

## ОПТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И БАЗЫ ДАННЫХ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

УДК 551.509.324.3

# Прогноз максимальной толщины гололедных отложений

Р.Ю. Игнатов<sup>✉1,2</sup>, К.Г. Рубинштейн<sup>1,2,3</sup>, Ю.И. Юсупов<sup>2\*</sup>

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

<sup>2</sup>НПЦ «Мэн Мейкер»

123242, г. Москва, Нововаганьковский пер., 5, стр. 1

<sup>3</sup>Гидрометцентр России

123242, г. Москва, Большой Предтеченский пер., 13, стр. 1

Поступила в редакцию 19.01.2022 г.;

после доработки 14.02.2022 г.;

принята к печати 1.04.2022 г.

Описаны методы численного прогноза максимальной толщины гололедных отложений и его результаты для десяти случаев гололеда на Восточно-Европейской равнине и одного – в Приморском крае. Приводятся оценки успешности прогнозов толщины отложений льда, полученные с помощью расчетов по выходной информации модели WRF-ARW и по данным измерений на синоптических станциях в различных регионах России.

*Ключевые слова:* гололед, оценки максимальной толщины гололедных отложений, численная модель прогноза погоды WRF-ARW; glazed frost, estimates of maximum thickness of ice deposits, numerical weather forecast model WRF-ARW.

## Введение

Гололедные отложения – неблагоприятное и временами опасное природное явление, которое часто наблюдается в холодное время года в регионах с умеренным климатом и с характерными оттепелями. В частности, гололеды распространены в период с осени до весны в центре и на юге европейской части России, в Северной Европе, в некоторых провинциях Канады, на севере США.

Гололеды опасны для любого вида транспорта, в большой мере для самолетов. Огромные потери несет от гололедов энергетическая отрасль из-за разрывов линий электропередач, особенно в труднодоступных районах.

Несмотря на заметные успехи численного прогноза погоды в последнее время, а также огромную протяженность дорог и линий электропередач, публикации по численному прогнозу гололедов в России практически отсутствуют. В 2020 г. была опубликована статья [1] с первыми и вполне удачными результатами численных прогнозов фактов возникновения гололеда. В еще одной нашей работе по прогнозу возникновения наледи на проводах [2] были приведены оценки удачных прогнозов и ложных тревог. Показано, что в целом прогноз факта гололеда был вполне успешным.

В зарубежной периодике есть несколько публикаций по численному прогнозу гололедных явлений, например [3–9]. Авторы этих работ в основном использовали статистические методы прогноза гололедов. Наиболее близка к нашей работе вышедшая в 2008 г. статья сотрудников Корнельского университета, США [10]. Ее авторы на основе анализа типа осадков и приземной температуры по прогнозам модели WRF-ARW [11] рассчитывали образования наледи с помощью видоизмененной схемы Рамера [6, 12]. В [10] использовалась численная модель WRF-ARW с горизонтальным пространственным разрешением 12 км и 31 вертикальной сигма-поверхностью, что, как мы увидим дальше, близко к параметрам наших расчетов. Для прогнозов были выбраны две области в США, анализировалось 23 случая гололеда в одной области и 15 – в другой. В основном прогнозы были успешными. Авторы работы подробно обсуждали трудности расчета оценок качества прогнозов, с которыми мы также столкнулись и о которых говорим ниже.

Механизм образования гололеда обычно связан с быстрой адвекцией теплого воздуха, при которой повышение температуры на небольшой высоте происходит быстрее, чем непосредственно над поверхностью земли. Теплый воздух скользит по расположенному внизу более холодному и тяжелому воздуху, температура воздуха на некоторой высоте может становиться положительной, а у поверхности земли остается отрицательной. Возможна также ситуация, когда температура воздуха у земли слаболожи-

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

тельная, а температура поверхности земли, деревьев и конструкций на земле отрицательная. Проходящие в это время осадки, даже если они замерзшие, попадая в нижнюю теплую воздушную массу из вышележащих слоев, становятся жидкими. Далее в приземном холодном воздухе с минусовой температурой капли охлаждаются и при контакте с конструкциями или поверхностью земли замерзают и превращаются в гололедные отложения. Гололедные явления могут образовываться и из осадков смешанной фазы, например при дожде со снегом и отрицательной температуре приземного воздуха или поверхностей.

На некоторых метеорологических станциях с помощью специального гололедного станка измеряется толщина этих отложений. Обычно она составляет несколько миллиметров, но иногда – десятки миллиметров. Травматизм в городских условиях и экономический ущерб при этом могут достигать значительных масштабов.

Ранее мы публиковали результаты исследования возможности численного прогноза обледенения проводов [2], где прогнозы оценивались по инструментальным измерениям веса проводов – этот метод показал свою перспективность. В работе [1] изучалась возможность численного прогноза факта возникновения гололеда по результатам прогнозов модели WRF-ARW путем анализа концентрации гидрометеоров в нижней тропосфере. Было проанализировано несколько десятков случаев гололеда в центре России и показано, что с помощью рассмотренного метода хорошо прогнозируются факты возникновения или отсутствия гололедов.

Более важным и сложным, по нашему мнению, является прогноз максимальной толщины гололедных отложений, который может помочь предсказать возможные последствия гололеда и потенциальную величину экономического ущерба для транспортной и энергетической отраслей. На основе таких расчетов целесообразно заблаговременно принимать меры по минимизации травматизма и экономических потерь, например кратковременно отключать энергообеспечение, подключая нагрев проводов для плавки наледи там, где это возможно. Мы оценивали качество прогнозов гололеда по данным наблюдений за толщиной гололедных отложений на метеорологических станциях.

Отметим, что существует также явление «изморозь», которое формируется при отсутствии атмосферных осадков, однако мы его не рассматриваем, как и «гололедицу» – лед на земной поверхности, образовавшийся после оттепели или дождя в результате похолодания до отрицательной температуры.

Факты гололедных явлений должны субъективно фиксироваться наблюдателем на всех стандартных метеорологических станциях. Количественные измерения толщины гололедных отложений ведутся на малой части метеорологических станций ввиду отсутствия на остальных необходимого для этих измерений оборудования.

В настоящее время во всех метеорологических службах гололед оперативно прогнозируется только синоптиками или с помощью статистических методов. Ни в России, ни за рубежом не создано надежной оперативной системы численного прогноза гололеда, которая была бы полезна при численных прогнозах опасных явлений погоды для территории государств с продолжительным холодным периодом, таких как Россия, Канада или США.

Во всех опубликованных методах численного прогноза гололедных явлений делается упор на определение типа осадков и температурных условий вблизи поверхности земли, приводящих к замерзанию жидких или смешанных осадков на земле, ветках деревьев и проводах.

Формирование и толщина гололеда зависят от температуры приземного воздуха, температуры подстилающей поверхности и количества твердых и жидких гидрометеоров в воздухе непосредственно у поверхности земли. Поэтому успешность численного прогноза гололеда зависит в большей мере от успешности прогноза вышеперечисленных параметров. Ниже мы приводим оценки этих параметров для десяти прогнозов. Так как температура подстилающей поверхности измеряется реже и хуже температуры воздуха, в оценках приводится последняя.

## Методика прогноза и оценок толщины гололеда

Для прогноза гололеда нами использовались результаты региональной негидростатической модели WRF-ARW версии 4.3 [13]. Область расчетов с нанесенными метеорологическими станциями приведена на рис. 1. Для оценки результатов прогноза гололедных явлений привлекались данные наблюдений на ~ 800 метеорологических станциях.

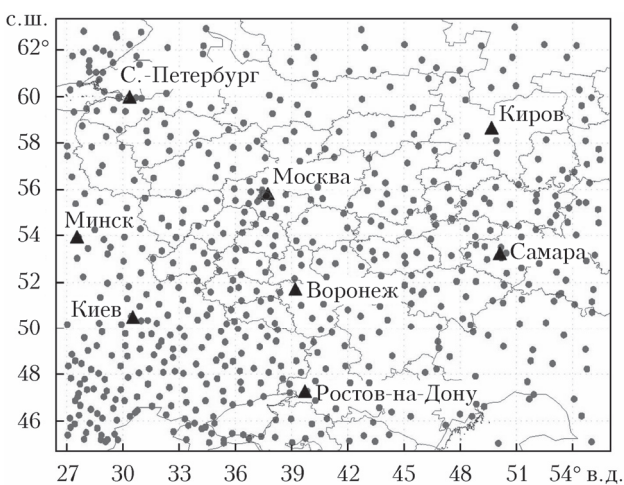


Рис. 1. Область расчетов по модели WRF-ARW и расположение метеорологических станций (точки), использованных для оценки прогноза гололеда

## Метод расчета толщины гололедных отложений

Толщина гололедных отложений  $G(t)$  (мм) рассчитывалась в каждый момент времени в каждом узле по формуле  $G(t) = G(t-1) + R(t)$  при выполнении одного из условий:  $T_s(t-1) \leq 0$  и узел находится на суше или  $T_2(t-1) \leq 0$  и узел на воде ( $T_s$  – температура поверхности). Принимается, что если  $T_s(t-1) \geq 0,1$  на суше или  $T_2(t-1) \geq 0,1$  на воде, то  $G(t) = 0$ , т.е. лед разрушается (тает). Здесь  $t$  – текущий момент времени;  $t-1$  – предыдущий момент времени;  $R(t)$  – приrost льда за интервал времени от  $t-1$  до  $t$ ;  $T_2$  – температура на высоте 2 м, ледяное покрытие принимается за сушу.

Приrost льда в каждый момент времени рассчитывается по формуле [10, 14]:

$$R(t) = \frac{1}{\rho_i \pi} \sqrt{[\rho_0 P(t)]^2 + [W(t)]^2},$$

где  $W(t) = 0,067P(t)^{0,846}$  – содержание воды в воздухе;  $P$  – сумма жидких осадков (мм) за период времени между  $t-1$  и  $t$ ;  $\rho_0$  – плотность воды ( $\sim 1$  кг/м<sup>3</sup>);  $\rho_i$  – плотность льда ( $\sim 0,9$  кг/м<sup>3</sup>).

Для акваторий не используется температура поверхности, так как она может быть положительной при отрицательной температуре воздуха, и возможный гололед не будет спрогнозирован, однако он может образоваться, в частности, на морских и речных судах или в портах, к примеру в незамерзающем Баренцевом море. Во всех описываемых случаях использовалась температура воздуха на высоте 2 м. В настоящей работе не учитывается обледенение судов из-за водных брызг, так как это отдельная задача. Прогноз гололедных отложений – лишь часть комплексного метода прогноза обледенения судов или самолетов, где учитываются степень волнения моря (озера, реки) и скорость ветра.

Как было установлено в экспериментах, для анализа прироста толщины гололеда целесообразно использовать температуру в предыдущий момент времени. Это связано с тем, что в случае быстрой адвекции холода падение температуры воздуха вблизи поверхности может опережать замерзание воды в осадках. В результате в модели может возникнуть ситуация, когда температура поверхности уже отрицательная, а в воздухе еще присутствует вода в жидкой фазе, и возникнет фиктивный гололед.

Пример такого явления приведен на рис. 2 (цв. вкладка). Видно, что на территорию прогноза с запада на восток быстро наступал холодный воздух и условий для образования гололеда не возникало. При использовании текущей температуры поверхности на момент прогноза возникают фиктивные гололедные «волны» (рис. 2, слева). Однако если в расчете гололеда применяется температура за предыдущий момент времени, то такие «волны» полностью исчезают (рис. 2, справа). В реальных ситуациях при вторжении холодного воздуха на равнины

вдали от моря гололедные явления наблюдаются очень редко.

## Анализ прогноза и его оценки для 10 случаев гололеда в центральной части Восточно-Европейской равнины

Как говорилось выше, для прогноза применяется модель WRF-ARW [13] версии 4.3 с шагом 18 км по горизонтали и 41 сигма-поверхностью по вертикали. В качестве начальных данных и краевых условий использовались анализы GFS (Global Forecast System – Система Глобального прогноза США) [15] с горизонтальным разрешением 0,25° по широте и долготе.

Для расчета оценок результаты прогноза по гидродинамической модели интерполировались линейно в точки с координатами станций.

Для иллюстрации методики были выбраны случаи, когда соотношение количества станций, где наблюдался гололед, и станций без него было не менее 1/10. В каждом участвовали как станции с гололедом, так и станции с его отсутствием, т.е. гололед никогда не наблюдался и не отсутствовал на всех станциях одновременно. Еще одним критерием выбора случаев было наличие гололедных отложений толщиной более 5 мм. Таким образом, было отобрано 10 случаев образования гололеда.

В каждом случае прогноз по модели WRF-ARW стартовал от ближайшего в прошлом срока (00:00 или 12:00) к выбранному временному промежутку и заканчивался на последнем сроке из него. Так как нас интересовала максимальная толщина гололедных отложений, длина временного промежутка и заблаговременность прогноза были разными для каждого случая.

Оценки результатов прогнозов представлены в табл. 1–2, а карты – на рис. 3 (случаи 1–6) и 4 (случаи 7–10) (цв. вкладка). На этих рисунках приведены все анализируемые прогнозы максимальной толщины гололедных отложений за время наблюдения гололедов. В большинстве случаев прогноз максимальных гололедных отложений весьма близок к данным наблюдений.

В первом прогнозе на юго-западе области наблюдался гололед, который был очень хорошо описан с помощью приведенной методики. Также близки к наблюдениям и максимальные прогностические толщины гололедных отложений. Причем район максимумов и величины отложений в прогнозе практически совпадает с районом максимумов и величинами в наблюдениях.

Третий и четвертый прогнозы характеризуются меньшими размерами области с гололедами и небольшой интенсивностью самого явления, однако они также предсказаны весьма успешно: районы распространения гололеда в наблюдениях и прогнозе очень близки.

В пятом и шестом прогнозах есть области не оправдавшегося прогноза гололеда на юго-западе территории, что видно и по оценкам, которые для этих примеров оказались не очень хорошими.

Таблица 2

**Средние оценки качества прогнозов температуры воздуха на высоте 2 м и осадков для 10 случаев на Восточно-Европейской равнине**

Случай	Температура			Осадки		
	BIAS	RMSE	PIR_T	BIAS	RMSE	PIR_P
1	0,48	3,25	<b>0,86</b>	0,14	1,39	<b>0,84</b>
2	-0,39	2,89	<b>0,83</b>	0,24	2,73	0,60
3	-1,11	2,93	0,63	0,16	0,93	0,75
4	-0,73	<b>2,42</b>	<b>0,72</b>	0,07	2,02	0,55
5	0,11	3,28	0,94	-0,04	1,40	0,74
6	0,37	2,50	<b>0,87</b>	0,20	1,28	0,56
7	-0,34	2,45	<b>0,79</b>	0,14	<b>0,91</b>	0,39
8	-0,45	2,57	<b>0,76</b>	<b>-0,03</b>	1,38	0,50
9	-0,44	2,44	<b>0,88</b>	0,18	1,29	<b>0,74</b>
10	-1,21	3,39	<b>0,87</b>	0,43	1,35	<b>0,81</b>
1–10	-0,37	2,87	0,80	0,15	1,75	0,67

Примечание. PIR\_T – критерий Пирса для положительной и отрицательной градаций температуры на высоте 2 м; PIR\_P – критерий Пирса для факта наличия и отсутствия осадков.

Видно, что почти для всех примеров прогнозов, кроме 3-го, критерий Пирса по температуре выше 0,7, и критерий Пирса по осадкам для него равен 0,75, что и позволило предсказать гололеды весьма успешно для всех 10 случаев.

**Прогноз для случая гололеда в ноябре 2020 г. в Приморском крае**

Для проверки универсальности предложенной методики нами был рассчитан прогноз гололеда в другом климатическом регионе – в Приморском крае.

На юге Приморского края 17–19 ноября 2020 г. наблюдалось редкое для Дальнего Востока явление – сильнейшие гололедные отложения, которое приняло масштаб стихийного бедствия. Толщина отложенный достигала в некоторых районах нескольких сантиметров. По данным метеорологических наблюдений зафиксирован максимум в Анучино (29 мм) и Владивостоке (28 мм).

Мы оценили возможность и качество прогноза толщины гололедных отложений с помощью вышеописанного метода. В отличие от рассмотренных выше случаев, когда для испытания разрабатываемой методики в качестве начальных и граничных условий использовались анализы GFS, в случае Приморского края использовались прогнозы GFS, чтобы оценить реальные возможности прогноза в будущем подобной критической для края ситуации. Область расчетов представлена на рис. 5. Выборка и анализ данных проводились внутри прямоугольника, чтобы исключить влияние границ, т.е. сама расчетная область в модели WRF-ARW превышала территорию, приведенную на рис. 5.

Прогнозы в центральной области России проводятся нами с помощью модели WRF-ARW в течение многих лет и конфигурация набора физических

В седьмом прогнозе (рис. 4) область гололеда больше, а в восьмом – меньше, чем наблюдалось. Эти не очень удачные примеры прогноза гололеда связаны с недостатками прогноза температуры и осадков моделью.

Девятый и десятый прогнозы с большими областями гололеда и значительными толщинами отложений были описаны удовлетворительно, судя по приведенным картам.

Отдельного упоминания заслуживает второй прогноз, когда в центральной области России, в том числе в Москве, наблюдался очень сильный гололед с толщиной отложений 20–25 мм; он нанес значительный экономический ущерб. В прогнозе местоположение и интенсивность гололедных отложений хорошо совпадают с наблюдениями, что видно на карте. Максимальные прогностические величины толщины ледяных отложений оказались очень близки к наблюдениям и составили 20–30 мм.

Для всех 10 случаев был отдельно оценен прогноз максимальной толщины отложений для каждой станции. Средние оценки приведены в табл. 1. Судя по ней, лучшие прогнозы получились для случаев 2, 7 и 10 (выделены полужирным). Важно заметить, что для трех случаев с большой толщиной гололедных отложений (1, 2, 5) оценки оказались весьма удовлетворительными. Можно также указать на небольшую недооценку толщин гололедных отложений во всех прогнозах.

Таблица 1

**Средние оценки качества прогнозов максимальной толщины гололедных отложений для случаев 1–10 на Восточно-Европейской равнине**

Случай	BIAS	RMSE	MOD	OBS	100% · MOD/OBS	COUNT
1	-2,75	11,49	2,99	5,74	52	103
2	<b>-0,61</b>	8,10	3,69	4,30	86	191
3	-1,18	1,69	1,05	2,22	47	160
4	-1,51	7,00	1,10	2,61	42	180
5	-1,01	6,97	5,34	6,39	84	89
6	-1,02	3,99	1,90	2,92	65	63
7	<b>-0,56</b>	3,06	1,49	2,05	73	182
8	-1,33	2,28	0,56	1,89	30	108
9	0,91	2,10	2,84	3,18	89	227
10	<b>-0,68</b>	2,88	1,20	1,88	64	126

Примечания. BIAS – сдвиг; RMSE – среднеквадратическая ошибка; MOD – среднее значение максимального диаметра по данным прогноза; OBS – среднее значение максимального диаметра по данным наблюдений; COUNT – размер выборки.

Для всех рассмотренных прогнозов толщины гололеда были рассчитаны оценки качества прогноза температуры воздуха и осадков по всем станциям на рассматриваемой территории (табл. 2).

Для оценок мы использовали более надежную температуру воздуха на высоте 2 м, которая в холодный период года в основном близка к температуре поверхности. Полужирным выделены лучшие оценки прогнозов с критерием Пирса > 0,7.

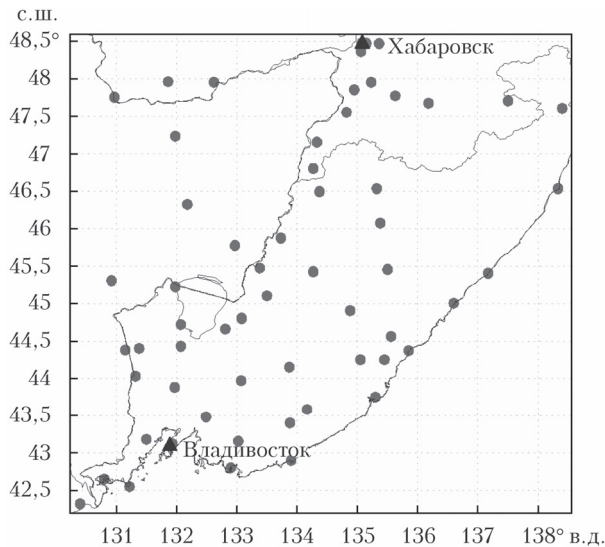


Рис. 5. Область расчетов и метеорологические станции (точки), использовавшиеся для оценки прогноза гололеда в Приморском крае

процессов модели определена достаточно давно, в то время как прогноз для Дальнего Востока потребовал предварительной оценки оптимального набора процедур. Как было показано выше, весьма существенным для прогноза гололеда является качество прогноза моделью температуры и осадков. В связи с этим для Дальнего Востока было выполнено тестирование различных параметризаций пограничного слоя атмосферы. Было проведено девять экспериментов. Кроме максимальной толщины гололедных отложений, оценивалось также качество воспроизведения моделью осадков и температуры.

Прогноз по модели WRF-ARW стартовал от 12:00 17 декабря 2020 г., заблаговременность составила 72 часа. Оценки для девяти экспериментов с различными параметризациями пограничного слоя приводятся в табл. 3.

Таблица 3

Оценки прогноза максимальной толщины гололедных отложений, температуры на высоте 2 м и осадков с 17 по 19 ноября 2020 г. в Приморском крае в экспериментах с различными параметризациями пограничного слоя

№	Индекс пограничного слоя	Максимальный диаметр отложений		Температура на высоте 2 м		Осадки, мм/12 ч	
		BIAS	RMSE	BIAS	RMSE	BIAS	RMSE
1	1	3,06	12,23	-1,09	2,92	-3,86	<b>9,40</b>
2	5	<b>0,54</b>	<b>8,67</b>	<b>-0,70</b>	2,72	-3,84	9,42
4	7	-1,86	9,27	-0,65	<b>2,56</b>	<b>-3,83</b>	9,43
5	8	-4,71	12,01	<b>-0,34</b>	<b>2,51</b>	-3,84	<b>9,32</b>
6	9	5,39	11,98	-1,15	2,98	<b>-3,67</b>	9,47
7	10	5,46	10,20	-0,99	3,37	<b>-3,76</b>	9,49
8	11	2,33	11,61	-1,17	2,93	-3,87	<b>9,41</b>
9	12	<b>-0,52</b>	10,33	<b>-0,68</b>	<b>2,60</b>	-3,87	<b>9,32</b>

Примечание. Полужирным выделены наилучшие оценки.

Индексы пограничного слоя означают следующее: 1 – Yonsei University Scheme (YSU) [16], 5 – Mellor–Yamada Nakanishi Niino (MYNN) Level 2,5 and Level 3 Schemes [17–19], 7 – Asymmetric Convection Model 2 Scheme (ACM2) [20], 8 – Bougeault–Lacarrere Scheme (BouLac) [21], 9 – University of Washington (TKE) Boundary Layer Scheme [22], 10 – TEMF Scheme [23], 11 – Shin-Hong Scale-aware Scheme [24], 12 – Grenier–Bretherton–McCa Scheme [25].

Из табл. 3 следует, что оптимальный пограничный слой – Mellor–Yamada (индекс 5), наилучшие оценки толщин гололеда получены именно для него. На рис. 6 (цв. вкладка) приведен пример расчета максимальной толщины гололедных отложений при использовании этого пограничного слоя. Видно, что прогноз весьма успешный. Значения максимальных прогностических толщин гололедных отложений близки к наблюдениям. Можно надеяться, что такой прогноз мог бы позволить заблаговременно подготовиться к такому редкому явлению на Дальнем Востоке и принять необходимые меры для минимизации экономических потерь.

В юго-западной части области, на территории Северной Кореи, прогнозировались толщины отложений, превышающие 50 мм. К сожалению, в этом районе у нас нет метеорологических станций, передающих информацию, поэтому трудно судить об их реалистичности.

В связи с малым количеством станций на Дальнем Востоке, на которых наблюдались гололедные отложения и проводились измерения их толщин (всего восемь), приведем оценки качества прогноза для каждой из них (табл. 4) – прогностическое и реальное значения максимальной толщины гололедных отложений.

Таблица 4

Максимальная толщина гололедных отложений по данным прогноза (MOD) и наблюдений (OBS) для каждой станции Приморского края, где наблюдался гололед с 17 по 19 ноября 2020 г.

Индекс станции	Название станции	MOD	OBS	100% · MOD/OBS
31878	Кировский	0,8	4	20
31884	Новопокровка	1,3	1	130
31921	Камень-Рыболов	0,7	1	70
31939	Чугуевка	21,3	12	178
31960	Владивосток	24,7	28	88
31961	Воздвиженка	7,5	7	107
31971	Барабаш	25,4	9	282
31981	Анучино	17,7	29	61

Прогноз по предложенной методике можно считать вполне успешным для этой климатической зоны. Отметим, что все наиболее мощные отложения предсказаны весьма успешно, значения максимумов лишь немного различаются, при этом оставаясь в пределах градации, соответствующей сильным отложениям (более 10 мм). Также стоит отметить Владивосток, для которого спрогнозированное значение толщины отложений составило 24,7 мм, а по данным наблюдений – 28 мм, т.е. значения были очень близки.

## Заклучение

Предложен и испытан метод краткосрочного прогноза гололедных явлений и оценки максимальной толщины отложений. Проанализированы 10 примеров для средней полосы России и один пример для Приморского края.

Прогноз гололеда и толщины гололедных отложений в большой степени зависит от качества прогноза температуры и осадков гидродинамической моделью. Практически все рассмотренные случаи сильных гололедных отложений (более 10 мм) оказались успешно предсказаны. Необходимо подчеркнуть, что нам неизвестны ни российские, ни зарубежные публикации с прогнозами толщины отложений, и эта работа является пионерской в этом чрезвычайно важном, на наш взгляд, для России направлении.

## Список литературы

1. *Игнатов Р.Ю., Рубинштейн К.Г., Юсупов Ю.И.* Численные эксперименты по прогнозу гололедных явлений // *Оптика атмосф. и океана.* 2020. Т. 33, № 9. С. 735–741; *Ignatov R.Yu., Rubinshtein K.G., Yusupov Yu.I.* Numerical experiments on forecasting glaze phenomena // *Atmos. Ocean. Opt.* 2020. V. 33, N 6. P. 682–689.
2. *Рубинштейн К.Г., Игнатов Р.Ю., Юсупов Ю.И., Туттов Д.Е.* Использование тепло-балансного метода для прогнозирования гололедно-изморозевых отложений на проводах воздушных линий электропередачи // *Энергия единой Сети.* 2018. Т. 37, № 2. С. 43–50.
3. *Titov D.E., Ugarov G.G., Soshinov A.G.* Monitoring the intensity of ice formation on overhead electric power lines and contact networks // *Power Technol. Eng.* 2015. V. 49, N 1. P. 78–82.
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 Technol. Eng.* 2017. V. 51, N 2. P. 240–246.
5. *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 Forecas.* 2008. V. 23. P. 878–853.
6. *DeGaetano A.T., Belcher B.N., Spier P.L., Zarnani A., Musilek P., Shi X., Ke X., He H., Greiner R.M.* Learning to predict ice accretion on electric power lines // *J. Eng. Appl. Art. Intel. Arc.* 2012. V. 25, N 3. P. 609–617.
7. *Nygaard B.E.K.* Evaluation of icing simulations for the “COST727 icing test sites” in Europe // *Proc. IWAIS XIII,* 2009. P. 11–16.
8. *Thompson G.* The weather research and forecasting (WRF) model to predict ground structural icing // *Proc. IWAIS XIII,* 2009. P. 2–10.
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. *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. 838–853.
11. *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: University Corporation for Atmospheric Research, 2008. 520 p.
12. *Ramer J.* An empirical technique for diagnosing precipitation type from model output // *Fifth Intern. Conf. on Aviation Weather Syst. Vienna,* 1993. P. 227–230.
13. *Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Liu Z., Berner J., Huang X.-Y.* A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4.3. 2021. DOI: 10.5065/1dfh-6p97.
14. *Jones K.F.* Ice Accretion in freezing rain // *Environ. Sci., Phys. Eng.* 1996. DOI: 10.21236/ada310659.
15. *NCEP Products Inventory* [Electronic resource]. URL: <https://www.nco.ncep.noaa.gov/pmb/products/> (last access: 10.10.2021).
16. *Hong S.-Y., Noh Y., Dudhia J.* A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes // *Mon. Weather Rev.* 2006. V. 134. P. 2318–2341.
17. *Nakanishi M., Niino H.* An improved Mellor–Yamada level 3 model: Its numerical stability and application to a regional prediction of advecting fog // *Bound.-Lay. Meteorol.* 2006. V. 119. P. 397–407.
18. *Nakanishi M., Niino H.* Development of an improved turbulence closure model for the atmospheric boundary layer // *J. Meteorol. Soc. Jap.* 2009. V. 87. P. 895–912.
19. *Olson J.B., Kenyon J.S., Angevine W.M., Brown J.M., Paoletti M., Suselj K.* A Description of the MYNN-EDMF Scheme and the Coupling to Other Components in WRF-ARW. 2019. DOI: 10.25923/n9wm-be49.
20. *Pleim J.E.* A combined local and nonlocal closure model for the atmospheric boundary layer. Part I: Model description and testing // *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 2007. V. 46. P. 1383–1395.
21. *Bougeault P., Lacarrere P.* Parameterization of orography-induced turbulence in a mesobeta-scale model // *Mon. Weather Rev.* 1989. V. 117. P. 1872–1890.
22. *Bretherton C.S., Park S.* A new moist turbulence parameterization in the Community Atmosphere Model // *J. Climate.* 2009. V. 22. P. 3422–3448.
23. *Angevine W.M., Jiang H., Mauritsen T.* Performance of an eddy diffusivity-mass flux scheme for shallow cumulus boundary layers // *Mon. Weather Rev.* 2010. V. 138. P. 2895–2912.
24. *Shin H.H., Hong S.-Y.* Representation of the subgrid-scale turbulent transport in convective boundary layers at gray-zone resolutions // *Mon. Weather Rev.* 2015. V. 143. P. 250–271.
25. *Herve G., Bretherton C.S.* A moist PBL parameterization for large-scale models and its application to subtropical cloud-topped marine boundary layers // *Mon. Weather Rev.* 2001. V. 129. P. 357–377.

*R.Yu. Ignatov, K.G. Rubinshtein, Yu.I. Yusupov.* Forecast of the maximum thickness of ice deposits.

The methods and results of numerical prediction of the maximum thickness of ice deposits are described. The success of ice deposition forecasts is estimated from calculations based on the WRF-ARW model output for different Russian regions.

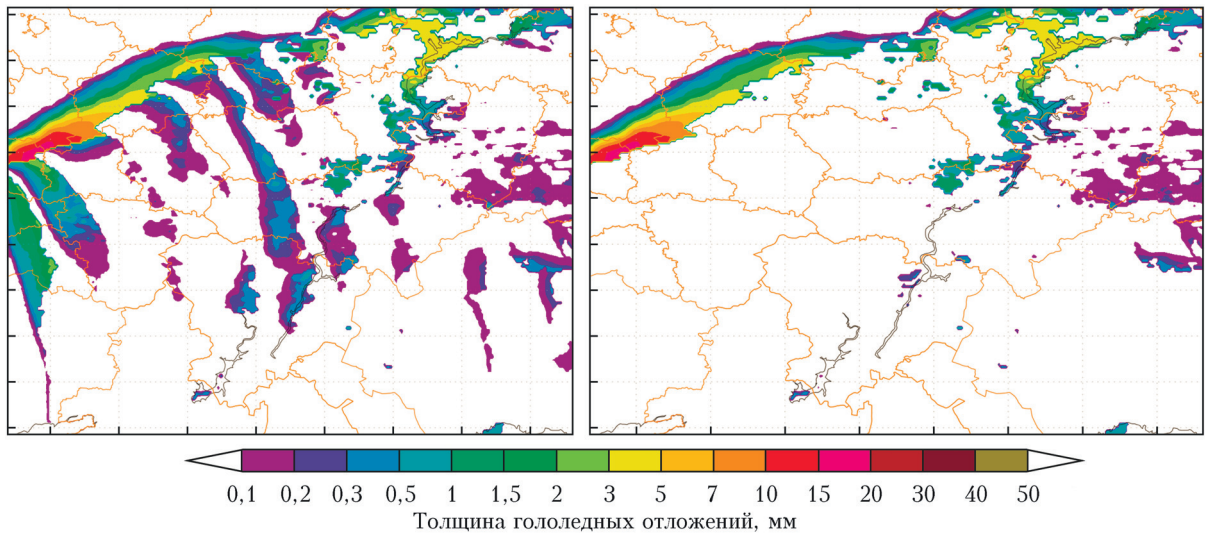


Рис. 2. Прогноз «ложного» гололеда при использовании текущей температуры воздуха (слева) и исправленный прогноз с привлечением температуры за предыдущий момент времени (справа). Прогноз на 21:00 14 февраля 2021 г.

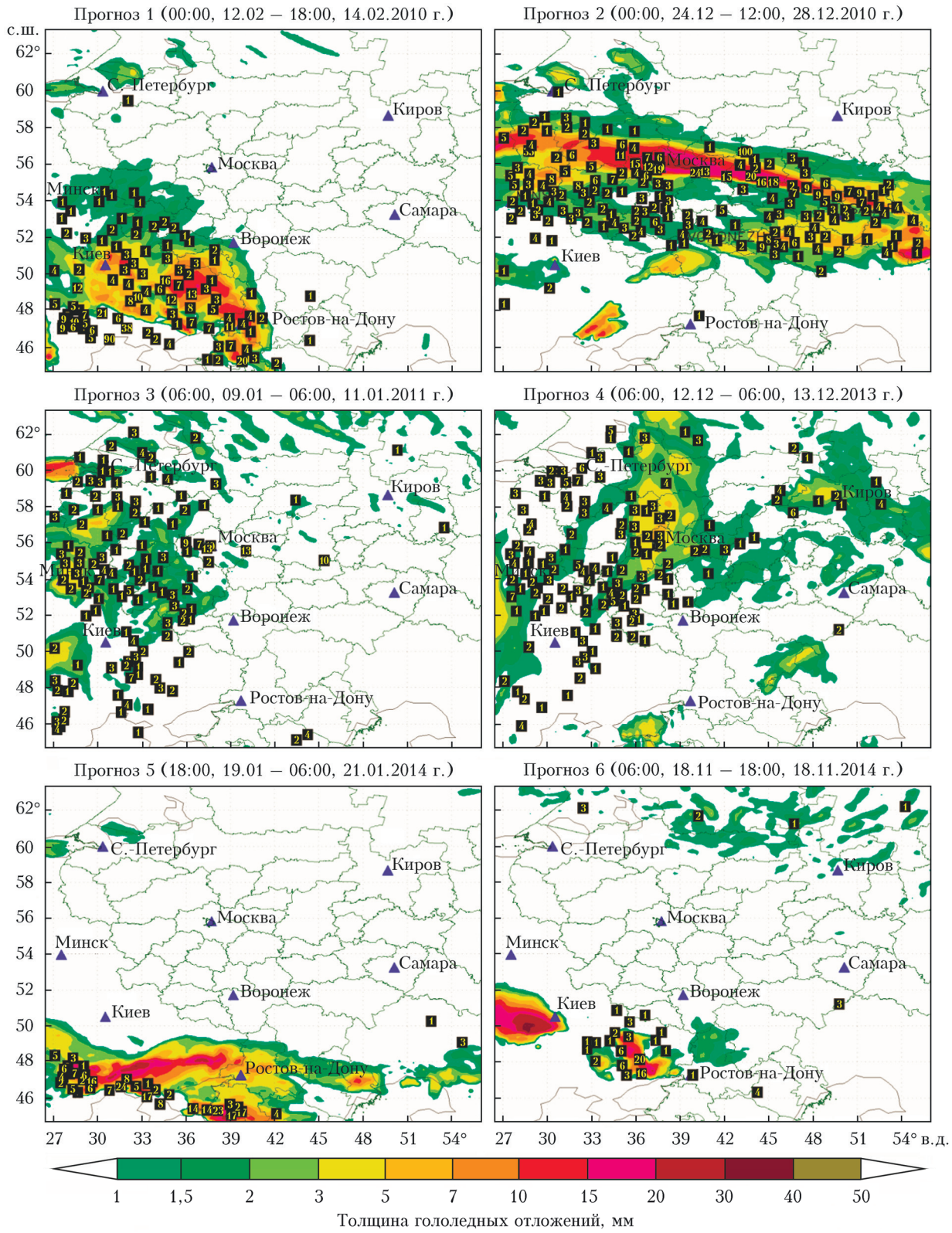


Рис. 3. Прогноз максимальной толщины гололедных отложений для шести прогнозов гололеда на Восточно-Европейской равнине: цифры в квадратах – данные наблюдений, цвет – прогноз. Дата и время в заголовке – начало и конец интегрирования толщины гололедных отложений



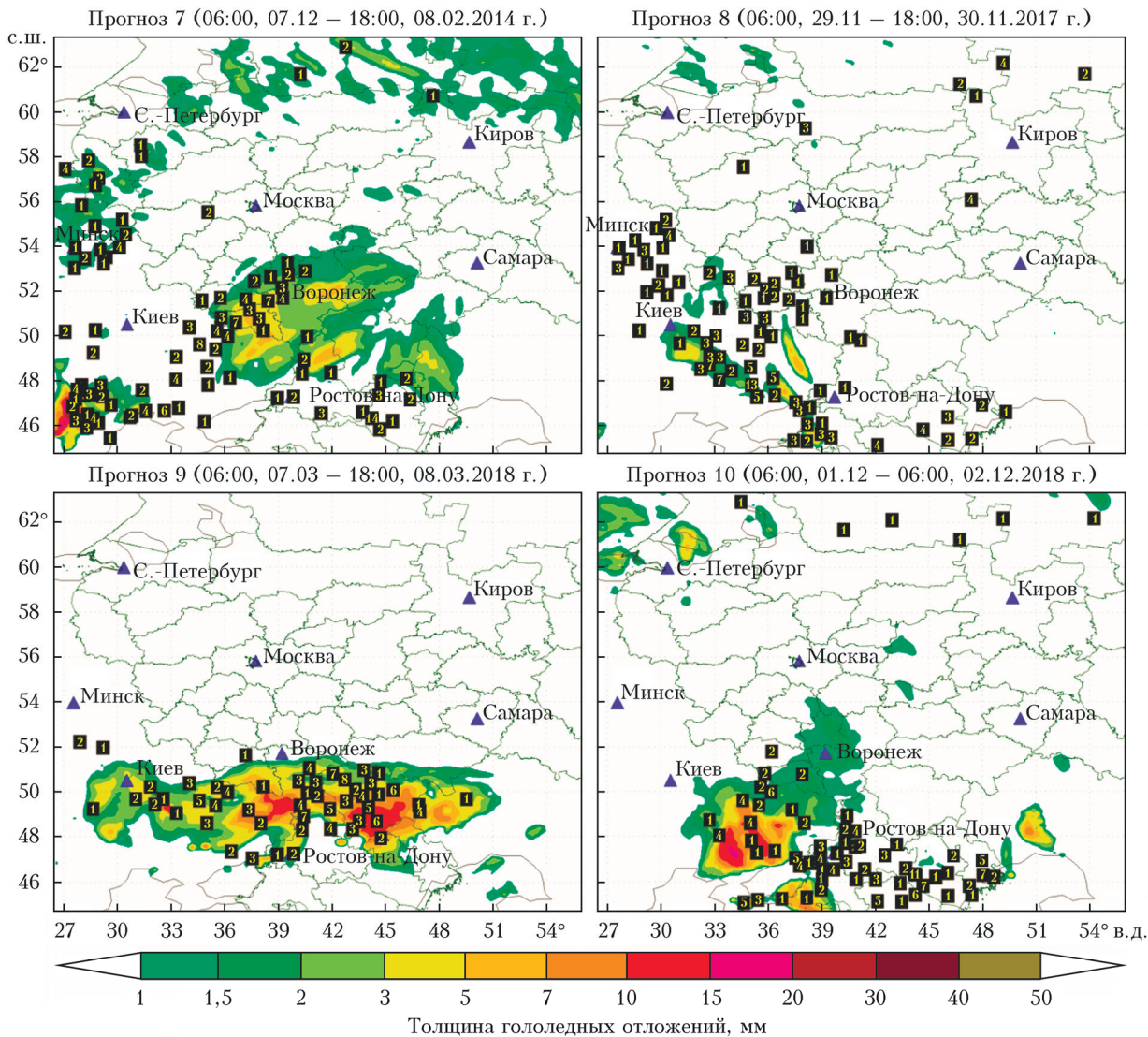


Рис. 4. То же, что и на рис. 3, для примеров 7–10

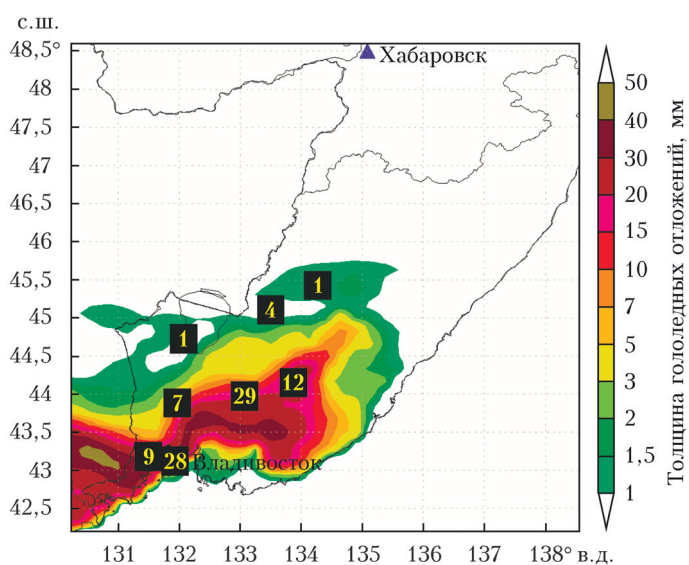


Рис. 6. Прогноз максимальной толщины гололедных отложений в Приморском крае для случая гололеда 17–19 ноября 2020 г.