Ледяной шторм в Приморье 18–19 ноября 2020 года

И. А. Гурвич, М. К. Пичугин, А. В. Баранюк, Е. С. Хазанова

Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН
Владивосток, 690041, Россия
E-mails: gurvich@poi.dvo.ru, pichugin@poi.dvo.ru

Работа посвящена анализу условий формирования ледяного дождя на юге Приморского края 18–19 ноября 2020 г., который из-за катастрофических последствий классифицирован как «ледяной шторм». Это опасное погодное явление было зарегистрировано в Приморском крае впервые за историю метеонаблюдений. Исследование выполнено на основе измерений со спутника Global Precipitation Measurement (GPM), данных реанализов ERA5 и ERA5-Land, стандартных метеорологических измерений и данных аэрологического зондирования атмосферы. Ледяной шторм возник при синоптической ситуации, аналогичной для подобного явления в регионах, где он наблюдается регулярно. Ему предшествовали две ориентированные зонально параллельные фронтальные системы. Выход южного циклона способствовал интенсивному выносу на Приморье устойчиво стратифицированной субтропической воздушной массы. Образовавшийся в свободной атмосфере (в результате натекания тёплого воздуха на клин холодного) слой толщиной >2 км с положительными температурами (до 5,8 °C) и высокими значениями относительной влажности, преимущественно 100 %, способствовал формированию в нём жидких осадков. Проходя через нормально стратифицированный нижележащий слой воздуха толщиной ~700 м с отрицательными температурами, переохлаждённые жидкие осадки при соприкосновении с поверхностями различных объектов вызывали быстрое нарастание на них ледяной глазури. Диаметр отложений льда варьировал от 12 до 51 мм. По измерениям многоканального микроволнового радиометра GPM Microwave Imager (GMI) и двухчастотного дождевого радиолокатора Dual-frequency Precipitation Radar (DPR) на спутнике GPM получено пространственное распределение зон осадков, оценки их количества и интенсивности. Вертикальный профиль температуры воздуха по данным ERA5 и интенсивности осадков из измерений DPR показал, что осадки формировались в свободной атмосфере в слое до 3 км при положительных температурах воздуха. Применение существующих методов идентификации ледяного дождя к конкретному случаю позволило выделить область с благоприятными условиями для опасного погодного явления общей площадью ~89 000 км^2. В зону благоприятных условий попали более 70 % метеостанций с сообщениями о ледяном дожде и гололёде. Сравнение с имеющимися фактическими измерениями показало репрезентативность полученных модельных данных. Использование спутниковых измерений совместно с данными реанализов высокого разрешения значительно расширяет возможности климатических исследований ледяных дождей.

Ключевые слова: опасные погодные явления, ледяной дождь, спутниковое микроволновое зондирование, Приморье, метеонаблюдения, реанализ ERA5

Одобрена к печати: 21.10.2021
DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-241-252

Введение

В ноябре 2020 г. на юге Приморского края наблюдалось крайне опасное погодное явление, которое в отечественных нормативных документах по гидрометеорологии определяется как «ледяной дождь». Ледяной дождь — это переохлаждённые атмосферные осадки в виде твёрдых прозрачных шариков льда диаметром 1–3 мм, выпадающие при отрицательной температуре воздуха у поверхности земли. Он возникает чаще всего в зонах тёплых атмосферных фронтов при наличии инверсии температуры в нижней тропосфере, если до высот 1–2 км и более формируется атмосферный слой толщиной в несколько сотен метров с положительной температурой, а температура воздуха у поверхности земли остаётся отрицательной. Для ледяного дождя благоприятны условия, когда атмосфера сильно стратифицирована: тёплая (выше точки замерзания) влажная воздушная масса натекает на более холодный, подмёрзший поверхностный слой воздуха (Вильфанд, Голубев, 2011; Simonson, 2020). Выпадающие

твёрдые осадки в тёплом слое воздуха частично или полностью тают, превращаясь в дождь. В нижележащем холодном воздухе, достигающем подстилающей поверхности, капли дождя покрываются ледяной коркой и превращаются в ледяные шарики, содержащие внутри незамёрзшую воду. При падении на поверхности и предметы шарики разбиваются, вытекающая вода при отрицательной температуре замерзает и образует гололёд (Вильфанд, Голубев, 2011; Голубев и др., 2013). По определению Американского метеорологического общества (*англ.* American Meteorological Society), ледяной дождь также характеризуется выпадением переохлаждённых жидких осадков. Это приводит к появлению ледяной глазури — покрытия из гладкого прозрачного льда, которое образуется на открытых объектах (Klima, Morgan, 2015).

Из-за катастрофических последствий ледяной дождь получил название ледяного или серебряного шторма (Klima, Morgan, 2015). В Северной Америке и Канаде, где это опасное погодное явление встречается наиболее часто, убытки от ледяных штормов оцениваются в миллиарды долларов (Bragg et al., 2003; DeGaetano, 2000; Kämäräinen et al., 2017). Они парализуют транспортную, водопроводную и энергетическую инфраструктуру городов и населённых пунктов. Из-за большого веса льда на проводах особенно страдают электросети. Обрыв проводов и падение опор линий электропередач (ЛЭП) приводит к крупномасштабным отключениям электроэнергии. Большой урон наносится также лесам и паркам. В России ледяной дождь с сопутствующими ему гололёдными явлениями обычно наблюдается в южных и центральных областях её европейской территории (Вильфанд, Голубев, 2011; Голубев и др., 2013). На Дальнем Востоке (ДВ) за всю историю метеонаблюдений ледяной дождь не регистрировался. Событие 18–19 ноября 2020 г. можно считать уникальным для Приморского края и ДВ в целом. Ледяной дождь в Приморье наблюдался менее суток и охватил в основном юго-западную часть края. Несмотря на это, по оценкам краевой администрации, нанесённый им ущерб превысил 1 млрд рублей (Тонких, 2020). Из-за обрыва проводов и падения опор линий электропередач на труднодоступных участках было нарушено электроснабжение, аварии на электросетях в Приморье оставили без света около 100 тыс. человек. Некоторые районы Владивостока были обесточены более недели. Были повреждены вантовые опоры моста на о. Русский, из-за чего нарушилось сообщение с островом. Пострадало практически 80 % зелёных насаждений (Суходоева, 2021). Катастрофические последствия ледяного дождя дают основание классифицировать его как ледяной шторм.

Исследование направлено на анализ условий формирования и характеристик ледяного шторма над южной частью Приморского края 18–19 ноября 2020 г. — уникального явления для Дальнего Востока. В работе решалась задача идентификации областей с благоприятными условиями формирования ледяного дождя, пространственного распределения зон осадков, оценки их количества и интенсивности с использованием измерений многоканального микроволнового радиометра GMI (*англ.* GPM Microwave Imager) и радиолокатора DPR (Dual-frequency Precipitation Radar) на спутнике GPM (*англ.* Global Precipitation Measurement), а также современных реанализов Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (*англ.* European Centre for Medium-Range Weather Forecasts — ECMWF) высокого разрешения ERA5 и ERA5-Land.

Данные и методы

Исследование базировалось на синергетическом подходе с использованием мультисенсорных спутниковых измерений, стандартных метеонаблюдений, данных аэрологического зондирования и реанализа. Для анализа развития синоптического процесса и структуры термобарического поля тропосферы использовались карты приземного анализа и барической топографии (геопотенциальных высот изобарических поверхностей 850, 700 и 500 гПа) Японского метеорологического агентства (ЯМА, *англ.* Japan Meteorological Agency), стандартные измерения метеоэлементов на одиннадцати метеостанциях Приморского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (УГМС), в частности на метеостанции «Владивосток город» (идентификатор 31960). Данные радиозондирования атмосферы

на аэрологической станции Приморского УГМС «Владивосток Сад-Город» (идентификатор 31977) были получены с сайта Вайомингского университета (*англ*. University of Wyoming, http://weather.uwyo.edu/upperair/). Стандартные измерения дополнялись данными о диаметре ледяной глазури, измеренном в различных микрорайонах и пригородах Владивостока и Артёма. Совместно с данными контактных измерений использовались спутниковые изображения облачности в оптическом и инфракрасном (ИК) спектральных диапазонах.

Спутниковые измерения

Идентификация, анализ эволюции и отслеживание траекторий барических образований осуществлялись по данным спектрорадиометров MODIS (*англ*. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) в оптическом (с пространственным разрешением 250 м) и инфракрасном (с пространственным разрешением 1 км) диапазонах длин волн на спутниках Aqua и Terra, радиометра VIIRS (*англ*. Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) в ИК-диапазоне с пространственным разрешением 375 м на спутнике Suomi NPP (*англ*. National Polar-orbiting Partnership) и многоспектрального радиометра AHI (*англ*. Advanced Himawari Images) в ИК-диапазоне с пространственным разрешением 2 км и временным шагом 1 ч на геостационарном спутнике Himawari-8. Для оценки направления и скорости приводного ветра использовались измерения скаттерометров ASCAT (*англ*. Advanced Scatterometer) на спутниках MetOp-A/B (*англ*. Meteorological Operational satellite programme) и скаттерометра Ku-диапазона на спутнике SCATSAT-1 (*англ*. Scatterometer Satellite) с пространственным разрешением 12,5 км, полезная нагрузка которого идентична полезной нагрузке скаттерометра OSCAT (*англ*. Oceansat Scatterometer) на спутнике Oceansat-2 (https://www.mosdac.gov.in/scatsat-1).

Количественные оценки интенсивности осадков были получены из измерений двухчастотного дождевого радиолокатора DPR, работающего в Ku- и Ka-диапазонах (13,5 и 35,5 ГГц соответственно). Радиолокатор действует на борту GPM (*англ*. Global Precipitation Measurement) — спутника с высотой орбиты 400 км, позволяющего проводить измерения в средних и частично в высоких широтах (65° ю. ш. – 65° с. ш.) (Hou et al., 2014). В настоящей работе используются данные DPR уровня Level-2A (ftp.gportal.jaxa.jp), включающие вертикальные профили интенсивности осадков (P_r, мм/ч) с шагом 250 м по вертикали и горизонтальным разрешением 5 км; максимальная ширина полосы обзора — 245 км. Также в анализе характеристик ледяного дождя дополнительно использовались поля яркостной температуры ($T_я$) на частотах 166, 183,31±3 и 183,31±7 ГГц с разрешением 6 км, измеренной многоканальным микроволновым радиометром GMI. Последние два частотных канала находятся в окрестности резонансной линии водяного пара и чувствительны к осадкам в различных слоях тропосферы, в том числе к ледяному дождю (Adhikari, Liu, 2019).

Реанализ ERA5 и идентификация ледяного дождя

Определение зон ледяного дождя в Приморье выполнено на основе ежечасных полей общего количества жидких и твёрдых осадков (P_r, мм/ч), падающих на поверхность земли, и температуры воздуха у поверхности (T_{2M}, °C) и в слое нижней тропосферы (T_i, °C) на стандартных изобарических поверхностях (i = 1000–500 гПа). Указанные параметры взяты из двух реанализов Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды: 1) ERA5 с пространственным разрешением ~31 км, разработанного на основе интегрированной системы прогнозирования Cy41r2 и улучшенной ассимиляции данных наблюдений (Hersbach et al., 2020); 2) ERA5-Land — повторного воспроизведения компонента ERA5 над сушей с исходным разрешением модели 9 км (Muñoz-Sabater, 2021). Из-за различий в разрешении ERA5 и ERA5-Land поля P_r, T_{2M} и T_i приведены в узлы регулярной сетки 0,1×0,1° методом билинейной интерполяции.

После интерполяции полей T_i из ERA5 в каждом узле определяется максимальная температура воздуха в слое атмосферы до 500 гПа (T_{MAX}). Любая зона осадков на суше с отрицательной приземной температурой ($T_{2M} < 0$ °C) и тёплым слоем воздуха ($T_{\mathrm{MAX}} > 4$ °C) определяется как область с ледяным дождём (Robbins, Cortinas, 2002).

Синоптическая ситуация, условия формирования и количественные характеристики ледяного шторма в Приморье

Перед выходом на Приморский край циклона, который сопровождался опасными гололёдными явлениями, погоду Владивостока и южного побережья края определял стационарный атмосферный фронт. Фронт сформировался в результате резких температурных контрастов между холодной воздушной массой отрога сибирского антициклона с отдельными ядрами над Забайкальем и Хабаровским краем и не по сезону тёплой и влажной воздушной массой над континентальным Китаем и Монголией и характеризовался слабой волновой деятельностью. С 06:00 GMT (*англ*. Greenwich Mean Time) 17 ноября по 00:00 GMT 18 ноября 2020 г. он медленно перемещался с запада на восток в зональных атмосферных потоках и начал оказывать влияние на погодные условия Приморья 17 ноября. Фронтальная зона сформировалась на северной периферии приземной депрессии над Китаем и южной периферии ядра сибирского антициклона (*рис. 1б*, см. с. 245). Меридиональная направленность градиента температуры воздуха и зональные потоки в тропосфере способствовали его широтной локализации. Одновременно над Китаем сформировалась вторая фронтальная система, параллельная первой. Аналогичная синоптическая ситуация предшествовала ледяному шторму в Новой Англии (северо-восток США) в декабре 2013 г. Сильная конвергенция воздушных потоков и термическая асимметрия в нижних слоях атмосферы привели к формированию условий для интенсивного дождя перед фронтом и снегопада с ледяным дождём за ним (Simpson, 2020). Ледяному дождю на европейской территории России в декабре 2010 г. также предшествовали две ориентированные в широтном направлении параллельные системы холодных атмосферных фронтов с волнами над Северной Атлантикой (Голубев и др., 2013).

Циклон, вызвавший ледяной шторм над югом Приморья 18–19 ноября 2020 г., возник при типичной для южных процессов синоптической ситуации (Руководство..., 1988). Малоподвижный высотный гребень над Беринговым морем 13–15 ноября блокировал выход западного (континентального) циклона на Берингово море и создавал условия для выхода его на Охотское море. Это усилило холодное вторжение в тылу циклона и обострило планетарную высотную фронтальную зону умеренных широт над ДВ. Ось дальневосточной высотной ложбины 17 ноября проходила через центральную часть Охотского моря, а над континентальной частью ДВ термобарическое поле тропосферы характеризовалось зональным переносом с короткими волновыми возмущениями. На север Вьетнама 15 ноября вышел тайфун «Вамко» (*англ*. Vamco), который вынес тёплую и очень влажную воздушную массу на территорию Китая. Над континентальным Китаем 16–17 ноября сформировалась новая высотная ложбина с осью вдоль 106–108° в. д., которая перемещалась на восток со скоростью 20–25 км/ч и углублялась (*рис. 1е*). По мере приближения ложбины к Жёлтому морю в ней росла термическая асимметрия, что способствовало усилению меридиональности в тропосфере. Выход образовавшегося над Китаем циклона на Японское море идентифицируется как южный синоптический процесс.

К 18:00 GMT 17 ноября южный циклон (ЮЦ) трансформировался в двухцентровую депрессию (см. *рис. 1б*), при этом южный центр заполнялся, а северный начал углубляться. На ИК-изображении VIIRS в 17:20 GMT видна его облачная шапка, характерная для ЮЦ в начальной стадии развития (*рис. 1а*). По мере перемещения его на северо-восток два параллельных стационарных фронта объединились, сформировалась фронтальная система циклона с тёплым и холодным участками (*рис. 1в*). При этом структура термобарического поля нижней тропосферы характеризовалась ярко выраженной термической асимметрией и большими горизонтальными градиентами температуры воздуха в центральной части ЮЦ (~4 °C/100 км), что проявлялось в интенсивной адвекции тепла в его передней части и холода в тылу (*рис. 1д*).

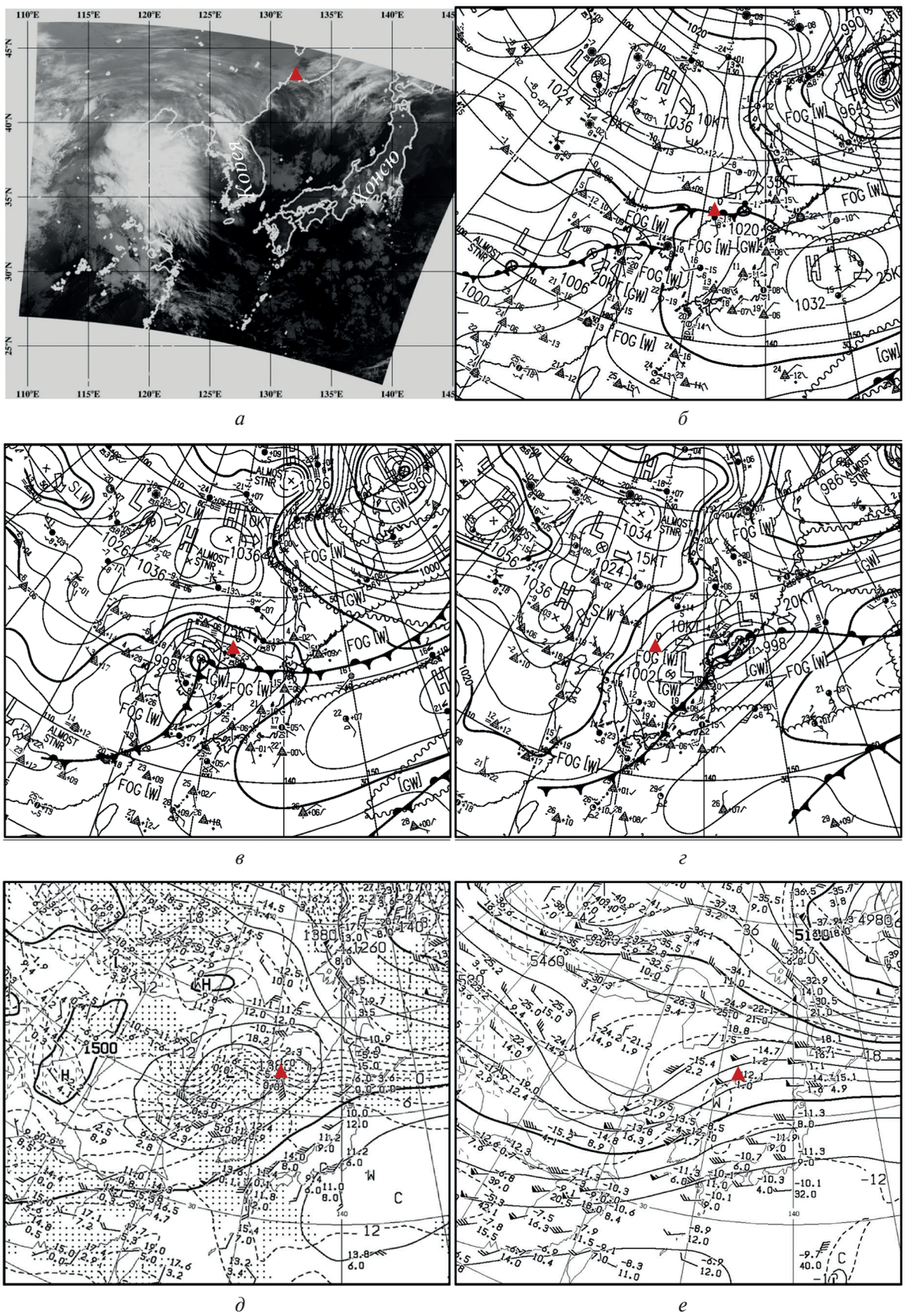
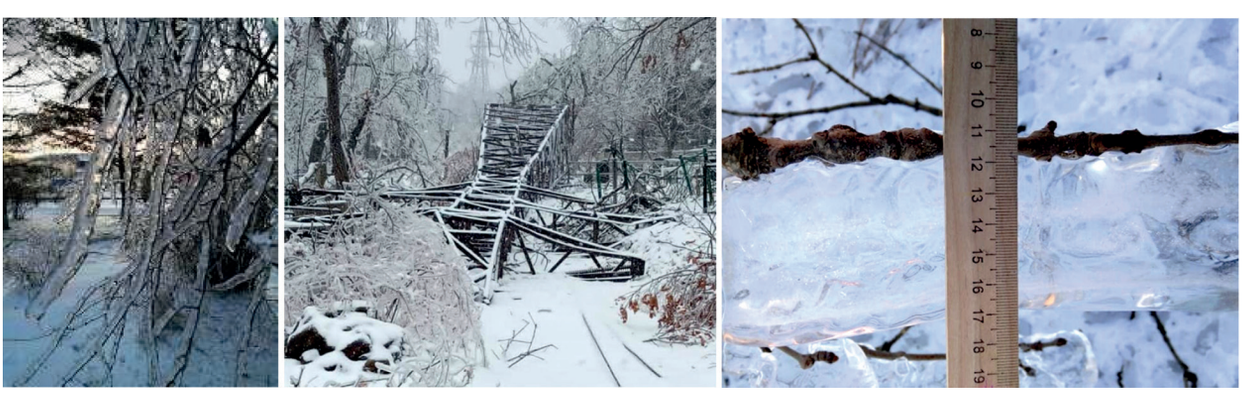


Рис. 1. ИК-изображение VIIRS (спутник Suomi NPP) в 17:20 GMT 17 ноября (*а*); карты приземного анализа ЯМА в 18:00 GMT 17 ноября (*б*), в 00:00 GMT 19 ноября (*в*) и в 00:00 GMT 20 ноября (*г*); карты барической топографии AT850 (*д*) и AT500 (*е*) ЯМА в 00:00 GMT 19 ноября 2020 г. Владивосток обозначен красным треугольником

Циклоническая циркуляция не распространялась выше изобарической поверхности 700 гПа, поэтому ЮЦ представляется низким барическим образованием. В течение суток 19 ноября он пересёк Японское море под передней частью высотной ложбины (см. *рис. 1е*), в 00:00 GMT 20 ноября вышел на Южные Курилы и далее перемещался на северо-восток без развития (*рис. 1г*).

Японское море циклон пересекал с 06:00 GMT 19 ноября по 00:00 GMT 20 ноября. Между 06:00 и 12:00 GMT его центр находился на расстоянии примерно 200–250 км от Владивостока. По данным скаттерометра на индийском спутнике SCATSAT, по мере перемещения ЮЦ над Японским морем усиливался ветер различных румбов до 20–25 м/с. Холодное вторжение в тылу ЮЦ длилось 5 сут (с 19 по 24 ноября), что повлияло на продолжительность гололёдных явлений и усугубило их последствия. Ещё одним характерным следствием холодного вторжения было образование в тылу ЮЦ двух полярных мезоциклонов со скоростью ветра ⩾15 м/с, которые существовали над Японским морем не более суток.

Дождь во Владивостоке начался в 15:00 GMT 17 ноября из облачности стационарного фронта, который обострялся по мере приближения ЮЦ за счёт выноса тёплой влажной воздушной массы юго-западным потоком в передней части высотной ложбины. По данным аэрологического зондирования, к 00:00 GMT 18 ноября в тропосфере сформировался слой положительных температур толщиной 958 м, в котором ~300 м занимала инверсия. К 00:00 GMT 19 ноября толщина инверсионного слоя увеличилась до 960 м, а слой положительных температур распространился почти до 3000 м и составлял более 2 км. В слое от поверхности земли примерно до 600 м температура воздуха была отрицательной. Относительная влажность воздуха 100 % 18–19 ноября регистрировалась до высоты примерно 4–5 км. Выполнялись условия для формирования жидких осадков в средней тропосфере. Осадки в виде дождя, достигая значительно меньшего по толщине нижнего слоя тропосферы с отрицательными температурами, не успевали замёрзнуть и выпадали в фазе переохлаждённых капель. Соприкасаясь с поверхностями объектов при отрицательной температуре, капли замерзали, образуя ледяную глазурь, что привело к катастрофическим последствиям для городской инфраструктуры, энергетики и зелёных насаждений, особенно деревьев (*рис. 2*).



а *б* *в*

Рис. 2. Гололёд на ветках деревьев около Тихоокеанского океанологического института им. В. И. Ильичева ДВО РАН (*а*); поваленная опора ЛЭП на Морском кладбище Владивостока (*б*); пример измерения диаметра гололёдных отложений добровольцами (*в*)

До 15:00 GMT 18 ноября во Владивостоке продолжался дождь, который затем перешёл в дождь со снегом, а в 18:00 GMT 19 ноября — в снег. Осадки регистрировались до 12:00 GMT 20 ноября. Метеостанция «Владивосток город» фиксировала гололёдные явления на проводах и поверхностях с 09:00 GMT 18 ноября с диаметром отложения 1 мм. Нарастание льда на гололёдном станке продолжалось до 18:00 GMT 19 ноября с максимальным диаметром отложений 28 мм. До 09:00 GMT 23 ноября диаметр отложений постепенно уменьшился до 15 мм. По данным, полученным в различных микрорайонах Владивостока и Артёма,

диаметр отложений льда варьировал от 12 мм в одном из районов Артёма до 51 мм в районе Перинатального центра Владивостока, средний диаметр по данным 11 метеостанций составил 27 мм. Значительные вариации диаметра отложений связаны с локальными неоднородностями интенсивности и пространственного распределения осадков. Для сравнения, во время пяти ледяных штормов в США толщина отложений льда на проводах варьировала в пределах 6–54 мм (Changnon, 2003).

Измерения со спутника GPM

Поля яркостной температуры по измерениям микроволнового радиометра GMI в 12:10 GMT 18 ноября (частоты $\nu = 166$, 183,31±3 и 183,31±7 ГГц) на вертикальной поляризации дают общую картину распределения зон твёрдых и жидких осадков из-за рассеяния микроволнового излучения на гидрометеорах (Yin, Liu, 2019).

Положение и конфигурация областей с пониженными относительно фоновых значений яркостной температуры $T_я(\nu = 183{,}31\pm3$ ГГц) = 240–247 К (*рис. 3а*), чувствительной к осадкам во всей толще тропосферы, и $T_я(\nu = 183{,}31\pm7$ ГГц) = 230–248 К (*рис. 3б*), чувствительной к осадкам в её нижних слоях, показывают, что осадки в основном формировались в нижних слоях тропосферы. Интенсивность осадков по данным радиолокатора DPR составляла от 1 до 2 мм/ч в отдельных очагах над сушей и до 4 мм/ч над морем (*рис. 3в*). Над сушей интенсивные осадки регистрировались в зонах с низкими значениями $T_я(\nu = 183{,}31\pm7$ ГГц) (см. *рис. 3б*).

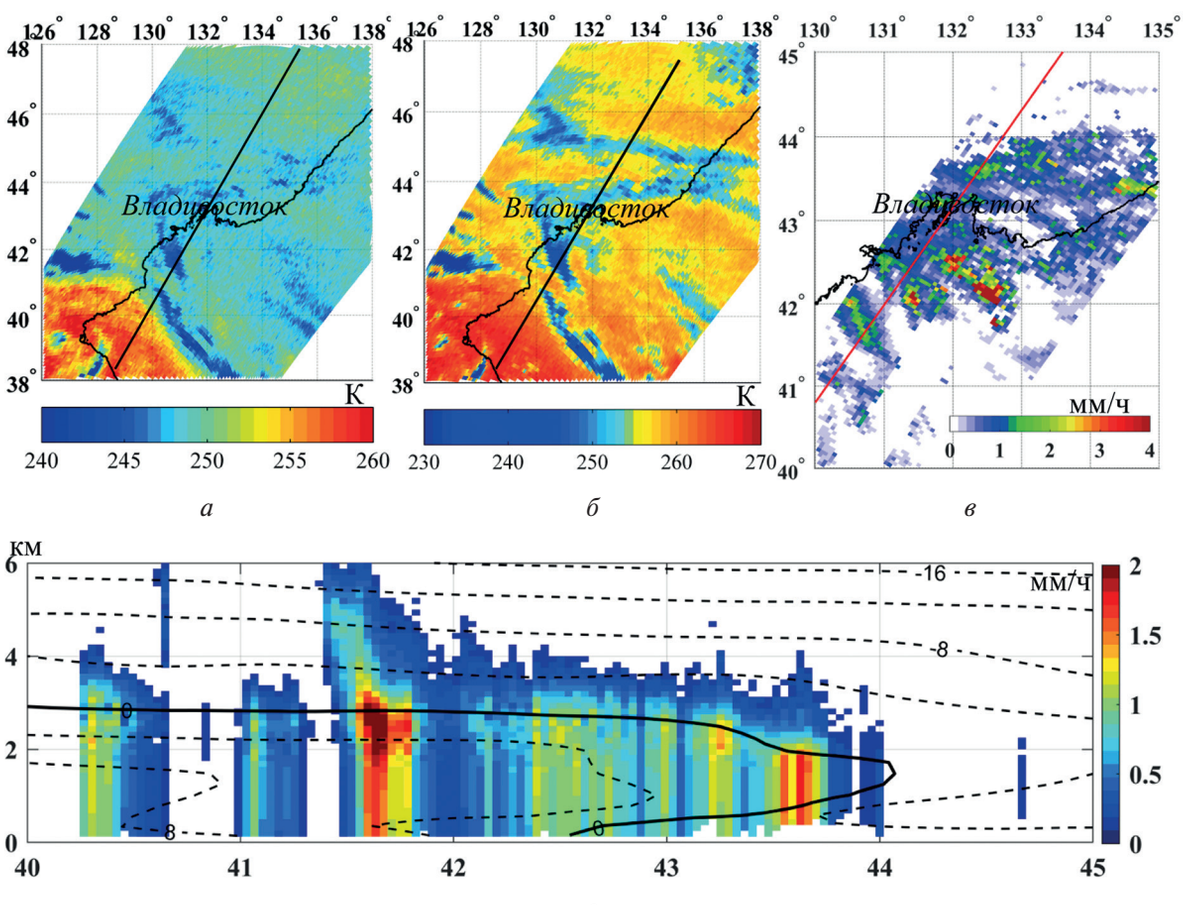


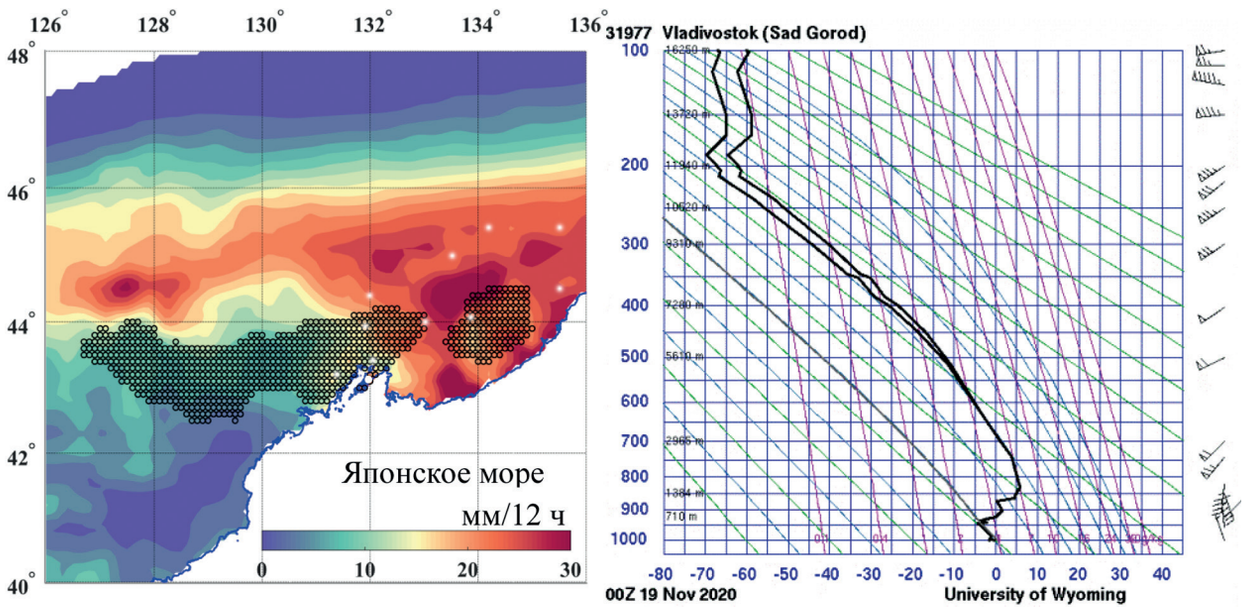
Рис. 3. Поля яркостной температуры на частотах $\nu = 183{,}31\pm3$ ГГц (*а*), $\nu = 183{,}31\pm7$ ГГц (*б*) по данным микроволнового радиометра GMI; интенсивность осадков по измерениям радиолокатора DPR со спутника GPM в 12:10 GMT (*в*); вертикальный профиль температуры воздуха и интенсивности осадков по данным реанализа ERA5 в 12:00 GMT 18 ноября 2020 г. (*г*). Вертикальное сечение показано чёрными линиями на (*а*, *б*) и красной линией на (*в*)

Конфигурация изотерм на вертикальном профиле температуры воздуха и интенсивности осадков, который проходит через Владивосток (*рис. 3г*), наглядно демонстрирует, что осадки формировались в свободной атмосфере в слое до 3 км при положительных температурах воздуха. Такие условия указывают на «процесс переохлаждённого тёплого дождя» (*англ.* supercolled warm rain process), при котором осадки начинаются в виде дождя, а не ледяных гидрометеоров (Huffman, Norman, 1988). На рисунке также хорошо виден процесс натекания тёплого воздуха на клин холодного. Максимальная интенсивность осадков на вертикальном разрезе (1,5–2 мм/ч и более) регистрировалась в области пониженных $T_я$ (см. *рис. 3б*). Один пик находился над морем между 41 и 42 параллелями, второй — над Владивостоком и к северу от него, где наблюдались максимальные по диаметру отложений и наиболее продолжительные по времени гололёдные явления. Так, во Владивостоке и Артёме (на 38 км севернее Владивостока) интенсивность осадков в 12:00 GMT 18 ноября составляла ~1,2–1,3 мм/ч (см. *рис. 3г*). В этот же срок метеостанция «Владивосток город» регистрировала слабый ливневый дождь с нарастанием диаметра гололёдных отложений от 1 мм в 09:00 GMT до 5 мм в 15:00 GMT. На метеостанции «Владивосток Кневичи» (идентификатор 31962) в 12:00 GMT регистрировался слабый замерзающий переохлаждённый дождь.

Идентификация ледяного дождя по данным ERA5 и ERA5-Land

Распределение накопленных за 12 ч (период 21:00 GMT 18 ноября – 09:00 GMT 19 ноября) сумм осадков по данным реанализа ERA5-Land (*рис. 4а*) показывает, что зоны осадков >30 мм/12 ч регистрировались на юго-западе Приморья и местами вдоль юго-восточного побережья. По модельным данным, сумма осадков во Владивостоке составляла 22–23 мм/12 ч, что близко к фактическим измерениям на метеостанции «Владивосток» — 26 мм/12 ч за этот же период. Чёрными кружочками обозначены узлы сетки, в которых условия, благоприятные для формирования ледяного дождя, выполнялись в течение 6 ч (см. *рис. 4а*, см. с. 249). За критерий таких условий было принято сочетание температур воздуха $T_{2M} < 0$ °C и $T_{MAX} \geqslant 4$ °C в свободной атмосфере (см. п. «Реанализ ERA5 и идентификация ледяного дождя»). Обширная область, где условия выполняются, вытянута широтно и захватывает юго-запад Приморья и районы Китая. Вторая область частично охватывает юго-восточную часть Приморья. Общая площадь обеих областей составляет примерно 89 000 км^2. Белыми точками на *рис. 4а* нанесены метеостанции в Приморье, которые регистрировали ледяной дождь и гололёд. Из одиннадцати метеостанций пять выходят за границы зоны благоприятных для ледяного дождя условий. Частично это обусловлено критерием $T_{MAX} \geqslant 4$ °C. Он был принят авторами работы (Robbins, Cortinas, 2002) с учётом механизма, когда ледяной дождь в виде обмёрзших капель формируется в холодном воздухе, а в слое воздуха с положительными температурами ледяная корка тает. В нашем случае возможно понижение критерия T_{MAX}, так как жидкие осадки формировались в тёплом воздухе и, проходя через слой воздуха с отрицательными температурами, выпадали в виде переохлаждённых капель. При понижении T_{MAX} до 3 °C в зону благоприятных условий попадают более 70 % метеостанций, сообщавших о ледяном дожде и гололёде. Три самых северных метеостанции расположены в горном районе. Не исключено, что разрешения реанализа ERA5 недостаточно для адекватного воспроизведения местных термодинамических процессов. Предложенная методика применима для данного случая ледяного дождя в южной части Приморья, но её использование в климатологических исследованиях требует учёта возможных ограничений для отдельных географических районов.

Репрезентативность модельных данных подтверждает аэрологическая диаграмма, построенная по данным радиозондирования атмосферы в 00:00 GMT 19 ноября на аэрологической станции «Владивосток Сад-Город» (*рис. 4б*). Слой воздуха с температурами выше точки замерзания толщиной более 2 км почти в три раза превышает тонкий приземный слой толщиной немногим более 700 м с отрицательными температурами. Практически на протяжении всего зондирования воздух близок к насыщению. В слое толщиной более 3 км воздух насыщен (относительная влажность составляет 100 %), т. е. выполняются условия, благоприятные для образования ледяного дождя и гололёда.



а *б*

Рис. 4. Сумма осадков за 12 ч (21:00 GMT 18 ноября – 09:00 GMT 19 ноября) по реанализу ERA5-Land (*а*); чёрными кружочками обозначены области, где выполняются условия формирования ледяного дождя, белыми точками нанесены метеостанции, где регистрировался ледяной дождь и гололёдные явления. Аэрологическая диаграмма по данным радиозондирования атмосферы на аэрологической станции «Владивосток Сад-Город» в 00:00 GMT 19 ноября 2020 г. (*б*)

Заключение

Ледяной шторм 18–19 ноября 2020 г. на юге Приморского края, как и на Дальнем Востоке в целом, был зарегистрирован впервые за всё время метеонаблюдений. Ледяной дождь сформировался при типичной для этого явления синоптической ситуации. Ему предшествовала система ориентированных в широтном направлении стационарных атмосферных фронтов, один из которых захватывал южное побережье Приморья. Структура термобарического поля тропосферы способствовала выходу южного циклона и интенсивному выносу на Приморье устойчиво стратифицированной субтропической воздушной массы. Благоприятным условием для выпадения ледяного дождя стала адвективная инверсия температуры в результате натекания тёплого влажного воздуха на клин холодного, что привело к образованию мощного (>2 км) слоя с положительными температурами (>5 °C) в свободной атмосфере и нормально стратифицированного приземного слоя с отрицательной температурой.

Жидкие осадки при соприкосновении с поверхностями различных объектов вызывали быстрое нарастание ледяной глазури (гололёд). Диаметр отложений льда варьировал от 12 до 51 мм, средний диаметр из 11 измерений составил 27 мм. Несмотря на небольшую площадь распространения, с ледяным штормом были связаны катастрофические события во Владивостоке, Артёме и ряде других населённых пунктов на юге Приморья (аварии на электросетях, повреждение опор мостов, деревьев и т. д.). Некоторые последствия ледяного шторма устранялись в течение шести месяцев.

В результате совместного использования измерений радиолокатора DPR, микроволнового радиометра GMI и реанализа высокого разрешения ERA5 было определено пространственное распределение зон осадков, получены оценки их количества и интенсивности. Положение и конфигурация областей с пониженными относительно фоновых значений $T_я(\nu = 183{,}31 \pm 7$ ГГц) = 230–248 K по данным GMI, чувствительной к осадкам в нижних слоях атмосферы, и вертикальный профиль температуры и интенсивности осадков по данным ERA5 показали, что осадки в основном формировались в слое тропосферы до 3 км при

положительных температурах воздуха. При таких условиях осадки начинаются в виде дождя, а не ледяных гидрометеоров, из-за положительных температур в области их формирования.

В зоны с благоприятными для ледяного дождя условиями, выделенные при использовании в качестве критерия сочетания температур воздуха на высоте 2 м $T_{2M} < 0$ °C и в свободной атмосфере $T_{\mathrm{MAX}} \geqslant 4$ °C, попадает 54 % метеостанций с сообщениями о ледяном дожде и гололёде в Приморье. При понижении критерия T_{MAX} до 3 °C с учётом того, что жидкие осадки формировались в тёплом воздухе и, проходя через приземный слой воздуха с отрицательными температурами, выпадали в виде переохлаждённых капель, в зону благоприятных условий попадают более 70 % метеостанций с данными о ледяном дожде.

Комплексное использование спутниковых измерений и современных реанализов высокого разрешения значительно расширит возможности климатических исследований этого опасного погодного явления.

Работа выполнена в рамках госбюджетной темы, регистрационный номер 121021500054-3. Авторы выражают благодарность жителям Артёма и Владивостока, принявшим участие в сборе и передаче данных о толщине отложений льда.

Литература

1. *Вильфанд Р. М.*, *Голубев А. Д.* Метеорологические условия выпадения ледяных дождей 25–26 декабря 2010 г. над центром Европейской части России // Лёд и снег. 2011. Т. 115. № 3. С. 119–124.
2. *Голубев А. Д.*, *Кабак А. М.*, *Никольская Н. А.*, *Бутова Г. И.*, *Хабарова Г. В.* Ледяной дождь в Москве, Московской области и прилегающих областях центра европейской территории России 25–26 декабря 2010 года // Тр. Гидрометеорол. научно-исследоват. центра Российской Федерации. 2013. № 349. С. 214–230.
3. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. Ч. II. Вып. 5: Дальний Восток. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 176 с.
4. *Суходоева О.* Дорожная служба Владивостока продолжает вывозить складированные после ледяного дождя ветки // vic.ru. 9 февр. 2021. URL: https://www.vlc.ru/event/news/54987.
5. *Тонких Д.* Председатель Правительства Приморья: Ущерб от циклона оценивается в более чем 1 миллиард рублей // primorsky.ru. 2020. URL: https://primorsky.ru/news/230831/.
6. *Adhikari A.*, *Liu C.* Remote sensing properties of freezing rain events from space // J. Geophysical Research: Atmospheres. 2019. V. 124. P. 10385–10400. https://doi.org/10.1029/2019JD030788.
7. *Bragg D. C.*, *Shelton M. G.*, *Zeide B.* Impacts and management implications of ice storms on forests in the southern United States // Forest Ecology and Management. 2003. V. 186. P. 99–123. DOI: 10.1016/S0378-1127(03)00230-5.
8. *Changnon S. A.* Characteristics of Ice Storms in the United States // J. Meteorology. 2003. V. 42. P. 630–639. DOI: 10.1175/1520-0450(2003)042<0630:COISIT>2.0.CO;2.
9. *DeGaetano A. T.* Climatic perspective and impacts of the 1998 Northern New York and New England ice storm // Bull. American Meteorological Society. 2000. V. 81. No. 2. P. 237–253. DOI: 10.1175/1520-0450(2003)042<0630:COISIT>2.0.CO;2.
10. *Hersbach H.*, *Bell B.*, *Berrisford P.*, *Hirahara S.*, *Horányi A.*, *Muñoz-Sabater J.*, *Nicolas J.*, *Peubey C.*, *Radu R.*, *Schepers D.*, *Simmons A.*, *Soci C.*, *Abdalla S.*, *Abellan X.*, *Balsamo G.*, *Bechtold P.*, *Biavati G.*, *Bidlot J.*, *Bonavita M.*, *De Chiara G.*, *Dahlgren P.*, *Dee D.*, *Diamantakis M.*, *Dragani R.*, *Flemming J.*, *Forbes R.*, *Fuentes M.*, *Geer A.*, *Haimberger L.*, *Healy S.*, *Hogan R. J.*, *Hólm E.*, *Janisková M.*, *Keeley S.*, *Laloyaux P.*, *Lopez Ph.*, *Lupu C.*, *Radnoti G.*, *de Rosnay P.*, *Rozum I.*, *Vamborg F.*, *Villaume S.*, *Thépaut J.-N.* The ERA5 global reanalysis // Quarterly J. Royal Meteorological Society. 2020. V. 146. P. 1999–2049. https://doi.org/10.1002/qj.3803.
11. *Hou A. Y.*, *Kakar R. K. Neeck S.*, *Azarbarzin A. A.*, *Kummerow C. D.*, *Kojima M.*, *Oki R.*, *Nakamura K.*, *Iguchi T.* The Global Precipitation Measurement mission // Bull. American Meteorological Society. 2014. V. 95. P. 701–722. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00164.1.
12. *Huffman G. J.*, *Norman G. A.* The Supercooled Warm Rain Process and the Specification of Freezing Precipitation // Monthly Weather Review. 1988. V. 116. No. 11. P. 2172–2182. https://doi.org/10.1175/1520-0493(1988)116<2172:TSWRPA>2.0.CO;2.
13. *Kämäräinen M.*, *Hyvärinen O.*, *Jylhä K.*, *Vajda A.*, *Neiglick S.*, *Nuottokari J.*, *Gregow H.* A method to estimate freezing rain climatology from ERA-Interim reanalysis over Europe // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2017. V. 17. P. 243–259. DOI: 10.5194/nhess-17-243-2017.

14. *Klima K.*, *Morgan M. G.* Ice storm frequencies in a warmer climate // Climatic Change. 2015. V. 133. No. 2. P. 209–222. DOI: 10.1007/s10584-015-1460-9.
15. *Muñoz-Sabater J.* ERA5-Land hourly data from 1981 to present // Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). 11 June 2021. URL: https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-ERA5-land-monthly-means?tab=overview. https://doi.org/10.24381/cds.e2161bac.
16. *Robbins C. C.*, *Cortinas J. V. Jr.* Local and Synoptic Environments Associated with Freezing Rain in the Contiguous United States // Weather and Forecasting. 2002. V. 17. P. 47–65. https://doi.org/10.1175/1520-0434(2002)017<0047:LASEAW>2.0.CO;2.
17. *Simonson J.* Extratropical cyclones and associated climate impacts in the Northeastern United States: Doctoral Thesis. 2020. 102 pp.
18. *Yin M.*, *Liu G.* Assessment of GPM high-frequency microwave measurements with radiative transfer simulation under snowfall conditions // Quarterly J. Royal Meteorological Society. 2019. V. 145. P. 1603–1616. DOI: 10.1002/qj.3515.

Ice storm in Primorye on November 18–19, 2020

I. A. Gurvich, M. K. Pichugin, A. V. Baranyuk, E. S. Khazanova

V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, *Vladivostok 690041*, *Russia*
E-mails: gurvich@poi.dvo.ru, *pichugin@poi.dvo.ru*

This work considers the conditions for the freezing rain formation on the south of Primorsky Krai on November 18–19, 2020, which, due to the catastrophic consequences, is classified as an "ice storm". This severe weather event was registered in the Primorsky Kray for the first time in the history of meteorological observations. The study was carried out using measurements from the Global Precipitation Measurement (GPM) satellite, ERA5 and ERA5-Land reanalysis data sets, standard meteorological measurements and atmospheric upper-air sounding data. An ice storm occurred during a synoptic situation similar to a like phenomenon in regions where it is observed regularly. It was preceded by two parallel frontal systems oriented zonally. The southern cyclone contributed to the intensive transport of a stably stratified subtropical air mass to Primorye. The liquid precipitation were formed in the layer >2 km thick which occurred in the free atmosphere as a result of the advective inversion, with positive temperatures (up to 5.8 °C) and high values of relative humidity, mainly 100 %. Passing through a normally stratified underlying layer with a thickness of ~700 m and negative temperatures, supercooled liquid precipitation in contact with the surfaces of various objects caused a rapid growth of ice glaze on them. The diameter of the ice glaze varied from 12 to 51 mm. Based on measurements of the GPM Microwave Imager (GMI) multichannel microwave radiometer and the Dual-frequency Precipitation Radar (DPR) on the GPM satellite, the spatial distribution of precipitation zones, estimates of their amount and intensity were obtained. The vertical profile of air temperature according to ERA5 data and precipitation intensity from DPR measurements showed that precipitation was formed in a free atmosphere in a layer up to 3 km at positive air temperatures. The application of existing methods for identifying freezing rain to a specific case made it possible to identify an area with favorable conditions for a hazardous weather phenomenon with a total area of ~89 000 km^2. More than 70 % of meteorological stations with reports of freezing rain and sleet fell into the zone of favorable conditions. Comparison with the available in situ measurements showed the representativeness of the obtained model data. The combined use of satellite measurements and high-resolution reanalysis data significantly expands the possibilities of climatic studies of freezing rains.

Keywords: hazardous weather phenomena, freezing rain, satellite microwave sounding, Primorye, meteorological observations, ERA5 reanalysis

Accepted: 21.10.2021
DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-241-252

References

1. Vilfand R. M., Golubev A. D., Meteorological conditions of freezing rain on December 25–26, 2010 over the center of the Russian European part, *Led i sneg*, 2011, Vol. 115, No. 3, pp. 119–124 (in Russian).
2. Golubev A. D., Kabak A. M., Nikolskaya N. A., Butova G. I., Khabarova G. V., Freezing rain in Moscow, the Moscow region and adjacent areas of the center of the Russia European territory December 25–26, 2010, *Trudy Gidrometeorologicheskogo nauchno-issledovatel'skogo tsentra Rossiiskoi Federatsii*, 2013, No. 349, pp. 214–230 (in Russian).
3. *Rukovodstvo po kratkosrochnym prognozam pogody*, Ch. II, Vyp. 5, Dal'nii Vostok (Guide to short-term weather forecasts, Pt. II, Iss. 5, Far East), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1988, 176 p. (in Russian).
4. Sukhodoeva O., Dorozhnaya sluzhba Vladivostoka prodolzhaet vyvozit' skladirovannye posle ledyanogo dozhdya vetki (The road service of Vladivostok continues to remove the branches stored after the freezing rain), *vic.ru*, 9 Febr. 2021 (in Russian), available at: https://www.vlc.ru/event/news/54987.
5. Tonkikh D., Predsedatel' Pravitel'stva Primor'ya: Ushcherb ot tsiklona otsenivaetsya v bolee chem 1 milliard rublei (Chairman of the Government of Primorye: The damage from the cyclone is estimated at more than 1 billion rubles), *primorsky.ru*, 2020 (in Russian), available at: https://primorsky.ru/news/230831/.
6. Adhikari A., Liu C., Remote sensing properties of freezing rain events from space, *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, Vol. 124, pp. 10385–10400, https://doi.org/10.1029/2019JD030788.
7. Bragg D. C., Shelton M. G., Zeide B., Impacts and management implications of ice storms on forests in the southern United States, *Forest Ecology and Management*, 2003, Vol. 186, pp. 99–123, DOI: 10.1016/S0378-1127(03)00230-5.
8. Changnon S. A., Characteristics of Ice Storms in the United States, *J. Applied Meteorology*, 2003, Vol. 42, pp. 630–639, DOI: 10.1175/1520-0450(2003)042<0630:COISIT>2.0.CO;2.
9. DeGaetano A. T., Climatic perspective and impacts of the 1998 Northern New York and New England ice storm, *Bull. American Meteorological Society*, 2000, Vol. 81, No. 2, pp. 237–253, DOI: 10.1175/1520-0450(2003)042<0630:COISIT>2.0.CO;2.
10. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soci C., Abdalla S., Abellan X., Balsamo G., Bechtold P., Biavati G., Bidlot J., Bonavita M., De Chiara G., Dahlgren P., Dee D., Diamantakis M., Dragani R., Flemming J., Forbes R., Fuentes M., Geer A., Haimberger L., Healy S., Hogan R. J., Hólm E., Janisková M., Keeley S., Laloyaux P., Lopez Ph., Lupu C., Radnoti G., de Rosnay P., Rozum I., Vamborg F., Villaume S., Thépaut J.-N., The ERA5 global reanalysis, *Quarterly J. Royal Meteorological Society*, 2020, Vol. 146, pp. 1999–2049, https://doi.org/10.1002/qj.3803.
11. Hou A. Y., Kakar R. K. Neeck S., Azarbarzin A. A., Kummerow C. D., Kojima M., Oki R., Nakamura K., Iguchi T., The Global Precipitation Measurement mission, *Bull. American Meteorological Society*, 2014, Vol. 95, pp. 701–722, https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00164.1.
12. Huffman G. J., Norman G. A., The Supercooled Warm Rain Process and the Specification of Freezing Precipitation, *Monthly Weather Review*, 1988, Vol. 116, No. 11, pp. 2172–2182, https://doi.org/10.1175/1520-0493(1988)116<2172:TSWRPA>2.0.CO;2.
13. Kämäräinen M., Hyvärinen O., Jylhä K., Vajda A., Neiglick S., Nuottokari J., Gregow H., A method to estimate freezing rain climatology from ERA-Interim reanalysis over Europe, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2017, Vol. 17, pp. 243–259, DOI: 10.5194/nhess-17-243-2017.
14. Klima K., Morgan M. G., Ice storm frequencies in a warmer climate, *Climatic Change*, 2015, Vol. 133, No. 2, pp. 209–222, DOI: 10.1007/s10584-015-1460-9.
15. Muñoz-Sabater J., ERA5-Land hourly data from 1981 to present, *Copernicus Climate Change Service* (*C3S*) *Climate Data Store* (*CDS*), 11 June 2021, available at: https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-ERA5-land-monthly-means?tab=overview, https://doi.org/10.24381/cds.e2161bac.
16. Robbins C. C., Cortinas J. V. Jr., Local and Synoptic Environments Associated with Freezing Rain in the Contiguous United States, *Weather and Forecasting*, 2002, Vol. 17, pp. 47–65, https://doi.org/10.1175/1520-0434(2002)017<0047:LASEAW>2.0.CO;2.
17. Simonson J., *Extratropical cyclones and associated climate impacts in the Northeastern United States: Doctoral Thesis*, 2020, 102 p.
18. Yin M., Liu G., Assessment of GPM high-frequency microwave measurements with radiative transfer simulation under snowfall conditions, *Quarterly J. Royal Meteorological Society*, 2019, Vol. 145, pp. 1603–1616, DOI: 10.1002/qj.3515.