

**Закономерности промерзания грунтов, дорожных одежд и
земляного полотна**
Козлова К.С.

Белорусский национальный технический университет

Введение

Важнейшим источником увлажнения и климатическими факторами, влияющими на водно-тепловой режим, являются атмосферные участки, испарение, амплитуда и быстрота колебаний температуры воздуха и почвы, продолжительность морозного периода, направление и скорость ветра, мощность снежного покрова, глубина промерзания грунта, миграция воды застаивающаяся в боковых канавах, затрудненный поверхностный сток и вода, поступающая от грунтовых вод

Глубина промерзания грунта земляного полотна

Промерзание грунтов – это переход грунта из одного состояния в другое с резким изменением его физико-механических свойств. Это сложный процесс, протекающий по-разному для различных видов грунтов. Все грунты по особенностям их промерзания в природных условиях подразделяются на три основные группы:

I – суглинки и глины;

II – супеси, мелкие и пылеватые пески;

III – средние пески, крупнозернистые и крупнообломочные грунты.

Глубина и характер промерзания грунтов зависят от температуры воздуха, высоты снежного покрова, растительности, типа грунта, степени увлажнения его и ряда других метеорологических факторов.

По данным наблюдений, глубина проникновения нулевой изотермы при одинаковой сумме отрицательных среднесуточных температур воздуха (635 градусо-дней) для различных типов грунтов разная: для суглинков – 135 см; мелких и пылеватых песков – 139 см; крупнообломочных грунтов – 177 см. Неодинаковы также глу-

бина проникновения отрицательной температуры в грунт и температура замерзания грунтов. Крупнообломочные грунты замерзают при температуре, близкой к 0°C , с образованием заметной границы между талым и мерзлым грунтами. При промерзании мелкодисперсных грунтов образуется зона промерзания (слой, в котором происходят фазовые превращения воды), разделяющая полностью промерзший и талый грунты.

Температура замерзания мелкодисперсных грунтов более низкая, чем у крупнообломочных грунтов. Это связано с тем, что мелкозернистые грунты имеют мелкие поры и повышенное количество связанной воды, которая замерзает при значительно низшей температуре, чем свободная вода.

Грунтовая вода обычно является связанной, плотность ее более единицы, содержит, как правило, растворимые соли, взвешенные частицы, испытывает большое давление со стороны защемленного воздуха, имеет меньшую степень подвижности, чем вода, находящаяся в свободном состоянии. Совокупность указанных свойств как раз и понижает температуру замерзания грунтовой влаги, а вместе с ней и самого грунта. Установлено, что все грунты замерзают при температуре ниже 0°C . Существенное влияние на это оказывают вид грунта, его влажность и продолжительность действия отрицательной температуры.

Например, глинистый грунт с влажностью 30 % замерзает при температуре от минус $1,0^{\circ}\text{C}$ до минус $2,0^{\circ}\text{C}$, а песок с 10 %-ной влажностью – при температуре минус $0,5^{\circ}\text{C}$. Это говорит о том, что глубина промерзания грунтов зависит не только от вида грунта, но и от его влажности. Чем выше температуропроводность грунта, тем больше глубина его промерзания. Влажность грунта в начальный момент способствует промерзанию, так как увеличивает теплопроводность, а в дальнейшем процесс замедляется. Это связано с тем, что при замерзании воды выделяется теплота льдообразования, поэтому скорость и глубина промерзания более влажного грунта будут меньше, чем грунта с меньшей влажностью.

Для условий Беларуси средняя скорость промерзания грунтов составляет $1,3\text{--}2,1$ см/сут, а оттаивания – $2,3\text{--}4,0$ см/сут и зависит от типа грунта и степени его уплотнения. Так, песчаные грунты обладают малой поверхностной энергией. Они промерзают без образования ледяных линз. Пылеватые грунты обладают значительной

поверхностной энергией и небольшим сопротивлением подъему воды, поэтому в них происходит интенсивное накопление влаги с образованием ледяных линз при промерзании. Глинистые грунты обладают огромной поверхностной энергией и большим сопротивлением перемещению воды в порах, поэтому скорость перемещения в них небольшая. При отрицательных температурах они не успевают промерзнуть быстрее, чем вода поднимается в активную зону.

На глубину промерзания влияет многообразие факторов, которые целесообразно разделить на две группы.

К *первой* группе относятся факторы зонального характера (рельеф местности, тип грунта и др.), величина которых почти не изменяется во времени.

Во *вторую* группу входят факторы, существенно изменяющиеся во времени. К ним относятся: сумма отрицательной температуры воздуха, продолжительность и интенсивность действия отрицательной температуры, высота снежного покрова, залегание уровня грунтовых вод, влажность грунта и др. Указанные факторы не только трудно определяемые, но некоторые из них не поддаются учету, поэтому и результаты, полученные предлагаемыми способами, различные (таблица 1).

Из таблицы 1 видно, что глубина промерзания, определенная по формулам для одной и той же местности (г. Минск), для одного и того же типа грунта, неодинакова, а колеблется в широких пределах. Разность между максимальной и минимальной глубинами промерзания составляет более 50 %. Это можно объяснить тем, что формулы учитывают действие не всех, а только некоторых факторов. Учесть существенное влияние большого числа факторов на глубину промерзания, по мнению авторов, можно, используя методы математической статистики для обработки данных натурных наблюдений.

Обоснование и выбор метода определения глубины промерзания грунтов

Из анализа работ по определению глубины промерзания грунтов следует, что она в основном зависит от климатических, гидрологических, грунтовых и других природных условий, которые варьируются в широких пределах, поэтому и глубина промерзания не остается постоянной, а изменяется из года в год. В связи с этим, авторы

считают, что глубину промерзания грунтов можно рассматривать как случайную величину, и для ее определения применять вероятностные методы.

Применение теории вероятностей к определению глубины промерзания грунтов основано на известной центральной предельной теореме теории вероятностей. Исследованиями авторов статьи установлено, что глубина промерзания грунтов подчиняется нормальному закону распределения, который вполне может быть применен для ее определения. С помощью кривых распределения (обеспеченности) можно определить глубину промерзания грунтов любой заданной обеспеченности в пределах данного периода наблюдений.

В практике ряды наблюдений (на метеорологических станциях) за глубиной промерзания грунтов бывают короткими и не дают возможности построить надежную кривую распределения (для Беларуси ряды наблюдений составляют 20–30 лет). В связи с этим, разными авторами разработаны теоретические кривые распределения, с помощью которых можно определить величину редкой повторяемости, выходящую за пределы ряда наблюдений. К ним относят: биномиальную кривую распределения С. И. Рыбкина, трехпараметрическое Г-распределение С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля и двойное. Сравнительные данные фактических глубин промерзания грунтов и теоретических, определенных по указанным кривым распределения, приведены в таблице 1.

Таблица 1. Сравнение фактической максимальной глубины промерзания с глубиной промерзания, определенной по трем типам распределения

Процент обеспеченности	Фактическая глубина промерзания, см	Глубина промерзания грунтов, см, при типах распределения		
		Биномиальное С. И. Рыбкина ($C_s = 2C_v$)	Трехпараметрическое Г-распределение С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля	Двойное экспоненциальное Э. Гумбеля

1	–	152	149	179
3	–	132	132	150
5	139	123	122	136
10	118	110	109	118
20	91	94	95	98
50	65	69	70	68
99	–	24	23	19

Таким образом, данные таблицы 1 подтверждают, что для определения глубины промерзания грунтов могут быть использованы указанные типы распределений и применены методы математической статистики.

Определение глубины промерзания грунтов статистическим методом

Методика определения глубины промерзания грунтов статистическим методом заключается в обработке статистических данных по глубине промерзания грунтов, которые систематически ведутся на метеостанциях. Полученные наблюдения за глубиной промерзания на метеостанциях в обобщенном виде учитывают все факторы, влияющее на промерзание грунтов. В зависимости от наличия фактических данных о глубине промерзания может быть два случая, а, следовательно, и два разных подхода к определению глубины промерзания грунтов заданной обеспеченности.

Первый случай – данные наблюдений за глубиной промерзания грунта имеются, то есть в данном конкретном районе проводились наблюдения за глубиной промерзания не менее чем 10 лет.

Второй случай – данные наблюдений за глубиной промерзания в данном районе отсутствуют (наиболее распространенный случай в дорожном строительстве).

Определение расчетной глубины промерзания грунтов при наличии данных многолетних наблюдений

Порядок расчета глубины промерзания грунтов при наличии многолетних данных будет следующим.

1. При наличии данных наблюдений за глубиной промерзания грунтов, проводимых на метеостанциях, составляется статистиче-

ский ряд максимальных глубин промерзания грунтов за каждый год в убывающем порядке.

2. Вычисляется средняя арифметическая величина ряда, то есть средняя глубина промерзания, по формуле

$$Z_{\text{ср}} = \frac{\sum Z_i}{n}, \quad (1)$$

где $\sum Z_i$ – суммарная глубина промерзания грунта за n лет;
 n – число лет наблюдений.

3. Определяют модульные коэффициенты для каждого года наблюдения:

$$K_i = \frac{Z_i}{Z_{\text{ср}}}, \quad (2)$$

где Z_i – глубина промерзания грунта i -го года.

4. Определяют коэффициент вариации C_v по формуле

$$C_v = \sqrt{\frac{\sum (K_i - 1)^2}{n - 1}}. \quad (3)$$

5. Вычисляют коэффициент асимметрии C_s (если число лет наблюдений более 50) по формуле

$$C_s = \sqrt{\frac{\sum (K_i - 1)^3}{(n - 1) \cdot C_v^3}}. \quad (4)$$

Если число лет наблюдений менее 50, тогда:

$$C_s = 2C_v. \quad (5)$$

6. По вычисленным коэффициентам вариации C_v и асимметрии C_s и при заданном проценте обеспеченности по таблицам С. И. Рыбкина (биномиальная кривая распределения) при $C_s = 2C_v$ или С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля (трехпараметрическое Γ -распределение) при $C_s = 2C_v$ определяется модульный коэффициент k_s . Для двойного экспоненциального распределения модульный коэффициент k_s определяется по формуле

$$k_s = 1 \pm C_v \cdot \left(\frac{y - \bar{y}_n}{\sigma_n} \right), \quad (5)$$

где y – действительное отклонение, то есть обратная функция $y = \ln(-\ln F)$, значение это приведено в таблице IX Н. В. Смирнова и Дунина-Барковского;

\bar{y}_n, s_n – среднее и стандартное отклонения; находятся в зависимости от числа лет наблюдений.

Модульный коэффициент k_s может быть определен по номограмме рис.

1

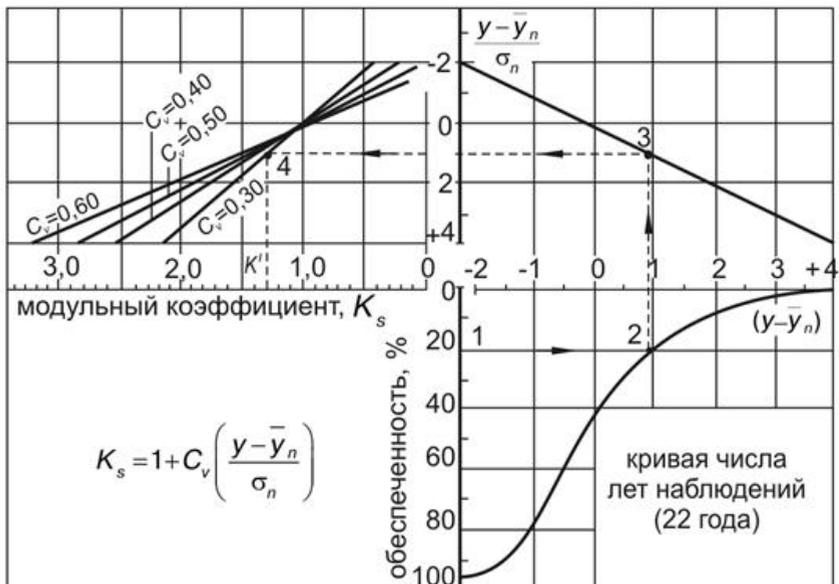


Рис. 1. Номограмма для определения модульного коэффициента k_s

7. Максимальная глубина промерзания грунта под снежным покровом заданной обеспеченности определяется по формуле

$$Z = k_s \cdot Z_{r.n.} \quad (6)$$

8. Максимальная глубина промерзания грунта земляного полотна заданной обеспеченности определяется из выражения

$$Z = k_n \cdot k_{\text{сн}} \cdot Z_0 \quad (7)$$

где k_n – коэффициент перехода от глубины промерзания грунта под снегом к глубине промерзания его без снега.

Заданную обеспеченность для дорог общего пользования рекомендуется принимать для дорог категорий:

I – 1 %;

II – 2 %;

III – 5 %;

IV – 10 %;

V – 20 %.

Коэффициент перехода k_n – принимать соответственно для категорий:

I – $k_n = 2,00$;

II – $k_n = 1,90$;

III – $k_n = 1,80$;

IV – $k_n = 1,75$;

V – $k_n = 1,70$.

Определение глубины промерзания грунтов по второму способу

В основу этого метода положены карты изолиний средней максимальной глубины промерзания грунтов и коэффициента вариации (рис. 2 и 3), которые составлены для Республики Беларусь и Европейской части СНГ.

Порядок расчета следующий.

1. По карте изолиний (см. рис. 2) находят средняя максимальная глубина промерзания грунта под снегом $Z_{\text{ср}}$, а по карте изолиний (см. рис. 3) – коэффициент вариации C_v .

2. По формуле (4) определяют коэффициент асимметрии C_s .

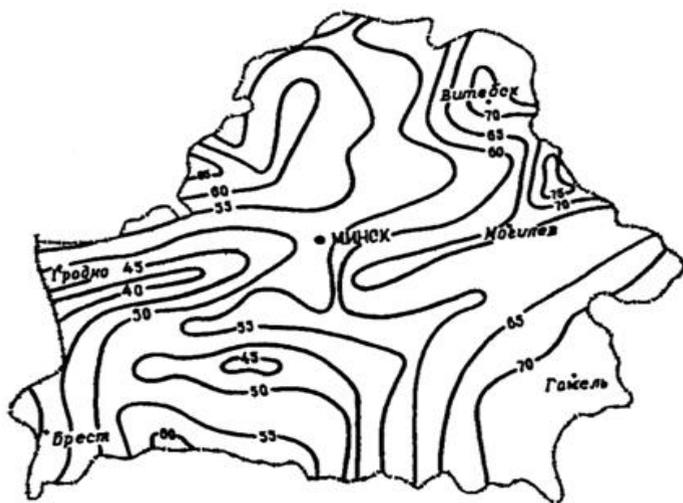


Рис. 2. Карта изолиний средней многолетней глубины промерзания грунта

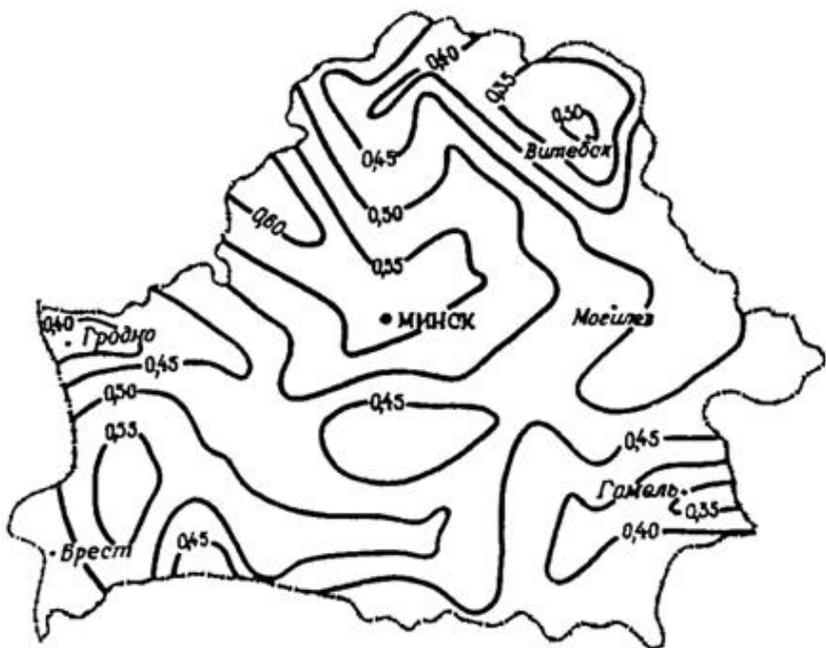


Рис. 3. Карта изолиний коэффициента вариации

3. По найденным значениям C_v , C_s и заданному проценту обеспеченности подбирается соответствующий модульный коэффициент k_s по таблицам С. И. Рыбкина.

4. По формуле (7) определяется глубина промерзания грунта земляного полотна $Z_{зп}$ заданной обеспеченности.

Районирование территории Республики Беларусь по глубине промерзания грунтов

Как следует из изложенного выше, глубина промерзания грунтов является одним из основных факторов водно-теплового режима.

Разработанный метод определения глубины промерзания грунтов с использованием карт изолиний, то есть второй способ, позволил произвести районирование территории Республики Беларусь по глубине промерзания.

В основу районирования территории республики положены грунтовые карты, разработанные академиком АН БССР П. П. Роговым, карты изолиний глубины промерзания грунтов, разработанные авторами статьи, данные о сумме отрицательных температур воздуха (сумма морозо-дней) и некоторые другие.

Территорию Республики Беларусь разделили на три зоны по глубине промерзания грунтов (рис. 4):

I-я – Юго-Западная. Граница ее с Запада – государственная граница Республики Беларусь, с Востока – граница зоны проходит по городам: Вороново – Ивье – Новогрудок – Ганцевичи – Житковичи – Лельчицы;

II-я – находится между границами I-й и III-й зон;

III-я – Северо-Восточная. Граница ее с Востока – государственная граница Республики Беларусь, с Запада граница проходит по городам: Шаркавщина – Глубокое – Докшицы – Борисов – Березино – Кличев – Бобруйск – Жлобин – Будо-Кошелево – Ветка.



Рис. 4. Районирование Республики Беларусь по глубине промерзания грунтов

I-я зона характеризуется средней многолетней глубиной промерзания грунтов в пределах 45–50 см и суммой градусо-дней мороза 500–800; II-я зона – средняя многолетняя глубина промерзания грунтов – 50–60 см и 800–1000 градусо-дней мороза; III-я зона, соответственно, 60–75 см и 1000–1300 градусо-дней мороза. Указанные границы зон (см. рис. 4) приблизительно совпадают с климатическими картами: температурой воздуха в самые холодные периоды года, с высотой снежного покрова и количеством дней его стояния, с почвенно-грунтовой картой и др.

Измерение глубины промерзания почвы на метеостанциях

В РБ на метеостанциях глубину промерзания измеряют с помощью мерзлотомера АМ-21. Его действие основано на свойстве дистиллированной воды замерзать и оттаивать при температуре 0°С и ниже. Определение глубины промерзания почвы производят прощупыванием замерзшего столбика воды в резиновой трубке, погруженной в специальной защитной трубе в почву: нижняя граница замерзшего столбика принимается за глубину промерзания почвы, верхняя – за глубину оттаивания.

Мерзломер состоит из следующих основных частей: резиновой трубки 1 с ниппелями на концах; шнура 2 или деревянной штанги (с гильзой 3 и колпачком 4 для извлечения резиновой трубки из защитной трубы); защитной винипластовой трубы 5 (с заглушкой), в которую помещается резиновая трубка со штангой (или шнуром)

Мерзломеры устанавливают в двух частях наблюдательного участка на расстоянии не менее 5 м.

Для установки защитной трубы в почве с помощью бура делают вертикальную скважину. В нее опускают защитную трубу так, чтобы нулевое деление или риска на ее наружной поверхности совпала с поверхностью почвы. Зазоры между трубой и стенками скважины плотно засыпают землей. В защитную трубу опускают резиновую трубку, прикрепленную к вытяжной штанге или шнуру. Резиновая трубка предварительно должна быть заполнена дистиллированной водой или профильтрованной дождевой водой. Ставим трубку в защитную трубу

Весной после полного оттаивания почвы мерзломер убирают с поля. Если до снятия мерзлотомера на наблюдательном участке производят работы, то следует обеспечить сохранность прибора.

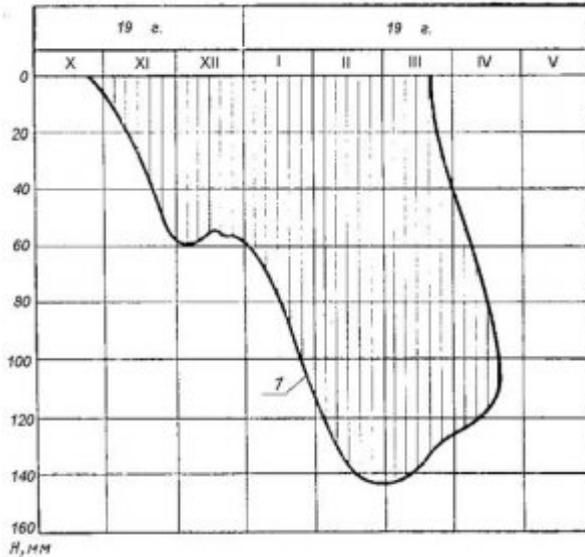


Рис.5. Образец графического оформления результатов наблюдений за ходом промерзания грунта
l - граница слоя грунта в твердомерзлом состоянии

Список литературы

1. Леонович, И. И. Механика земляного полотна / И. И. Леонович, Н. П. Вырко. – Минск: Наука и техника, 1975. – 232 с.
2. Вырко, Н. П. Строительство и эксплуатация лесовозных дорог: учебник для студ. вузов специальности «Лесоинженерное дело» / Н. П. Вырко. – Минск: БГТУ, 2005. – 446 с.
3. Гумбель, Э. Статистика экстремальных значений / Э. Гумбель. – М.: Мир, 1965. – 308 с.
4. Митропольский, А. К. Техника статистических вычислений / А. К. Митропольский. – М.: Физматгиз, 1961. – 64 с.
5. Пузаков, Н. А. Водно-тепловой режим земляного полотна автомобильных дорог / Н. А. Пузаков. – М.: Автотрансиздат, 1960. – 128 с.
6. Леонович, И. И. Статистический метод определения глубины промерзания грунтов / И. И. Леонович, Н. П. Вырко // Отопле-

ние, вентиляция и строительная теплофизика: сб. – Минск: Вышэйшая школа, 1971. – Вып. 1. – С. 157–160.

7. Смирнов, Н. В. Курс теории вероятностей и математической статистики / Н. В. Смирнов, Н. В. Дунин-Барковский. – М.: Наука, 1965. – 230 с.