

УСКОРЕННЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ СОДЕРЖАНИЯ НЕЗАМЕРЗШЕЙ ВОДЫ В МЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ

В.А. Истомин¹, Е.М. Чувиллин^{2,3}, Б.А. Буханов²

¹ ООО «Газпром ВНИИГАЗ», 142717, Московская обл., Ленинский р-н,
пос. Развилка, Проектируемый проезд № 5537, вл. 15/1, Россия; vlistomin@yandex.ru

² Сколковский институт науки и технологий, Центр добычи углеводородов,
143026, Москва, ИЦ Сколково, ул. Нобеля, 3, Россия

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический ф-т,
119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия

Предложен экспресс-метод определения содержания незамерзшей воды в мерзлых породах в широком диапазоне отрицательных температур (до -15°C). Метод включает экспериментальное измерение зависимости активности поровой воды от весовой влажности образца грунта при положительной (по Цельсию) температуре и последующий термодинамический пересчет содержания незамерзшей воды в спектре отрицательных температур. По предложенному методу выполнен расчет содержания незамерзшей воды в глинистых грунтах каолинитового и полиминерального состава. Проведено сравнение полученных значений содержания незамерзшей воды в мерзлых грунтах с результатами измерений по контактному методу, показавшее их согласованность в пределах погрешностей методов.

Мерзлые породы, незамерзшая вода, глина, активность поровой воды, контактный метод

FAST ESTIMATION OF UNFROZEN WATER CONTENT IN FROZEN SOILS

V. A. Istomin¹, E. M. Chuvilin^{2,3}, B. A. Bukhanov²

¹ JSC Gazprom VNIIGAZ, 15/1, Proektiruemyy passage # 5537, Razvilka Village,
Moscow region, Leninskiy district, 142717, Russia; vlistomin@yandex.ru

² Skolkovo Institute of Science and Technology, Center for Hydrocarbon Recovery,
3, Nobel str., IC Skolkovo, Moscow, 143026, Russia

³ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology,
1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia

A new method is suggested for fast estimation of unfrozen water contents in frozen soils and sediments within a wide range of negative temperatures (up to -15°C). The method consists in measuring pore water potential (or water activity) at positive Celsius temperatures with subsequent thermodynamic calculations of unfrozen water contents using the measured data. The method was used to estimate the amount of unfrozen water in frozen kaolinite and polymineral clay samples. The results showed good agreement with direct measurements by the contact method.

Frozen soil, unfrozen water, clay, pore water activity, contact method

ВВЕДЕНИЕ

Наличие незамерзшей воды в мерзлых породах является существенным фактором, определяющим их физико-химические и механические свойства. Экспериментальные данные о неполном замерзании поровой воды в мерзлых породах были получены еще в первой половине XX в. К настоящему времени разработан целый ряд экспериментальных методов определения содержания незамерзшей воды в мерзлых породах: калориметрический, ядерно-магниторезонансный (ЯМР), диэлектрический, криоскопический, адсорбционный, контактный и др. [Ершов и др., 1979; Чевевер, 2004; Старостин, 2008; Akagawa, 1988; Ishizaki et al., 1996; Yoshikawa, Overduin, 2005]. Параллельно с разработкой экспериментальных методов предлагались различные расчетные схемы оценки со-

держания незамерзшей воды в мерзлых дисперсных породах в спектре отрицательных температур [Комаров, 2003; Anderson, Tice, 1972; Watanabe, Mizoguchi, 2002]. В последнее время с появлением новых экспериментальных методов интерес к изучению незамерзшей воды в мерзлых грунтах существенно возрос [Истомин и др., 2009; Старостин, Петров, 2013; Qin et al., 2009; Dall'Amico et al., 2011; Kozłowski, Nartowska, 2013; Painter, Karra, 2014; Kozłowski, 2016].

Следует отметить, что многие из существующих на сегодняшний день методов определения незамерзшей воды отличаются значительной трудоемкостью. Кроме того, имеются и проблемы принципиального (теоретического) характера при сопоставлении получаемых разными методами ре-

зультатов. Это вызывает необходимость совершенствования современных методик, а также разработки более оперативных методов оценки содержания незамерзшей воды в мерзлых породах.

Термодинамические основы метода определения содержания незамерзшей воды по измеренной активности поровой воды

В работе В.А. Истомина с соавт. [2009] подробно изложена термодинамика поровой влаги в дисперсных средах и разработана методика термодинамического расчета содержания незамерзшей воды в мерзлых породах по измерению потенциала влаги (параметра, широко используемого в почвоведении) в грунтовых образцах при положительных температурах (в диапазоне 15–25 °С) в зависимости от их влажности. Методика была сопоставлена с классическим контактным методом и показала согласованность обоих методов в пределах ошибок измерений. Предложенная в этой работе методика может быть упрощена в области отрицательных температур от 0 до –15 °С (для ряда грунтовых сред до –20 °С) и представлена как экспресс-метод расчета температурной зависимости количества незамерзшей воды (W_{uf}). Упрощение достигается использованием активности поровой воды (a) вместо ее химического потенциала, применением более простых соотношений для термодинамического расчета, а также возможностью пренебречь во многих случаях зависимостью активности поровой воды от температуры.

По аналогии с водными растворами активность поровой влаги $a = a(T, W)$ грунтовой системы заданной влажности W определяется соотношением

$$a = \frac{p_{wpor}}{p_w}, \quad (1)$$

где p_{wpor} – парциальное давление водяных паров над исследуемым образцом заданной влажности W ; p_w – давление паров над чистой водой. Таким образом, активность поровой воды является относительным давлением пара над поровой водой исследуемого образца.

Из определения (1) следует, что a – безразмерная величина. Она зависит от влажности образца и, строго говоря, от температуры, т. е. $a = a(T, W)$. Для гидрофильных систем (грунтов) $a < 1$, а при увеличении влажности образца $a \rightarrow 1$.

Используемый в почвоведении [Судницицын, Каманина, 2008; Campbell et al., 2007] параметр потенциала влаги ψ , МПа связан с активностью a соотношением

$$\psi = RT \frac{\rho}{M} \ln \frac{p_{wpor}}{p_w} = RT \frac{\rho}{M} \ln a, \quad (2)$$

где R – универсальная газовая постоянная (8.314 Дж/(моль·К)); T – температура исследуемого образца пористой среды, К; M – молекулярная

масса воды (18.015 г/моль); ρ – плотность воды (1.0 г/см³).

Активность воды по измеренной величине потенциала влаги при заданной влажности образца определяется из формулы (2) с учетом численных значений R и M следующим образом:

$$\begin{aligned} a(W, T) &= \exp \left[\frac{M\psi}{RT\rho} \right] = \exp \left[\frac{18.015 \psi}{8.314 T\rho} \right] = \\ &= \exp \left[\frac{2.167\psi(W, T)}{T} \right]. \end{aligned} \quad (3)$$

Как показывает проведенный термодинамический анализ [Istomin et al., 2015, 2017], для расчета содержания незамерзшей воды в диапазоне температур от 0 до –15 °С в большинстве случаев можно пренебречь температурной зависимостью активности поровой влаги, т. е. сделать допущение, что величина a является только функцией W (из формулы (3) видно, что в этом случае величина $\psi(W, T)/T$ не будет зависеть от температуры). Отсутствие температурной зависимости активности означает, что энтальпия поровой воды совпадает с энтальпией воды в объеме. Это, строго говоря, справедливо только при больших влажностях образца, близких к значению максимальной влагоемкости. Следует отметить, что температурная зависимость активности поровой влаги a должна иметь место для “прочносвязанной воды” и для межслоевой воды в глинах с “раздвижным каркасом” (например, при наличии в грунте заметного количества монтмориллонита или гидрослюда).

Из экспериментальных данных активности поровой воды в грунтовом образце с заданной влажностью W (измеряется в процентах к массе сухого образца) необходимо рассчитать температуру T_{eq} ($T < 273.15$ К), при которой поровая вода будет находиться в равновесии со льдом в свободном объеме (как и при определении зависимости содержания незамерзшей воды от температуры контактным методом). При этой температуре влажность образца W становится равной содержанию незамерзшей воды, т. е. $W = W_{uf}$. Для такого термодинамического расчета необходимо иметь соотношение для разности свободных энергий Гиббса (разности химических потенциалов) между жидкой (переохлажденной водой) и льдом, которое представлено в [Истомин и др., 2009]. Далее, приравнявая химические потенциалы поровой воды и льда, можно получить функциональную связь между активностью поровой воды и температурой T_{eq} , при которой поровая вода будет находиться в равновесии со льдом в свободном объеме:

$$\begin{aligned} -RT \ln a &= \\ &= 6008 \left(1 - T/T_0 \right) - 38.2 \left[T \ln \frac{T}{T_0} + (T_0 - T) \right]. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь $T_0 = 273.15$ К, $T = T_{eq}$ ($T < T_0$) – температура (К), отвечающая равновесию “поровая вода–лед” (при влажности образца W и активности поровой воды a).

Вместо формулы (4) на практике удобно использовать обратную зависимость равновесной температуры ($^{\circ}\text{C}$) от активности поровой влаги. В диапазоне $0.6 \leq a \leq 1.0$ с использованием зависимости (4) авторами получена расчетная формула равновесной температуры t_{eq} , $^{\circ}\text{C}$ для измеренной активности воды $a = a(W)$ в образце:

$$t_{eq} = 103.25 \ln a + 5.57(1-a)^2. \quad (5)$$

Формула (5) выражает связь между влажностью образца (через активность поровой воды) и равновесной температурой, т. е. температурой, при которой поровая вода в образце заданной влажности W находится в термодинамическом равновесии со льдом в свободном объеме. Иначе говоря, по формуле (5) рассчитывается температурная зависимость содержания незамерзшей воды, поскольку (5) устанавливает связь между активностью воды (количеством незамерзшей воды W_{uf}) и отрицательной температурой образца.

Экспериментальное определение потенциала влаги и активности воды в грунтах

Потенциал влаги ψ используется в грунтоведении и почвоведении для описания термодинамических свойств поровой воды [Грунтоведение, 2005; Шеин, 2005]. На сегодняшний день имеются различные инструментальные средства для измерения потенциала поровой влаги. Одним из удобных приборов является WP 4T, разработанный компанией Decagon Devices (США) [Campbell et al., 2007]. Измерительная система данного прибора основана на определении давления паров воды над влажным грунтом по методу “точки росы”. Прибор WP 4T позволяет получать значения потенциала влаги в температурном диапазоне от 5 до 43 $^{\circ}\text{C}$ с погрешностью ± 0.1 МПа в диапазоне от 0 до -10 МПа и с погрешностью ± 1 МПа в диапазоне от -10 до -50 МПа. Этот прибор может определять не только значения потенциала поровой влаги ψ , но и активность воды a в пористых средах (пересчет одной величины в другую осуществляется по формуле (3)). С учетом всех видов погрешности точность определения активности влаги при $0.7 \leq a \leq 0.9$ составляет ~ 0.025 , а при $0.9 < a < 1.0$ не более 0.01.

Для экспериментального определения потенциала влаги и активности воды готовятся образцы грунта диаметром 3.8 см и высотой 0.5–1.0 см с влагосодержанием от первых процентов до полной влагоемкости. При проведении измерений для автоматизации процесса получения, накопления и обработки данных прибор WP 4T подключался к компьютеру через стандартную программу Hyper Terminal.

Для обеспечения оперативности процесс измерения начинается на грунтовом образце с максимальной влагонасыщенностью (близкой к полной влагоемкости), затем влагосодержащий образец ступенчато подсушивается (на 1–2 %) в эксикаторе с хлоридом кальция с последующим измерением потенциала влаги (активности воды). Проводится не менее 6–7 измерений в образце различной влажности. Контроль влажности образца в процессе подсушивания осуществляется путем его взвешивания на электронных весах с дискретностью 0.001 г, причем контроль влажности осуществляется до и после серии измерений потенциала влаги (активности воды). Функционал прибора WP 4T позволяет проводить измерения не только при комнатной температуре (~ 25 $^{\circ}\text{C}$), но и в диапазоне температур от $+15$ до $+40$ $^{\circ}\text{C}$. Поэтому для данного диапазона можно получить зависимость активности поровой воды от температуры. Как показали тестовые измерения, в большинстве случаев эта зависимость является слабой. Ее следует принимать во внимание только для глинистых образцов, когда в поровом пространстве содержится преимущественно связанная (адсорбционная) вода [Istomin et al., 2017]. В других случаях температурной зависимостью активности воды (при заданной влажности) можно пренебречь.

Характеристика исследуемых грунтов

В качестве объекта исследования использовались глинистые грунты различного состава: полиминеральная (кудиновская) глина [Истомин и др., 2009] и мономинеральная (каолинитовая) глина. Их гранулометрический состав определялся ареометрическим методом, а минеральный – методом рентгеновской дифрактометрии. Результаты определения гранулометрического и минерального состава представлены в табл. 1. Из данных табл. 1 следует, что в минеральном составе кудиновской (полиминеральной) глины преобладают зерна кварца (45 %), в меньшем количестве содержатся микроклин (9 %), иллит (8 %), каолинит (5 %), гидрослюда (2 %), а также тонкодисперсная (рентгеноаморфная) субстанция (28 %). Пылевато-глинистая фракция полиминеральной глины составляет 69 %, из которых 34 % – глинистая фракция. В составе каолинитовой глины преобладает минерал каолинит (92 %), а содержание пылевато-глинистой фракции 92 %, из которой глинистые частицы (< 0.005 мм) составляют 65 %. Содержание водорастворимых солей в образцах полиминеральной и каолинитовой глин незначительно: 0.19 и 0.04 % соответственно. Удельная активная поверхность дисперсных грунтов, полученная сорбционным методом по азоту, составила 26 $\text{m}^2/\text{г}$ для полиминеральной и 12 $\text{m}^2/\text{г}$ для каолинитовой глин.

Таблица 1. Гранулометрический и минеральный состав исследуемых грунтов

Тип грунта	Распределение частиц по фракциям, %							Минеральный состав, %	Засоленность, %
	1–0.5 мм	0.5–0.25 мм	0.25–0.1 мм	0.1–0.05 мм	0.05–0.01 мм	0.01–0.005 мм	<0.005 мм		
Полиминеральная глина	1	2	13	15	22	13	34	Кварц – 45, микроклин – 9, иллит – 9, каолинит – 5, РАВ* – 28	0.19
Каолинитовая глина	1	1	0	3	19	11	65	Каолинит – 92, кварц – 6, мусковит – 2	0.04

*РАВ – рентгеноаморфное вещество.

 Таблица 2. Содержание незамерзшей воды W_{uf} в исследуемых грунтах (контактный метод)

$T, ^\circ\text{C}$	$W_{uf}, \%$	Источник	$T, ^\circ\text{C}$	$W_{uf}, \%$	Источник
Полиминеральная глина			Каолинитовая глина		
-1.7	9.4	[Истомин и др., 2009]	-3.0	7.0	[Istomin et al., 2015]
-2.5	8.8		-4.0	6.6	
-4.0	7.3		-5.0	5.6	
-7.0	6.5		-7.0	3.9	
-10.0	5.4		-10.0	3.1	
-14.0	4.4		-3.0	7.0	
-1.6	9.1	-6.5	4.3		
-2.8	7.7	-14.8	2.6		
-3.7	6.4	-19.9	2.3		
-6.5	5.4	-22.5	2.2		
-22.0	4.2	-27.6	2.1		

Для исследуемых грунтов содержание незамерзшей воды в зависимости от температуры предварительно было получено контактными методами. Он основан на определении равновесной влажности грунта со льдом, которое достигается длительным непосредственным контактом сухой грунтовой пластины с двумя пластинами льда [Новые методы..., 1983; Лабораторные методы..., 1985]. Результаты определения содержания незамерзшей воды по контактному методу представлены в табл. 2.

Расчет содержания незамерзшей воды по экспериментальным определениям активности поровой воды

Алгоритм определения содержания незамерзшей воды по экспериментальным значениям активности поровой влаги состоит в следующем. На первом шаге экспериментально определяется зависимость активности поровой влаги a от весовой влажности W (%) дисперсной среды при комнатной температуре (в нашем случае использовался прибор WP 4T). На втором шаге с использованием экспериментальных данных активности поровой воды при различных влажностях грунтового образца по формуле (5) определяется температура

($t_{eq}, ^\circ\text{C}$), соответствующая равновесию между поровой водой в образце с влажностью W и льдом. Выявляется взаимосвязь между отрицательной температурой (t_{eq}) и равновесным содержанием жидкой фазы в мерзлых дисперсных средах, т. е. температурная зависимость содержания незамерзшей воды (W_{uf}).

По предложенному методу были выполнены расчеты содержания незамерзшей воды для двух глинистых грунтовых сред, а также проведено сравнение полученных результатов с экспериментальными данными по контактному методу.

Экспериментальные значения параметров ψ и a для образцов полиминеральной и каолинитовой глин при разных значениях весовой влажности ($W, \%$) представлены в табл. 3. В экспериментах использовались весы с дискретностью 0.001 г, что позволяет проводить измерения влагосодержания дисперсных сред с точностью до 0.1 %. В результате расчетов по формуле (5) получена зависимость между влажностью W и отрицательной температурой ($t_{eq}, ^\circ\text{C}$), при которой данное количество поровой воды будет находиться в равновесии с фазой льда в объеме (табл. 4). Таким образом, через значения активности воды устанавливается связь равновесного содержания жидкой фазы в дисперсных льдосодержащих средах W_{uf} и отрицательной температурой ($t_{eq}, ^\circ\text{C}$). Для получения значений содержания незамерзшей воды для исследуемых глинистых грунтов построена графическая зависимость влагосодержания W от отрицательной температуры t_{eq} (см. рисунок).

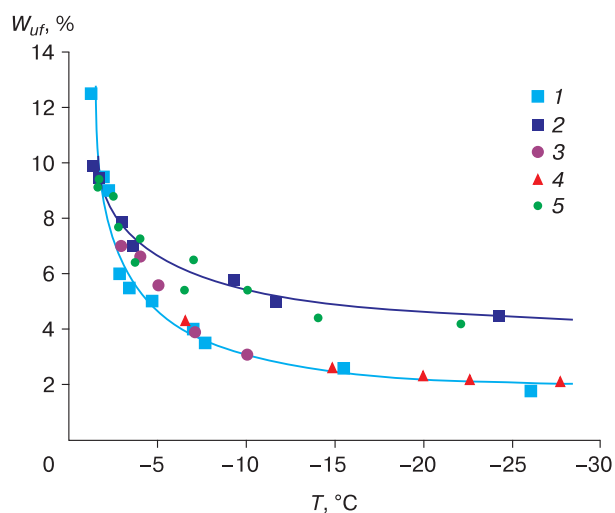
Сопоставление расчетных и экспериментальных данных содержания незамерзшей воды в полиминеральной и каолинитовой глинах показывает хорошую согласованность между предложенным экспресс-методом и контактными методами (см. рисунок). В рассматриваемых случаях согласованность имеет место в широком диапазоне отрицательных температур, вплоть до $-27 ^\circ\text{C}$. Максимальное расхождение между данными, полученными предложенным и контактными методами, составляет не более 0.5 %, что сопоставимо с точностью контактного метода.

Таблица 3. Зависимость потенциала влаги ψ и активности a поровой воды глинистых грунтов от влажности W при $+25\text{ }^\circ\text{C}$

$W, \%$	$\psi, \text{МПа}$	$a, \text{д.ед.}$
Полиминеральная глина		
3.7	-45.36	0.719
4.5	-32.53	0.790
5.0	-15.53	0.893
5.8	-12.46	0.913
7.0	-4.81	0.966
7.9	-4.01	0.971
9.5	-2.19	0.984
9.9	-1.86	0.987
Каолинистая глина		
1.8	-34.37	0.776
2.6	-20.68	0.860
3.5	-10.21	0.928
4.0	-9.32	0.935
5.0	-6.24	0.956
5.5	-4.48	0.968
6.0	-3.73	0.973
9.0	-2.96	0.979
9.5	-2.55	0.982
12.5	-1.59	0.989
17.0	-0.95	0.993
21.0	-0.55	0.996

Таблица 4. Результаты расчета равновесной температуры t_{eq} для образцов кудиновской и каолинистой глин с разным влагосодержанием W

$W, \%$	$a, \text{д.ед.}$	$t_{eq}, \text{ }^\circ\text{C}$
Полиминеральная глина		
3.7	0.719	-33.6
4.5	0.790	-24.2
5.0	0.893	-11.6
5.8	0.913	-9.3
7.0	0.966	-3.6
7.9	0.971	-3.0
9.5	0.984	-1.6
9.9	0.987	-1.4
Каолинистая глина		
1.8	0.776	-25.9
2.6	0.860	-15.4
3.5	0.928	-7.6
4.0	0.935	-7.0
5.0	0.956	-4.7
5.5	0.968	-3.4
6.0	0.973	-2.8
9.0	0.979	-2.2
9.5	0.982	-1.9
12.5	0.989	-1.2
17.0	0.993	-0.7
21.0	0.996	-0.4



Изменение содержания незамерзшей воды в глинистых грунтах.

1, 2 – расчетные данные по ускоренному методу с использованием значений активности поровой воды для каолинистой и полиминеральной глин соответственно; 3, 4 – экспериментальные данные по контактному методу для каолинистой глины [Istomin et al., 2015] и [Grechishcheva, Motenko, 2015]; 5 – экспериментальные данные по контактному методу для полиминеральной глины. Линии – аппроксимация содержания незамерзшей воды по экспресс-методу.

Следует отметить, что для получения температурной зависимости содержания незамерзшей воды в мерзлых породах до $-15\text{ }^\circ\text{C}$ в рамках предложенного метода достаточно 7–8 ч. Таким образом, разработанный метод определения содержания незамерзшей воды в мерзлых грунтах в сравнении с существующими экспериментальными методами отличается оперативностью и сопоставимой точностью с контактными методами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен экспресс-метод определения температурной зависимости содержания незамерзшей воды в мерзлых дисперсных грунтах. Метод включает определение активности поровой воды при положительной (комнатной) температуре с последующим термодинамическим пересчетом на зависимость содержания незамерзшей воды от отрицательной (по Цельсию) температуры. С использованием разработанного метода выполнен расчет содержания незамерзшей воды в каолинистой и полиминеральной глинах в широком диапазоне отрицательных температур (до $-15\text{ }^\circ\text{C}$). Сравнение расчетных значений содержания жидкой фазы в мерзлых грунтах с результатами, полученными контактным методом, показало согласованность в пределах погрешностей методов.

Дальнейшее развитие метода будет направлено на оценку влияния температуры на величину активности поровой воды, проверку его точности применительно к породам различной дисперсности, а также распространение метода на засоленные, нефтезагрязненные и органогенные мерзлые грунты.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФ (грант 16-17-00051).

Литература

- Грунтоведение.** 6-е изд. / Под ред. В.Т. Трофимова, В.А. Королева и др. М., Изд-во Моск. ун-та, 2005, 1024 с.
Trofimov, V.T. (Ed.), 2005. Soil Science. 6th edition. Moscow University Press, Moscow, 1024 pp. (in Russian)
- Ершов Э.Д.** Фазовый состав влаги в мерзлых породах / Э.Д. Ершов, Ю.П. Акимов, В.Г. Чеверев, Э.З. Кучуков. М., Изд-во Моск. ун-та, 1979. 189 с.
Yershov, E.D., Akimov, P.Yu., Cheverev, V.G., Kuchukov, E.Z., 1979. The phase composition of moisture in frozen soils. MSU, Moscow, 189 pp. (in Russian)
- Истомин В.А., Чувилин Е.М., Махонина Н.А., Буханов Б.А.** Определение температурной зависимости содержания незамерзшей воды в грунтах по потенциалу влаги // Криосфера Земли, 2009, т. XIII, № 2, с. 35–43.
Istomin, V., Chuvilin, E., Makhonina, N., Bukhanov, B., 2009. Temperature dependence of unfrozen water content in sediments on the water potential measurements. Earth's Cryosphere XIII (2), 35-43. (in Russian)
- Комаров И.А.** Термодинамика и тепломассообмен в дисперсных мерзлых породах / И.А. Комаров. М., Науч. мир, 2003, 608 с.
Komarov, I.A., 2003. Thermodynamics and Heat and Mass Transfer in Fine-grained Porous Rocks. Nauchnyi Mir, Moscow, 608 pp. (in Russian)
- Лабораторные** методы исследования мерзлых пород / Под ред. Э.Д. Ершова. М., Изд-во Моск. ун-та, 1985, 350 с.
Yershov, E.D. (Ed.), 1985. Methods for Laboratory Studies of Frozen Rocks. Moscow University Press, Moscow, 350 pp. (in Russian)
- Новые** методы исследования состава, строения и свойств мерзлых пород / Под ред. С.Е. Гречищева, Э.Д. Ершова. М., Недра, 1983, 140 с.
Grechishchev, S.E., Yershov, E.D., 1983. New Methods in Studies of Compositions, Structure, and Properties of Frozen Soils. Nedra, Moscow, 140 pp. (in Russian)
- Старостин Е.Г.** Определение количества незамерзшей воды по кинетике кристаллизации // Криосфера Земли, 2008, т. XII, № 2, с. 60–64.
Starostin, E.G., 2008. Determination of the amount of unfrozen water, based on the crystallization kinetics. Earth's Cryosphere XII (2), 60–64. (in Russian)
- Старостин Е.Г., Петров Е.Е.** Исследование содержания незамерзшей воды в грунтах методом кинетики кристаллизации // Наука и образование, 2013, № 1, с. 19–23.
Starostin, E.G., Petrov, E.E., 2013. Estimation of unfrozen water contents in soils: crystallization kinetics approach. Nauka i Obrazovaniye, No. 1, 19–23.
- Судницын И.И.** Экологическая гидрофизика почв / И.И. Судницын, И.З. Каманина. Дубна, Междунар. ун-т природы, общества и человека, 2008, 181 с.
Sudnitsyn, I.I., Kamanina, I.Z., 2008. Ecological Hydrophysics of Soils. International University of Nature, Society, and Man, Dubna, 181 pp. (in Russian)
- Чеверев В.Г.** Природа криогенных свойств грунтов / В.Г. Чеверев. М., Науч. мир, 2004, 234 с.
Cheverev, V.G., 2004. The Nature of Cryogenic Properties of Soils. Nauchniy Mir, Moscow, 234 pp. (in Russian)
- Шейн Е.В.** Курс физики почв / Е.В. Шейн. М., Изд-во Моск. ун-та, 2005, 432 с.
Shein, E.V., 2005. The course of soil physics. MSU, Moscow, 432 pp. (in Russian)
- Akagawa, S.** Experimental study of frozen fringe characteristics // Cold Regions Science and Technology, 1988, vol. 15, No. 3, p. 209–223.
- Anderson, D.M., Tice, A.R.** Predicting unfrozen water contents in frozen soils from surface area measurements // Highw. Res. Rec., 1972, No. 393, p. 12–18.
- Campbell, G.S., Smith, D.M., Teare, B.L.** Application of a Dew Point Method to obtain the soil water characteristic // Springer Proc. in Physics, 2007, No. 112, p. 71–77.
- Dall'Amico, M., Endrizzi, S., Gruber, S., Rigon, R.** A robust and energy-conserving model of freezing variably saturated soil // The Cryosphere, 2011, No. 5, p. 469–484, DOI: 10.5194/tc-5-469-2011.
- Grechishcheva, E., Motenko, R.** Experimental study of freezing point and water phase composition of saline soils contaminated with hydrocarbons // Proc. of the 7th Canadian Permafrost Conference, Canada, Quebec City, Sept. 20–23, 2015, ABS_316.
- Ishizaki, T., Maruyama, M., Furukawa, Y., Dash, J.G.** Premelting of ice in porous silica glass // J. Cryst. Growth, 1996, No. 162, p. 455–460.
- Istomin, V.A., Chuvilin, E.M., Bukhanov, B.A., Uchida, T.A.** A method for determination of water content in real and model porous media in equilibrium with bulk ice or gas hydrate // Proc. of the 7th Canadian Permafrost Conf. Canada, Quebec City, Sept. 20–23, 2015, ABS_658.
- Istomin, V.A., Chuvilin, E.M., Bukhanov, B.A., Uchida, T.A.** Pore water content in equilibrium with ice or gas hydrate in sediments // Cold Regions Sci. and Technol., 2017, No. 137, p. 60–67, DOI: 10.1016/j.coldregions.2017.02.005.
- Kozlowski, T.** A simple method of obtaining the soil freezing point depression, the unfrozen water content and the pore size distribution curves from the DSC peak maximum temperature // Cold Regions Sci. and Technol., 2016, No. 122, p. 18–25, DOI: 10.1016/j.coldregions.2015.10.009.
- Kozlowski, T., Nartowska, E.** Unfrozen water content in representative bentonites of different origin subjected to cyclic freezing and thawing // Vadose Zone J., 2013, p. 1–11, DOI: 10.2136/vzj2012.0057.
- Painter, S.L., Karra, S.** Constitutive model for unfrozen water content in subfreezing unsaturated soils // Vadose Zone J., 2014, DOI: 10.2136/vzj2013.04.0071.
- Qin, Y., Li, G., Qu, G.** A formula for the unfrozen water content and temperature of frozen soils // Proc. of 4th Conf. of Cold Regions Eng., 2009, p. 155–161, DOI: 10.1061/41072(359)18.
- Watanabe, K., Mizoguchi, M.** The amount of unfrozen water in frozen porous media saturated with solution // Cold Regions Sci. and Technol., 2002, No. 2, p. 103–110, DOI.org/10.1016/S0165-232X(01)00063-5.
- Yoshikawa, K., Overduin, P.P.** Comparing unfrozen water content measurements of frozen soil using recently developed commercial sensors // Cold Regions Sci. and Technol., 2005, No. 42, p. 250–256, DOI: 10.1016/j.coldregions.2005.03.001.

*Поступила в редакцию
13 марта 2017 г.*