

ISSN 0130 - 2906

An Experience in Predicting Road Glazing Using Automated Meteorological Station Data

M. M. Gogoshev, S. M. Stankov, I. S. Kutiev

Abstract

Method of road icing forecasting with application of automated meteorological stations is considered. The problem is solved on the basis of heat conductivity equation which makes it possible to determine water layer temperature on the road surface. Possibilities of practical application of this method are discussed. The necessary minimum of measured meteorological values and characteristics of road pavement is presented, namely, air temperature at the levels of 2.0 and 2.5 over the road; pavement surface temperature; temperature under the pavement 0.1 m deep; air relative humidity; wind direction and velocity; availability of precipitation by the time of measurements; solar radiation intensity; cloud presence.

Index Keywords: Boundary layers; Calculations; Cold weather problems; Frost effects; Ice problems; Mathematical models; Meteorological instruments; Automated meteorological stations; Roads and streets

E. M. Dobryshman Modeling Mesoscale Features of the Equatorial Atmosphere G. P. Kurbatkin, B. F. Abdurakhimov, and V. N. Krupchatnikov Modeling Dynamic Processes Over Central Asia A. V. Korolev On the Droplet Lifecycle in Stratiform Clouds S. S. Gaigerov, E. D. Zhorova, and M. Ya. Kalikhman Air Particle Tracks in the Stratosphere of the Northern Hemisphere M. V. Buikov On the Resuspension of Aerosol Particles V. M. Dorokhov, R. E. Fioletov, and V. I. Sitnikova Variations in the Total O ₃ and NO ₃ Content in the Arctic Atmosphere During Polar Winters of 1989 and 1991 Yu. L. Shchev'ev and A. B. Gaikovich Studies into the Kinematic Structure of Water Flow Over Ridges M. V. Bolgov and I. O. Sarmanov On Stochastic Relations in River Runoff Models G. I. Melkonyan and A. I. Stepanov Determination of Flow Friction in Winter	5 21 30 39 45 54 60 67 76 84 90 95 101 106 111 112 117 120 122
BRIEF COMMUNICATIONS	
A. F. Buchinskii Optimization of Meteorological Service M. M. Gogoshev, S. M. Stankov, and I. S. Kutiev An Experience in Predicting Road Glazing Using Automated Meteorological Station Data L. K. Malik On the Future of the Marshes and the Possibilities of the Northern Forest Recovery D. Ya. Ratkovich On Incorporation of the Nonstationary Nature of River Runoff Into Assessments of the Prospects for Its Utilization Yu. A. Sklyarov, Yu. I. Brichkov, V. A. Vorob'ev, and L. B. Sazonov A Satellite Meter of Short-Wave Reflected Radiation and Its Testing M. A. Petrosyants "Climatology", ed. by O. A. Drozdov and N. V. Kobysheva, Gidrometeoizdat, Leningrad, 1989 O. N. Belinskii, M. A. Masterskikh, and M. G. Naishuller Dangerous Meteorological Phenomena in 1992 S. V. Kiryanov and N. A. Afanas'eva The Impact of the Volga Discharge on the Northern Caspian Sea Pollution T. A. Bogdanova Weather Review For March of 1992 O. N. Belinskii, M. A. Masterskikh, and M. G. Naishuller Anomalous Hydrometeorological Phenomena in March of 1992 Abroad	84 90 95 101 106 111 112 117 120 122
INSTRUMENTS, OBSERVATIONS, AND PROCESSING	
CRITIQUE AND BIBLIOGRAPHY	
REVIEWS AND CONSULTATIONS	
CHRONICLE	

ISSN 0130 - 2906

An Experience in Predicting Road Glazing Using Automated Meteorological Station Data

M. M. Gogoshev, S. M. Stankov, I. S. Kutiev

Abstract

Index Keywords: Boundary layers; Calculations; Cold weather problems; Frost effects; Ice problems; Mathematical models; Meteorological instruments; Automated meteorological stations; Roads and streets

УДК 551.509.324.3+551.508.824

Method of road icing forecasting with application of automated meteorological stations is considered. The problem is solved on the basis of heat conductivity equation which makes it possible to determine water layer temperature on the road surface. Possibilities of practical application of this method are discussed. The necessary minimum of measured meteorological values and characteristics of road pavement is presented, namely, air temperature at the levels of 2.0 and 2.5 over the road; pavement surface temperature; temperature under the pavement 0.1 m deep; air relative humidity; wind direction and velocity; availability of precipitation by the time of measurements; solar radiation intensity; cloud presence.

Опыт прогнозирования обледенения дорог с использованием данных автоматической метеорологической станции

М. М. Гогошев, С. М. Станков, И. С. Кутиев

Рассматривается метод прогноза обледенения дорог с использованием данных автоматических метеорологических станций. Задача решается на основе уравнения теплопроводности, с помощью которого находится температура водяного слоя на поверхности дороги. Обсуждаются возможности практического приложения этого метода.

Введение. Прогноз обледенения дорог — весьма сложная проблема, ибо связана одновременно с прогнозированием ряда параметров: температур воздуха и дорожного покрытия, увлажнения дорожного покрытия и т. д. С другой стороны, прогноз этих элементов — задача, связанная с общей проблемой погоды данной местности. Прогноз никогда не связан с маленьким участком, каким, например, является дорога высокогорного перевала. Вот почему мы считаем, что более целесообразно брать конкретные параметры, которые отражают погоду и одновременно состояние покрытия дорог только в этом ограниченном районе.

В ряде публикаций [4, 6, 8] обледенение рассматривается как физический процесс кристаллизации воды на дорожной поверхности, а в [3, 7] приведены практические задачи расчета образования и разрушения льда на дорожном участке. В [9] даны

методические указания по борьбе с обледенением дорог.

Существенное в нашем методе то, что мы используем нужные данные с одной автоматической метеорологической станции (AMC), которые относятся только к конкретному дорожному участку. Не составляет труда со значительно меньшим числом измеренных параметров (конкретно для покрытия) экстраполировать прогноз на соседние участки. Автоматическая метеорологическая станция и данные, которые используются при предсказании возможного обледенения, описаны в [5].

Необходимый минимум измеряемых метеорологических величин и характеристик состояния дорожного покрытия следующий: температура воздуха на уровнях 2,0 и 0,5 м над дорогой, температура поверхности покрытия, температура на глубине 0,1 м покрытия, относительная влажность воздуха, направление и скорость ветра, наличие

осадков в момент измерения, состояние покрытия (сухое, мокрое с наличием соли в слое воды, мокрое при отсутствии в воде соли, обледенелое), интенсивность солнечной радиации, наличие облаков.

Физическая модель. В физическом смысле обледенение — это переход воды из одного агрегатного состояния в другое (из жидкого в твердое). Чтобы описать и прогнозировать обледенение, надо найти распределение поля температуры в интересующей нас области и его изменение. Это дает уравнение теплопроводности.

Обледенение дорог может наблюдаться при следующих ситуациях:

- мокрая дорога, которая замерзает вследствие переохлаждения воды;
- обледеневшая дорога, на которой есть вода; при изменении температуры воды замерзает или лед тает;
- нечищенная от снега и льда дорога, в неровностях которой задерживается вода (лужи).

Все остальные возможные ситуации сводятся к одной из трех указанных. Во время тумана, например, дорога увлажняется и при подходящих условиях обледеневает. Маленькие капли тумана прикасаются к ледяной поверхности, всем своим объемом кристаллизируют на ней образуя иней. У более крупных капель сначала замерзает поверхность. Выделенная при кристаллизации скрытая теплота нагревает оставшуюся в капле воду, которая расширяется и разрывает ледяную сферу [1]. Вода растекается по обледеневшей поверхности дороги и замерзает, образуя стекловидное покрытие. Замерзание мелких капель относится к ситуации *a*, последующий процесс — к ситуации *b*. Характерной особенностью замерзающего слоя воды является выделение потенциальной теплоты кристаллизации, которая частично согревает переохлажденную воду, частично передается подстилающей поверхности (асфальт) и воздуху. Поэтому при температуре около точки замерзания (кристаллизации), температура воды отличается от температуры расположенного над ней воздуха и асфальтового покрытия.

Процесс замерзания воды на льду или на асфальтовом покрытии зависит от толщины ледяного слоя. В [12] представлена зависимость скорости замерзания от толщины водяного слоя, расположенного над льдом. При толстом ледяном слое кристаллизация начинается с поверхности, причем ледяная оболочка становится толще до тех пор, пока не займет всю толщину водяного слоя. Если водяной слой меньше 0,08 м, кристаллизация происходит во всем объеме

одновременно. В ситуациях *a* и *b* предполагается, что слой воды на асфальтовом покрытии или на обледеневшей поверхности меньше 0,08 м. Третий случай демонстрирует ситуацию, когда вода задерживается между снежными и ледяными остатками в виде маленьких луж с толщиной слоя больше 0,08 м.

Процессы замерзания чистой и соленой вод существенно различаются. В соленой воде нарастает скорость возникновения центра кристаллизации вследствие изменения температуры энергии активации, самодиффузии и коэффициента поверхностного натяжения на границе вода — лед. В следующем изложении рассмотрим подробно ситуацию *a*, предполагая, что толщина водяного слоя меньше 0,08 м. Это предположение упрощает значительно математическую модель и позволяет использовать ее во время оперативного прогноза обледенения.

Математическое моделирование. Основной проблемой при прогнозировании состояния асфальтового покрытия является прогноз температуры слоя, расположенного над покрытием. При ситуации *a* это слой воды. Температурный режим этого слоя, на изменение границ которого влияет множество метеорологических факторов, описан уравнением теплопроводности.

Координатная система. Так как изменения температуры в вертикальном направлении происходят намного быстрее изменений в горизонтальном направлении (параллельно дороге), то достаточно чтобы уравнение было одномерным в пространственном отношении. Ось *Ox* (рис. 1) начинается с поверхности слоя и ориентируется перпендикулярно вниз к Земле.

Основные уравнения. Решаем уравнение

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + f(x, t; \tau),$$

$$x \in (0, X), \quad t \in [t_0, t_0 + T], \quad (1)$$

где *u* — температура исследуемого слоя,

x — расстояния по оси *Ox*,

t — время,

*a*² — коэффициент температуропроводности,

f — суммарная интенсивность внутренних тепловых потоков,

*t*₀ — начальный момент,

T — момент прогноза,

X — толщина исследуемого слоя,

τ = (τ₋₂, τ₋₁, τ₀, τ₁, τ₂) — вектор измеряемых в момент *t*₀ температур на уровнях ξ₋₂, ξ₋₁, ξ₀, ξ₁, ξ₂ соответственно. Так

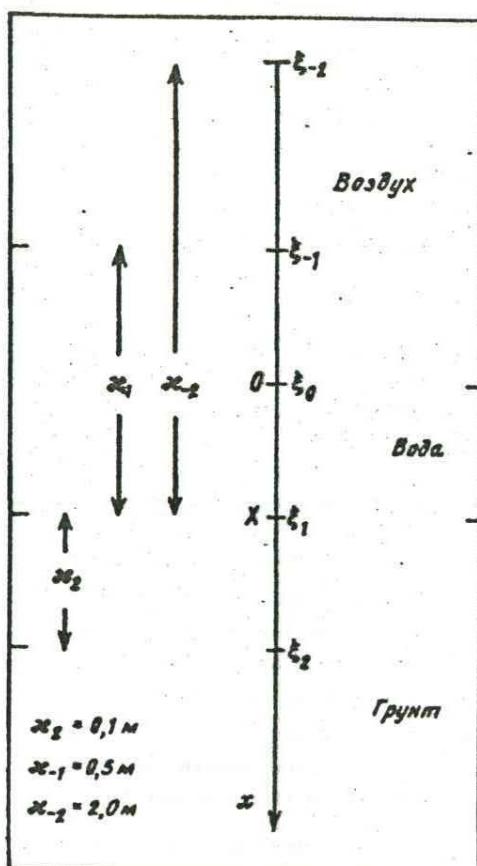


Рис. 1. Координатная система.

как процесс обледенения охватывает весьма узкий интервал изменения температуры исследуемого слоя, то принимаем, что коэффициент температуропроводности постоянен.

Начальные условия:

$$u(x, 0) = \varphi(x), \quad x \in [0, X]. \quad (2)$$

При рассмотрении тонкого слоя (меньше 0,08 м) принимаем, что $\varphi(x) = \varphi(X)$, $x \in (0, X)$, где $\varphi(X)$ — температура на границе между исследуемым слоем и грунтом в момент t_0 .

Границные условия:

$$\begin{aligned} -k \frac{\partial u}{\partial x}(0, t) &= \psi_1(t; \tau), \\ -k \frac{\partial u}{\partial x}(X, t) &= \psi_2(t; \tau), \end{aligned} \quad (3)$$

где

ψ_1, ψ_2 — тепловые потоки через граничные поверхности,

k — коэффициент теплопроводности исследуемого слоя.

Численный метод. Уравнение (1) — одномерное параболическое частное дифференциальное уравнение с постоянными коэффициентами. Для его числен-

ного решения используется чисто неявный разностный метод на равномерной сетке. Частные производные аппроксимируются следующим способом:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= \left\{ u(x, t + \Delta t) - u(x, t) \right\} / \Delta t, \\ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} &= \left\{ u(x + \Delta x, t + \Delta t) - \right. \\ &\quad \left. - 2u(x, t + \Delta t) + \right. \\ &\quad \left. + u(x - \Delta x, t + \Delta t) \right\} / \Delta x^2 \end{aligned} \quad (4)$$

с ошибками $O(\Delta t)$, $O(\Delta x^2)$.

Начальные условия аппроксимируются точно; чтобы не увеличивалась ошибка $O(\Delta x^2)$, при аппроксимации граничных условий вводится фиктивный столб узлов:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial x} &= \left\{ u(x + \Delta x, t + \Delta t) - \right. \\ &\quad \left. - u(x - \Delta x, t + \Delta t) \right\} / 2\Delta x \end{aligned} \quad (5)$$

Полученная при дискретизации система из алгебраических уравнений решается по методу Томаса (прогонки).

Реализация программы. Математическая модель реализована программно на Microsoft Fortran V 5.0 и тестирована на IBM-PC AT. Ниже изложены результаты выполнения программы за период прогноза $T = 1$ ч, шаг во времени $\Delta t = 2.5$ ч и $\Delta x = 0.04$ м.

Физические параметры и константы. Коэффициент температуропроводности $a^2 = \lambda / c\rho$, коэффициент теплопроводности λ , удельной теплоемкости c и плотности воды ρ определяются соответственно так:

$$\lambda = 0,555 \text{ Вт} / \text{м}^\circ\text{C};$$

$$c = 423,5 \text{ кг}^\circ\text{C};$$

$$\rho = 10^3 \text{ кг} / \text{м}^3.$$

Суммарная интенсивность источника и стока

$$f(x, t; \tau) = \frac{1}{c\rho} \sum_{i=1}^3 c_i(t) Q_i(x; \tau),$$

где Q_i — плотность теплового потока солнечной радиации, $\text{Вт} / \text{м}^2$;

Система экспертных оценок, используемая при прогнозе обледенения дорог

Состояние дорожного покрытия, <i>B</i>	$u(\xi_{-1}, t_0)$	$u(\xi, t_0 + T)$ $\xi \in (\xi_0, \xi_1)$
[0,2 ... 1,2)	< 0,0	< 0,0
[1,2 ... 3,5)	< -5,0	< 0,0
[1,2 ... 3,5)	< 0,0	< -2,0
[3,5 ... +)	< -5,0	< -10,0
[0,0 ... 0,2)		
[0,0 ... 0,2)	< -2,0	< -5,0
[0,2 ... 1,2)	< -5,0	< 0,0
	> 0,0	< -5,0

Примечание. * Только при осадках.

Q_2 — плотность теплового потока излучения, Bt/m^2 ;

Q_3 — плотность теплового потока испарения, Bt/m^2 ;

{ c_i }_{i=1}³ — коррекционные множители, характерные для сезона, местоположения исследуемого объекта и интервала [$t_0, t_0 + T$].

Вследствие тонкости слоя воды, который мы рассматриваем (даже $X = 0$ на сухом асфальте), все потоки тепла { Q_i }_{i=1}³ считаем внутренними, т. е. действующими на весь слой, а не через его границы.

Тепловой поток солнечной радиации Q_1 рассчитывается, причем по теоретической модели находится его максимальная величина в соответствии с расположением объекта и сезоном года. С помощью данных достаточно длинного временного ряда посредством параболической экстраполяции получается распределение Q_1 в интервале [$t_0, t_0 + T$].

Остальные тепловые потоки определяются так:

$$Q_2(x; \tau) = \lambda_2(\tau_2 + 273,0)^4;$$

$$Q_3(x; \tau) = \lambda_3(e_1 - e_2),$$

где

$$\lambda_2 = -2,5 \cdot 10^{-9};$$

$$\lambda_3 = 4,11 \cdot (1 + 0,72u(t_0));$$

$u(t_0)$ — скорость ветра в момент t_0 ;

$e_1 = 6,1 \cdot 10^{7,63\tau_1 / (\tau_1 + 241,9)}$, давление насыщенного водяного пара, gPa ;

$e_2 = 0,01e_1 e_3$, парциальное давление водяного пара, gPa ;

e_3 — относительная влажность воздуха, %.

Для уточнения конкретных величин { $c_i(t)$ }_{i=1}³ за интервал [$t_0, t_0 + T$] используется дополнительный статистический материал, а также данные о влажности и температуре воздуха на уровне ξ_{-2} , скорости ветра и прочем.

Тепловые потоки через граничные поверхности определяются так:

$$\psi_1(t; \tau) = \mu_1(\tau_1 - \tau_{-1}),$$

$$\psi_2(t; \tau) = \mu_2(\tau_1 - \tau_2),$$

$$\mu_1 = -2,65(1 + 0,72u(t_0)),$$

$$\mu_2 = 0,13.$$

Результаты. В реализованном нами варианте АМС на перевале Шипка (высота над морем 1200 м) измеряются все описанные выше параметры, за исключением двух — интенсивности солнечной радиации и наличия облаков. Последний параметр вообще не использован при вычислении, а солнечная радиация определяется с помощью теоретической модели, учитывающей сезонные изменения локальной погоды и степень облачности.

Автоматическая станция с перевала Шипка передает информацию четыре раза в течение одного часа на расстояние около 50 км до приемного пункта — Управления дорог в городе Стара Загора. Одновременно с визуализацией поступающей информации проводится ее архивация и передача к персональному компьютеру для запуска программы прогноза обледенения дорог. Мы прогнозируем температуру непосредственно лежащего на асфальте слоя воды или при сухом асфальте — температуру самой поверхности асфальта. Конкретный прогноз обледенения дорожного покрытия делается на основе экспертной системы, показанной в таблице.

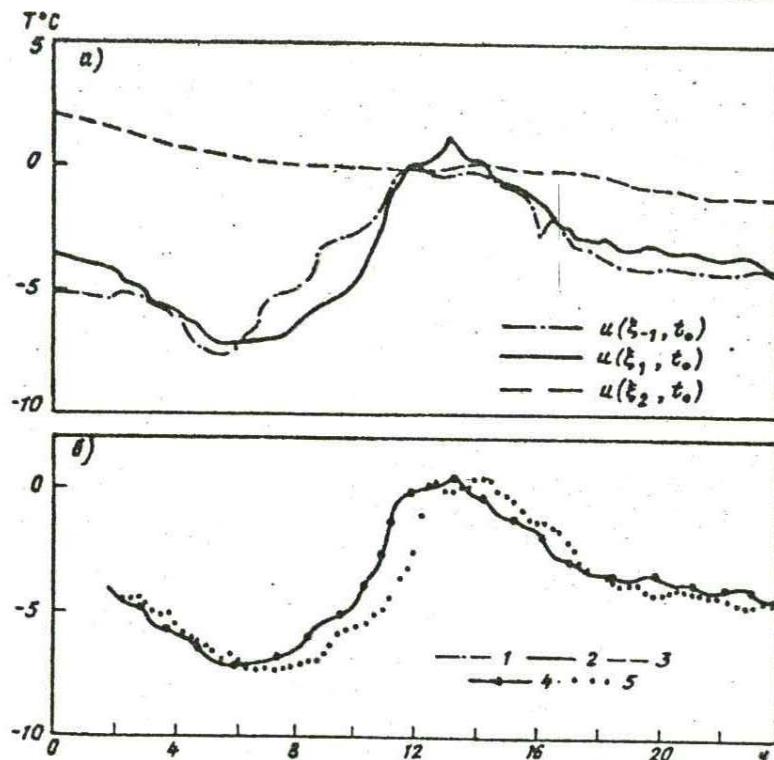


Рис. 2. Пример расчета суточного хода температуры на различных уровнях (а) и температуры слоя обледенения (б).

1) $u(\xi_{-1}, t_0)$; 2) $u(\xi_1, t_0)$; 3) $u(\xi_2, t_0)$; 4) фактическая температура слоя; 5) прогнозическая температура слоя обледенения.

На рис. 2 приведен пример рассчитанных и измеренных температур покрытия. Видно, что величины хорошо совпадают, особенно ночью. Отклонения днем вызваны отсутствием непосредственных измерений солнечной радиации. Этот недостаток устранен установкой датчика осенью 1991 г.

Наши прогнозы и наблюдения, проведенные зимой 1990/91 г., подтвердили полностью выбранный подход. По предварительным оценкам, более 85% сделанных прогнозов оправдались.

Литература

- Алексеев В.Р. Наледи. — Наука, Новосибирск, 1987.
- Березин И.С., Жидков Н.П. Методы вычислений. Т. 2. — М., Наука, 1962.
- Бучинский В.Е. Гололед и борьба с ним. — Л., Гидрометеоиздат, 1966.
- Глухов В.Г. Метеорологические условия образования гололеда на высотных сооружениях. — Л., Гидрометеоиздат, 1972.
- Гогошев М.М. Автоматическая метеорологическая станция. — София, Пътища, 1991.
- Голубев В.Н. Условия возникновения льда на границе твердого тела и воды. — Гляциологические исследования, 1981, вып. 26.
- Драгневич Е.Г. Гололед и изморозь. Условия образования, прогноз и го-
- лоледное районирование северо-запада европейской территории СССР. — Л., Гидрометеоиздат, 1971.
- Заморский А.Д. Атмосферный лед: иней, гололед, снег и град. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1950.
- Рябов В.К., Полин К.Ю., Шушаков Е.В. Методические рекомендации для борьбы с наледями на автомобильных дорогах. — Хабаровск, 1974.
- Сендов Б.Х., Попов В.А. Численные методы, т. 2. — София, 1978.
- Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. — М., Наука, 1962.
- Шелаков В.К. Ледяные хранилища. — М., Наука, 1967.

13. Bevington P. R. Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences. — McGraw-Hill Inc., 1969.
14. Forsythe G. E. and Wasow W. R. Finite-Difference Methods for Partial Differential Equations. — John Wiley & Sons, N. Y., 1960.

Болгарская академия наук

Поступила
1 VII 1991