

УДК 631.432

ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛАГОЗАПАСОВ В ПРОМЕРЗАЮЩИХ ПОЧВОГРУНТАХ КАРЕЛИИ: ИНЖЕНЕРНЫЕ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ

И. М. Нестеренко, С. Л. Матвеев

Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН

Снижение температуры воздуха и увлажненных почв ведет к повышению влажности промерзающего слоя, изменению водно-физических свойств. В глинах и суглинках образуются линзы и прослойки льда, нарушается устойчивость грунтов и сооружений при оттаивании, усиливается вынос взвешенных и растворенных веществ.

Ключевые слова: снег, промерзание, влагоемкость, объемная масса, водоотдача, устойчивость грунтов и сооружений.

I. M. Nesterenko, S. L. Matveev. MOISTURE REDISTRIBUTION IN FREEZING SOILS IN KARELIA: ENGINEERING AND ECOLOGICAL PROBLEMS

Reduction in the temperature of the air and moisture-bearing soils results in an increase in the moisture content in the frozen layer, a change in hydrophysical properties. Ice lenses and bands form in clays and loams, the stability of grounds and buildings at thawing is affected, leaching of suspended and dissolved matter intensifies.

Key words: snow, freezing, water capacity, volume weight, water yield, ground and building stability.

При проектировании, строительстве и эксплуатации дорог, мелиоративных объектов и сооружений на них, в водохозяйственных и гидрологических расчетах, в связи с необходимостью учета сезонного перераспределения влагозапасов, изменения водно-физических свойств почвогрунтов при их промерзании, при изучении процессов эрозии и выноса взвешенных и растворенных веществ в водоприемники немаловажную роль играет знание процессов промерзания и оттаивания почвогрунтов. В России этим вопросам начали уделять большее внимание со второй половины прошлого века [Нестеренко, Симанов, 1969]. Об этом свидетельствуют и материалы последних симпозиумов по физике, химии и экологии сезонно промерзающих почв [Nesterenko, Sinkevitch, 1992; International symposium..., 1997].

Объекты и методы исследований

Торфяники, ленточные суглинки и глины имеют широкое распространение на северо-западе России. Приурочены они в основном к озерно-ледниковым равнинам и являются первоочередными объектами проведения мелиоративных работ для улучшения сельскохозяйственных и лесных угодий. В Карелии это Олонецкая (бассейн Ладожского озера), Корзинская низины и Ладвинская равнина (бассейн Онежского озера). Часто ленточные отложения залегают близко к поверхности и в них врезается осушительная сеть. Эти отложения имеют различный механический состав – от легких суглинков до тяжелых глин. В ленточных глинах Корзинской низины отмечено абсолютное преобладание пылеватой и высокое содержание глинистой фракции (20–75 %) [Нестеренко, Стрелкова,

2006]. Характерным для ленточных отложений является снижение их прочности при нарушении естественной структуры. Они находятся в скрыто-текучем, реже – пластичном состоянии и при нарушении естественного сложения легко переходят в текучее [Ломтадзе, 1965]. С ростом объемов капитального строительства в 60-е гг. прошлого века в Карелии (дороги, гидротехнические сооружения, мелиоративные системы и т. д.) встал вопрос о необходимости детального изучения этих процессов. На первом этапе (1950–1960-е гг.) разрабатывались методы исследований сезонно промерзающих почвогрунтов, проводилась оценка особенностей изменения водно-физических свойств в пахотном слое и подстилающих горизонтах, способов защиты почв от эрозии и гидротехнических сооружений от разрушения [Нестеренко, 1967].

Полевые и лабораторные исследования проводились с 1963 г. на Корзинском научном стационаре Института биологии, расположенном в южной части Карелии, в 70 км западнее Петрозаводска [Нестеренко, Стрелкова, 2006]. На стационаре имеется участок неосушенного болота (НП-4 – наблюдательный пункт № 4). Площади с торфяной залежью низинного и переходного типа мощностью до 3 м осушены в 1962–1963 гг. дощатым дренажем с расстоянием между дренами 40 м в зоне атмосферного водного питания. В истекшие годы проводился ремонт открытой проводящей сети, а в 1980-е гг. в зоне повышенного грунтового водного питания (полоса 5) были заложены дополнительные дрены. На стационаре до 1994 г. действовал метеорологический пункт (МП), который был зарегистрирован в системе Гидрометеослужбы. Торфяник в зоне грунтового-напорного водного питания осушен дощатыми дренами через 20 м с дополнением в последующем полиэтиленовых и гончарных дренах (НП5). Тяжелосуглинистые почвы, подстилаемые ленточными глинами, осушены гончарным дренажем с расстояниями между ними 8, 12 и 20 м (НП-3). В основном до 1994 г. на стационаре проводились круглогодичные наблюдения за осадками, испарением, стоком, температурой воздуха и почвы, промерзанием почвы, влажностью и водно-физическими свойствами почвогрунтов, уровнями грунтовых вод и др.

Влажность почвы в течение года, в том числе и в зимний период, определяли 2 раза в месяц на глубину до 1 м специальным буром, состоящим из двух тонкостенных полуцилиндров (разрезана труба из нержавеющей стали), соединяемых специальным замком, с хорошо заостренной пилообразной нижней частью.

Это позволяло одновременно отбирать почву на всю глубину. После разделения бура на две части специальным ножом вырезался образец длиной 10 см, который полностью помещался в 5 бюкс для высушивания. Постоянный объем образца позволял в конечном итоге определять как весовую, так и объемную влажность, рассчитывать послойные запасы влаги.

Образцы с ненарушенной структурой в мерзлом слое отбирали и переоборудованным для почвы ледовым буром [Нестеренко, 1971]. На границе промерзания брали дополнительно образцы из примыкающего к мерзлому (2–5 см) талого грунта. Бур-кольцо позволял как в мерзлых торфах, так и в глинах (без включений песка) отбирать пробы на влажность и монолит диаметром 10 см при промерзании до 60 см. Монолит использовался для изучения льдистости, объемной массы, водоотдачи, влажности.

На различных типах почв и вариантах осушения устанавливались мерзлотомеры и приборы нашей конструкции для непрерывной регистрации вспучивания почвы [Нестеренко, 1979]. Были организованы наблюдения за деформацией каналов с целью выяснения причин значительного разрушения их откосов в слоистых глинах и суглинках при промерзании и оттаивании.

Результаты исследований

Многолетние (1963–1994 гг.) наблюдения позволили оценить вариабельность основных климатических характеристик – температуры, глубины промерзания различных почв и высоты снежного покрова на конец зимы (табл. 1), которые в значительной степени определяют формирование влагозапасов, их перераспределение, изменение водно-физических свойств почвы и ее вспучивание при промерзании.

Таблица 1. Промерзание и высота снежного покрова, Корзинская низина, 1963–1994 гг.

Показатель	Промерзание, Нм, см			Снег, Нс, см	
	МП	НП-4	НП-3	МП	НП-4
X	38	22	52	39	59
X _{min}	14	1,0	32	12	32
X _{max}	61	48	78	71	89
σ	11,7	12	11,6	13,7	14,5
Cv	0,31	0,55	0,22	0,35	0,25

Примечание. X – средняя многолетняя величина; σ – стандартное отклонение; Cv – коэффициент вариации.

Высота снежного покрова на неосушенной и частично залесенной части торфяника более чем в 1,5 раза выше, глубина промерзания примерно на ту же величину ниже. Большая вариабельность (Cv) глубины промерзания на НП-4 обусловлена тем, что на окраине неосушенной

части болота в зоне разгрузки грунтовых вод в отдельные годы наблюдалось даже отсутствие мерзлоты, а при ее наличии подмерзлотные воды находились под напором. Многофакторный регрессионный анализ выявил достаточно надежные связи глубины промерзания (H_m) с суммой отрицательных температур (Σt), среднемесячной из средних минимальных (t_{\min}) и с высотой снежного покрова (H_c):

$$\begin{aligned} & \text{осушенные торфяные почвы} \\ & H_m = 27,8 + 0,0214\Sigma t - 0,434H_c, \\ & R = 0,69, p = 0,001, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & H_m = 12,7 - 3,26t_{\min} - 0,434H_c, \\ & R = 0,69, p = 0,001; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \text{осушенные минеральные почвы} \\ & H_m = 39,5 + 0,024\Sigma t - 0,047H_c, \\ & R = 0,70, p = 0,0004. \end{aligned} \quad (3)$$

Наибольшая глубина промерзания наблюдается в минеральных почвогрунтах на участке НП-3, величина ее в отдельные годы более чем в 2 раза превышает промерзание торфяных почв (табл. 1).

Отмечается устойчивое потепление климата на Европейском Севере и рост осадков [Климат Карелии..., 2004] и, соответственно, связанное с этими процессами уменьшение глубины промерзания и перераспределение влагозапасов.

Перераспределение влагозапасов в промерзающих грунтах зависит от температуры, глубины снежного покрова, предзимнего увлажнения. Ранее была установлена зависимость между скоростью промерзания и увеличением влажности нижнего слоя мерзлого грунта по отношению к прилегающему талому [Нестеренко, 1969]. При влагозапасах на начало зимы до 80–90 % от полной влагоемкости и увеличении их за зиму на 7–17 % в торфяных и до 30 % в минеральных почвогрунтах промерзание приводит к росту запасов влаги сверх как полевой, так и полной влагоемкости (табл. 2),

что ведет к существенному росту водоотдачи почвогрунтов.

Надежные уравнения связи для изменения влагозапасов dW в слое 0–50 см в торфяных почвах на МП за холодный период (октябрь – март) имеют вид:

$$\begin{aligned} dW_3 &= 0,123H_m - 0,7W_{нз} - 0,1T + 278, \\ R &= 0,75, \end{aligned} \quad (4)$$

в зоне обильного грунтово-напорного водного питания (НП 5):

$$\begin{aligned} dW_5 &= 0,282H_m - 0,86W_{нз} - 0,10T + 224; \\ R &= 0,86, \end{aligned} \quad (5)$$

в минеральных почвах (НП-3):

$$\begin{aligned} dW_m &= 0,283T - 0,47W_{нз} + 0,40H_m + 138, \\ R &= 0,42. \end{aligned} \quad (6)$$

Меньшая, но достоверная связь в минеральных грунтах обусловлена неоднородным накоплением влаги и льда в линзах и прослойках.

При переходе воды в лед и увеличении ее объема в среднем на 9 % происходят существенные изменения структуры и физических свойств грунтов. Мерзлый осушенный торф представляет сплошную массу с редкими тонкими прослойками льда. В верхнем слое вспаханных почв в пустотах часто наблюдается образование кристаллического льда в значительных количествах. Мерзлый торф становится практически водонепроницаемым, а это способствует формированию поверхностного стока с началом снеготаяния [Нестеренко, 1971].

В плотных минеральных почвах при уровнях грунтовых вод 0,8 м и более в верхних слоях при значительной скорости промерзания образуются тонкие прослойки и линзы льда толщиной до 1–2 мм через каждые 5–10 мм. И лишь у нижней границы при замедлении скорости промерзания начинает формироваться мощная прослойка льда, толщина которой к весне достигает иногда 5–10 см. При этом увеличение глубины промерзания во вторую половину

Таблица 2. Перераспределение почвенных влагозапасов в зимний период, 1964–1986 гг.

Характеристики	Точки	Глубина, см	X, мм	X _{min} , мм	X _{max} , мм	σ	W/W _{пв} , %	
Начальные влагозапасы, W	МП	0–20	122	71	170	23,6	71,8	0,19
		0–50	314	217	383	44,0	73,9	0,14
		0–100	688	480	825	87,2	80,9	0,13
	НП5	0–20	130	80	168	64,3	76,4	0,20
		0–50	389	284	433	42,4	>100	0,12
		0–100	485	336	675	93,9	16,5	0,19
	НП3	0–20	100	56	146	31,5	85,4	0,32
		0–50	239	100	347	68,1	>100	0,28
		0–100	485	336	675	93,9	16,5	0,19
Увеличение влагозапасов за зиму	МП	0–20	28	2	76	17,1	12,2	0,61
		0–50	52	3	190	14,4	7,4	0,28
		0–100	63	11	211	49,9	17,1	0,79
	НП5	0–20	29	0	68	23,9	13,2	0,82
		0–50	56	0	113	38,7	6,7	0,69
		0–100	57	0	108	35,8	30,8	0,63
	НП3	0–20	37	11	84	19,7	29,6	0,53
		0–50	83	29	151	34,5	26,5	0,42
		0–100	127	43	238	50,6	0,40	

зимы происходит в основном за счет увеличения мощности нижней прослойки льда, под которой обычно наблюдается талый грунт.

При более высоком стоянии уровней грунтовых вод ленточные глины и суглинки насыщены многочисленными прослойками и линзами льда. Иногда наблюдается образование пустот в мерзлом слое за счет разобщенности ядер кристаллизации, неравномерного накопления льда в отдельных точках и возникновения значительных сил выпучивания. Все это приводит к значительному подъему поверхности почвы (до 20 см), смещению отдельных слоев, оползням на откосах каналов [Нестеренко, 1967].

Увеличение количества влаги и расширение ее при промерзании приводит к уменьшению объемной массы мерзлого почвогрунта (γ_m). При насыщении грунта водой до полной влагоемкости и выше ее в зоне промерзания объемная масса может быть рассчитана по уравнению:

$$\gamma_m = \rho / (1 + 1,09W_m), \quad (7)$$

где ρ – плотность, г/см³; W_m – весовая влажность мерзлой почвы, г/г.

Расчеты объемной массы мерзлого торфа по уравнению (7) при $W_m > 4,5$ г/г дали очень близкие значения к ее фактическим значениям. Следовательно, зная плотность твердой фазы почвы, мало изменяющейся в течение ряда лет, и определив влажность, можно рассчитать объемную массу и перевести весовую влажность в объемную (W_o), получить водоотдачу: $\mu = W_o - W_{ппв}$, где $W_{ппв}$ – полевая предельная влагоемкость, %.

Для облегчения расчетов были предложены графики и таблицы [Нестеренко, 1979].

Запас свободной влаги в слое мерзлого осушенного торфа иногда достигает 100 мм, в минеральных почвогрунтах – 150 мм.

По данным непрерывных наблюдений за высотой вспучивания в минеральных грунтах была получена зависимость ее за определенный период (от 3 до 15 сут) от условий зимнего режима:

$$\Delta H_p = 1,3 + 0,0535\Delta H_m - 0,012H_m - 0,0094H_c - 0,0047\Sigma t, \quad r = 0,76, \quad (8)$$

где H_p – высота вспучивания за период, см; ΔH_m – изменение глубины промерзания, см; H_m – общая глубина промерзания на начало периода, см; Σt – сумма среднесуточных температур воздуха за расчетный период, °С.

В откосах мелиоративных каналов процессы влагонакопления при промерзании проходят более интенсивно за счет более интенсивного притока грунтовых вод. При значительной скорости промерзания в верхнем слое откоса образуется большое количество тонких про-

слоек и линз льда толщиной до 5 мм. Мощная прослойка, толщина которой к весне достигает 6–10, а иногда и 15 см, формируется у нижней границы мерзлого слоя при заполнении каналов снегом и снижении скорости промерзания. Часто здесь же образуются значительные пустоты за счет неравномерного льдонакопления и вспучивания грунта. Наиболее интенсивно эти процессы протекают при наличии напорного водного питания. Весной при оттаивании грунтов по линзам и прослойкам льда наблюдается оплывание откосов каналов и их значительное разрушение, обильный вынос взвешенных и растворенных веществ в водоприемники.

В первые годы после строительства закрытых дренажных систем при наличии рыхлой засыпки над дренами и просадки ее талые поверхностные воды устремляются по трассам дрен и закрытых коллекторов, вызывая размыв верхнего оттаявшего слоя почвы, устьевых участков коллекторов. В отдельных точках через пустоты и рыхлую засыпку вода устремляется в дрены, что часто при недоброкачественном строительстве приводит к заилению дрен или к выносу растворенных питательных и взвешенных веществ из верхнего слоя почвы, значительному ухудшению качества воды в водоприемниках.

Был разработан и внедрен на значительных площадях способ защиты откосов каналов в морозоопасных грунтах [Нестеренко, 1967]. На дне канала устраивалась подпорная стенка и откосы перекрывались торфом, торфяным дерном, почвой из пахотного слоя или песком. На площадях, где глины или суглинки перекрыты слоем торфа мощностью до 0,5 м, работы были полностью механизированы: нижняя часть откосов каналов, которая проходит в минеральном грунте, перекрывалась слоем торфа до 20–25 см, срезаемого с приканавной полосы, и засеивалась травами. В течение последующих 15–20 лет на таких каналах разрушения не наблюдались. Для сохранения устойчивости откосов более мелкой регулирующей сети каналов целесообразно выполнять их в виде ложбин с заложением откосов до 6–8-кратного. Засыпку дрен необходимо проводить с запасом на просадку грунта.

Предложенные способы защиты откосов каналов и дренажных систем в морозоопасных грунтах широко использовались в мелиоративном строительстве в Карелии, в Ленинградской и других областях Северо-Запада и Европейского Севера России. Они не только увеличивают эксплуатационный срок службы гидротехнических сооружений, способствуют сохранению почвенного покрова, но играют и значительную роль в уменьшении отрицательных последствий

мелиораций на водные экосистемы – снижении эрозии, выноса растворенных и взвешенных веществ в водоприемники. Способ защиты дорожного полотна от промерзания с помощью торфяной дернины применялся в Финляндии [Frost..., 1997]

Был предложен и защищен авторским свидетельством способ мелиорации длительно сезонно мерзлотных почв тяжелого механического состава [Нестеренко, 1989]. Изобретение относится к сельскому хозяйству, в частности, к тепловой мелиорации почв. Оно позволяет снизить глубину промерзания почвы с улучшением ее структуры, водного и питательного режимов путем создания дернового подслоя в подошве пахотного слоя, что изменяет и улучшает термический режим почвы.

Литература

Климат Карелии: изменчивость и влияние на водные объекты и водосборы. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2004. 224 с.

Ломтадзе В. Д. Физико-механические свойства позднеледниковых ленточных глин окрестностей Ленинграда // Зап. Ленингр. горн. ин-та. 1965. Т. XVIII, вып. 2.

Нестеренко И. М. Устойчивость и способы крепления откосов осушительных каналов в морозоопасных грунтах // Гидротехника и мелиорация. 1967. № 3. С. 92–96.

Нестеренко И. М. Методы исследования промерзающих торфяных и минеральных почвогрунтов

в КАССР // Метеорология и гидрология. 1971. № 3. С. 58–64.

Нестеренко И. М. Мелиорация земель Европейского Севера Европейского Севера СССР. Л.: Наука, 1979. 260 с.

Нестеренко И. М. Рекомендации по проектированию мелиоративных систем в Карельской АССР. Петрозаводск, 1980. 74 с.

Нестеренко И. М. Авторское свидетельство № 1554791 «Способ мелиорации длительно сезонно мерзлотных почв тяжелого механического состава». М.: Госкомизобретений, 1989. (Приоритет изобретения 10.03.1988.)

Нестеренко И. М., Симанов Ю. Г. Динамика влажности почвогрунтов в зимний период // Почвоведение. 1969. № 5. С. 105–112.

Нестеренко И. М., Стрелкова А. А. Корзинский научный стационар Республики Карелия // Мелиоративно-болотные стационары России. Составители Маслов Б. С. (РАСХН), Константинов В. К. (НИИЛХ), Бабиков Б. В. (НИИЛХ), Аhti Э. (НИИЛеса, Финляндия). Научный центр VANTAA. METLAA (Финляндия), 2006.

Frost action soils. Rotterdam: Lulea University of Technology, 1997. 540 p.

International Symposium on Physics, Chemistry, and Ecology of Seasonally Frozen Soils. Fairbanks, Alaska, June 10–12, 1997. 573 p.

Nesterenko I. M. Subsidence and wearing out of peat soils as a result of reclamation and agricultural utilization of marshland // Proc. of the VIPC. Vol. I. Poznan, Poland, 1976. P. 218–234.

Nesterenko I. M., Sinkevitch E. I. Mire drainage and change of suspended substance and solute removal into water courses // Proc. of IX IPC. Uppsala, Sweden, 1992. P. 285–295.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Нестеренко Иван Михайлович

ведущий научный сотрудник, д. г. н.
Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: nim@onego.ru
тел.: 89214604586

Матвеев Сергей Леонидович

главный гидролог
Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: sergey.matveev.1960@mail.ru
тел.: 89114050642

Nesterenko, Ivan

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Science
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: nim@onego.ru
tel.: 89214604586

Matveev, Sergey

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Science
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: sergey.matveev.1960@mail.ru
tel.: 89114050642