

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Поступила в редакцию 12.11.2024 г.

Принята к публикации 24.02.2025 г.

EDN: OORYLZ

УДК 551.345:550.83(571.56)

Шумскайте М.Й., Янушенко Т.А.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГГ СО РАН), Новосибирск, Россия, shumskajteMI@ipgg.sbras.ru, yanushenkota@ipgg.sbras.ru

Голиков Н.А.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГГ СО РАН); Новосибирский государственный университет (НГУ); Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), Новосибирск, Россия, golikovna@ipgg.sbras.ru

ИЗУЧЕНИЕ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД БЫКОВСКОГО ПОЛУОСТРОВА ЛАБОРАТОРНЫМИ МЕТОДАМИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ И ЯДЕРНОГО МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА

Комплексная диэлектрическая проницаемость осадочных горных пород главным образом зависит от пористости и водонасыщенности пород. Для мерзлых пород комплексная диэлектрическая проницаемость определяется также состоянием воды в порах. Это обусловлено различием диэлектрической проницаемости и электрической проводимости свободной воды и льда в порах породы. В мелкопористых породах велико влияние связанной воды, свойства которой отличаются от свойств свободной воды. На образцах многолетнемерзлых пород проведено изучение гранулометрического состава и удельного электрического сопротивления пород, а также выполнены измерения методом ядерного магнитного резонанса, который широко используется в геологических и геофизических исследованиях для определения фильтрационно-ёмкостных свойств горных пород и реологических свойств пластовых флюидов. Установлено, что превращение воды в лед с понижением температуры происходит не при определенной температуре, а в некотором диапазоне отрицательных температур, а также, что диэлектрическая проницаемость образцов из разных скважин, как минимальные, так и максимальные ее значения, отличается примерно в 6 раз. По данным ядерного магнитного резонанса выявлена связь водонасыщения с гранулометрическим составом и зависимость времени поперечной релаксации от степени минерализации и температуры пород.

Ключевые слова: комплексная диэлектрическая проницаемость, ядерный магнитный резонанс-релаксометрия, многолетнемерзлая порода, Быковский полуостров.

Для цитирования: Шумскайте М.Й., Янушенко Т.А., Голиков Н.А. Изучение многолетнемерзлых пород Быковского полуострова лабораторными методами диэлектрической спектроскопии и ядерного магнитного резонанса // Нефтегазовая геология. Теория и практика. - 2025. - Т.20. - №1. - https://www.ngtp.ru/rub/2025/8_2025.html EDN: OORYLZ

Введение

Явлением глобального масштаба является вечная мерзлота, которая занимает 35 млн. км², что составляет 25% всей суши земного шара. В России она покрывает 60-65% территории. Для того чтобы спрогнозировать глобальное изменение климата, необходимо

составить комплексный портрет местности на основе большого массива данных, который может включать диэлектрические и ядерно-магнитные методы.

В последние два десятилетия геофизические и сервисные компании возобновили применение диэлектрического каротажа при изучении горных пород. В отличие от опыта 70-х гг. XX века, когда измерения в диэлектрическом каротаже выполнялись на одной частоте, 15-20 лет назад исследователи обратили внимание на частотную зависимость диэлектрической проницаемости и электропроводности от петрофизических свойств, предполагая, что по частотной зависимости комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) можно судить о коэффициенте пористости, нефте- и водонасыщенности пород. Для определения частотной зависимости потребовались новые подходы к обработке данных и методы, способы интерпретации результатов измерений электрофизических параметров флюидонасыщенных горных пород в широком частотном диапазоне. В настоящее время геофизики исследуют возможности анализа и интерпретации измерений КДП для повышения информативности скважинной геоэлектрики. Нефтесервисными компаниями уже разработаны приборы для скважинной диэлектрической спектроскопии [Bittar, Li, 2011; Comparon, Nizem, 2010]. Так, например, в диэлектрическом приборе компании Schlumberger используется пять частот в диапазоне от 20 МГц до 1 ГГц, а в результате обработки измеренных разностей фаз и амплитуд получают трансформации измеренных сигналов в кажущиеся электропроводность и диэлектрическую проницаемость.

Основным вопросом диэлектрической спектроскопии в геоэлектрике является возможность определения структуры и состава среды. По результатам поставленного физического эксперимента геофизики пытались установить связь измеренной реальной части диэлектрической проницаемости и сигнала затухания со структурой среды [Судакова, Владов, 2019]. По итогам исследования обозначены границы применимости метода и сделали выводы о связи затухания с мощностью слоев. Вопрос определения состава и доли флюида в порах также является очень важным. Для его решения выполнена серия измерений диэлектрической проницаемости и удельной электропроводности экспериментальных моделей горной породы, насыщенной водой и нефтью при различных температурах [Эпов, Савин, Миронов, 2012; Репин, Бобров, Голиков, 2014].

Другой важной задачей, которая выполняется методом диэлектрических измерений, является определение объемной доли связанной воды в образцах горной породы. Отечественными геофизиками она успешно решается в СВЧ диапазоне. Показано, что в этом диапазоне количество связанной воды может быть определено по измерению КДП, также можно выявить тип связанной воды (слабосвязанная, рыхлосвязанная или прочносвязанная) и её долю в керне [Табарин, Демьянцева, 2009].

ЯМР-релаксометрия – широко распространенный метод, использующийся в различных областях научных исследований, в том числе и в петрофизике, для изучения свойств, состава и структуры вещества. Научных публикаций, посвященных определению фильтрационно-емкостных свойств, рассмотрению особенностей структуры порового пространства горных пород, а также оценке свойств пластовых флюидов, за последние 30 лет появилось огромное множество ([Fleury, Deflandre, Godefroy, 2001; Freedman et al., 2003; Freedman, Heaton, 2004; Джафаров, Сынгаевский, Хафизов, 2002; Шумскайте, Глинских, 2015, 2016] и др.).

При изучении многолетнемерзлых пород ЯМР-метод может дать информацию об объемном содержании воды в образце, внутренней структуре образца, распределении воды в поровом пространстве и изменении этого распределения в процессе замораживания/оттаивания. Это возможно, поскольку метод ЯМР позволяет получить сигнал только от свободной и связанной воды или нефти. При этом к воде в твердой фазе (например, лед или группы H_2O в кристаллической решетке) метод не чувствителен, и сигнал от нее не регистрируется [Shumskayte et al., 2016].

В общем случае релаксация T_1 (спин-решеточная релаксация) – рост намагниченности в направлении оси Z , релаксация T_2 (спин-спиновая релаксация) – спад намагниченности в направлении XY . В подвижных жидкостях при комнатной температуре молекулы водорода вращаются очень быстро и требуется большее время для переориентации магнитных моментов ядер водорода вдоль оси Z (длинное время T_1). С увеличением вязкости жидкости скорости вращения молекул замедляются, и их проще переориентировать (короткое T_1). Однако, для высоковязких флюидов наступает момент, когда скорости вращения молекул настолько замедляются, что их снова становится сложно ориентировать вдоль оси Z , и, соответственно, T_1 снова увеличивается. При этом времена поперечной релаксации T_2 с ростом вязкости всегда уменьшаются (рис. 1).

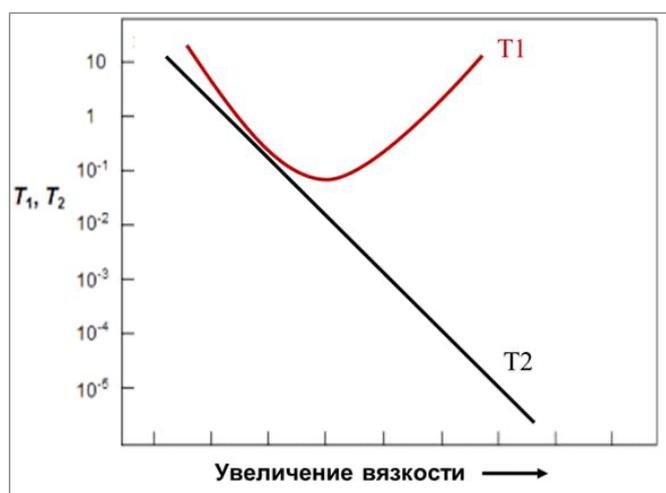


Рис. 1. Графики изменения времен релаксации T_1 и T_2 в зависимости от вязкости

Изучение диэлектрических свойств горных пород представляет интерес для электрических и магнитных методов в геофизике, весьма перспективных в регионах вечной мерзлоты, а также для выяснения механизма и природы процессов, протекающих в горных породах при воздействии электрических полей.

В работе выполнены диэлектрические и ЯМР-измерения образцов многолетнемерзлых пород Быковского п-ова, находящегося в 40 км на север от п. Тикси. На рис. 2 представлена карта Быковского п-ова с местами бурения, обозначенными красными точками.



Рис. 2. Карта Быковского полуострова с местами бурения
1 - Омужева лагуна, 2 - озеро Гольцовое, 3 - озеро Полярное.

Фактический материал и описание образцов

Природные условия и растительность на полуострове существенно отличаются на равнине и в горах, но в основном преобладают болота. Вечная мерзлота оттаивает лишь к концу лета на 30-50 см, и во многих случаях минеральная почва лежит непосредственно над многолетнемерзлыми породами. Лед можно обнаружить и на дне многочисленных озер, которые зарастают по краям щетиной злака арктофилы. Быковский п-ов является природной лабораторией для исследования геофизических, биогеохимических и микробиологических

градиентов вдоль деградации вечной мерзлоты. Быковский п-ов детально изучен, но субаквальная вечная мерзлота остается плохо описанной.

В лабораторных условиях изучены мерзлые породы со скважин, находящихся в Омудево лагуне и озере Гольцовом. Мерзлая порода имеет различный состав в зависимости от глубины скважины. Для проведения исследований отобраны образцы, характеризующие основные литологические и структурные свойства по разрезу скважин.

Со скважины в Омудево лагуне отобрано 30 образцов с глубины от 1,2 до 30,5 м. Разрез представлен иллитовой глиной с органикой, алевритом, глиной с песком и мерзлым крупнозернистым песком. Для ЯМР-исследований отобрано 13 образцов, описание которых приведено в табл. 1, а внешний вид изображен на рис. 3.

Таблица 1

Описание образцов скважины в Омудево лагуне (PG 2410)

Номер керна	Глубина, м	Описание
PG 2410-2-3	1,26	Иллитовая глина с включениями органики, запах гниения.
PG 2410-4-5	2,85	Иллитовая глина алевритистая.
PG 2410-7-1	6,65	Иллитовая глина, в нижней части песок.
PG 2410-8-1	7,55	Верх - глина, мелкоалеврит, песчаный прослой, глинистый прослой.
PG 2410-9-2	9,35	Верх - песок, низ - глина с песком - 2-3 мм. Прослой крупнозернистого песка.
PG 2410-10-1	10,40	Глина (алеврит), крупный песок с включениями органики, галька слабоокатанная.
PG 2410-11-1	12,00	Верх 5 см - глина, алеврит с включениями гальки. 10-50 алеврит, 50-105 песок.
PG 2410-12-5	13,65	Верх - алеврит с большим количеством воды, прослой крупного песка. Низ - песок, включения крупной гальки.
PG 2410-13-1	15,30	Переслаивание слоев песка крупно- и среднезернистого с глинистыми прослоями. Слой 5-6 см дресвы крупных обломков.
PG 2410-14-3	16,70	Песок крупнозернистый, слой глины (алеврита), песок частично смерзшийся.
PG 2410-15-5	18,20	Песок мерзлый, прослой алеврита (глины).
PG 2410-17-4	20,80	Мерзлый песок, слой органики, линзы глин (0,5 см).
PG 2410-18-4	23,50	Мерзлый песок крупнозернистый.



Рис. 3. Фотографии отобранных образцов

Со скважины на озере Гольцовом отобрано 18 образцов с глубины от 5,50 до 36,03 м, где в основном преобладает глина и мелкозернистый песок. Для ЯМР-исследований выбрано 10 образцов (табл. 2).

Таблица 2

Описание образцов скважины в озере Гольцовом (PG-2412)

Номер керна	Глубина, м	Описание
2412-1-1	5,50	Иллитовая глина с запахом гниения.
2412-1-4	7,24	Иллитовая глина с запахом гниения.
2412-2-5	10,38	Иллитовая глина с включением песка средне-мелкозернистого, запах гниения.
2412-3	11,82	Глина плотная, растирается в пыль песок средне-мелкозернистый.
2412-4-3	14,30	Песок средне-мелкозернистый, добавка глины (ил?).
2412-4-5	14,75	Глина с примесью алевроита песка.
2412-8	22,18	Песок средне-мелкозернистый, немного глины.
2412-9	24,43	Песок мелкозернистый + алевроит.
2412-10	28,47	Песок крупно-средне-мелкозернистый.
2412-11	29,74	Песок средне-мелкозернистый.

Проведены исследования гранулометрического состава на лазерном анализаторе. Гранулометрический состав пород из обеих скважин неоднороден, встречаются прослойки, содержащие все фракции от пелитовой до крупнозернистого песка с включениями гальки, и прослойки с однородным распределением с выраженным максимумом. Разрез скважины в озере Гольцовом сильно меняется с глубиной (рис. 4): на глубине 36,03 м глины практически нет, в основном песок; в середине интервала на глубине 14,74 м наблюдается сложный состав породы, присутствуют глина плотная, песок средне-мелкозернистый и крупнозернистый; на глубине 5,50 м порода представлена иллитовой глиной.

Гранулометрический состав скважины в Омудево лагуна также неоднороден (рис. 5). На глубине 1,2 м присутствует иллитовая глина с включениями органики, на глубине 6,65 м порода представлена иллитовой глиной и глиной с песком. На глубине 20,10 м наблюдается сложный состав: песок мерзлый, верх – смесь алевроита с мелкозернистым песком, и далее до глубины 30,5 м состав однороден и состоит из мерзлого песка с крупнозернистой фракцией.

Общей закономерностью является наличие в верхней части разреза отложений иллитовой глины, в середине разреза переслаивание слоев с различным грансоставом, которое сменяется к низу интервала крупнозернистым песком с незначительным присутствием остальных фракций. Средняя зафиксированная в скважинах при отборе керна температура, измеренная с помощью термостата Thermo Haake DC10-B3, составила -3,2°C для Омудево лагуны и +1,2°C для озера Гольцового.

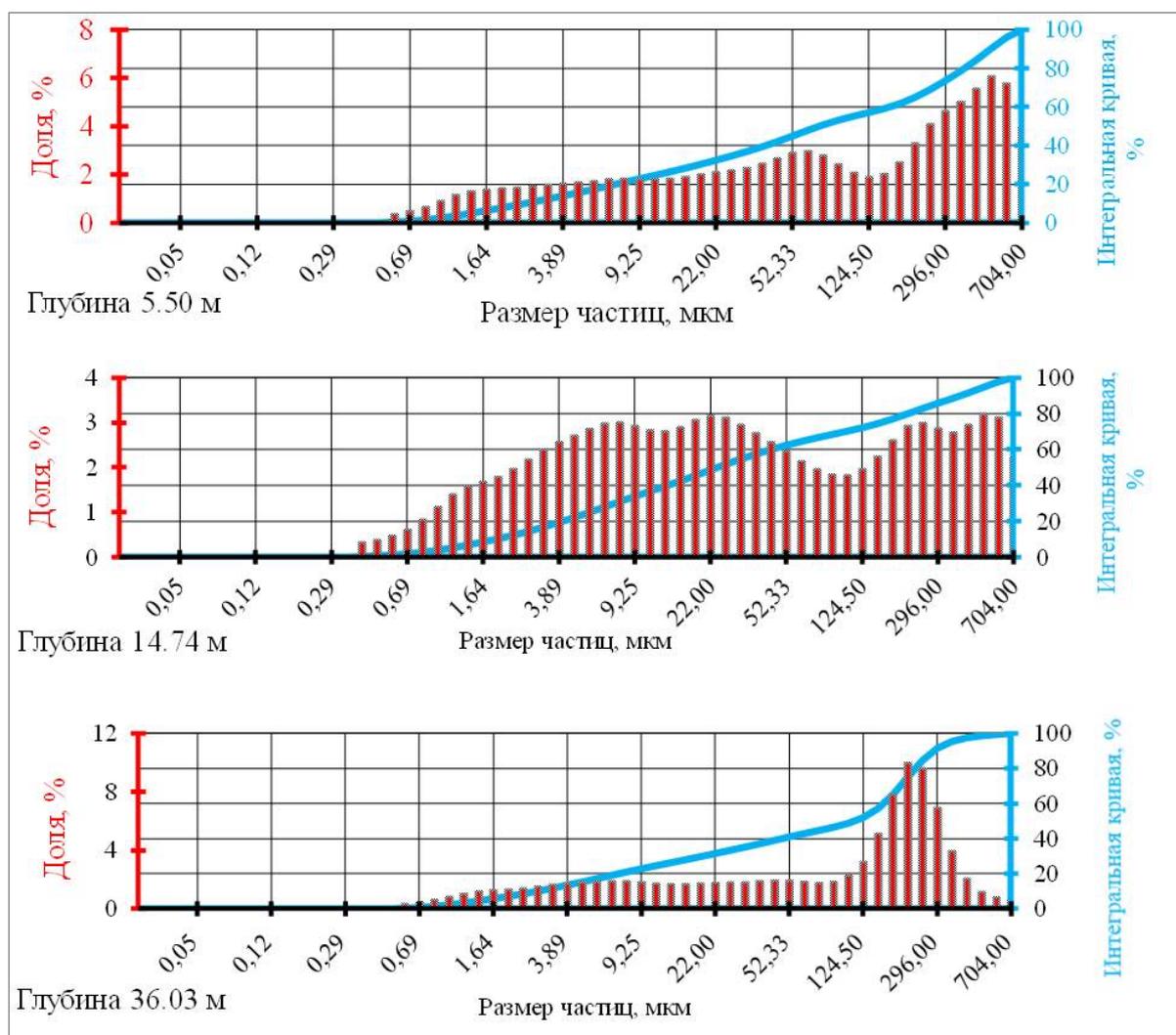


Рис. 4. Диаграммы гранулометрического состава пород скважины озера Гольцовое

Электрические свойства многолетнемерзлых пород

Для измерения удельного электрического сопротивления (УЭС) мерзлых пород применялся двухэлектродный метод. Измерения выполнялись на приборе LCR–78105G с диапазоном частот 20 Гц – 5 МГц на переменном токе. Образцы замораживались с помощью термостата Thermo Haake DC10-V3 при температуре, которая зафиксирована в скважине при отборе мерзлой породы.

Как видно из рис. 6, УЭС меняется от 0,6 до 2,76 Ом·м для образцов Омудево́й лагуны и от 4,6 до 63,1 Ом·м для образцов озера Гольцовое, что говорит о крайне неоднородном разрезе обеих скважин. Температура в обеих скважинах с глубиной уменьшается, что, вероятно, связано с тепловыми потоками, протекающими в горных породах. При этом сохраняется общая тенденция к увеличению с глубиной, что связано с падением водосодержания (рис. 7). Водосодержание является важным фактором, влияющим на сопротивление: чем меньше воды в образце, тем больше УЭС.

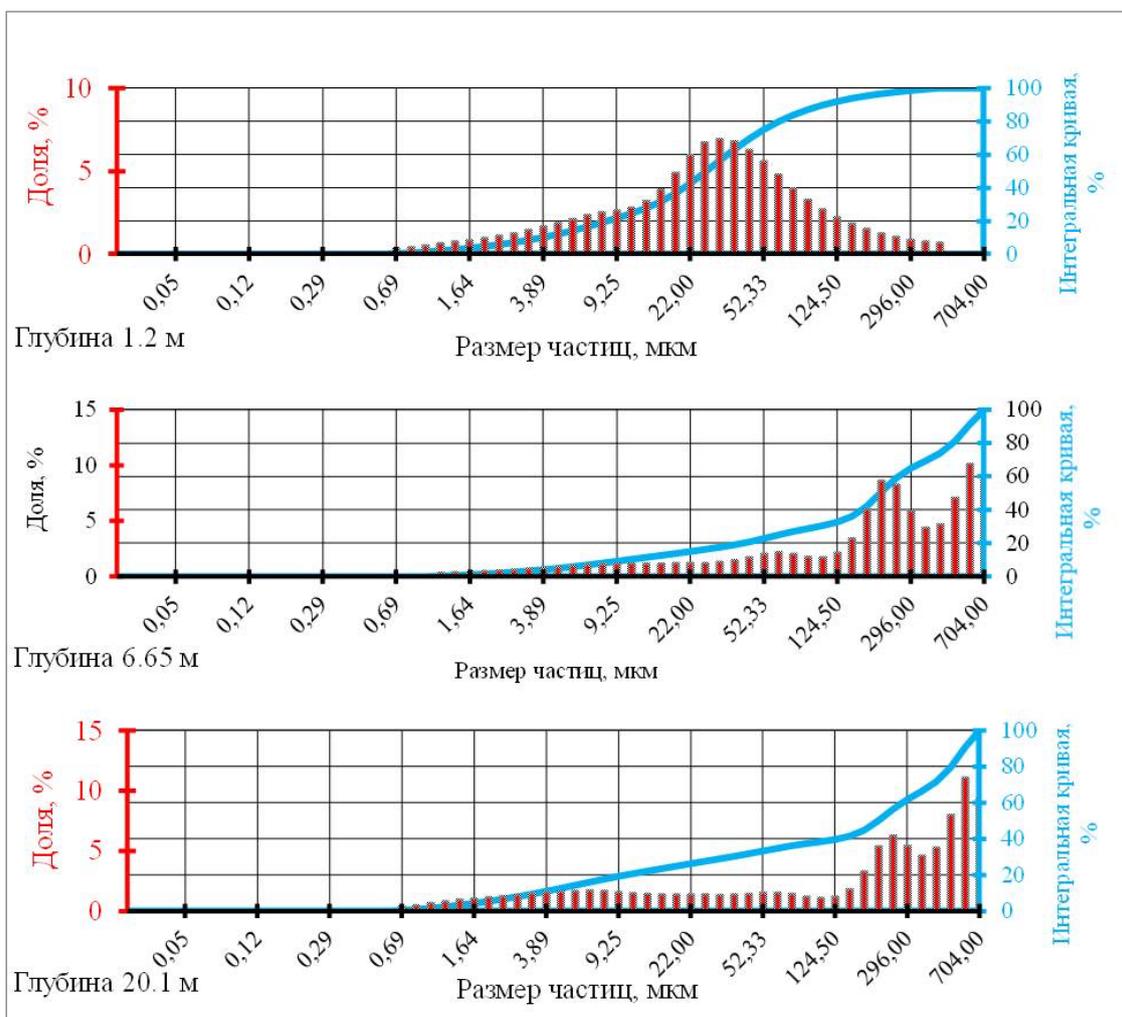


Рис. 5. Диаграммы гранулометрического состава пород скважины Омuleвой лагуны

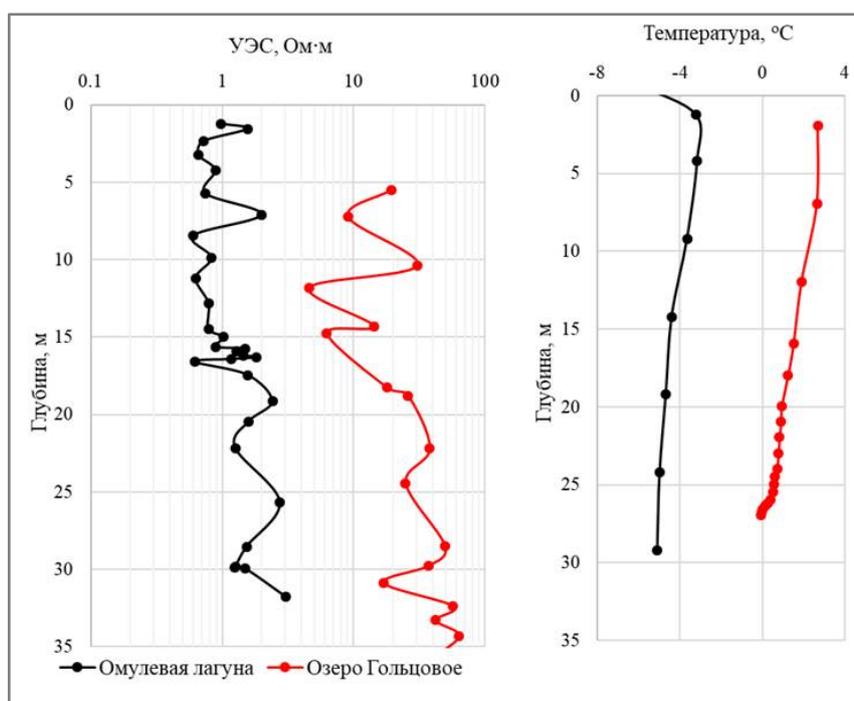


Рис. 6. Кривые зависимости удельного электрического сопротивления и температуры от глубины

На рис. 7 видно общую тенденцию уменьшения водосодержания при увеличении глубины в обеих скважинах. Максимальное значение водосодержания породы со скважины в озере Гольцовом наблюдается на глубине 5,50 м, где порода представлена иллитовой глиной, а со скважины в Омuleвой лагуне – на глубинах 1,85 м и 10.4 м, где горная порода состоит из иллитовой глины и глины, с включением органики.

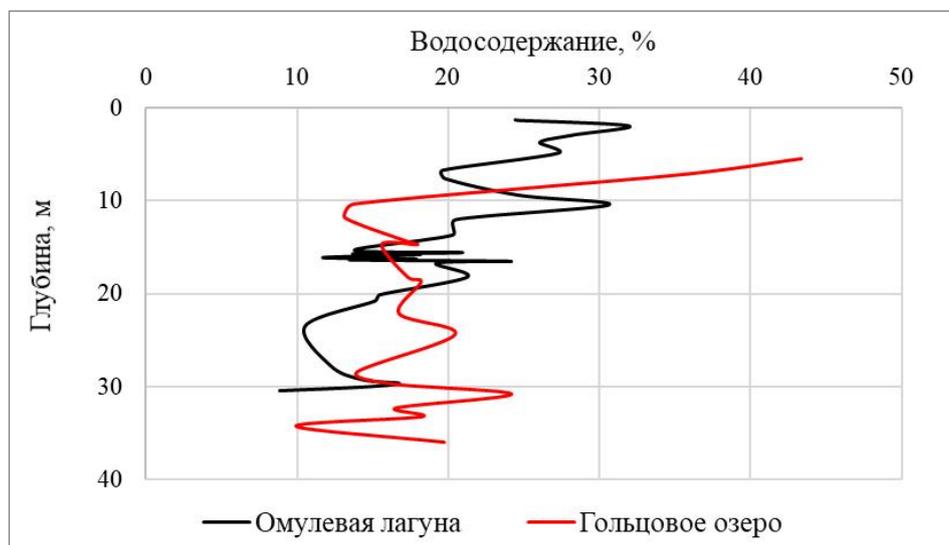


Рис. 7. Кривые зависимости водосодержания от глубины

Анализ результатов проведенных исследований по измерению УЭС многолетнемерзлых пород позволяет сделать вывод, что экспоненциальный рост УЭС начинается с уменьшением температуры ниже $-2,5^{\circ}\text{C}$, что свидетельствует о замерзании воды в породе именно при этой температуре, и свободная вода становится изолятором. Типичный результат измерений образцов с озера Гольцовое и Омuleвой лагуны представлен на рис. 8.

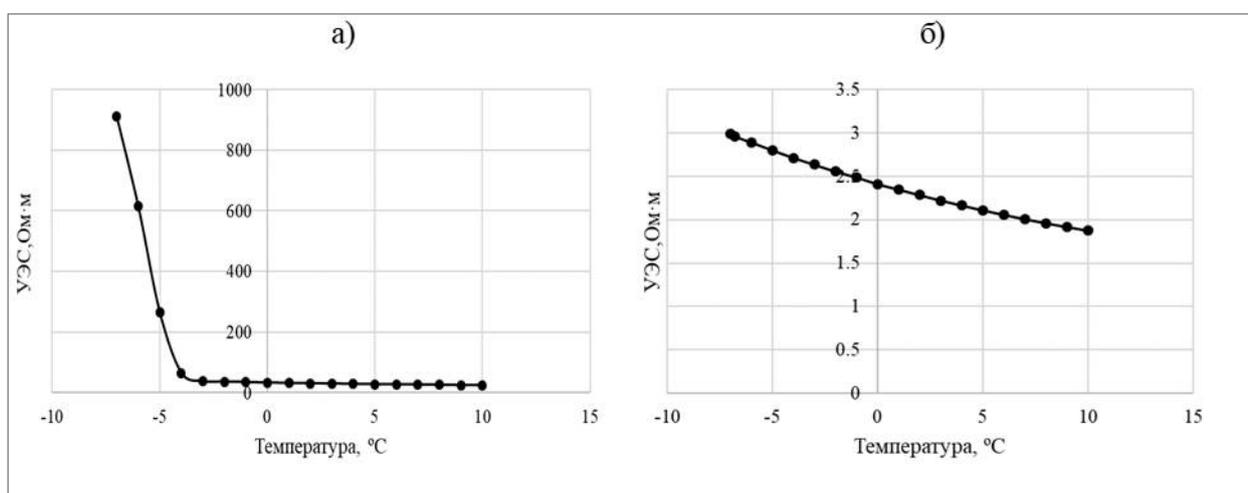


Рис. 8. Диаграммы удельного электрического сопротивления образцов 2412-2-5 (а) и 2410-12-2 (б) во время замораживания

В момент замораживания образца 2412-2-5 при температуре $+10^{\circ}\text{C}$ величина УЭС составляла $23 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, при температуре -7°C УЭС увеличилось до $911 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Экспоненциальный рост УЭС начинается при температуре -3°C . Образец состоит из иллитовой глины с включением средне-мелкозернистого песка и находился на глубине $10,38 \text{ м}$.

При исследовании образцов в Омудево лагуне обнаружено, что при замораживании породы вода в образцах не замерзает. Измеренное УЭС во время замораживания образцов со скважины в Омудево лагуне изменяется в пределах от $0,4$ до $2,96 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, от температуры зависит линейно, экспоненциального роста не наблюдается. Это подтверждает тот факт, что вода в образцах не замерзает.

Таким образом, результаты измерений УЭС образцов горных пород из скважин Быковского п-ова показывают, что:

- гранулометрический состав пород сильно меняется с глубиной, что обуславливает изменчивость водосодержания, электропроводности и УЭС;
- вода в образцах, кроме верхних слоев, находится в связанном состоянии и начинает замерзать при температуре ниже $-2,5^{\circ}\text{C}$, что подтверждается зависимостью УЭС от температуры.

Диэлектрические свойства многолетнемерзлых пород

На рис. 9 и 10 приведены результаты измерений КДП для образцов №1 из скважины Омудево лагуны (2410) и №3 из скважины озера Гольцовое (2412) в виде диаграммы Коул-Коула и зависимости ϵ' от частоты.

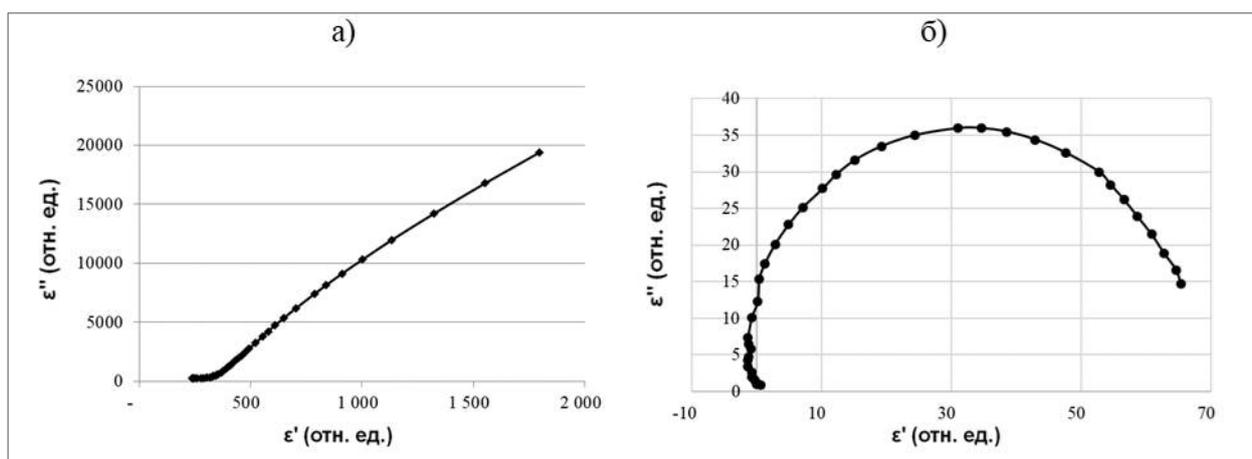


Рис. 9. Диаграммы Коул-Коула для образца №1 из скважины 2410 (а) и образца №3 из скважины 2412 (б)

Анализ данных диаграмм поляризации показал, что образцы не имеют общего вида

поляризации. Так, поляризация Коул-Коула наблюдается только для образца № 3 из скв. 2412.

Образцы из скв. 2410 имеют более высокие значения действительной части КДП по сравнению с образцами из скв. 2412. Среднее максимальное значение действительной части КДП для образцов из скв. 2410 составляет 1668 отн. ед., для образцов из скв. 2412 – 258 отн. ед., т.е. отличаются примерно в 6 раз. Средние минимальные значения действительной части КДП для образцов из скважин 2410 и 2412 также отличаются примерно в 6 раз. Для всех образцов наблюдается уменьшение действительной части КДП с увеличением частоты.

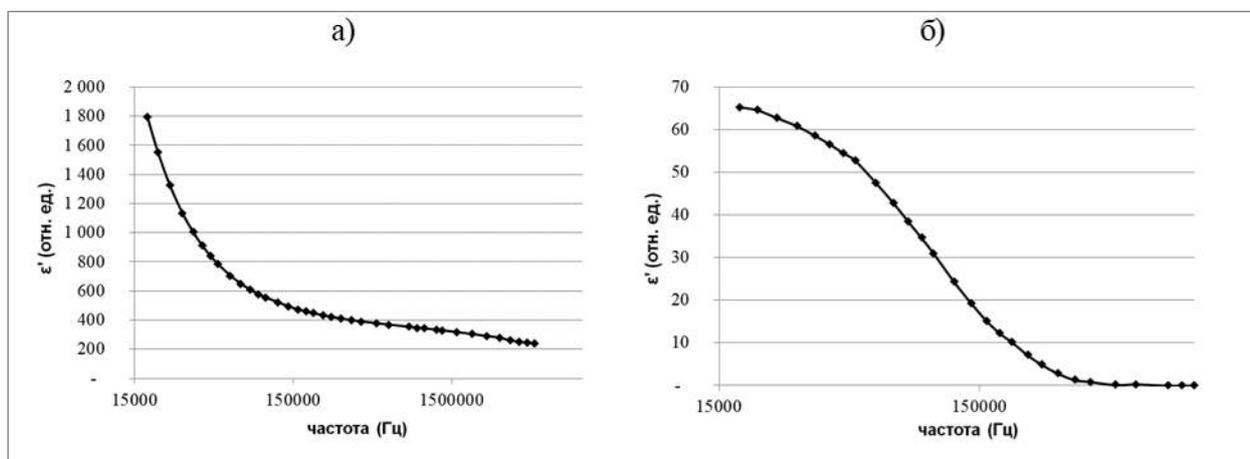


Рис. 10. Диаграммы зависимости ϵ' от частоты для образца №1 из скважины 2410 (а) и образца №3 из скважины 2412 (б)

К возможным причинам расхождения результатов из двух скважин можно отнести:

– разные условия залегания образцов: в скважине озера Гольцовое более высокие значения температуры залегания породы (от 0,15 до 2,63°C) по сравнению со скважиной Омuleвой лагуны (от -3,2 до -4,4°C);

– разные значения УЭС для образцов из двух скважин: в скважине озера Гольцовое более высокие значения УЭС (от 4,6 до 63,1 Ом·м), чем в скважине Омuleвой лагуны (от 0,6 до 2,76 Ом·м);

– разная степень минерализации образцов: образцы озера Гольцовое менее минерализованы, чем образцы Омuleвой лагуны.

ЯМР-свойства многолетнемерзлых пород

Образцы пород, извлеченные из скважин Омuleвой лагуны и озера Гольцовое, являются 100% насыщенными. После проведения электрических и диэлектрических измерений все образцы рассортированы по непроницаемым пакетам (см. рис. 1), заморожены и в таком виде хранились, чтобы не нарушить естественного насыщения. Затем для изучения структуры

порового пространства образцов они полностью разморожены для проведения ЯМР-измерений при 100%-ном насыщении, а после подверглись замораживанию и постепенному оттаиванию для изучения влияния гранулометрического состава и минерализации на общее содержание воды в образцах разных скважин по ЯМР-данным.

ЯМР-измерения проводились на ЯМР-анализаторе «Niumag Micro12-040V» с индукцией магнитного поля 0,28 Тл, рабочей частотой 12 МГц и расстоянием между эхо-импульсами 0,1 мс, температура магнитной системы - 32°C.

На начальном этапе для каждого образца выполнены измерения с использованием двух импульсных последовательностей – CPMG (последовательность Карра-Парселла-Мейбума-Гилла) и IR-CPMG (последовательность инверсия-восстановление). CPMG-последовательность позволяет получить распределение времен поперечной релаксации T_2 , общее водосодержание исследуемого образца, доли свободной и связанной воды в образце. Последовательность IR-CPMG позволяет установить времена продольной релаксации T_1 , а также строить двумерные карты времен релаксации T_1 - T_2 .

При петрофизических исследованиях для получения данных о фильтрационно-емкостных свойствах образца чаще всего используют импульсную последовательность CPMG. Спектры T_2 пород со скважин Омудевова лагуны и озера Гольцовое после полного размораживания, т.е. при 100%-ном насыщении представлены на рис. 11.

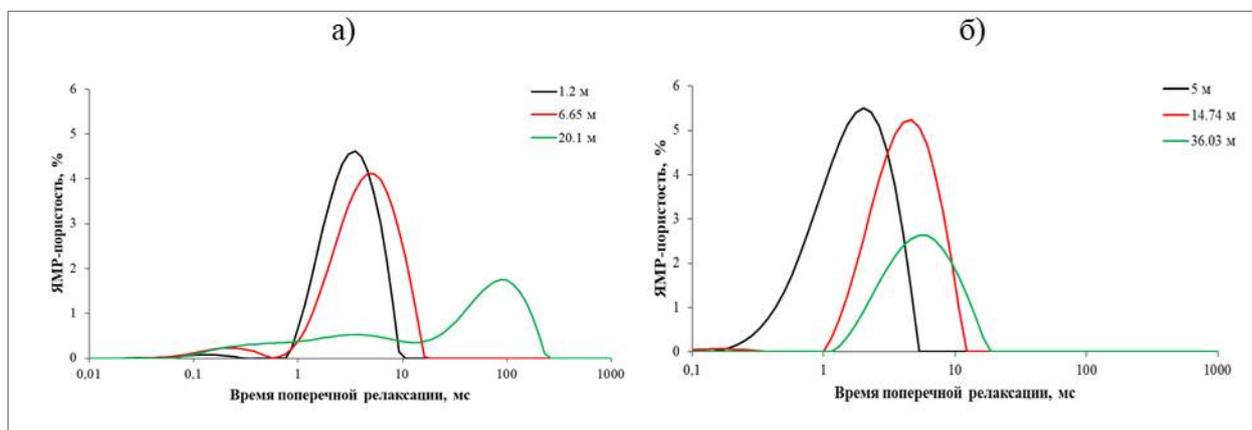


Рис. 11. Спектры времен поперечной релаксации пород скважин Омудевова лагуны (а) и озера Гольцовое (б) при 100% насыщении

Породы скважины Омудевова лагуна характеризуются общим водосодержанием в интервале от 28 до 62% со средним значением 43%. Большая часть воды в изученных образцах является связанной (по разрезу от 15 до 100% со средним значением 78%). Связанная вода в данном случае определяется как площадь под графиком распределения времен поперечной релаксации до времени отсечки 10 мс. Как видно из рис. 11а, с увеличением глубины залегания

породы наблюдается закономерное повышение времен поперечной релаксации, что свидетельствует о росте размера частиц породы и переходе от иллитовой фракции к песчаной. Спектры образцов верхней части разреза - более узкие, т.е. породы представлены однородным составом, присутствует небольшой пик на временах 0,1-1 мс. С увеличением глубины бимодальность переходит в плавные перегибы, т.е. поровое пространство становится более сообщающимся. При этом содержание воды в образцах с глубин 1,2 и 6,65 м составляет порядка 50%, и вся она является связанной, а в образце с глубины 20,1 м содержание воды – 35%, и только ее треть находится в связанном состоянии, остальная вода – свободная, в крупных порах. Это можно объяснить повышенным содержанием глинистой фракции в верхней части разреза, которая удерживает большее количество воды на своей поверхности.

Породы скважины озеро Гольцовое характеризуются общим водосодержанием в интервале от 29 до 66% со средним значением 45%. Большая часть воды в образцах является связанной (по разрезу от 40 до 100% со средним значением 83%). Как видно из рис. 11б, породы скважины озеро Гольцовое имеют более короткие времена релаксации по сравнению с породами скважины Омудевова лагуны. При этом с увеличением глубины залегания породы также наблюдается закономерное повышение времен поперечной релаксации, которое свидетельствует о росте размера частиц породы и переходе от иллитовой фракции к песчаной. Спектры всех образцов - одномодальные, т.е. представлены однородным составом. При этом содержание воды в образцах с глубин 5 и 14,74 м составляет порядка 60%, и вся она является связанной, а в образце с глубины 36,03 м содержание воды – 30%, и в связанном состоянии находится 86%. Это можно объяснить повышенным содержанием глинистой фракции в верхней части разреза, которая удерживает большее количество воды на своей поверхности. В целом, породы скважины озера Гольцовое по ЯМР-данным характеризуются более короткими временами поперечной релаксации и большей степенью связанности воды, т.е. в составе этих пород больше иллитовой фракции.

По картам T_1 - T_2 можно сделать вывод о типе насыщающего флюида и его распределении в поровом пространстве образца (рис. 12). Как видно из рисунка, в поровом пространстве образцов находится только вода (лежит на линии равных значений), при этом для разных образцов наблюдается распределение воды в порах разного размера. В образце из скважины Омудевова лагуны с глубины 20,1 м присутствует незначительное количество воды в порах малого размера, которые на картах T_1 - T_2 выглядят как размытые белые пятна.

Для всех образцов из скважин Омудевова лагуны и озера Гольцовое выполнены эксперименты по замораживанию-размораживанию. Температура менялась от до -10°C до комнатной, ЯМР-измерения проводились с шагом в 1 мин. Следует отметить, что в начальный момент времени, т.е. при температуре -10°C , сигнал ЯМР удалось получить ввиду того, что

вода в образцах имеет высокие минерализацию и степень связанности, что приводит к понижению температуры замерзания. Эти же данные подтверждаются результатами измерений УЭС (см. рис. 8). Основные результаты представлены на рис. 13.

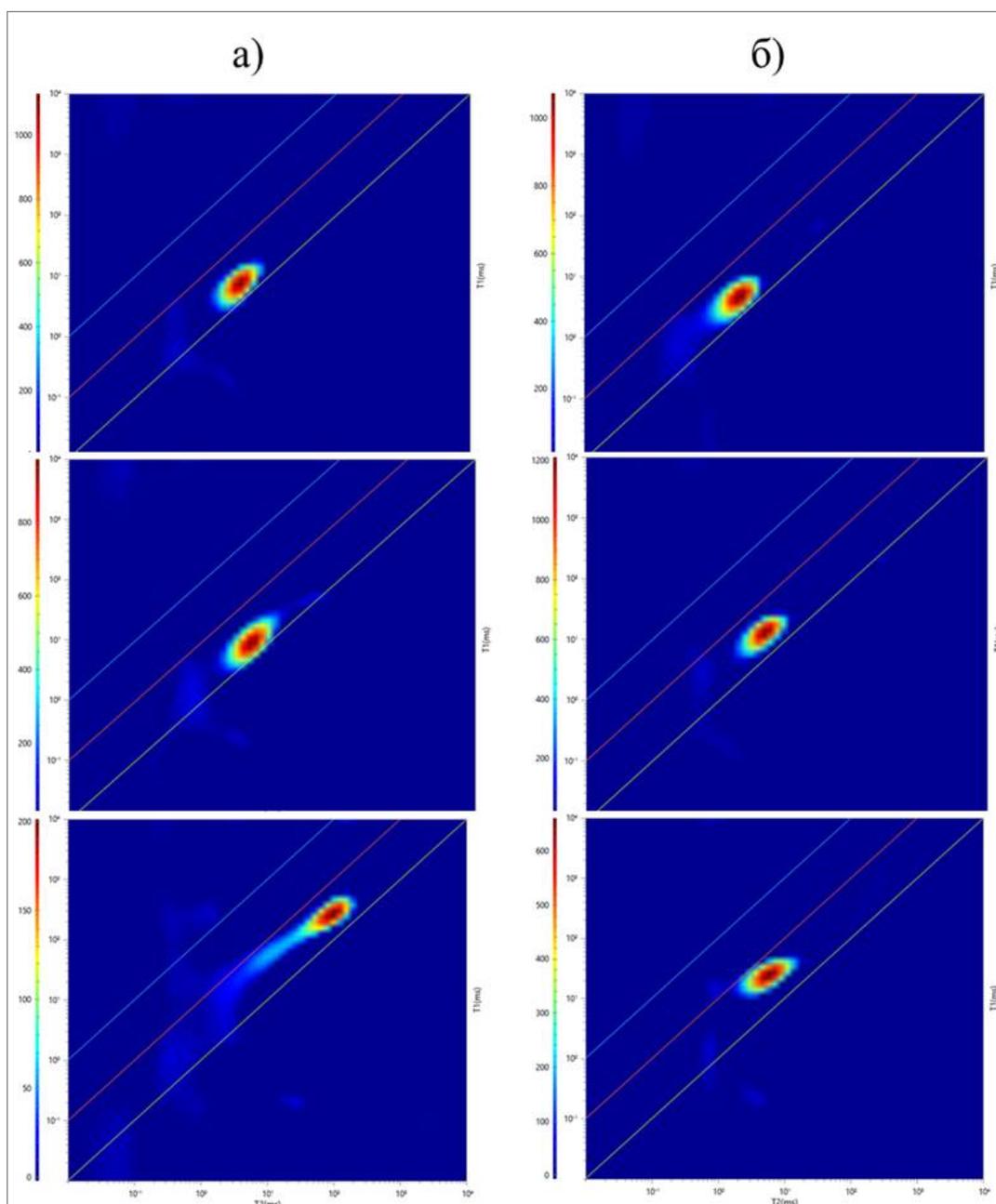


Рис. 12. Карты времен релаксации T_1 - T_2 пород скважин Омужева лагуна (а) и озеро Гольцовое (б)

Увеличение глубины - сверху вниз.

По графикам видно, что в процессе размораживания происходит постепенное увеличение амплитуды спектров и их смещение в сторону больших времен релаксации. Это свидетельствует о том, что с ростом температуры свободной воды в образце становится все больше, и она постепенно заполняет все более крупные поры. При этом после 30 минут

спектры перестают меняться, т.е. образец полностью оттаял. Следует отметить, что ЯМР-пористость, т.е. содержание воды в образцах в начальный момент (сразу после замораживания) составляет в среднем 16,5% для пород из скважины Омудевова лагуны и 6,5% для пород из скважины озеро Гольцовое. Это можно объяснить тем, что породы скважины Омудевова лагуны более минерализованы, соответственно, вода в них будет замерзать при более низких температурах, это согласуется с результатами диэлектрических измерений. При этом распределение по временам релаксации, которое дает информацию о структуре порового пространства, характеризует только насыщенную часть образца и не дает полного представления о распределении пор по размерам.

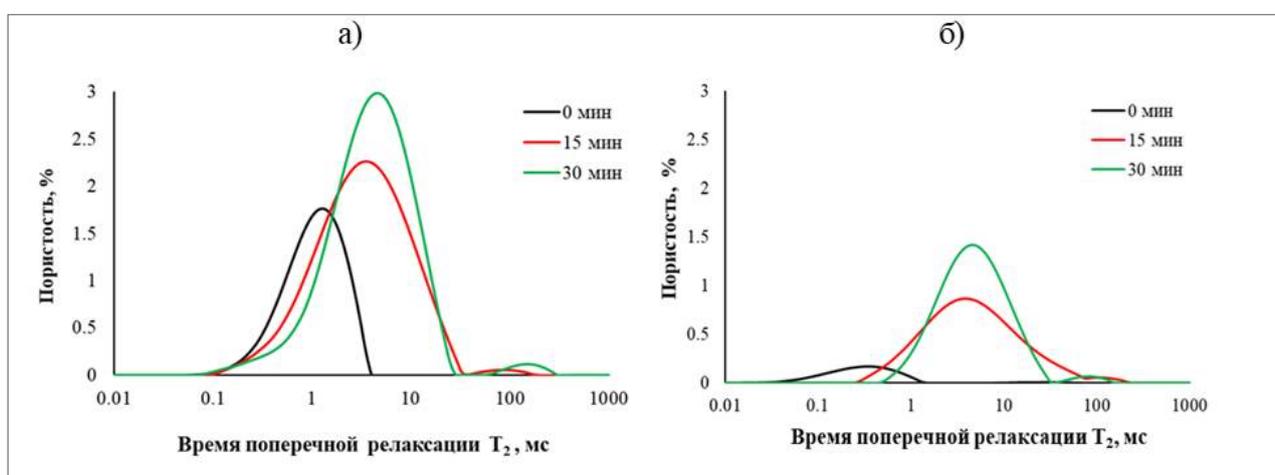


Рис. 13. Спектры времен поперечной релаксации пород скважин Омудевова лагуны с глубины 6,65 м (а) и озеро Гольцовое с глубины 36,03 м (б) при размораживании

Заключение

Результаты измерений комплексной диэлектрической проницаемости многолетнемерзлых пород из скважин Омудевова лагуна (2410) и Озеро Гольцовое (2412) Быковского п-ова показали, что образцы из скв. 2410 имеют более высокие значения действительной части КДП в отличие от образцов из скв. 2412. Для всех образцов характерно уменьшение действительной части КДП с увеличением частоты. Анализ данных показал, что образцы не имеют общего вида поляризации. Поляризация Коул-Коула наблюдается только для одного образца из скв. 2412. Установлено, что превращение воды в лед с понижением температуры происходит не при определенной температуре, а в некотором диапазоне отрицательных температур. Установлено, что диэлектрическая проницаемость изменяется примерно в 6 раз для разных скважин.

По ЯМР-данным установлена связь содержания воды в образцах с литологическим и гранулометрическим составом, а также экспериментально подтверждено предположение о разной степени минерализации образцов: образцы озера Гольцовое менее минерализованы,

чем образцы Омудево́й лагуны. Это проявляется как на диаграммах Коул-Коула, так и на ЯМР-спектрах при размораживании образцов.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 22-17-00181 «Импульсное электромагнитное зондирование многолетнемерзлых пород: теоретическое и экспериментальное развитие высокоразрешающего геофизического метода, научное обоснование и создание инновационной технологии мониторинга криолитозоны», <https://rscf.ru/project/22-17-00181/>.

Литература

Джафаров И.С., Сынгаевский П.Е., Хафизов С.Ф. Применение метода ядерного магнитного резонанса для характеристики свойства и распределения пластовых флюидов. - М.: Химия, 2002. - 439 с.

Репин А.В., Бобров П.П., Голиков Н.А. Диэлектрическая проницаемость нефтеводонасыщенных кернов баженовской свиты // Актуальные проблемы геологии нефти и газа Сибири: материалы Всероссийской научной конференции молодых ученых и студентов, посвящ. 80-летию акад. А.Э. Конторовича (г. Новосибирск, 10-15 февраля 2014 г.). - Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2014. - С. 228-231.

Судакова М.С., Владов М.Л. Экспериментальное исследование акустических свойств водонасыщенного песка в интервале температуры от -20 до +20°C // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. - 2019. - №(4). - С. 55-62. DOI: [10.33623/0579-9406-2019-4-55-62](https://doi.org/10.33623/0579-9406-2019-4-55-62)

Табарин В.А., Демьянцева С.Д. Определение содержания связанной воды в кернах на СВЧ // Нефтегазовое дело. - 2009. - Т. 7. - №1. - С.1-28.

Шумская М.И., Глинских В.Н. Анализ влияния объемного содержания и типа глинистых минералов на релаксационные характеристики песчано-алевритовых образцов керна // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. - 2015. - № 7. - С. 35-38.

Шумская М.И., Глинских В.Н. Экспериментальное исследование зависимости ЯМР-характеристик от удельной поверхности и удельного электрического сопротивления песчано-алевритоглинистых образцов // Геология и геофизика. - 2016. - Т. 57. - № 10. - С. 1911-1918. DOI: [10.15372/GiG20161009](https://doi.org/10.15372/GiG20161009)

Эпов М.И., Савин И.В., Миронов В.Л. Диэлектрическая температурная модель влажных нефтесодержащих пород в диапазоне частот от 0,5 до 15 ГГц // Геология и геофизика. - 2012. - №7. - С. 912-919. DOI: [10.1016/j.rgg.2012.05.008](https://doi.org/10.1016/j.rgg.2012.05.008)

Bittar M.S., Li J. High frequency dielectric measurement tool: patent 20110221443 USA, G01V 3/10; applicant and patentee Halliburton Energy Services, Inc. - No 13128676; application date 11.08.2009; publication date 15.09.2011.

Comparon L., Hizem M. System and method to measure dielectric constant in a subterranean well: patent 12669195 USA, G01V 3/00, G01V 3/10; applicant and patentee Schlumberger Technology Corporation. - No 12669195; application date 09.06.2008; publication date 11.11.2010.

Fleury M., Deflandre F., Godefroy S. Validity of permeability prediction from NMR measurements // Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Chemistry. - 2001. - №4. - P. 869-872. DOI: [10.1016/S1387-1609\(01\)01343-3](https://doi.org/10.1016/S1387-1609(01)01343-3)

Freedman R., Heaton N., Flaum M., Hirasaki G., Flaum C., Hurlimann M. Wettability saturation and viscosity from NMR measurements // SPE Journal. - 2003. - №8. - P. 317-327. DOI: [10.2118/87340-PA](https://doi.org/10.2118/87340-PA)

Freedman R., Heaton N. Fluid characterization using nuclear magnetic resonance logging // Petrophysics. - 2004. - №45. - P. 241-250.

Shumskayte M., Junasheva A., Eltsov T., Golikov N. Electrophysical parameters and NMR-characteristics of cryogel // IOP Conference Series: Earth and Environment Science. - 2016. - Vol. 43. - Paper 012021. - 7 p. DOI: [10.1088/1755-1315/43/1/012021](https://doi.org/10.1088/1755-1315/43/1/012021)

This is an open access article under the CC BY 4.0 license

Received 12.11.2024

Published 24.02.2025

Shumskayte M.Y., Yanushenko T.A.

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences (IPGG SB RAS), Novosibirsk, Russia, shumskaitemi@ipgg.sbras.ru, yanushenkota@ipgg.sbras.ru

Golikov N.A.

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences (IPGG SB RAS); Novosibirsk state university (NSU); Novosibirsk state technical university (NSTU), Novosibirsk, Russia, golikovna@ipgg.sbras.ru

STUDY OF PERMAFROST ROCKS OF THE BYKOV PENINSULA BY LABORATORY METHODS OF DIELECTRIC SPECTROSCOPY AND NUCLEAR MAGNETIC RESONANCE

The complex permittivity of sedimentary rocks mainly depends on the porosity and water saturation. For frozen rocks, the complex permittivity is also determined by the state of water in the pores. This is due to the difference in permittivity and electrical conductivity of free water and ice in the pores of the rock. In fine-porous rocks, the influence of bound water is great, the properties of which differ from the properties of free water. A study of the granulometric composition and specific electrical resistance of rocks was carried out on samples of permafrost rocks, and measurements were also made using the nuclear magnetic resonance method. Nuclear magnetic resonance is widely used in geological and geophysical studies to determine the filtration-capacitive properties of rocks and the rheological properties of formation fluids. It was found that the transformation of water into ice with a decrease in temperature does not occur at a certain temperature, but in a certain range of negative temperatures. It was found that the dielectric constant changes by approximately 6 for different wells. According to NMR data, a connection was established between water saturation and granulometric composition and the dependence of the transverse relaxation time on the degree of mineralization and temperature of rocks.

Keywords: complex permittivity, NMR relaxometry, permafrost rock, Bykov peninsula.

For citation: Shumskayte M.Y., Yanushenko T.A., Golikov N.A. Izuchenie mnogoletnemerzlykh porod Bykovskogo poluostrova laboratornymi metodami dielektricheskoy spektroskopii i yadernogo magnitnogo rezonansa [Study of permafrost rocks of the Bykov peninsula by laboratory methods of dielectric spectroscopy and nuclear magnetic resonance]. *Neftegazovaya Geologiya. Teoriya i Praktika*, 2025, vol. 20, no. 1, available at: https://www.ngtp.ru/rub/2025/8_2025.html EDN: OORYLZ

References

Bittar M.S., Li J. *High frequency dielectric measurement tool*: patent 20110221443 USA, G01V 3/10; applicant and patentee Halliburton Energy Services, Inc, No 13128676; application date 11.08.2009; publication date 15.09.2011.

Comparon L., Hizem M. *System and method to measure dielectric constant in a subterranean well*: patent 12669195 USA, G01V 3/00, G01V 3/10; applicant and patentee Schlumberger Technology Corporation, No 12669195; application date 09.06.2008; publication date 11.11.2010.

Dzhafarov I.S., Syngaevskiy P.E., Khafizov S.F. *Primenenie metoda yadernogo magnitnogo rezonansa dlya kharakteristiki svoystva i raspredeleniya plastovykh flyuidov* [Nuclear magnetic resonance application for reservoir fluids distribution and properties characterization]. Moscow: Khimiya, 2002, 439 p. (In Russ.).

Epov M.I., Savin I.V., Mironov V.L. Dielektricheskaya temperaturnaya model' vlazhnykh neftesoderzhashchikh porod v diapazone chastot ot 0,5 do 15 GGts [Dielectric temperature model of wet oil-bearing rocks in the frequency range from 0.5 to 15 GHz]. *Geologiya i geofizika*, 2012, no. 7,

