

УДК 551.509.324.3

Численные эксперименты по прогнозу гололедных явлений

Р.Ю. Игнатов¹, К.Г. Рубинштейн^{1, 2}, Ю.И. Юсупов^{3*}

¹Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН
115191, г. Москва, Большая Тульская ул., 52

²Гидрометцентр России
123242, г. Москва, Большой Предтеченский пер., 11–13

³НПЦ «МЭП Мейкер»
123242, г. Москва, Нововаганьковский пер., 5 стр. 1

Поступила в редакцию 8.05.2020 г.

Представлены методы и результаты численного прогноза гололедных явлений на территории Центральной России для холодных периодов 2003–2018 гг. Приведено сравнение успешности прогноза гололеда по двум методам: 1) анализ типов гидрометеоров и температуры воздуха у земли из прогнозов модели WRF-ARW; 2) использование теплобалансной модели с прогнозами модели WRF-ARW в качестве входных данных. Показаны некоторые преимущества прогнозов гололеда с помощью теплобалансной модели.

Ключевые слова: прогноз гололеда, Центральный регион России, WRF-ARW; forecast of ice, central region of Russia, WRF-ARW.

Введение

Одно из опасных метеорологических явлений холодного времени года — это обледенение дорог, проводов и деревьев, т.е. гололед.

Согласно [1, 2] гололед — это слой плотного льда, нарастающего на поверхности земли и предметах от намерзания капель переохлажденного дождя или мороси. Обычно гололед наблюдается при слабой отрицательной температуре воздуха у поверхности, но иногда и при более низкой, до -16 °С. Гололед может иметь место и при слабой положительной температуре воздуха, если температура поверхности земли или объектов, на которых он отлагается, отрицательная. Намерзать могут также осадки смешанной фазы (дождь со снегом), наблюдающиеся при отрицательной температуре воздуха или поверхности. В настоящей работе мы будем включать эти явления в понятие «гололед» или «гололедные явления». Отметим, что существует близкое явление, называемое изморозью, которое формируется на поверхностях в холодное время года при высокой влажности и без осадков. В настоящей работе оно не рассматривается.

Количественные измерения толщины гололеда ведутся на малом количестве метеорологических станций ввиду отсутствия на большинстве из них необходимого для измерений оборудования. Как правило, на станциях фиксируется лишь факт наличия

самого явления, а его интенсивность наблюдатель оценивает на глаз.

В настоящее время гололед прогнозируется в основном синоптиками. Работ по численному прогнозу гололедных явлений немного. В частности, авторами настоящей статьи была опубликована работа по прогнозу гололеда и наледи на проводах [3]. Других публикаций в российской научной периодике авторам не известно. В зарубежной периодике имеется некоторое количество публикаций, например, [4–10].

Во всех опубликованных работах, посвященных методам численного прогноза гололеда, делается упор на прогноз и анализ типа осадков и температурных условий вблизи земли, приводящих к возможному замерзанию жидкости на земле, ветках деревьев и проводах. Основное отличие методов заключается в использовании различных численных моделей, тестировании алгоритмов в различных климатических условиях и выборе нескольких отличающихся критериев наличия или отсутствия гололеда в прогнозе. Более подробный обзор представлен в [3]. Проверок на значительном статистическом материале и указаний на внедрение методов в оперативную практику в литературе не приведено.

Формирование и интенсивность гололеда зависят от температуры воздуха, температуры поверхности и количества твердых и жидких частиц воды в воздухе непосредственно у поверхности земли. Поэтому успешность прогноза гололеда зависит, прежде всего, от успешности прогноза перечисленных выше параметров.

Прогноз гололеда возможен также с помощью анализа теплового и водного баланса на подстилающей поверхности. Для этих целей возможно

* Роман Юрьевич Игнатов (prognozist@gmail.com); Константин Григорьевич Рубинштейн (k.g.rubin@googlemail.com); Юрий Исаакович Юсупов (usupov@gismeteo.ru).

использование теплосбалансных моделей с учетом возможных причин образования гололеда и с более точным описанием теплоемкости и теплопроводности подстилающей поверхности. В настоящей работе приведены результаты испытания обоих методов.

Стоит упомянуть, что ни в России, ни за рубежом на сегодняшний день не создано надежной оперативной системы численного прогноза гололеда. Это было бы весьма полезным вкладом в численный прогноз опасных явлений погоды для таких обширных территорий с обычно продолжительным холодным периодом, как, например, Россия, Канада или Норвегия.

1. Метод прогноза гололеда с помощью анализа типа осадков

Тип атмосферных осадков можно определить, зная такие метеорологические характеристики вблизи поверхности земли (на высоте 2 м), как температура воздуха, подстилающей поверхности, концентрации и сочетание гидрометеоров (капли, лед, снег, крупа).

Численные модели неплохо предсказывают температура на 2 м; абсолютные ошибки составляют не более 1–3 °С. Сама температура хорошо измеряется на метеорологических станциях, в то время как концентрация гидрометеоров не измеряется вообще. В современных параметризациях микрофизики облаков, которые имеются в большинстве численных циркуляционных моделей, рассчитываются концентрации различных гидрометеоров. Зная концентрации и соотношения жидких и твердых гидрометеоров, можно прогнозировать гололедные явления.

В проведенных нами экспериментах прогноз по региональной модели рассчитывался на 18 ч. В используемой нами модели WRF-ARW [11] есть 12 схем параметризации микрофизики облаков. Для определения типа осадков необходимо анализировать соотношение концентраций четырех видов гидрометеоров: воды, снега, снежной крупы и льда. В настоящей работе при расчетах использовалась параметризация микрофизики облаков [12], в которой все перечисленные гидрометеоры и переходы между ними присутствуют.

Для анализа типа осадков выбирались результаты прогнозов с запаздыванием от 6 до 18 ч с интервалом 3 ч. Первые 6 ч прогноза не использовались для исключения влияния эффекта «разгона модели». При прогнозе на 18 ч анализировались четыре срока: 09:00, 12:00, 15:00, 18:00 в случае начала прогноза от 00:00; 21:00, 00:00, 03:00, 06:00 в случае начала прогноза от 12:00. В нашей статье приведены результаты оценок прогнозов на 09:00, 12:00, 15:00, 18:00.

Для прогноза формирования гололеда используются: температура на нижней модельной сигма-поверхности, температура подстилающей поверхности, сумма осадков за 12 ч, отношения смеси для четырех видов гидрометеоров (вода, лед, снег, снежная крупа) на нижней модельной сигма-по-

верхности за истекшие 3 ч. Высота нижней модельной сигма-поверхности составляет ~ 2 м.

Считается, что гололед в прогнозе присутствует, если хотя бы в один из четырех сроков одновременно выполнены четыре условия:

- 1) на нижней модельной сигма-поверхности присутствует жидкий вид гидрометеора (вода);
- 2) отношение массы воды к сумме масс остальных трех гидрометеоров больше коэффициента влажности, который лежит в диапазоне от 0 до 1;
- 3) температура воздуха или поверхности составляет 0 °С или ниже;
- 4) сумма осадков за 12 ч составляет не менее 0,1 мм.

Как было сказано выше, для прогноза мы используем модель WRF-ARW [11], версия 3.9.1.1, с пространственным шагом 18 км и 41-сигма поверхностью по вертикали. В качестве начальных данных и краевых условий использовались анализы GFS [13] с разрешением 0,25° по широте и долготе.

При этом прогноз гололеда дается на 12 ч (день или ночь) без привязки к конкретным срокам, т.е. прогнозируется факт наличия или отсутствия гололеда в течение этого времени.

Есть возможность рассчитывать и количество осажженного льда, но из-за малого количества наблюдений за этим параметром анализ качества такого прогноза не проводился. По количеству осажженного льда можно рассчитать нагрузку на провода, деревья и другие предметы. Такой прогноз важен, прежде всего, энергетикам и, возможно, дорожникам.

2. Метод прогноза гололеда с помощью анализа теплового баланса

В нашей работе тепловой баланс рассчитывался с помощью канадской модели METRo [14]. При этом, как и в первом методе, используются результаты прогноза региональной модели WRF-ARW. Для расчета брались прогностические поля: температура и точка росы на высоте 2 м от поверхности земли, сумма жидких и твердых осадков с начала прогноза, скорость ветра на высоте 10 м от поверхности земли, давление на поверхности, потоки коротковолновой и длинноволновой радиации, температура почвы на глубине 40 см.

Для адаптации теплосбалансной модели необходимо не менее двух случаев наблюдений подряд на станциях, период наблюдений на которых совпадает с началом периода прогноза по модели атмосферы. С помощью теплосбалансной модели можно прогнозировать восемь типов состояния подстилающей поверхности: 1 – сухая, 2 – влажная, 3 – покрытая снегом, 4 – покрытая снегом с водой, 5 – с росой, 6 – с тающим снегом или льдом, 7 – покрытая черным льдом, 8 – покрытая замерзающей дождевой водой. Черный лед – это явление льда в результате сублимации водяного пара из воздуха на поверхности с отрицательной температурой без наличия в этот момент осадков.

Наличием в прогнозе гололеда будем считать прогноз любого из двух типов состояния подстилающей поверхности, где присутствует лед (7 или 8). Если прогнозируется другой тип поверхности (1–6), считаем, что прогнозируется отсутствие гололеда.

В каждом расчетном узле задается один из четырех видов подстилающей поверхности, различающихся, прежде всего, своими теплофизическими свойствами.

Результаты прогноза гололеда по теплбалансной модели анализировались на временном интервале 12 ч (06:00–18:00 или 18:00–06:00). Прогнозировалось наличие гололеда на весь 12-часовой интервал, если хотя бы в течение 1 ч в пределах этого интервала (не обязательно подряд) прогнозировался «черный лед» (№ 7) или «замерзающий дождь» (№ 8). Модель тестировалась с разной продолжительностью этого периода (1, 3, 9, 18, 27 и 36 случаев наличия в прогнозе гололеда из 36), т.е. за 12 ч получается 36 случаев прогноза (с интервалом 20 мин).

3. Метод оценки результатов

Для оценки результатов прогноза гололедных явлений использовались данные наблюдений на 350 метеорологических станциях, наиболее полная карта расположения которых приведена на рис. 1.

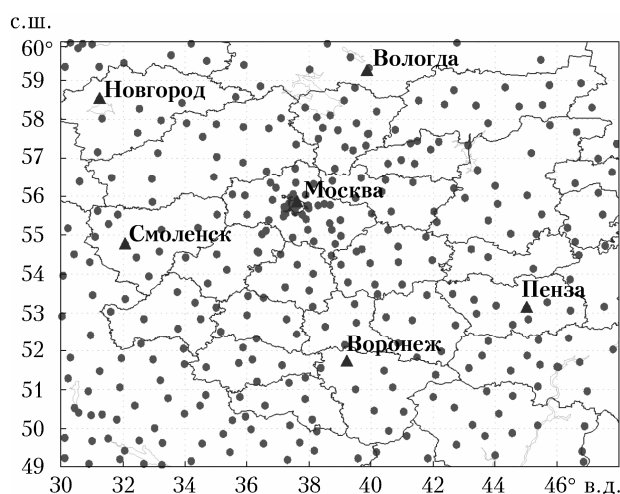


Рис. 1. Область прогноза и метеорологические станции (точки), использовавшиеся для оценки прогноза гололедных явлений

Проводилась оценка качества прогноза наличия или отсутствия гололеда.

Важным этапом оценки была выборка из рядов наблюдений случаев наличия или отсутствия гололедных явлений. При этом зачастую код отсутствия явления может интерпретироваться и как отсутствие самого явления, и как отсутствие информации о явлении, что вызывает дополнительные сложности.

Наличие гололеда в данных наблюдений подтверждается, если выполнены следующие условия: 1) хотя бы в один из четырех сроков наблюдения в течение 12 ч (09:00, 12:00, 15:00, 18:00 или 21:00,

00:00, 03:00, 06:00), непосредственно в этот срок или в течение последнего часа перед ним, отмечались: замерзающая морось или дождь любой интенсивности, ледяной дождь (коды явления 24, 56, 57, 66, 67, 79 [1]); 2) при нулевой или отрицательной температуре воздуха на станции хотя бы в один из четырех сроков отмечались: морось, дождь, дождь со снегом любого характера или интенсивности (коды явлений 50–55, 58–65, 80–84). При этом в любом случае сумма осадков за 12 ч (предшествующих 06:00 или 18:00) должна быть не менее 0,1 мм/12 ч. Заметим, что наблюдения за осадками проводятся на рассматриваемой территории 2 раза в сутки (с интервалом 12 ч), в то время как наблюдения за явлениями погоды и температурой проводятся 8 раз в сутки (каждые 3 ч).

Для подтверждения надежных случаев отсутствия гололеда в наблюдениях должны выполняться следующие условия:

1) ни в один из четырех сроков наблюдения в течение 12 ч (09:00, 12:00, 15:00, 18:00 или 21:00, 00:00, 03:00, 06:00), непосредственно в срок, не отмечались: замерзающая морось, замерзающий дождь, ледяной дождь любой интенсивности;

2) при нулевой или отрицательной температуре воздуха на станции ни в один из этих сроков не отмечались: морось, дождь, дождь со снегом любого характера или интенсивности (коды явлений 50–55, 58–65, 80–84);

3) упомянутые в предыдущих пунктах явления на станции отмечались, но сумма осадков за 12 ч была менее 0,1 мм или информация об осадках неизвестна;

4) во все четыре срока наблюдалось какое-то другое явление (кроме тех, что перечислены выше) или во все сроки какие-либо явления отсутствуют.

Прогностические поля интерполировались билинейно в точки станций и сравнивались с отобранными случаями факта наличия/отсутствия гололеда. С 2003 по 2018 г. были выбраны даты, когда наличие гололеда отмечалось на 10 и более станциях Московской области. Таким образом, для каждой даты существовали как станции с наличием явления, так и станции с его отсутствием, т.е. гололед никогда не наблюдался на всех станциях одновременно. Число отобранных случаев гололеда составило 1953, число случаев отсутствия — 3999, всего 5952 случая.

4. Примеры прогноза гололеда

На рис. 2 и 3 как примеры представлены два конкретных случая из 46 рассмотренных.

Видно, что прогноз гололеда был весьма успешным. Наблюдалось хорошее совпадение территории фактического и прогностического гололеда. Можно заметить, что в юго-западной части территории в прогнозе типа осадков наблюдалось довольно большое количество ложных тревог (левая часть рис. 2 и 3). В случае использования теплбалансной модели (правая часть рис. 2 и 3) число ложных тревог значительно меньше.

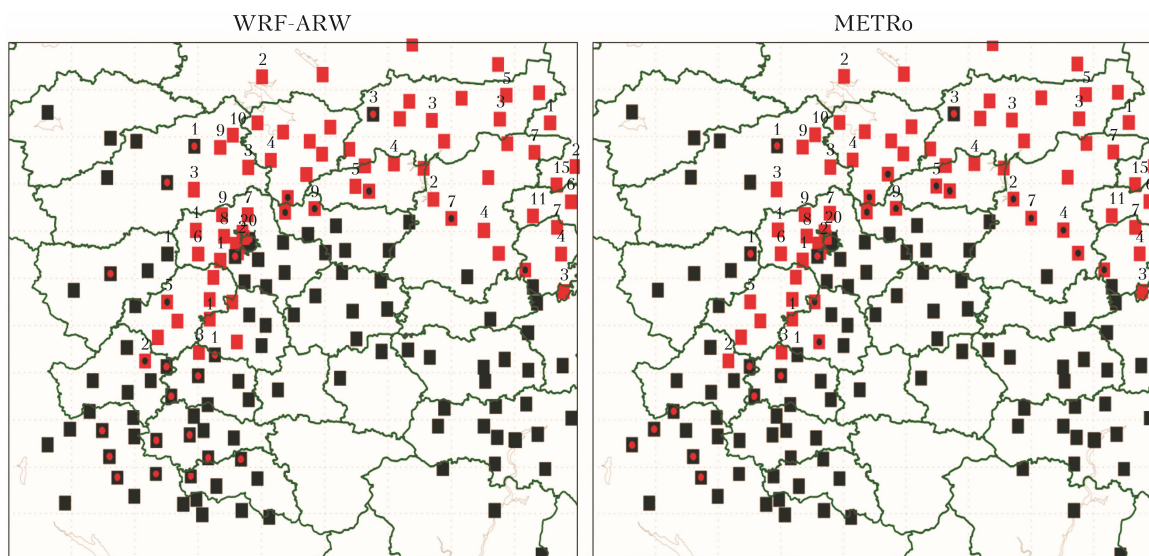


Рис. 2. Прогноз гололеда на ночь 11 ноября 2016 г. в сравнении с данными наблюдений: цифры – толщина отложений по данным наблюдений; серый квадрат – успешный прогноз гололеда, черный квадрат – успешный прогноз отсутствия гололеда, черный квадрат с серым кружком – ложная тревога (гололед прогнозируется, но по факту его не было), серый квадрат с черным кружком – неоправдавшийся прогноз гололеда (в прогнозе гололед есть, по факту его не было)

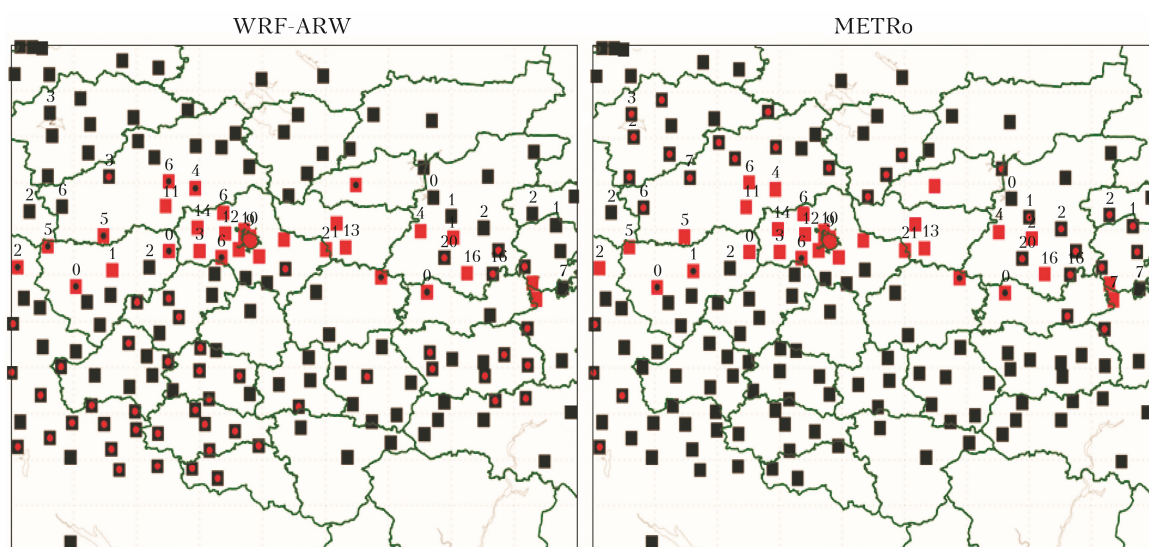


Рис. 3. Прогноз гололеда на день 26 декабря 2016 г. в сравнении с данными наблюдений. Обозначения те же, что и на рис. 2

5. Оценки результатов прогноза гололеда с помощью анализа типов осадков

Результаты оценивались по территории, приведенной на рис. 1. Ниже представлены средние оценки для всех отобранных случаев. Напомним, что в экспериментах варьировались два параметра. Первый – коэффициент водности, который означает соотношение воды и остальных гидрометеоров; второй – порог, при превышении которого считалось, что осадки в прогнозе есть. Напомним, что в наблюдениях за наличие осадков принимается их количество больше или равное 0,1 мм/12 ч.

В табл. 1 приводятся оценки прогноза факта наличия/отсутствия гололеда. Из анализа видно, что чем больше порог наличия осадков в прогнозе, тем выше предупрежденность отсутствия гололеда и, следовательно, ниже предупрежденность наличия. Такая же зависимость отмечается при росте коэффициента водности. Остальные оценки меняются более сложным образом. Задача – найти оптимальное сочетание прогноза наличия и отсутствия гололеда. Одной из важных оценок является критерий Пирси, который, наряду с общей оправдываемостью, определяет успешность прогноза как наличия, так и отсутствия гололеда. Чем ближе он к единице, тем лучше прогноз. В табл. 1 выделены те значения, которые, по нашему мнению, являются оптимальными:

Таблица 1

Оценки прогноза факта наличия/отсутствия гололеда с помощью анализа типов осадков

| Коэффициент водности | Порог наличия осадков в прогнозе | ООп | ОпН | ПрН | ОпО | ПрО | ПИР | Ложн | Проп | Число прогнозов гололеда | |
|----------------------|----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-------|------|------|--------------------------|------|
| | | | | | | | | | | Н | О |
| 0,001 | 0,05 | 68 | 51 | 73 | 83 | 66 | 0,397 | 48 | 16 | 2787 | 3165 |
| 0,01 | | 69 | 52 | 72 | 83 | 68 | 0,412 | 47 | 16 | 2682 | 3270 |
| 0,1 | | 70 | 54 | 70 | 83 | 71 | 0,415 | 45 | 16 | 2533 | 3419 |
| 0,9 | | 71 | 56 | 67 | 82 | 74 | 0,417 | 43 | 17 | 2360 | 3592 |
| 0,001 | 0,1 | 69 | 52 | 68 | 82 | 69 | 0,388 | 47 | 17 | 2546 | 3406 |
| 0,01 | | 70 | 54 | 68 | 82 | 72 | 0,403 | 45 | 17 | 2441 | 3511 |
| 0,1 | | 71 | 56 | 65 | 81 | 74 | 0,406 | 43 | 18 | 2294 | 3658 |
| 0,9 | | 72 | 57 | 63 | 81 | 77 | 0,407 | 42 | 18 | 2123 | 3829 |
| 0,001 | 0,2 | 69 | 53 | 62 | 80 | 73 | 0,361 | 46 | 19 | 2270 | 3682 |
| 0,01 | | 71 | 55 | 61 | 80 | 75 | 0,375 | 44 | 19 | 2165 | 3787 |
| 0,1 | | 72 | 57 | 59 | 79 | 78 | 0,378 | 42 | 20 | 2018 | 3934 |
| 0,9 | | 73 | 59 | 56 | 79 | 81 | 0,379 | 40 | 20 | 1850 | 4102 |
| 0,001 | 1 | 70 | 56 | 37 | 73 | 86 | 0,233 | 43 | 26 | 1281 | 4671 |
| 0,01 | | 71 | 59 | 36 | 73 | 88 | 0,245 | 40 | 26 | 1189 | 4763 |
| 0,1 | | 71 | 62 | 34 | 73 | 89 | 0,241 | 37 | 26 | 1074 | 4878 |
| 0,9 | | 71 | 64 | 32 | 73 | 91 | 0,235 | 35 | 26 | 965 | 4987 |
| 0,001 | 2 | 68 | 57 | 18 | 70 | 93 | 0,116 | 42 | 29 | 605 | 5292 |
| 0,01 | | 69 | 64 | 18 | 70 | 94 | 0,135 | 35 | 29 | 561 | 5391 |
| 0,1 | | 70 | 67 | 17 | 70 | 96 | 0,131 | 32 | 29 | 492 | 5460 |
| 0,9 | | 70 | 71 | 15 | 70 | 96 | 0,126 | 28 | 29 | 430 | 5522 |
| 0,001 | 5 | 67 | 54 | 1 | 67 | 99 | 0,010 | 45 | 32 | 59 | 5893 |
| 0,01 | | 67 | 60 | 1 | 67 | 99 | 0,010 | 39 | 32 | 46 | 5906 |
| 0,1 | | 67 | 72 | 1 | 67 | 99 | 0,011 | 27 | 32 | 36 | 5916 |
| 0,9 | | 67 | 77 | 1 | 67 | 99 | 0,009 | 22 | 32 | 27 | 5925 |

Примечание. Общее число случаев: 5952; число случаев гололеда: 1953; число случаев отсутствия гололеда: 3999. ООп – общая оправдываемость прогноза; ОпН – оправдываемость прогноза наличия; ПрН – предупредительность наличия; ОпО – оправдываемость отсутствия; ПрО – предупредительность отсутствия; ПИР – критерий Пирси; Ложн – процент ложных тревог; Проп – процент пропусков цели; Н – общее число прогнозов наличия гололеда; О – общее число прогнозов отсутствия.

значение коэффициента водности 0,9; значение порога наличия прогностических осадков 0,05 или 0,1 мм/12 ч. Критерий Пирси при этом больше 0,4, а общая оправдываемость превышает 70%, довольно неплохие показатели можно видеть и в других оценках.

Из табл. 1 видно, что при превышении порога наличия в прогнозе осадков 0,2 очень быстро уменьшается критерий Пирси и ухудшаются другие характеристики.

Подобные эксперименты были проведены для Мурманской, Волгоградской обл. и Краснодарского края. Результаты близки, но оценки получились несколько хуже, возможно, за счет того, что общее число случаев было меньше, чем в Центральной России.

6. Оценки результатов прогноза гололеда с помощью теплосбалансной модели

Для тех же случаев и той же территории были рассчитаны оценки прогноза гололеда с помощью теплосбалансной модели. В экспериментах варьиро-

вались три параметра: типы подстилающей поверхности с разными теплофизическими характеристиками (асфальт, цемент, песок, щебень); общее число моментов времени с наличием гололеда в прогнозе за 12-часовой период (всего 36 двадцатиминутных моментов времени), граничные условия снизу (два варианта: назовем их условно «дорога», когда снизу задается температура почвы на глубине 40 см, и «эстакада», когда снизу задается температура воздуха на высоте 2 м). Результаты оценок приведены в табл. 2 и 3.

Рассмотрим табл. 2, где представлены оценки прогноза факта наличия/отсутствия гололеда с помощью теплосбалансной модели. Видно, что критерий Пирси принимает максимальные значения в девять моментов времени (общая продолжительность 3 ч) с гололедом в прогнозе, причем это характерно для всех четырех типов подстилающей поверхности. Лучшие оценки получены при использовании теплофизических характеристик подстилающей поверхности с параметрами «песок», критерий Пирси в этом случае составляет 0,461. Следует отметить завышенное число ложных тревог (43%). В табл. 2 можно обнаружить небольшую разницу результатов для всех четырех типов подстилающего слоя, это касается всех оценок.

Таблица 2

Оценки прогноза факта наличия/отсутствия гололеда с помощью теплобалансной модели

| T _{гол} | Тип подстилающего слоя | ООп | ОпН | ПрН | ОпО | ПрО | ПИР | Ложн | Проп | Число прогнозов гололеда | |
|------------------|------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-------|------|------|--------------------------|------|
| | | | | | | | | | | Н | О |
| 1 | Асфальт | 62 | 46 | 88 | 90 | 49 | 0,386 | 43 | 9 | 3743 | 2209 |
| 3 | | 64 | 47 | 85 | 88 | 54 | 0,398 | 44 | 11 | 3469 | 2483 |
| 9 | | 72 | 56 | 72 | 84 | 72 | 0,455 | 43 | 15 | 2520 | 3420 |
| 18 | | 73 | 63 | 47 | 77 | 86 | 0,341 | 36 | 22 | 1448 | 4504 |
| 27 | | 71 | 68 | 24 | 71 | 94 | 0,192 | 31 | 28 | 704 | 5248 |
| 36 | | 69 | 77 | 8 | 68 | 98 | 0,071 | 22 | 31 | 209 | 5743 |
| 1 | Цемент | 62 | 46 | 88 | 90 | 49 | 0,386 | 53 | 9 | 3743 | 2209 |
| 3 | | 64 | 47 | 85 | 88 | 54 | 0,398 | 44 | 11 | 3469 | 2483 |
| 9 | | 72 | 56 | 72 | 84 | 72 | 0,455 | 43 | 15 | 2520 | 3432 |
| 18 | | 73 | 63 | 47 | 77 | 86 | 0,341 | 36 | 22 | 1448 | 4504 |
| 27 | | 71 | 68 | 24 | 71 | 94 | 0,192 | 31 | 28 | 704 | 5248 |
| 36 | | 69 | 77 | 8 | 68 | 98 | 0,071 | 22 | 31 | 209 | 5743 |
| 1 | Песок | 63 | 46 | 90 | 91 | 49 | 0,402 | 53 | 8 | 3785 | 2167 |
| 3 | | 65 | 48 | 87 | 89 | 54 | 0,418 | 51 | 10 | 3519 | 2433 |
| 9 | | 72 | 56 | 73 | 84 | 72 | 0,461 | 43 | 15 | 2524 | 3428 |
| 18 | | 73 | 64 | 46 | 76 | 87 | 0,337 | 35 | 23 | 1411 | 4541 |
| 27 | | 71 | 69 | 22 | 71 | 95 | 0,180 | 30 | 28 | 640 | 5312 |
| 36 | | 68 | 77 | 7 | 68 | 98 | 0,062 | 22 | 31 | 183 | 5769 |
| 1 | Щебень | 63 | 46 | 90 | 91 | 49 | 0,403 | 53 | 8 | 3794 | 2158 |
| 3 | | 65 | 48 | 87 | 89 | 54 | 0,418 | 51 | 10 | 3523 | 2429 |
| 9 | | 72 | 56 | 73 | 84 | 72 | 0,458 | 43 | 15 | 2527 | 3425 |
| 18 | | 73 | 64 | 46 | 76 | 87 | 0,338 | 35 | 23 | 1414 | 4538 |
| 27 | | 71 | 69 | 23 | 71 | 95 | 0,182 | 30 | 28 | 645 | 5307 |
| 36 | | 68 | 76 | 7 | 68 | 98 | 0,062 | 23 | 31 | 186 | 5766 |

Примечание. T_{гол} – общее число моментов времени с гололедом в прогнозе (из 36); нижнее граничное условие «дорога» – температура почвы на глубине 40 см.

Таблица 3

Оценки прогноза факта наличия/отсутствия гололеда с помощью теплобалансной модели

| T _{гол} | Тип подстилающего слоя | ООп | ОпН | ПрН | ОпО | ПрО | ПИР | Ложн | Проп | Число прогнозов гололеда | |
|------------------|------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-------|------|------|--------------------------|------|
| | | | | | | | | | | Н | О |
| 1 | Асфальт | 63 | 47 | 92 | 93 | 49 | 0,424 | 52 | 6 | 3839 | 2113 |
| 3 | | 65 | 48 | 89 | 91 | 54 | 0,435 | 51 | 8 | 3584 | 2368 |
| 9 | | 72 | 56 | 75 | 85 | 70 | 0,466 | 43 | 14 | 2637 | 3315 |
| 18 | | 74 | 64 | 48 | 77 | 86 | 0,352 | 35 | 22 | 1470 | 4482 |
| 27 | | 71 | 71 | 23 | 71 | 95 | 0,190 | 28 | 28 | 646 | 5306 |
| 36 | | 68 | 79 | 6 | 68 | 99 | 0,058 | 20 | 31 | 163 | 5789 |
| 1 | Цемент | 63 | 47 | 92 | 93 | 49 | 0,424 | 52 | 6 | 3839 | 2113 |
| 3 | | 65 | 48 | 89 | 91 | 54 | 0,435 | 51 | 8 | 3584 | 2368 |
| 9 | | 72 | 56 | 75 | 85 | 70 | 0,466 | 43 | 14 | 2637 | 3315 |
| 18 | | 74 | 64 | 48 | 77 | 86 | 0,352 | 35 | 22 | 1470 | 4482 |
| 27 | | 71 | 71 | 23 | 71 | 95 | 0,190 | 28 | 28 | 646 | 5306 |
| 36 | | 68 | 79 | 6 | 68 | 99 | 0,058 | 20 | 31 | 163 | 5789 |
| 1 | Песок | 63 | 47 | 92 | 92 | 50 | 0,422 | 52 | 7 | 3800 | 2152 |
| 3 | | 65 | 48 | 88 | 90 | 54 | 0,422 | 46 | 9 | 3533 | 2419 |
| 9 | | 72 | 56 | 73 | 84 | 72 | 0,460 | 47 | 15 | 2551 | 3401 |
| 18 | | 74 | 65 | 47 | 77 | 87 | 0,347 | 34 | 22 | 1412 | 4540 |
| 27 | | 71 | 71 | 22 | 71 | 95 | 0,185 | 28 | 28 | 628 | 5324 |
| 36 | | 68 | 79 | 6 | 68 | 99 | 0,057 | 20 | 31 | 162 | 5790 |
| 1 | Щебень | 63 | 47 | 92 | 92 | 50 | 0,423 | 52 | 7 | 3794 | 2158 |
| 3 | | 66 | 49 | 88 | 90 | 55 | 0,436 | 50 | 9 | 3521 | 2431 |
| 9 | | 72 | 56 | 73 | 84 | 72 | 0,461 | 43 | 15 | 2534 | 3418 |
| 18 | | 74 | 65 | 47 | 77 | 87 | 0,250 | 34 | 22 | 1408 | 4544 |
| 27 | | 71 | 71 | 23 | 71 | 95 | 0,186 | 28 | 28 | 632 | 5320 |
| 36 | | 68 | 78 | 6 | 68 | 99 | 0,057 | 21 | 31 | 163 | 5789 |

Примечание. Нижнее граничное условие «эстакада» – температура воздуха на высоте 2 м.

В табл. 3 самые высокие значения критерия Пирси отмечаются для типов подстилающей поверхности асфальт и цемент (0,466).

Сравнивая табл. 2 и 3, можно отметить небольшую разницу между всеми типами подстилающего слоя и между двумя вариантами нижнего граничного условия. В случае «эстакады» оценки получают несколько лучше, но разница незначительная.

Сравнивая результаты прогнозов гололеда по двум методам, можно сделать вывод, что прогноз с помощью теплосбалансной модели для центра России получился лучше, чем с помощью модели анализа типов осадков. Однако эта разница невелика, лучший критерий Пирси для прогнозов по типам осадков составляет 0,417, а по теплосбалансной модели – 0,466.

Заключение

Предложены и испытаны два метода краткосрочного прогноза наличия гололеда. Проведены оценки прогнозов наличия и отсутствия явления.

Тестирование предложенных методов проведено на большом числе случаев (46) и за большой временной интервал (2003–2018 гг.).

Прогноз с помощью теплосбалансной модели в большинстве случаев дает лучший результат, чем с помощью анализа типа осадков, однако эта разница невелика.

Теплосбалансную модель целесообразней использовать для прогноза гололедных явлений на равнинах, чем анализ гидрометеоров.

Возможно, следует разработать совместный способ. Это предполагается сделать в ближайшее время.

1. *Наставления по кодам. Международные коды. Том I. 1. Дополнения II к Техническому регламенту ВМО. Часть А – Буквенно-цифровые коды // ВМО. 2019. № 306. 549 с.*
2. *Хромов С.П., Мамонтова Л.И. Метеорологический словарь. Л.: Гидрометеониздат, 1974. 568 с.*

3. *Рубинштейн К.Г., Игнатов Р.Ю., Юсупов Ю.И., Титов Д.Е.* Использование тепло-балансного метода для прогнозирования гололедно-изморозевых отложений на проводах воздушных линий электропередачи // Энергия единой сети. 2018. № 2(37). С. 43–50.
4. *Titov D.E., Ugarov G.G., Ustinov A.A.* Analysis of application of models to assess parameters of ice formation on overhead electric power lines // Power Tech. Eng. 2017. V. 51, N 2. P. 240–246.
5. *Zarnani A., Musilek P., Shi X., Ke X., He H., Greiner R.* Learning to predict ice accretion on electric power lines // J. Eng. Appl. Artif. Intell. 2012. V. 25, N 3. P. 609–617.
6. *DeGaetano A.T., Belcher B.N., Spier P.L.* Short-term ice accretion forecasts for electric utilities using the weather research and forecasting model and a modified precipitation-type algorithm // Weather Forecast. 2008. V. 23. P. 878–853.
7. *Thompson G.* Using the Weather Research and Forecasting (WRF) Model to Predict Ground Structural Icing // Book of IWAIIS XIII. Andematt: 2009. P. 2–10.
8. *Titov D.E., Ugarov G.G., Soshinov A.G.* Monitoring the Intensity of Ice Formation on Overhead Electric Power Lines and Contact Networks // Power Tech. Eng. 2015. V. 49, N 1. P. 78–82.
9. *Shao J., Laux S.J., Trainor B.J., Pettifer R.E.W.* Nowcasts of temperature and ice on overhead railway transmission wires // Meteorol. Appl. 2003. V. 10, N 2. P. 123–133.
10. *Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D., Duda M.G., Huang X.-Y., Wang W.A.* Description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Technical Note NCAR/TN-475+STR. USA: 2008. P. 520.
11. *Mansell E.R., Ziegler C. L., Bruning E.C.* Simulated electrification of a small thunderstorm with two-moment bulk microphysics // J. Atmos. Sci. 2010. V. 67. P. 171–194.
12. *NCEP Products Inventory [Electronic resource]. URL: <https://www.nco.ncep.noaa.gov/pmb/products/gfs> (last access: 12.01.2020).*
13. *Crevier L.-P., Delage Y.* METRo: A New Model for Road-Condition Forecasting in Canada // J. Appl. Meteorol. 2001. V. 40. P. 2026–2037.

R.Yu. Ignatov, K.G. Rubinstein, Yu.I. Yusupov. Numerical experiments on the forecast of ice phenomena.

Methods and results of numerical forecast of ice phenomena over the territory of the central Russia for winters 2003–2018 are presented. The forecast success is compared using the analysis of precipitation types and the heat balance model, where the predictions of the WRF-ARW model are used as input. Some advantages of forecasts using a heat-balanced model are shown. It is suggested to develop an integral method in the future.