

**Редкое явление  
замерзающего дождя в  
Пермском крае**

**Н.А. Калинин,  
Б.Л. Смородин,  
Д.В. Давыдов**

# 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.
- Особенно опасны крупнокапельные переохлажденные осадки (замерзающий дождь), с которыми связаны авиационные катастрофы, анализ которых привел к необходимости повышения уровня защищенности воздушных судов от обледенения.
- В 1990-е годы под эгидой ВМО были начаты работы по исследованию условий погоды и климатических характеристик замерзающих осадков, актуальные для России.
- За последние 10 лет Шакиной Н.П. с коллегами проанализирован большой массив данных по 5 аэропортам Московского аэроузла, а также в аэропортах Минеральные Воды, Одесса и Нижний Новгород.
- В половине случаев образование замерзающих дождей соответствует интервалу приземной температуры от 0 до  $-2^{\circ}\text{C}$ . При температуре ниже  $-10^{\circ}\text{C}$  и выше  $0^{\circ}\text{C}$  замерзающие осадки практически не наблюдались.

# 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 же замерзал, образуя наст на снегу и тонкую ледяную пленку на различных предметах.
- На отдельных станциях Пермского края гололед сохранялся до 17 декабря, а на станции Губаха гололедные отложения разрушились только днем 21 декабря.
- Необычность явления заключалась в довольно низкой температуре воздуха у поверхности земли. В Перми в 12 ч ВСВ (17 ч местного времени) было  $-10,9^{\circ}\text{C}$ . По территории края температура воздуха составляла от  $-3$  до  $-16^{\circ}\text{C}$ .
- Явление замерзающего дождя при такой низкой температуре наблюдается довольно редко. Например, только в двух из 268 случаев замерзающего дождя, зафиксированных в аэропортах Московского аэроузла, температура у поверхности земли была ниже  $-10^{\circ}\text{C}$
- Ночью 15 декабря на севере Пермского края дожди перешли в снег, достигнув критерия неблагоприятного явления.

## Некоторые последствия замерзающих осадков



- Печальные последствия «зимних ливней» не заставили себя ждать. Стекла автомобилей мгновенно покрывались льдом, с которым не справлялись «дворники», поэтому в ход пошли скребки.

# Некоторые последствия замерзающих осадков

- В Березниках, с населением 160 тыс. человек, горадминистрация в связи с погодными условиями даже создала комиссию по чрезвычайным ситуациям. Так, 15 декабря до 17 часов за медпомощью обратился 51 житель Березников с переломами и 7 человек с более серьёзными травмами, в том числе полученными в автоавариях.
- Образовавшийся после дождей гололед внес коррективу в работу воздушного транспорта. 18 декабря при взлёте аэробус «А 319» авиакомпании «S7 Airlines» (выполнявший рейс Пермь – Москва) во время поворота выкатился со взлётно-посадочной полосы аэропорта. Причина ЧП – обледенение полосы. К счастью, трагедии удалось избежать: 77 человек, находившихся на борту, отделались легким испугом и 8-часовым ожиданием из-за задержки рейса.
- 19 декабря аэропорт всё из-за того же обледенения не принимал самолёты до 15:30.

# Синоптические условия

- Днем 14 декабря в средней и нижней тропосфере циркуляцию обуславливали два высотных циклона с центрами в районе Западной Украины и полуострова Таймыр. Между циклонами располагался слабо выраженный гребень, ориентированный с северного Казахстана на средний Урал. Ведущий поток имел южное направление. Скорость ветра на уровне 5 км составляла 19 м/с.
- ВФЗ наблюдалась над Гренландией и Скандинавским полуостровом, 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 находился в стадии заполнения, являлся высоким барическим образованием и смещался согласно ВФЗ с юга на север со скоростью 15 км/ч. Давление в центре циклона росло 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 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 на фронте составил  $4,5^{\circ}/100$  км, на уровне 1,5 км —  $5^{\circ}/100$  км. Фронт в поле осадков выражен не был. Осадки отмечались лишь вблизи центра циклона. Барические тенденции перед фронтом были слабо отрицательные с максимальным значением  $-1,3$  гПа/3ч над западными районами Пермского края.
- Ночью 14 декабря в нижних слоях атмосферы над территорией края располагалась теплая воздушная масса, но очень сухая. Осадки, сформировавшиеся в теплой воздушной массе, не успевали перейти в твердую фазу и достигали поверхности земли в виде слабого дождя.

# 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. Перми 14 декабря 2010 г. (рис.1).
- Благодаря интенсивному горизонтальному переносу теплого воздуха с юга (направление ветра 190—150 градусов, скорость 10—14 м/с) в 12 ч ВСВ в интервале высот 390—1700 м отмечалась положительная температура.
- Нижняя граница облака находится вблизи уровня, на котором дефицит точки росы уменьшается до  $2^{\circ}\text{C}$ , что в данном случае соответствует высоте 1200 м. Другой способ оценки этой границы, 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». Оно соответствует классическому механизму образования замерзающего дождя: снежинки из верхней части облака попадают в область с положительной температурой и тают, образуя капли. Капли, проходя слой с температурой воздуха ниже  $0^{\circ}\text{C}$ , переохлаждаются и замерзают от соприкосновения с подстилающей поверхностью, также имеющей отрицательную температуру.

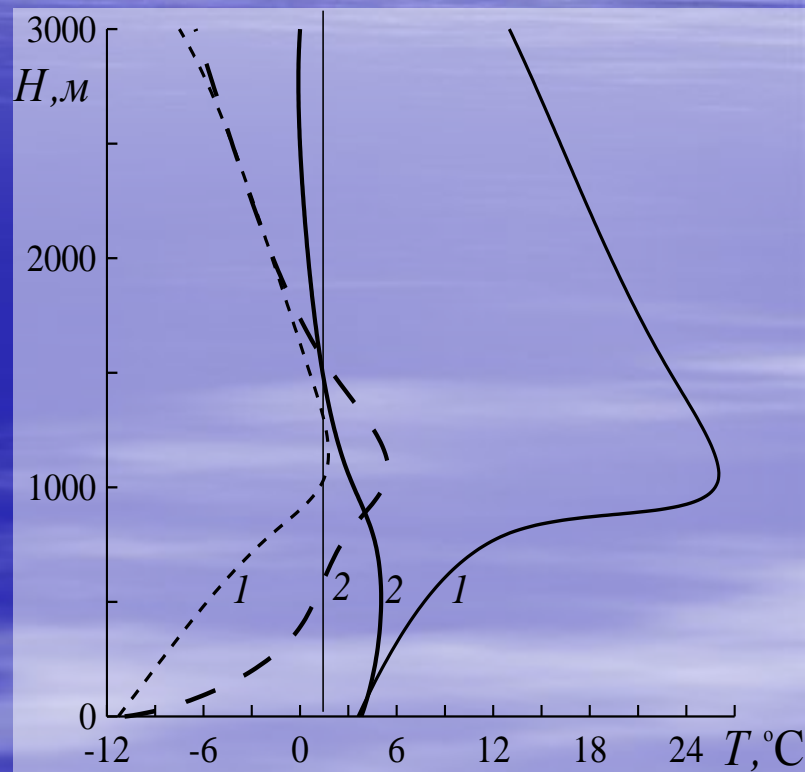


Рис. 1. Вертикальные профили температуры воздуха (штриховые линии) и дефицита точки росы (сплошные линии).

Пермь 14 декабря 2010 г.:  
1 — 0 ч ВСВ; 2 — 12 ч ВСВ.

# Результаты численного моделирования процесса охлаждения падающих капель

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

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \chi_{\text{в}} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (1)$$

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

- граничные условия в центре капли (нет теплового потока):  $\frac{\partial T}{\partial r} = 0$  при  $r = 0$  (2)

- На поверхности капли ( $r=a$ ) считается выполненным линейный закон теплоотдачи (тепловой поток на поверхности равен теплоотдаче по Ньютону):

$$\chi_{\text{в}} \frac{\partial T}{\partial r} = -\alpha (T - T_{\text{возд}}(H(t))) \quad (3)$$

где  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи на границе вода—воздух,  $\text{Вт}/\text{м}^2 \times \text{К}$ .

- Температура окружающего воздуха, определяемая по данным радиозондирования (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, пространственное распределение температуры в атмосфере можно считать не зависящим от времени. Капли падают на землю с постоянной скоростью, величина которой зависит от их размера.



# Результаты численного моделирования процесса охлаждения падающих капель

- Для того чтобы рассчитать температуру капли решалась следующая задача. В каждый момент времени рассчитывались координаты капли радиуса  $a$  над поверхностью земли, в соответствии с которыми задавалась температура на ее поверхности, и решалось уравнение теплопроводности. Можно предположить, что начальная температура капли составляет  $5,4^\circ\text{C}$ , при которой происходит интенсивное формирование капель дождя в нижней части облака под действием процесса коагуляции в области «теплого носа»
- Используем в качестве масштабов длины  $[r] = a$ , времени  $[t] = a^2/\chi_b$ , скорости  $[v] = \chi_b/a$  и запишем уравнение теплопроводности и соответствующие граничные условия в безразмерном виде

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (4)$$

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

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

- В уравнение (5) входит безразмерный параметр — число  $Bi = \frac{\alpha a}{\chi_b}$ , 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  $\alpha$ , который сильно зависит от окружающих условий и лежит в интервале  $20\text{—}50 \text{ (Вт/м}^2\text{×К)}$ , в дальнейшем будем рассматривать температуру капель при различных значениях  $Bi$ .

# Результаты численного моделирования процесса охлаждения падающих капель

- Вертикальные профили температуры поверхности капли представлены на рис. 2 для различных наборов числа  $Bi$  и размера капель.
- Температура поверхности капли (сплошные линии) уменьшается по мере приближения к поверхности земли, однако она выше, чем температура окружающего воздуха (штриховая линия). Это связано с тем, что тепло отводится от внутренней части капли с конечной скоростью молекулярного теплопереноса.
- Температура капель радиусом 1—1,5 мм вблизи поверхности земли ниже нуля и жидкость находится в переохлажденном состоянии (линии 1—3 на рис. 2) даже при относительно низких степенях теплообмена с окружающей средой ( $Bi = 0,035—0,04$ ). Это связано с тем, что скорость падения мелких капель меньше, время движения их в атмосфере больше, поэтому они сильнее охлаждаются.
- Крупные капли (линии 4—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, рис. 2).
- Из рис. 2 следует, что уменьшение размера капли и увеличение ее теплообмена с окружающей средой ведут к более быстрому понижению температуры поверхности капли.

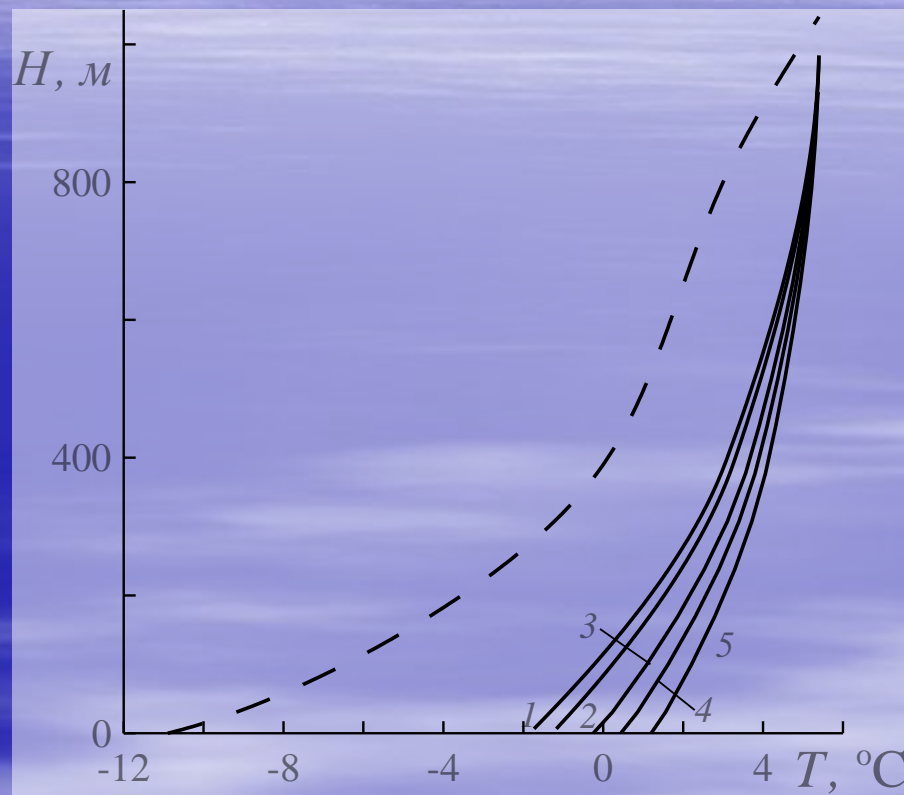


Рис. 2. Вертикальные профили температуры воздуха (штриховая линия) и температуры поверхности капель.

Пермь 14 декабря 2010 г. 12 ч ВСВ: 1 —  $a = 1$  мм,  $Bi = 0,04$ ; 2 —  $a = 1$  мм,  $Bi = 0,035$ ; 3 —  $a = 1,5$  мм,  $Bi = 0,04$  ( $a = 2$  мм,  $Bi = 0,06$ ); 4 —  $a = 2$  мм,  $Bi = 0,05$ ; 5 —  $a = 2$  мм,  $Bi = 0,04$ .

# Результаты численного моделирования процесса охлаждения падающих капель

- На рис. 3 представлено распределение температуры в капле в момент достижения ею подстилающей поверхности для двух размеров капель в случае, когда их поверхность находится в переохлажденном состоянии.
- Для более крупных капель (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).

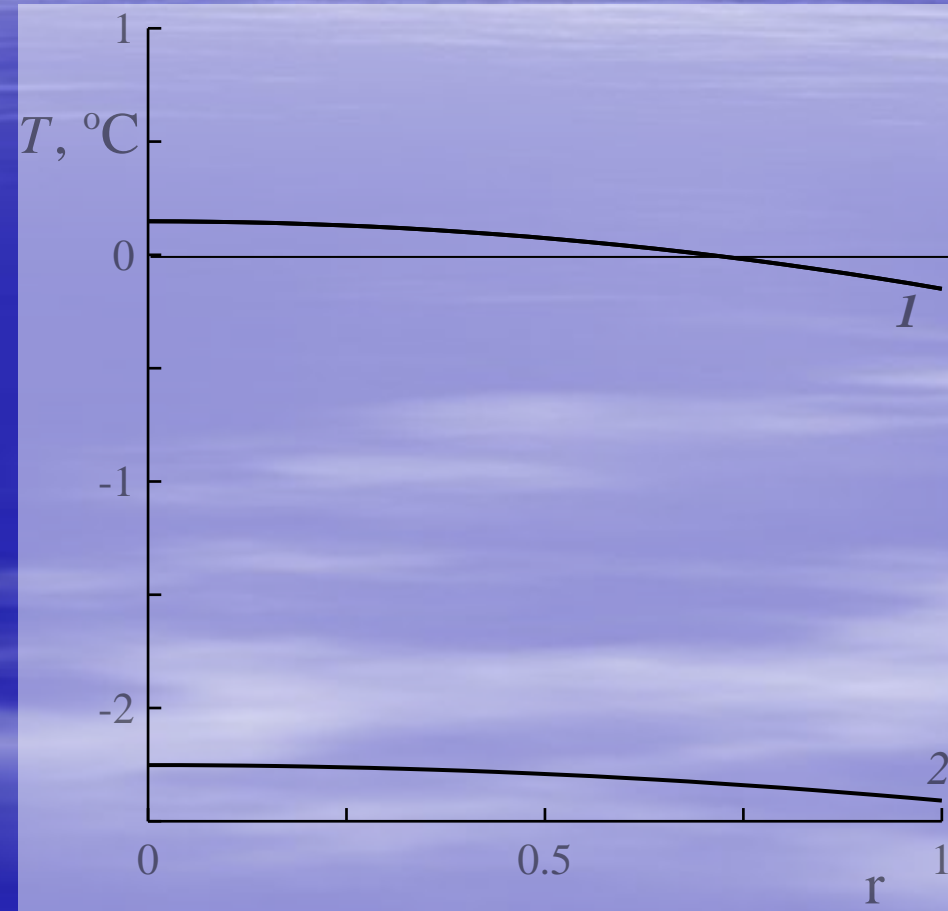


Рис. 3. Распределение температуры внутри капель без учета фазового перехода.

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

# Результаты численного моделирования процесса охлаждения падающих капель

- Исходя из условия теплового баланса, оценим, какая часть капли может превратиться в лед при кристаллизации переохлажденной воды в капле.
- В мелких каплях, охлаждающихся до температуры  $-2^{\circ}\text{C}$  (рис. 2, линия 1), максимальная доля капли, превратившаяся при ее падении в лед, равна

$$\frac{\Delta m}{m} = \frac{c\Delta t}{L} \cdot 100\% = \frac{4200 \cdot 2}{3,3 \cdot 10^5} \approx 2,5\% \quad (7)$$

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

$$\frac{4\pi}{3}(a^3 - r^3) / \frac{4\pi}{3}a^3 = 1 - \frac{r^3}{a^3} = 2,5 \cdot 10^{-2} \quad \frac{r}{a} = (1 - 2,5 \cdot 10^{-2})^{1/3} \approx 0,992 \quad (8)$$

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

# Результаты численного моделирования процесса охлаждения падающих капель

- Как уже отмечалось выше, вероятность образования замерзающих осадков при температуре ниже  $-10^{\circ}\text{C}$  мала, поэтому для сравнения с реальным (наблюдаемым) распределением температуры воздуха была смоделирована ситуация эволюции температуры падающих капель для случая температуры воздуха у поверхности земли  $-5^{\circ}\text{C}$ .
- Предполагается, что расположение нулевой изотермы и распределение температуры воздуха выше нее в обоих случаях одинаково, а вертикальные градиенты температуры в интервале высот (0—390 м) отличаются в два раза.
- Результат представлен на рис. 4. В случае температуры воздуха у поверхности земли  $-5^{\circ}\text{C}$  теплообмен капель с атмосферой происходит менее интенсивно, чем в случае  $-10,9^{\circ}\text{C}$ , поэтому температура капель у поверхности выше. Она либо положительна, либо имеет небольшие отрицательные значения.

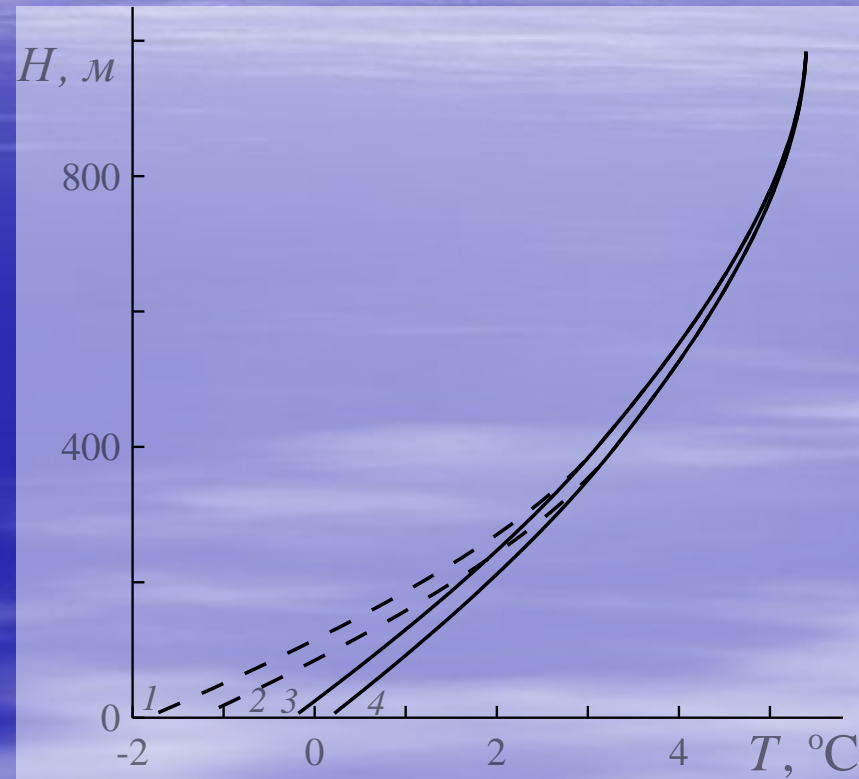


Рис. 4. Изменение с высотой температуры поверхности капель:

1,3 —  $a = 1 \text{ мм}$ ,  $Bi = 0,04$ ;

2,4 —  $a = 1 \text{ мм}$ ,  $Bi = 0,035$ .

Штриховые линии соответствуют температуре воздуха у поверхности земли  $T = -10,9^{\circ}\text{C}$ , сплошные  $T = -5^{\circ}\text{C}$ .

# Заключение

- В средних широтах Северного полушария замерзающие осадки (дождь и морось) — явление редкое. Чаще всего они наблюдаются в интервале приземной температуры 0 до  $-2^{\circ}\text{C}$  и очень редко при температуре ниже  $-10^{\circ}\text{C}$ .
- В данной работе рассмотрены метеорологические и синоптические условия выпадения замерзающих осадков на территории Пермского края 14 декабря 2010г., когда приземная температура составила  $-10,9^{\circ}\text{C}$ .
- 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.
- При учете фазовых переходов воды получены следующие результаты:
  - для капли радиусом  $a = 1$  мм толщина ледяной корки  $d = 0,021$  мм.
  - для капли радиусом  $a = 2$  мм ледяная корка отсутствует
- Авторы благодарят начальника отдела метеорологических прогнозов Пермского ЦГМС Людмилу Николаевну Кузьмину за предоставление данных об условиях погоды и синоптических материалов 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. («Влияние циклонической деятельности на условия формирования снежного покрова на Урале», проект 2011–1.2.1–220–010/86).

**Спасибо за внимание!**