

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2022-4-20-35>

УДК 551.578.9

Условия формирования опасных отложений зернистой изморози на Полярном Урале

И.И. Леонов

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,

г. Москва, Россия

leonov@geogr.msu.ru

Рассмотрены синоптические условия формирования зернистой изморози высокой интенсивности на территории Полярного Урала. В формировании зернистой изморози выявлена ведущая роль мезомасштабных процессов, в первую очередь связанных с особенностями рельефа местности. Проведены численные эксперименты по воспроизведению случаев образования зернистой изморози на территории горного массива Рай-Из с использованием мезомасштабной модели WRF-ARW. Результаты моделирования и используемые методы их интерпретации позволили получить подробные поля метеорологических величин, необходимых для правильной оценки вероятности и интенсивности образования зернистой изморози. Также было показано, что для успешного моделирования гололедно-изморозевых отложений в виде зернистой изморози целесообразно использовать шаги модели по пространству не более 2 км.

Ключевые слова: опасные явления погоды, гололедно-изморозевые отложения, обледенение, изморозь, зернистая изморозь, численный прогноз погоды, WRF-ARW

Formation conditions of hazardous hard rime accretion in the Polar Urals

I.I. Leonov

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

leonov@geogr.msu.ru

Synoptic conditions for the formation of high-intensity hard rime accretion on the territory of the Polar Urals are considered. A leading role of mesoscale processes primarily related to the terrain features in the formation of hard rime is revealed. Numerical experiments are implemented to reproduce the cases of hard rime formation on the territory of the Rai-Iz mountain range using the WRF-ARW mesoscale model. The simulation results and the methods used to interpret them made it possible to obtain detailed fields of meteorological parameters necessary for the correct assessment of the probability and intensity of the hard rime formation. It was also shown that it is reasonable to use model spatial steps of not more than 2 km for successful modeling of ice accretion in the form of hard rime.

Keywords: severe weather events, ice accretion, icing, rime, hard rime, numerical weather prediction, WRF-ARW

Введение

Одной из наиболее важных задач современной метеорологии остается изучение условий возникновения опасных явлений погоды и методов их прогнозирования. В типовой перечень опасных явлений погоды входят сильные гололедно-изморозевые отложения, диаметр которых превышает 20 мм для гололеда, 35 мм для мокрого снега и сложных отложений и 50 мм для отложений изморози [11].

Считается, что наибольшую опасность для хозяйственной деятельности человека представляет гололед, формирующийся, как правило, во время выпадения замерзающей мороси или замерзающего дождя [4]. Однако, помимо гололеда, большую угрозу хозяйственной деятельности человека представляют отложения изморози, достигающие опасных значений. Изморозь в атмосфере бывает двух видов – зернистая и кристаллическая. Кристаллическая изморозь является продуктом сублимации водяного пара, имеет небольшую плотность и прочность и, как правило, не приводит к серьезным последствиям. Отложения зернистой изморози относят в внутриоблачному обледенению, так как нарастание льда происходит вследствие столкновения переохлажденных капель тумана с различными объектами: проводами ЛЭП, ветвями деревьев и др. Зернистая изморозь имеет более высокую плотность и отличается большей, по сравнению с кристаллической изморозью, прочностью [2]. Такие отложения наиболее часто наблюдаются на территориях со сложным рельефом местности, для которых характерна высокая повторяемость переохлажденных туманов [8]. Чрезвычайные ситуации, вызванные образованием зернистой изморози в труднодоступных северных регионах России, тяжело ликвидировать. В связи с этим необходимо изучать условия формирования гололедно-изморозевых отложений с целью последующего развития прогнозных методов.

В предлагаемой работе предметом изучения являлись условия формирования отложений зернистой изморози высокой интенсивности на территории горного массива Рай-Из, располагающегося на Полярном Урале. По данным наблюдений на метеорологической станции Рай-Из, данная территория отличается особенно высокой повторяемостью образования изморозевых отложений, в том числе достигающих критериев опасного явления. В связи с этим данная территория хорошо подходит для изучения данных процессов.

В статье рассмотрены синоптические условия формирования трех отобранных случаев формирования опасных отложений зернистой изморози. Для более подробного изучения условий формирования и анализа вертикальной структуры тропосферы во время формирования зернистой изморози были проведены численные эксперименты с использованием мезомасштабной модели WRF-ARW.

Материалы и методика исследования

На первом этапе исследования были отобраны три случая формирования высокоинтенсивных отложений зернистой изморози на территории Полярного Урала в районе горного массива Рай-из (Райиз). Под высокоинтенсивными отложениями в данной работе понимаются отложения зернистой изморози, которые достигли опасных значений – 50 мм в диаметре. Рассматривались три синоптических периода, во время которых над Полярным Уралом сформировалась атмосферная циркуляция, которая привела к образованию опасных отложений зернистой изморози.

Информация о характеристиках изморозевых отложений для каждого из выбранных случаев приведена в таблице.

Таблица. Основные характеристики отложений зернистой изморози
Table. Main characteristics of hard rime accretion

| № случая | Дата и время начала обледенения | Масса отложения, г/м | Толщина отложения, мм | Диаметр отложения, мм | Продолжительность фазы нарастания, ч |
|----------|---------------------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------------------|
| 1 | 28.09.1994 21:00 | 2400 | 52 | 172 | 19 |
| 2 | 01.11.1996 12:00 | 2304 | 91 | 379 | 79 |
| 3 | 19.10.1997 15:00 | 2096 | 59 | 280 | 57 |

Для выполнения классического синоптического анализа использовались данные наблюдений с метеорологических станций [1] и данные реанализа ERA5 [6]. По ежечасным данным реанализа ERA5 были восстановлены поля давления, ветра, температуры воздуха на различных изобарических поверхностях, адвекции температуры и области выпадения осадков для каждого срока наблюдения с целью исследования перемещения воздушных масс через массив Рай-из. По срочным данным, полученным на метеорологической станции Рай-из (66.9° с. ш., 65.659° в. д.), были исследованы изменения наиболее важных параметров атмосферы во время обледенения: атмосферного давления, температуры и относительной влажности воздуха, скорости и направления ветра. Данные с гололедных станков использовались для оценки толщины, диаметра и массы отложений зернистой изморози, а также продолжительности фазы нарастания и сохранения обледенения.

Для более детального изучения мезомасштабных процессов, приводящих к образованию опасных отложений в виде зернистой изморози, были проведены эксперименты с использованием модели атмосферы WRF-ARW 4.1.2 [10]. Выбор модели обусловлен тем, что исходный код модели

находится в свободном доступе. Модель WRF-ARW постоянно совершенствуется, имеет большой выбор начальных данных, настроек запуска и инструментов для обработки результатов моделирования.

В качестве начальных и граничных условий для запуска численных экспериментов использовались данные реанализа ERA5 с шагом по пространству $0,25^\circ$. Область интегрирования имела четыре расчетных домена с шагами по пространству 18, 6, 2 и $0,667$ км с количеством узлов 142×121 для каждой вложенной сетки. В данном случае использование четырех вложенных сеток было обусловлено небольшим пространственным масштабом исследуемых процессов. На рис. 1 для наглядности представлено описание топографической подложки для профиля, проходящего через горный массив Рай-Из (от 66.737° с. ш., 65.290° в. д. до 67.050° с. ш., 66.018° в. д.). В случае численных экспериментов с использованием шага по пространству, равному 18 км, орографические особенности территории не разрешаются моделью, при использовании шага в 6 км разрешаются недостаточно полно. Уменьшение шага до 2 км и менее позволяет намного более точно описывать рельеф в области интегрирования и ожидать от модели успешного воспроизведения мезомасштабных процессов, связанных с влиянием орографии. С целью более точного изучения вертикальной структуры атмосферы использовалось увеличенное до 78 количество вертикальных уровней модели.

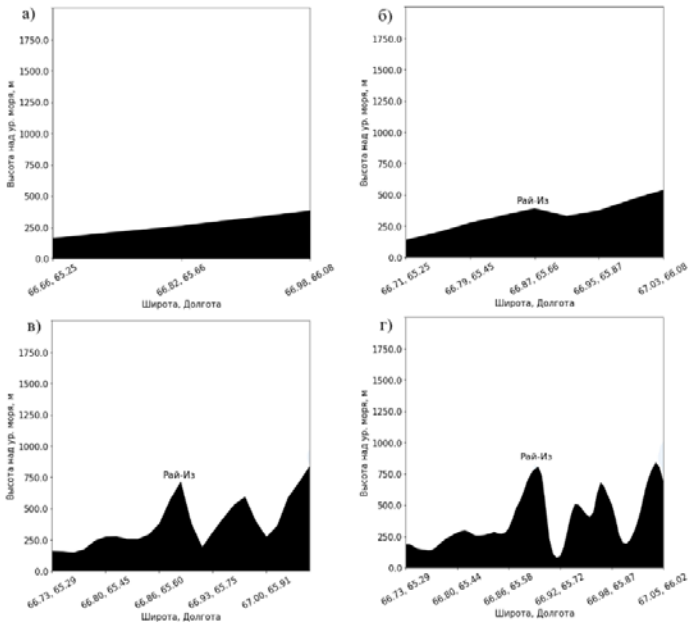


Рис. 1. Описание рельефа в модели WRF-ARW для шага: 18 км (а); 6 км (б); 2 км (в); 667 м (г).
Fig. 1. Description of the terrain in the WRF-ARW model for the step: 18 km (top left); 6 km (top right); 2 km (bottom left); 667 m (bottom right).

При проведении численных экспериментов использовалась параметризация пограничного слоя YSU, новая упрощенная схема Аракавы-Шуберта для описания конвекции и алгоритмы RRTMG для расчета коротковолновой и длинноволновой радиации. Схема Noah-MP использовалась в качестве модели, описывающей процессы, происходящие на подстилающей поверхности и в почве.

В экспериментах по воспроизведению внутриоблачного обледенения наибольшее значение имел выбор параметризации микрофизики. В ходе проведения численных экспериментов использовалась двухмоментная схема NSSL, включающая в себя расчет семи типов гидрометеоров: в виде водяного пара, облачных капель, дождя, снега, льда, крупы и града [9]. Кроме этого, параметризация позволяла получить поля концентраций ядер кристаллизации и концентрации облачных капель.

Модель запускалась на 96 часов для каждого из трех рассматриваемых периодов обледенения, результаты вычислений записывались с дискретностью в один час.

В настоящее время существует множество методов описания процессов внутриоблачного обледенения, используемых в численных моделях атмосферы. Большинство из них основано на уравнениях, описывающих обтекание воздушным потоком цилиндрического тела [5].

Интенсивность обледенения рассчитывается по формуле (1). Данная формула позволяет рассчитать массу отложения льда, образовавшегося на подверженном обледенению предмете за единицу времени, которая зависит от параметров атмосферы и размеров предмета.

$$\frac{dM}{dt} = E \cdot LWC \cdot V \cdot A, \quad (1)$$

где M – масса гололедно-изморозевого отложения; t – время обледенения; E – ослабляющий коэффициент; LWC – содержание жидкой воды в объеме воздуха (*Liquid Water Content*); V – скорость ветра на высоте 10 м; A – площадь поперечного сечения объекта, на котором происходит обледенение.

Коэффициент ослабления показывает долю переохлажденных капель тумана, которые преобразовались в отложения изморози, и рассчитывается по формуле:

$$E = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3, \quad (2)$$

где α_1 – коэффициент столкновения; α_2 – коэффициент налипания; α_3 – коэффициент намерзания.

Коэффициенты столкновения, прилипания и намерзания могут значительно занижать интенсивность отложений. Коэффициент столкновения (α_1) представляет собой отношение количества капель, столкнувшихся с объектом, к общему потоку капель, переносимому воздухом. Коэффициент прилипания (α_2) представляет собой отношение удержавшихся на объекте капель, переносимых потоком, к их общему количеству. Коэффициент намерзания (α_3) – это отношение переохлажденных капель воды, успевших

замерзнуть на поверхности столкновения, к общему количеству удержавшихся на объекте капель.

В случае зернистой изморози коэффициенты прилипания и намерзания близки к единице, так как жидкие капли легко прилипают к поверхности и из-за малого размера имеют небольшую теплоемкость и успевают быстро замерзнуть на препятствии.

Коэффициент столкновения в данном случае необходимо рассчитывать, так как часть небольших и легких капель переохлажденного тумана в потоке воздуха огибает препятствие из-за сил инерции. В основе подавляющего большинства методов расчета коэффициента столкновения заложено уравнение, описанное Лэнгмюром и Блоджет еще в 1946 году [7]. В данном методе оценивается влияние сил инерции и вязкости на переохлажденные капли тумана и с помощью безразмерных величин определяется доля капель, которые должны столкнуться с твердым телом.

В текущей работе для оценки массы отложения зернистой изморози использовался аналогичный, но более современный метод, предложенный Лозовски [5]. Согласно этому методу, коэффициент столкновения α_1 рассчитывается по формуле:

$$\alpha_1(K_0) = \begin{cases} 0,489(\log_{10} 8K_0)^{1,978}, & 0,125 < K_0 < 0,9 \\ \frac{K_0}{K_0 + \frac{\pi}{2}}, & K_0 \geq 0,9 \end{cases}, \quad (3)$$

где K_0 – безразмерный параметр, рассчитываемый по формуле

$$K_0 = 0,125 + \frac{K - 0,125}{1 + 0,0967Re^{0,6367}}, \quad (4)$$

где K – число Стокса (5); Re – число Рейнольдса (6).

$$K = \frac{\rho_w D_d^2 V}{9\mu D_c}, \quad (5)$$

где ρ_w – плотность воды; D_c – диаметр объекта подверженного обледенению; D_d – диаметр капли переохлажденного тумана; μ – динамическая вязкость воздуха.

$$Re = \frac{VD_c\rho_a}{\mu}, \quad (6)$$

где ρ_a – плотность воздуха.

Результаты синоптического анализа

Чаще всего синоптические условия формирования зернистой изморози схожи с условиями формирования внутримассовых гололедов. Это процессы, связанные с образованием низкой внутримассовой облачности или плотного адвективного тумана [3].

В текущей работе был проведен подробный синоптический анализ трех периодов, во время которых были зафиксированы опасные отложения зернистой изморози.

В конце сентября 1994 года на территории Полярного Урала наблюдалось прохождение интенсивной циклонической серии. С 23 по 26 сентября 1994 г. через область горного массива Рай-Из проходило два молодых циклона, смещавшихся в восточном направлении. В ночь с 26 на 27 сентября территория находилась в тылу уходящего на восток циклона, а в середине дня 28 сентября – уже в области повышенного давления вблизи точки седловины, давление на метеорологической станции Рай-Из в тот момент составляло 1018,7 гПа. Под действием ведущего потока к концу 28 сентября к территории подошел новый циклон серии (рис. 2а).

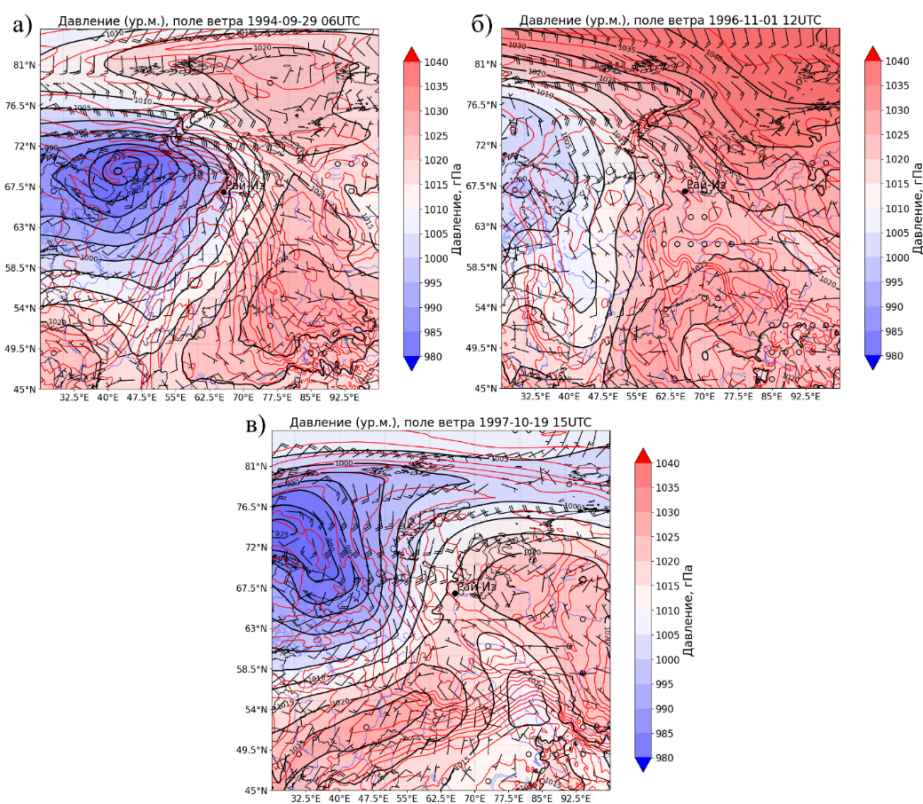


Рис. 2. Синоптические условия в период наиболее интенсивного образования отложений изморози на территории Полярного Урала: 29.09.1994 06 ч ВСВ (а); 01.11.1996 12 ч ВСВ (б); 19.10.1997 15 ч ВСВ (в).

Fig. 2. Synoptic conditions during the most intensive formation of hard rime accretion in the Polar Urals: 06 UTC 29.09.1994 (top left); 12 UTC 01.11.1996 (top right); 15 UTC 19.10.1997 (bottom).

Утром 29 сентября территория Полярного Урала располагалась в области сильной адвекции теплого воздуха. Она была обусловлена расположением исследуемой территории в теплом секторе мощного циклона, смещавшегося с района Балтийского моря в северо-восточном направлении. Температура воздуха начала повышаться с $-2.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ в сторону положительных значений, при этом относительная влажность воздуха достигла 100 %. В момент начала обледенения на метеорологической станции Рай-Из был зафиксирован сильный ветер юго-западного направления со скоростью 16 м/с и порывами до 23 м/с. В отдельные сроки наблюдений скорость возрастала до 20 м/с, а скорость порывов до 26 м/с (рис. 3).

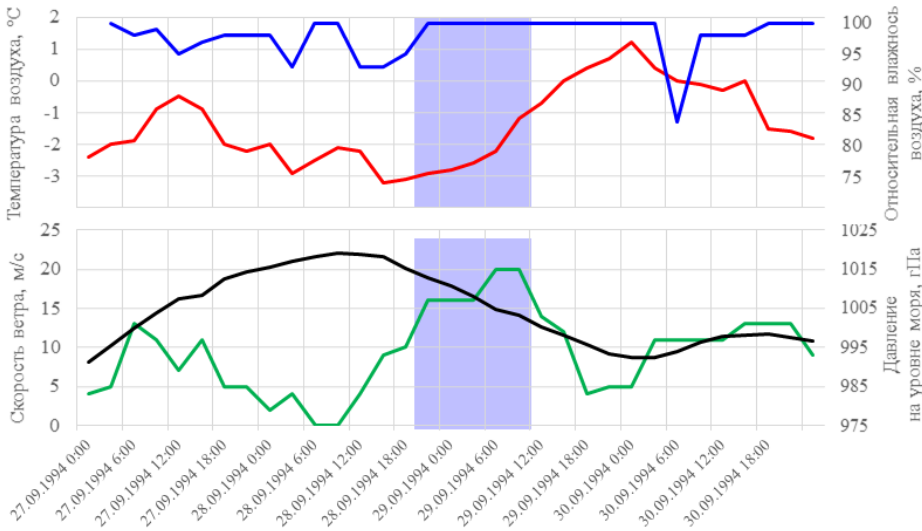


Рис. 3. Ход основных метеорологических величин с 27 по 30 сентября 1994 года: синяя линия – относительная влажность воздуха на высоте 2 м; красная – температура воздуха на высоте 2 м; черная – атмосферное давление на уровне моря; зеленая – средняя скорость ветра на высоте 10 м.
Fig. 3. Graph of values of main meteorological values from September 27 to September 30, 1994: blue line – relative humidity at 2 m; red – air temperature at 2 m; black – atmospheric pressure at sea level; green – average wind speed at 10 m.

Фаза сохранения отложений зернистой изморози длилась 21 час, что всего на 2 часа больше, чем продолжительность фазы нарастания. Столь небольшая разница в продолжительности стадий была связана с продолжавшейся адвекции тепла и ростом температуры воздуха до положительных значений, а также прохождением слабого ливневого дождя, который привел к быстрому разрушению отложений льда.

Иная ситуация наблюдалась в конце октября – начале ноября 1996 г. Во время второго рассматриваемого периода район метеорологической

станции Рай-Из находился в области размытого барического поля (рис. 2б). По данным реанализа ERA5 наблюдался ветер юго-восточных направлений, который приносил холодный воздух с выхолаженной под действием антициклона территории полуострова Таймыр, что указывает на масштабный процесс адвекции холода. Однако на метеорологической станции в момент образования зернистой изморози наблюдался ветер переменных направлений, от южного до западного. Этот факт объясняется мезомасштабной циркуляцией, возникшей в условиях размытого барического поля и влияния горного массива Рай-Из. Скорость ветра при обледенение составляла 10–12 м/с с порывами до 14 м/с. Температура воздуха вследствие адвекции холода понижалась, относительная влажность воздуха возрастала с 90 до 100 % (рис. 4).

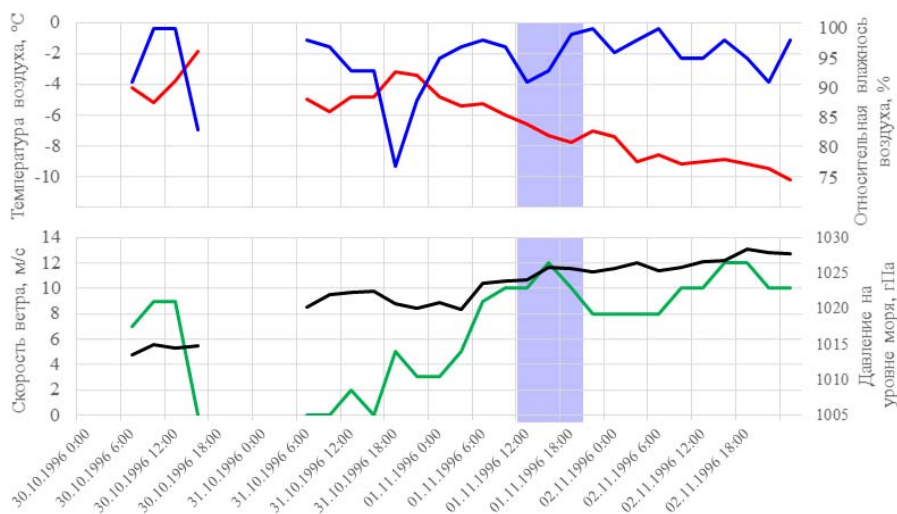


Рис. 4. Ход основных метеорологических величин с 30 октября по 2 ноября 1994 года: синяя линия – относительная влажность воздуха на высоте 2 м; красная – температура воздуха на высоте 2 м; черная – атмосферное давление на уровне моря, зеленая – средняя скорость ветра на высоте 10 м.

Fig. 4. Graph of values of main meteorological values from October 30 to November 2, 1994: blue line – relative humidity at 2 m; red – air temperature at 2 m; black – atmospheric pressure at sea level, green – average wind speed at 10 m.

Продолжительность фазы нарастания составила 79 часов, продолжительность фазы сохранения – 122 часа. Столь продолжительная фаза нарастания изморози обусловлена слабо изменяющейся синоптической ситуацией. Действительно, метеорологическая станция Рай-Из находилась несколько дней в области размытого барического поля, также на протяжении всего периода наблюдалась отрицательная температура воздуха.

Третий рассмотренный синоптический период приходился на середину октября 1997 года. 18 октября 1997 года территория Полярного Урала располагалась в центре антициклона, значения атмосферного давления на метеорологической станции Рай-Из, приведенные к уровню моря, достигали 1030,8 гПа. В течение последующих суток область высокого давления смещалась на юго-восток, а в район горного массива Рай-Из продвигался мощный циклон с Баренцева моря. На момент начала обледенения массив Рай-Из находился практически в точке седловины (рис. 2в). С продвижением циклона на восток усиливалась адвекция тепла. Температура начала повышаться. Относительная влажность воздуха на протяжении всего обледенения составляла 100 %. Скорость ветра от 10 до 14 м/с с порывами до 20 м/с (рис. 5). Направление ветра юго-западное и южное. Зернистая изморозь нарастала в течение 57 часов. Ледяные отложения сохранялись 72 часа до полудня 22 октября 1997 года.

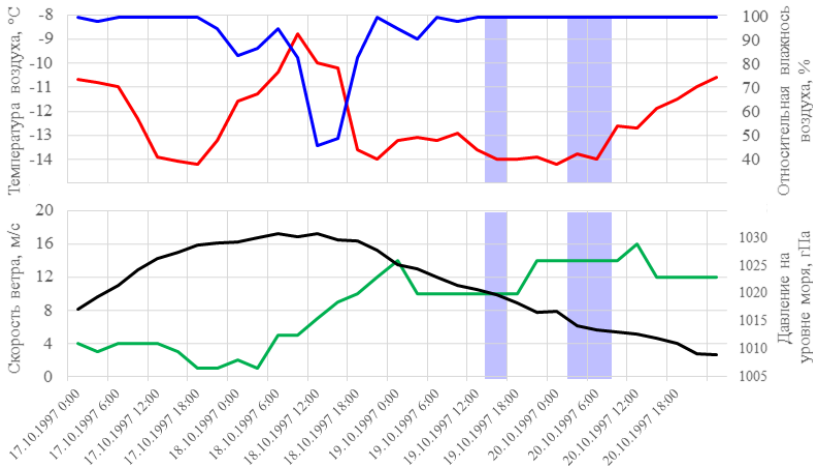


Рис. 5. Ход основных метеорологических величин с 17 по 20 октября 1994 года: синяя линия – относительная влажность воздуха на высоте 2 м; красная – температура воздуха на высоте 2 м; черная – атмосферное давление на уровне моря; зеленая – средняя скорость ветра на высоте 10 м.

Fig. 5. Graph of values of main meteorological values from October 17 to October 20, 1994: blue line – relative humidity at 2 m; red – air temperature at 2 m; black – atmospheric pressure at sea level; green – average wind speed at 10 m.

Результаты синоптического анализа показали, что во всех трех случаях наблюдалась различная синоптическая ситуация. Особенно сильное влияние в формировании зернистой изморози оказывали именно мезометеорологические процессы: образование сплошного переохлажденного тумана, вызванного перетеканием воздушных масс через горный хребет, а также усиление скорости ветра.

Результаты численного моделирования

Данных с наземных метеорологических станций не всегда достаточно для детального описания какого-либо метеорологического явления. Особенно это характерно для метеорологических станций, расположенных в труднодоступных и горных территориях России.

В качестве дополнительных данных можно использовать атмосферные реанализы, имеющие высокое пространственное разрешение. Реанализ ERA5 с шагом по пространству $0,25^\circ$ (около 28 км) хорошо подходит для описания явлений синоптического масштаба, но для описания мезомасштабных процессов такого разрешения недостаточно.

С целью получения значений метеорологических полей с более высоким пространственным и временным разрешением были проведены численные эксперименты по восстановлению параметров нижней тропосферы при формировании опасных отложений зернистой изморози с использованием атмосферной модели WRF-ARW. Главной целью численного моделирования было воспроизведение мезомасштабных условий атмосферной циркуляции, приводящих к формированию отложений зернистой изморози.

На первом этапе обработки результатов численного моделирования были рассмотрены поля основных метеорологических величин: температуры воздуха, относительной влажности воздуха, скорости и направления ветра. От точности воспроизведения данных параметров напрямую зависит успешность воспроизведения зернистой изморози.

Температура воздуха влияет на распространение области обледенения. Так, например, моделью были воспроизведены особенности распределения области отрицательной температуры воздуха в районе горного массива Рай-Из.

Во время проведения численных экспериментов были получены более точные поля ветра. Модель с минимальным шагом сетки воспроизвела скорость ветра на метеостанции Рай-Из намного точнее, чем с шагом 18 и 6 км. Так, например, в случае экспериментов с шагом 18 км скорость ветра в период с 17 по 20 октября 1997 года в среднем была ниже наблюдений на 3,7 м/с, с шагом 6 км – на 3,3 м/с, с шагом 2 км – на 1,1 м/с, с шагом 667 м – уже на 0,7 м/с. Несмотря на ощутимое улучшение качества моделирования с увеличением разрешения модели, скорость ветра значительно занижалась во всех случаях. Как будет показано ниже, это повлияло и на занижение массы зернистой изморози. Направление ветра также более точно воспроизводится мезомасштабной моделью с высоким разрешением. Данные WRF-ARW показали, что модель воспроизводит направление ветра намного точнее, чем реанализ ERA5, данные которого сильно отличались от наблюдаемых на станции.

Далее оценивалось пространственное распределение поля содержания жидкой фазы воды в воздухе – LWC. Данный параметр является наиболее важным для описания образования зернистой изморози. На рис. 6б, г, е рассматривается пространственное положение области возможного обледенения, а на рис. 6а, в, д представлены вертикальные разрезы атмосферы.

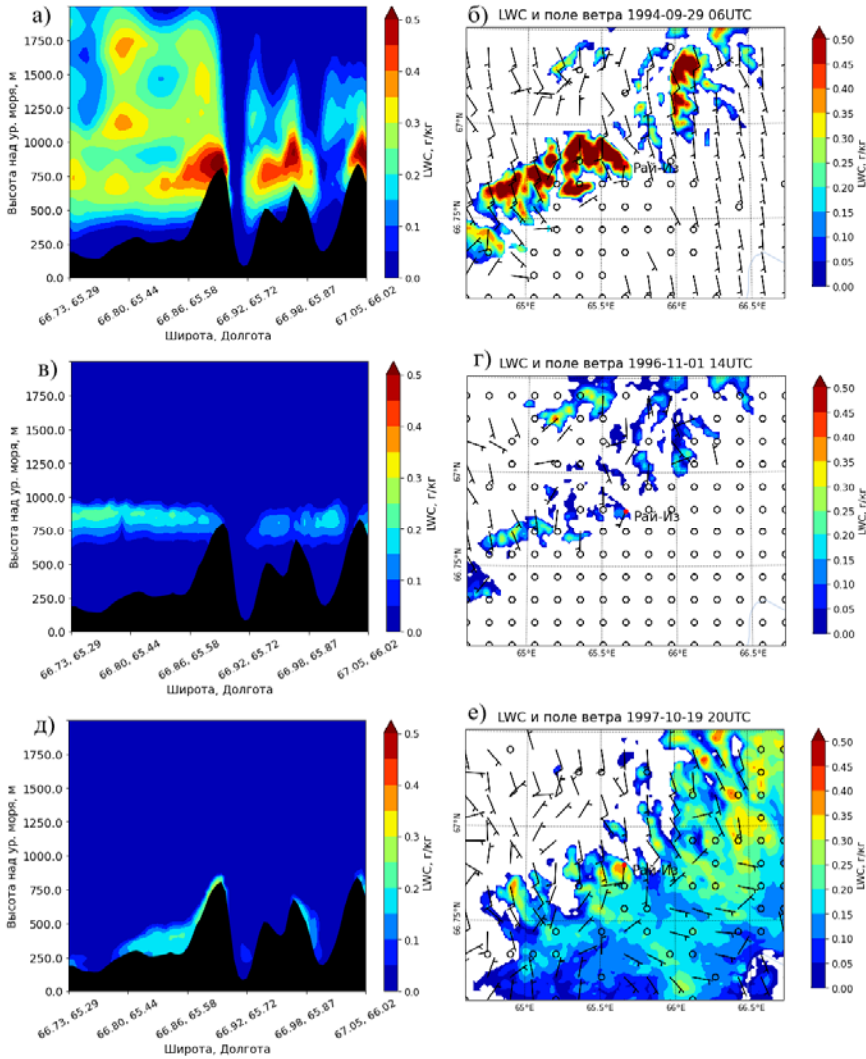


Рис. 6. Вертикальный разрез атмосферы через горный массив Рай-Из: 29.09.1994 06 ч ВСВ (а); 01.11.1996 14 ч ВСВ (в); 19.01.1997 20 ч ВСВ (д). Поле содержания жидкой воды (LWC) на территории Полярного Урала: 29.09.1994 06 ч ВСВ (б); 01.11.1996 14 ч ВСВ(г); 19.01.1997 20 ч ВСВ (е). **Fig. 6.** Vertical cross section of the atmosphere through the mountain range Rai-Iz: 29.09.1994 06 UTC (top left); 01.11.1996 14 UTC (center left); 19.01.1997 20 UTC (bottom left). Liquid water content field (LWC) in the Polar Urals: 29.09.1994 06 UTC (top right); 01.11.1996 14 UTC (center right); 19.01.1997 20 UTC (bottom right).

Как было показано выше, пространственное разрешение модели имеет особенно важное значение при воспроизведении и прогнозировании явлений, на формирование которых большое слияние оказывает точность описания моделью рельефа местности. Результаты численных экспериментов

позволили получить пространственные разрезы тропосферы во время формирования опасных отложений изморози на территории горного массива Рай-Из. Во всех трех случаях модель воспроизвела область образования переохлажденного тумана, сформировавшегося вследствие обтекания влажной воздушной массой горных хребтов. Рассмотрим результаты всех трех случаев более подробно.

В случае 1994 года наблюдалось очень высокое содержание жидкой воды в воздухе, в области наблюдения изморози – свыше $0,5 \text{ г/м}^3$. Данный случай отличается наиболее высокой скоростью обледенения: при наибольшей массе отложения, 2400 г на метр провода гололедного станка, продолжительность обледенения составила всего 19 часов. Также данный случай характеризуется наибольшей плотностью отложения – около 400 г/см^3 . Это связано с большим влагосодержанием и с более высокой температурой воздуха в момент обледенения, так как размер облачных капель пропорционален влагосодержанию, а более крупные капли интенсивнее растекаются на поверхности тела и образуют более плотное отложение.

Образование изморози в ноябре 1996 года также было воспроизведено моделью. Как видно из рис. 6г, по данным моделирования данному случаю соответствовало невысокое влагосодержание – до $0,2 \text{ г/м}^3$. Такие результаты хорошо согласуются с данными наблюдений, так как второй случай имел наименьшую интенсивность обледенения.

Случай 1997 года отличается тем, что область обледенения располагалась непосредственно на склонах горного массива (рис. 6д). В первых двух случаях области обледенения располагались в облаках, нижняя граница которых проходила через вершину горного массива, на которой располагается метеостанция.

Далее рассматривались результаты численного моделирования зернистой изморози для метеорологической станции Рай-Из. На рис. 7 представлены графики хода образования зернистой изморози. Сплошной синей линией показана накопленная масса отложения в виде зернистой изморози по данным модели WRF-ARW с шагом 667 м , пунктирной синей линией – с шагом 2 км . Голубой закраской отмечен период, во время которого на метеорологической станции Рай-Из наблюдатель отмечал наличие тумана с отложением изморози (код 49 КН-01). Рассмотрим результаты моделирования для каждого случая. Как было показано выше, в случае 1994 года наблюдалась максимальная масса отложений при наименьшем периоде фазы нарастания изморози. Результаты моделирования хорошо согласуются с данными наблюдений. Модель показала интенсивный рост отложения льда в период с 18 ч ВСВ 28 сентября. Наблюдатель на метеорологической станции отметил туман с отложением изморози примерно в то же время. Также хорошо согласуются и данные об окончании обледенения.

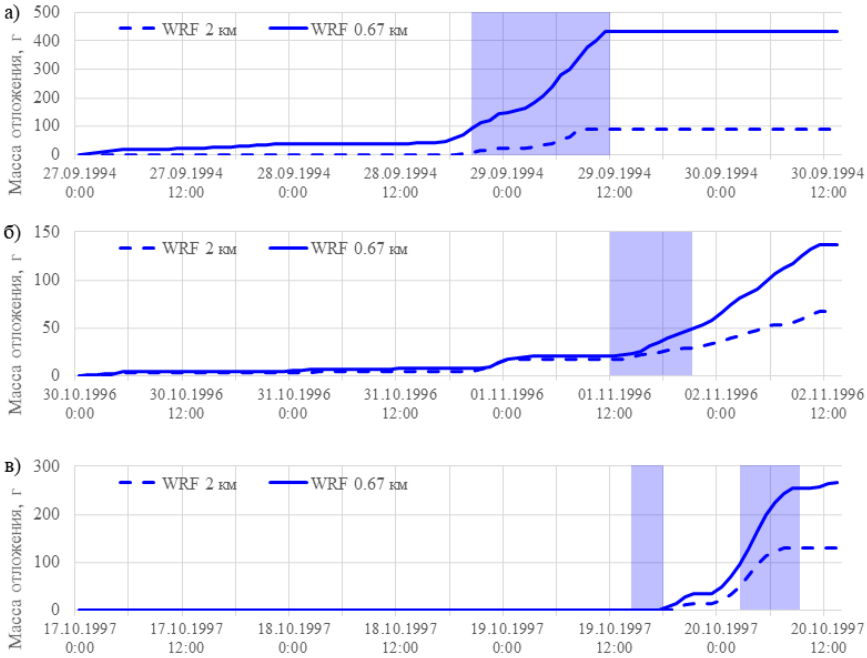


Рис. 7. График временного хода увеличения массы зернистой изморози по данным моделирования: 27-30 сентября 1994 г. (а); 30 октября – 2 ноября 1996 г. (б); 17-20 октября 1997 г. (в). Синей заливкой показан период наблюдения тумана с отложением изморози.

Fig. 7. Graph of the time course of the increase in the mass of hard rime accretion according to modeling data: September 27-30, 1994 (top); October 30 - November 2, 1996 (center); October 17-20, 1997 (bottom). The blue fill shows the observation period of fog with rime deposition.

Моделирование случая 1996 года показывает другие результаты. По данным наблюдений фаза нарастания продолжалась 79 часов. Поэтому результирующая накопленная масса значительно ниже, чем по данным наблюдений. Модель достаточно точно воспроизвела время начала обледенения. На графике видно, что начиная с 21 ч 1 ноября модель показывала рост отложения, однако наблюдатель на метеостанции не отмечал туман. Это связано с тем, что наблюдатель отмечал выпадение осадков в виде слабого и умеренного снега, а по данным с гололедного станка обледенение продолжалось, т. е. в данном случае нет расхождения в данных модели и наблюдениях.

Наблюдения 1997 года также хорошо согласуются с данными наблюдений. Модель успешно воспроизвела период образования изморози. Так же как и в случае 1996 года, в наблюдениях есть перерыв между последовательными сроками кода КН-01, опять же из-за выпадения осадков в этот срок. Несмотря на то, что по данным наблюдений продолжительность фазы

нарастания была больше, чем период моделирования, можно сделать вывод о том, что модель, так же как и в других экспериментах, занижает массу образовавшихся отложений.

Отдельно стоит отметить то, что при уменьшении шага модели в три раза, с 2 км до 667 м, наблюдается существенное увеличение интенсивности образования зернистой изморози. Таким образом, увеличение разрешения моделирования является важной задачей при прогнозировании явлений внутриоблачного обледенения.

Заключение

В результате работы были изучены условия формирования опасных отложений зернистой изморози на территории Полярного Урала. В ходе работы применялись два различных подхода: проведение синоптического анализа и анализ данных численного мезомасштабного моделирования.

Синоптический анализ показал, что во всех трех рассматриваемых случаях наблюдались различные условия формирования зернистой изморози. Было показано, что наиболее сильное влияние в формировании зернистой изморози оказывали мезометеорологические процессы: образование сплошного переохлажденного тумана, вызванного перетеканием воздушных масс через горный хребет, а также усиление скорости ветра.

С целью более подробного изучения условий формирования зернистой изморози были проведенные численные эксперименты с использованием мезомасштабной атмосферной модели WRF-ARW. Результаты численного моделирования позволили получить данные о метеорологических полях с высоким временным и пространственным разрешением. Моделью были воспроизведены пространственные области возможного образования зернистой изморози. Также были получены вертикальные разрезы тропосферы, по которым можно проследить образование внутриоблачного обледенения вследствие обтекания горных хребтов низкой облачностью и по причине образования переохлажденных туманов. Было выполнено сравнение результатов численного моделирования с данными наблюдений за гололедно-изморозевыми отложениями на метеорологической станции Рай-Из, которое показало возможность успешного моделирования зернистой изморози и применения выбранных методов для оперативного прогноза опасных явлений обледенения.

Список литературы

1. Булыгина О.Н., Веселов В.М., Разуваев В.Н., Александрова Т.М. Описание массива срочных данных об основных метеорологических параметрах на станциях России: Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620549 <http://me-teo.ru/data/163-basic-parameters#описание-массива-данных>
2. Бучинский В.Е. Атлас обледенения проводов. Л.: Гидрометеиздат, 1966. 114 с.
3. Воробьев В. И. Синоптическая метеорология. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 616 с.
4. Шакина Н.П., Хоменко И.А., Иванова А.Р., Скриптунова Е.Н. Образование и прогнозирование замерзающих осадков: обзор литературы и некоторые новые результаты // Труды Гидрометцентра России. 2012. Вып. 348. С. 130-161.

5. Finstad K.J., Lozowski E.P., Gates E.M. A computational investigation of water droplet trajectories // *J. Atm. Ocean. Technol.* 1988. Vol. 5, no. 1. P. 160-170.
6. Hersbach, H., Bel, B., Berrisford P. et al. The ERA5 global reanalysis // *Q J R Meteorol Soc.* 2020. Vol. 146. P. 1999-2049.
7. Langmuir I., Blodgett K. A mathematical investigation of water droplet trajectories // *Collected Works of Irving Langmuir.* 1946. Vol. 10. P. 348-393.
8. Makkonen, L. Models for the growth of rime, glaze, icicles and wet snow on structures // *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences.* 2000. Vol. 358, no. 1776. P. 2913-2939.
9. Mansell, E.R., Ziegler C.L., Bruning E.C. Simulated electrification of a small thunderstorm with two-moment bulk microphysics // *J. Atmos. Sci.* 2010. Vol. 67. P. 171-194. DOI: <https://doi.org/10.1175/2009JAS2965.1>
10. Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Liu Z., Berne J., ... Huang, X.-yu. A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4 // No. NCAR/TN-556+STR. 2019. <https://openky.ucar.edu/islandora/object/openky:2898>
11. Типовой перечень и критерии опасных метеорологических явлений [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://meteoinfo.ru/hazards-definitions> (Дата обращения: 05.07.2022).

References

1. Bulygina O.N., Veselov V.M., Razuvaev V.N., Alexandrova T.M. Opisanie massiva srochnyh dannyh ob osnovnyh meteorologicheskikh parametroh na stanciyah Rossii [The description of the array of term data on the main meteorological parameters at stations in Russia] Available at: <http://meteo.ru/data/163-basic-parameters#описание-массива-данных> [in Russ.]
2. Buchinskii V.E. Atlas obledeneniya provodov [Atlas of wire icing], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1991, 114 p. [in Russ.]
3. Vorob'ev V.I. Sinopticheskaya meteorologiya [Sinoptical Meteorology]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1991, 616 p. [in Russ.]
4. Shakina N.P., Khomenko I.A., Ivanova A.R., Skriptunova Ye.N. Origination and forecasting of freezing precipitation: review and some new results. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2012, vol. 348, pp. 130-161 [in Russ.].
5. Finstad K.J., Lozowski E.P., Gates E.M. A computational investigation of water droplet trajectories. *J. Atm. Ocean. Technol.*, 1988, vol. 5, no. 1, pp. 160-170.
6. Hersbach, H., Bel, B., Berrisford P. et al. The ERA5 global reanalysis. *Q J R Meteorol Soc.*, 2020, vol. 146, pp. 1999-2049.
7. Langmuir I., Blodgett K. A mathematical investigation of water droplet trajectories. *Collected Works of Irving Langmuir*, 1946, vol. 10, pp. 348-393.
8. Makkonen L. Models for the growth of rime, glaze, icicles and wet snow on structures. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2000, vol. 358, no. 1776, pp. 2913-2939.
9. Mansell E.R., Ziegler C.L., Bruning E.C. Simulated electrification of a small thunderstorm with two-moment bulk microphysics. *J. Atmos. Sci.*, 2010, vol. 67, pp. 171-194. DOI: 10.1175/2009JAS2965.1.
10. Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Liu Z., Berner J., ... Huang, X.-yu. (). A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4. No. NCAR/TN-556+STR, 2019. Available at: <https://openky.ucar.edu/islandora/object/openky:2898>.
11. List and criteria of dangerous meteorological phenomena. Available at: <https://meteoinfo.ru/hazards-definitions>.

Поступила 05.10.2022; одобрена после рецензирования 16.11.2022;
принята в печать 29.11.2022.

Submitted 05.10.2022; approved after reviewing 16.11.2022;
accepted for publication 29.11.2022.