

ОПЕРАТИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ КРАТКОСРОЧНЫХ ПРОГНОЗОВ ГОЛОЛЕДА НА ТЕРРИТОРИИ УРАЛО-СИБИРСКОГО РЕГИОНА

М.Я. Здерева, В.М. Токарев, Н.А. Хлучина, Л.П. Воробьева

*ФГБУ «Сибирский региональный научно-исследовательский
гидрометеорологический институт», Новосибирск*

В основе прогностического метода лежит алгоритм построения логических бинарных деревьев разделения образов, признаками в которых служат выходные модельные параметры. В качестве базовых моделей использованы выходные поля COSMO-Ru13 с шагом 13,2 км и GFS(NCEP) с шагом 0,5°. Решения синхронизированы с заблаговременностью модельных прогнозов. В силу малой обеспеченности данными о гололеде на территории региона получены варианты решений для кластеров радиусом 200 км. Описана оперативная технология производства прогнозов.

Ключевые слова: прогноз гололеда, распознавание образов, бинарные деревья, интерпретация моделей атмосфер.

OPERATIONAL TECHNOLOGY FOR SHORT-TERM GLAZE FORECASTS IN THE TERRITORY OF THE URAL-SIBERIAN REGION

M.Ya. Zdereva, V.M. Tokarev, N.A. Khлuchina, L.P. Vorobieva

Siberian Regional Research Hydrometeorological Institute, Novosibirsk

The prognostic method is based on an algorithm for building logical binary trees for separating patterns, the signs of which are the output model parameters. The output fields of COSMO-Ru13 model with a step of 13.2 km and those of GFS(NCEP) model with a step of 0.5 degrees were used as basic models. The decisions are synchronized with the lead time of the model forecasts. Due to the low availability of data on glaze in the region, additional variants of solutions were obtained for clusters with a radius of 200 km. An operational technology for the production of forecasts is presented.

Key words: glaze forecast, pattern recognition, binary trees, interpretation of atmospheric models.

Сильные гололедно-изморозевые отложения, вызывающие обледенение поверхности земли, деревьев, линий электропередачи, технических средств и различных объектов хозяйственной деятельности человека, входят в перечень опасных метеорологических явлений [1]. Отсутствие надежных методов их прогнозирования обуславливает актуальность исследований, направленных на изучение условий их образования в целях разработок прогностических методик. Задачи прогноза подобных редких явлений усложняются необходимостью учета сочетаний развития атмосферных процессов, комплекса метеорологических факторов и локальных условий, то есть взаимосвязи синоптических, мезометеорологических и микрофизических процессов на конкретных географических пространствах.

Считается, что переохлажденные или замерзающие осадки, приводящие к гололедным явлениям в приземном слое, в подавляющем большинстве случаев формируются перед теплыми фронтами. При этом важно вертикальное распределение температуры и влажности. Среди характерных для обледенения типов стратификации атмосферы [2] наиболее распространенным является сочетание холодного приземного слоя с отрицательными температурами со слоем положительных температур внутри облачности (часто называют его «теплый нос»). При этом фазовые переходы атмосферной воды во время выпадения осадков зависят от толщины как теплого, так и холодного слоев.

Работы по изучению гололедообразования на Урале и юго-востоке Западной Сибири активно проводились в 1960–1970-х гг. В результате на фактическом материале выявлен комплекс необходимых условий:

- переохлажденный дождь, морось, туман или низкая слоистая облачность;
- слои инверсии в пограничном слое атмосферы;
- сочетание температуры воздуха у земли (от $+0,5$ до -3 °C) и на уровне АТ-850 (от $+5$ до -5 °C);
- температура воздуха на нижней границе первого слоя инверсии от $-0,5$ до -8 °C;
- суммарный дефицит точки росы в слое Земля – 850 гПа $\leq 3-5$ °C;
- очаг теплого воздуха на АТ-850 гПа.

Однако разработать прогностические методы при отсутствии надежных прогностических атмосферных полей в то время было весьма затруднительно. Тем не менее полученные Р.А. Ягудиным [3] графические монограммы для прогноза гололеда и его интенсивности по сочетанию ожидаемой температуры воздуха у земли и фактической высоты изотермы -10 °C являются до сих пор руководством [4] для оперативных подразделений гидрометслужбы.

В настоящее время активизированы разработки в области численного моделирования гололедных явлений. Наиболее сложная проблема в этом направлении – описание микрофизических процессов в облаках, при котором определяются не только поля концентраций облачных капель и ядер кристаллизации, но и тип гидрометеора (водяной пар, облачные капли, дождь, снег, лед, крупа, град) [5]. Есть примеры воспроизведения ситуаций с гололедно-изморозевыми отложениями и в российских исследованиях. В работах [6, 7] приведены результаты отдельных численных экспериментов на базе определенной конфигурации мезомасштабной модели атмосферы WRF-ARW, которые показали возможность воспроизведения как детализированной термической структуры тропосферы в момент образования явления, так и непосредственно полей максимального диаметра отложений гололеда, согласованного с данными наблюдений.

Приведенные примеры можно рассматривать как начальный этап в численном моделировании гололедных явлений. Малое количество экспериментов пока не позволяет сделать выводы об использовании результатов в прогностической практике. Тем не менее авторы [8] предлагают для лучшего понимания условий обледенения использовать данные численного моделирования взамен данных наблюдений, в силу ограниченности последних как по вертикали, так и по горизонтали – и это для Канады. Заметим, что для российской метеорологической сети наблюдений это еще более актуально.

Поле производства оперативных автоматизированных прогнозов гололедных явлений тем не менее оставалось свободным. Перед нами стояла задача создать метод прогноза гололеда с выходом на оперативную технологию, с тем, чтобы использовать результаты в оперативной работе метеорологических служб региона.

Разработка метода прогноза гололеда строилась на уже апробированном ранее алгоритме построения бинарных деревьев для распознавания погодных явлений. Для выхода на прогноз решения строятся на базе ожидаемой термодинамической структуры атмосферы и метеорологических полей, представленных гидродинамическими моделями атмосферы (вариант MOS – Model Output Statistics).

Для построения решающих правил использован алгоритм DW, опыт работы с которым имеется в нескольких разработках ФГБУ «СибНИГМИ» [9]. Методические основы алгоритма, его авторские модификации и основные ключевые моменты описаны в статье настоящего сборника [10].

Для разработки оперативного варианта решений выбрано представление гололеда непосредственно по наблюдениям (КН-01) в бинарном виде (наличие/отсутствие). Первоначальная рабочая выборка предиктанта сформирована по данным наблюдений за период 2014–2019 гг., в дальнейшем она ежегодно дополняется текущими наблюдениями. Фактическая

вероятность гололеда на большей части территории региона очень низкая, менее 5 % случаев, лишь на отдельных метеостанциях Пермского края достигает 15 %. Поэтому в ходе экспериментов деревья решений строились не только по отдельным станциям, но и с объединением выборок по пространству с радиусом 200 км и по территории региона в целом. Для оперативного варианта выбраны решения по кластерам с радиусом 200 км.

1. Подготовка базовых параметров

В качестве признаков в разработанном методе выступают выходные поля гидродинамических моделей COSMO-Ru_Sib13 и GFS(NCEP). Список и подготовка базовых параметров определяются на этапе формирования рабочих архивов. В аналогичном формате они затем выбираются на первом шаге в оперативной технологии производства прогнозов.

Выбор исходных предикторов является важным моментом, существенно влияющим на результаты решений, поэтому он определяется, прежде всего, физической или потенциально возможной связью с искомым явлением. Исходный список включает 33 предиктора (табл. 1). Выбранные признаки отражают термическую и влажностную структуру атмосферы с динамикой по времени, среди них температура в верхнем слое почвы, на поверхности и на уровнях 2 м, АТ-925, характеристики влажности на уровнях до АТ-850, давление на уровне моря, ветер у земли, осадки. Дополнительно рассчитываются температура смоченного термометра у земли и на АТ-850, вертикальные градиенты геопотенциала и температуры, смещенные минимальная температура воздуха у земли и на АТ-850, изменения температуры и давления по времени. В базовый список не вошли прогнозы облачности, типы и количество гидрометеоров в составе атмосферы и другие из-за большой неопределенности в их прогнозировании, что отрицательно влияет на устойчивость статистических решений.

2. Расчет бинарных прогнозов

По описанному алгоритму [10] построены логические решения в виде бинарных деревьев для каждого срока заблаговременности (00+18, 00+42, 00+66, 12+18, 12+42, 12+66) по моделям GFS и COSMO. Приведем примеры окончательных решений для кластеров с центром Гайны (Пермский край) (рис. 1) и с центром Огурцово (Новосибирская область) (табл. 2). Изначально они отличаются фактической вероятностью явления в рабочей выборке: 23 % для сектора Гайны и почти в восемь раз меньше (4 %) для Огурцова. На рисунке наглядно видно разделение дерева на ветки по пороговым значениям базовых параметров, а по таблице можно проследить разбег условных вероятностей первого и второго образа на

Таблица 1

Признаки для DW-решений по моделям COSMO и GFS

| № | Параметр | Описание параметра |
|-------|--------------|--|
| 1–2 | Tsm850 | Температура смоченного термометра на уровне АТ-850 (в срок, срок + 6 ч) (°C) |
| 3–4 | T9-T0 | Разность температур, АТ-925-2м (в срок, срок + 6 ч) (°C) |
| 5–6 | T8-T0 | Разность температур, АТ-850-2м (в срок, срок + 6 ч) (°C) |
| 7–8 | RH0 | Относительная влажность на высоте 2 м (в срок, срок + 6 ч) (%) |
| 9–10 | RH9 | Относительная влажность на уровне АТ-925 (в срок, срок + 6 ч) (%) |
| 11–12 | UV0 | Скаляр вектора скорости на высоте 10 м (в срок, срок + 6 ч) (м/с) |
| 13–14 | Tsm0 | Температура смоченного термометра на высоте 2 м (в срок, срок + 6 ч) (°C) |
| 15–16 | dTd0 | Дефицит точки росы на высоте 2 м (в срок, срок + 6 ч) (°C) |
| 17–18 | dTd8 | Дефицит точки росы на уровне АТ-850 (в срок, срок + 6 ч) (°C) |
| 19 | Ts(+6)-Ts(0) | Тенденция температуры поверхности почвы ((срок + 6 ч) – срок) (°C) |
| 20 | T(0)-T(-6) | Тенденция температуры на высоте 2 м (срок – (срок – 6 ч)) (°C) |
| 21 | T(+6)-T(-6) | Тенденция температуры на высоте 2 м ((срок + 6 ч) – (срок – 6 ч)) (°C) |
| 22 | P(0)-P(-6) | Тенденция давления на уровне моря (срок – (срок – 6 ч)) (гПа) |
| 23 | P(+6)-P(0) | Тенденция давления на уровне моря ((срок + 6 ч) – срок) (гПа) |
| 24–25 | H500-H925 | Толщина слоя, АТ500-АТ925 (в срок, срок + 6 ч) (Дам) |
| 26 | AP0 | Осадки (в срок, срок + 6 ч) (мм) |
| 27 | AP+6 | Осадки (в срок + 6 ч) (мм) |
| 28 | T925 | Температура на уровне АТ-925 (в срок) (°C) |
| 29 | T850 | Температура на уровне АТ-850 (в срок) (°C) |
| 30 | Ts | Температура поверхности почвы (в срок) (°C) |
| 31 | min(T0+5) | Смещенная минимальная температура на 2 м (ночь) (°C) |
| 32 | min(T8-5) | Смещенная минимальная температура на АТ-850 (ночь) (°C) |
| 33 | abs(T0+5) | Модуль смещенной минимальной температуры на 2 м (ночь) (°C) |

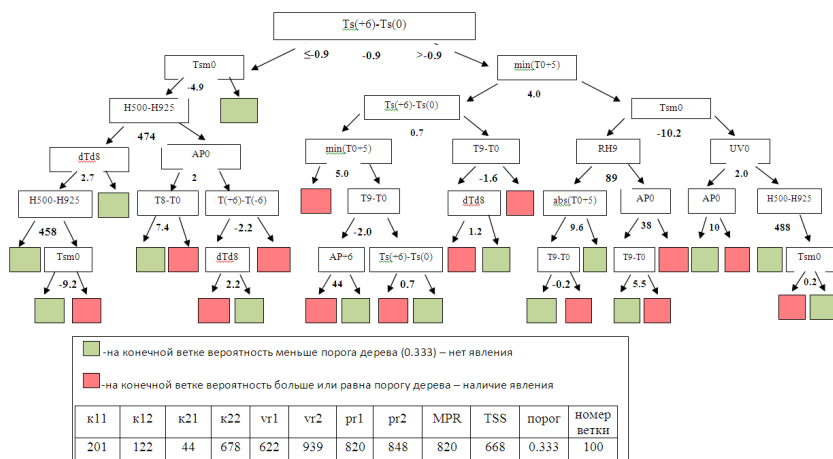


Рис. 1. Бинарное дерево решений и его оценки по матрице сопряженности для прогноза гололеда на базе модели COSMO-Ru13 на срок 00+18. Кластер с радиусом 200 км с центром на метеостанции Гайны. Архивная выборка 2014–2017 гг.

каждом шаге, который был максимизирован с помощью критерия Пирси–Обухова. Конечный порог, определяющий класс решения, получен по критерию MPR, для Гайны – 0,333, для Огурцова – 0,364. По этим порогам представлена матрица сопряженности и основные оценки для построенного дерева. Соответственно, бинарный прогноз явления состоит из сравнения вероятности на законченной ветке, к которой приведут значения текущих модельных данных, с переходным порогом.

Полученные методические решения прошли предварительное тестирование на выборке 2018–2019 гг., не участвующей в обучении. В табл. 3 представлены суммарные по территории за весь период оценки матрицы сопряженности для прогнозов по кластерам радиусом 200 км.

Анализ оценок показал сопоставимость результатов по обеим базовым моделям. В целом по территории предупрежденности явления вышла на уровень 65 % на все сроки прогноза, однако при достаточно высоком проценте «ложных тревог» – 75–85 %. По модели COSMO вероятность явления снижается к третьей ночи на 9 % от первых +6 ч, достигая 12 %. По модели GFS на все сроки вероятность на уровне 18–20 %. Средняя оправдываемость прогнозов около 90–93 % и критерий Пирси–Обухова 0,5–0,6 независимо от базовой продукции. Если в сумме по территории результаты по обеим моделям примерно одинаковые, то в прогнозах по станциям преимущество решений по разным моделям меняется, что привело к определению и выбору базовой модели в окончательном решении для каждой станции.

Таблица 2

**Бинарное дерево решений и его оценки по матрице сопряженности
для прогноза гололеда на базе модели COSMO-Ru13 на срок 00+30.**

Кластер с радиусом 200 км с центром на метеостанции Огурцово.

Архивная выборка, 2014–2017 гг.

| Но- мер ветки | Число 1-го об- раза | Число 2-го об- раза | Веро- ятность 1-го образа | Параметр | Порог пара- метра | Номер ветки, если «≤» | Номер ветки, если «>» | TSS |
|---------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------------------|---------------|-------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|
| 1 | 35 | 944 | 0,036 | dTd0 | 1,5 | 2 | 3 | 0,362 |
| 2 | 20 | 198 | 0,092 | AP0 | 31,0 | 4 | 5 | 0,316 |
| 3 | 15 | 746 | 0,020 | RH9 | 88,0 | 6 | 7 | 0,392 |
| 4 | 5 | 112 | 0,043 | min(T0+5) | 4,0 | 8 | 9 | 0,595 |
| 5 | 15 | 86 | 0,149 | P(0) – P(-6) | -2,0 | 10 | 11 | 0,364 |
| 6 | 5 | 541 | 0,009 | T(+6) – T(-6) | 1,4 | 12 | 13 | 0,623 |
| 7 | 10 | 205 | 0,047 | Tsm850 | 0,7 | 14 | 15 | 0,429 |
| 8 | 4 | 23 | 0,148 | min(T8-5) | 80,0 | 16 | 17 | 0,696 |
| 9 | 1 | 89 | 0,011 | 0 | 0,0 | 0 | 0 | 0,000 |
| 10 | 1 | 37 | 0,026 | 0 | 0,0 | 0 | 0 | 0,000 |
| 11 | 14 | 49 | 0,222 | Tsm850 | -9,7 | 22 | 23 | 0,408 |
| 12 | 5 | 204 | 0,024 | T9-T0 | 0,3 | 24 | 25 | 0,578 |
| 13 | 0 | 337 | 0,000 | 0 | 0,0 | 0 | 0 | 0,000 |
| 14 | 2 | 129 | 0,015 | 0 | 0,0 | 0 | 0 | 0,000 |
| 15 | 8 | 76 | 0,095 | UV0 | 6,0 | 30 | 31 | 0,513 |
| 16 | 4 | 7 | 0,364 | 0 | 0,0 | 0 | 0 | 0,000 |
| 17 | 0 | 16 | 0,000 | 0 | 0,0 | 0 | 0 | 0,000 |
| 22 | 2 | 27 | 0,069 | 0 | 0,0 | 0 | 0 | 0,000 |
| 23 | 12 | 22 | 0,353 | Tsm0 | -0,1 | 46 | 47 | 0,500 |
| 24 | 0 | 118 | 0,000 | 0 | 0,0 | 0 | 0 | 0,000 |
| 25 | 5 | 86 | 0,055 | Ts | -10,8 | 50 | 51 | 0,684 |
| 30 | 2 | 58 | 0,033 | 0 | 0,0 | 0 | 0 | 0,000 |
| 31 | 6 | 18 | 0,250 | dTd8 | 0,9 | 62 | 63 | 0,611 |
| 46 | 12 | 11 | 0,522 | Ts | -4,5 | 92 | 93 | 0,462 |
| 47 | 0 | 11 | 0,000 | 0 | 0,0 | 0 | 0 | 0,000 |
| 50 | 1 | 76 | 0,013 | 0 | 0,0 | 0 | 0 | 0,000 |
| 51 | 4 | 10 | 0,286 | dTd0 | 2,2 | 102 | 103 | 0,700 |
| 62 | 0 | 11 | 0,000 | 0 | 0,0 | 0 | 0 | 0,000 |
| 63 | 6 | 7 | 0,462 | 0 | 0,0 | 0 | 0 | 0,000 |
| 92 | 1 | 6 | 0,143 | 0 | 0,0 | 0 | 0 | 0,000 |
| 93 | 11 | 5 | 0,688 | 0 | 0,0 | 0 | 0 | 0,000 |
| 102 | 4 | 3 | 0,571 | 0 | 0,0 | 0 | 0 | 0,000 |
| 103 | 0 | 7 | 0,000 | 0 | 0,0 | 0 | 0 | 0,000 |
| k11 | k12 | k21 | k22 | vr1 | vr2 | pr1 | pr2 | MPR |
| 25 | 22 | 10 | 922 | 532 | 989 | 714 | 977 | 714 |

Таблица 3

**Таблица сопряженности и оценки прогнозов гололеда (код 01)
на независимом материале по DW-решениям на базе моделей COSMO и GFS.
Холодный период 2018–2019 гг.**

| Срок | k11 | k12 | k21 | k22 | k0 | vr1+ | vr2- | vr | pr1 | pr2 | MPR | TSS |
|------------|------|-------|------|--------|--------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| COSMO-Ru13 | | | | | | | | | | | | |
| 00+06 | 1902 | 6836 | 1032 | 93419 | 103189 | 22 | 99 | 92 | 65 | 93 | 65 | 0,6 |
| 00+18 | 1645 | 7186 | 861 | 110065 | 119757 | 19 | 99 | 93 | 66 | 94 | 66 | 0,6 |
| 00+30 | 1859 | 7693 | 1123 | 93627 | 104302 | 19 | 99 | 91 | 62 | 92 | 62 | 0,5 |
| 00+42 | 1603 | 9646 | 925 | 108377 | 120551 | 14 | 99 | 91 | 63 | 92 | 63 | 0,5 |
| 00+54 | 1885 | 9398 | 1066 | 92795 | 105144 | 17 | 99 | 90 | 64 | 91 | 64 | 0,5 |
| 00+66 | 1662 | 11509 | 852 | 106760 | 120783 | 13 | 99 | 90 | 66 | 90 | 66 | 0,6 |
| GFS | | | | | | | | | | | | |
| 00+06 | 1813 | 7228 | 1040 | 90552 | 100633 | 20 | 99 | 912 | 64 | 93 | 64 | 0,6 |
| 00+18 | 1582 | 6865 | 762 | 111457 | 120666 | 19 | 99 | 94 | 67 | 94 | 67 | 0,6 |
| 00+30 | 1854 | 8037 | 1027 | 89849 | 100767 | 19 | 99 | 91 | 64 | 92 | 64 | 0,6 |
| 00+42 | 1578 | 8155 | 834 | 110113 | 120680 | 16 | 99 | 93 | 65 | 93 | 65 | 0,6 |
| 00+54 | 1865 | 7969 | 1054 | 89084 | 99972 | 19 | 99 | 91 | 64 | 92 | 64 | 0,6 |
| 00+66 | 1644 | 7438 | 847 | 110261 | 120190 | 18 | 99 | 93 | 66 | 94 | 66 | 0,6 |

Модель COSMO: OR
Модель COSMO: 6
Модель COSMO: 2
Модель ПЛАН
Модель ПЛАН20
Интерактивные метеогаммы2012(COSMO)
Интерактивные метеогаммы2012(ПЛАН)
Аномалии температур
Метеогаммы (компилирование)
Таблицы (компилирование)
Специализированные массивы климатических данных

Табличные прогнозы по территориальным управлениям:
Дата составления прогноза: 16.01.2021 Зап.-Сибирское 00 Голосед Показать
Комментарий к таблицам прогнозов гололеда
Комментарий к таблицам прогнозов гроз
Комментарий к таблицам прогнозов заморозков

16.01.2021 5:16
Прогноз гололеда по методу СибНИГМИ (расчет ЭСРВЦ) модель GFS-COSMO от 00 UTC на 16.01-19.01 2023

ТОМСКАЯ обл.
Прогноз по кластерам: радиус 200км на 16.01 - 19.01
16.01 : 17.01 : 18.01 : 19.01 :
00-12: 12-24 24-36 : 36-48 48-60 : 60-72 :
день : ночь день : ночь день : ночь :
И индекс ПАРABEL..... - - - + - -
3 29128 УЛЬ-ОЗЕРНОЕ..... 9 9 9 9 - 9
4 29154 КОЛЫВНОЕ..... - - + - - -
5 29231 ТОМСК..... - - - - - -
7 29430
"-:прогноз отсутствия "+" прогноз наличия "0"-нет условий "9"-нет расчета

НОВОСИБИРСКАЯ обл.
В период 16.01 - 19.01 гололед не ожидается

КЕМЕРОВСКАЯ обл.
В период 16.01 - 19.01 гололед не ожидается

РЕСПУБЛИКА АЛТАЙ
В период 16.01 - 19.01 гололед не ожидается

АЛТАЙСКИЙ край
Прогноз по кластерам: радиус 200км на 16.01 - 19.01
16.01 : 17.01 : 18.01 : 19.01 :
00-12: 12-24 24-36 : 36-48 48-60 : 60-72 :
день : ночь день : ночь день : ночь :
И индекс БАЙРАУЛ_ДМС..... - - - - - -
3 29138 РУБИНСК..... - 9 - 9 + 9
8 36834 ЗЕМНОГОРСК..... - 9 - 9 - 9
9 36838 БЕЛОУЗКА..... 9 9 9 9 9 9
19 36946
"-:прогноз отсутствия "+" прогноз наличия "0"-нет условий "9"-нет расчета

Рис. 2. Пример таблицы прогнозов на сайте sibnigmi.ru

В оперативной работе результаты расчетов формируются в таблицы (пример на рис. 2) для каждого управления гидрометслужбы и передаются пользователям через интернет-ресурсы.

3. Оперативная технология прогнозов

Полученные DW-решения и программы восстановления по ним встроены в оперативную технологию производства краткосрочных прогнозов в ФГБУ «ЗС РВЦ» и в ФГБУ «СибНИГМИ».

Полная технологическая линия производства прогнозов включает следующие блоки:

1. По окончании расчетов модели COSMO_RU_Sib13 – форматирование выходных данных, выбор базовых параметров в ближайших узлах по списку станций региона, расчет дополнительных параметров.

2. Скачивание выходной продукции модели GFS(NCEP). Форматирование выходных данных, выбор базовых параметров в ближайших узлах по списку станций региона, расчет дополнительных параметров.

3. Прогноз гололеда по кластерам радиусом 200 км на 1–3 сут. отдельно по каждой модели. Выбор окончательного решения согласно полученному результату на испытаниях по независимой выборке.

4. Формирование прогнозов в таблицы и передача их пользователям через интернет-ресурсы.

5. Архивирование фактических метеорологических параметров из SQL-базы КН-01.

6. Архивирование результатов расчетов прогнозов явлений.

7. Автоматизированный расчет оценок прогнозов по разработанному методу.

Работа выполнена на современном уровне с использованием выходной продукции актуальных оперативных моделей. К плюсам можно отнести и использование двух моделей различных научных школ для сравнения и оценки их применимости к условиям резко континентального климата на планете, для которого они, по-видимому, специально не адаптировались.

Выполненная работа включает законченные разделы, доведенные до готовых к передаче на оперативные испытания программ усвоения оперативных данных и полностью автоматизированных расчетов прогнозов, и открывает новое направление исследований для прогнозов изморози, отложений мокрого снега. Интерес представляют возможности прогнозирования гололедицы, для внедрения первых результатов которого нормативные документы пока не готовы.

Литература

1. РД 52.27.724-2019. Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения. М.: ФГБУ «Гидрометцентр России», 2019. 66 с.
2. 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.
3. Ягудин Р.А. Рекомендации к прогнозу гололеда на юго-востоке Западной Сибири // Труды ЗСРНИГМИ. 1977. Вып. 30. С. 68–69.
4. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. Ч. II. Вып. 2. Урал и Сибирь / Под ред. В.М. Ярковой, И.П. Фадеевой. Л.: Гидрометеиздат, 1988. С. 181–185.
5. Makkonen L., Wichura B. Simulating wet snow loads on power line cables by a simple model // Cold Regions Science and Technology. 2010. Vol. 61, No. 2–3. P. 73–81.
6. Леонов И.И., Соколичина Н.Н. Условия формирования ледяного шторма во Владивостоке в ноябре 2020 года // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2021. № 4 (382). С. 69–83.
7. Леонов И.И. Структура атмосферы при формировании высокоинтенсивных гололедно-изморозевых отложений. [Электронный ресурс]. URL: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/016.2/2494> (дата обращения: 20.06.2023).
8. Makkonen L., Lozowski E. Numerical Modelling of Icing on Power Network January 2008, Chapter 3 In book: Atmospheric Icing of Power Networks. P. 83–118. DOI: 10.1007/978-1-4020-8531-4_3.
9. Здерева М.Я., Токарев В.М., Хлучина Н.А., Воробьева Л.П., Бабошина Н.А. Оперативная технология прогноза гроз в Сибири и результаты ее испытаний // Труды Гидрометцентра России. 2018. № 2 (368). С. 27–43.
10. Токарев В.М. Анализ методических и алгоритмических вопросов исследования и прогноза переходов температуры через ноль и связанных с ними гололедных явлений // Труды СибНИГМИ. 2023. Вып. 108. С. 71–87.