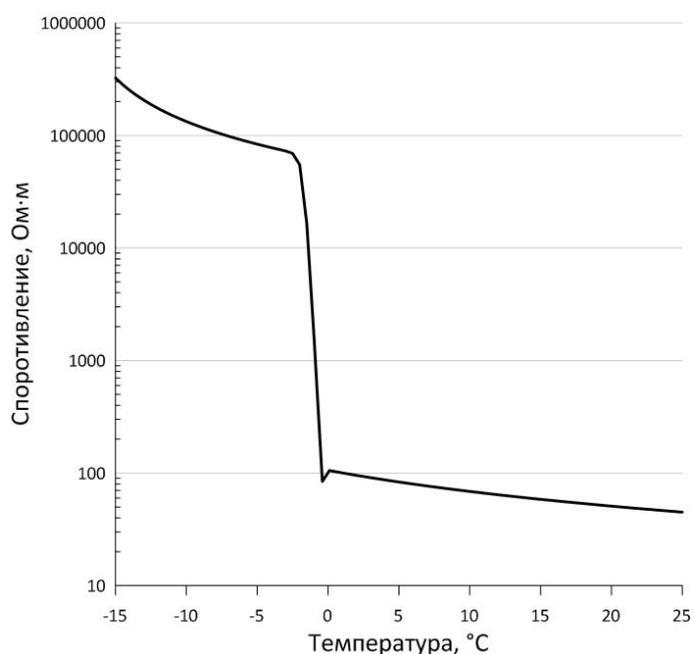


Рис.11 Теоретическая кривая, показывающая изменение УЭС от температуры

### 2.3.2. Поляризуемость

Поляризуемость – способность породы накапливать электрический заряд под действием электрического поля. Основная доля вторичных электрических зарядов накапливается в пограничном слое между твердой и жидкой фазами в ходе физико-химических процессов (миграция, диффузия, электрохимические реакции и др.). Поляризуемость определяется отношением напряженности первичного электромагнитного поля, пропускаемого в землю, и вторичным полем, созданного поляризованной геологической средой:

$$\eta = U_{ВП} / U^*, \quad (3)$$

где  $U_{ВП}$  — напряжение в момент выключения тока,  $U^*$  — напряжение при длительном пропускании тока.

Механизмы ВП в ионопроводящих породах и породах с включениями электропроводящих (или металлических) включений различны.

Механизм поляризации диэлектрического включения предложенные в работе (Duvillard, 2018) приведен на рисунке 12.

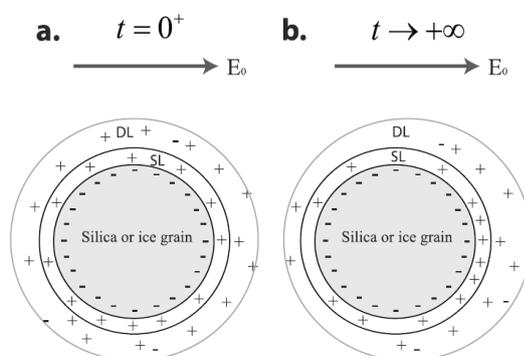


Рис. 12 Схема модели ВП диэлектрического включения (Duvillard, 2018).

Слева – частица в состоянии покоя, справа – под воздействием электрического поля

Здесь рассматривается частица, на поверхности которой сформирован двойной электрический слой (ДЭС). Используется двухслойная модель ДЭС: плотный слой Штерна (SL) и диффузный слой (DL). Оба слоя состоят из подвижных зарядов. Однако, движение зарядов в слое Штерна возможно только в тангенциальном направлении, а в диффузном – в любом. В результате наложения электрического поля заряды плотного слоя начинают движения по поверхности включения. В результате с одной стороны зерна формируются

избытки, а с другой – недостаток зарядов. Зерно оказывается поляризованным. После снятия электрического поля заряды релаксируют в исходное состояние также посредством поверхностной диффузии.

Механизм ВП частицы, обладающей полупроводниковым типом проводимости, в отсутствие окислительно-восстановительных реакций на межфазной поверхности, предложенный в работе (Duvillard, 2018), приведен на рис. 13.

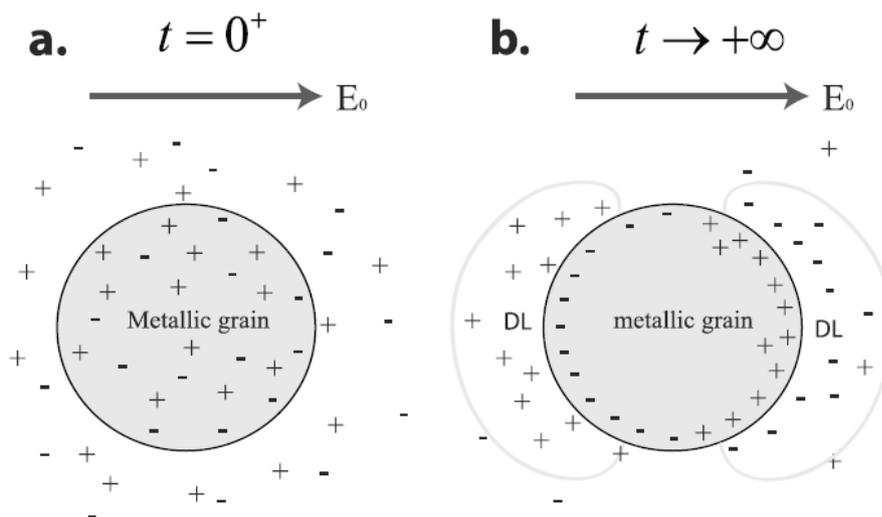


Рис. 13 Схема модели ВП металлической частицы (Duvillard, 2018).

Слева – частица в состоянии покоя, справа – под воздействием электрического поля

При отсутствии окислительно-восстановительных реакций ДЭС на поверхности включения отсутствует. Полупроводниковый тип проводимости включения подразумевает наличие в качестве переносчиков зарядов электроны (-) и «дырки» (+). Под воздействием электрического поля носители заряда распределяются по обеим сторонам металлической частицы. В результате у разных сторон включения формируются противоположные по знаку разности потенциалов, что приводит к притягиванию ионов жидкой фазы к поверхности. Накопление зарядов вблизи поверхности включения приводит к формированию диффузионных слоев.

При отключении электрического поля носители заряда стремятся вернуться в равновесное состояние. Время, за которое они вернуться, принято называть временем релаксации ( $\tau$ ).

Механизмом быстропротекающей вызванной поляризации мерзлых пород объясняется поляризацией Максвелла-Вагнера. Сущность эффекта заключается в накоплении зарядов на границе двух сред с разным УЭС. В свою очередь интенсивность

поляризации зависит от криотекстуры, температуры, минерализации, глинистости и общей льдистости породы (Агеев, 2019).

### 3. Общие положения теории вызванной поляризации

Идея использования эффекта ВП для решения геологических задач была впервые предложена французским геофизиком К. Шлюмберже. Математические основы ВП были сформулированы в середине прошлого века канадским геофизиком Г. Сигелом. В СССР на развитие метода ВП оказали Ю.П. Булашевич, Б.И. Геннадиник, В.А. Комаров, В.В. Кормильцев и другие выдающиеся ученые.

Источниками поля ВП являются диполи, возникающие в результате накопления на противоположных сторонах частицы положительных и отрицательных зарядов. Процесс перемещения зарядов связан с влиянием внешнего электрического поля.

Для проведения измерений ВП обычно используются такие же установки, как и в методе сопротивлений, например, четырехэлектродная установка AMNB.

#### 3.1. Вызванная поляризация во временной и частотной области

Для удобства возьмем установку AMNB, расположенную на поверхности однородно объемно-поляризуемого пространства. В момент включения тока ( $t_{вкл}$ ) и его пропускании через питающие электроды ( $I_{AB}$ ) (Рис.14, а) среда начинает заряжаться. Зарядание среды в этом случае подобно зарядке конденсатора в элементарной электрической цепи. Затем поле ВП начинает нарастать (Рис. 14, б). В итоге, процесс ВП выходит на насыщение, и напряжение пропускания  $U_{пр}$  в приемной линии MN прекращает изменяться. После выключения тока вторичное поле спадает по тому же временному закону, что и при зарядании среды.

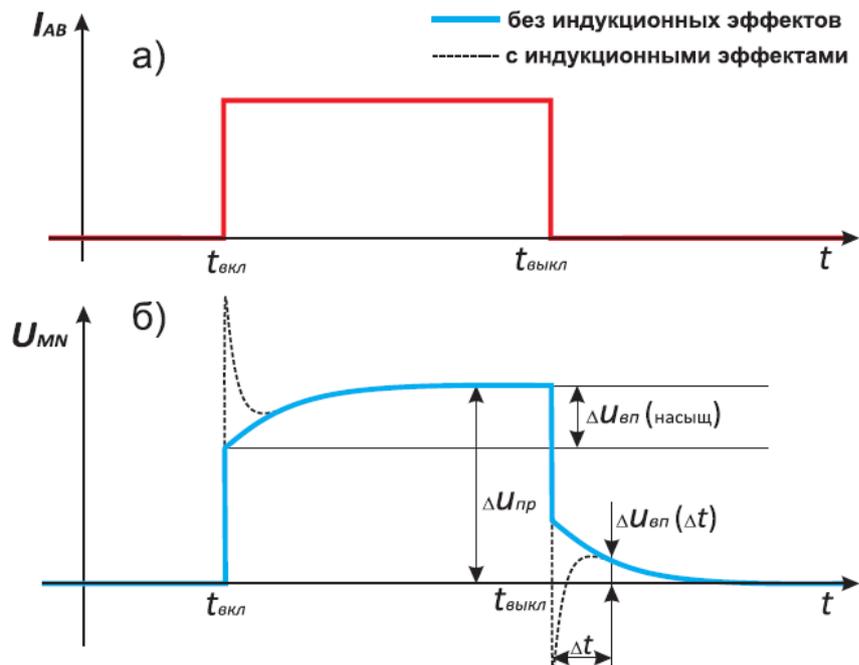


Рис. 14 Реакция поляризуемой среды на прямоугольный импульс тока (Алексанова, 2018).

Характеристикой интенсивности процессов ВП является поляризуемость ( $\eta$ ):

$$\eta = \frac{U_{MN}(t_{\text{вкл}}) - U_{MN}(t_{\text{выкл}})}{U_{MN}(t_{\text{выкл}})} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где  $U_{MN}(t_{\text{вкл}})$  – напряжение, измеренное сразу после включения тока, измеренное до появления поля ВП,  $U_{MN}(t_{\text{выкл}})$  – напряжение непосредственно перед выключением тока.

Поляризуемость также может быть выражена отношением остаточного напряжения ( $U_{\text{ВП}}$ ) к напряжению пропускания полностью ( $U_{\text{ПР}}$ ) заряженной среды:

$$\eta = \frac{U_{\text{ВП}}}{U_{\text{ПР}}} \cdot 100\%. \quad (5)$$

На практике  $U_{\text{ВП}}$  изменяется не сразу после выключения тока, а спустя некоторое время задержки. Помехой в данном случае являются индукционные эффекты на ранних временах — становление электромагнитного поля в среде.

В амплитудно-частотном методе ВП амплитуда  $\rho(\omega)$  убывает с частотой, а асимптотические значения  $\rho_0$  (сопротивление на постоянном токе) и  $\rho_\infty$  (сопротивление на бесконечной частоте) связаны через поляризуемость:

$$\rho_\infty = \rho_0(1 - \eta), \quad (6)$$

Откуда поляризуемость можно выразить следующим образом:

$$\eta = \frac{\rho^0 - \rho^\infty}{\rho^0}. \quad (7)$$

На практике  $\rho_0$  и  $\rho^\infty$  невозможно измерить, поэтому в полевых работах обычно используется процентный частотный эффект (Percent Frequency Effect или PFE):

$$PFE(\omega_1, \omega_2) = \frac{|\rho(\omega_1)| - |\rho(\omega_2)|}{|\rho(\omega_1)|} \cdot 100\%. \quad (8)$$

Выбор частот  $\omega_1$  и  $\omega_2$  основан на том, чтобы не затягивать время измерений и не попасть в зоны индукционных искажений.

Для фазово-частотных измерений ВП характерно появление фазы ( $\varphi_{ВП}$ ). Для объяснения сущности фазы возьмем прямоугольный разнополярный ток  $I_{AB}$  и измеренный сигнал  $U_{MN}$  (Рис. 15). Жирными линиями показан импульс, тонкими – первые (основные) гармонические компоненты.

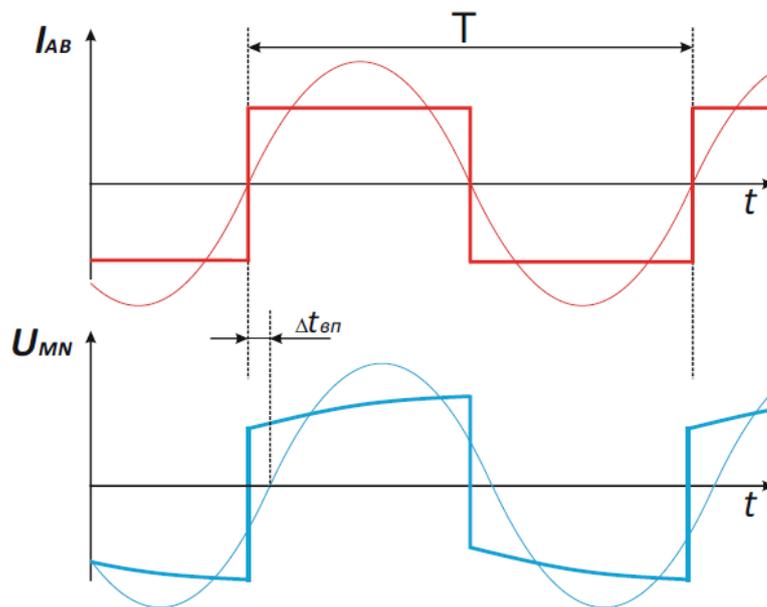


Рис. 15 Образование фазового сдвига ВП в первой гармонике прямоугольного сигнала (Алексанова, 2018)

Из-за эффекта ВП сигнал в приемной линии MN отличается от прямоугольного, поэтому первая его гармоника смещена вправо. Временной сдвиг  $\Delta t_{ВП}$  связан с фазой ВП через период  $T = 2\pi/\omega$ :

$$\varphi_{ВП} = (\Delta t_{ВП}/T) \cdot 360^\circ. \quad (9)$$

Аналогично амплитудно-частотным измерениям, рабочая частота  $f = \omega / 2\pi$  подбирается не слишком низкой (чтобы не снижать производительность работ) и не слишком высокой (чтобы избежать влияния индукционных эффектов). Как правило, рабочая частота колеблется от 0.1 до 10 Гц (Алексанова и др., 2018).

### 3.2. Спектральная вызванная поляризация

Форма временного спада поля ВП, как и характер зависимости амплитуды и фазы от частоты, в различных породах существенно отличается. На основе экспериментальных данных установлено, что спектральные характеристики ВП зависят от размера и состава зерен, структуры и минерализации поровой влаги. Для теоретического описания эффекта ВП было предложено множество моделей. В обычных случаях комплексное УЭС породы может быть описано эмпирической моделью Пелтона (Pelton et al., 1978):

$$Z(\omega) = R_0 \left[ 1 - m \left[ \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^c} \right] \right], \quad (10)$$

где  $Z$  – модуль комплексного электрического сопротивления,  $R_0$  – значение электрического сопротивления на постоянном токе,  $m$  – стационарная поляризуемость,  $\tau$  – время релаксации,  $c$  – показатель степени модели Коул-Коул,  $\omega$  – круговая частота,  $i$  – мнимая единица.

Стационарная поляризуемость в данном уравнении характеризует интенсивность поляризации породы, время релаксации определяет время, за которое носители заряда вернуться в равновесное состояние, а показатель степени модели Коул-Коул описывает дисперсию времени релаксации и может характеризовать степень неоднородности породы. Безразмерный коэффициент  $C$  находится в пределах от 0 до 1. Для песчано-глинистых смесей он колеблется от 0.1-0.3, когда как для хорошо сортированных пород он может быть равен 0.5 и выше.

Каждый параметр определенным образом влияет на фазовый спектр (Рис. 16).

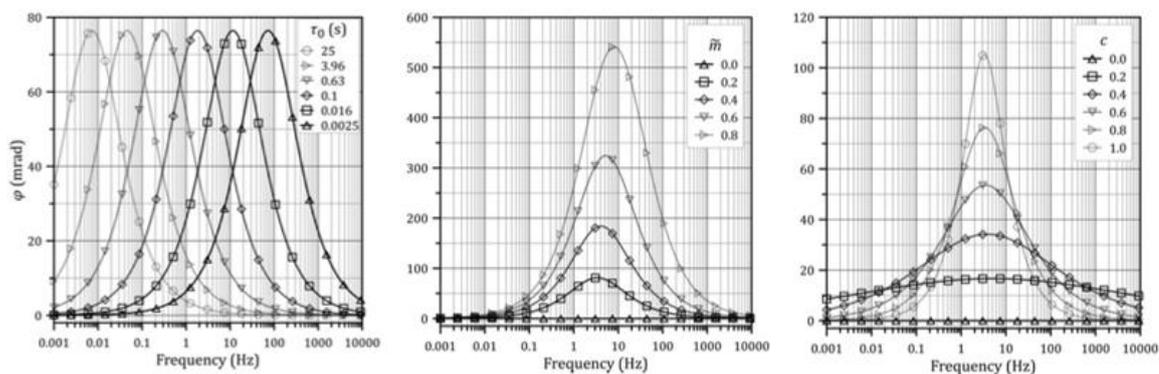


Рис. 16 Влияние времени релаксации, стационарной поляризуемости и показателя степени модели Коул-Коул на фазовый спектр (Slater, 2020)

На практике спектральные параметры ( $\tau$ ,  $m$ ,  $c$ ) могут быть использованы для оценки свойств поляризующихся тел. Однако, в настоящее время метод спектральной ВП характеризуется низкой производительностью относительно ВП во временной области, а его применение целесообразно на небольших участках работ, либо в лабораторных условиях (Люо, 2008).

#### 4. Материалы и методы

##### 4.1. Аппаратура и лабораторное оборудование

Для проведения измерений использовалась морозильная камера Haier HCE143R. Объем камеры 146 литров, диапазон рабочих температур от  $-25$  до  $+20^{\circ}\text{C}$ . С помощью программируемого термостата Термодат-14Е5 задавалась температура в камере (Рис.17). Погрешность установления температуры составила  $\pm 1.25^{\circ}\text{C}$ . В камере было сделано два отсека из пенополистирола. В одном отсеке находилась установка с синтетическим образцом для измерения ВП, а также аналогичная копия этой установки для измерения температуры в образце. От стенок камеры измерительный отсек был теплоизолирован со всех сторон. В другом отсеке располагался высокоточный термодатчик ТС711А для измерения температуры в камере. На дне камеры были размещены ёмкости с антифризом (температура замерзания  $-30^{\circ}\text{C}$ ) суммарным объемом 30 литров.



Рис.17 Морозильная камера (а) и термостат (б)

Теплоизоляция и буферный раствор антифриза исключили возможность резкого изменения температуры в измерительном отсеке и образце (Рис. 18).

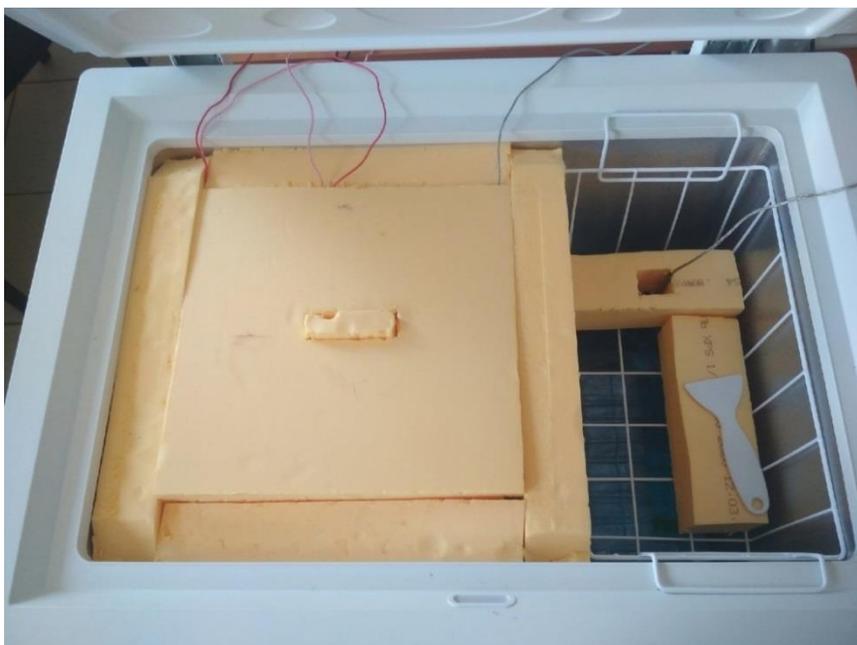


Рис. 18 Вид внутренней части камеры

Теплоизоляция измерительного отсека пенополистиролом и буферный раствор на дне камеры

Четырёхэлектродная установка для образца представляет собой конструкцию из пластиковой трубки (Рис. 19). Торцевые отверстия трубки закрывались пластиковыми крышками с медными дисковыми электродами. Внутри трубки располагались приемные кольцевые электроды, изготовленные из нержавеющей стали. Идентичная (референсная) установка для измерения температуры в образце имела точно такую же конструкцию.

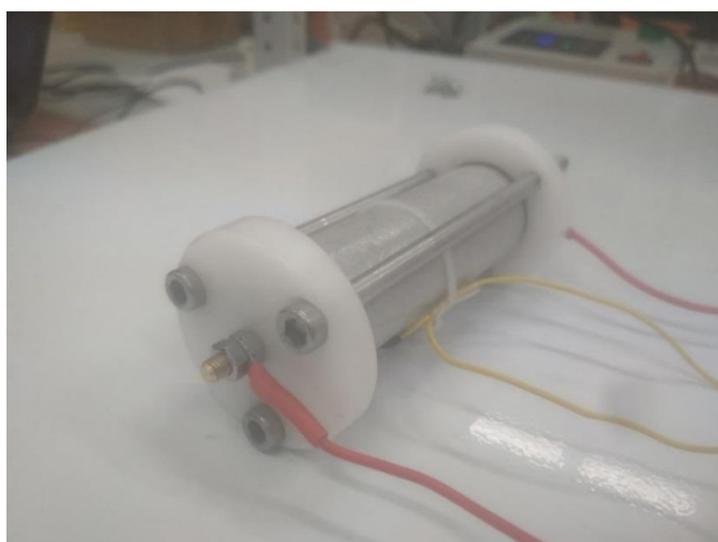


Рис. 19 Лабораторная установка для измерения ВП в сборе

Для измерения комплексного импеданса использовался программируемый многофункциональный потенциостат-гальваностат P-40X (далее – P-40X) (Рис. 20). С помощью P-40X можно создавать гармонический (диапазон частот от 10 мГц до 10 кГц) и импульсный ток в образце. Прибор предусматривает возможность работы в диапазоне стабилизированных токов от 1 нА до 3 А, а также имеет высокое входное сопротивление (100 ГОм).

Для P-40X заранее задавалась программа измерений комплексного импеданса используя программное обеспечение ES8. Далее, прибор в автоматическом режиме выполнял циклические измерения комплексного импеданса в диапазоне частот 10 кГц до 10 мГц. Изменение частоты от высоких к низким. С помощью компьютера выполнялся контроль и управление процессом измерений.



Рис. 20 Многофункциональный потенциостат-гальваностат P-40X

Температура в морозильной камере менялась в соответствии с заданной программой. Программа заморозки-разморозки образцов создавалась, используя TermodatNet (программа управления регулятором температуры Термодат-14Е5). В общем случае, схема лабораторной установки представлена на рисунке 21.

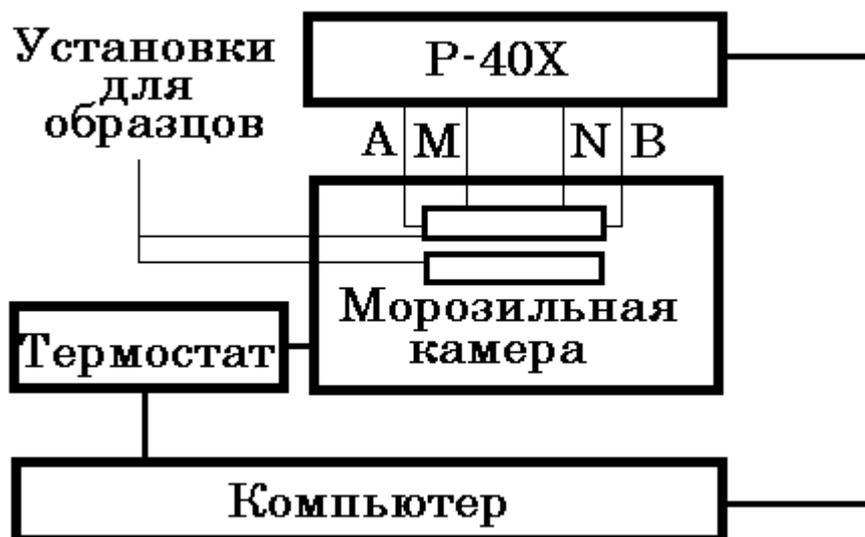


Рис. 21 Блок-схема лабораторных измерений  
Компьютер подключен к P-40X и термостату

#### 4.2. Синтетические образцы горных пород и их характеристика

Измерения проведены на просеянном кварц-полевошпатовом песке (диаметр зерен 0.2 – 0.3 мм) и его смесях с криптомеланом (диаметр зерен 0.5 – 1 мм), насыщенным электролитом – раствором воды различной электропроводности:

- А1 – Песок (электропроводности раствора 500 мкС), без рудных включений;
- А2 – Песок 95% + криптомелан 5% (500 мкС);
- А3 – Песок 97.5% + криптомелан 2.5% (2000 мкС);
- В3 – Песок 97.5% + криптомелан 2.5% (2000 мкС).

Смеси помещались в измерительную установку и референционную установку малыми порциями. Каждая порция спрессовывались вручную. В идентичную установку помещался аналогичный образец.

#### 4.3. Методология экспериментальных работ

Программа изменения температуры в диапазоне +5 – -15 градусов предусматривала заморозку и разморозку образца ступенями по 3 градуса. В диапазоне этих температур обеспечивалась полная заморозка и оттаивание воды в образце. Примеры программ изменения температуры в камере и образце приведены на рисунке 22.

Для образца В3 использовалась другая программа измерений – сначала ступенями температура опускалась до -15 градусов, а затем камера выключалась и образец размораживался. Программа заморозки и температура в образце В3 показаны пунктирными линиями на рисунке 22. Подобная программа заморозки-оттаивания образцов позволяла лучше последить динамику изменения спектров комплексного импеданса в процессе разморозки (градиент изменения температуры в образце меньше).

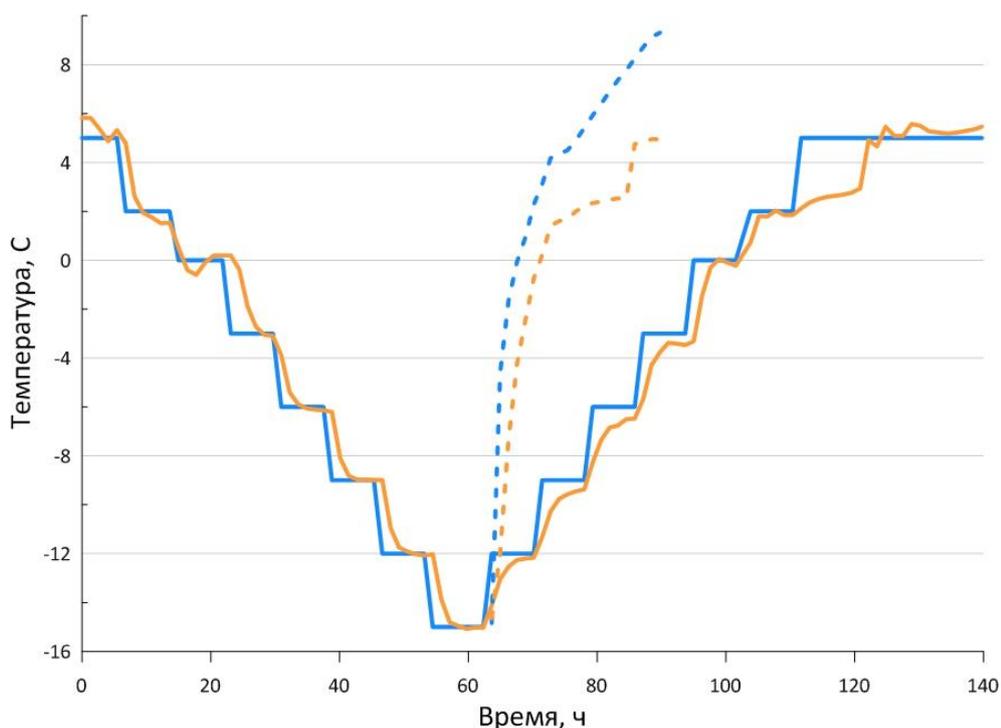


Рис.22 Изменение температуры в образце и камере в процессе цикла заморозки - разморозки. Синяя линия – температура, установленная программой в камере, оранжевая линия – температура в образце. Пунктирной линией показано изменение температуры в камере и образце при измерениях на образце В3

Температура в образце не сразу приобретала температуру, установленную в камере. Совпадение температуры в камере и образце отмечалось к концу приложенной ступени. Время релаксации температуры в образцах составляло 5 – 6 часов. Опытным путем определена оптимальная длительность ступени в 8 часов. При этом усвоено, что процесс оттаивания происходил медленнее, чем заморозка. Эта особенность сильно проявлена при приближении к 0 °С. По этой причине приходилось выдерживать последнюю ступень дольше, чем 8 часов, пока лед окончательно не переходил в воду. Помимо особенностей изменения температуры в образце, можно выделить еще несколько моментов, на которые стоит обратить внимание. Один из них связан с переходом температуры в

образце через 0 °С. Температура сначала опускается чуть ниже нуля, а затем снова повышается и держится некоторое время на одном уровне. Связана эта особенность с выделением тепла в процессе кристаллизации воды. Аналогичная зависимость установлена при переходе к положительным температурам. При установленной программой температуры в +5 °С, температура в образце долго стремится к этому уровню. В определенный момент температура в образце резко изменяется и достигает температуры, установленной в камере. Именно в этот момент большая часть льда переходит в воду, о чем говорилось выше.

Параллельно с изменением температуры проводились измерения модуля комплексного импеданса в диапазоне частот от 10 кГц до 10 мГц. На графике (Рис. 23) показано изменение модуля импеданса образца в цикле заморозки-оттаивания. На графике комплексного импеданса наблюдаются своего рода ступени, соответствующие ступеням температуры. Стабилизация сопротивления наблюдается ближе к концу ступени, когда образец приобретал установленную в камере температуру. Видно, что ступени на графике несимметричны при одинаковых значениях температуры при заморозке и разморозке. Данная асимметрия связана с тем, что разморозка образца длилась дольше, чем заморозка. Кроме того, вероятно перестройка порового пространства образца в процессе заморозки.

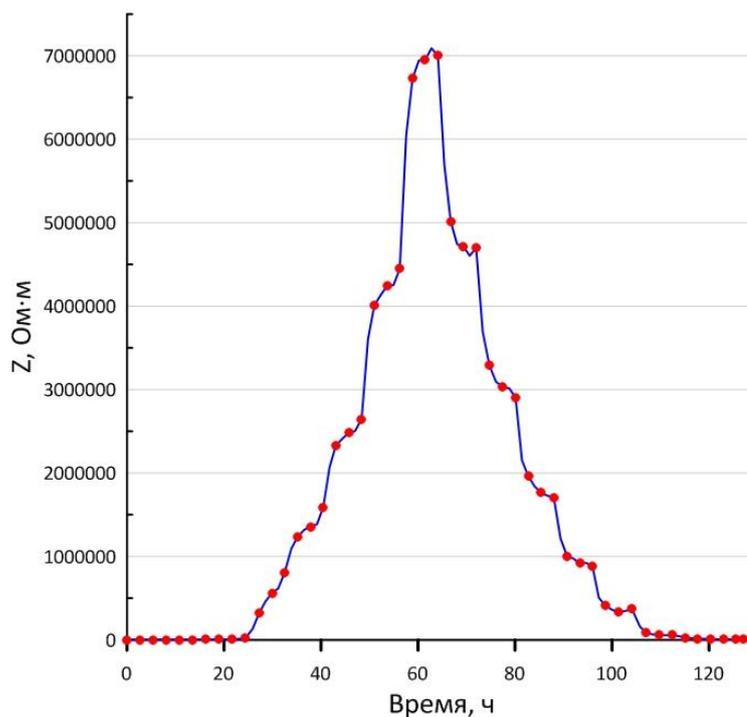


Рис. 23 Изменение модуля импеданса в процессе заморозки и разморозки (образец АЗ)

Коэффициент установки ( $k= 0,0158$ ) определен по результатам измерений на воде различной солености, что позволило перейти от комплексного импеданса к удельному электрическому сопротивлению ( $\sigma = 1/\rho= k/Z$ ).

#### 4.4. Компьютерная рентгеновская микротомография

Для определения динамики изменения структуры порового пространства в процессе заморозки и разморозки выполнена компьютерная рентгеновская микротомография (далее – микро-КТ) при разных температурах: -10, -5, -2 и 2 градусах. Для этой цели использовался рентгеновский микротомограф SkyScan 1172. По данным микро-КТ были реконструированы трехмерные теневые («плотностные») модели просеянного песка (диаметр зерен 0.2 – 0.3 мм), упакованного в цилиндрический пластиковый контейнер диаметром 5 мм, длиной 10 мм. Пример срезов трехмерной «плотностной» модели в горизонтальной и вертикальных плоскостях показан на рисунке 24.

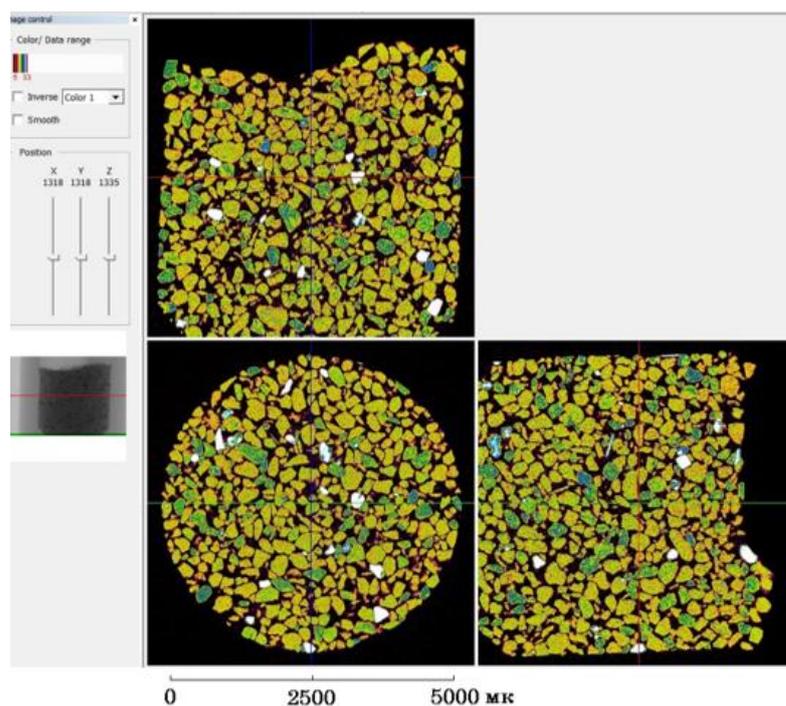


Рис. 24 Трехмерная «плотностная» модель

Для анализа динамики изменения порового пространства были взяты срезы (одинаковые X, Y, Z). Раскраска модели подбиралась вручную. Основным требованием раскраски являлось четкое разделение фаз в образце по плотности (зерна, лед, вода, воздух).

## 5. Результаты и их обсуждение

### 5.1. Удельное электрическое сопротивление

Удельное электрическое сопротивление (далее в тексте электрическое сопротивление) породы резко возрастает при температуре ниже  $0^{\circ}\text{C}$ . В процессе заморозки породы при переходе через  $0^{\circ}\text{C}$  часть поровой влаги в порах переходит в лед. В следствии этого пористость породы снижается, а электрическое сопротивление увеличивается.

В породе выделяют два типа поровой воды: «свободная вода» в крупных капиллярах (перемещаемая под действием гравитационных сил) и «капиллярная» или «пленочная вода», заполняющая более тонкие поры и капилляры. Гравитационная вода замерзает первой вблизи  $0$  градусов, а «пленочная» вода сохраняется в породе даже при очень низких температурах (до  $-10$  -  $-15$  градусов). Учитывая то, что электрический заряд в породе переносится преимущественно ионами жидкой фазы ее электропроводность косвенным образом позволяет характеризовать процесс промерзания породы. На графиках зависимости электрического сопротивления от температуры процессы кристаллизации льда в песке хорошо видны (Рис. 25). Аналогично изменению температуры в образце, электрическое сопротивление при переходе через  $0^{\circ}\text{C}$  в скором времени возвращается на прежний уровень и держится там некоторое время. К тому же, в каждом измерении мы видим гистерезис, ярко выраженный в диапазоне от  $-1^{\circ}\text{C}$  до  $-5^{\circ}\text{C}$ . Вероятно, гистерезис связан с особенностями формирования льда в образце (Ren and Vanapalli, 2019).

Изначально вода замерзает в крупных порах, образуя в центре зародыши льда, которые увеличиваются в процессе замерзания. Далее замерзают поры меньшего размера. При образовании льда в породе вокруг зерен сохраняются тонкие пленки воды, обладающие повышенной минерализацией. Процесс оттаивания проходит обратным образом – сначала оттаивают мелкие поры, а затем крупные. Помимо этого, при переходе образца из мерзлого состояния в талое, может изменяться извилистость порового пространства, что также влияет на сопротивление породы.

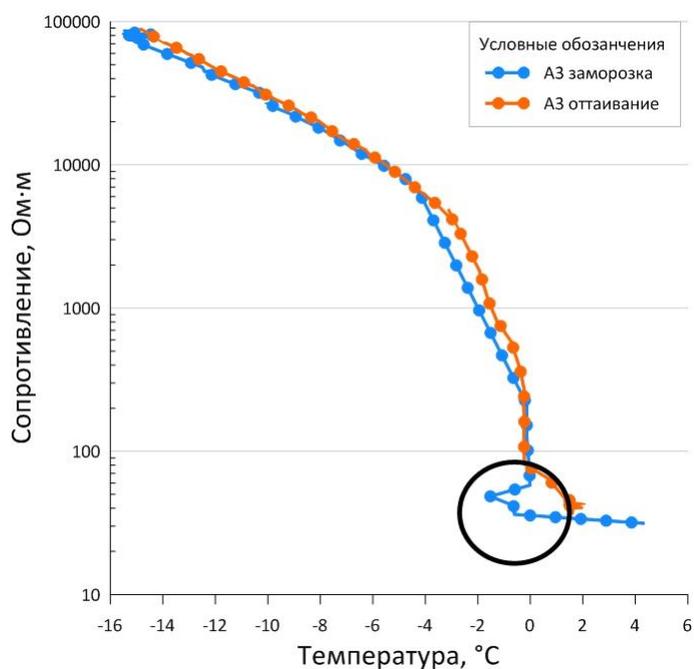


Рис. 25 Зависимость сопротивления от температуры в образце при заморозке и разморозке (образец А3). Черный круг – область переохлажденного состояния воды

Подобную зависимость сопротивления от температуры можно видеть в работе (Limbrock, 2021) при измерениях на песчанике и граните (Рис. 26).

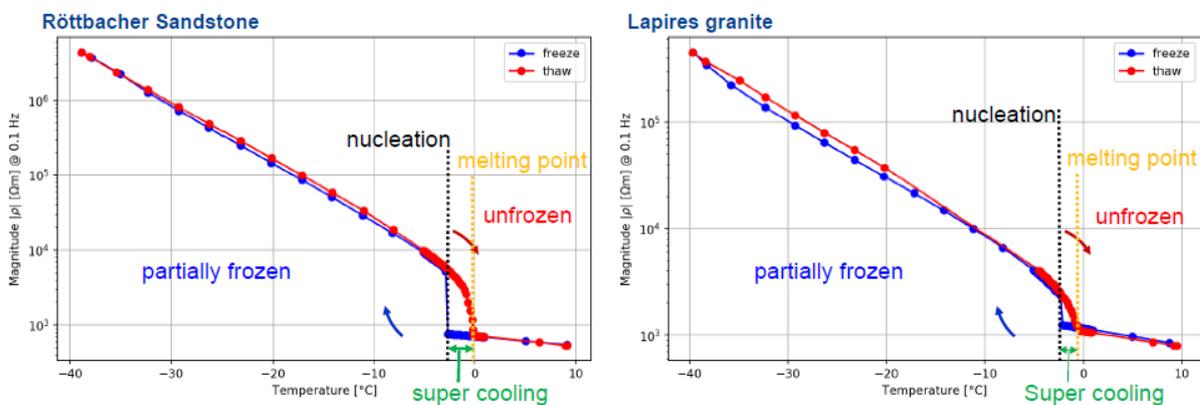


Рис. 26 Зависимость сопротивления от температуры в образце при заморозке и разморозке. Слева – песчаник, справа – гранит.

В данной работе автор использует термин «super cooling», характеризующий область нахождения воды в переохлажденном состоянии вблизи  $0^{\circ}\text{C}$ . На полученных зависимостях петля гистерезиса минимальная и процесс заморозки-разморозки происходит почти линейно. Вероятно, маленькая по размерам петля гистерезиса была достигнута за счет плавного перехода температуры в камере через  $0^{\circ}\text{C}$ . В данной работе переход от  $0^{\circ}\text{C}$  до  $-4^{\circ}\text{C}$  осуществлялся с шагом  $0.2^{\circ}\text{C}$ , который длился от 120 до 180 минут. Также можно

заметить, что ширина области переохлажденного состояния воды несколько больше у песчаника. Точка замерзания у двух образцов тоже отличается. Такие различия могут быть связаны с как с различной пористостью образцов, так и различной минерализацией поровой воды.

На графике (Рис.27) можно видеть, что экспериментальные данные можно описать зависимостью, рассчитанной согласно выражению (2). Для удобства показана зависимость сопротивления от температуры, учитывая, что  $\rho = 1/\sigma$ . На графике видно, что электрическое сопротивление изменяется согласно теоретической зависимости в процессе заморозки.

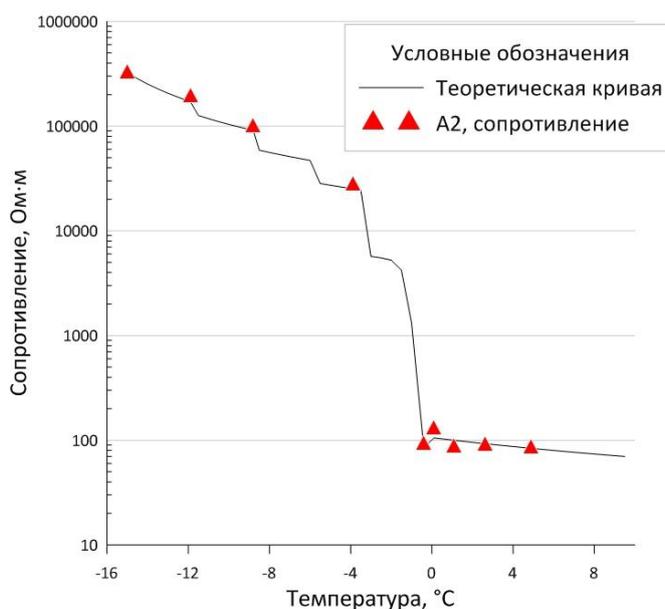


Рис. 27 Сопоставление теоретической зависимости сопротивления от температуры с экспериментальными данными

## 5.2. Фазовые спектры

На рисунке 28 приведены фазовые спектры образцов при различной температуре.

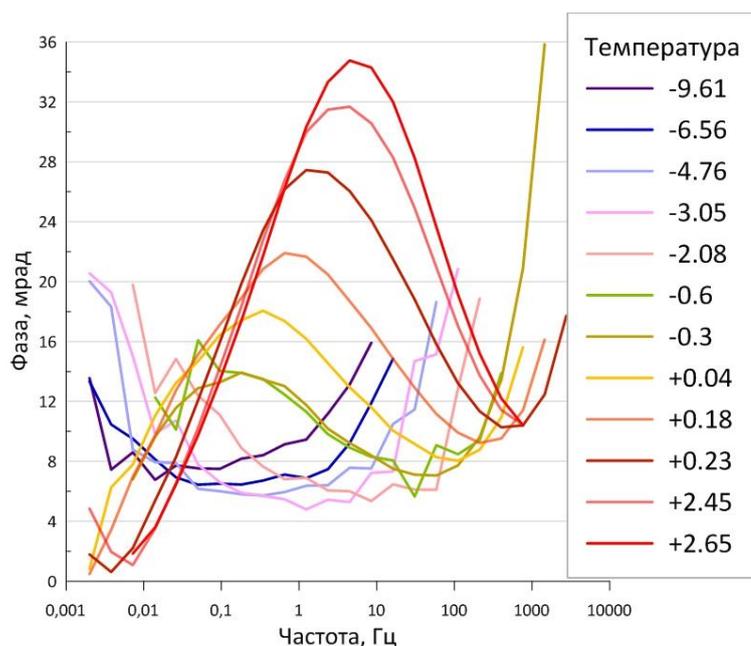


Рис. 28 Фазовые спектры для смеси песка с криптомеланом (образец В3)

В цикле заморозки-разморозки фазовые спектры образцов изменялись одинаковым образом. Снижение температуры в образце сопровождалось смещением максимума пика фазы в сторону низких частот, уменьшением амплитуды пика и его расширением. При разморозке мы наблюдали аналогичные изменения спектров, но в обратной последовательности.

Подобная динамика изменения фазовых спектров наблюдается при высушивании песка с включениями биоугля – древесного угля из растительных остатков (Gao et al., 2019). Фазовые спектры для песка с включениями биоугля представлены на рисунке 29. По мере уменьшения количества воды в смесях песка и биоугля пик в фазовых спектрах смещался в область низких частот, а его интенсивность уменьшалась.

Процесс высушивания образцов подобен процессу замораживания, так как приводит к уменьшению доли воды (проводящей фазы) в породе. В первом случае изолятором является воздух, во втором – лед. Учитывая схожесть процессов, следует ожидать аналогичные поведения геоэлектрических параметров от водонасыщенности пород (в частности, – изменение параметров модели Коул-Коул).

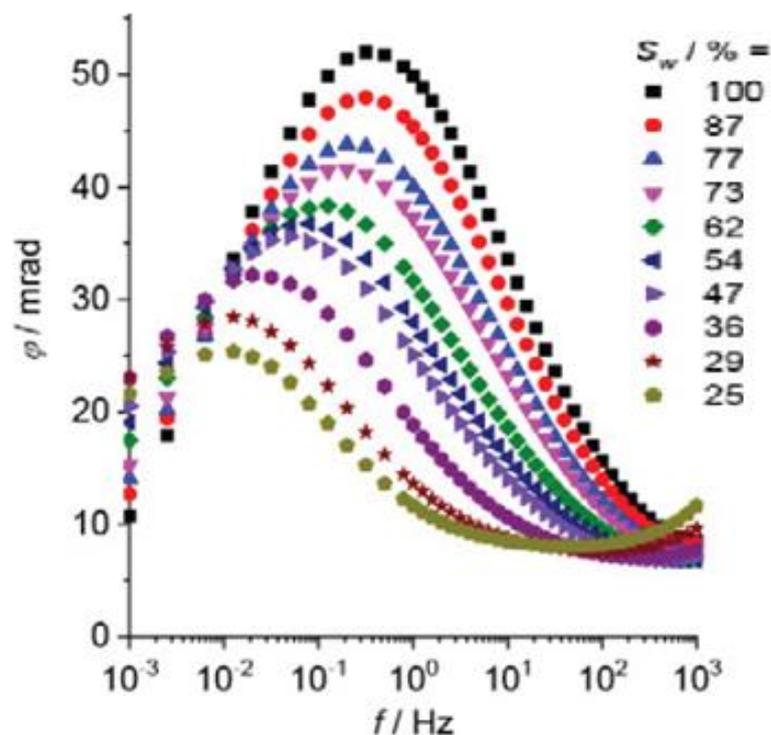


Рис. 29 Фазовые спектры для песка с включениями биоугля при различной влагонасыщенности

При температурах ниже  $-3 - -5\text{ }^{\circ}\text{C}$  пик в спектрах фазы пропадал. При этом в области высоких частот появлялся «хвост» — суперпозиция поляризации льда и аппаратурных искажений (обусловленных резким возрастанием нагрузочного сопротивления до  $2 - 5\text{ МОм}$ ). Таким образом, оценка параметров ВП образцов ниже  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  затруднена.

### 5.3. Параметры модели Коул-Коул

Анализ полученных фазовых спектров при заморозке и разморозке выполнен на основе аппроксимации спектров моделью Коул-Коул. Определялись: значение сопротивления на низкой частоте ( $R_0$ ), стационарная поляризуемость ( $m$ ), время релаксации ( $\tau$ ) и показатель степени модели Коул-Коула ( $c$ ). Определение параметров было выполнено только для спектров, имеющих четкий пик в фазовых спектрах (при температуре образцов выше  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). В качестве сравнения на графиках представлены результаты измерений на смеси песка с магнетитом (с зернами  $0.2\text{ мм}$  и включениями магнетита около  $1\text{ см}$ ) и графитизированном песчанике. На графиках образцы представлены как #4 (смесь песка с магнетитом) и #8 (графитизированный песчаник) (Revil, 2019).

### 5.3.1. Стационарная поляризуемость

Стационарная поляризуемость смесей песка с зернами криптомелана определяется их объемным содержанием. На графиках (Рис. 30, 31) представлены зависимости  $m$  и электрического сопротивления от температуры в образце, соответственно. Для сравнения на график вынесены результаты подобного исследования из работы (Revil, 2019).

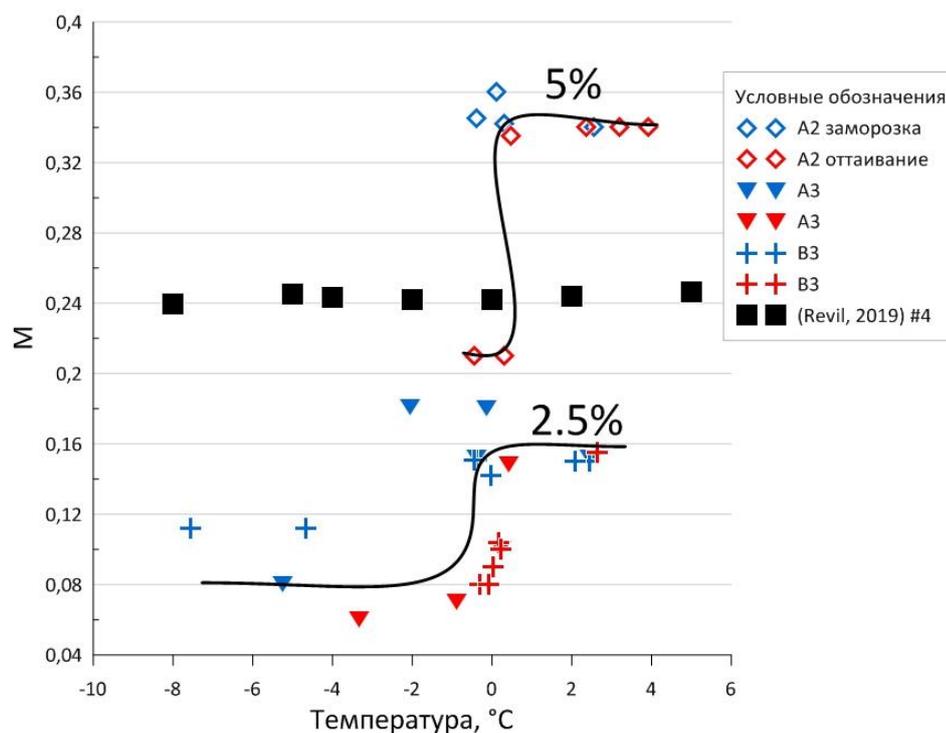


Рис. 30 Зависимость стационарной поляризуемости от температуры.

Приведены зависимости для образцов A2, A3 и B3. Объемная доля криптомелана в образцах A2 – 5%, A3 и B3 – 2.5%. Для смеси песка с магнетитом (#4) поляризуемость не изменяется

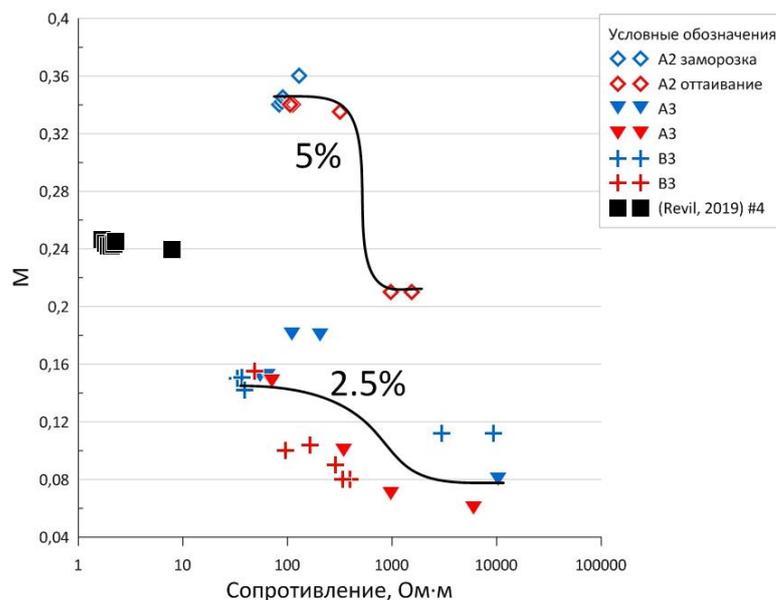


Рис. 31 Зависимость стационарной поляризуемости от сопротивления.

Приведены зависимости для образцов A2, A3, B3 и смеси песка с магнетитом (#4).

Объемная доля криптомелана в A2 – 5%, в A3 и B3 – 2.5%

Для смеси песка с магнетитом (#4) значение поляризуемости почти не изменяется при заморозке. Однако, для образцов A2, A3 и B3 стационарная поляризуемость уменьшается примерно в два раза в процессе заморозки, а затем, при оттаивании, стремится выйти на прежний уровень. При различном содержании криптомелана динамика одинаковая.

В работе (Revil, 2019), после измерений на синтетических и природных образцах, автор утверждает, что поляризуемость не зависит от температуры, а контролируется только объемным содержанием металлических частиц. В качестве исключения автор выделяет халькопирит и образцы с графитом, причем в них наблюдается некоторое увеличение параметра поляризуемости с уменьшением температуры.

Вышесказанное утверждение не совпадает с результатами измерений в данной работе. Все образцы с криптомеланом отмечаются уменьшением поляризуемости при понижении температуры и замерзании воды.

В работе (Gao et al., 2019) стационарная поляризуемость уменьшается по мере уменьшения водонасыщенности аналогично возникновению льда в породе, что еще раз подчеркивает схожесть процессов замерзания и высушивания (Рис. 32).

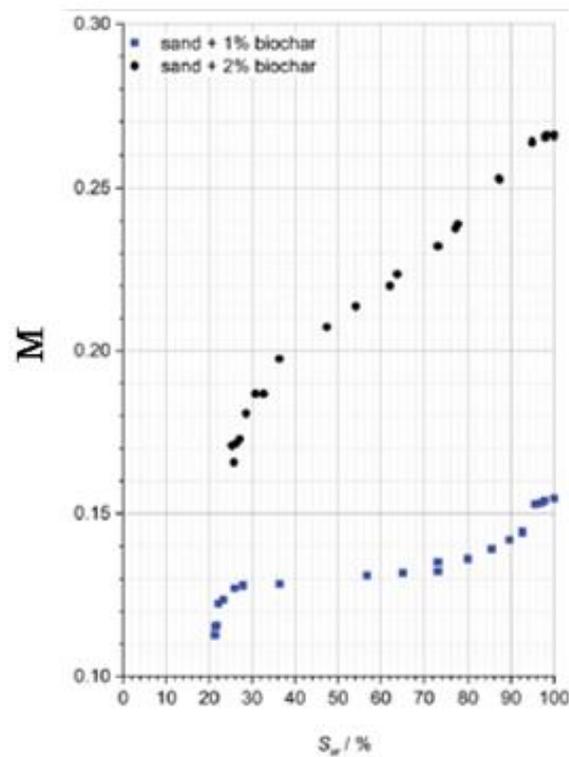


Рис. 32 Изменение поляризуемости в зависимости от содержания воды.

На графике представлены результаты измерений на песке с 1% содержанием биоугля (синий цвет) и 2% (черный цвет) (Gao et al., 2019)

### 5.3.2. Время релаксации

Время релаксации соответствует максимуму спектра, которое может быть определено как  $\tau = (2\pi f_{max})^{-1}$ . Изменение времени релаксации от температуры и сопротивления показано на рисунках 33 и 34.

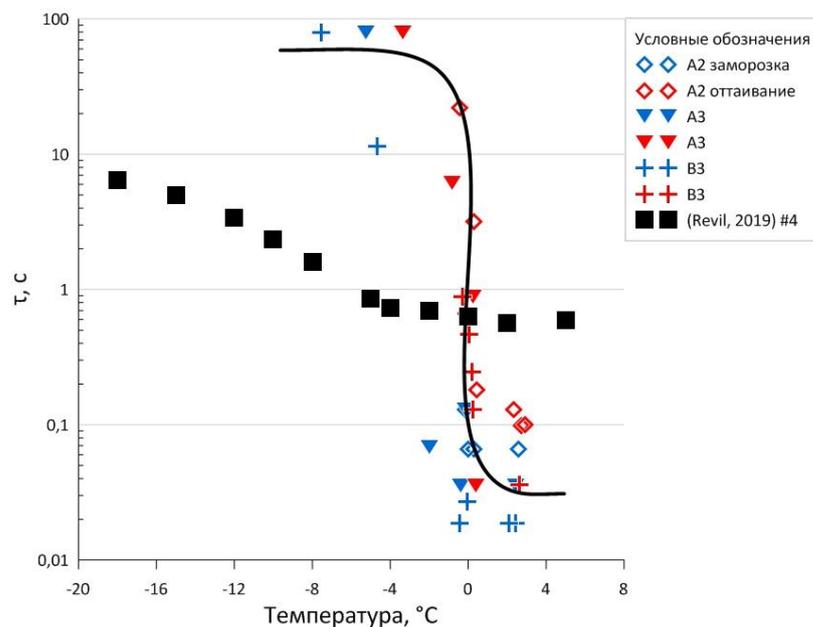


Рис. 33 Изменение времени релаксации от температуры

С появлением льда в образце время релаксации резко возрастает (переход через  $0^{\circ}\text{C}$ ). Для смеси песка с магнетитом (#4) увеличение времени релаксации начинается при температуре ниже  $-4^{\circ}\text{C}$ . Скорее всего, установленные различия связаны с различной электропроводностью воды в образце (разница по сопротивлению в 50 раз).

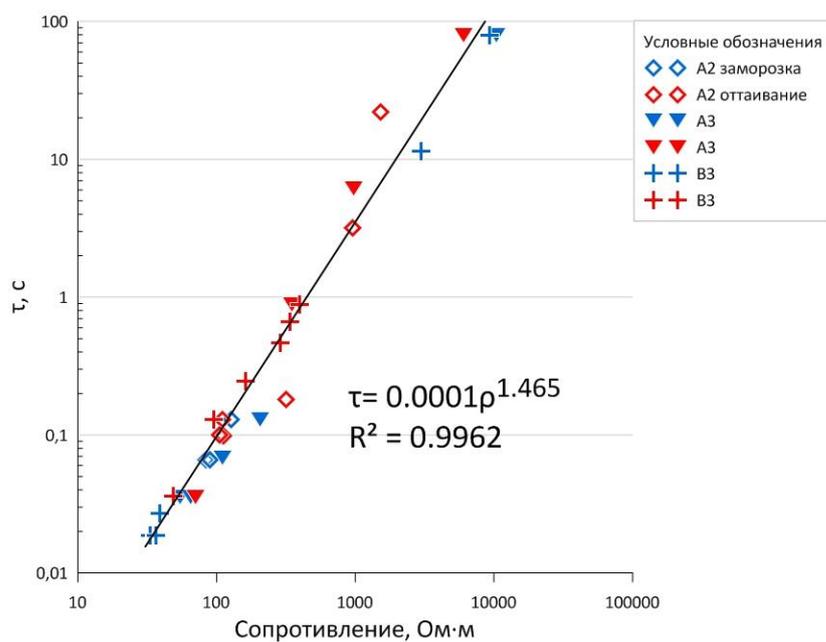


Рис. 34 Изменение времени релаксации от сопротивления

Рост времени релаксации сопровождается увеличением сопротивления в породе. Зависимость времени релаксации от сопротивления в данной работе можно аппроксимировать степенной зависимостью  $\tau = 0.0001 \rho^{1.465}$ .

### 5.3.3. Показатель степени модели Коул-Коула

На рисунках 35 и 36 приведены зависимости  $n$  от температуры и сопротивления, соответственно.

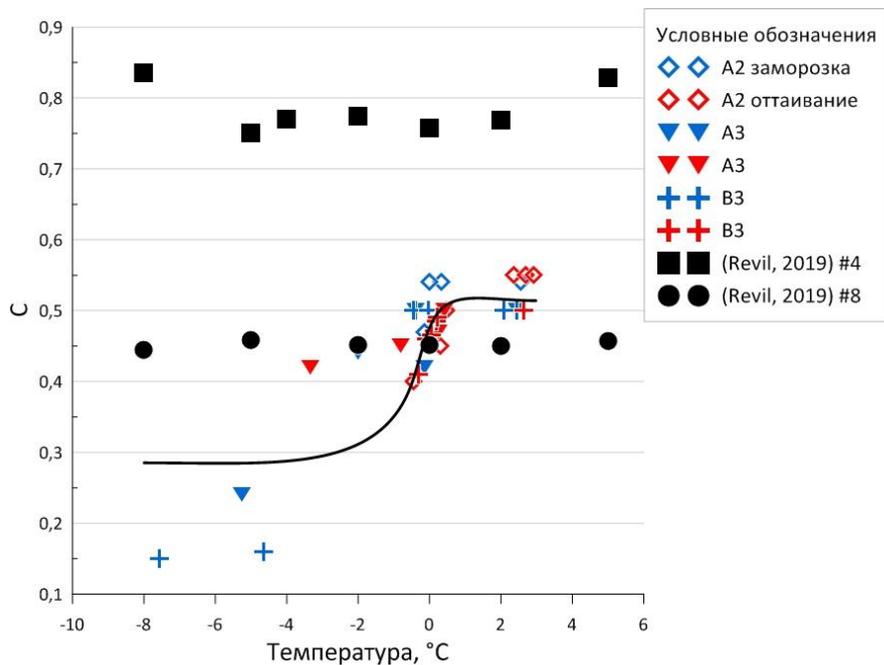


Рис. 35 Изменение показателя степени модели Коул-Коула от температуры

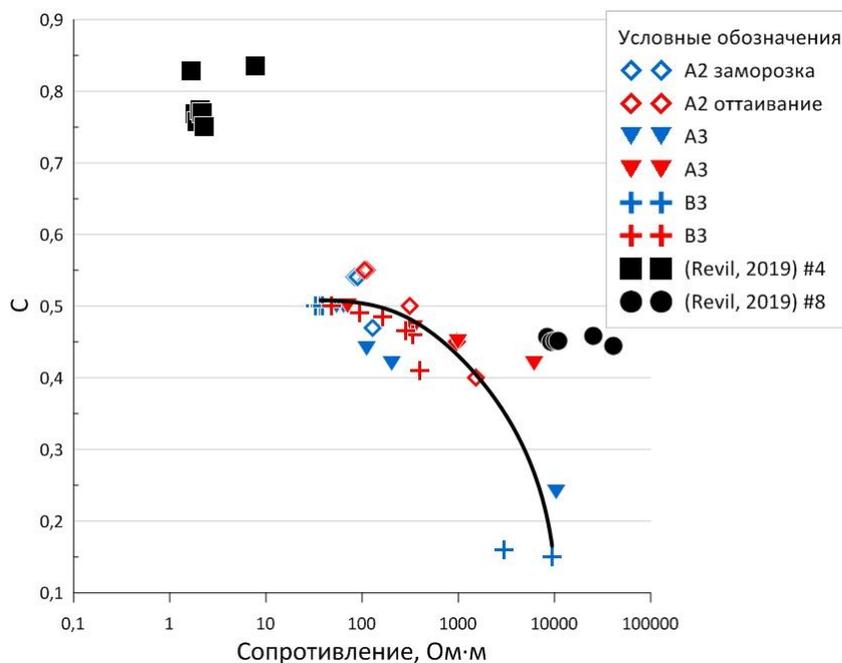


Рис. 36 Изменение показателя степени модели Коул-Коул от сопротивления

Как и поляризуемость, показатель степени модели Коул-Коул уменьшается при заморозке. Уменьшение данного коэффициента говорит об увеличении дисперсии времени релаксации, которая может быть обусловлена перестройкой порового пространства породы или пассивацией поверхности включений криптомелана. На образцах (Revil, #4, #8) подобной зависимости не наблюдается.

#### 5.3.4. Взаимосвязь параметров ВП

При заморозке-разморозке параметры ВП изменяются, причем динамика в каждом случае схожая. Соответственно, следует рассмотреть взаимное влияние параметров друг на друга (рис 37, 38, 39).

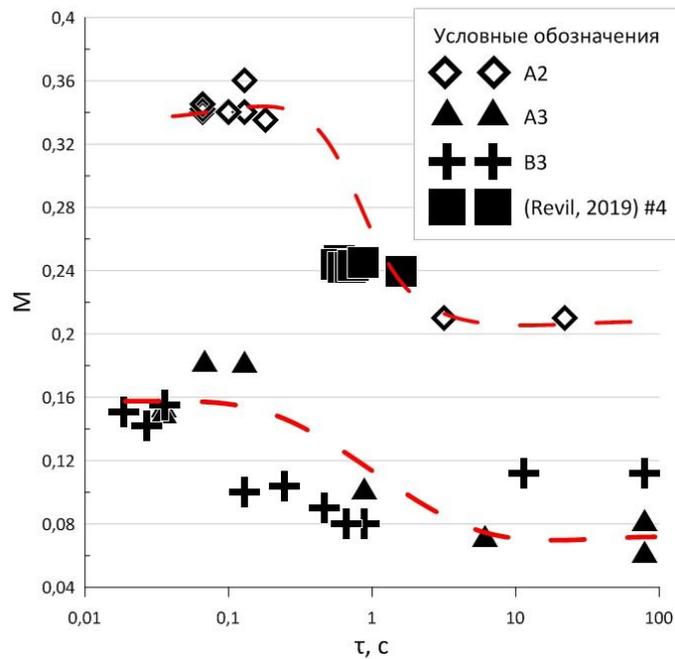


Рис. 37 Зависимость времени релаксации от стационарной поляризуемости.

Увеличение времени релаксации сопровождается уменьшением поляризуемости

Поляризуемость в мерзлом состоянии примерно в два раза ниже, чем в талом. При этом, порода в мерзлом состоянии может поляризоваться. Это указывает на наличие в образцах незамерзшей поровой влаги, так как поляризация электропроводящих включений возможна только на межфазной поверхности вода-включение криптомелана. При различной электропроводности воды динамика изменения поляризуемости и времени релаксации схожая.

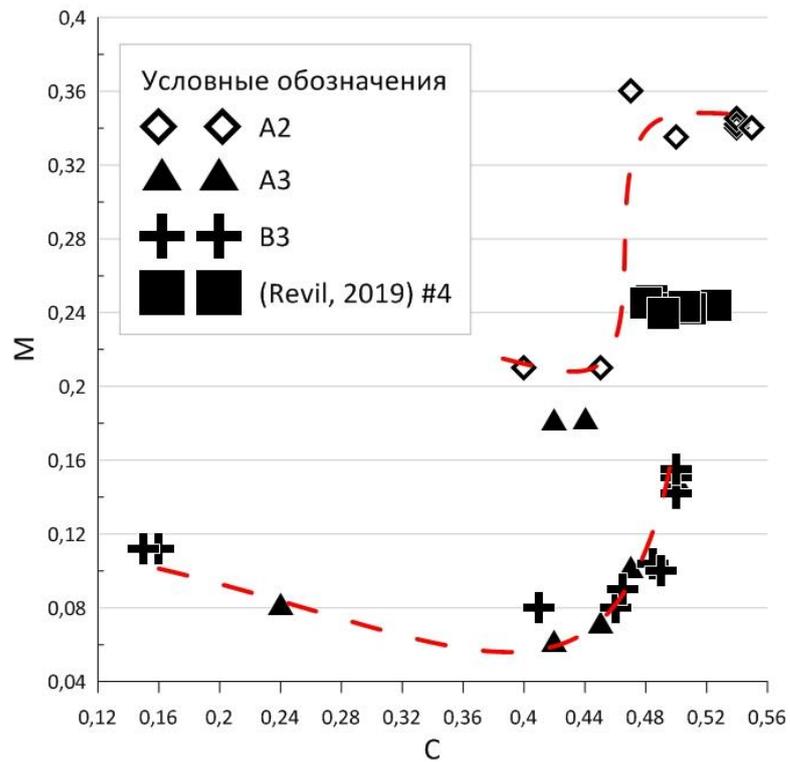


Рис. 38 Зависимость показателя степени модели Коул-Коул от стационарной поляризуемости

Поляризуемость резко начинает возрастать при переходе образца из мерзлого в талое состояние, однако, коэффициент  $c$  в этот момент возрастает медленнее. При переходе образца из талого в мерзлое состояние ситуация обратная – коэффициент  $c$  резко уменьшается, тогда как поляризуемость изменяется незначительно.

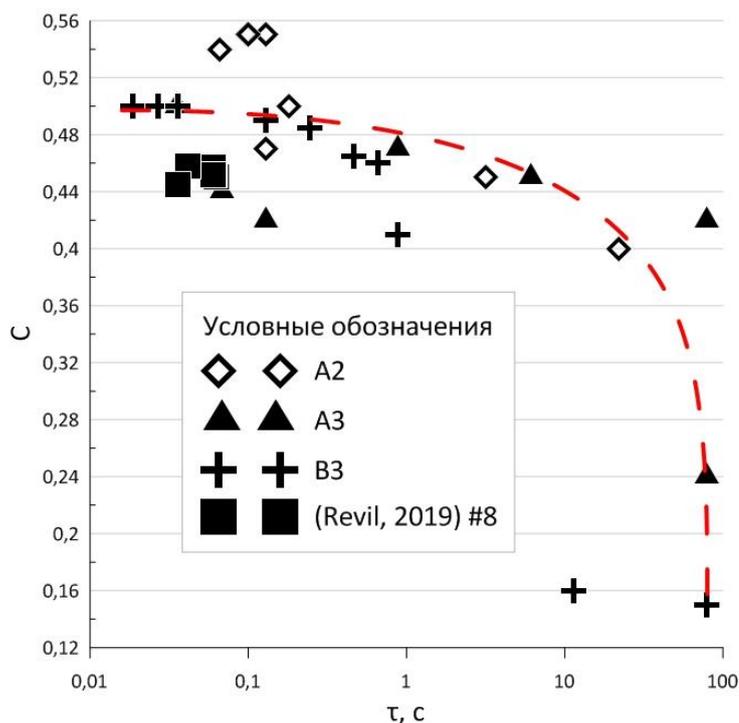


Рис. 39 Зависимость времени релаксации от показателя степени модели Коул-Коул

Увеличение времени релаксации сопровождается уменьшением показателя степени модели Коул-Коул. Резкое изменение происходит при замерзании/оттаивании образца. В области резкого уменьшения коэффициента  $c$  наблюдается увеличение дисперсии.

#### 5.4. Микро – КТ

На рисунке 40 приведены срезы томограмм при различных температурах.

Главным фактором поглощения рентгеновского излучения является плотность вещества. Раскраска модели подобрана таким образом, чтобы подчеркнуть плотностные неоднородности внутри пор. Учитывая, что образец представляет собой четырёхкомпонентную среду (зерна, вода, лед, воздух), где каждый компонент различается по плотности, была подобрана раскраска срезов томограмм, позволяющая каждую фазу определить визуально.

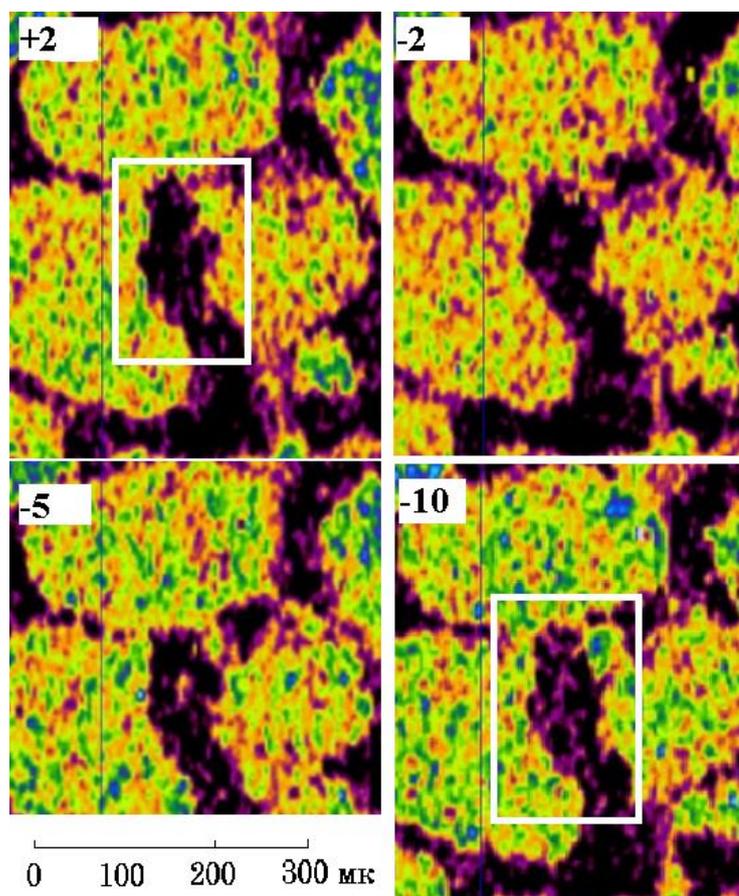


Рис. 40 Результат микро – КТ при разной температуре

По данным микро-КТ установлено, что при промерзании образца часть воды остается в незамерзшем состоянии. Между зернами прослеживаются капилляры – фиолетовые области на рисунке (на рисунке 40 – белые прямоугольники). Более детально эти участки представлены на рисунке 41.

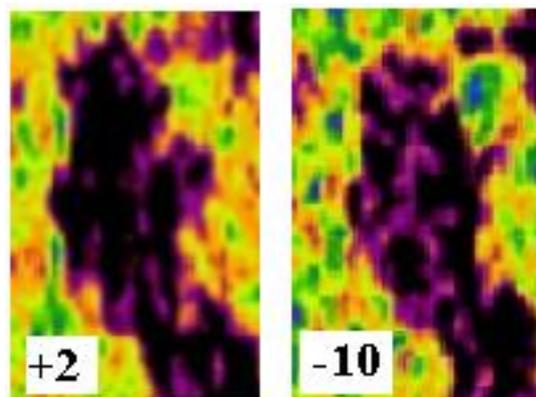


Рис. 41 Капилляры с незамерзшей водой между зернами при  $-10^{\circ}\text{C}$

Наличие капилляров, заполненных водой при температуре ниже нуля, объясняет высокую поляризацию образца в мерзлом состоянии. Схематически модель породы с включением электропроводящих минералов в мерзлом состоянии представлена на рисунке 42.

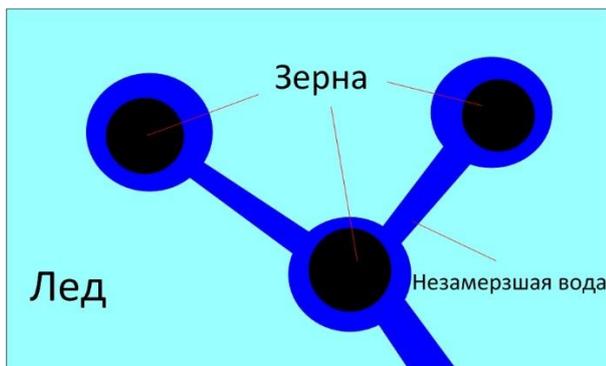


Рис. 42 Схема, показывающая наличие тонких пленок вокруг зерен и капилляров между ними

Данная модель вполне соответствует модели В.А. Комарова (1994), где на границе двух фаз наблюдается скачок потенциала при наложении электрического поля (Рис.43, а). В свою очередь, есть предположение, что частица может поляризоваться без наличия жидкой фазы (Рис 43, б) (Revil, 2015).

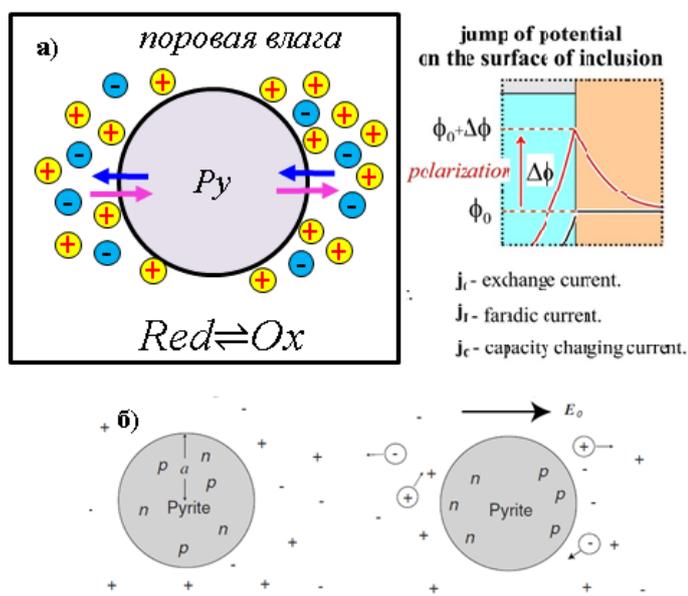


Рис. 43 а) Модель поляризации В.А. Комарова (1994). При наличии твердой и жидкой фазы при наложении электрического поля наблюдается скачок потенциала. б) Модель поляризации без наличия жидкой фазы (Revil, 2015). Слева – частица в состоянии покоя, справа – поляризация частицы при наложении электрического поля.

Если рассмотреть модель, где зерно полностью покрыто льдом-изолятором, а пленочная вода отсутствует, то для первой модели В.А. Комарова поляризуемость равнялась бы нулю ( $M = 0$ ). В случае модели А. Ревия поляризуемость оставалась бы на одном уровне ( $M = \text{const}$ ).

В настоящей работе интенсивность поляризации испытывает изменение только при переходе через  $0^{\circ}\text{C}$ . Основываясь на результатах данной работы, механизм поляризации полностью соответствует модели В.А. Комарова, так как поляризуемость снижается в процессе заморозки. Однако, нельзя исключать влияние механизма поляризации модели А. Ревия, так как в мерзлом состоянии поляризуемость остается на одном уровне. Вероятно, обе модели поляризации могут существовать одновременно, взаимно дополняя друг друга.

## ВЫВОДЫ

- 1) Фазовые превращения свободной и пленочной воды в лед отмечаются изломами зависимостей электрического сопротивления от температуры.
- 2) Замораживание и оттайка образцов приводит к появлению петель гистерезиса электрического сопротивления и поляризуемости в диапазоне температур (-1 – -5<sup>0</sup>С), обусловленных перестройкой порового пространства образцов.
- 3) Интенсивность поляризации электропроводящих включений в мерзлых породах снижается примерно в два раза, при промерзании свободной поровой воды.
- 4) По результатам микро-КТ можно проследить динамику изменения порового пространства.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках исследовательской работы были проведены измерения спектральной вызванной поляризации на смесях песка и зерен криптомелана, различающихся объемным содержанием и электропроводностью поровой влаги.

По результатам исследований было установлено, что в мерзлом состоянии порода с включениями электропроводящих минералов (в том числе и вкрапленные руды) обладает достаточно высокой поляризуемостью. При переходе породы из талого в мерзлое состояние ее поляризуемость снижается всего в два раза. Таким образом, эффективность метода ВП в пределах площадей распространения вечной мерзлоты (Дальний Восток и Арктический сектор) снижается несущественно, что подтверждается многолетним опытом проведения полевых работ в данных районах.

Высокая поляризуемость пород с включениями электропроводящих минералов в мерзлом состоянии возможна лишь в случае наличия незамерзшей поровой влаги. Наличие незамерзшей поровой влаги и капилляров между зернами было установлено при помощи микро-КТ. Применение микро-КТ совместно с анализом поведения параметров ВП позволило доказать применимость модели электродной поляризации электропроводящих включений В.А. Комарова (1994) для пород в мерзлом состоянии. В свою очередь, модель ВП породы с металлическими включениями А. Ревилля (2015) оказывается хуже применима для объяснения полученных экспериментальных данных, так как не позволяет объяснить снижение интенсивности поляризации породы при ее переходе в мерзлое состояние.

Выполненные автором лабораторные исследования заложили основу для последующего изучения ВП пород при переходе из талого в мерзлое в лаборатории кафедры Геофизики Института наук о Земле СПбГУ. Требуется продолжить измерения ВП на синтетических образцах пород с включениями различных электропроводящих минералов при большей электропроводности насыщающей их воды (т.к. проследить динамику ВП ниже  $-5^{\circ}\text{C}$  не удалось), а также различными металлическими вкраплениями. Также необходимы исследования на природных образцах для более четкого установления поведения параметров ВП.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность научному руководителю Гурину Григорию Владимировичу за помощь в написании научно-исследовательской работы, а также РЦ «Рентгенодифракционные методы исследования» Санкт-Петербургского государственного университета за проведенную рентгеновскую компьютерную томографию образцов (проект № 103-28619 «Изучение порового пространства пород в мерзлом состоянии»).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 3D electrical conductivity and induced polarization tomography of a rock glacier / P.-A. Duvillard [et. al.] // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2018. – Vol. 123, № 11. – 27 p.
2. Gao, Z. Spectral induced polarization of biochar in variably saturated soil / Gao, Z [et. al.] // *Vadose Zone Journal*. – 2019. – Vol 18, № 1. – 13 p.
3. Kalinicheva, S. Mapping mountain permafrost landscapes in Siberia using landsat thermal imagery / S. Kalinicheva, A. Fedorov, M. Zhelezniak // *Geosciences*. – 2019. – Vol. 9, № 4. – 14p.
4. Limbrock, J. K. Textural and mineralogical controls on temperature dependent SIP behavior during freezing and thawing / J. K. Limbrock, M. Waigand, A. Kemna // *EGU General Assembly2021 -Session EMRP1.15*. – 2021. – 22 p.
5. Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP / W. H. Pelton [et. al.] // *Geophysics*. – 1978. – Vol 43, № 3. – P. 588-609.
6. Ren, J. Comparison of soil-freezing and soil-water characteristic curves of two Canadian soils / J. Ren, S. K. Vanapalli // *Vadose Zone Journal*. – 2019. – Vol 18, № 1. – 14 p.
7. Revil, A. Induced polarization response of porous media with metallic particles — Part 9: Influence of permafrost / A. Revil [et. al.] // *Geophysics*. – 2019. – Vol 84, № 5. – 72 p.
8. Revil, A. Induced polarization response of porous media with metallic particles — Part 1: A theory for disseminated semiconductors / A. Revil, N. Florsch, D. Mao // *Geophysics*. – 2015. – Vol 30, № 5. – 14 p.
9. Slater, L. Resistivity and induced polarization: theory and applications to the near-surface Earth / L. Slater, A. Binley. – Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2020. – 383 p.
10. Temperature distribution in a permafrost-affected rock ridge from conductivity and induced polarization tomography / P.-A. Duvillard [et. al.] // *Geophysical Journal International*. – 2020. – Vol. 225, № 2. – P. 1207-1221.
11. Theory and application of spectral induced polarization / ed. by Y. Luo, G. Zhang. – Tulsa, OK: Society of Exploration Geophysicists, 2008. – 165 p.
12. Агеев, Д. В. Изучение явления быстропротекающей вызванной поляризации мерзлых пород: дис. на соискание ученой степени канд. геол. – мин. н.: 25.00.10. / Дмитрий Владимирович Агеев; МГУ – М., 2019. – 83 с.
13. Алванян, А. К. Геокриология: учебное пособие / А. К. Алванян, К. А. Алванян. – Пермь: изд. ПГНИУ, 2020. – 139 с.

14. Бойцов, А. В. Геокриология и подземные воды криолитозоны: учебное пособие / А. В. Бойцов. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2011. – 178 с.
15. Возможности электромагнитных зондирований при картировании многолетнемерзлых пород / М. А. Баранов [и др.] // Вестник ИрГТУ. № 7. Науки о Земле. – 2014. – Вып. 90. – С. 25-30.
16. Геокриология. Характеристики и использование вечной мерзлоты. Т. I / под ред. А. В. Брушкова; пер. В. А. Сантаевой и А. В. Брушкова. Москва; – Берлин : Директ-Медиа, 2020. – 437 с.
17. Геоэлектрохимия: Учебное пособие / В. А. Комаров // изд. СПбГУ. – СПб. – 1994. – 136 с.
18. Изучение криолитозоны северного обрамления Сибирской платформы по данным региональных электроразведочных работ / Д. В. Яковлев, А. Г. Яковлев, О. А. Валясина // Криосфера Земли. – 2018. – т. XXII. – № 5. – С. 77-95.
19. Информативность геофизических методов разведки при решении геокриологических задач на суше и шельфе / Зыков, Ю. Д. [и др.] // Российские полярные исследования. № 2. – С. 17-23.
20. Общее мерзлотоведение (геокриология) / В. А. Кудрявцев [и др.] ; под ред. В. А. Кудрявцева. – М.: изд. МГУ, 1978. – 464 с.
21. Павленко, В. И. Особенности и экономическая эффективность использования электроразведочного метода переходных процессов для инженерно-геологических изысканий в районе Севера и Арктики России // В. И. Павленко, Ю. В. Коротков // Арктика: экология и экономика. – 2012. – № 4(8). – С.40-45.
22. Пендин, В. В. Мерзлотоведение: Учебное пособие / В. В. Пендин // изд. МГГРУ. – М. – 2008. – 77 с.
23. Структура промерзающего подозерного талика на стационаре Парисенто (пов Гыдан) по данным электротомографии / Шеин, А. Н. [и др.] // Интерэкспо Гео-Сибирь. – № 2(2). – С. 103-110.
24. Тихонова, Сах. А. Электрические свойства мерзлых пород / Сах. А. Тихонова, Св. А. Тихонова; науч. рук. Н. А. Забродина // Проблемы геологии и освоения недр. – 2015. – Томск.: изд. ТПУ. – Т.1. – С.345-346.
25. Электроразведка: пособие по электроразведочной практике для студентов геофизических специальностей. Том I / Е. Д. Алексанова [и др.] под ред. проф. И.Н. Модина и доц. А.Г. Яковлева. – Тверь: «ПолиПРЕСС», –2018. – 274 с.