

Редкое явление замерзающего дождя в Пермском крае

Н. А. Калинин*, Б. Л. Смородин*

Проанализировано явление замерзающего дождя, наблюдавшееся в Пермском крае 14 декабря 2010 г., когда приземная температура была $-10,9^{\circ}\text{C}$. На основе данных радиозондирования атмосферы численно смоделирован процесс охлаждения падающих капель и рассчитана их температура. Показано, что капли крупного размера не успевают достичь состояния переохлаждения и при падении на землю имеют положительную температуру. Более мелкие капли охлаждаются до отрицательной температуры. Выполненная оценка процесса превращения в лед падающих капель при кристаллизации переохлажденной воды показала, что при фазовом переходе объемная доля ледяной оболочки капель не превышает 3% даже при наиболее благоприятных условиях охлаждения.

1. Введение

Замерзающие осадки, вызывающие обледенение дорог, линий электропередач, летательных аппаратов и тем самым влияющие на условия безопасности воздушных судов и функционирование аэропортов, представляют собой опасное метеорологическое явление [9]. Особенно опасны крупнокапельные переохлажденные осадки (замерзающий дождь), с которыми связаны авиационные катастрофы; их анализ привел к необходимости повышения уровня защищенности воздушных судов от обледенения [12]. В 1990-е годы под эгидой ВМО были начаты работы по исследованию условий погоды и климатических характеристик замерзающих осадков, актуальные и для России [7—9, 11]. Подробное и систематическое исследование условий выпадения замерзающих осадков в аэропортах России и СНГ проведено в работах [10—13], где проанализирован большой массив данных по пяти аэропортам Московского аэроузла и по аэропортам Минеральных Вод, Одессы и Нижнего Новгорода. Показано, что региональные различия повторяемости замерзающих осадков, стратификации атмосферы и синоптических ситуаций, при которых наблюдалось это явление, довольно значительны. В половине случаев образование замерзающих дождей соответствует интервалу приземной температуры от $-0,1$ до -2°C . При температуре ниже -10°C замерзающие осадки практически не наблюдались, потому что синоптическая ситуация, связанная с выносом теплого воздуха вдоль фронтальной поверхности на высоте около 1 км, в сочетании с большим скачком температуры при наличии приземной инверсии наблюдается крайне редко [3—5, 10—13].

* Пермский государственный университет; e-mail: kalinin@psu.ru.

В настоящей статье представлены результаты моделирования процесса охлаждения падающих капель при синоптической ситуации, сложившейся в Пермском крае 14 декабря 2010 г.

2. Условия погоды при выпадении замерзающих осадков на территории Пермского края

Вечером 14 декабря 2010 г. в южных и центральных районах Пермского края начались дожди, и почти повсеместно образовался гололед. Дождь, соприкасаясь с холодной подстилающей поверхностью и предметами, сразу замерзал, образуя наст на снегу, тонкую ледяную пленку на предметах, вызвал транспортные проблемы: стекла мгновенно покрывались льдом, с которым не справлялись “дворники”. На отдельных станциях Пермского края гололед сохранялся до 17 декабря, а на станции Губаха гололедные отложения разрушились только днем 21 декабря (табл. 1). Необычность явления заключалась в низкой температуре воздуха у поверхности земли. В Перми в 12 ч ВСВ 14 декабря (17 ч местного времени) было $-10,9^{\circ}\text{C}$. На территории края температура воздуха составляла от -3 до -16°C . Необходимо отметить, что явление замерзающего дождя при такой низкой температуре наблюдается довольно редко. Например, только в двух из 268 случаев замерзающего дождя, зафиксированных в аэропортах Московского аэроузла и проанализированных в работе [11], температура у

Таблица 1

Условия погоды при выпадении замерзающих осадков на территории Пермского края 14 декабря 2010 г.

Метеостанция	Температура воздуха, $^{\circ}\text{C}$		Сумма осадков за 12 ч (время местное), мм		Начало гололеда, ч.мин ВСВ 14 XII	Окончание гололеда, ч.мин ВСВ, дата	Диаметр отложения, мм
	минимальная	максимальная	8—20 ч 14 XII	20 ч 14 XII — 8 ч 15 XII			
Гайны	-8	-7	—	7	—	—	—
Ныроб	-15	-13	—	4	—	—	—
Чердынь	-12	-10	—	6	—	—	—
Коса	-8	-8	—	11	—	—	—
Кочево	-9	-9	—	8	—	—	—
Кудымкар	-14	-12	—	6	19:30	18:00 16 XII	4
Губаха	-13	-8	—	2	17:30	6:00 21 XII	3
Бисер	-17	-12	—	0,2	—	—	—
Добрянка	-14	-9	—	3	15:45	8:45 17 XII	3
Верещагино	-12	-12	—	2	17:00	6:30 16 XII	—
Пермь	-14	-9	0,0	2	12:05	10:00 16 XII	1
Лысьва	-15	-7	—	0,3	15:25	23:25 14 XII	2
Кын	-24	-13	0,6	—	—	—	—
Большая Соснова	-20	-11	0,0	1	14:40	12:05 17 XII	1
Ножовка	-17	-7	0,0	1	14:50	19:30 17 XII	4
Кунгур	-19	-7	0,4	0,0	13:55	7:15 15 XII	2
Чайковский	-16	-7	—	2	17:48	16:30 16 XII	1
Чернушка	-17	-6	0,1	—	11:00	18:15 14 XII	2
Октябрьский	-15	-2	2	—	9:25	0:15 17 XII	3

поверхности земли была ниже -10°C . В аэропортах Минеральных Вод, Одессы и Нижнего Новгорода, согласно данным [10, 12, 13], явления замерзающего дождя при такой низкой температуре вообще не наблюдались. Ночью 15 декабря на севере Пермского края дожди перешли в снег, достигнув критерия неблагоприятного явления [7]. На метеостанциях Кудымкар, Гайны, Кочево, Коса суммы осадков составили соответственно 6, 7, 8 и 11 мм (табл. 1).

3. Синоптические условия

Днем 14 декабря в средней и нижней тропосфере циркуляцию обуславливали два высотных циклона с центрами над Западной Украиной и п-овом Таймыр. Между циклонами располагался слабо выраженный гребень, ориентированный с Северного Казахстана на Средний Урал. Ведущий поток имел южное направление, скорость ветра на высоте 5 км составляла 19 м/с. Высотная фронтальная зона наблюдалась над Гренландией и Скандинавским п-овом, а далее к востоку делилась на две ветви, одна из которых располагалась вдоль северных морей, другая — поворачивала вдоль западного побережья Европы на Средиземное море и выходила к Уральским горам.

У поверхности земли погоду Пермского края определял каспийский циклон с центром восточнее Самары. Циклон двигался согласно высотной фронтальной зоне, ориентированной с юга на север. Днем 14 декабря, находясь в стадии заполнения и будучи высоким барическим образованием, он смещался со скоростью 15 км/ч. По сравнению с предшествующими полусутками скорость циклона уменьшилась в два раза. Давление в центре циклона увеличивалось следующим образом: в 12 ч ВСВ 13 декабря оно составляло 1001 гПа, 14 декабря в 0 ч — 1005 гПа, в 12 ч ВСВ — 1010 гПа. Теплый участок арктического фронта располагался значительно севернее территории Пермского края и проходил через Сыктывкар и Вологду, теплая ветвь полярного фронта проходила через Челябинск и Казань. Фронт смещался со скоростью 15 км/ч. Контраст температуры воздуха у поверхности земли составил $4,5^{\circ}\text{C}/100\text{ км}$, на высоте 1,5 км — $5^{\circ}\text{C}/100\text{ км}$. Фронт в поле осадков выражен не был. Осадки отмечались лишь вблизи центра циклона. Барические тенденции перед фронтом были слабо отрицательные с максимальным значением $-1,3\text{ гПа}/3\text{ ч}$ над западными районами Пермского края. Ночью 14 декабря в нижних слоях атмосферы над территорией края располагалась теплая, но очень сухая воздушная масса. Температура воздуха на высоте 1,5 км составляла 1°C . Слабые северные потоки и отсутствие облачности в ночные часы при наличии снежного покрова способствовали сильному радиационному выхолаживанию подстилающей поверхности и формированию мощной приземной инверсии от поверхности земли до высоты 970 м с вертикальным градиентом температуры $1,3^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$, которая сохранялась и днем. Смена потоков на южные и юго-западные днем 14 декабря способствовала поступлению влаги в слое 850—500 гПа. Дефицит точки росы уменьшился до $0\text{—}1,4^{\circ}\text{C}$. По данным радиозондирования за 12 ч ВСВ 14 декабря, высота нулевой изотермы составила 390 м, толщина слоя с положительной температурой воздуха — около 1,3 км (табл. 2). Осадки, сформировавшиеся в теплой

Таблица 2

Данные радиозондирования в г. Пермь 13 и 14 декабря 2010 г.

Уровень, изобарическая поверхность, <i>гПа</i>	Температура воздуха, °С	Дефицит точки росы, °С	Направление ветра, <i>град</i>	Скорость ветра, <i>м/с</i>
0 ч 13 декабря				
Земля	–6,5	1,4	90	1
950	5,4	12	169	7
925	4,4	17	180	9
850	0,0	9	180	9
700	–6,1	16	195	11
500	–23,9	11	205	8
12 ч 13 декабря				
Земля	–5,5	4,6	45	1
936	3,3	25	143	12
925	3,2	25	145	13
850	1,4	8	115	11
700	–6,9	7	140	9
500	–25,3	6	105	8
0 ч 14 декабря				
Земля	–11,3	3,6	90	3
925	–1,7	13	115	3
871	1,5	26	74	2
850	0,6	23	60	2
700	–7,5	13	315	4
500	–26,7	12	350	8
12 ч 14 декабря				
Земля	–10,9	3,8	45	2
925	3,0	4,5	150	10
895	5,4	3,1	196	14
850	2,0	1,4	190	14
700	–6,5	0,0	160	11
500	–22,9	0,5	220	19

воздушной массе, не успевали перейти в твердую фазу и достигали поверхности земли в виде слабого дождя.

4. Результаты численного моделирования процесса охлаждения падающих капель

Рассмотрим условия, способствующие изменению температуры капли, падающей из облака, в случае, когда в пограничном слое атмосферы наблюдалась приземная инверсия, выявленная по данным радиозондирования в г. Пермь 14 декабря 2010 г. (табл. 2, рис. 1). В результате интенсивного горизонтального переноса теплого воздуха с юга (направление ветра 190—150°, скорость 10—14 м/с (табл. 2)) в 12 ч ВСВ в интервале высот 390—1700 м отмечалась положительная температура. Положение нижней границы облаков можно оценить с помощью графиков зависимости температуры и дефицита точки росы от высоты (рис. 1) [1, 2]. Нижняя граница облака находится вблизи уровня, на котором дефицит точки росы

уменьшается до 2°C , что в данном случае соответствует высоте 1200 м. Другой способ оценки этой границы, используемый в работах [10—13] и заключающийся в определении уровня, на котором относительная влажность достигает 90—95%, дает такой же результат.

Распределение температуры воздуха с высотой, сложившееся к 12 ч ВСВ 14 декабря 2010 г., называется стратификацией типа “теплый нос” [10]. Оно соответствует классическому механизму образования заморающего дождя: снежинки из верхней части облака попадают в область с положительной температурой и тают, образуя капли. Капли, проходя слой с температурой воздуха ниже 0°C , переохлаждаются и заморают от соприкосновения с подстилающей поверхностью, также имеющей отрицательную температуру.

Рассмотрим изменения температуры внутри капель радиуса a и на их поверхности. Запишем уравнение теплопроводности в сферической системе координат, считая, что температура воды в капле T зависит только от радиальной переменной r :

$$\frac{T}{t} = \frac{2T}{r^2} \frac{2}{r} \frac{T}{r}, \quad (1)$$

где $\kappa = 1,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ — коэффициент температуропроводности воды.

Для уравнения (1) поставим граничные условия в центре капли:

$$T/r = 0 \text{ при } r = 0. \quad (2)$$

На поверхности капли ($r = a$) считается выполненным линейный закон теплоотдачи

$$\kappa \frac{T}{r} = (T - T_{\text{возд}}(H(t))), \quad (3)$$

где α — коэффициент теплоотдачи на границе вода — воздух ($\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$).

Температура окружающего воздуха $T_{\text{возд}}$, определяемая по данным радиозондирования (табл. 2, рис. 1), зависит от положения падающей капли в атмосфере, а следовательно, и от времени. Поскольку время падения капли до соударения с землей не превышает нескольких минут, то пространственное распределение температуры в атмосфере можно считать не зависящим от времени. Капли падают на землю с постоянной скоростью, величина которой зависит от их размера [6].

Чтобы рассчитать температуру капли, решали следующую задачу. В каждый момент времени рассчитывались координаты капли радиуса a над

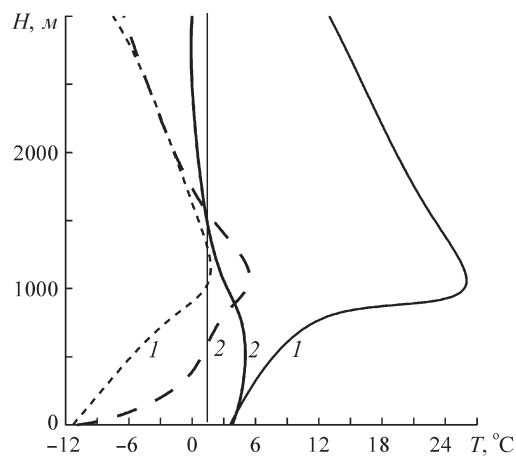


Рис. 1. Вертикальное распределение температуры воздуха (штриховые линии) и дефицита точки росы (сплошные линии). Пермь, 14 декабря 2010 г.

1) 0 ч ВСВ; 2) 12 ч ВСВ.

поверхностью земли, в соответствии с которыми задавалась температура на ее поверхности, и решалось уравнение теплопроводности. Можно предположить, что начальная температура капли составляет $5,4^{\circ}\text{C}$ (табл. 2), при которой происходит интенсивное формирование капель дождя в нижней части облака под действием процесса коагуляции в области “теплого носа” [10].

Используем в качестве масштабов длины $[r] = a$, времени $[t] = a^2/\nu$, скорости $[v] = \nu/a$ и запишем уравнение теплопроводности и соответствующие граничные условия в безразмерном виде:

$$\frac{T}{t} = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0, \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} = -Bi(T - T_{\text{возд}}(H(t))) \quad \text{при} \quad r = 1, \quad (5)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad \text{при} \quad r = 0. \quad (6)$$

В уравнение (5) входит безразмерный параметр — число $Bi = a/\nu$, который характеризует теплообмен на поверхности капли: чем больше число Bi , тем сильнее охлаждение капли при ее падении в окружающем холодном воздухе. Поскольку невозможно указать точное значение коэффициента теплоотдачи, который существенно зависит от окружающих условий и находится в интервале $20\text{—}50 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, то в дальнейшем будем рассматривать температуру капель при разных значениях Bi .

Вертикальное распределение температуры поверхности капли представлено на рис. 2 для разных наборов числа Bi и размера капель. Темпера-

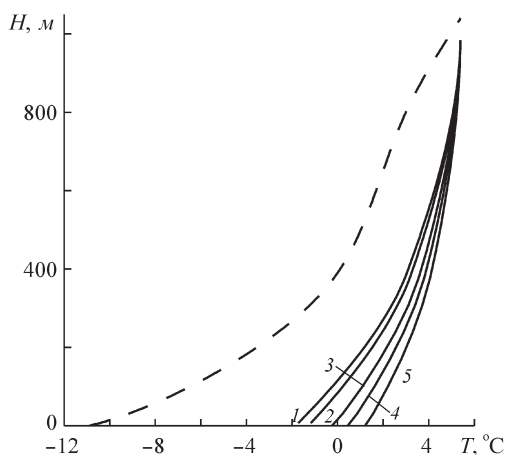


Рис. 2. Вертикальное распределение температуры воздуха (штриховая линия) и температуры поверхности капель (сплошные линии). Пермь, 12 ч ВСВ 14 декабря 2010 г.

1) $a = 1 \text{ мм}$, $Bi = 0,04$; 2) $a = 1 \text{ мм}$, $Bi = 0,035$; 3) $a = 1,5 \text{ мм}$, $Bi = 0,04$ ($a = 2 \text{ мм}$, $Bi = 0,06$); 4) $a = 2 \text{ мм}$, $Bi = 0,05$; 5) $a = 2 \text{ мм}$, $Bi = 0,04$.

тура поверхности капли уменьшается по мере приближения к поверхности земли, однако она выше, чем температура окружающего воздуха. Это связано с тем, что тепло отводится от внутренней части капли с конечной скоростью молекулярного теплопереноса. Температура капель радиусом $1\text{—}1,5 \text{ мм}$ вблизи поверхности земли ниже 0°C , и жидкость находится в переохлажденном состоянии (линии 1—3 на рис. 2) даже при относительно низкой степени теплообмена с окружающей средой ($Bi = 0,035\text{—}0,04$). Это связано с тем, что скорость падения мелких капель — меньше, а время движения их в атмосфере — больше, поэтому они сильнее охлаждаются. Круп-

ные капли (линии 4 и 5 на рис. 2) при тех же значениях числа Bi до самой земли имеют положительную температуру. Однако при больших значениях теплообмена ($Bi = 0,06$) даже крупные капли ($a = 2$ мм) успевают охладиться до отрицательной температуры (линия 3 на рис. 2). На рис. 2 видно, что уменьшение размера капли и увеличение ее теплообмена с окружающей средой ведут к более быстрому понижению температуры поверхности капли.

На рис. 3 представлено распределение температуры в капле в момент достижения ею подстилающей поверхности для двух размеров каплей в случае, когда их поверхность находится в переохлажденном состоянии. Для более крупных каплей (линия 1, рис. 3) внутренняя область (примерно 70% по радиусу капли) имеет положительную температуру, тогда как внешняя их часть переохлаждена. Мелкие капли полностью переохлаждены (линия 2, рис. 3).

Исходя из условия теплового баланса оценим, какая часть капли может превратиться в лед при кристаллизации переохлажденной воды в капле:

$$mc T = mL, \quad (7)$$

где $c = 4200$ Дж/(кг К) — удельная теплоемкость воды; m — масса капли, кг; $L = 3,3 \cdot 10^5$ Дж/кг — удельная теплота плавления льда; T — разность температуры плавления льда и температуры капли у поверхности земли.

Тогда в мелких каплях, охлаждающихся до температуры -2°C (рис. 2, линия 1), максимальная доля капли, превратившаяся при ее падении в лед, составляет

$$\frac{m}{m} \frac{c T}{L} 100\% = \frac{4200}{3,3 \cdot 10^5} \frac{2}{1} 100\% = 2,5\%. \quad (8)$$

Считая, что капля промерзает равномерно с поверхности и что в переохлажденной капле произошел фазовый переход, например, из-за столкновения с центром кристаллизации, можно оценить толщину ледяной корочки следующим образом:

$$\frac{4}{3}(a^3 - r^3) / \frac{4}{3}a^3 = 1 - \frac{r^3}{a^3} = 2,5 \cdot 10^{-2}, \quad (9)$$

$$\frac{r}{a} = (1 - 2,5 \cdot 10^{-2})^{1/3} = 0,992.$$

Таким образом, доля ледяной корочки не превышает 0,8% радиуса капли даже при наиболее благоприятных условиях охлаждения.

Как уже отмечалось выше, вероятность образования замерзающих осадков при температуре ниже -10°C мала, поэтому для сравнения с реальным (наблюдаемым) распределением температуры воздуха была смодели-

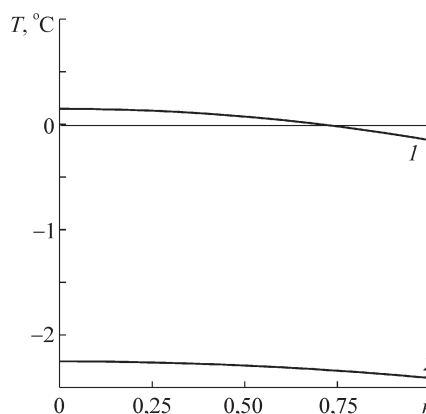


Рис. 3. Распределение температуры внутри капель без учета фазового перехода.

1) $a = 1,5$ мм, $Bi = 0,04$; 2) $a = 1$ мм, $Bi = 0,04$.

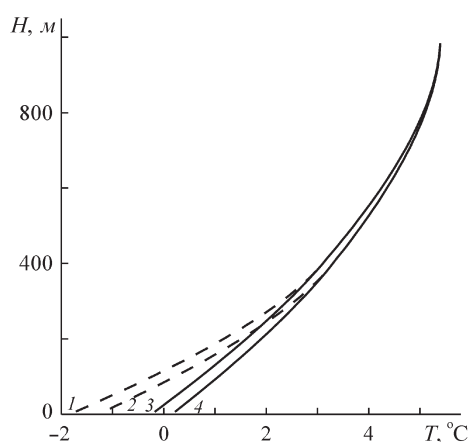


Рис. 4. Изменение с высотой температуры поверхности капель.

1, 3) $a = 1$ мм, $Bi = 0,035$; 2, 4) $a = 1$ мм, $Bi = 0,04$. Штриховые линии соответствуют температуре воздуха у поверхности земли $T = -10,9^\circ\text{C}$, сплошные $T = -5^\circ\text{C}$.

лирована ситуация эволюции температуры падающих капель для случая температуры воздуха у поверхности земли -5°C . Предполагается, что расположение нулевой изотермы и распределение температуры воздуха выше нее в обоих случаях одинаковы, а вертикальные градиенты температуры в интервале высот 0—390 м различаются в два раза (рис. 4). В случае температуры воздуха у поверхности земли -5°C теплообмен капель с атмосферой происходит менее интенсивно, чем в случае с $T = -10,9^\circ\text{C}$, поэтому температура капель у поверхности земли выше. При этом она либо положительна, либо имеет небольшие отрицательные значения.

5. Заключение

В средних широтах Северного полушария замерзающие осадки (дождь и морось) — явление редкое. Чаще всего они наблюдаются в интервале приземной температуры от $-0,1$ до -2°C и очень редко — при температуре ниже -10°C . Здесь рассмотрены метеорологические и синоптические условия выпадения замерзающих осадков на территории Пермского края 14 декабря 2010 г., когда приземная температура была $-10,9^\circ\text{C}$. На основе данных радиозондирования атмосферы численно смоделирован процесс охлаждения падающих капель и рассчитана их температура. Показано, что капли крупного размера не успевают достичь состояния переохлаждения и при падении на землю имеют положительную температуру. Более мелкие капли охлаждаются до отрицательной температуры. Выполненная оценка процесса превращения в лед падающих капель при кристаллизации переохлажденной воды показала, что при фазовом переходе объемная доля ледяной оболочки капель не превышает 3% даже при наиболее благоприятных условиях охлаждения.

Авторы благодарят начальника отдела метеорологических прогнозов Пермского ЦГМС Л. Н. Кузьмину за предоставленные данные об условиях погоды и за синоптические материалы за 13—15 декабря 2010 г. по территории Пермского края.

Работа выполнена при поддержке ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” на 2009—2013 гг. (проект 2011-1.2.1-220-010/86).

Литература

1. Арабей Е. Н. Данные радиозондирования как средство выявления облачных слоев. — Метеорология и гидрология, 1975, № 6, с. 32—37.
2. Дмитриева-Арраго Л. Р., Колоскова Л. Ф. О приближенном способе определения границ облачности. — Метеорология и гидрология, 1969, № 6, с. 47—51.
3. Калинин Н. А., Смирнова А. А. Исследование радиолокационных характеристик для распознавания опасных явлений погоды, связанных с кучево-дождевой облачностью. — Метеорология и гидрология, 2005, № 1, с. 84—95.
4. Калинин Н. А., Смирнова А. А. Совместное использование данных радиолокационных и станционных наблюдений для анализа облачных полей. — Метеорология и гидрология, 2002, № 8, с. 53—60.
5. Калинин Н. А., Смирнова А. А. Численный анализ данных радиолокационных и станционных измерений облачности. — Метеорология и гидрология, 2003, № 7, с. 31—39.
6. Матвеев Л. Т. Физика атмосферы. — Л., Гидрометеиздат, 2000, 780 с.
7. Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения. РД 52.88.629-2002. — СПб, Гидрометеиздат, 2002, 42 с.
8. Облака и облачная атмосфера. Справочник. /Под ред. И. П. Мазина, А. Х. Хргиана.— Л., Гидрометеиздат, 1989, 648 с.
9. Положение о порядке действий учреждений и организаций при угрозе возникновения и возникновении опасных природных явлений. РД 52.88.699-2008. — М., 2008, 34 с.
10. Шакина Н. П., Скриптунова Е. Н., Завьялова А. А. Условия выпадения замерзающих осадков в некоторых аэропортах России и СНГ. IV. Аэропорт Нижний Новгород. — Метеорология и гидрология, 2007, № 7, с. 25—39.
11. Шакина Н. П., Скриптунова Е. Н., Иванова А. Р. Условия выпадения замерзающих осадков в некоторых аэропортах России и СНГ. I. Аэропорты московского аэроузла. — Метеорология и гидрология, 2003, № 6, с. 40—58.
12. Шакина Н. П., Скриптунова Е. Н., Иванова А. Р. Условия выпадения замерзающих осадков в некоторых аэропортах России и СНГ. II. Аэропорт Минеральные Воды. — Метеорология и гидрология, 2005, № 2, с. 27—42.
13. Шакина Н. П., Скриптунова Е. Н., Иванова А. Р. и др. Условия выпадения замерзающих осадков в некоторых аэропортах России и СНГ. III. Аэропорт Одесса. — Метеорология и гидрология, 2005, № 9, с. 5—18.

Поступила
3 XII 2011

UNUSUAL PHENOMENON OF FREEZING RAIN IN PERM KRAI

N. A. Kalinin and B. L. Smorodin

Analyzed is a phenomenon of the freezing rain observed in Perm krai on December 14, 2010, when the surface temperature was $-10,9^{\circ}\text{C}$. The process of cooling of falling drops is numerically simulated and their temperature is computed on the basis of the data of radio sounding of the atmosphere. It is demonstrated that the large-size drops do not have time to reach the supercooling state and, when falling to the ground, have a positive temperature. The finer drops are cooled to the negative temperature. An executed estimation of the process of transformation of falling drops into ice at the crystallization of the supercooled water demonstrated that the volume fraction of the ice cover of drops at the phase transition does not exceed 3% even under optimum cooling conditions.