

УДК 551.345+624.139

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-1-116-122

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЗАТОРФОВАННОСТИ НА ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ВОДЫ В МЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ РАЗЛИЧНОГО ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА

Римма Григорьевна Мотенко^{1✉}, Рената Ранасовна Давлетова²,
Эрика Станиславовна Гречишцева³, Андрей Григорьевич Алексеев⁴

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; rmotenko@mail.ru✉

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; davletova.rr@yandex.ru

³ НИИОСП им. Н.М. Герсеванова АО «НИЦ Строительство», Москва, Россия; cryoerika@mail.ru

⁴ НИИОСП им. Н.М. Герсеванова АО «НИЦ Строительство»; НИУ МГСУ, Москва, Россия;
adr-alekseev@yandex.ru

Аннотация. В статье рассматриваются результаты экспериментальных исследований содержания незамерзшей воды (W_w) в мерзлых грунтах различного гранулометрического состава со степенью заторфованности от 3 до 100% (с шагом 10%). Обсуждаются полученные закономерности $W_w = f(t^{\circ}\text{C})$. Оценивается роль содержания органического вещества в формировании фазового состава влаги в диапазоне температур от 0 до -18°C . Акцентируется внимание на рассмотрении закономерностей изменения влажности за счет незамерзшей воды при степени заторфованности выше 50%, при которой грунты по ГОСТ 25100-2020 относят к торфам. Приводятся закономерности изменения W_w от степени заторфованности при фиксированных температурах.

Ключевые слова: мерзлые грунты, незамерзшая вода, содержание органического вещества, заторфованность, торф

Для цитирования: Мотенко Р.Г., Давлетова Р.Р., Гречишцева Э.С., Алексеев А.Г. Экспериментальная оценка влияния заторфованности на фазовый состав воды в мерзлых грунтах различного гранулометрического состава // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2024. № 1. С. 116–122.

EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE EFFECT OF CONGESTION ON THE PHASE COMPOSITION OF WATER IN FROZEN SOILS OF VARIOUS GRANULOMETRIC COMPOSITION

Rimma G. Motenko^{1✉}, Renata R. Davletova², Erika S. Grechishcheva³,
Andrey G. Alekseev⁴

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; rmotenko@mail.ru✉

² Lomonosov Moscow State University; Moscow, Russia; davletova.rr@yandex.ru

³ NIIOSP named after N.M. Gersevanov JSC Research Center of Construction, Moscow, Russia; cryoerika@mail.ru

⁴ NIIOSP named after N.M. Gersevanov JSC Research Center of Construction; NRU MGSU, Moscow, Russia;
adr-alekseev@yandex.ru

Abstract: The article discusses the results of experimental studies of the content of unfrozen water (W_w) in frozen soils of various granulometric composition with a degree of congestion from 3 to 100% (in increments of 10%). The obtained regularities $W_w = f(t^{\circ}\text{C})$ are discussed. The role of the organic matter content in the formation of the phase composition of moisture in the temperature range from 0 to -18°C . is estimated. Attention is focused on the consideration of the regularities of humidity changes due to unfrozen water with a degree of congestion above 50%, when soils according to GOST 25100-2020 are referred to peat. The regularities of the change in W_w from the degree of congestion at fixed temperatures are given.

Keywords: frozen soils; unfrozen water; organic matter content; congestion

For citation: Motenko R.G., Davletova R.R., Grechishcheva E.S., Alekseev A.G. Experimental evaluation of the effect of congestion on the phase composition of water in frozen soils of various granulometric composition. *Moscow University Geol. Bull.* 2024; 1: 116–122. (In Russ.).

Введение. В настоящее время активно происходит хозяйственное освоение территорий, занятых многолетнемерзлыми и сезонномерзлыми породами, связанное со строительством и разработкой месторождений полезных ископаемых, поэтому вопрос об

изучения фазового состава влаги в мерзлых грунтах является актуальным.

На территории России расположено более 75% болот земного шара, половина их приурочена к районам с многолетнемерзлыми грунтами: забо-

Таблица 1

Классификация грунтов по относительному содержанию органического вещества [ГОСТ 25100-2020]

Разновидность грунтов	Относительное содержание органического вещества I_r , доли единицы	
	пески	глинистые грунты
С примесью органического вещества (с примесью растительных остатков)	$0,03 \leq I_r \leq 0,10$	$0,05 \leq I_r \leq 0,10$
Органоминеральные: – с низким содержанием органического вещества (слабозаторфованные) – со средним содержанием органического вещества (среднезаторфованные) – с высоким содержанием органического вещества (сильнозаторфованные)	$0,10 < I_r \leq 0,25$ $0,25 < I_r \leq 0,40$ $0,40 < I_r \leq 0,50$	
Органические (торф)	$I_r \geq 0,50$	

лоченность тундровой зоны составляет около 70%, лесной — 30%. Большая часть этой площади занята торфами мощностью более 0,5 м. Встречаются также минеральные грунты с содержанием растительных остатков и погребенные торфяники.

В строительной практике часто отказываются от использования торфяных грунтов в качестве оснований. Такой отказ не всегда целесообразен и возможен в условиях интенсивного освоения северных регионов [Роман, 1987].

Торф — своеобразная геологически молодая, не прошедшая стадии диагенеза горная порода, образующаяся в результате отмирания и разложения болотной растительности в условиях избыточного увлажнения и недостаточного доступа кислорода [Грунтоведение, 2005], а по ГОСТу 25100-2020: *торф (торфяной грунт)* — органический грунт болотного, озерного или аллювиально-болотного генезиса, содержащий в своем составе по массе 50% и более органического вещества, представленного преимущественно растительными остатками. Необходимо также дать определение *заторфованного грунта* — песчаный или глинистый грунт, содержащий в своем составе от 3% (для песка) и от 5% (для глинистого грунта) до 50% (по массе) торфа [ГОСТ 23740-2016].

Характеристикой содержания торфа в грунте служит *относительное содержание органического вещества (степень заторфованности (I_r))* — отношение массы органического вещества в образце абсолютно сухого грунта к массе грунта.

По относительному содержанию органического вещества (степени заторфованности) грунты по ГОСТ 25100-2020 подразделяют на несколько разновидностей (см. табл. 1).

Изучением фазового состава влаги мерзлых торфосодержащих грунтов занимались многие исследователи: Д.М. Алексютина, С.Л. Вотяков, Р.И. Гаврильев, П.Н. Давидовский, Г.П. Бровка, С.В. Елисеев, А.В. Конюхов, Р.Г. Мотенко, Л.Т. Роман, В.Г. Чеверев, Е.М. Чувилин и другие. Рассматривались природные грунты с естественной заторфованностью и модельные грунты, подготовленные с добавлением органического вещества [Алексютина, Мотенко, 2016; Гаврильев, 1970; Давлетова, Мотенко, 2022; Мотенко, Давлетова, 2022; Роман, 2002; Роман, 1987; Фазовый..., 1979 и др.]. Были выявлены некоторые закономерности, например, увеличение содержания незамерзшей воды с увеличением степени заторфованности, однако практически отсутствуют исследования грунтов с содержанием органического вещества в диапазоне от 0,5 до 1,0 и анализ зависимостей содержания незамерзшей воды от заторфованности при фиксированных температурах.

Объект исследования. Объектом исследования являются грунты разного гранулометрического состава — песок мелкий однородный; суглинок легкий, пылеватый; каолинитовая глина легкая, пылеватая и слаборазложившийся верховой торф (в дальнейшем мы будем называть его «чистый» торф). Исследованные грунты использовались в качестве модельных, их состав и характеристики представлены в табл. 2 и 3.

Для оценки влияния заторфованности на W_w были подготовлены образцы грунта следующим образом: к навеске сухого грунта добавляли слаборазложившийся отмытый дистиллированной водой торф. Его количество задавалось в зависимости от заданной степени заторфованности (I_r) от 0,0 до 0,9, с шагом 0,1.

Методика исследования. Среди применяющихся в настоящее время методов для определения влажности за счет незамерзшей воды [Исаев и др., 2021; Chuvilin, et al., 2022] была выбрана комбинация контактного метода [ГОСТ 59537-2021] и криоскопического метода в цикле оттаивания [Ершов и др., 1997; Мотенко, 1997; Методы..., 2004].

Криоскопический метод основан на выделении скрытой теплоты кристаллизации (или же поглощении теплоты плавления) и понижении температуры замерзания (плавления) воды в порах грунта. Использование криоскопического метода для исследования фазового состава влаги в грунте обосновано тем, что содержание незамерзшей воды в мерзлом грунте при температуре t_0 равно той влажности грунта, при которой температура его замерзания или оттаивания будет равна t_0 [Чистотинов, 1973; Методы..., 2004]. Необходимо отметить, что одним из основных источников погрешности определения температуры начала замерзания влажных грунтов является переохлаждение. Более точные результаты дает метод, построенный на снятии кривых нагревания, который получил название: метод «конца

Таблица 2

Гранулометрический состав исследованных грунтов

№	Содержание частиц, %										Наименование грунта по ГОСТ 25100-2020	Место отбора
	> 10 мм	10–5 мм	5–2 мм	2–1 мм	1–0,5 мм	0,5–0,25 мм	0,25–0,10 мм	0,10–0,05 мм	0,05–0,01 мм	0,01–0,002 мм		
1					7,1	78,0	13,0	0,0	1,9	0,0	Песок мелкий однородный	Московская область, Люберецкий район
2				4,4	7,3	16,0	10,5	31,8	17,4	12,6	Суглинок пылеватый, легкий	г. Дудинка
3					0,4	1,1	32,0	38,2	28,3		Глина пылеватая, легкая	Челябинская область (поселок Каолиновый)

Таблица 3

Характеристики исследованных грунтов

№	Гигроскопическая влажность, %	Плотность частиц грунта, г/см ³	Влажность на границе текучести, %	Влажность на границе раскатывания, %	Число пластичности	Относительное содержание органического вещества, %
1	0,1	2,67				0,0
2	1,9	2,61	28,2	17,4	10,8	0,2
3	0,0	2,58	53,3	34,5	18,8	0,0

плавления» [Сергеев, Батюк, 1978]. В эксперименте определяется температура окончания оттаивания.

Приготавлялась грунтовая паста из заторфованных грунтов и воды в необходимом соотношении, которая закладывалась и уплотнялась в цилиндрические формы диаметром 3–4 см и высотой 4–6 см. В геометрический центр образца устанавливалась хромель-копелевая термопара. Образцы выдерживались в течение суток для равномерного распределения влажности, а затем промораживались при температуре -10°C . Исследования проводились в цикле оттаивания, в воздушной среде при комнатной температуре. После эксперимента образцы разделялись на две части и устанавливалась их влажность весовым методом путем высушивания их в сушильном шкафу при температуре 105°C .

В опытах применялась модифицированная методика определения температуры начала замерзания (оттаивания) с применением прецизионных измерителей температур ПИТ-1 и ПИТ-2. Для записи изменения температуры образца во времени использовались хромель-копелевые термопары, свободные концы которых термостатировались при 0°C (рис. 1). Полученные значения регистрировались и обрабатывались с помощью программного обеспечения для этих приборов (COM Thermo Reliase 20.9.21.0) [Мотенко, Давлетова, 2022; Давлетова, Мотенко, 2022].

Контактный метод основан на принципе динамического равновесия между льдом, незамерзшей водой и газом (принцип Н.А. Цытовича) [Мето-

ды..., 2004]. Для глинистых грунтов из влажной грунтовой пасты подготовлены пластиинки, которые высушивались при комнатной температуре до воздушно-сухого состояния. Параллельно с этим были подготовлены пластиинки льда. При температуре ниже температуры опытов собирались слоистые кассеты, которые включали два грунтовых образца-близнеца и три ледяные пластины. Собранные кассеты герметизировались и помещались в морозильные камеры с предварительно установленными

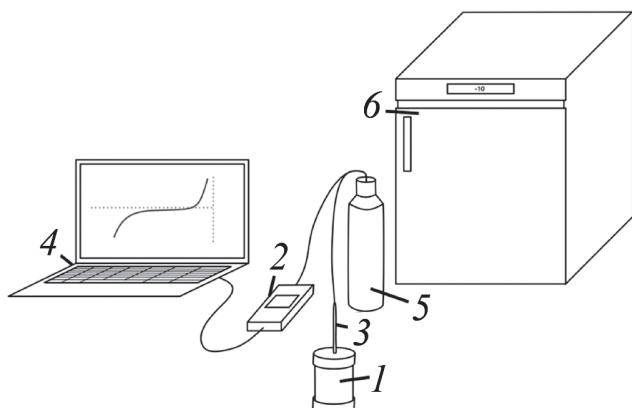


Рис. 1. Схема экспериментальной установки по определению температуры начала замерзания (оттаивания) грунтов: 1 — образец, 2 — прецизионный измеритель температур ПИТ-1, 3 — хромель — копелевая термопара, 4 — компьютер с программным обеспечением, 5 — сосуд Дьюара (термос), 6 — холодильник

температурами в диапазоне от -1 до -30 $^{\circ}\text{C}$ (в проведенном исследовании значения температур опытов составили: -1 ; $-1,6$; $-4,6$; -18 $^{\circ}\text{C}$). Через 7–10 дней (после наступления равновесия) пластиинки вынимались и весовым методом определялась влажность, равная значению W_w при температуре опыта. Для песчаных грунтов использовалась другая методика [Давлетова, Мотенко, 2022]. Образцы сухого песка закладывались в металлический бюкс между двумя ледяными пластиинками. Готовились по два идентичных образца, и они также помещались в морозильные камеры при заданных значениях температуры.

Результаты исследования и их обсуждение. Экспериментальные исследования незамерзшей воды в мерзлых грунтах разного гранулометрического состава проводились при содержании в них органического вещества (I_r) от 0 до 100%. Получены классические зависимости влажности за счет незамерзшей воды от температуры для песчаных (рис. 2, *a*) и глинистых грунтов (суглинка и каолинитовой глины) (рис. 2, *б*, *в*). Самые высокие значения W_w получены для «чистого» торфа при $I_r = 100\%$ (кривая № 12)

Для песчаных грунтов выявлено явное отличие в характере изменения содержания незамерзшей воды для грунтов со степенью заторфованности от 0 до 50% («заторфованные грунты») и для грунтов с I_r от 50 до 100%, которые в соответствии с ГОСТ 25100-2020 классифицируются как «торф». Для заторфованных песков ($I_r < 50\%$) изменение содержания незамерзшей воды происходит в области интенсивных фазовых переходов и переходной области, а в области вымерзания прочносвязанной воды изменения не происходят. Причем граница вымерзания прочносвязанной воды смещается от -1 до -3 $^{\circ}\text{C}$ с увеличением степени заторфованности от 3 до 40%. Для торфов ($I_r > 50\%$) изменение количества незамерзшей воды происходит во всем исследованном диапазоне температур, причем с понижением температуры от -2 до -18 $^{\circ}\text{C}$ уменьшение W_w составляет $\sim 20\%$.

Для глинистых грунтов изменение содержания незамерзшей воды происходит во всем исследованном диапазоне температур и заторфованности. Причем изменения в этих диапазонах менее выражены, чем у песка. Можно отметить, что граница вымерзания прочносвязанной воды для суглинка и каолинитовой глины располагается при температурах $-4\dots-5$ $^{\circ}\text{C}$, причем в этой области с понижением температуры ниже -4 $^{\circ}\text{C}$ изменение содержания W_w составляет приблизительно 30%.

На графиках четко видно, что содержание незамерзшей воды у всех грунтов с $I_r = 50\dots100\%$, которые относятся к торфу (табл. 1), не одинаково и увеличивается с ростом заторфованности. Так, например при температуре $-4,6$ $^{\circ}\text{C}$ при $I_r = 50\%$ для песка содержание незамерзшей воды составляет 12%, для суглинка — 13,5%, и для каолинитовой

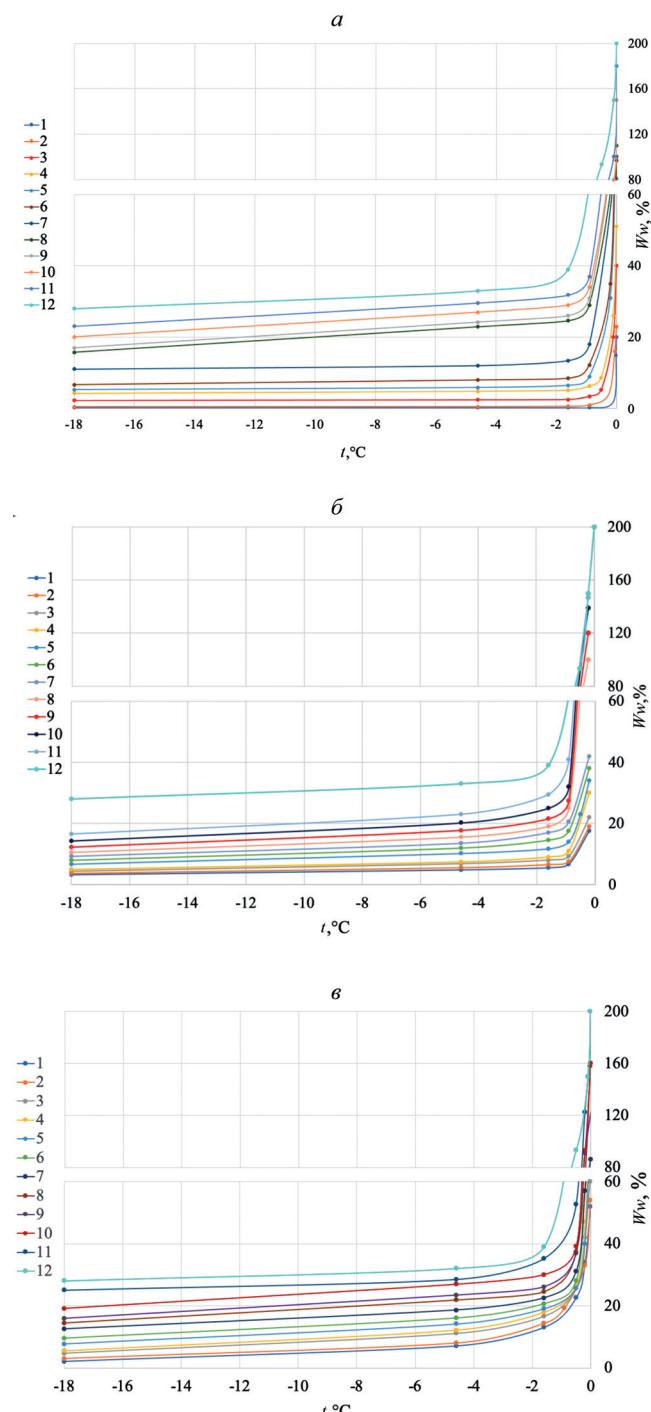


Рис. 2. Зависимости содержания незамерзшей (W_w) воды от температуры (t) для песка (*а*), суглинка (*б*) и каолинитовой глины (*в*) с относительным содержанием органического вещества (I_r , д.ед.): 1 — 0; 2 — 0,03 (для песка) и 0,05 (для глинистых грунтов); 3 — 0,1; 4 — 0,2; 5 — 0,3; 6 — 0,4; 7 — 0,5; 8 — 0,6; 9 — 0,7; 10 — 0,8; 11 — 0,9; 12 — 1,0

глины 18%. Для «чистого» торфа — 33%. Значения различаются в 2–3 раза и для песчаных грунтов они выше.

При рассмотрении суглинистых грунтов выявлено, что зависимость $W_w = f(t^{\circ}\text{C})$ для «чистого» торфа располагается существенно выше, чем кривые для грунтов при I_r от 10 до 90%. Для каолинитовой

глины (рис. 2, в) различие между зависимостями менее выражено, и к «чистому» торфу приближаются данные для торфа с $I_r = 90\%$ (кривые 12 и 11, соответственно). Для песка (рис. 2, а), как отмечалось выше, сформировались две группы зависимостей: при I_r от 0 до 50% (заторфованные грунты) и от 50 до 100% (торф).

Полученные закономерности были проанализированы для заторфованных грунтов при изменении I_r от 0 до 0,5. Рассмотрим полученные данные при фиксированных температурах эксперимента ($-0,9; -1,6; -4,6; -10$ и -18°C) (рис. 3). В результате анализа полученных зависимостей выявлено, что при увеличении степени заторфованности от 0 до 50 количество незамерзшей воды для всех заторфованных грунтов пропорционально увеличивается. При всех температурах содержание незамерзшей воды у незаторфованных грунтов ($I_r = 0$) увеличивается в ряду песок — суглинок — каолинитовая глина, что связано с особенностями формирования фазового состава влаги в грунтах различного гранулометрического состава.

Закономерности изменения содержания незамерзшей воды от степени заторфованности в диапазоне I_r от 0 до 0,5 были аппроксимированы линейной функцией (рис. 3). Величина достоверности аппроксимации при всех температурах близка к 1.

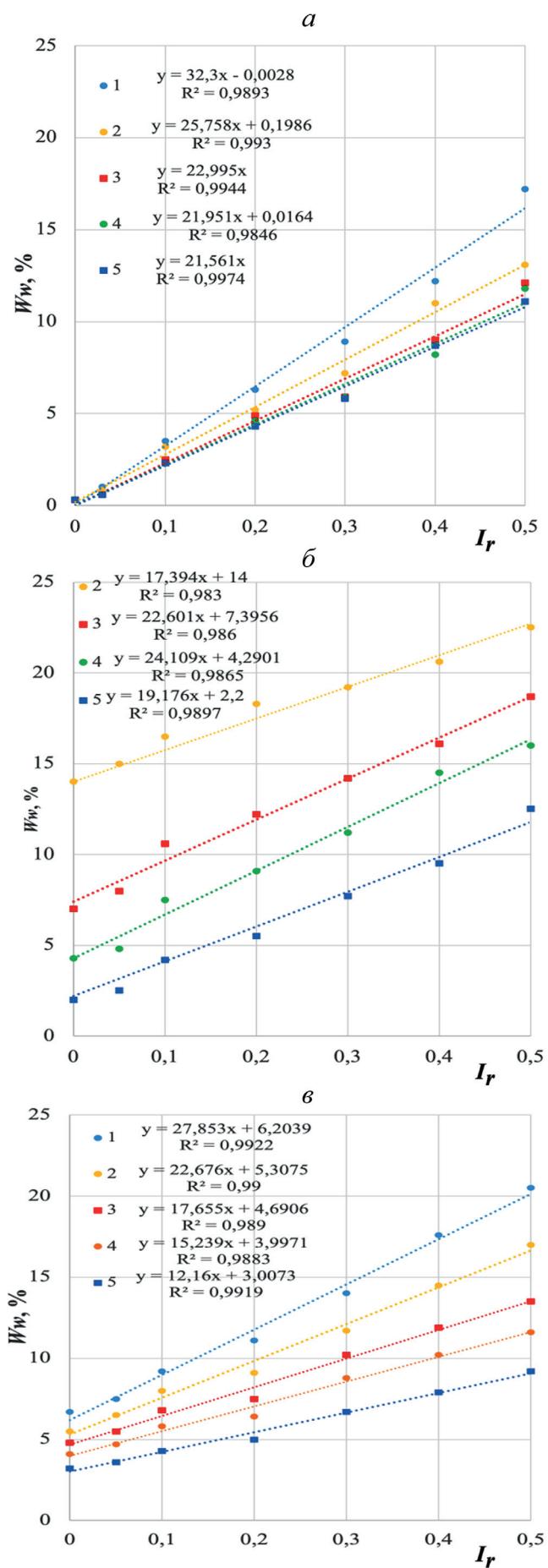
Результаты по определению содержания незамерзшей воды сопоставлены для всех исследованных грунтов во всем изученном диапазоне заторфованности от 0 до 1 при фиксированных значениях температуры экспериментов.

На рис. 4 представлены данные, полученные при температуре $-4,6^{\circ}\text{C}$. Видно, что пропорциональная зависимость влажности за счет незамерзшей воды от заторфованности наблюдается для песка при изменении степени заторфованности I_r от 0 до 50%, у суглинка — от 0 до 80% и у каолинитовой глины от 0 до 90%. Отметим, что данные для песка при $I_r > 50\%$ совпадают с данными для каолинитовой глины. При $I_r = 100\%$ («чистый» торф) количество незамерзшей воды при $-4,6^{\circ}\text{C}$ составляет 33%.

Выводы. Проведены экспериментальные исследования содержания незамерзшей воды в грунтах различного гранулометрического состава с заданными значениями степени заторфованности от 0 до 1, проведено 274 опыта и получено 34 зависимости количества незамерзшей воды от температуры:

1) характер изменения температурных зависимостей различен у песчаных и глинистых грунтов. Для песчаных грунтов — грунт со степенью заторфованности 50% отчетливо разграничивает заторфо-

Рис. 3. Зависимости содержания незамерзшей воды (W_w) от относительного содержания органического вещества (I_r , д.ед.) для песка (а), суглинка (б) и каолинитовой глины (в) при разных значениях температуры экспериментов: 1 — $-0,9^{\circ}\text{C}$; 2 — $-1,6^{\circ}\text{C}$; 3 — $-4,6^{\circ}\text{C}$; 4 — -10°C ; 5 — -18°C



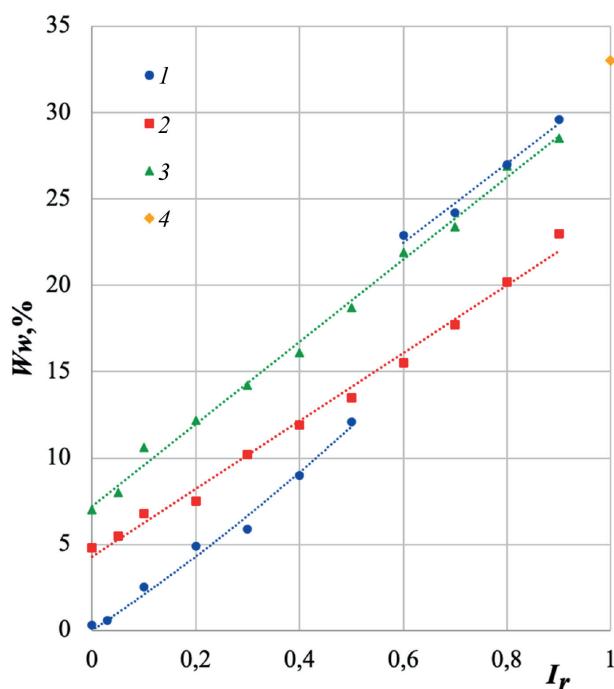


Рис. 4. Зависимости изменения содержания незамерзшей воды (W_w) при температуре $-4,6^{\circ}\text{C}$ от относительного содержания органического вещества (I_r , д.ед.) в грунтах разного гранулометрического и органо-минерального состава: 1 — песок, 2 — суглинок, 3 — каолинитовая глина, 4 — «чистый» торф

ванные грунты и торф, в то время как для глинистых грунтов это различие проявляется у грунтов со степенью заторфованности до 80% для каолинитовой глины и до 90% для суглинка;

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексютина Д.М., Мотенко Р.Г. Оценка влияния засоления и содержания органического вещества в мерзлых породах на западном побережье Байкала. Термо- и теплофизические свойства и фазовый состав влаги // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2016. № 2. С. 59–63.
2. Гаврильев Р.И., Елисеев С.В. Тепловые свойства торфа // Методы определения тепловых свойств горных пород. М.: Наука, 1970. 175 с.
3. ГОСТ 23740-2016. Методы определения содержания органических веществ.
4. ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация.
5. ГОСТ Р 59537-2021. Грунты. Методы лабораторного определения влажности за счет незамерзшей воды.
6. Грунтоведение. Классический университетский учебник / Под ред. В.Т. Трофимова. М.: Изд-во МГУ, 2005. 2024 с.
7. Давлетова Р.Р., Мотенко Р.Г. Экспериментальная оценка влияния содержания органического вещества на количество незамерзшей воды в мерзлых песках // Материалы четвертой Общероссийской научно-практической конференции молодых специалистов «Инженерные изыскания в строительстве». М.: ООО «Геомаркетинг», 2022. С. 81–88.
8. Ериов Э.Д., Мотенко Р.Г., Комаров И.А. Экспериментальные исследования теплофизических свойств
- 9) изменение содержания незамерзшей воды с понижением температуры происходит во всем исследуемом диапазоне температур у всех грунтов, кроме песков при заторфованности от 0 до 50%;
- 3) количество незамерзшей воды у грунтов, которые относятся к торфу по ГОСТ 25100-2020 ($I_r=50\text{--}90\%$) и «чистого» торфа ($I_r=100\%$) различается в 2–3 раза, а для песчаных отличие еще больше;
- 4) анализ зависимостей содержания незамерзшей воды при выбранной температуре выявил, что содержание незамерзшей воды для всех заторфованных грунтов увеличивается пропорционально степени заторфованности в диапазоне изменения I_r от 0 до 50%; дальнейшее увеличение содержания органического вещества приводит к изменениям в закономерностях формирования W_w , различным для грунтов разного состава и зависимость становится нелинейной;
- 5) аппроксимация зависимостей содержания незамерзшей воды от степени заторфованности позволяет получить достаточно простые математические уравнения с высокой величиной достоверности, которые могут быть рекомендованы для практического использования;
- 6) при изменении содержания органического вещества формирование фазового состава воды в мерзлых грунтах различного гранулометрического и минерального состава связано с изменениями в удельной поверхности грунтов, гранулометрическом составе и с закономерностями формирования разных категорий связанной воды в грунтах различной дисперсности.
- и фазового состава влаги мерзлых засоленных грунтов // Геоэкология. 1999. № 3. С. 232–242.
9. Исаев О.Н., Шарафутдинов Р.Ф., Гречишева Э.С. и др. Разработка рекомендаций по выполнению инженерно-геологических изысканий в Арктической зоне // Вестник НИЦ Строительство. 2021. С. 58–75.
10. Методы геокриологических исследований / Под ред. Э.Д. Ершова. М.: Изд-во МГУ, 2004. 512 с.
11. Мотенко Р.Г. Теплофизические свойства и фазовый состав влаги мерзлых засоленных дисперсных пород: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. н. М.: Наука, 1997. 26 с.
12. Мотенко Р.Г., Давлетова Р.Р. Экспериментальная оценка влияния содержания органического вещества на фазовый состав воды в мерзлых глинистых грунтах // Сборник докладов Шестой конференции геокриологов России Мониторинг в криолитозоне с участием российских и зарубежных ученых, инженеров и специалистов. М.: КДУ, Добросвет, 2022. С. 995–1000.
13. Роман Л.Т. Механика мерзлых грунтов. М.: МАИК «Наука/Интерperiодика», 2002. 426 с.
14. Роман Л.Т. Мерзлые торфяные грунты как основания сооружений. Новосибирск: Наука, 1987. 224 с.
15. Сергеев Г.Б., Батюк В.А. Криохимия. М.: Химия, 1978. 296 с.

16. Фазовый состав влаги в мерзлых породах / Под ред. Э.Д. Ершова. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979. 192 с.

17. Чистотинов Л.В. Миграция влаги в промерзающих неводонасыщенных грунтах. М.: Наука, 1973. 144 с.

18. *Chuvinin E.M., Bukhanov B.B., Mukhametdinova A.Z., et al.* Freezing point and unfrozen water contents of permafrost soils: estimation by the water potential method // Cold regions science and technology. 2022. № 196. 103488.

Статья поступила в редакцию 04.04.2023,
одобрена после рецензирования 05.06.2023,
принята к публикации 05.03.2024