

Арктика и Антарктика

Правильная ссылка на статью:

Гречищева Э.С., Буханов Б.А., Мухаметдинова А.З., Мотенко Р.Г. Особенности исследования фазового состава влаги мерзлых грунтов при нефтесолевом загрязнении // Арктика и Антарктика. 2025. № 3. DOI: 10.7256/2453-8922.2025.3.75093 EDN: FECLXL URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=75093

Особенности исследования фазового состава влаги мерзлых грунтов при нефтесолевом загрязнении

Гречищева Эрика Станиславовна

ORCID: 0000-0002-0307-6153

Заведующий сектором; Центр геокриологических и геотехнических исследований; НИИОСП им. Н.М. Герсевича АО "НИЦ "Строительство"

105187, Россия, г. Москва, р-н Соколиная Гора, ул. Вольная, д. 28/4 к. 3, кв. 298

✉ cryoerika@mail.ru



Буханов Борис Александрович

ORCID: 0000-0002-7058-7244

кандидат геолого-минералогических наук

старший научный сотрудник; Центр науки и технологий добычи углеводородов; Сколковский институт науки и технологий

121205, Россия, г. Москва, Можайский р-н, тер. инновационного центра Сколково, ул. Сикорского, д. 11

✉ bor-buhanov@yandex.ru



Мухаметдинова Алия Захрафовна

ORCID: 0000-0001-7270-4806

кандидат технических наук

старший научный сотрудник; Центр науки и технологий добычи углеводородов; Сколковский институт науки и технологий

121205, Россия, г. Москва, Можайский р-н, тер. инновационного центра Сколково, ул. Сикорского, д. 11

✉ a.mukhametdinova@skoltech.ru



Мотенко Римма Григорьевна

ORCID: 0000-0002-9764-5475

кандидат геолого-минералогических наук

старший научный сотрудник; кафедра геокриологии геологического факультета; МГУ имени М.В. Ломоносова

119234, Россия, г. Москва, р-н Раменки, тер. Ленинские Горы, д. 1

✉ rmotenko@mail.ru



[Статья из рубрики "Грунты холодных равнинных и горных регионов"](#)

DOI:

10.7256/2453-8922.2025.3.75093

EDN:

FECLXL

Дата направления статьи в редакцию:

06-07-2025

Дата публикации:

13-07-2025

Аннотация: Целью работы являлось исследование влияния нефтесолевого загрязнения на влажность за счет незамерзшей воды в глине и выявление методических особенностей при работе с грунтами, содержащими в своем составе нефть. Объектом исследования являлся модельный глинистый грунт, а испытания проводились для модельных образцов. Исследования проводились для «чистых», засоленных и загрязненных нефтью грунтов, а также грунтов с нефтесолевым загрязнением. Авторы уделяют особое внимание такому аспекту, как подготовка грунтовых паст, поскольку лабораторное моделирование такой сложной системы, как "грунт-вода-лед-соль-нефть" сопряжено с рядом методических особенностей. Также авторы обращают внимание на требования и методы, традиционно используемые при проведении инженерно-геологических изысканий в соответствии с нормативной документацией. Испытания проведены с использованием стандартных контактного и криоскопического методов. Для сравнения проведены испытания методом ядерно-магнитного резонанса. Влажность за счет незамерзшей воды в широком температурном диапазоне для грунтов с нефтесолевым загрязнением исследована впервые. При исследовании этой характеристики получена не только зависимость содержания незамерзшей воды от температуры, но также выявлены ограничения стандартных методов определения влажности за счет незамерзшей воды. Установлено, что контактный метод определения влажности за счет незамерзшей воды не может применяться при исследовании незасоленных и засоленных грунтов, содержащих нефть. Для получения корректных результатов следует применять методы, при реализации которых не происходит изменение соотношения нефти, воды (или раствора) и льда. Результаты криоскопического и ЯМР методов показали, что влияние нефтесолевого загрязнения на содержание незамерзшей воды идентично влиянию засоленности, расхождение результатов составило менее 8%.

Ключевые слова:

мерзлые грунты, загрязнение грунтов, нефтесолевое загрязнение, нефтяное загрязнение, загрязнение криолитозоны, незамерзшая вода, фазовый состав влаги, метод ядерно-магнитного резонанса, термограмма оттаивания, температура начала замерзания

Введение

Развитие нефтедобывающей промышленности приводит к существенному увеличению территорий, отводимых для освоения нефтяных месторождений. При этом одной из наиболее опасных проблем является загрязнение природной среды углеводородами и другими активными веществами, попадающими в следствие разливов нефти и нефтепродуктов при их добыче, хранении, транспортировке и переработке. Нефть, попадая в почвы и грунты, привносит с собой разнообразный набор химических соединений, нарушающих сложившийся геохимический баланс в экосистемах. Наиболее часто сопровождающим углеводородное загрязнение является привнос в почву солей, содержащихся в пластовых водах, которые поднимаются вместе с нефтью добывающими скважинами [\[1\]](#).

Аварии на нефтепромыслах приводят к заметному засолению при любых даже относительно невысоких концентрациях солей в пластовых жидкостях и соответственно в сточных водах [\[1-3\]](#). Кроме того, возможно нефтяное загрязнение с поверхности в районах распространения природных засоленных грунтов [\[4-5\]](#). Основным механизмом распространения загрязнения – гравитационный – движение по поверхности в сторону уклона местности (поверхностный сток), проникновение в почвенные горизонты и рыхлые отложения [\[6\]](#).

Состав пластовых вод, которые извлекаются вместе с нефтью, концентрации в них солей и соотношения ионов, а соответственно, и степень их экологической опасности разнообразны. Основные группы вод – хлоридно-натриевые (преобладающие) и хлоридно-кальциевые. Все воды нефтяных месторождений высоко минерализованы [\[7\]](#). При этом даже в пределах одного бассейна состав пластовых вод достаточно разнообразен. Пластовые воды, отделяющиеся от добываемой нефти в процессе ее первичной подготовки, составляют основные объемы сточных вод промыслов – около 82-84% [\[8\]](#). Минерализованные воды Западной Сибири относятся к хлоридно-натриевому типу, их общая минерализация составляет в среднем 4 г/л [\[9\]](#), а обводненность добываемой нефти сеноманскими высокоминерализованными водами на месторождениях ХМАО достигает 30-70% [\[10\]](#).

На Ковыктинском газоконденсатном месторождении (Иркутская обл.) содержание нефтепродуктов в напочвенном покрове местами превышает 500 мг/кг. При этом средняя минерализация растворимых солей в водной вытяжке составила 0,78%, а максимальные значения достигали 5,58% [\[11\]](#). Исследователями установлено, что концентрации солей и нефтепродуктов изменяются в разрезе со временем, но даже по прошествии 13 лет после загрязнения могут оставаться значительными, в т.ч. на рекультивированных землях [\[12-14\]](#). Большинство работ по исследованию нефтесолевого загрязнения рассматривают экологический аспект этой темы с изучением грунтового или почвенного разреза на глубину до 1 м с точки зрения воздействия на растительность в районе загрязнения. Лишь несколько исследований посвящены изучению более глубоких горизонтов.

В экспериментальном исследовании на мысе Болванский (о. Вайгач) при излитии нефти зафиксировано проникновение нефти на всю глубину слоя сезонного оттаивания (1,3 м), а также в подстилающие мерзлые грунты на 0,1 м [\[15\]](#). Через три года после разлива результаты опробования показали присутствие нефтяного загрязнения по всей глубине вскрытых ММП (0,7 м под СТС), при чем ледяные шлыры не явились препятствием для проникновения нефти вглубь ММП [\[16\]](#).

При проектировании зданий и сооружений в Арктике и в районах распространения многолетнемерзлых грунтов в целом обязательными являются теплотехнические расчеты для назначения проектной температуры грунтов [17]. Также дополнительные расчеты проводятся в том случае, если во время эксплуатации произошли значительные изменения поверхностных или грунтовых условий. Нефтяное и нефтесолевое загрязнения обуславливают изменение как поверхностных условий, так и свойств грунта [18-19]. Входными параметрами для моделирования являются такие поверхностные условия как температура воздуха, высота снежного покрова, наличие растительности и др., а также характеристики грунтов: температура начала замерзания, коэффициент теплопроводности в талом и мерзлом состоянии, объемная теплоемкость в талом и мерзлом состоянии, а также влажность за счет незамерзшей воды в спектре отрицательных температур [17]. Эти параметры должны определяться экспериментально для зданий и сооружений повышенного уровня ответственности [17], а также для засоленных грунтов [20]. Целью проведенного исследования являлось определение влажности за счет незамерзшей воды в грунтах при нефтесолевом загрязнении.

В настоящее время для нужд строительства и инженерных изысканий разработан ГОСТ Р 59537-2021 «Грунты. Метод лабораторного определения влажности за счет незамерзшей воды» [21], который предусматривает определение влажности за счет незамерзшей воды контактным и десорбционным методами, а также широко распространен криоскопический метод [22], реализация которого описана также в ГОСТ Р 71043-2023 «Грунты. Метода лабораторного определения температуры начала замерзания и конца оттаивания» [23]. Однако, исследование характеристик грунтов ввиду специфичности свойств нефтепродуктов осложняется дополнительными физико-химическими процессами взаимодействия в системе «минеральные частицы-лед-вода-соль-нефть». При исследовании фазового состава влаги в мерзлых грунтах, загрязненных дизельным топливом, специалистами из Института физико-технических проблем севера было установлено, что на результат определений влажности за счет незамерзшей воды влияет порядок внесения нефтепродукта [24]. В связи с преобразованиями в жидкой фазе, которые происходят в ходе пробоподготовки и проведении испытания контактным методом, проведены сравнительные испытания с применением альтернативного метода ядерно-магнитного резонанса (ЯМР) [25].

Объект исследования

Исследование проводилось на модельных грунтах. Определение модельного грунта принято в соответствии с [26]: грунт нарушенного сложения (искусственно созданный в лаборатории), воспроизводящий некоторые характерные особенности (например, состав) моделируемых грунтов с целью исключения из рассмотрения большого числа взаимовлияющих факторов. В качестве модельного грунта использовалась каолинистая глина элювиального генезиса, представляющая собой продукт переотложения первичных каолинов коры выветривания пород Челябинской области.

Влажность на границе текучести – 53,3%, влажность на границе раскатывания – 33,2%, число пластичности – 20,1 %, плотность частиц – 2,59 г/см³, степень засоленности – 0,02 %. По степени засоленности каолинистая глина является незасоленным грунтом [27]. Гранулометрический состав каолинистой глины представлен в табл. 1.

Таблица 1. Гранулометрический состав каолинистой глины (без загрязнения нефтью,

$z=0\%$)

Содержание частиц, %						
1-0,5 мм	0,5- 0,25 мм	0,25- 0,1 мм	0,1- 0,05 мм	<0,05 мм	<0,01 мм	<0,005 мм
-	-	0,2	1,1	28,7	26,2	43,8

Поскольку определение показателей свойств грунтов с нефтесолевым загрязнением в природном сложении значительно осложняется неравномерностью распределения поллютантов, ключевым моментом становится правильное воспроизведение основных свойств, влияющих на характеристики. Такая задача может быть решена путем проведения исследования на модельных образцах [26]. Модельными образцами в нашем исследовании являлись образцы, приготовленные из модельного грунта, с заданными значениями влажности W (40%), плотности скелета грунта ρ_d (1,21 г/см³), степени засоленности D_{sal} (0; 1; 2 %), нефтяного загрязнения z (0; 2,5; 10 %).

Методология и методы исследования

Выявление влияния нефтесолевого загрязнения на свойства грунтов возможно только при сравнении свойств такого грунта с некоторым эталоном, которым в данном исследовании является незагрязненный незасоленный исходный модельный грунт. Кроме того, для того, чтобы выявить совместное влияние нефтяного загрязнения и засоления, необходимы сведения о влиянии каждого из поллютантов в отдельности. По этой причине в рамках проведенного исследования проводились испытания не только для «чистых» грунтов и грунтов с нефтесолевым загрязнением, но также для грунтов с одним из поллютантов: засоленных и загрязненных нефтью.

Для искусственного загрязнения выбрана смесь нефтей из нескольких месторождений севера Западной Сибири, поступающая по трубопроводу на Московский нефтеперерабатывающий завод. Температура застывания нефти составила -18°C , плотность – 0,869 г/см³. Фракционный, групповой и углеводородный составы нефти приведены в табл. 2.

Таблица 2. Состав нефти

Фракционный состав, %			Групповой состав нефти, %			Углеводородный состав бензиновых фракций, %		
до 150 °C	до 200 °C	до 250 °C	Масла	Смоли	Асфаль- тены	Алканы	Нафтенны	Арены
2	21	36	50,73	42,1	7,17	71,5	28,5	0

Из спектра солей выбран хлорид натрия, поскольку наиболее часто именно эти ионы встречаются при нефтесолевом загрязнении [1, 3, 6-7, 9, 11-13, 28-29], а также оказывают наибольшее влияние как на биоту [3, 11, 14], так и на свойства грунтов [30-35]. Для проведения исследования использовался хлористый натрий химически чистый производства ООО «РусХим».

При подготовке модельных образцов сначала готовились грунтовые пасты путем смешивания в необходимых пропорциях исходных модельных грунтов, нефти, дистиллированной воды или раствора соли. Грунтовые пасты из «чистых» грунтов

готовились путем добавления в исходный модельный сухой грунт дистиллированной воды в необходимом количестве для задания определенной влажности. Для подготовки грунтовой пасты засоленных грунтов искусственно задавалось засоление исходного минерального модельного грунта. Засоление осуществлялось с помощью растворов соответствующей концентрации. Грунты с нефтяным и нефтесолевым загрязнением готовились в 2 этапа. На первом этапе проводилось увлажнение грунта дистиллированной водой (для грунтов с нефтяным загрязнением) или раствором хлорида натрия (для грунтов с нефтесолевым загрязнением) и тщательное перемешивание до достижения однородной консистенции. На втором этапе добавлялась нефть в необходимом количестве. В итоге приготовлено 9 вариаций грунта с различными значениями степени засоленности и нефтяного загрязнения.

Исследования температурной зависимости влажности за счет незамерзшей воды проводились комбинацией контактного (ГОСТ 59537-2021) и криоскопического методов (Методы геокриологических..., 2004), которые отличаются простотой технического осуществления и возможностью проведения серийных исследований [36], а также методом ядерно-магнитного резонанса [25].

Для всех исследований образцы изготавливались из грунтовой пасты с заданными значениями влажности, степени засоленности и нефтяного загрязнения. Грунтовая паста закладывалась методом послойного уплотнения: при исследованиях криоскопическим методом (рис. 1) - в стальные стаканы диаметром 6 см и высотой 5 см с установкой в центр образца температурного датчика сопротивления установки «KrioLab Tbf-16», при исследованиях методом ЯМР (рис.2) - в фторопластовые стаканчики внутренним диаметром 2,5 см и высотой 6 см, при исследованиях контактным методом (рис.3) - в резиновые трафареты шириной 3 см, длиной 4 см и толщиной 0,5 см. После подготовки образцы для криоскопического и ЯМР анализа промораживались в морозильной камере при температуре ниже -25°C . При такой температуре происходит формирование массивной криотекстуры в образце [37], а также вымерзает большая часть поровой влаги [31], что исключает наложение эффекта переохлаждения влаги в измерениях при последующем нагревании образца. Образцы для исследований контактным методом высушивались при комнатной температуре в течение 3 суток, затем переносились в морозильную камеру и охлаждались при температуре ниже -25°C .

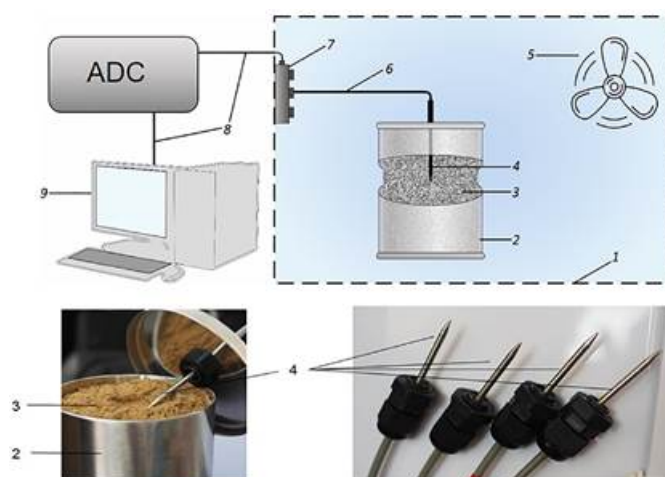


Рис. 1. Схема испытаний криоскопическим методом с применением установки «KrioLab Tbf-16»: 1 – воздушный термостат, 2 – форма для образца, 3 – грунт, 4 – датчик температуры, 5 – вентилятор, 6 – кабель для подключения датчиков, 7 – АЦП, 8 – USB-кабель, 9 – компьютер с установленным ПО (Chuvilin et al., 2022)

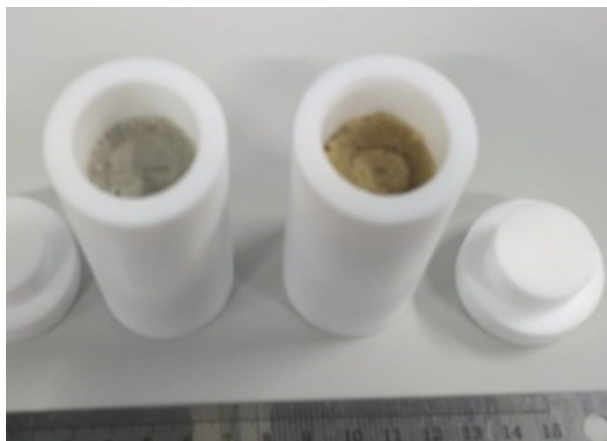


Рис. 2. Образцы мерзлого грунта в фторопластовых стаканчиках для исследований методом ЯМР

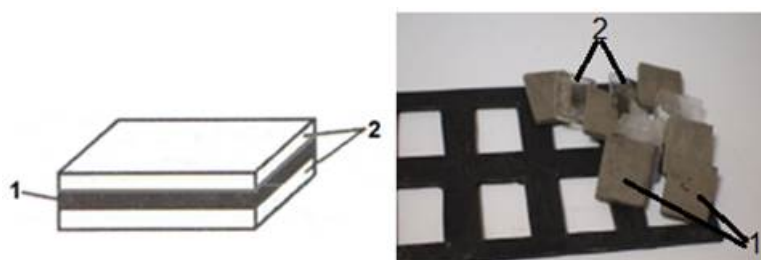


Рис. 3. Образцы для исследований контактным методом: 1 – пластины грунта, 2 – пластины льда

При исследованиях криоскопическим методом предварительно замороженные образцы с установленными датчиками переносились в установку «KrioLab Tbf-16» при комнатной температуре, датчики подключались к компьютеру, на котором с помощью специального ПО проводилась запись температуры в образце в цикле оттаивания для получения термограммы оттаивания, по которой проводилось определение температуры оттаивания образца заданной влажности (рис.4). Влажность исследуемого образца грунта определялась весовым методом после испытания. Испытания проводились на двух параллельных образцах. С уменьшением влажности убывает величина суммарного теплового эффекта, что приводит к снижению точности определения величины температуры оттаивания. Для незасоленных пород температурной границей применимости данной методики является значение температуры $-1...-3^{\circ}\text{C}$. Для засоленных пород эта граница сдвигается в область более низких температур. При исследовании засоленных грунтов температурный интервал, где происходит вымерзание (оттаивание) порового раствора, увеличивается с ростом концентрации порового раствора, термограмма выполаживается, что вызывает увеличение погрешности при ее графической обработке [34] и делает невозможным использование только одного криоскопического метода для исследования влажности за счет незамерзшей воды в широком температурном диапазоне.

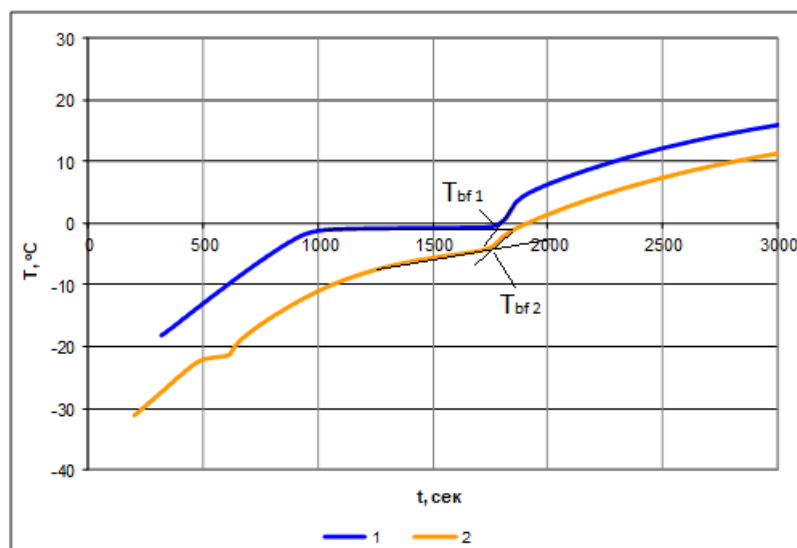


Рис. 4. Термограммы оттаивания мерзлых образцов грунта: 1 – незасоленного, 2 – засоленного [34]

При исследованиях контактным методом, основанным на принципе динамического равновесия между льдом, незамерзшей водой и паром (принцип Н.А. Цытовича), предварительно охлажденные пластины грунта и льда собирались вместе таким образом, чтобы образовалась слоистая кассета, где каждая сухая пластина контактировала с двумя пластинами льда. Затем собранные кассеты в термоконтейнерах переносились в морозильные камеры, в которых заранее была установлена температура, равная температуре испытания. В изотермических условиях не происходит влагообмен между льдонасыщенной породой и породой, суммарное влагосодержание которой равно или больше влажности, соответствующей количеству незамерзшей воды. Однако при контакте мерзлой льдонасыщенной породы с породой в воздушно-сухом состоянии, влагосодержание в которой меньше количества незамерзающей воды при данной температуре, происходит влагообмен и насыщение сухой породы влагой за счет переноса воды в твердой и жидкой фазах. Через некоторое время наступает термодинамическое равновесие трех фаз влаги и прекращение насыщения водой первоначально сухой породы. При этом суммарное влагосодержание первоначально "сухой" породы отвечает равновесному количеству незамерзшей воды при данной температуре. Время экспозиции образцов при проведении исследования составило не менее 10 дней, что является достаточным для наступления термодинамического равновесия, в т.ч. в засоленных грунтах [31]. Точность поддержания температуры при испытании составила $\pm 0,2$ °C за счет использования термоконтейнеров в морозильной камере, которые минимизировали амплитуду колебаний температуры. После завершения времени экспозиции грунтовые пластины отделялись от ледяных, взвешивались и высушивались в сушильном шкафу при температуре 105 °C для определения их влажности.

При исследованиях методом ЯМР (рис.5) использовался низкочастотный ЯМР-релаксометр Geospec 2-53 (Oxford Instruments, Великобритания). Принцип работы ЯМР-релаксометра основан на взаимодействии атомных ядер водорода и внешних магнитных полей. Для этого исследуемый образец помещается в постоянное магнитное поле и подвергается воздействию последовательности радиочастотных импульсов, чередующихся измерением сигнала. Затем, путем математической обработки спада намагниченности и времен поперечной релаксации (T_2 , мс) рассчитывался общий объем жидкой фазы воды (см³) в исследуемом образце. Кривые T_2 релаксации измерялись

методом Карра-Парселла-Мейбум-Гилла (КПМГ) [38]. При измерениях в однородном поле межэховое расстояние (раздвижка) TE ($TE=2\tau$) устанавливалось равным 0,10 мс. Число повторений (накоплений) импульсной последовательности (90° - τ - 180° - 2τ - 180° -...- 180°) было равным 32. Одной из важных особенностей данной модели ЯМР-релаксометра, работающего на частоте 2,28 МГц с магнитным полем 0,05 Тл, является наличие дополнительного набора градиентных катушек, расположенных вдоль каждой стороны магнита, что позволяет определять не только общий объем жидкой фазы в исследуемом образце, но и получить одномерный профиль (1D) её распределения по высоте образца. В экспериментах для обеспечения наилучшей точности измерения жидкой фазы в исследуемых грунтовых средах проводилась серия калибровочных измерений на эталонном образце (стеклянный контейнер объемом 5 мл с 10% раствором NaCl), где объем жидкой компоненты измерен с высокой точностью.

После предварительного промораживания грунта при температуре -25°C в морозильной камере устанавливалась температура, при которой планировалось провести определение влажности за счет незамерзшей воды. Образцы выдерживались при этой температуре не менее 4 ч. Затем в термokonтейнере с аккумулятором холода стаканчик с грунтом (рис. 3.3.7) переносился в установку ЯМР для проведения испытания. Установка размещалась в помещении с комнатной температурой. Однако, тестовые испытания показали, что температура грунта в стаканчике за счет толстой стенки из фторопласта не успевает повыситься за время испытания, которое составляет не более 2 минут. Фторопласт выполнял функцию теплоизоляции и предотвращал нагрев грунта в процессе испытания, а также не являлся помехой для прохождения сигнала. Время самого испытания в установке составляло не более 120 секунд в соответствии с разработанной методикой [39]. Все испытания по определению содержания незамерзшей воды для одной разновидности грунта проводились на одном образце.

После испытания стаканчик с грунтом помещался в морозильную камеру и выстаивался при другой более высокой отрицательной температуре. Затем испытание повторялось. Таким образом проводились испытания в спектре отрицательных температур. После окончания цикла испытаний при отрицательных температурах проводились дополнительные калибровочные испытания, которые заключались в измерении ЯМР сигнала от талого грунта, высушенного грунта (при $+105^\circ\text{C}$ в течение 8 часов) и пустого фторопластового стаканчика. Такой подход, с одной стороны, позволил учесть «шум» фторопластового стаканчика и минеральной компоненты грунта, а с другой - скорректировать показания прибора ЯМР с учетом реального влагосодержания конкретного образца и сформировавшихся категорий воды в нем. Кроме того, только при получении сигнала для стаканчика с высушенным грунтом с нефтью возможно разделить при обработке данных объем нефти и воды (или раствора), содержащихся в грунте.

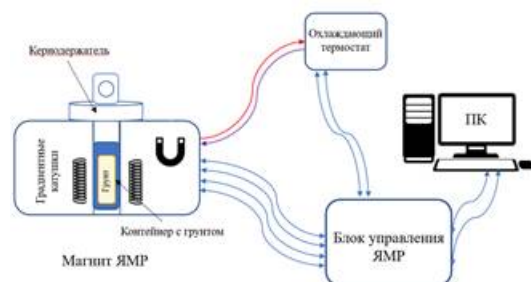


Рис. 5. Схема установки ЯМР и фото прибора Geospec 2-53 для исследований методом ЯМР [40]

Результаты и их обсуждение

На рисунке 6 приведены результаты для «чистого», засоленного грунта, а также грунтов с нефтяным и нефтесолевым загрязнением, полученные стандартными методами: криоскопическим и контактным.

При исследовании фазового состава криоскопическим методом было получено почти полное совпадение результатов для незагрязненного и загрязненного грунта. Результаты, полученные контактным методом, существенно различаются для незагрязненного и загрязненного грунта: получено снижение влажности за счет незамерзшей воды при добавлении нефти как в незасоленный, так и в засоленный грунт. Однако, ранее Журавлевым И.И., Мотенко Р.Г., Кравцовой О.Н., Тимофеевым А.В., Малышевым А.В. и др. были получены данные, свидетельствующие о том, что нефтяное загрязнение не влияет на количество незамерзшей воды в мерзлых незасоленных грунтах. Более того, в работе [\[24\]](#) рассмотрено влияние порядка внесения влаги и загрязнителя в грунт на количество незамерзшей воды, определяемое калориметрическим методом; выявлено, что если сначала вносится нефть, а потом грунт увлажняется, то количество незамерзшей воды в грунте значительно меньше.

При исследованиях контактным методом паста для исследования готовится из сухого грунта, в который сначала вносится вода или раствор, и только после тщательного перемешивания в пасту добавляется нефть. В таком случае нефть располагается каплями в порах грунта либо обволакивает пленками частицы, но при этом не вступает во взаимодействие с самими частицами, так как их активные центры заняты молекулами воды или ионами растворенных солей. Далее из пасты готовятся пластины, которые высушиваются при комнатной температуре, как того требует методика. Таким образом вода из пластин испаряется, а освободившиеся активные центры поверхностей частиц занимают молекулы нефти. И в соприкосновение со льдом попадает именно такая пластина. Далее в ходе установления динамического равновесия при отрицательной температуре молекулы воды из пластин льда под влиянием энергии свободных активных центров поверхностей частиц перемещаются в пластины грунта. Но так как в загрязненном грунте свободных активных центров остается меньше, чем в незагрязненном, в конечном итоге содержание незамерзшей воды получилось меньше, поскольку во время самого опыта происходило перемещение молекул воды в обезвоженный загрязненный грунт. На термограммах оттаивания для глины с засоленностью 2% отмечено наличие второго фазового перехода при температуре $-21,2^{\circ}\text{C}$ и концентрации соли в незамерзшей воде не менее 0,23 д.е. , что связано с формированием криогидрата хлорида натрия [\[34, 41\]](#). Второй фазовый переход получен на термограммах как засоленного грунта, так и грунта с нефтесолевым загрязнением. На кривой незамерзшей воды формирование криогидрата выражается в нарушении монотонности убывания незамерзшей воды при понижении температуры. Однако, при исследовании контактным методом такое нарушение монотонности получено только для грунта без нефтяного загрязнения, что противоречит результатам, полученным криоскопическим методом.

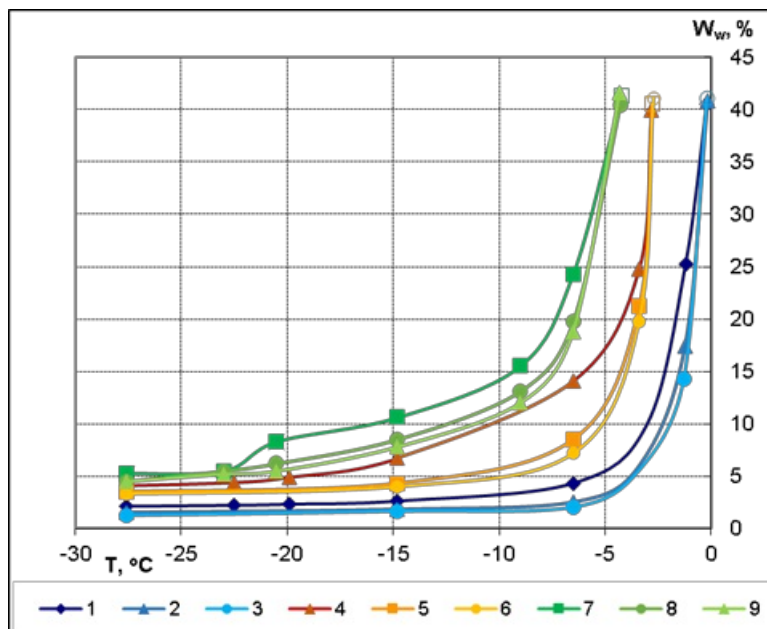


Рис. 6. Зависимость содержания незамерзшей воды (W_w) от температуры (T): • – значения, полученные контактным и криоскопическим методами, ○ – значения, полученные криоскопическим методом: 1 – $D_{sal}=0\%$, $z=0\%$; 2 – $D_{sal}=0\%$, $z=2,5\%$; 3 – $D_{sal}=0\%$, $z=10\%$; 4 – $D_{sal}=1,0\%$, $z=0\%$; 5 – $D_{sal}=1,0\%$, $z=2,5\%$; 6 – $D_{sal}=1,0\%$, $z=10\%$; 7 – $D_{sal}=2,0\%$, $z=0\%$; 8 – $D_{sal}=2,0\%$, $z=2,5\%$; 9 – $D_{sal}=2,0\%$, $z=10\%$

Для сравнения и оценки возможности применения контактного метода для загрязненных нефтью грунтов проведена серия экспериментов методом ЯМР на таких же образцах. Преимущество данного метода заключается в том, что в процессе пробоподготовки и самого испытания сохраняется исходная влажность грунта и корректное распределение влаги и нефти в поровом пространстве, поскольку не происходит ни сорбция влаги, ни десорбция. Кроме того, время между подготовкой грунтовой пасты и промораживанием, когда могут происходить процессы испарения и микробиологического окисления нефти, минимально и составляет не более 1 часа, также как и при исследованиях криоскопическим методом. Таким образом, образцы практически не претерпевают изменения состава перед проведением испытания.

На рисунке 7 приведены результаты исследований, полученные методом ЯМР. Разница в результатах, полученных для грунтов с нефтью и без нее, не превышает 8%. Тенденции к уменьшению влажности за счет незамерзшей воды при увеличении нефтяного загрязнения не наблюдается как для незасоленных, так и для засоленных грунтов. Получено нарушение монотонности убывания незамерзшей воды при понижении температуры как для засоленного грунта, так и для грунта с нефтесолевым загрязнением, что коррелирует с результатами криоскопического метода. Таким образом, можно сделать вывод о том, что нефтяное загрязнение не оказывает значимого влияния на содержание незамерзшей воды во всем температурном диапазоне, а влияние нефтесолевого загрязнения эквивалентно влиянию засоления на фазовый состав влаги в мерзлом грунте. Кроме того, проведенное исследование позволяет предположить, что стандартный десорбционный метод ГОСТ 59537-2021 не подходит для исследований грунтов с нефтью и нефтепродуктами, поскольку в процессе испытаний происходит изменение соотношения нефти и воды, а также частичное испарение нефти. Данное предположение требует дополнительных экспериментальных исследований.

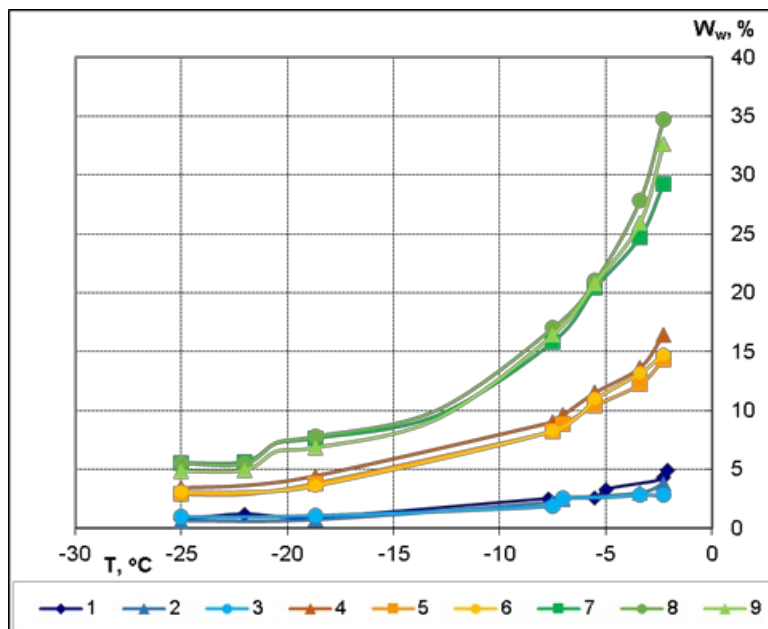


Рис. 7. Зависимость содержания незамерзшей воды (W_w) от температуры (T) по результатам исследований методом ЯМР: 1 – $D_{sal}=0\%$, $z=0\%$; 2 – $D_{sal}=0\%$, $z=2,5\%$; 3 – $D_{sal}=0\%$, $z=10\%$; 4 – $D_{sal}=1,0\%$, $z=0\%$; 5 – $D_{sal}=1,0\%$, $z=2,5\%$; 6 – $D_{sal}=2,0\%$, $z=10\%$; 7 – $D_{sal}=2,0\%$, $z=0\%$; 8 – $D_{sal}=2,0\%$, $z=2,5\%$; 9 – $D_{sal}=2,0\%$, $z=10\%$

Выводы

В рамках экспериментальных исследований рассмотрено влияние нефтесолевого загрязнения на фазовый состав влаги в мерзлых глинистых грунтах на примере каолинистой глины при температурах до $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$. В качестве основных методов исследования рассмотрены как стандартные подходы (контактный и криоскопический методы) по определению влажности за счет незамерзшей воды в мерзлых грунтах, которые активно применяются в рамках инженерных изысканий и рекомендуются действующими нормативными документами, так и уникальные технологии (ЯМР), которые применяются для прецизионных научных исследований. По результатам исследований сделаны следующие выводы:

1. Контактный метод определения влажности за счет незамерзшей воды не может быть применен для грунтов, содержащих в своем составе нефть и нефтепродукты, поскольку в процессе пробоподготовки происходит испарение части нефти и воды, что обуславливает новые физико-химические процессы, нехарактерные для состояния грунта, когда в нем находятся вода и лед.
2. При исследовании влажности за счет незамерзшей воды в грунтах, содержащих нефть и нефтепродукты, следует использовать методы, в процессе реализации которых соотношение нефти, льда и воды соответствует природному: криоскопический, ЯМР и другие методы.
3. Влияние нефтесолевого загрязнения на влажность за счет незамерзшей воды идентично влиянию засоления грунта во всем исследованном диапазоне температур.

Библиография

1. Солнцева, Н. П. Добыча нефти и геохимия природных ландшафтов / Н. П. Солнцева. – М.: Изд-во МГУ, 1998. – 376 с. – Текст: непосредственный.
2. Вечная мерзлота и освоение нефтегазоносных районов / под ред. У. С. Мельникова,

- С. Е. Гречищева. – М.: ГЕОС, 2002. – 402 с. – Текст: непосредственный.
3. Бузмаков, С. А., Кулакова, С. А. Оценка состояния почвенного покрова на территории нефтяных месторождений // Экология и природопользование. – 2010. – № 4. – С. 75-79. – Текст: непосредственный.
4. Иванова, Н. В., Ривкин, Ф. М., Власова, Ю. В. Строение и закономерности формирования криогенной толщи на побережье Печорского моря // Криосфера Земли. – 2020. – Т. XII, № 2. – С. 19-24. – Текст: непосредственный.
5. Гаретова, Л. А., Харитонов, Г. В., Имранова, Е. Л. Влияние углеводородного загрязнения на экологическое состояние песчаных почв территории месторождения Дзунбаян (Восточная Монголия) // Геоэкология. – 2023. – № 4. – С. 74-85. DOI: 10.31857/S0869780923030037 EDN: WMITLW.
6. Безродный, Ю. Г., Ботвинкин, В. Н. Результаты натурных исследований загрязнения почвогрунтов на рабочих площадках добывающих скважин ООО "Лукойл-Нижевожскнефть" // Нефтяное хозяйство. – 2006. – № 11. – С. 120-123. – Текст: непосредственный. EDN: JWWGTV.
7. Батоян, В. В. Принципы районирования территории СССР по устойчивости поверхностных вод к загрязнению при нефтедобыче // Ландшафтно-геохимическое районирование и охрана среды. – М.: Изд-во Мысль, 1983. – С. 118-130.
8. Панов, Г. Е., Петрашин, Л. Ф., Лысяный, Г. Н. Охрана окружающей среды на предприятиях нефтяной и газовой промышленности. – М.: Недра, 1986. – 244 с. – Текст: непосредственный.
9. Васильев, С. В. Воздействие нефтедобывающей промышленности на лесные и болотные экосистемы / С. В. Васильев. – Новосибирск: Наука. Сиб. Отд-ние, 1998. – 136 с. – Текст: непосредственный.
10. Казанцева, М. Н. Влияние нефтедобычи на живой и почвенный покров таежных лесов Западной Сибири // Сибирский экологический журнал. – 2011. – Т. 18, № 6. – С. 789-796. – Текст: непосредственный. EDN: OKKYGZ.
11. Белозерцева, И. А. Изменение почв в мерзлотно-таежных условиях в районе освоения газоконденсатного месторождения // Геоэкология. – 2012. – № 3. – С. 221-228. – Текст: непосредственный. EDN: NNFQVS.
12. Шепелев, А. И., Мазитов, Р. Г. Влияние нефтесолевых загрязнений на свойства почв поймы средней Оби // Геосибирь. – 2006. – Т. 3, № 1. – С. 144-149. – Текст: непосредственный. EDN: PIEJPN.
13. Шишконокова, Е. А., Трофимов, С. Я., Аветов, Н. А. Восстановление верховых болот Ханты-Мансийского Приобья после рекультивации нефте-и солезагрязненных торфяных почв в 2003–2005 гг. // Вестник Московского Университета. Серия 17: Почвоведение. – 2020. – № 3. – С. 28-38. – Текст: непосредственный.
14. Носова, М. В., Середина, В. П. Экологическое состояние почв пойменных экосистем при нефтесолевом загрязнении // Актуальные вопросы устойчивого природопользования: научно-методическое обеспечение и практическое решение. Материалы международной научно-практической конференции, посвященной 60-летию НИЛ экологии ландшафтов факультета географии и геоинформатики БГУ / Редколлегия: Д. С. Воробьев (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2022. – С. 421-422. – Текст: непосредственный. EDN: RUXCJM.
15. Ананьева, Г. В., Дроздов, Д. С., Инстанес, А., Чувилин, Е. М. Нефтяное загрязнение слоя сезонного оттаивания и верхних горизонтов многолетнемерзлых пород на опытной площадке "мыс Болванский" в устье р. Печора // Криосфера Земли. – 2003. – № 1. – С. 49-59. – Текст: непосредственный.
16. Чувилин, Е. М., Микляева, Е. С. Полевой эксперимент по оценке нефтяного загрязнения верхних горизонтов многолетнемерзлых пород // Криосфера Земли. – 2005.

- Т. IX, № 2. – С. 60-66. – Текст: непосредственный.
17. СП 25.13330.2020. Основания и фундаменты на вечномёрзлых грунтах.
18. Collins, C. M., Racine, C. H., Walsh, M. E. Fate and Effects of Crude Oil Spilled on Subarctic Permafrost Terrain in Interior Alaska: Fifteen years later. – Cold Regions Research and Engineering Laboratory Hanover, NH. CRREL Report 93-13. – 1993.
19. Ершов, Э. Д., Нефедьева, Ю. А., Мотенко, Р. Г., Пармузин, С. Ю. Прогноз изменения глубины сезонного оттаивания и промерзания грунтов под влиянием нефтяного загрязнения // Вестник МГУ. Сер. 4. Геология. – 2008. – № 6. – С. 47-50. – Текст: непосредственный.
20. СП 11-105-97. Часть IV. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Правила производства работ в районах распространения многолетнемерзлых грунтов.
21. ГОСТ Р 59537-2021. Грунты. Метод лабораторного определения влажности за счет незамерзшей воды.
22. Методы геоэкологических исследований / под ред. Э. Д. Ершова. – М.: Изд-во МГУ, 2004. – 507 с. – Текст: непосредственный.
23. ГОСТ Р 71043-2023. Грунты. Метод лабораторного определения температуры начала замерзания и конца оттаивания.
24. Кравцова, О. Н., Малышев, А. В., Старостин, Е. Г. Влияние загрязнения нефтепродуктами на фазовый состав воды в грунтах // Материалы 3-й конференции геоэкологов России. – М.: Изд-во МГУ, 2005. – С. 66-71. – Текст: непосредственный.
25. Bukhanov, B. B., Chuvilin, E. M., Mukhametdinova, A. Z. Freezing point and unfrozen water contents of permafrost soils: estimation by the water potential method // Cold Regions Science and Technology. – 2022. – Vol. 196. – P. 103488. DOI: 10.1016/j.coldregions.2022.103488. EDN: BWNVNI.
26. Вознесенский, Е. А. Модельные грунты, модельные образцы и моделирование при испытаниях грунтов / Е. А. Вознесенский // Полевые и лабораторные методы исследования грунтов – проблемы и решения. – Москва, 2025. – Текст: непосредственный.
27. ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация.
28. Сорочин, А. В. Экологические последствия различных этапов освоения нефтегазовых месторождений в таежной зоне Западной Сибири // Антропогенная трансформация природной среды. – 2014. – № 1. – С. 30-34. – Текст: непосредственный. EDN: ULNZZZ.
29. Шепелев, А. И., Шепелева, Л. Ф. Геохимическая трансформация состава и свойств почв тайги Западной Сибири под влиянием нефтесолевых загрязняющих веществ // Мир науки, культуры, образования. – 2014. – Т. 49, № 6. – С. 552-554. – Текст: непосредственный. EDN: TJLOMT.
30. Григорьева, В. Г. О понижении температуры замерзания воды в дисперсных грунтах // Материалы по лабораторным исследованиям мерзлых грунтов. – М., 1957. – Вып. 3. – С. 177-194. – Текст: непосредственный.
31. Фазовый состав влаги в мерзлых породах / Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова; под ред. Э. Д. Ершова. – Москва: Изд-во Московского ун-та, 1979. – 190 с. – Текст: непосредственный.
32. Теплофизические свойства горных пород / под ред. Э. Д. Ершова. – М.: Изд-во МГУ, 1984. – 204 с. – Текст: непосредственный.
33. Лосева, С. Г., Харина, М. Г., Кулешова, В. Ю. Влияние засоления на водно-физические и теплофизические свойства грунтов. Засоленные мерзлые грунты как основания сооружений // Текст: непосредственный. – М.: Наука, 1990. – С. 24-33.
34. Мотенко, Р. Г. Теплофизические свойства и фазовый состав влаги мерзлых засоленных дисперсных пород: автореф. дисс. на соискание степени канд. геол.-

- минерал. наук / Р. Г. Мотенко. – Москва, 1997. – 22 с. – Текст: непосредственный. EDN: ZJZJSX.
35. Аксенов, В. И., Геворкян, С. Г. Засоленные и льдистые мерзлые грунты Арктического побережья как основание сооружений // М.: ООО "МАФ", 2023. – 280 с. – Текст: непосредственный.
36. Алексеев, А. Г., Гречищева, Э. С., Вшивцева, Т. В. Современные методы лабораторных исследований свойств мерзлых грунтов // Фундаменты. – 2021. – № 4. – С. 16-18. – Текст: непосредственный. EDN: WIYMDE.
37. Общая геокриология / под ред. Э. Д. Ершова. – М.: Изд-во МГУ, 2002. – 682 с. – Текст: непосредственный.
38. Straley, C. et al. Core Analysis by Low-Field NMR. – Log Anal. – 1997. – 38.
39. Bukhanov, B., Chuvilin, E., Mukhametdinova, A. Estimation of residual pore water content in hydrate-bearing sediments at temperatures below and above 0 °C by NMR // Energy & Fuels. – 2022. – Vol. 36, № 24. – P. 14789-14801. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.2c03089. EDN: IRTJSC.
40. Чувилин, Е. М., Соколова, Н. С., Буханов, Б. А. Применение водно-потенциометрического метода для определения содержания незамерзшей воды в мерзлых грунтах различного состава // Криосфера Земли. – 2020. – Т. XXIV, № 5. – С. 16-28. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2020-5(16-28). EDN: ZHKCXC.
41. Ершов, Э. Д., Мотенко, Р. Г., Комаров, И. А. Экспериментальное исследование теплофизических свойств и фазового состава влаги засоленных мерзлых грунтов // Геоэкология. – 1999. – № 3. – С. 232-242. – Текст: непосредственный.

Результаты процедуры рецензирования статьи

В связи с политикой двойного слепого рецензирования личность рецензента не раскрывается.

Со списком рецензентов издательства можно ознакомиться [здесь](#).

Предмет исследования являются, по мнению автора, Особенности исследования фазового состава влаги мерзлых грунтов при нефтесолевым загрязнении

Методология исследования, исходя из анализа статьи можно сделать вывод о том, что автором статьи использовался метод анализ литературных данных, Для искусственного загрязнения выбрана смесь нефтей из нескольких месторождений севера Западной Сибири, поступающая по трубопроводу на Московский нефтеперерабатывающий завод. исследовались фракционный, групповой и углеводородный составы нефти, Исследования температурной зависимости влажности за счет незамерзшей воды проводились комбинацией контактного (ГОСТ 59537-2021) и криоскопического методов (Методы геокриологических..., 2004). Для всех исследований образцы изготавливались из грунтовой пасты с заданными значениями влажности, степени засоленности и нефтяного загрязнения. Грунтовая паста закладывалась методом послойного уплотнения. При исследованиях криоскопическим методом предварительно замороженные образцы с установленными датчиками переносились в установку «KrioLab Tbf-16» при комнатной температуре, датчики подключались к компьютеру, на котором с помощью специального ПО проводилась запись температуры в образце. При исследованиях методом ЯМР (рис.5) использовался низкочастотный ЯМР-релаксометр Geospec 2-53 (Oxford Instruments, Великобритания). Принцип работы Для сравнения и оценки возможности применения контактного метода для загрязненных нефтью грунтов проведена серия экспериментов методом ЯМР на таких же образцах. ЯМР-релаксометра основан на взаимодействии атомных ядер водорода и внешних магнитных полей.

Актуальность затронутой темы безусловна и обусловлена тем, что развитие

нефтедобывающей промышленности приводит к существенному увеличению территорий, отводимых для освоения нефтяных месторождений. При этом одной из наиболее опасных проблем является загрязнение природной среды углеводородами и другими активными веществами, попадающими в следствие разливов нефти и нефтепродуктов при их добыче, хранении, транспортировке и переработке. Нефть, попадая в почвы и грунты, приносит с собой разнообразный набор химических соединений, нарушающих сложившийся геохимический баланс в экосистемах. В этой связи исследования данного региона является весьма актуальным.

Научная новизна заключается в попытке автора в рассмотрено влияние нефтесолевого загрязнения на фазовый состав влаги в мерзлых глинистых грунтах на примере каолинистой глины при температурах до -25 оС. В качестве основных методов исследования рассмотрены как стандартные подходы (контактный и криоскопический методы) по определению влажности за счет незамерзшей воды в мерзлых грунтах, которые активно применяются в рамках инженерных изысканий и рекомендуются действующими нормативными документами, так и уникальные технологии (ЯМР), которые применяются для прецизионных научных исследований.

Библиография обширна для постановки рассматриваемого вопроса, однако не содержит ссылки на нормативно-правовые акты.

Апелляция к оппонентам представлена в выявлении проблемы на уровне имеющейся у автора статья информации, полученной в результате анализа литературных источников и собственных исследований.

Выводы, интерес читательской аудитории в выводах есть обобщения. Целевая группа потребителей информации в статье не указана.