

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2021-4-69-83>

УДК 551.578.11

## Условия формирования ледяного шторма во Владивостоке в ноябре 2020 года

*И.И. Леонов, Н.Н. Соколикхина*

*Московский государственный университет  
имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия  
leonov@geogr.msu.ru*

Рассмотрены синоптические условия формирования беспрецедентного ледяного шторма с образованием гололеда высокой интенсивности, длительным по времени и на достаточно большой площади в Приморском крае России. Показана ведущая роль сильного выдвигания слоя с положительной температурой в сторону холодной воздушной массы и наличие двусторонней адвекции тепла в нижней тропосфере. Показано, что длительное сохранение гололеда на территории края обусловлено продвижением южного циклона на восток и приходом холодных воздушных масс с континента. Проведены эксперименты численного моделирования замерзающих у земной поверхности осадков с использованием мезомасштабной модели WRF-ARW. Результаты моделирования позволили получить более подробную вертикальную структуру атмосферы во время формирования замерзающих осадков и заполнить недостающие для анализа данные.

*Ключевые слова:* опасные явления погоды, гололедно-изморозевые отложения, гололед, замерзающий дождь, ледяной дождь, численный прогноз погоды, WRF-ARW

## Formation conditions of an ice storm in Vladivostok in November 2020

*I.I. Leonov, N.N. Sokolikhina*

*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia  
leonov@geogr.msu.ru*

Synoptic conditions for the formation of an unprecedented ice storm with the generation of long-lived high-intensity glaze ice on the vast territory in Primorsky Krai are investigated. The leading role of the strong extension of the layer with positive temperature towards the cold air mass and the existence of two-way temperature advection in the lower troposphere are shown. It is shown that the long-term preservation of glaze ice on the territory of the region was associated with the movement of the southern cyclone to the east and the arrival of cold air masses from the continent. Experiments were implemented to simulate freezing precipitation using the WRF-ARW mesoscale model. The simulation results made it possible to obtain more detailed data on the vertical structure of the atmosphere during the formation of freezing precipitation and to fill in the missing data for analysis.

*Keywords:* severe weather events, ice accretion, glaze ice, freezing rain, ice pellets, numerical weather prediction, WRF-ARW

## Введение

До настоящего времени особенно важными остаются исследования, связанные с изучением опасных гидрометеорологических явлений на территории России. В «Типовой перечень и критерии опасных метеорологических явлений» [12] среди прочих входят сильные гололедно-изморозевые отложения, диаметр отложения на проводах гололедного станка которых составляет не менее 20 мм для гололеда, 35 мм для мокрого (замерзающего) снега и сложных отложений и 50 мм для изморози. Чаще всего опасные отложения гололеда формируются во время выпадения замерзающей мороси или замерзающего дождя [6]. Во время образования гололеда вместе с замерзающим дождем или моросью может наблюдаться ледяной дождь, относящийся к твердым осадкам. В совокупности эти явления образуют замерзающие осадки.

Для описания отдельных случаев выпадения замерзающих осадков хорошо подходит термин «ледяной шторм» – аналог англоязычного термина «ice storm», обозначающего опасные случаи образования гололеда с толщиной отложений льда более  $\frac{1}{4}$  дюйма (6,4 мм) [11]. Для российских условий термин «ледяной шторм» уместно употреблять для описания синоптических условий, во время которых диаметр образовавшихся гололедно-изморозевых отложений достиг опасных значений, установленных для территории России [12].

Сильные гололедно-изморозевые отложения становятся причиной серьезных негативных последствий для множества отраслей народного хозяйства, а также могут способствовать причинению ущерба жизни и здоровью людей. Так, например, ледяной дождь, прошедший в 2010 году в Московском регионе, стал причиной длительного нарушения электроснабжения населения, обледенение привело к многочисленным авариям на автодорогах, изменению режима работы железнодорожного транспорта и к серьезным сбоям в режиме работы аэропортов [1, 2]. Лучшее всего условия формирования замерзающих осадков на территории России изучены для европейской части и юга [6]. Также подробно рассматривались условия образования замерзающего дождя на территории Пермского края [4].

В предлагаемой работе объектом изучения стал ледяной шторм, прошедший во Владивостоке в ноябре 2020 года. Он привел к катастрофическим экономическим последствиям на юге Приморского края.

В середине ноября 2020 года в Приморье наблюдалась теплая погода, на несколько градусов выше нормы. Атмосферные условия обуславливались распространением над Приморским краем отрога Сибирского антициклона. Однако во второй половине дня 18 ноября во Владивостоке начался ливневой дождь, который в сочетании с отрицательной температурой воздуха привел к образованию гололеда. Нарастание гололеда продолжалось практически двое суток и достигло значения 28 мм по данным метеорологической станции Владивосток. Беспрецедентный гололед

привел к многочисленным обрывам линий электропередач, обрушениям опор воздушных линий. Десятки тысяч жителей Владивостока остались без электроэнергии, отопления, воды и связи, были повалены тысячи деревьев. Более 600 человек были вынуждены обратиться в медицинские учреждения в связи с полученными из-за гололеда травмами. Отложения в виде гололеда продержались на проводах и деревьях еще около недели.

Рассмотрены не только синоптические условия выпадения замерзающего дождя с последующим образованием интенсивного и продолжительного гололеда, но и для более детального анализа структуры тропосферы проведены численные эксперименты с использованием мезомасштабной модели WRF-ARW.

### **Материалы и методика исследования**

На первом этапе исследования был сделан подробный синоптический анализ условий формирования замерзающего дождя аналогично анализу синоптической ситуации, наблюдаемой в Москве в декабре 2010 года [5].

Для выполнения классического синоптического анализа использовались данные электронного архива ГИС «Метео» научно-производственного центра «МэпМейкер» [10], в качестве вспомогательных использовались данные реанализа ERA5 [7].

Рассматривался синоптический период продолжительностью 7 суток с 16 по 23 ноября 2020 года, во время которого над Приморским краем сформировалась и развивалась атмосферная циркуляция, которая привела к выпадению замерзающего дождя и образованию гололеда высокой интенсивности.

По ежедневным срочным данным были восстановлены поля давления и приземной температуры воздуха, области выпадения осадков для каждого срока наблюдения с целью исследования перемещения атмосферных вихрей и атмосферных фронтов в Приморье.

Для изучения вертикальной структуры тропосферы были использованы данные радиозондирования с аэрологических станций Владивосток (Садгород), Дальнереченск и Каннин. Эти данные позволили схематично изобразить пространственный вертикальный разрез тропосферы до высоты 5 км. По данным радиозондов станции Садгород был построен временной разрез тропосферы с 17 по 20 ноября 2020 г. (BCB), наглядно показывающий расположение зон адвекций тепла и холода и, как следствие, метеорологические явления, наблюдаемые во Владивостоке.

Для более детального изучения синоптических условий и вертикальной структуры атмосферы были проведены эксперименты с использованием мезомасштабной модели атмосферы WRF-ARW 4.1.2 [9]. Выбор модели обусловлен тем, что исходный код модели находится в свободном доступе. Также важно отметить, что модель постоянно совершенствуется, имеет широкий диапазон выбора начальных данных, настроек запуска и инструментов для обработки результатов моделирования.

В качестве начальных и граничных условий использовались данные реанализа ERA5 с шагом по пространству  $0,25^\circ$  [7]. Область интегрирования имела три расчетных домена с шагом по пространству 18, 6 и 2 км с количеством узлов  $142 \times 121$  для каждой вложенной сетки.

Модель WRF-ARW, как уже отмечалось выше, имеет множество настроек физических параметризаций. При проведении 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 фазы выпадающих осадков большое значение имел выбор параметризации микрофизики. В ходе проведения численных экспериментов использовалась двухмоментная схема NSSL [8], включающая в себя расчет семи типов гидрометеоров: водяной пар, облачные капли, дождь, снег, лед, крупа и град.

Модель запускалась на 36 часов, первые 12 из которых отводились на усвоение данных и в дальнейшем отбрасывались, из оставшихся суточных периодов создавался единый модельный прогон длиной в четверо суток, охватывающий период формирования и выпадения замерзающего дождя на территории Приморского края. Результаты записывались с дискретностью в один час.

Для сравнения с данными радиозондирования и более подробного изучения вертикальной структуры тропосферы по данным моделирования были построены временные и пространственные вертикальные разрезы нижней тропосферы, карты полей ветра и температуры воздуха на различных высотах, а также карты выпадения замерзающих осадков.

Существует множество способов определения фазы выпадающих осадков. Основные методы прогноза замерзающих осадков описаны в [6]. В публикациях последнего времени рассмотрены методы, использующие возможности современных параметризаций микрофизики выделять гидрометеоры различных фазовых состояний [3]. В настоящей работе использовался схожий подход. Замерзающими считались осадки, во время образования которых отношение гидрометеоров жидкой фазы к общему числу гидрометеоров превышало 80 % и температура воздуха на высоте 2 метров принимала отрицательные значения.

### Результаты синоптического анализа

В первой половине ноября 2020 года в Приморье наблюдалась теплая погода, со средней температурой воздуха на несколько градусов выше нормы. Первая декада ноября по данным наблюдений оказалась теплее нормы на  $1,5^\circ\text{C}$ , вторая – на  $4,5^\circ\text{C}$ .

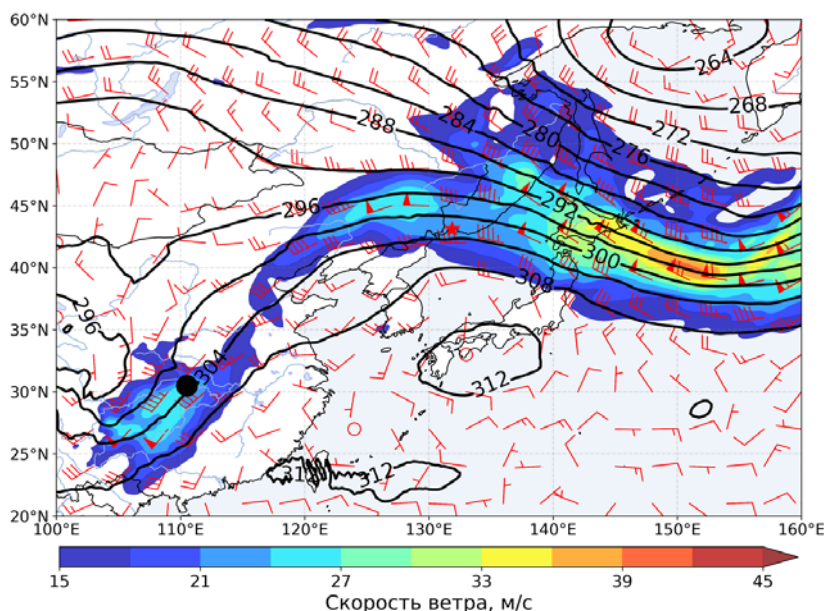
За три дня до начала катастрофического ледяного шторма, 16 ноября, в южной части Приморья наблюдалась спокойная погода. Основным

центром действия атмосферы, определяющим погодные условия, являлся сибирский антициклон. Температура воздуха в районе Владивостока составляла около 5 °С днем, и около 1 °С ночью и в утренние часы. Значение давления превышало 1025 гПа. Наблюдался ветер северных направлений со скоростью до 10 м/с и порывами до 16 м/с.

Днем 17 ноября (около 00 ч ВСВ 17.11.2020) через Владивосток прошел теплый атмосферный фронт, направление ветра сменилось на северо-западное, а потом на юго-восточное. Температура воздуха начала повышаться. В это же время над юго-восточным Китаем сформировался циклон, который под действием ведущего потока смещался на восток (рис. 1).

В течение 18 ноября южный циклон смещался в северо-восточном направлении, к концу дня пересек Желтое море и достиг района границы Китая и КНДР (рис. 2).

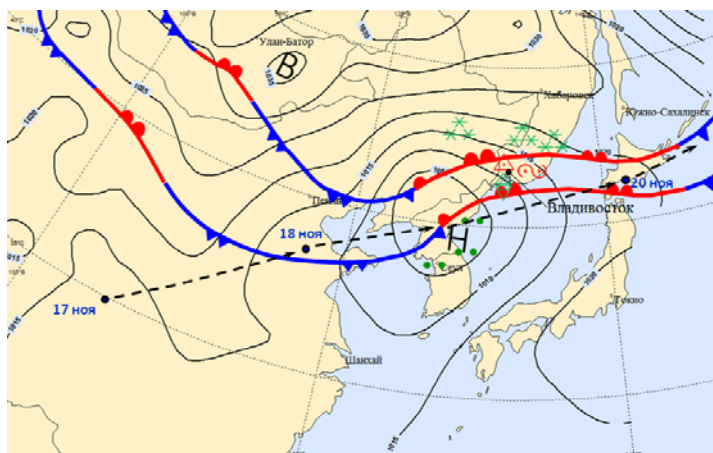
В 3 часа ночи по местному времени во Владивостоке были зафиксированы первые отложения льда величиной 1 мм. В первой половине дня 18 ноября наблюдались осадки в виде слабого ливневого дождя с ухудшением горизонтальной дальности видимости до 200 м. Во второй половине дня наблюдались осадки в виде мороси и ливневого дождя, направление ветра сменилось на северное.



**Рис. 1.** Карта абсолютной барической топографии 700 гПа по данным реанализа ERA5 за 17.11.2020 00.00 ч ВСВ (черной точкой отмечено приземное положение центра южного циклона).

**Fig. 1.** Map of absolute baric topography of 700 hPa according to the ERA5 reanalysis data for 11/17/2020 00 UTC (the black dot marks the surface position of the center of the southern cyclone).

Ночью 19 ноября южный циклон продвинулся на восток. К этому времени давление в центре циклона составляло менее 1000 гПа. Атмосферное давление во Владивостоке продолжало понижаться и к 19 часам по местному времени составило 1001,9 гПа. С приближением теплого фронта теплый и влажный тропический воздух стал надвигаться на холодный умеренный континентальный воздух. В ходе вынужденной конвекции на юге Приморья усилился процесс осадкообразования. В районе Владивостока наблюдались осадки в виде крупы, ливневого снега, ледяного и замерзающего дождя (рис. 2).



**Рис. 2.** Карта приземного синоптического анализа за 19.11.2020 00.00 ч ВСВ, траектория перемещения южного циклона (точками отмечено положение центра действия для 00.00 ч ВСВ каждого дня).

**Fig. 2.** Surface synoptic chart for 11/19/2020 00UTC, trajectory of the southern cyclone (the dots mark the position of the center of action for 00 UTC of each day).

Таким образом, ночью 19 ноября юг Приморского края находился в сложной синоптической обстановке. Около земли наблюдалась отрицательная температура воздуха от  $-1$  до  $-5$  °С, которая была обусловлена притоком холодной континентальной воздушной массы с севера. В то же время на высотах от 800 до 2900 м располагалась теплая и очень влажная воздушная масса с температурой воздуха выше  $5$  °С, которую принес южный циклон.

Такая структура атмосферы привела к тому, что осадки в виде снега, проходя через слой воздуха с положительной температурой, превращались в капли дождя, далее в приземном слое холодного воздуха переохлаждались и мгновенно замерзали при столкновении с земной поверхностью, образуя слой гололеда.

К часу ночи 19 ноября диаметр гололедных отложений составил 5 мм, к 7 часам утра следующего дня по местному времени – 12 мм,

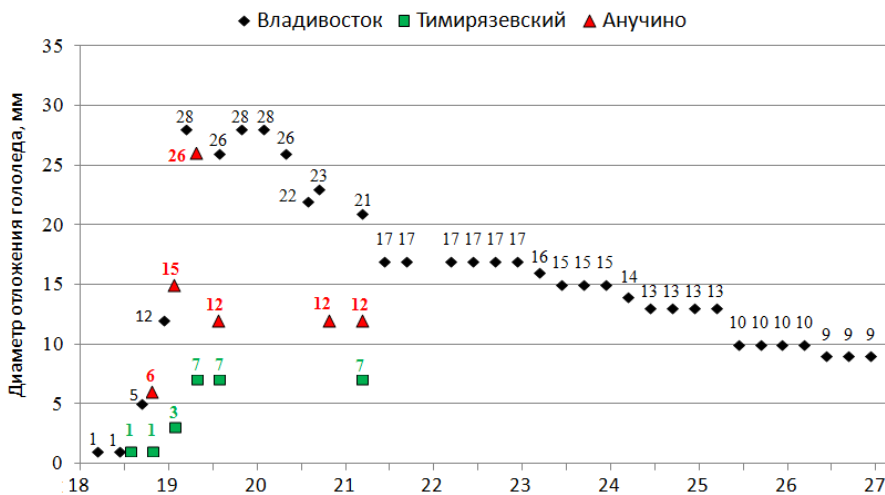
к 13 часам – 28 мм. Максимальный диаметр отложений гололеда сохранялся до 10 часов утра 20 ноября, общая продолжительность обледенения составила 210 часов, практически 9 дней.

По данным Приморского УГМС, гололедно-изморозевые отложения наблюдались также на метеорологических станциях Анучино и Тимирязевский.

На метеорологической станции Анучино образование гололеда началось 19 ноября в 4 часа утра и продолжалось 15 часов. Толщина отложения достигала 12 мм, диаметр – 29 мм. Максимальный вес отложения составил 184 г. Начало образования гололеда наблюдалось при слабо отрицательной температуре воздуха  $-3,4^{\circ}\text{C}$ , северо-восточном ветре со скоростью 3 м/с. Отложения гололеда продержались 62 часа.

На метеорологической станции Тимирязевский образование гололеда началось 18 ноября в 22 часа по местному времени. Толщина отложения достигала 3 мм при диаметре 7 мм. Максимальный вес отложения составил 56 г. Начало гололедообразования наблюдалось при температуре воздуха  $-2,3^{\circ}\text{C}$ , северном ветре с направлением  $17^{\circ}$  и скоростью 5 м/с. Отложения гололеда сохранялись 66 часов.

Временной ход нарастания и сохранения отложений гололеда на метеорологических станциях Владивосток, Анучино и Тимирязевский представлен на рис. 3.

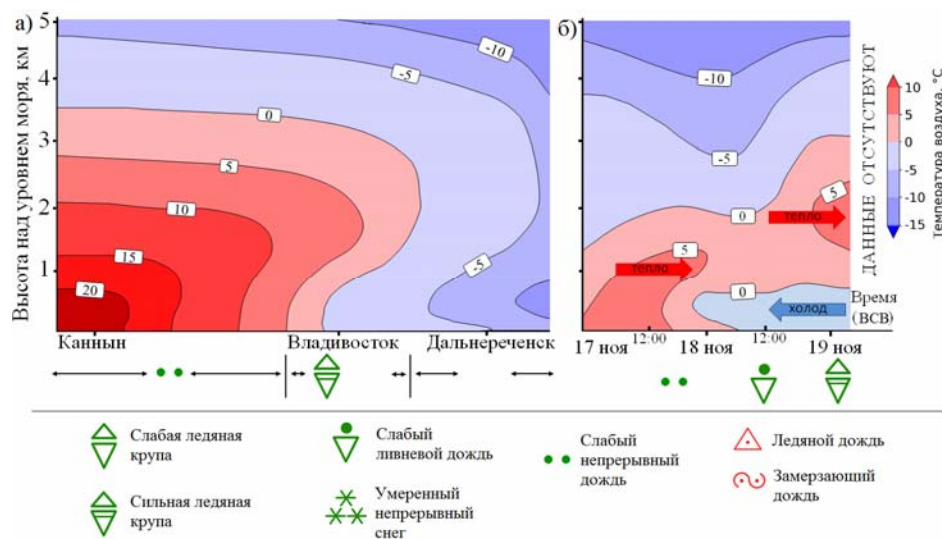


**Рис. 3.** График временного хода нарастания и сохранения отложений гололеда на метеорологических станциях Владивосток, Тимирязевский и Анучино на момент времени 00.00 ч ВСВ в период 18–27.11.2020 г.  
**Fig. 3.** Graph of the time course of the growth and preservation of ice accretion at the meteorological stations Vladivostok, Timiryazevskiy and Anuchino for 00 UTC from 18 to 27 November 2020.

Помимо описанных выше случаев образования гололеда 19–20 ноября 2020 года в Приморском крае, там же наблюдались и другие опасные явления погоды. В эти дни на всей территории края прошли сильные и очень сильные осадки в виде дождя, мокрого снега и снега. Общее количество выпавших осадков за период 19–20 ноября составило 30–74 мм, местами на западе и юго-востоке края 77–90 мм.

Еще одна особенность рассматриваемой синоптической ситуации состояла в том, что южный циклон продолжал смещаться на восток, и юг Приморья в последующие дни находился под действием отрога Сибирского антициклона, что привело к сохранению отрицательной температуры воздуха в данном регионе и, как следствие, сохранению отложений льда вплоть до 27 ноября 2020 года.

При анализе синоптических условий, приводящих к опасным гололедным явлениям, особое значение имеет исследование вертикальной структуры тропосферы. С этой целью по данным радиозондирования на аэрологических станциях Владивосток (Сад-Город), Дальнереченск и южнокорейского города Каннин за 00.00 ч ВСВ 19 ноября 2020 года был построен вертикальный разрез через фронтальную зону для периода максимальной интенсивности замерзающих осадков дождя во Владивостоке (рис. 4а).



**Рис. 4.** Термическая структура тропосферы в 00.00 ч ВСВ 19.11.2020 в зоне теплого фронта при выпадении замерзающих осадков с образованием гололеда в ноябре 2020 г. (а); эволюция очага замерзающего дождя во Владивостоке в период 17–19 ноября 2020 г. (б).

**Fig. 4.** Thermal structure of the troposphere in the warm front zone during freezing precipitation with ice formation in November 2020 (a); evolution of the center of freezing rain in Vladivostok from 17 to 19 November 2020 (b).



Утром 19 ноября в момент максимальной интенсивности выпадения замерзающих осадков и образования гололеда слой с положительной температурой воздуха располагался приблизительно от 700 до 3000 м над земной поверхностью, что создавало благоприятные условия перехода твердых обложных осадков в жидкие, а затем в переохлажденные в зоне отрицательных температур. Слой с положительной температурой располагался в холодной воздушной массе, что является наиболее характерным показателем для фронтальных гололедных ситуаций. Данные радиозондирования не позволяют оценить протяженность выдвижения слоя положительных температур с высокой точностью, но учитывая большую вертикальную мощность данного слоя и широкую полосу гололедообразования можно сделать предположение, что выдвижение области положительных температур в область холодной воздушной массы составляло не менее 150 км.

Описанная выше картина, как правило, характерна для случаев интенсивных и продолжительных гололедообразующих ситуаций. В ноябре 2020 г. гололедообразующие явления наблюдались в широкой полосе (300–400 км) перед теплым фронтом и были в первую очередь связаны с глубоким выдвижением слоя с положительной температурой в сторону холодной воздушной массы.

Значительное искривление изотерм в холодном подфронтальном воздухе свидетельствует о том, что наряду с адвекцией теплого и влажного тропического воздуха на высотах более 1200 м в приземном слое до высоты 500 м наблюдается не менее интенсивная адвекция холода. Таким образом, в области перед теплым фронтом имеет место двухсторонняя адвекция.

Ранее нами было сделано предположение, что чем интенсивнее указанная двухсторонняя адвекция, тем ярче проявляется аномальное искривление изотерм в подфронтальной холодной воздушной массе и тем больше протяженность зоны гололедных явлений теплого фронта [5]. Ноябрьский случай образования гололеда на юге Приморского края стал очередным подтверждением этого предположения.

Помимо пространственной картины термической структуры тропосферы в зоне прохождения теплого фронта, были рассмотрены временные изменения условий атмосферной стратификации над Владивостоком.

В ходе анализа временного хода основных параметров стратификации в нижних слоях тропосферы над Владивостоком в период рассмотренных выше событий была построена схема эволюции очага замерзающего дождя (рис. 4б), которая наглядно иллюстрирует основные детали вертикальной структуры атмосферы. На предлагаемой схеме отчетливо проявилась обширная линза теплого и влажного воздуха, характерная для явления замерзающих и ледяных дождей высокой интенсивности.

## Результаты численного моделирования

Данных с наземных метеорологических станций, особенно со станций аэрологического радиозондирования, не всегда достаточно для детального описания какого-либо метеорологического явления. Так, из-за сильного обледенения приборов на метеорологической станции Владивосток не измерялись скорость и направление ветра с 22 ч 18 ноября по 7 ч утра 20 ноября. Кроме этого, отсутствовали данные радиозондирования на аэрологической станции Сад-Город для сроков с 12 ч 19 ноября по 0 ч 22 ноября 2020 г. Этот факт делает невозможным изучение структуры тропосферы в указанные даты. С целью получения значений метеорологических полей с более высоким пространственным и временным разрешением были проведены численные эксперименты по восстановлению гололедных явлений в ноябре 2020 года с использованием атмосферной модели WRF-ARW.

На первом этапе с помощью модели получилось воспроизвести основные схемы, полученные в результате синоптического анализа. Это схема эволюции очага замерзающего дождя над Владивостоком и схемы термической структуры тропосферы в зоне теплого фронта при выпадении замерзающих осадков с образованием гололеда.

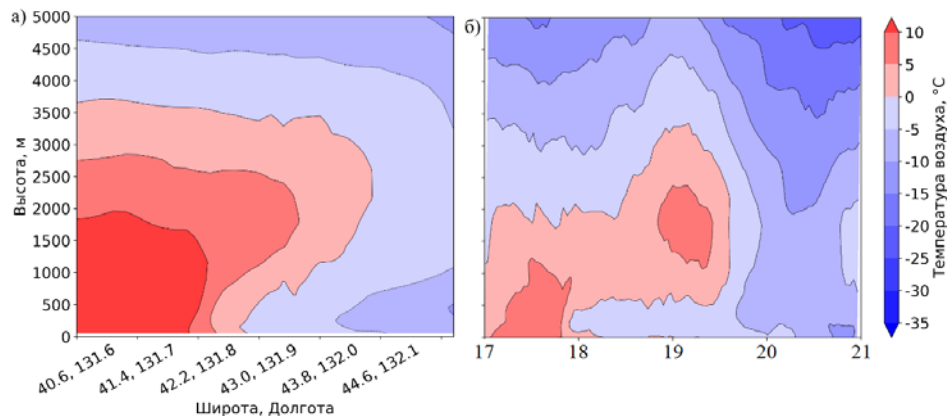
На рис. 5а представлен вертикальный разрез тропосферы, показывающий постепенное выдвигание слоя положительных температур в область холодного воздуха. Атмосферная модель WRF-ARW хорошо воспроизвела сильное искривление изотерм в зоне теплого фронта, характерное для двухсторонней адвекции: теплого воздуха на высоте и холодного у земной поверхности.

Также с помощью модели WRF-ARW был воспроизведен временной разрез тропосферы в период с 17 по 21 ноября (рис. 5б). На данной схеме отчетливо проявилась линза теплого воздуха, расположение и время жизни которой хорошо согласуется с данными радиозондирования во Владивосток (аэрологическая станция Сад-Город).

Как неоднократно говорилось выше, прогнозирование осадков является очень сложной задачей, особенно в тех случаях, когда это осадки различных фазовых состояний. Представленные схемы термической структуры тропосферы могут значительно облегчить изучение и прогнозирование явления замерзающих дождей. Важным фактом является то, что современные гидродинамические модели атмосферы, в том числе WRF, COSMO, ICON и другие, успешно прогнозируют температуру воздуха на ближайшие сутки. Это дает возможность получения подробных пространственных и временных разрезов тропосферы и дальнейшего их использования для уточнения прогноза замерзающих осадков.

Помимо данных о температуре воздуха на различных высотах, в качестве вспомогательных можно использовать данные о направлении и скорости ветра. Во время синоптического анализа был сделан вывод, что интенсивное выпадение замерзающих осадков было связано

с двухсторонней адвекцией воздуха. Для более подробного изучения этого предположения моделью WRF-ARW были воспроизведены поля ветра на высотах до 5 км.



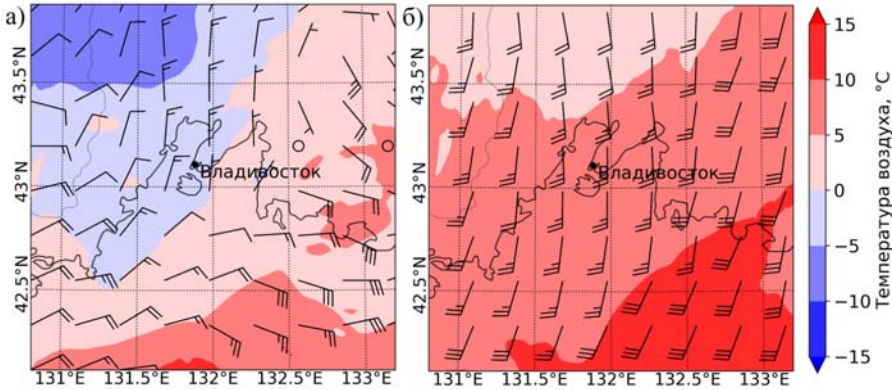
**Рис. 5.** Вертикальный разрез тропосферы до 5 км по данным модели WRF-ARW на момент времени 00.00 ч ВСВ 19 ноября 2020 г. (а); эволюция очага заморающего дождя во Владивостоке в период 17–21 ноября 2020 г. по данным модели WRF-ARW (б).

**Fig. 5.** a) Vertical section of the troposphere up to 5 km according to the WRF-ARW model in November 2020 (a); evolution of the center of freezing rain in Vladivostok from 17 to 21 November 2020 according to the WRF-ARW model (б).

Данные моделирования показали, что 19 ноября на высотах около 300 м над югом Приморского края преобладал северный ветер. В это же время на высотах около 1500 м наблюдался южный ветер. Это указывает на то, что 19 ноября район Владивостока находился в сложной синоптической обстановке: на высотах от 800 до 2000 м в столичный регион Приморья проникал теплый и влажный тропический воздух, а с северными потоками у земли на территорию Приморского края подкачивался холодный воздух.

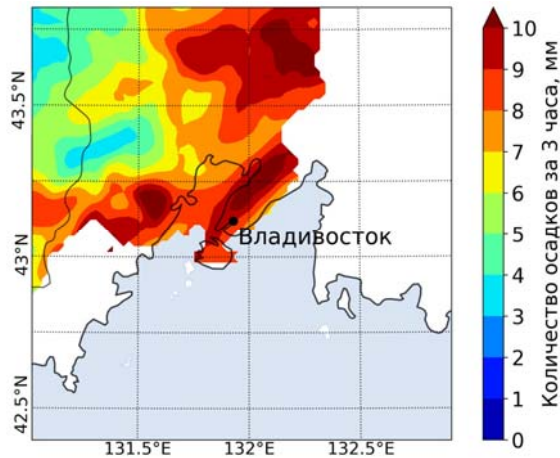
Для более наглядного восприятия данной картины были построены карты поля ветра на высоте 300 и 1500 м над Приморским краем, которые подтверждают наличие двухсторонней адвекции в данный период (рис 6а, рис. 6б).

Помимо изучения термической структуры атмосферы, было необходимо изучить возможность восстановления мезомасштабной моделью WRF-ARW. Главный интерес представлял фазовый состав осадков. В рамках завершающей фазы экспериментов были построены поля заморающих осадков согласно описанной выше методике. На рис. 7 представлены поля осадков за трехчасовой период наибольшей интенсивности их выпадения в виде заморающего дождя, полученные в результате пост-процессинга выходных данных модели WRF-ARW.



**Рис. 6.** Поля температуры воздуха, направления и скорости ветра над югом Приморского края по данным модели WRF-ARW 19.11.2020 00.00 ч ВСВ на высоте 300 м (а); 1500 м (б).

**Fig. 6.** Air temperature, wind speed and wind direction fields over the south of Primorsky Krai according to the WRF-ARW model 11/19/2020 00 UTC at 300 m (a); 1500 m (б).



**Рис. 7.** Поле количества осадков, выпавших в виде замерзающего дождя за трехчасовой период их наибольшей интенсивности на момент времени 03 ч ВСВ 19.11.2020 г. по данным модели WRF-ARW.

**Fig. 7.** Field of the amount of precipitation in the form of freezing rain for 3 hours according to the WRF-ARW model 11.19.2020 03 UTC.

Важно отметить, что модель воспроизвела полосу выпадения замерзающих осадков на территории Приморского края, хорошо согласующихся с данными наблюдений на метеорологических станциях, оборудованных гололедными станками. Высокое пространственное разрешение модели позволило воспроизвести процесс гололедообразования высокой интенсивности на о. Русский.

## Заключение

В результате работы были изучены условия формирования катастрофического ледяного шторма на территории Приморского края. В ходе работы применялись два различных подхода: проведение классического синоптического анализа и анализ данных численного моделирования.

Синоптический анализ показал, что инициатором выпадения катастрофических замерзающих осадков и формирования опасных гололедных отложений в ноябре 2020 года стал выход южного циклона, втянувшего в свою циркуляцию резко контрастирующие по температуре и влагосодержанию воздушные массы. Это привело к образованию сложной картины атмосферной стратификации в нижней тропосфере: ярко выраженные слои положительных температур на высотах и отрицательных – вблизи земли. Широкая полоса гололедных явлений была вызвана глубоким выдвиганием слоя положительных температур в сторону холодной воздушной массы.

Существование в нижней тропосфере двухсторонней адвекции температуры усилило процесс гололедообразования, а приток холодной континентальной воздушной массы с севера препятствовал быстрому таянию образовавшейся толстой корки льда на земной поверхности. По этой причине общая продолжительность обледенения составила 210 часов, практически 9 дней.

С целью более подробного изучения условий формирования ледяного шторма в Приморье были проведены численные эксперименты с использованием мезомасштабной атмосферной модели WRF-ARW. Результаты численного моделирования позволили получить данные о метеорологических полях с высоким временным и пространственным разрешением.

Основные синоптические механизмы выпадения замерзающего дождя над югом Приморского края России были представлены в виде наглядных схем, построенных на основе аэросиноптического анализа и данных моделирования. Рассмотренные в данной работе схемы можно использовать для дальнейшей разработки методов прогнозирования таких опасных ледяных и замерзающих дождей.

Статья посвящена памяти Евгения Константиновича Семенова, выдающегося ученого в области метеорологии, блестящего синоптика, великолепного лектора и прекрасного учителя. Бесценный опыт и знания Евгения Константиновича на протяжении многих лет помогали его ученикам находить особенный подход к изучению условий формирования аномалий погоды, и эта работа не была исключением.

Работа выполнена в рамках госбюджетной темы № 121051400081-7.

## Список литературы

1. Вильфанд Р.М., Голубев А.Д. Метеорологические условия выпадения ледяных дождей 25–26 декабря 2010 г. над центром Европейской части России // Лед и снег. 2011. № 3 (115). С. 119-124.

2. Голубев А.Д., Кабак А.М., Никольская Н.А. и др. Ледяной дождь в Москве, Московской области и прилегающих областях центра Европейской территории России 25–26 декабря 2010 года // Труды Гидрометцентра России. 2013. Вып. 349. С. 214-230.

3. Игнатов Р.Ю., Рубинштейн К.Г., Юсупов Ю.И. Численные эксперименты по прогнозу гололедных явлений // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33, № 9. С. 735-741. DOI: 10.15372/AOO20200911.

4. Калинин Н.А., Смородин Б.Л. Редкое явление замерзающего дождя в Пермском крае // Метеорология и гидрология. 2012. № 8. С. 27-35.

5. Семенов Е.К., Соколичина Н.Н., Соколичина Е.В., Леонов И.И. Атмосферная циркуляция над центром Европейской России в период ледяного дождя в декабре 2010 года // Метеорология и гидрология. 2018. № 5. С. 91-102.

6. 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.

7. Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. The ERA5 global reanalysis // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2020. Vol. 146: P. 1999-2049.

8. 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>

9. Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gil, D.O., Liu Z., Berner J. et al. A description of the advanced research WRF Model version 4 // NCAR/TN-556+STR/NCAR Technical Note. 2019. [http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw\\_v3.pdf](http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw_v3.pdf).

10. Электронный архив научно-производственного центра «Мэп Мейкер» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://mapmakers.ru/> (Дата обращения: 05.04.2021).

11. Электронный метеорологический словарь Национального управления океанических и атмосферных исследований [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://www.weather.gov/otx/Full\\_Weather\\_Glossary](https://www.weather.gov/otx/Full_Weather_Glossary) (Дата обращения: 15.07.2021).

12. Типовой перечень и критерии опасных метеорологических явлений [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://meteoinfo.ru/hazards-definitions> (Дата обращения: 21.010.2021).

## References

1. Vilfand R.M., Golubev A.D. Meteorologicheskie usloviya vypadeniya ledyanx dozhdex 25-26 dekabrya 2010 g. nad centrom Evropejskoj chasti Rossii. *Led i sheg [Ice and Snow]*, 2011, vol. 115, no. 3, pp. 119-124 [in Russ.].

2. Golubev A.D., Kabak A.M., Nikol'skaya N.A. et al. Ice rain in Moscow, Moscow Region, and adjoining areas in the center of the European part of Russia on December 25-26, 2010. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2013, vol. 349, pp. 214-230 [in Russ.].

3. Ignatov R.Yu., Rubinshtein K.G., Yusupov Yu.I. Numerical experiments on the forecast of ice phenomena. *Optika Atmosfery i Okeana [Atmospheric and Oceanic Optics]*, 2020, vol. 33, no. 9, pp. 735–741. DOI: 10.15372/AOO20200911 [in Russ.].

4. Kalinin N.A., Smorodin B. L. Unusual Phenomenon of Freezing Rain in Perm Krai. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2012, vol. 37, no. 8, pp. 521–528. DOI: 10.3103/S1068373912080031.

5. Semenov E.K., Sokolikhina N.N., Leonov I.I., Sokolikhina E.V. Atmospheric Circulation over Central European Russia during Freezing Rain in December 2010. *Meteorologiya i Gidrologiya* [Russ. Meteorol. Hydrol.], 2018, no. 5, pp. 91-102 [in Russ.].

6. 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.].

7. Hersbach H, Bell B, Berrisford P et al. The ERA5 global reanalysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 2020, vol. 146, pp. 1999-2049.

8. Mansell E.R., C.L. Ziegler, 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

9. Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Liu, Z., Berner, J., Wang W., Powers J. G., Duda M. G., Barker D., Huang X. A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4. *NCAR/TN-556+STR*. 2019. DOI: 10.5065/1dfh-6p97.

10. Electronic archive of the MapMakers Group Ltd. Available at: <https://mapmakers.ru/> (accessed 5 April 2021).

11. National Weather Service Weather Glossary. Available at: [https://www.weather.gov/otx/Full\\_Weather\\_Glossary](https://www.weather.gov/otx/Full_Weather_Glossary) (accessed 15 July 2021).

12. List and criteria of dangerous meteorological phenomena. Available at: <https://meteoinfo.ru/hazards-definitions> – (accessed 21 October 2021).

*Поступила 14.10.2021; одобрена после рецензирования 30.11.2021;  
принята в печать 13.12.2021.*

*Submitted 14.10.2021; approved after reviewing 30.11.2021;  
accepted for publication 13.12.2021.*