

Иван Иосифович ЛЕОНИЧ,
доктор технических наук,
профессор кафедры
"Строительство
и эксплуатация дорог"
Белорусского национального
технического университета

Николай Павлович ВЬРКО,
доктор технических наук,
профессор кафедры
"Строительство
и эксплуатация дорог"
Белорусского национального
технического университета

ГЛУБИНА ПРОМЕРЗАНИЯ ГРУНТОВ — ВАЖНЕЙШИЙ ФАКТОР ВОДНО-ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА

DEPTH OF SOIL FREEZING —
A DETERMINING FACTOR
OF THE WATER-HEAT REGIME
OF THE ROADBED

В статье рассмотрены процессы увлажнения и перемещения влаги в земляном полотне, глубина промерзания и методы определения ее расчетных значений в зависимости от наличия статистических данных наблюдений и по картам изолиний исходных параметров. Обосновано районирование территории Беларуси по глубине промерзания грунтов и прогнозирование вероятности образования пучин. Информация, содержащаяся в статье, предназначена для использования при проектировании автомобильных дорог и разработке противоупучинных мероприятий.

This article describes the moistening processes and moisture movement in the roadbed, depth of soil freezing and methods of determining its calculated values depending on the availability of the statistics observed and by the maps of isolines of the initial parameters. Zoning of the Belarusian territory according to the depth of soil freezing and prediction of the probability of soil heaving have been substantiated. The information contained in the article is intended for road design and antiheaving measures.

ВВЕДЕНИЕ

Водно-тепловой режим — это закономерное изменение влажности и температуры в различных точках земляного полотна в течение года [1]. Изменения влажности и температуры в земляном полотне тесно связаны между собой, а поэтому рассматриваются комплексно в виде водно-теплого режима.

Водно-тепловой режим земляного полотна и окружающей местности имеют тесную связь, но и определенное отличие, которое заключается в том, что теплопроводность и теплоемкость покрытий и поверхности грунта за пределами дороги неодинаковы; структуры грунта земляного полотна и грунта окружающей местности разные. В процессе эксплуатации дороги вода и снег систематически удаляются с покрытия, а на окружающей местности задерживаются продолжительное время. Отличие водно-теплого режима дорожной конструкции и окружающей местности также во многом зависит от технологии возведения земляного полотна, источников получения грунта и типа машин, выполняющих строительство.

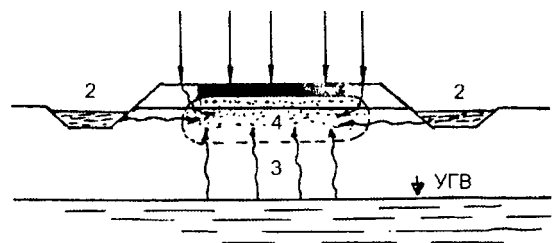
При строительстве земляного полотна из боковых резервов, привозного грунта происходит нарушение структуры грунта, в то время как местный грунт разрушению не подвергается. В земляном полотне под действием уплотняющих средств, под воздействием движущегося транспорта создается специфический водно-тепловой режим, под влиянием которого формируется новое равновесное состояние грунта, а влажность, температура и плотность грунта колеблются в определенных пределах и подчиняются циклическому закону в течение года.

УВЛАЖНЕНИЕ И ПЕРЕДВИЖЕНИЕ ВЛАГИ В ГРУНТАХ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА

Основным условием обеспечения устойчивости и прочности системы "дорожная одежда — земляное полотно" является недопущение переувлажнения или чрезмерного колебания влажности грунта земляного полотна.

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, застаивающейся в боковых канавах, затрудненный поверхностный сток и вода, поступающая от грунтовых вод (рис. 1) [2]. Атмосферные осадки 1, выпадающие на поверхность дороги, могут просачиваться через водопроницаемую дорожную одежду (гравийная, белое шоссе, мостовая) и обочины к грунту основания.

При высоком расположении уровня грунтовых вод 3 (см. рис. 1) увлажнение земляного полотна происходит по капиллярам снизу вверх. В зимнее время капиллярная вода является основным источником льдонакопления в грунтовых основаниях, подверженных пучинообразованию. Вода, застаивающаяся на поверхности дороги или в боковых канавах, вследствие затрудненного поверхностного стока 2 может достигнуть грунта земляного полотна в результате действия пленочного или капиллярного механизма передвижения влаги. Следует отметить, что капиллярная вода в зимнее время является основным источником льдонакопления в грунтах земляного полотна [3].



- 1 — атмосферные осадки;
2 — поверхностная вода (вода в боковых канавах);
3 — капиллярная вода от уровня грунтовых вод;
4 — парообразная вода

Рис. 1. Источники увлажнения земляного полотна

При проектировании и строительстве дорог, проходящих через лесной массив, необходимо учитывать особенность водно-теплового режима, складывающегося в нем, при этом есть факторы, которые необходимо учитывать в обязательном порядке. Это связано с тем, что в лесу, как правило, должны быть определен гидрологический режим и водообеспеченность лесных и болотных экосистем.

Научными сотрудниками Института леса НАН Беларуси, Белорусского государственного технологического университета (БГТУ) изучены особенности водного режима хвойных лесов, насаждений на избыточно увлажненных лесных землях на площади свыше 230 тыс. га. Осушение данных земель вначале способствовало повышению продуктивности и устойчивости лесов, улучшению доступности лесного фонда, развитию транспортной сети и строительству дорог. В то же время на определенной площади лесных переувлажненных земель ожидаемый эффект не получен. Это связано с недооценкой экологической роли болот и заболоченных лесов. Установлено, что недостаток влаги или ее избыток ведет к ослаблению древостоев, отражается на их состоянии. Как результат — массовое размножение вредителей и болезней древостоя, гибель деревьев, усыхание ельников. В результате развития корневых гнилей и сосудистых микозов возникла угроза утраты формации ясеневых лесов. Это обусловило необходимость проведения работ по повторному заболочиванию лесных территорий. Тем самым усложняются условия для строительства и эксплуатации дорог. С одной стороны, для строительства дорог, проходящих через лесной массив, необходимо было бы осушать территорию, с другой — осушение наносит вред лесам.

Для дорог, построенных в лесу, существенным источником увлажнения грунтов земляного полотна является миграция влаги из боковых канав, в которых вода может застаиваться 40 и более суток. В связи с этим, авторами был исследован процесс передвижения (миграции) влаги из боковых канав в тело земляного полотна за счет действия градиента влажности. Был рассмотрен случай, когда земляное полотно расположено на водоупоре (наиболее тяжелый случай).

В основу решения данной задачи положено уравнение Дорси, которое описывает общий поток влаги в грунтах [1]. Оно имеет вид:

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \cdot k \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial x}, \quad (1)$$

где W — влажность грунта, доли от объема грунта;
 t — время увлажнения, сут;
 x — расстояние передвижения влаги (координата), м;
 k — коэффициент влагопроводности грунта, м/сут;
 Φ — гидравлический потенциал.

Применив уравнение (1) для условий миграции влаги из боковых канав, получили выражение, позволяющее определить максимальное расстояние, на которое может мигрировать влага за период действия источника увлажнения

$$W_{(x,t)} = W_n \cdot \left[1 - \Phi \left(\frac{x}{2\sqrt{kt}} \right) \right] + \frac{W_0}{2} \cdot \left[2\Phi \left(\frac{x}{2\sqrt{kt}} \right) - \Phi \left(\frac{x-l}{2\sqrt{kt}} \right) - \Phi \left(\frac{x+l}{2\sqrt{kt}} \right) \right], \quad (2)$$

где W_n — полная влагоемкость грунта, %;
 x — текущая координата;
 k — коэффициент влагопроводности грунта, м/сут;
 t — время увлажнения, сут;
 W_0 — естественная влажность грунта, %;
 l — расстояние от источника увлажнения, м.

Анализ полученных расчетов показывает, что интенсивное водонасыщение грунта происходит в первые 5 сут, а по истечении 15–25 сут почти прекращается (рис. 2). Увеличение влажности грунта в первые 5 суток достигает 60 %–70 % (рис. 3) по отношению к первоначальной. Насыщение грунта водой наступает тем раньше, чем меньше его первоначальная влажность [4].

Проведенные исследования позволили установить максимальное расстояние от источника увлажнения, на которое способна мигрировать влага за время действия источника увлажнения в зависимости от типа грунта. Это расстояние за 20 сут действия источника увлажнения составляет: для глинистых грунтов — 2,5–3,5 м; суглинистых — 3,0–4,0 м; супесчаных — 7,0–9,0 м, для мелкого песка — 27,0–36,0 м [2].

Важная характеристика водно-теплового режима земляного полотна — коэффициент влагопроводности грунта, его определение является необходимым.

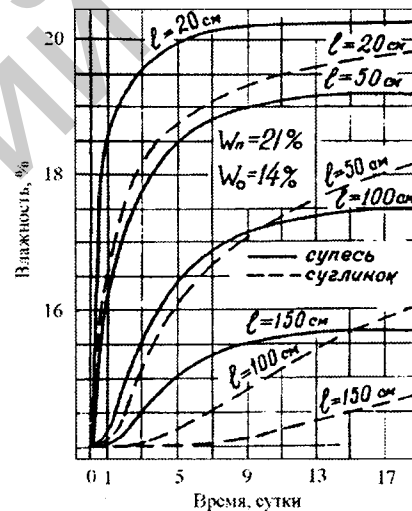


Рис. 2. Изменение влажности грунтов в зависимости от расстояния до источника увлажнения и времени его действия

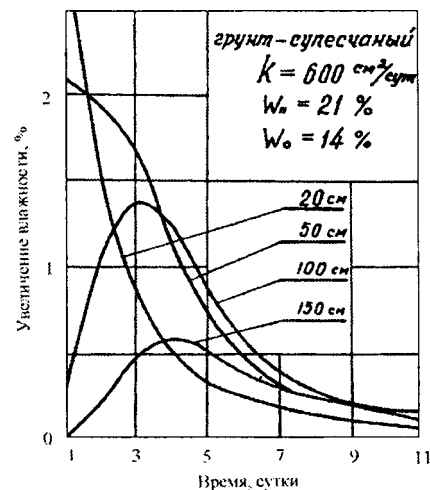


Рис. 3. Интенсивность нарастания влажности грунтов в зависимости от расстояния до источника увлажнения и времени его действия

Таблица 1. Результаты определения коэффициента влагопроводности грунта

| Тип грунта | Полная влагоемкость грунта, % | Плотность грунта ρ_c , г/см ³ | Коэффициент | |
|--|-------------------------------|---|------------------|---|
| | | | уплотнения k_y | влагопроводности k , см ² /ч |
| Супесь: оптимальная влажность $W_{оп} = 10,0\%$; $\rho_c = 2,01$ г/см ³ ; $W_T = 15,7\%$ | 16,2 | 1,70 | 0,85 | 190,0 |
| | 15,5 | 1,80 | 0,90 | 110,0 |
| | 15,0 | 1,5 | 0,92 | 70,0 |
| | 14,6 | 1,87 | 0,93 | 49,1 |
| | 13,0 | 1,95 | 0,97 | 20,0 |
| | 10,0 | 2,01 | 1,00 | 8,5 |
| Супесь пылеватая: оптимальная влажность $W_{оп} = 12,0\%$; $\rho_c = 1,91$ г/см ³ ; $W_T = 23,8\%$ | 19,2 | 1,76 | 0,92 | 15,8 |
| | 19,5 | 1,78 | 0,93 | 10,0 |
| | 20,3 | 1,81 | 0,95 | 7,2 |
| | 20,8 | 1,83 | 0,96 | 6,6 |
| | 21,0 | 1,88 | 0,98 | 4,4 |
| | 21,5 | 1,91 | 1,00 | 2,9 |

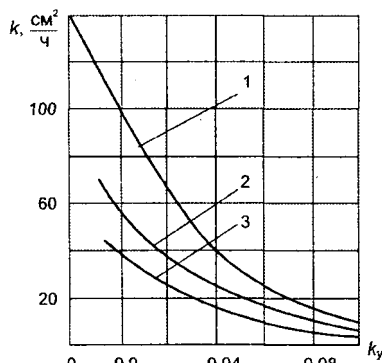
1 — грунт супесчаный; 2 — глина пылеватая;
3 — супесь пылеватая

Рис. 4. Зависимость коэффициента влагопроводности грунта от степени уплотнения

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЛАГОПРОВОДНОСТИ ГРУНТА

Для определения коэффициента влагопроводности грунта авторы использовали методику, разработанную профессором И. А. Золотарем [5]. Результаты исследования приведены в таблице 1 и на рис. 4.

Исследования показывают, что коэффициент влагопроводности грунта зависит от степени его уплотнения [5]. Следовательно, увеличение степени уплотнения грунта земляного полотна является одним из наиболее эффективных мероприятий по стабилизации водно-теплового режима дорожной конструкции. Другим важным фактором, который необходимо учитывать при проектировании дорог, является глубина промерзания грунта.

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 [6, 7]:

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 [6], 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 глубина проникновения отрицательной температуры в грунт и температура заморозания грунтов. Крупнообломочные грунты заморают при температуре, близкой к 0 °С, 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 заморозания мелкодисперсных грунтов более низкая, чем у крупнообломочных грунтов. Это связано с тем, что мелкозернистые грунты имеют мелкие поры и повышенное количество связанной воды, которая заморают 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 заземленного воздуха, имеет меньшую степень подвижности, чем вода, находящаяся в свободном состоянии. Совокупность указанных свойств как раз и понижает температуру заморозания грунтовой влаги, а вместе с ней и самого грунта. Установлено, что все грунты заморают при температуре ниже 0 °С. Существенное влияние на это оказывают вид грунта, его влажность и продолжительность действия отрицательной температуры.

Например, глинистый грунт с влажностью 30 % заморают при температуре от минус 1,0 °С до минус 2,0 °С, а песок с 10 %-ной влажностью — при температуре минус 0,5 °С. Это говорит о том, что глубина промерзания грунтов зависит не только от вида грунта, но и от его влажности. Чем выше теплопроводность 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 заморозании воды

Таблица 2. 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 |

выделяется теплота льдообразования, поэтому скорость и глубина промерзания более влажного грунта будут меньше, чем грунта с меньшей влажностью.

Вопросу промерзания грунта посвящены работы многих исследователей: М. Н. Гольдштейна, В. С. Лукьянова, И. И. Леоновича, И. А. Золотаря, Н. А. Пузакова, В. М. Сиденко, А. Я. Тулаева и др. Анализируя данные исследования, а также проведенные авторами статьи, можно сделать заключение, что 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 2). Из таблицы 2 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 [8, 9]. 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 экспоненциальное распределение Э. Гумбеля. Сравнительные данные фактических глубин промерзания грунтов и теоретических, определенных по указанным кривым распределения, приведены в таблице 2.

Таким образом, данные таблицы 2 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, влияющие 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 [4, 10].

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 конкретном 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 наблюдений будет следующим.

1. При наличии данных наблюдений за глубиной промерзания грунтов, проводимых на метеостанциях, составляется статистический ряд максимальных глубин промерзания грунтов за каждый год в убывающем порядке.

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

$$Z_{cp} = \frac{\sum Z_i}{n}, \tag{3}$$

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

3. Определяют модульные коэффициенты для каждого года наблюдения:

$$k_i = \frac{Z_i}{Z_{cp}}, \tag{4}$$

где Z_i — глубина промерзания грунта i -го года.

4. Определяют коэффициент вариации C_v по формуле

$$C_v = \sqrt{\frac{\sum (k_i - 1)^2}{n - 1}}. \tag{5}$$

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

$$C_s = \sqrt{\frac{\sum (k_i - 1)^3}{(n - 1) \cdot C_v^3}}. \tag{6}$$

Если число лет наблюдений менее 50, тогда:

$$C_s = 2C_v. \tag{7}$$

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 $C_s \neq 2C_v$ определяется модульный коэффициент k_s . Для двойного экспоненциального распределения модульный коэффициент k_s определяется по формуле

$$k_s = 1 \pm C_v \cdot \left(\frac{y - \bar{y}_n}{\sigma_n} \right), \tag{8}$$

где y — действительное отклонение, то есть обратная функция $y = \ln(-\ln\Phi)$, значение это приведено в таблице IX Н. В. Смирнова и Дунина-Барковского [11];

\bar{y}_n, σ_n — среднее и стандартное отклонения; находятся в зависимости от числа лет наблюдений [11].

Модульный коэффициент k_s может быть определен по номограмме рис. 5, построенной авторами статьи.

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

$$Z = k_s \cdot Z_{cp}. \tag{9}$$

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

$$Z_{zn} = k_n \cdot k_s \cdot Z_{cp}, \tag{10}$$

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. 6 и 7), которые составлены для Республики Беларусь и Европейской части СНГ.

Порядок расчета следующий.

1. По карте изолиний (см. рис. 6) находят среднюю максимальную глубину промерзания грунта под снегом Z_{cp} , а по карте изолиний (см. рис. 7) — коэффициент вариации C_v .

2. По формуле (7) определяют коэффициент асимметрии C_s .

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 (10) определяется глубина промерзания грунта земляного полотна Z_{zn} заданной обеспеченности.

РАЙОНИРОВАНИЕ ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ ПО ГЛУБИНЕ ПРОМЕРЗАНИЯ ГРУНТОВ

Как следует из изложенного выше, глубина промерзания грунтов является одним из основных факторов

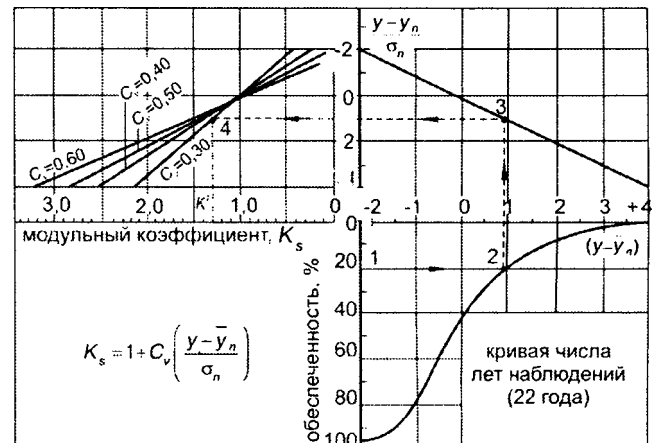


Рис. 5. Номограмма для определения модульного коэффициента k_s

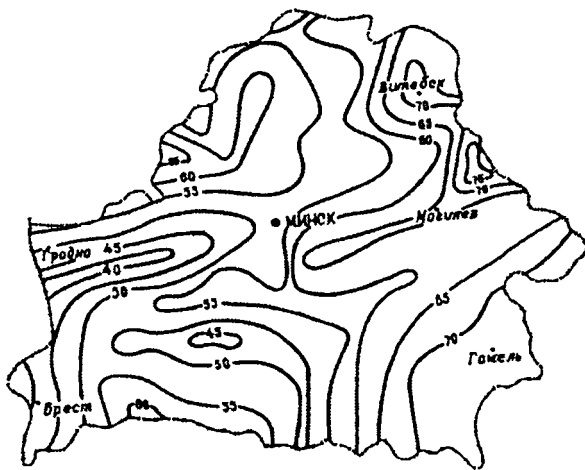


Рис. 6. Карта изолиний средней многолетней глубины промерзания грунта

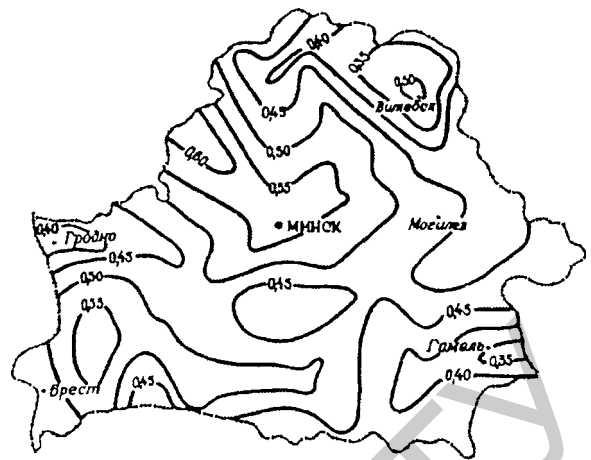


Рис. 7. Карта изолиний коэффициента вариации

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.

Авторы статьи разделили территорию Республики Беларусь на три зоны по глубине промерзания грунтов (рис. 8):

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.

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. 8) 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.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПУЧИНООБРАЗОВАНИЯ НА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГАХ

Как было изложено выше, в земляном полотне автомобильных дорог протекают сложные водно-тепловые процессы. В результате в различных точках грунтового массива меняется количество влаги, состояние воды, а вместе с тем, — прочность и несущая способность дороги. Одним из наиболее ощутимых проявлений водно-тепловых процессов являются пучины (рис. 9). Пучины — следствие промерзания грунта

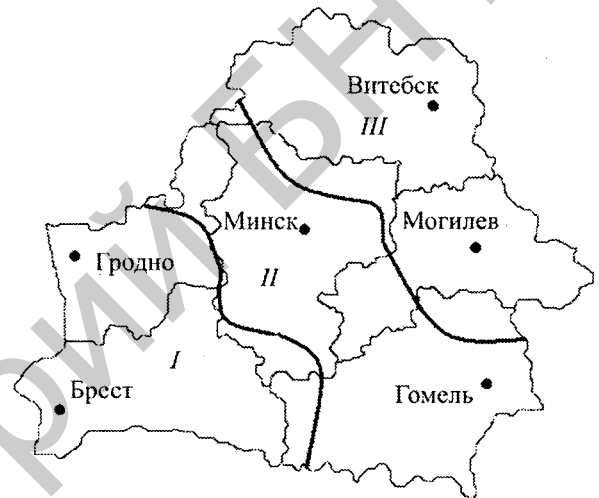


Рис. 8. Районирование Республики Беларусь по глубине промерзания грунтов

и миграции влаги из нижних слоев в зону активного охлаждения. На интенсивность пучинообразования влияют скорость промерзания грунта активного слоя и интенсивность поступления влаги.

При больших морозах грунты промерзают медленно, имеется достаточно времени для подтока воды, в связи с этим идет интенсивное образование ледяных линз. При сильных морозах происходит быстрое промерзание грунта и вода не успевает перераспределиться, поэтому ледяные линзы не образуются.

Для условий Беларуси средняя скорость промерзания грунтов составляет 1,3–2,1 см/сут, а оттаивания — 2,3–4,0 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.

В зависимости от мощности и характера увлажнения Н. А. Пузаковым [9] для трех типов местности по степени и характеру увлажнения предложены формулы,

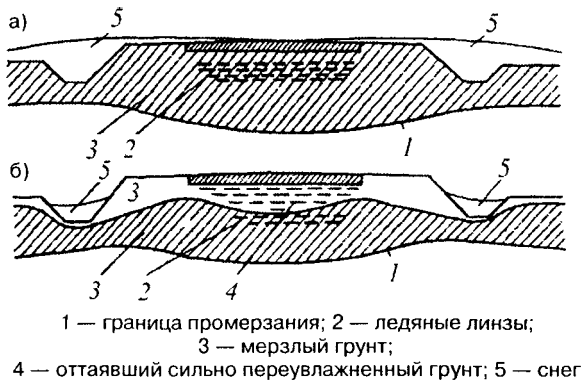


Рис. 9. Образование донника:

а — промерзание грунта под проезжей частью;
б — оттаивание грунта весной

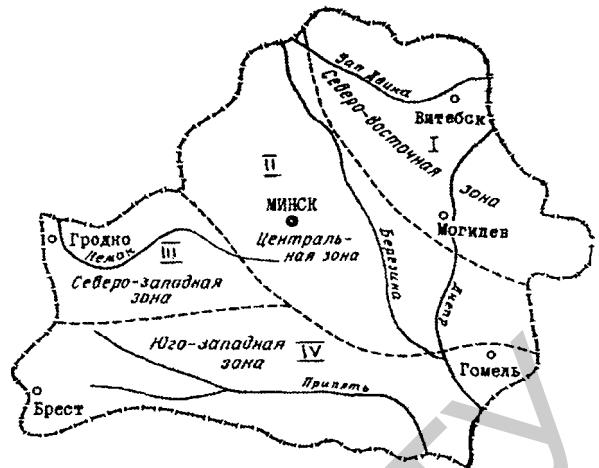


Рис. 10. Схематическая карта районирования территории Беларуси по условиям пучинообразования

необходимые при контроле водно-теплового режима земляного полотна. Так, для третьего типа местности по характеру и степени увлажнения, как наиболее опасной с точки зрения пучения, величина морозного пучения H_3 , см, по формуле Н. А. Пузакова равна:

$$H_3 = \frac{2,2k_{\text{кап}}}{\alpha_0} \cdot (W_{\text{кап}} - W_0) \cdot \left(2,31 \lg \frac{h}{h-Z} - Z \right), \quad (11)$$

где $k_{\text{кап}}$ — коэффициент капиллярной влагопроводности, см²/сут;
 $W_{\text{кап}}$ — капиллярная влажность грунта, доли единиц;
 W_0 — максимальная молекулярная влажность грунта, доли единиц;
 h — глубина залегания грунтовых вод от поверхности дороги, см;
 Z — максимальная глубина промерзания грунта, см.

Как видно из формулы (11), пучение зависит от климатических, грунтовых и гидрологических условий.

Учитывая вышеизложенное, а также то, что глубина промерзания грунтов играет важную роль в процессе пучинообразования, авторы статьи территорию Беларуси разделили на четыре зоны (рис. 10) по условиям пучинообразования.

I-я зона (Северо-Восточная) характеризуется продолжительной зимой около 120 сут, устойчивым снежным покровом, стоящим 100–120 дней. Оттепелей сравнительно мало. Промерзание грунта начинается в конце октября — начале ноября, а оттаивание — в конце марта — начале апреля. Средняя многолетняя отрицательная температура воздуха — 7 °С–8 °С. Количество осадков — примерно 600 мм.

II-я зона (Центральная) — продолжительность зимы около 100 сут. Снежный покров держится от 80 до 100 дней. Начало промерзания — ноябрь, а оттаивания — начало апреля. Средняя многолетняя отрицательная температура воздуха — 6 °С–7 °С. Количество осадков — около 650 мм.

III-я зона (Северо-Западная) — продолжительность зимы около 80 сут со значительным количеством оттепелей и осадками 700 мм. Средняя многолетняя отрицательная температура воздуха — 5 °С–6 °С.

IV-я зона (Юго-Западная) характеризуется большим количеством дней оттепелей, один раз за 10 лет снежный покров не устанавливается. Продолжительность зимы — около 60 дней. Средняя отрицательная температура воздуха — около 4,5 °С. Осадков выпадает примерно 500 мм.

Внешнее проявление пучин заключается в постепенном поднятии дорожной одежды по мере нарастания суммы $\sum T_x t_x$, где $\sum T_x$ — количество дней с отрицательной температурой t_x . Поднятие дорожной одежды может достигать значительных размеров. Максимальная величина его наблюдается к концу холодного периода. На взбулживаниях, особенно на асфальтобетонных покрытиях, четко видны трещины ромбического очертания (зимний период пучинообразования). Весной при прогревании дорожной одежды грунт земляного полотна оттаивает и под действием нагрузки, передаваемой от транспортных средств, происходит вскрытие пучин. То есть грунт, насыщенный водой, теряет несущую способность, и дорожные одежды (покрытие) разрушаются [3].

Таким образом, чтобы на дороге возникли пучины, необходимо наличие трех характерных условий: если земляное полотно возведено из пучинистых (пылеватых) грунтов; если земляное полотно (грунт) переувлажнено, и когда оно медленно и глубоко промерзает.

Поэтому при проектировании и строительстве дорог необходимо учитывать возможности появления пучин в процессе их эксплуатации и принимать инженерные решения, исключающие появление пучин, то есть прогнозировать их появление, тем самым предохраняя дорожную одежду от разрушения. В связи с этим, авторами разработана методика прогнозирования пучинообразования, в основу которой положен статистический метод определения глубины промерзания грунтов, третья расчетная схема (Н. А. Пузакова), охватывающая места, где имеется постоянный источник увлажнения.

Прогнозирование вероятности появления пучин производится в следующем порядке.

1. Принимается величина морозного пучения для заданного участка дороги (допустимая, контрольная или любая другая искомая).

2. По графику (рис. 11) находят глубину промерзания грунта Z_0 , при которой данная величина пучения может иметь место.

3. По карте изолиний (см. рис. 6) определяют среднюю многолетнюю глубину промерзания грунта $Z_{\text{ср}}$ для рассматриваемого района.

4. Зная глубину промерзания грунта Z_0 и Z_{cp} , вычисляют модульный коэффициент k_s по формуле

$$k_s = \frac{Z_0}{k_n \cdot Z_{cp}}, \quad (12)$$

где k_n — переходный коэффициент от глубины промерзания грунта под снегом к глубине промерзания без снега.

5. По карте изолиний (см. рис. 7) для рассматриваемого района находят коэффициент вариации C_v .

6. Зная коэффициент вариации C_v и модульный коэффициент k_s , по таблицам С. И. Рыбкина (фрагмент таблицы С. И. Рыбкина приведен в таблице 3) находят вероятность появления пучин заданной величины.

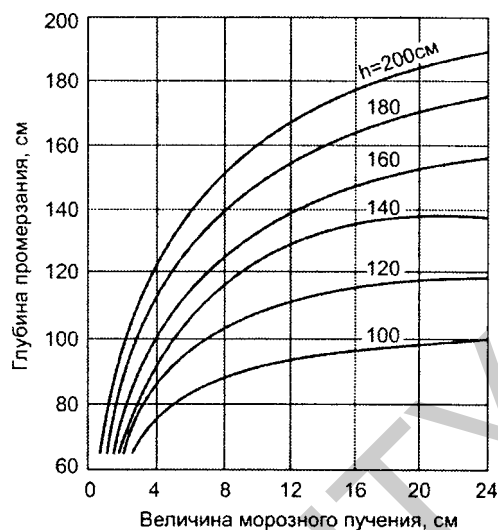
ВЫВОДЫ

- 1 По степени увлажнения грунты на территории Беларуси можно отнести ко II-й и III-й расчетной схеме.
- 2 В зимнее время при образовании пучин капиллярная вода является основным источником льдонакопления в основаниях дорожных одежд. Это наиболее опасный источник увлажнения.
- 3 Перемещение капиллярной и пленочной воды обусловлено наличием в дорожной конструкции температурного градиента.
- 4 Изменение температуры воздуха существенно влияет на режим влажности в грунтах земляного полотна. При повышении температуры повышается испарение влаги из грунта потому, что относительная влажность воздуха уменьшается, а дефицит влаги увеличивается.
- 5 Установлено, что интенсивное водонасыщение грунта происходит в первые пять суток после начала увлажнения, по истечении 15–20 сут почти прекращается.
- 6 Увеличение влажности грунта за первые пять суток достигает 60 %–70 % по отношению к первоначальной влажности, и насыщение грунта водой наступает тем раньше, чем меньше его первоначальная влажность.
- 7 Установлено, что максимальное расстояние от источника увлажнения (из боковых канав, при затрудненном водоотводе) в течение 20 сут составляет: для глинистых грунтов — 2,5–3,0 м; суглинистых — 3,0–4,0 м; супесчаных — 7,0–9,0 м; мелкого песка — 27,0–36,0 м.

Таблица 3. Модульный коэффициент k_s

| Коэффициент вариации | Вероятность | | | | | |
|----------------------|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1:100 | 1:33 | 1:20 | 1:10 | 1:5 | 1:4 |
| 0,25 | 1,674 | 1,522 | 1,445 | 1,332 | 1,202 | 1,154 |
| 0,30 | 1,825 | 1,636 | 1,540 | 1,399 | 1,240 | 1,183 |
| 0,35 | 1,990 | 1,754 | 1,638 | 1,468 | 1,276 | 1,208 |
| 0,40 | 2,156 | 1,872 | 1,736 | 1,536 | 1,312 | 1,232 |
| 0,45 | 2,334 | 1,999 | 1,837 | 1,603 | 1,345 | 1,254 |
| 0,50 | 2,511 | 2,126 | 1,938 | 1,670 | 1,378 | 1,277 |
| 0,55 | 2,700 | 2,256 | 2,042 | 1,737 | 1,408 | 1,294 |
| 0,60 | 2,890 | 2,386 | 2,146 | 1,804 | 1,438 | 1,312 |
| 0,65 | 3,090 | 2,522 | 2,252 | 1,871 | 1,468 | 1,328 |
| 0,70 | 3,289 | 2,659 | 2,358 | 1,939 | 1,497 | 1,343 |

Примечание — Допускаемая величина морозного пучения должна быть не более 6 см для гравийных и щебеночных покрытий; 4 см — для асфальтобетонных и 2 см — для цементобетонных покрытий.



Цифры на кривых h — глубина залегания уровня грунтовых вод

Рис. 11. График определения глубины промерзания по заданной величине морозного пучения

- 8 При проектировании и строительстве автомобильных дорог, проходящих через лесные массивы, необходимо учитывать, что более 60 % лесной территории Беларуси заболочены. Колебание уровня грунтовых вод имеет два максимума: весенний — продолжительностью 15–25 сут и осенний — до 40 сут. Продолжительность расчетного состояния грунта земляного полотна в осенний и весенний периоды составляет от 15 до 40 сут.
- 9 В весенний период влажность грунта земляного полотна для автомобильных дорог, проходящих по лесным массивам, в 1,5–2 раза выше, чем для дорог в открытой местности.
- 10 Глубина промерзания грунта — один из главных факторов водно-теплового режима земляного полотна, который оказывает большое влияние на распределение и передвижение влаги, изменение фазового состава грунта, высоту насыпи и др.
- 11 На промерзание грунта существенное влияние оказывают тип и влажность грунта, интенсивность и продолжительность действия отрицательной температуры, теплопроводность и влагопроводность грунта и т. д.
- 12 На скорость и глубину промерзания грунтов существенное влияние оказывают время образования

- и толщина снежного покрова. Если снежный покров образуется до промерзания, то скорость промерзания уменьшается примерно в 2 раза по сравнению с промерзанием грунта при отсутствии снежного покрова.
- 13 Разработанный авторами статистический метод определения глубины промерзания грунта земляного полотна наиболее полно отражает и учитывает факторы, влияющие на глубину промерзания.
 - 14 При отсутствии данных о глубине промерзания грунта, необходимых для проектирования автомобильных дорог, рекомендуется метод ее определения по картам изолиний средней многолетней глубины промерзания грунтов и коэффициента вариации.
 - 15 Разработанные карты изолиний промерзания грунтов позволяют для заданного процента обеспеченности определять расчетную глубину промерзания грунта. Расчетная обеспеченность устанавливается в зависимости от срока службы дорожной конструкции и ее рекомендуется принимать для категорий дорог:
 - I — обеспеченность 1 %;
 - II — обеспеченность 2 %;
 - III — обеспеченность 5 %;
 - IV — обеспеченность 10 %;
 - V — обеспеченность 20 %.
 - 16 Чем выше температуропроводность грунта, тем больше глубина его промерзания. Влажность в начальный период способствует промерзанию, так как увеличивается температуропроводность, а в дальнейшем процесс промерзания замедляется в связи с тем, что при промерзании воды выделяется теплота льдообразования.
 - 17 Скорость промерзания грунта земляного полотна для условий Беларуси составляет 1,3–2,1 см/сут, а скорость оттаивания грунта за счет потока тепла снизу составляет 15 %–25 % от максимальной глубины промерзания и равна 2,3–4,0 см/сут.
 - 18 Учитывая, что факторы, формирующие температурный режим в грунтовой толще на протяжении многолетнего периода остаются постоянными (тип грунта, рельеф, средняя многолетняя глубина промерзания), авторами произведено районирование территории Беларуси. Принятое районирование будет характеризовать водно-тепловой режим с глубиной промерзания грунтов и количеством суммы градусо-дней мороза, необходимых для проектирования, строительства и эксплуатации дорог.
 - 19 Одним из наиболее ощутимых проявлений водно-тепловых процессов является образование пучин, как следствие промерзания грунта и миграции влаги из нижних слоев в зону активного охлаждения. Интенсивность пучинообразования зависит от скорости промерзания грунта и скорости подтока влаги. Большое влияние на миграцию влаги в зону отрицательных температур оказывают тип грунта и степень его уплотнения. К высокопучинистым грунтам относятся пылеватые грунты. Пучинообразование произойдет в том случае, когда в наличии будут три фактора: пучинистый (пылеватый или мелкозернистый) грунт, влажность и отрицательная температура (промерзание грунта).
 - 20 На основании изучения физической сущности и условий образования пучин авторами разработана методика определения величины морозного пучения на период заданной обеспеченности и произведено районирование территории Беларуси на четыре зоны по условиям пучинообразования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Леонович, И. И. Прогнозирование пучинообразования автомобильных дорог Беларуси / И. И. Леонович, Н. П. Вырко // Сб. "Вопросы эксплуатации автомобильных дорог и мостов". — М.: Транспорт, 1970. — С. 10–17.
2. Определение глубины промерзания грунтов для целей фундаментостроения: сб. науч. тр. / НИИ оснований и фундаментов / Г. И. Лапкин. — М.: Тр. НИИ оснований и фундаментов, 1955. — Вып. 26. — С. 36–43.
3. Бируля, А. К. Проектирование автомобильных дорог: учебник для студ. вузов специальности "Автомобильные дороги" / А. К. Бируля. — М.: Науч.-техн. изд-во Мин-ва автотранспорта и шос. дорог РСФСР, 1961. — Ч. 1. — 499 с.
4. Леонович, И. И. Механика земляного полотна / И. И. Леонович, Н. П. Вырко. — Минск: Наука и техника, 1975. — 232 с.
5. Водно-тепловой режим земляного полотна и дорожных одежд / Под ред. И. А. Золотаря, Н. А. Пузакова, В. М. Сиденко. — М.: Транспорт, 1971. — 413 с.
6. Вырко, Н. П. Строительство и эксплуатация лесовозных дорог: учебник для студ. вузов специальности "Лесоинженерное дело" / Н. П. Вырко. — Минск: БГТУ, 2005. — 446 с.
7. Гумбель, Э. Статистика экстремальных значений / Э. Гумбель. — М.: Мир, 1965. — 308 с.
8. Митропольский, А. К. Техника статистических вычислений / А. К. Митропольский. — М.: Физматгиз, 1961. — 64 с.
9. Пузаков, Н. А. Водно-тепловой режим земляного полотна автомобильных дорог / Н. А. Пузаков. — М.: Автотрансиздат, 1960. — 128 с.
10. Леонович, И. И. Статистический метод определения глубины промерзания грунтов / И. И. Леонович, Н. П. Вырко // Отопление, вентиляция и строительная теплофизика: сб. — Минск: Вышэйшая школа, 1971. — Вып. 1. — С. 157–160.
11. Смирнов, Н. В. Курс теории вероятностей и математической статистики / Н. В. Смирнов, Н. В. Дунин-Барковский. — М.: Наука, 1965. — 230 с.

Статья поступила в редакцию 05.09.2011.