



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра метеорологических прогнозов

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(Магистерская диссертация)

На тему: «Комплексный подход к прогнозу замерзающих осадков
на аэродроме Сыктывкар»

Исполнитель Размыслова Валерия Викторовна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат географических наук
(ученая степень, ученое звание)
Волобуева Ольга Васильевна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
заведующий кафедрой



(подпись)

кандидат физико-математических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Анискина Ольга Георгиевна
(фамилия, имя, отчество)

« 01 » февраля 2023 г.

Санкт-Петербург
2023

СОДЕРЖАНИЕ

СОДЕРЖАНИЕ	2
СОКРАЩЕНИЯ	4
ВВЕДЕНИЕ	5
1 Замерзающие осадки. Условия образования и их классификация	7
1.1 Замерзающие осадки и виды обледенения	7
1.2 Обледенение ВС	9
1.3 Условия образования и классификация замерзающих осадков	12
1.4 Фронтальный гололёд	15
1.5 Внутримассовый гололёд	19
1.6 Связь замерзающих осадков с температурной инверсией	20
2 Прогноз гололёда	27
2.1 Расчёт вероятности гололёда	27
2.2 Прогноз гололёда по Р. Я. Ягудину	29
2.3 Прогноз обледенения	29
2.4 Прогноз интенсивности обледенения	32
2.5 Сообщения SIGMET об обледенении	38
3 Исследование условия образования замерзающих осадков на аэродроме «Сыктывкар» и подбор критериев для их прогноза	40
3.1 Физико-географическое расположение и описание аэродрома «Сыктывкар»	40
3.2 Климатическая характеристика аэродрома «Сыктывкар» и близлежащих территорий	41
3.3 Условия образования замерзающих осадков	43
3.4 Характеристики инверсии, влияющие на возникновение замерзающих осадков, которые можно использовать для прогноза	48
3.5 Расчет критериев для прогноза замерзающих осадков и их анализ	55
3.6 Успешность прогнозов замерзающих осадков на аэродроме	63

«Сыктывкар»	
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	68
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	70

СОКРАЩЕНИЯ

ВНГО – Высота нижней границы облачности

ВС – Воздушное судно

ВСВ – Всемирное скоординированное время

ОМС – Орган метеорологического слежения

ЦАО – Центральная аэрологическая обсерватория

ВВЕДЕНИЕ

Замерзающие осадки - опасное явление для многих отраслей экономики. Для авиации они имеют очень большое значение, так как вызывают обледенение воздушных судов.

Обледенение – это нарост ледяной корки на некоторой поверхности.

Большое количество авиационных катастроф связано именно с сильным обледенением судов. Из-за обледенения могут перестать работать системы, самолёт может сильно кренить и также могут заледеневать важные части воздушных судов. Однако есть возможность обходить зоны с обледенением как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскости.

Для того, чтобы предупредить диспетчеров и экипаж воздушных судов о возможном обледенении, авиационными синоптиками выпускаются сообщения SIGMET с указанием области, где возможно обледенение и высоты его слоя.

Но не только для авиации важны замерзающие осадки, для обычного населения замерзающие осадки являются причиной гололёдов, из-за чего люди могут травмироваться, поскользнувшись на образовавшейся корочке льда. Транспорт также опасен гололёд, кроме того, что на дорогах появляется ледяная корка, что влияет на управляемость транспортным средством и даже может привести к автомобильной катастрофе, механизмы некоторых транспортных средств, например, поездов, также могут сильно заледенеть.

В результате продолжительных замерзающих осадков может пострадать значительная часть отраслей, что приведёт к экономическим последствиям, это и обрыв проводов, в результате чего происходит отключение электроэнергии, большое количество автомобильных катастроф, нарушение движения всех видов транспорта.

Прогноз мощных замерзающих осадков не является сложным, однако прогноз слабых и умеренных интенсивностей является довольно затруднительным для метеорологических служб. Условия формирования замерзающих осадков на аэродроме Сыктывкар с учетом местных особенностей и выбор оптимального метода прогноза определяет практическую значимость данного исследования, а также ее актуальность.

Цель магистерской диссертации – разработать комплексный подход к прогнозу замерзающих осадков на аэродроме Сыктывкар.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Создать архив данных со случаями замерзающих осадков за период с 2017 по 2022 гг. на аэродроме Сыктывкар.

2. Проанализировать годовой ход случаев замерзающих осадков.

3. Провести типизацию синоптических ситуаций при образовании замерзающих осадков.

4. Проанализировать случаи замерзающих осадков по результатам зондирования атмосферы.

5. Проанализировать случаи замерзающих осадков при различной температуре (зависимость от максимальной температуры в инверсии, мощности инверсии и глубины инверсии).

6. Рассчитать успешность прогнозов замерзающих осадков на аэродроме «Сыктывкар».

1. ЗАМЕРЗАЮЩИЕ ОСАДКИ. УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ И ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ

1.1 Замерзающие осадки и виды обледенения

Замерзающие осадки – осадки, выпадающие при температуре ниже 0 градусов, капли которых могут замерзнуть при столкновении с землей, летящими воздушными судами или другими объектами.

Накопление льда от замерзающих осадков неравномерно покрывает поверхность предметов. Гравитация обычно заставляет дождевую воду стекать к нижней стороне объекта, прежде чем она замерзнет. Такой же эффект может создать ветер. В любом случае результатом будет более толстое покрытие льда на одной стороне объекта по сравнению с противоположной стороной.

Замерзающими осадками могут быть дождь или же морось.

Гололёд – отложение льда на объектах, в основном, с наветренной стороны или на поверхности земли, происходящее из-за выпадения замерзающих осадков при отрицательной температуре у поверхности земли. [1].

Термин «гололёд» применяется часто совместно с термином «замерзающие осадки», так как является результатом выпадения замерзающих осадков.

Для гидрометеорологических станций, создающих прогнозы для населения и сельского хозяйства важнее не фазовое состояние осадков, а результат их выпадения. То есть для них важнее гололёд, а для авиации важнее именно фазовое состояние капель в воздухе, именно тип осадков, поэтому эти термины могут быть взаимозаменяемыми как в научной литературе, так и в разговорной речи.

Изморозь – отложение льда при тумане или же дымке. Изморозь обычно можно встретить на проводах или ветках растений. Изморозь делится на подвиды:

- Кристаллическая изморозь – изморозь в результате сублимации водяного пара в тумане или дымке. Она состоит из кристаллов, которые нарастают в первую очередь с наветренной стороны объекта. Для такой изморози температура должна быть от -11°C до -25°C , но может образовываться и при более низких температурах. Её легко стряхнуть с поверхности, на которой она намёрзла.

- Зернистая изморозь – изморозь, которая появляется при намерзании капелек в замерзающем тумане при температурах от -3°C до -8°C . Образуется также в основном на наветренной стороне объектов, но для её образования требуется сильный ветер. Внешне зернистая изморозь сравнима с рыхлым льдом, похожим на снег. Плотность такой изморози намного больше, чем кристаллической.

Гололедица – лед на подстилающей поверхности, который мог образоваться вследствие:

- замерзания переохлажденного дождя или мороси на поверхности земли;
- замерзания мокрого снега, дождя или мороси при выпадении на очень холодную поверхность земли;
- замерзания воды на поверхности земли, которая ранее возникла в результате оттепелей или же осадков в виде дождя.

Наст – ледяная корка, поверх выпавшего снежного покрова. Если после образования наста пройдет еще один снегопад и накроет слоем снега образовавшийся наст, то снег в результате таких действий будет состоять из рыхлых и плотных слоёв

Обледенелый мокрый снег — ледяная масса, похожая на более плотную зернистую изморозь. Он образуется при температуре до $+2^{\circ}\text{C}$ и скорости ветра не больше 6 м/с в результате очень быстрого замерзания

выпавшего мокрого снега. Область покрытия обледенелым мокрым снегом может превышать даже гололёдные образования.

Твердый налёт – это белый, тонкий слой, состоящий из маленьких кристаллов льда, который образовывается в результате сублимации водяного пара на относительно холодных поверхностях, в основном с наветренной стороны. Такой налёт можно встретить на колоннах или каменных сооружениях.

Условия возникновения для твёрдого налёта - ослабление морозной погоды, оттепель при облачной погоде. Толщина такого налёта, как правило, не больше нескольких миллиметров[8].

Прогноз замерзающих осадков производится по благоприятным условиям его возникновения.

1.2 Обледенение ВС

Обледенение – это отложение льда на различных частях ВС, обтекаемых во время полёта.

Обледенению, как правило, подвергаются носовые части ВС, происходит искажение профиля данных поверхностей за счёт неровного намерзания льда. В результате обледенения меняется обтекаемость ВС и происходит увеличение сопротивления. Также уменьшается подъемная сила ВС и тяга силовой установки, происходит увеличение массы.

Лётные характеристики, которые ухудшаются при обледенении:

- уменьшается вертикальная скорость набора высоты;
- снижается максимальная скорость полёта;
- понижается потолок ВС;
- возрастает расход топлива;
- увеличивается необходимая тяга для конкретной скорости.

Для вертолётов обледенение опасно тем, что при горизонтальном полёте лёд нарастает на лопастях несущего и хвостового винтов, шасси,

стабилизаторе и лобовой части кабины. Наибольшей опасностью для вертолётчиков является именно нарост на винтах, так как при этом нагрузка на лопасти становится больше, нарушается равновесие ротора и, вследствие чего, возникает сильная вибрация.

В реактивных двигателях обледенение в основном влияет на входные устройства, которые обледеневают даже при температуре несколько выше 0°C . В основном обледеневают они будут на земле и при наборе высоты на большой частоте вращения двигателя или же при взлёте с относительно маленькой скоростью [10].

Для возникновения обледенения необходимы следующие условия на высоте полёта:

- наличие переохлаждённых капелек воды;
- температура поверхности ВС должна быть ниже 0°C

Обледенение, как явление может возникать при температурах от $+2^{\circ}\text{C}$ до -20°C (реже температура может быть ниже), при этом наиболее сильное обледенение будет наблюдаться при температурах от 0°C до -10°C .

Причины обледенения ВС:

- столкновение замерзающих капель воды с поверхностью ВС при полёте в тумане, осадках или же облаках;
- при полёте в ясном небе, когда происходит движение в более тёплом и влажном воздухе (например, при посадке ВС залетает в слой инверсии) и происходит сублимация водяного пара на поверхности ВС

Вероятность обледенения намного выше в капельно-жидких облаках, таких как слоистые и слоисто-кучевые облака. В таких облаках наибольшая водность, так как осадки в этих облаках не могут сформировать нужный вес для того, чтобы выйти из облака или же интенсивность осадков будет довольно слабой.

Вероятность обледенения в смешанных облаках зависит от конкретного случая, так как водность таких облаков будет всегда разной. К смешанным облакам относятся кучево-дождевые облака.

В слоисто-дождевых облаках обледенение происходит в той части, которая состоит из переохлаждённых капель, в основном в слое с температурой от 0°C до -10°C.

Вероятность обледенения в кристаллических облаках наименьшая, так как в них, как правило, отсутствуют переохлажденные капли. Такими облаками являются все перистые облака.

Степень обледенения во многом зависит от того, сколько времени ВС проводит в области с обледенением. Поэтому наиболее опасным является обледенение, связанное с прохождением фронта, так как фронтальная облачность занимает довольно большую площадь и часто сам фронт может лежать таким образом, что фронтальная зона по пути следования будет увеличена в несколько раз, относительно её обычного размера.

Интенсивность обледенения зависит от:

- температуры воздуха(наиболее сильная интенсивность будет при температурах до -10°C);
- влажности облаков, количестве воды, содержащейся в объёме воздуха г/м³(наибольшая влажность наблюдается в дождевых облаках);
- осадков, наибольшая вероятность обледенения в замерзающих осадках, чуть меньше вероятность заледенеть будет при мокром снеге и при сухом снеге вероятность обледенения будет наименьшей;
- размера замерзающих капель, таким образом, что капли большого размера в отличие от мелких будут сталкиваться с поверхностью ВС и заледеневать, в то время как капли маленького размера будут обтекать ВС под действием потоков воздуха;
- профиля крыла, так как, чем меньше профиль крыла, тем воздушный поток будет огибать крыло на более маленьком расстоянии от него, капли по инерции будут сталкиваться с ребром крыла намного чаще и это ребро будет покрываться ледяным наростом;
- скорости полёта, в случае, когда скорость полёта не превышает 300 км/ч, вероятность обледенения возрастает с увеличением скорости, так

как чем больше скорость полёта, тем более вероятно столкновение с каплями и сами капли при увеличении скорости по инерции чаще будут не отклоняться, а «врезаться» в поверхность ВС. Однако если скорость превышает 300 км/ч, то за счёт адиабатического сжатия лобовой части ВС встречным потоком воздуха и из-за трения частиц воздуха о поверхность ВС, происходит кинетический нагрев, вследствие чего, обледенение наступает при более низких температурах. В облаках кинетический нагрев меньше, чем при ясном небе почти в 2 раза, так как, в облаках тепло занято испарением капель, находящихся на поверхности ВС.

При полёте на высоте от 6 до 12 км обледенение, как правило, отсутствует, так как на этих высотах обычно образуются кристаллические облака, поэтому обледенение, как правило, происходит при взлёте, посадке и при полётах на малых высотах.

Отдельно можно выделить самолёты с газотурбинными двигателями, так как у них есть возможность обледенения в воздухозаборниках при положительной температуре, вплоть до +5°C. При расширении воздуха температура опускается ниже нуля градусов и происходит нарастание льда на поверхности входного канала. Сечение канала уменьшается, вследствие чего уменьшается и тяга двигателя. В крайних случаях лёд может скалываться и попадать в компрессор, вызывая повреждение ВС[9].

1.3 Условия образования и классификация замерзающих осадков

Температура, при которой возникают замерзающие осадки в разных источниках всегда разная, но наиболее часто встречаются данные при 0 – -6 градусах.

При более мелком размере капель и более низких значениях температуры гололёд получается более слоистым и относительно не плотным. При близких к нулю температурах гололёд более плотный и имеет прозрачный вид.

Географически повторяемость гололёда наибольшая на возвышенностях более 50 м над окружающим рельефом и на наветренных сторонах гор. Наименьшая же повторяемость гололёда наблюдается в долинах рек и низинах.

Климатически повторяемость гололёда наибольшая в местах с резким изменением погодного режима и наименьшая в районах с устойчивой погодой[3].

Наличие сильного ветра при гололёде усугубляет ситуацию из-за того, что намерзание происходит наиболее интенсивно.

По интенсивности гололёд разделяют на:

- слабый (<5 мм гололёдного отложения)
- умеренный (5-20мм гололёдного отложения)
- сильный (20-50мм гололёдного отложения)
- очень сильный (>50 мм гололёдного отложения)

Обледенение по форме классифицируется на:

- профильное, которое ложится и повторяет форму поверхности объекта;
- желобковое, такая форма обледенения имеет углубление в средней части, которое образуется из-за того, что капли сдуваются под действием потоков воздуха в разные стороны на различные части крыла или же вследствие точечного нагрева;
- неправильное, форма такого обледенения ложится неравномерно, обычно за пределами лобовой части крыла.

При достаточно низких температурах и малой влажности облаков обычно возникает профильный тип отложения, а в переохлаждённых облаках чаще всего возникает желобковый тип.

В переохлаждённых облаках более высокая температура и большая влажность, чем в случае с профильным типом отложения.

В смешанных облаках возникает неправильное отложение, при этом должно соблюдаться условие, что на лобовых выступах воздушного судна температура будет положительной.

Классификация обледенения по интенсивности:

- слабое, скорость отложения ледяного нароста не более 0,5 мм/мин;
- умеренное – скорость отложения льда 0,6 - 1,0 мм/мин;
- сильное – скорость отложения льда 1,1 - 2,0 мм/мин;
- очень сильное, скорость отложения льда превышает 2,0 мм/мин.

Степень обледенения воздушного судна зависит от многих факторов, например от типа самолёта, условий, в которых выполняется полёт и от скорости.

По внешнему виду отложения подразделяют на:

- прозрачный лед;
- матовый полупрозрачный лед;
- непрозрачный белый лед;
- изморозь;
- иней.

То, каким будет лёд при обледенении зависит от скорости полёта и в каких именно облаках происходит нарост льда[1].

В авиационной метеорологии гололёд, как замерзающие осадки разделяют на:

- слабые (видимость более 2 км);
- умеренные (видимость от 1 до 2 км);
- сильные (видимость менее одного км).

За счёт механизмов образования сильные замерзающие осадки, то есть осадки, ухудшающие видимость до 1 км и ниже, довольно редкое явление, как правило, видимость ухудшает снег, который еще не перешел в состояние замерзающего дождя.

Длительность замерзающих осадков также чаще всего варьируется от 30 минут до 1 часа, так как данное состояние является переходным, однако это не исключает случаев с длительностью гололёда до 6 часов и даже более при определенных синоптических ситуациях. Такими ситуациями, например, является стационарный фронт или же тёплый фронт, который по некоторым причинам не может продвинуться дальше.

Ледяной дождь возникает, когда падающий снег сталкивается со слоем теплого воздуха, достаточно глубоким для того, чтобы снег полностью растаял и превратился в дождь. По мере того, как дождевые капли продолжают падать, они проходят через тонкий слой холодного воздуха прямо у поверхности земли и охлаждаются до температуры ниже нуля.

Однако сами капли не замерзают, это явление называется образованием «переохлажденных капель». Когда переохлажденные капли ударяются о замерзшую землю (линии электропередач или ветки деревьев), они мгновенно замерзают, образуя тонкую пленку льда.

Гололёды по своему образованию делятся на гололёды внутри воздушных масс и фронтальные гололёды.

1.4 Фронтальный гололёд

Фронтальные гололёды наблюдаются в передней части циклона и в зонах прохождения фронта окклюзии по тёплому типу [1]. Ширина полосы образования гололёда вдоль фронтальной линии равна приблизительно 100-200 км [2].

Частым для возникновения гололёда является маленький наклон фронтальной поверхности в нижней части [4]. На рисунке 1.4.1 представлена схема осадков при прохождении тёплого фронта.

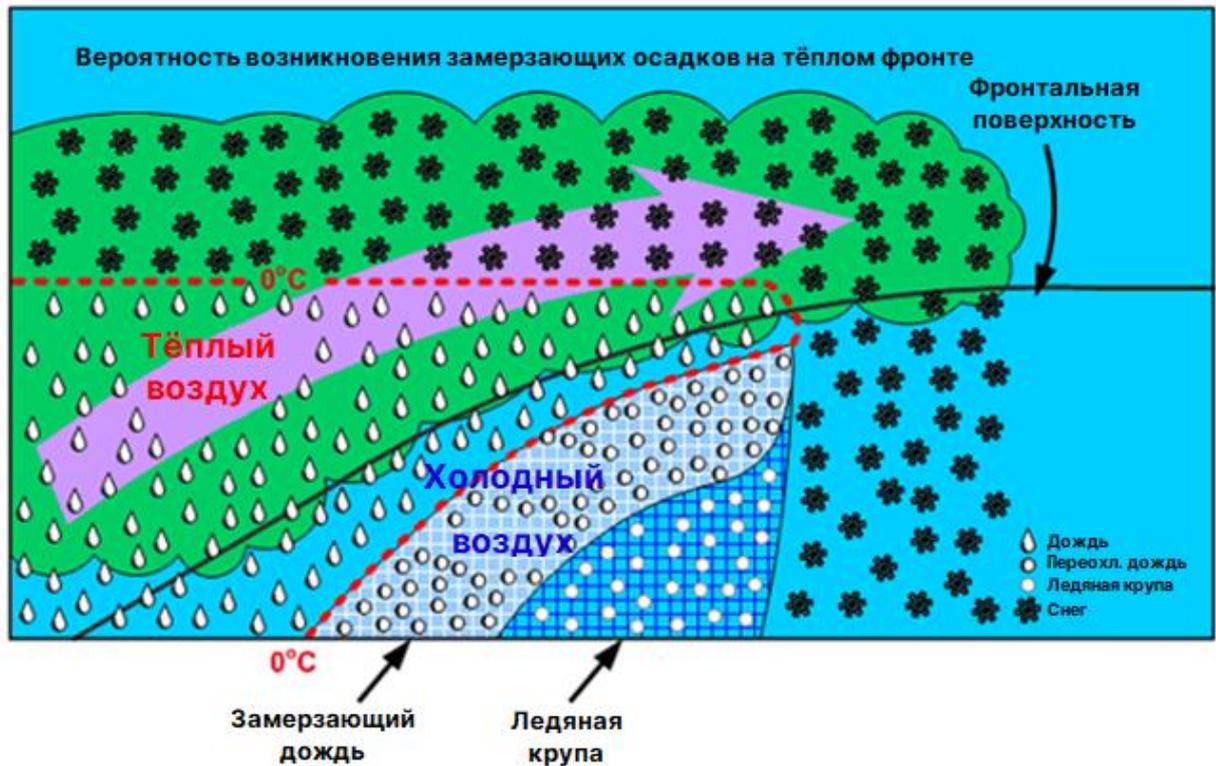


Рисунок 1.4.1- Схема осадков при прохождении тёплого фронта

В полностью холодной атмосфере осадки выпадают в виде снега, когда с верхних слоёв атмосферы под действием тёплого фронта начинает наплывать тёплый воздух и в атмосфере создаётся слой, в котором воздух нагревается и переходит точку замёрзания.

Осадки в виде снега падают, пролетая этот слой и нагреваясь, снова попадают в слой холодного воздуха, охлаждаясь.

Так как тёплый слой ещё довольно маленький, то на приземный слой холодного воздуха выделяется большее количество времени и в результате таких флуктуаций образуется ледяная крупа.

Дальше, по мере того как тёплый слой становится больше, а приземный холодный меньше, капли не успевают до конца замёрзнуть, выпадая на землю в виде замерзающего дождя.

И в момент, когда приземная температура переходит через ноль градусов к положительным температурам, осадки полностью идут в виде дождя.

При фронтальных гололёдах переход температуры происходит скачкообразно, часто с отрицательных на положительные значения. Благоприятным фактором также будет наличие инверсии перед фронтом с положительными значениями температуры в точке её максимального развития.

В результате исследований было выяснено, что фронтальные гололёды чаще возникают при скорости фронта не более 25 км/ч и наиболее вероятны при перемещении южных циклонов. Есть при этом и случаи возникновения гололёда на медленных холодных фронтах первого рода, в особенности при наличии на них волн тёплого фронта.

Хорошие условия для возникновения гололёда будут встречаться зимой в тёплом секторе циклона и в его передней части, в зоне прохождения тёплого фронта и на северной и западной периферии стационарного антициклона.

В большинстве случаев замерзающие осадки возникают в результате того, что тёплый влажный воздух «вытесняет» более холодный воздух, что характерно для тёплого фронта или фронта окклюзии по типу тёплого фронта.

Поднимающийся воздух охлаждается, конденсируется водяной пар, образуя перед фронтом узкую полосу с переохлажденными осадками. Эта полоса обычно имеет ширину менее 50 километров и представлена областью № 1 (заштрихованной оранжевым цветом) на рисунке 1.4.2. Эта полоса часто огибает центр низкого давления, обтекая циклон, или же продолжает идти вдоль фронта окклюзии.

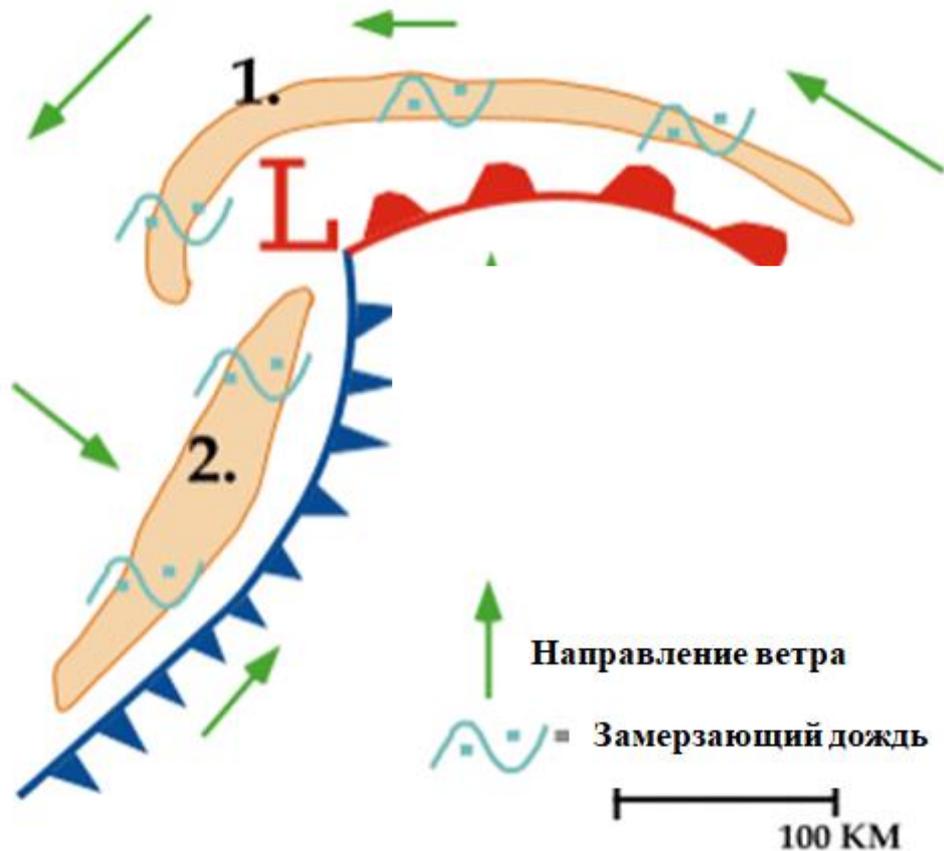


Рисунок 1.4.2 - Зоны образования замерзающих осадков относительно фронтальной системы

Вторая область с замерзающими осадками обычно находится за холодным фронтом (область № 2, заштрихованная оранжевым цветом на рисунке 1.4.2). Замерзающие осадки развиваются, когда теплый воздух поднимается после прохождения холодного фронта, возникают осадки, которые попадая в нижний, более холодный, слой воздуха, охлаждаются, образуя ледяной дождь.

Переохлажденные осадки, связанные с холодным фронтом, обычно бывает очень слабыми, а в редких случаях даже наблюдаются в передней части фронта.

Стационарные фронты также могут быть связаны с образованием замерзающих осадков.

Стационарный фронт разделяет холодный воздух от влажного теплого воздуха. Замерзающие осадки развиваются, когда довольно слабый ветер на высотах толкает теплый влажный воздух над более холодным, создавая узкую полосу переохлажденного дождя на холодной стороне фронтальной границы (Рисунок 1.4.3).

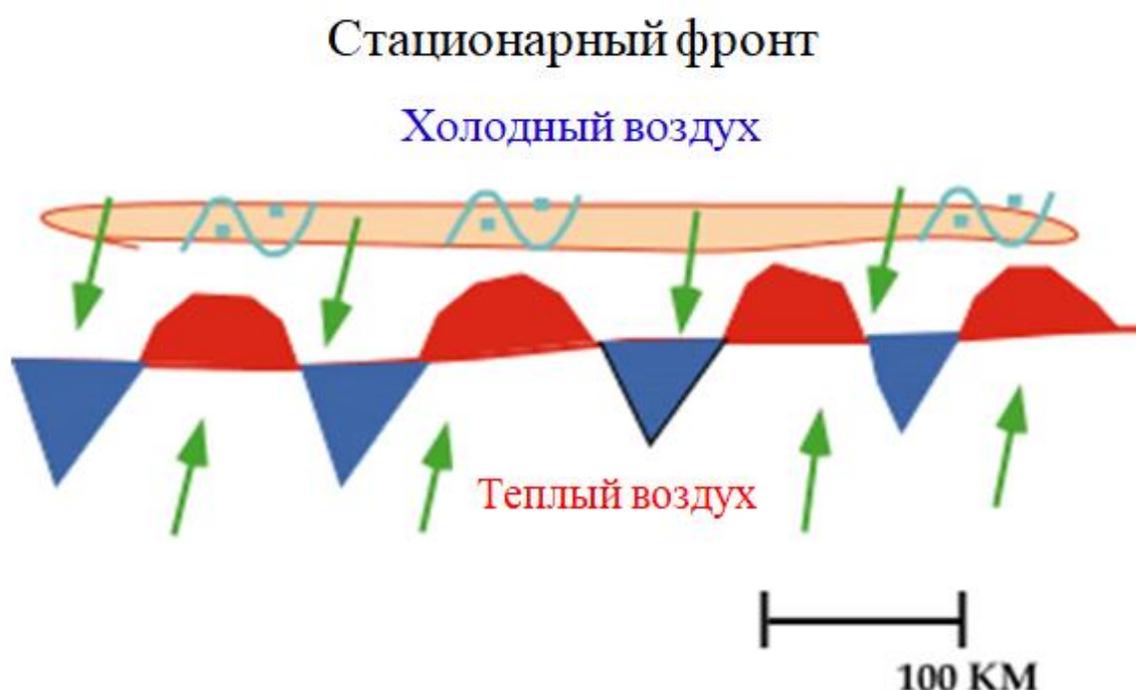


Рисунок 1.4.3 - Зона возникновения замерзающих осадков при стационарном фронте

1.5 Внутримассовый гололёд

Внутримассовые гололёды образуются при переносе тепла и отрицательной приземной температуре с наличием слоистой облачности, из которой могут выпадать осадки в виде мороси.

Также благоприятными для возникновения гололёда данного типа будут инверсии с нижней границей около 500-1000 м и мощностью 500-1000 м с положительной температурой на верхней границе облаков.

Еще один вариант возникновения гололёда, при понижении слоистой облачности до поверхности земли, переходящей в туман. Капли тумана оседают на поверхности объектов, образуя гололёдные отложения[3].

Получается, что в основном, замерзающие осадки обычно связаны с инверсиями, как и внутримассовый гололёд подразумевает наличие инверсии, и при прохождении тёплого фронта будет наблюдаться инверсия.

Температурной инверсией называется такое поведение кривой температуры воздуха, при котором с высотой происходит рост значений температуры. Рассмотрим образование замерзающих осадков при инверсии.

1.6. Связь замерзающих осадков с температурной инверсией

Высокий слой воздуха с отрицательной температурой при выпадении осадков будет давать нам снег, однако в слое инверсии, которая переходит через 0 градусов, кристаллические осадки будут таять, переходя в жидкую форму (Рисунок 1.6.1).

Попадая в нижний слой, находящийся у земли и имеющий температуру ниже нуля, осадки будут снова замерзать, но так как этот слой недостаточно мощный, полное замерзание не происходит, образуя переохлажденные осадки[6].

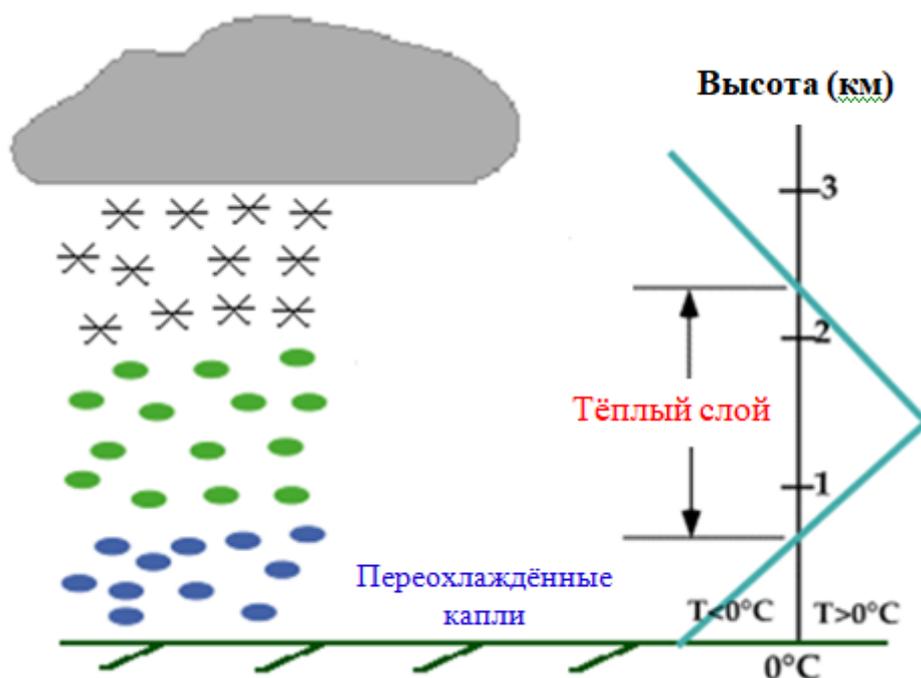


Рисунок 1.6.1 - Ход кривой температуры, благоприятный для замерзающих осадков

Чаще всего температура не уменьшается с высотой, а повышается, многократно на несколько градусов, прежде чем уменьшиться. Это увеличение, а затем уменьшение называется инверсией. Зимой инверсия может иметь решающее значение для определения фазового состояния осадков.

Если ожидается положительная температура или температура около 0°C и при этом имеется инверсия от земли, то осадки ожидаются в виде дождя, если инверсии нет, то при нормальном ходе кривой температуры осадки ожидаемо будут выпадать в виде снега.

Однако если снег может выпадать при положительных температурах, то дождь и мокрый снег при отрицательных температурах идти не могут.

Мокрый снег выпадает при положительных температурах и в момент, когда температура у земли становится отрицательной, начинает идти замерзающий дождь.

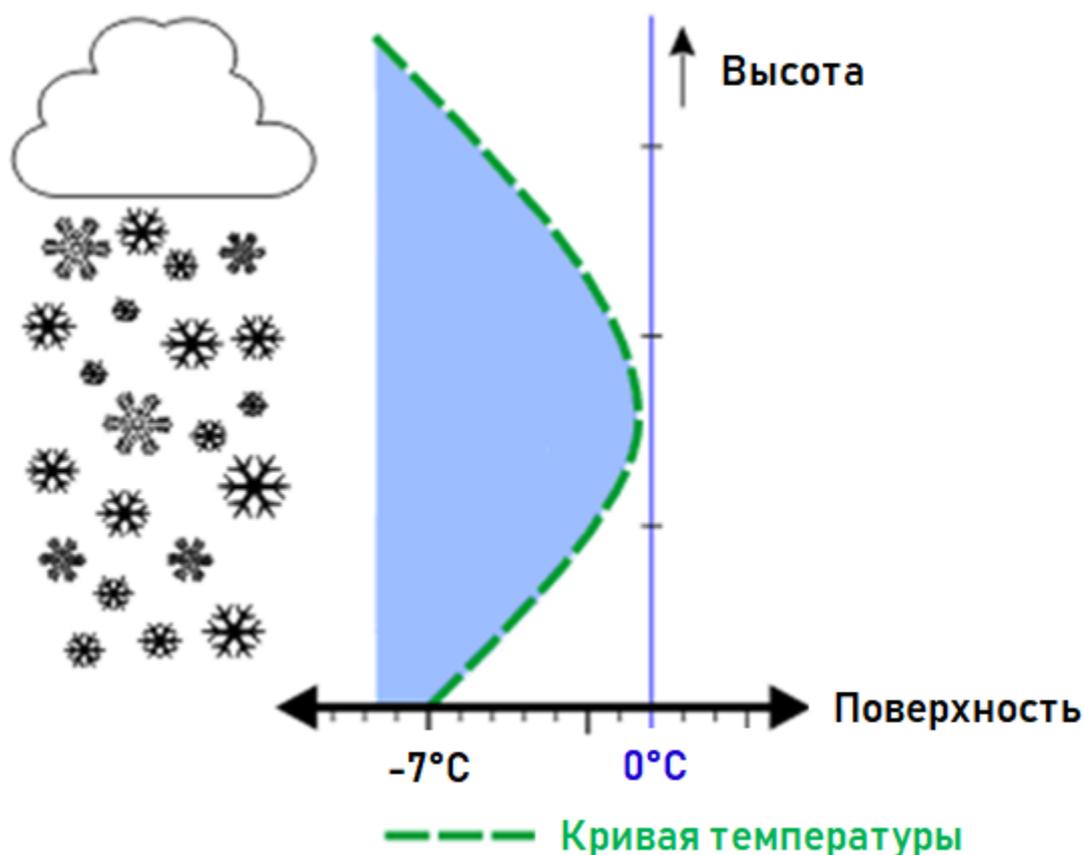


Рисунок 1.6.2 - Распределение температуры при осадках в виде снега

На рисунке 1.6.2 зеленая пунктирная линия - это температура относительно высоты над уровнем моря. Температура поверхности составляет -4°C и увеличивается с высотой, а затем возвращается к нормальному ходу. Однако, поскольку температура не достигает точки замерзания, осадки будут выпадать в виде снега.

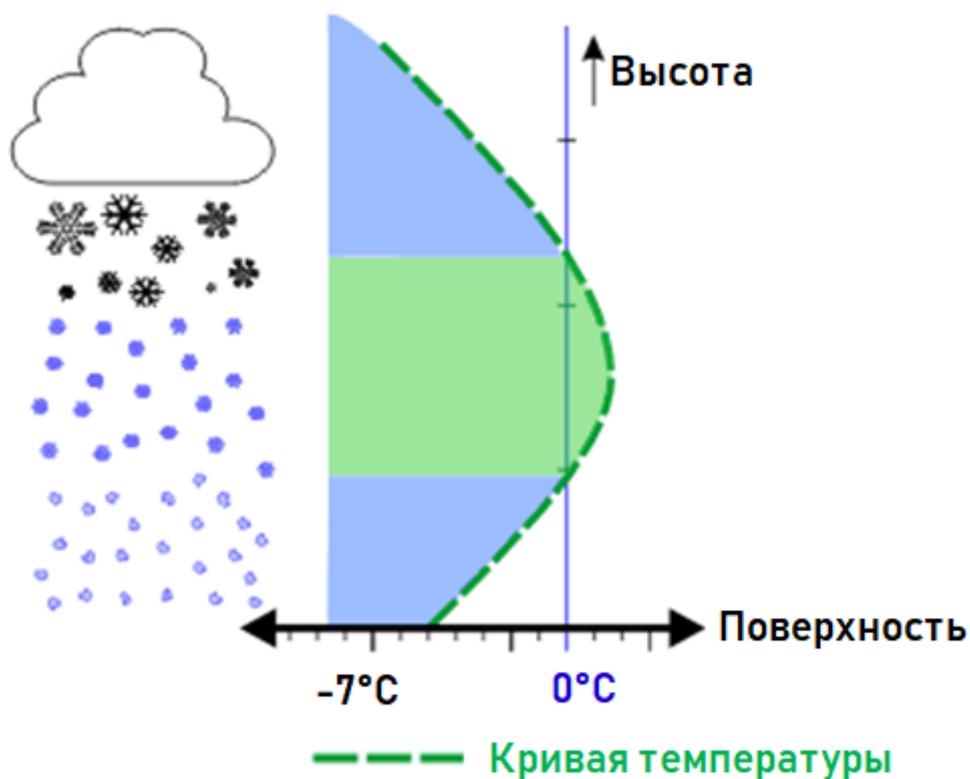


Рисунок 1.6.3. Распределение температуры при осадках в виде ледяной крупы

Ледяная крупа - прозрачные или полупрозрачные частицы льда, которые нелегко раздавить, диаметром до 5 мм. Образуются из замерзающих дождевых капель или из подтаявших у земли снежных хлопьев, данное явление зачастую указывает, что в верхних слоях присутствует слой с обледенением.

На Рисунке 1.6.3 температура поверхности выше -3°C . На высоте имеется инверсия с переходом к положительным температурам.

При попадании снега в слой воздуха, где температура выше точки замерзания, снежинки частично тают. Когда осадки снова попадают в воздух с температурой ниже точки замерзания, они снова замерзают в ледяные шарики, которые отскакивают от земли. Такие осадки можно также

распознать по звуку, они будут довольно громко стучать, особенно на металлических поверхностях.

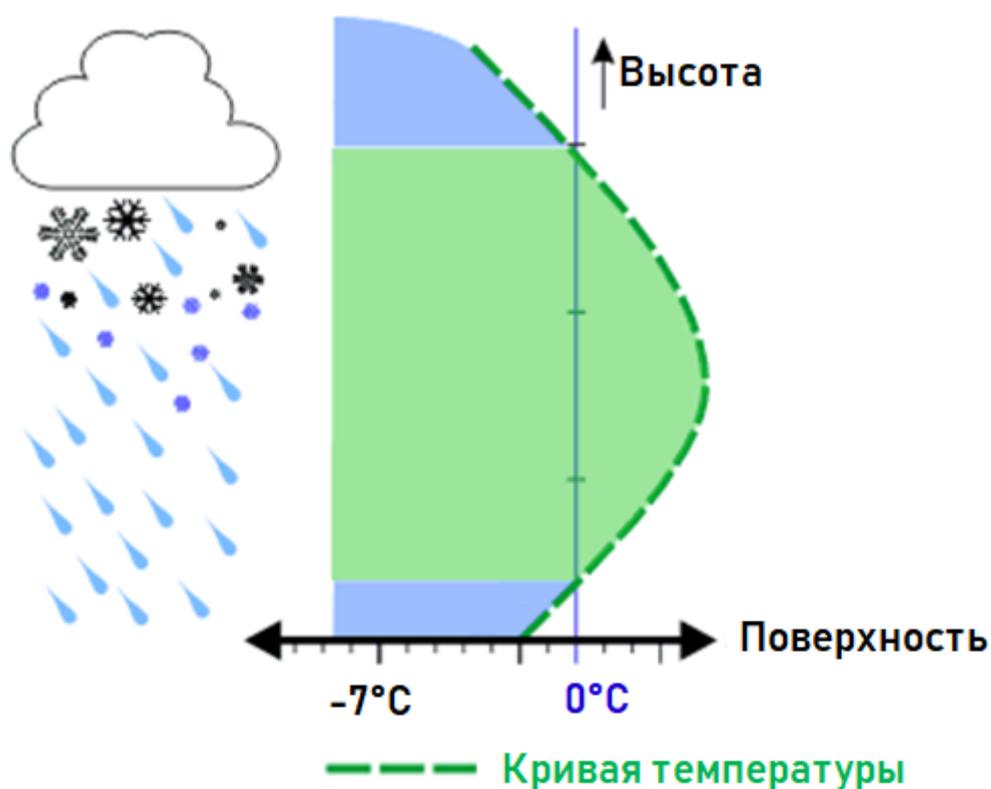


Рисунок 1.6.4 - Распределение температуры при осадках в виде замерзающего дождя

Ледяной дождь возникает, когда в атмосфере присутствует довольно глубокая инверсия, а у земли неглубокий слой холодного воздуха, ниже точки замерзания (Рисунок 1.6.4).

Осадки могут начинаться на высоте как дождь и/или снег, но в теплом слое полностью переходят в дождь. Дождь падает обратно в холодный воздух, но поскольку глубина невелика, дождь не успевает превратиться в снег и выпадает замерзающим дождём.

При попадании на землю или объекты, такие как мосты и транспортные средства, капли замерзающего дождя заледеневают, образуя нарост при контакте с поверхностью.

Разница между замерзающим дождём и ледяной крупой на температурно-ветровом зондировании будет в том, что при замерзающем дожде приземный холодный слой должен быть достаточно маленьким, а при ледяной крупе он будет намного больше.



Рисунок 1.6.5 - Распределение температуры при осадках в виде «теплого» замерзающего дождя

Менее распространенным способом образования ледяного дождя является процесс переохлаждения теплого дождя, когда температура верхней границы облаков выше примерно -10°C (Рисунок 1.6.5).

Переохлажденные дождевые капли образуются по мере того, как микроскопические облачные капельки сливаются друг с другом при падении. Осадки выпадают на поверхность в виде переохлажденного дождя или мороси и мгновенно замерзают при контакте.

Капли дождя не замерзают в холодном слое, потому что при относительно высокой температуре там не так много осадков в твёрдой форме[7].

2. ПРОГНОЗ ГОЛОЛЁДА

2.1 Расчёт вероятности гололёда

Существует график расчета вероятности гололёда с использованием карты АТ-850 (Рисунок 2.1.1). Вычисляется адвективное изменение H^{850}_{1000} на прогнозируемые 24 часа, вносится поправка на изменение воздушной массы и по прогнозируемому значению по графику рассчитывается вероятность образования гололёда[1].

H^{850}_{1000} можно найти, сложив исходные значения, трансформационные изменения и адвективные изменения, которые можно вычислить по траектории частицы на АТ-850.

Дополнительными факторами образования гололеда могут служить следующие условия (Рисунок 2.1.2):

- При прогностической температуре на АТ-850 более или равной 1 градусу Цельсия, отрицательной температуре у поверхности и значениях H^{850}_{1000} равном 130-132 гп.дам, можно ожидать гололёд.
- При значениях H^{850}_{1000} меньше, чем 128 гп.дам сильный гололёд наблюдаться не будет[2].

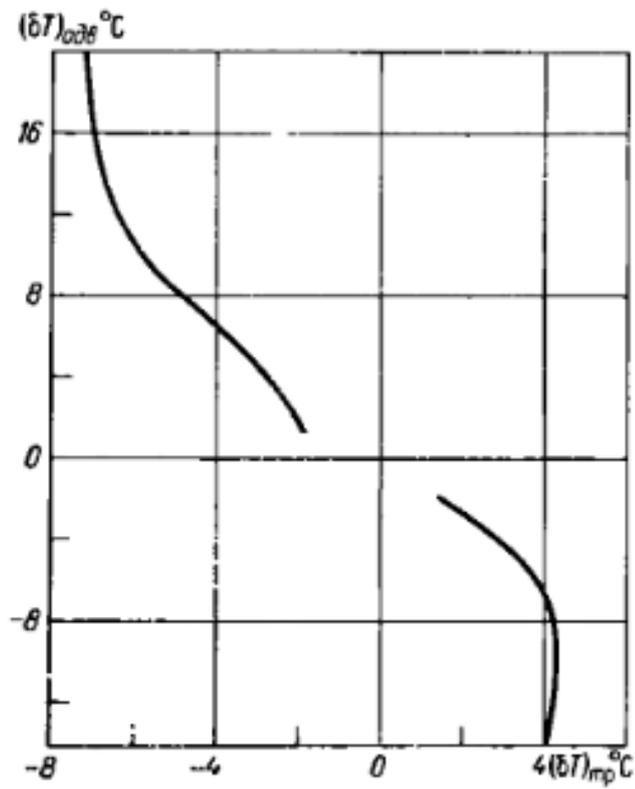


Рисунок 2.1.1 -График для определения трансформационных изменений температуры на уровнях 850 и 700 гПа

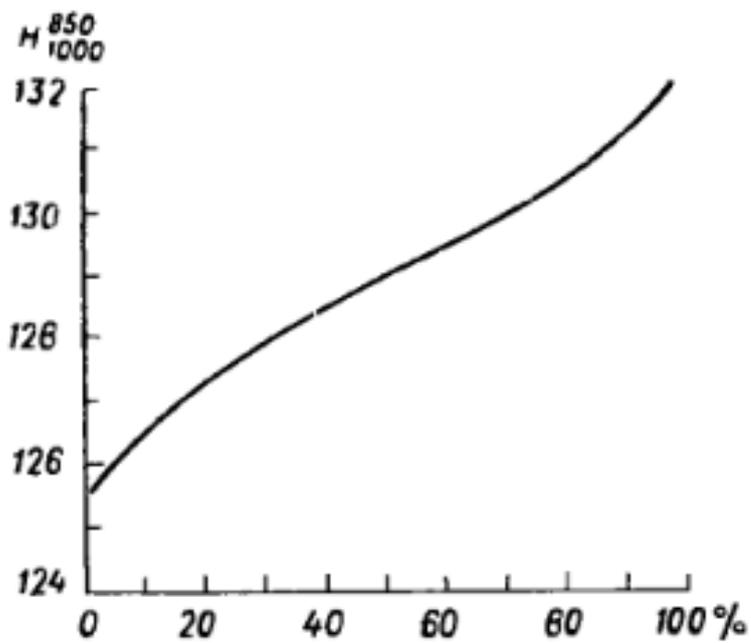


Рисунок 2.1.2 -Вероятность образования гололёда

2.2 Прогноз гололёда по Р. Я. Ягудину

По номограмме «а», температуре на уровне двух метров и температуре на 850 гПа определяется возможность возникновения гололёда. Далее по номограмме «б», по той же температуре воздуха и высоте минус десятой изотермы определяется интенсивность гололёда (Рисунок 2.2.1).

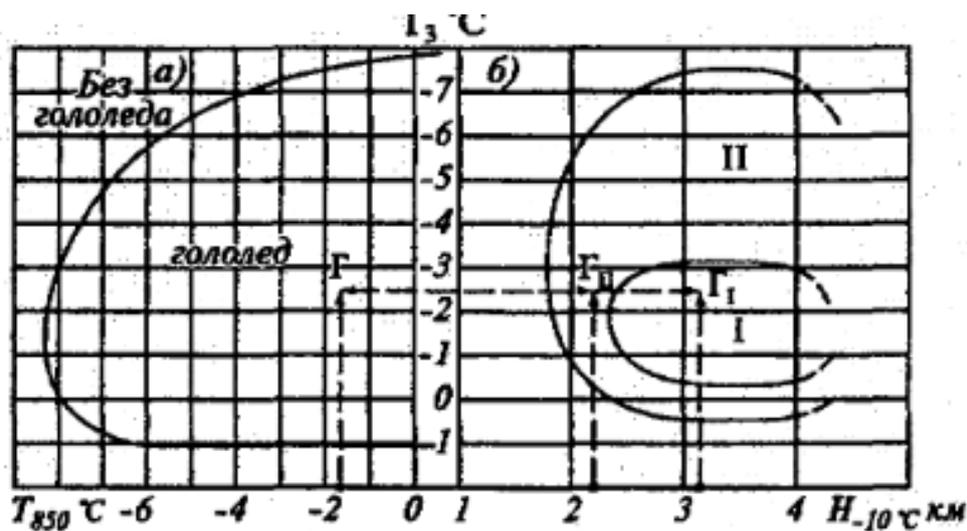


Рисунок 2.2.1 -Номограмма Р. Я. Ягудина для определения возможности возникновения гололёда(а) и его интенсивности(б)
(I – зона умеренного гололёда, II – зона слабого гололёда)

2.3 Прогноз обледенения

Спрогнозировать обледенение можно при помощи специальной диаграммы (Рисунок 2.3.1).

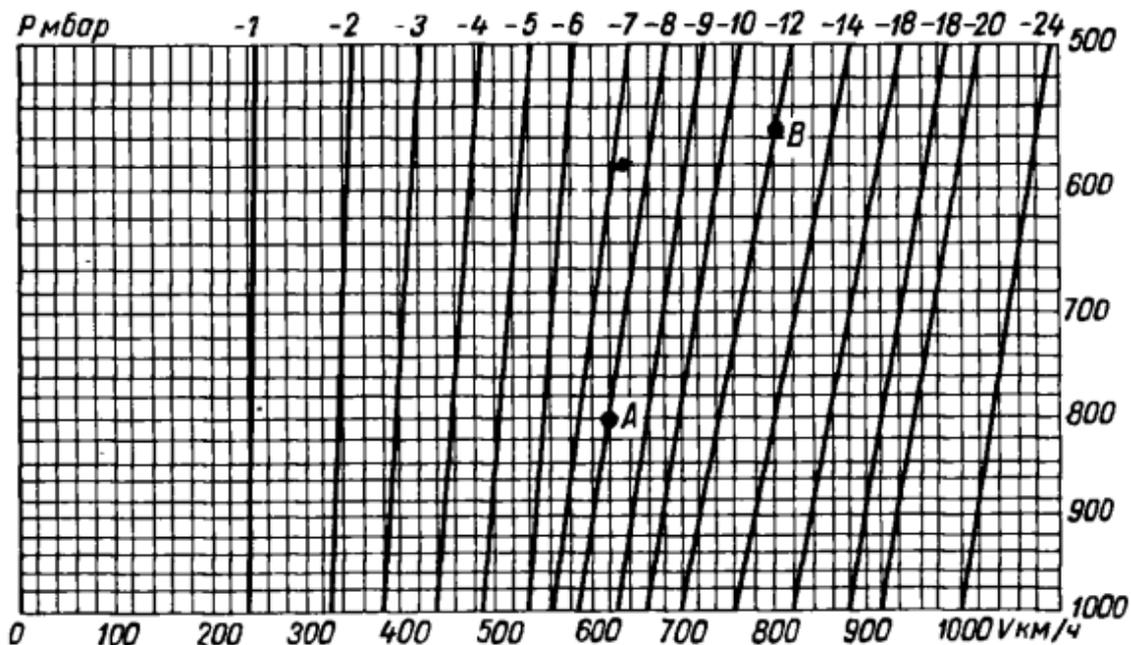


Рисунок 2.3.1 - Диаграмма для определения пороговой скорости полета, без возникновения обледенения

1. Зная скорость полёта, высоту полёта и температуру на данной высоте по диаграмме, представленной на рисунке 2.3.1 определяется возможность обледенения ВС.

2. Необходимо определить верхнюю и нижнюю границу облачности, а также высоту нулевой, минус десятой и минус двадцатой изотермы в данном слое.

В слое от 0°C до -10°C наиболее благоприятные условия для возникновения обледенения.

В слое от -10°C до -20°C обледенение является возможным, но уже менее вероятным.

В слое от -20°C обледенение ВС маловероятно, так как облака там преимущественно кристаллические.

Однако были зафиксированы случаи обледенения при температурах ниже -40°C , когда в перистых и перисто-слоистых облаках, в особенности

если также присутствовала кучево-дождевая облачность, присутствовали капли переохлажденной воды.

Анализ аэрологической диаграммы должен включать в себя такие пункты как:

1) Значение $(T-Td)$ имеет быстрый рост с увеличением высоты – обледенение ВС маловероятно;

2) При отрицательных температурах и наличии инверсии или изотермии в добавлении к тому, что разность значения $(T-Td)$ понижается с набором высоты и является минимальным на нижней границе задерживающего слоя, то область с обледенением чаще всего будет находиться под этим слоем;

3) Внутри инверсии или изотермии значение $(T-Td)$ уменьшается с увеличением высоты, область с обледенением может находиться как внутри задерживающего слоя, так и под ним;

4) Наличие слоя с быстрым падением температуры с высотой, при понижении значения $(T-Td)$ говорит о том, что в этом слое вероятнее всего есть обледенение;

5) Область обледенения от земли до 2 км возможна при температурах меньших температуры насыщения:

$$T \leq -8(T - Td) = T_{\text{нл}}, \quad (2.3.1)$$

где $T_{\text{нл}}$ - температура, насыщения по отношению ко льду.

Наращение ледяной корки происходит тогда, когда температура достигнет уровня насыщения, относительно поверхности льда.

Наиболее благоприятные для обледенения облака – это капельные и переохлажденные облака, например слоистые, слоисто-кучевые, кучевые облака, а также нижние границы слоисто-дождевых и кучево-дождевых облаков.

Обледенение также может наблюдаться в смешанных облаках, таких как высокослоистые и верхние границы слоисто-дождевых облаков.

В облаках, состоящих только из кристалликов льда, обледенение наблюдаться не может. Такими облаками являются перистые и перисто-слоистые облака[1].

Также существует ещё один график для прогноза обледенения по известной скорости полёта и по прогностической температуре на высоте полёта (Рисунок 2.3.2).

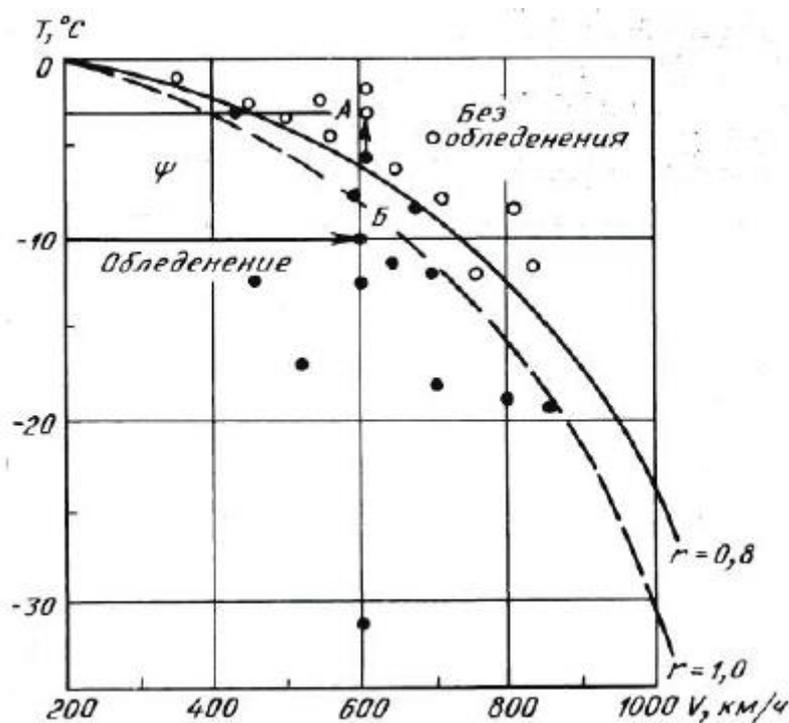


Рисунок 2.3.2 -График для определения условий обледенения воздушных судов в зависимости от скорости полета и температуры воздуха

2.4 Прогноз интенсивности обледенения

Интенсивность обледенения на поверхностях ВС зависит от многих факторов: скорости ВС, его типа и продолжительности полёта в условиях

обледенения. Интенсивность обледенения обозначается как I и высчитывается в мм/мин.

Для дозвуковых ВС интенсивность обледенения можно определить с помощью формулы:

$$I = 10^{-2}wV, \quad (2.4.1)$$

где w – водность облака(г/м³);

V – скорость ВС(км/ч).

В таблице 2.4.1 указана вероятность водности различных облаков(%) по данным Льюиса(США) и по данным ЦАО(Россия)

Таблица 2.4.2 - Водность облаков по данным Льюиса (США) и ЦАО (Россия)

Водность	Данные Льюиса			Данные ЦАО		
	St,Sc	Ac,As	Cu,Cb	Sc,St,Ac	Ns,As	Cu,Cb
0,00-0,09	12	50	31	35,5	29,4	57,7
0,10-0,19	32	32		28,8	31,9	
0,20-0,29	22	13	26	16,4	20,0	26,9
0,30-0,39	16	4		9,0	10,4	
0,40-0,49	12	1	22	4,5	3,7	7,7
0,50-0,59	5	0		2,5	2,5	
0,60-0,69	0,3	0	10	1,2	0,7	4,6
0,70-0,79	0,6	0		1,1	0,8	
0,80-0,89	0,3	0	7	0,3	0,26	0,8
0,90-0,99	0	0		0,3	0,8	
1,00-1,19	0	0	2	0,28	0,26	0,8
1,20-1,39	0	0	1	0,05	0	1,5

1,40-1,59	0	0	0	0,07	0	0
1,60-1,79	0	0	0,7	0	0	0

В таблице 2.4.2 представлены данные водности облаков по эмпирическим значения Петтита(Канада).

Таблица 2.4.2 - Водность облаков по данным Петтита (Канада)

Тип облаков	Максимальная водность			Средняя водность		
	наибольшая повторяемость	абсолютный максимум		наибольшая повторяемость	абсолютный максимум	
Cu	0,2	1,5		0,17	0,8	
St	0,1	1,4		0,10	0,8	
Общая	0,19	1,5		0,11	0,8	
Накопление частоты(%)	Максимальная водность			Средняя водность		
	Cu	St	Общая	Cu	St	Общая
100	1,5	1,4	1,5	0,8	0,8	0,8
90	0,6	0,58	0,58	0,36	0,29	0,32
50	0,25	0,22	0,24	0,14	0,10	0,12
25	0,14	0,15	0,145	0,08	0,065	0,07

На Рисунках 2.4.1 – 2.4.3 показаны графики средних значений водности облаков в зависимости от высоты нижней границы облака (ВНГО) при различных типах облачности.

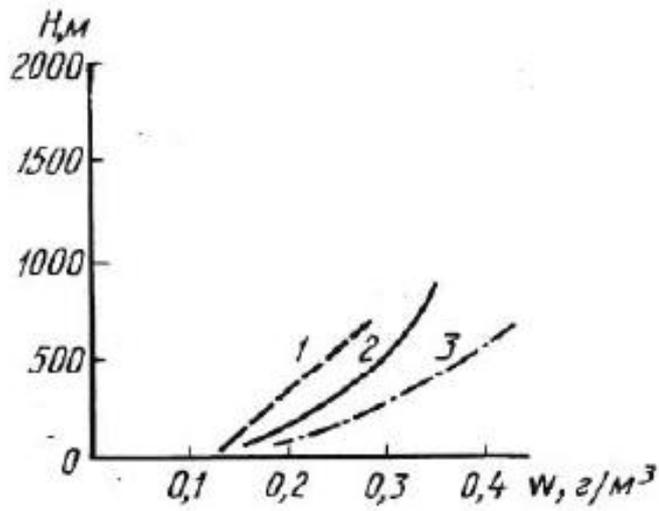


Рисунок 2.4.1 -Средняя водность S_c, S_t, A_c в зависимости от их высоты над нижней границей, где 1) $T < -10^\circ C$; 2) $-10^\circ C \leq T < 0^\circ C$; 3) $T > 0^\circ C$

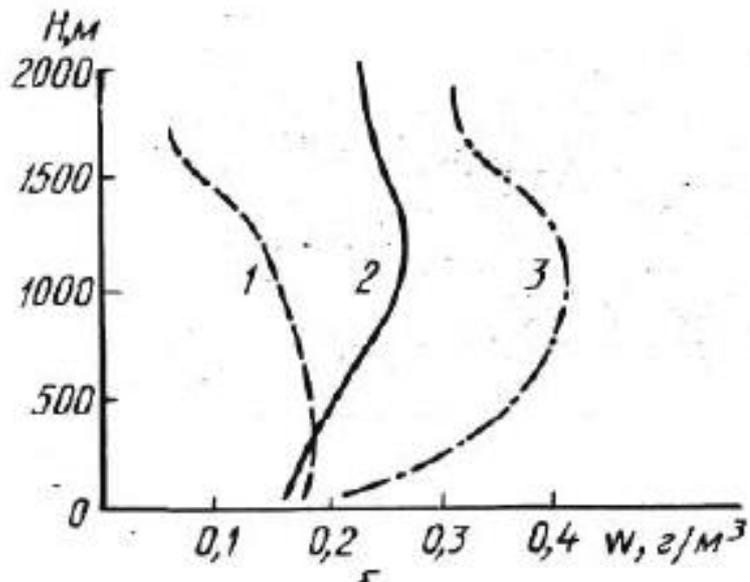


Рисунок 2.4.2 -Средняя водность N_s, A_s в зависимости от их высоты над нижней границей, где 1) $T < -10^\circ C$; 2) $-10^\circ C \leq T < 0^\circ C$; 3) $T > 0^\circ C$

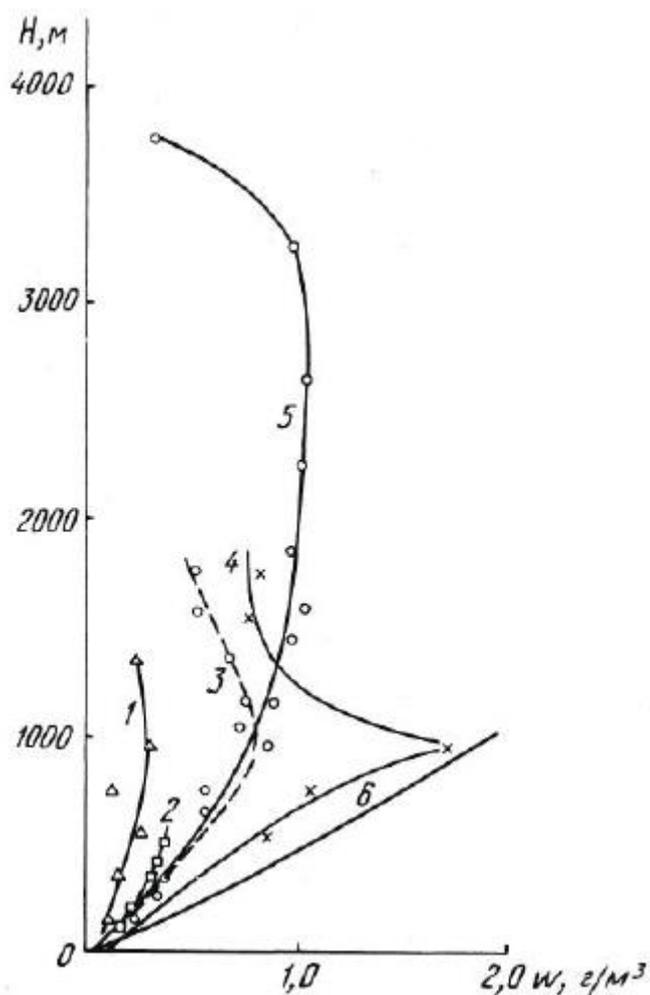


Рисунок 2.4.3 -Средняя водность кучевых облаков в зависимости от их высоты над нижней границей: 1) периферия Cucong; 2) Cuhum; 3) средняя частота Cucong; 4) плотные Cucong(1, 2, 3, 4) по данным В. А. Зайцева; 5) Cucong — по данным А. П. Чуваева; 6) водность в предположении влажно-адиабатического процесса

Интенсивность обледенения ВС также можно определить с помощью номограммы, которая показана на Рисунке 2.4.4. На оси абсцисс, в левой её части отложена температура ВНГО, а по оси ординат вниз отложена интенсивность обледенения. Кривые в левом верхнем квадрате являются градиентами температуры, а радиальные прямые в правом верхнем квадрате

представляют собой изолинии вертикальных мощностей облачного слоя. Прямые, направленные вправо вниз – изолинии скоростей ВС.

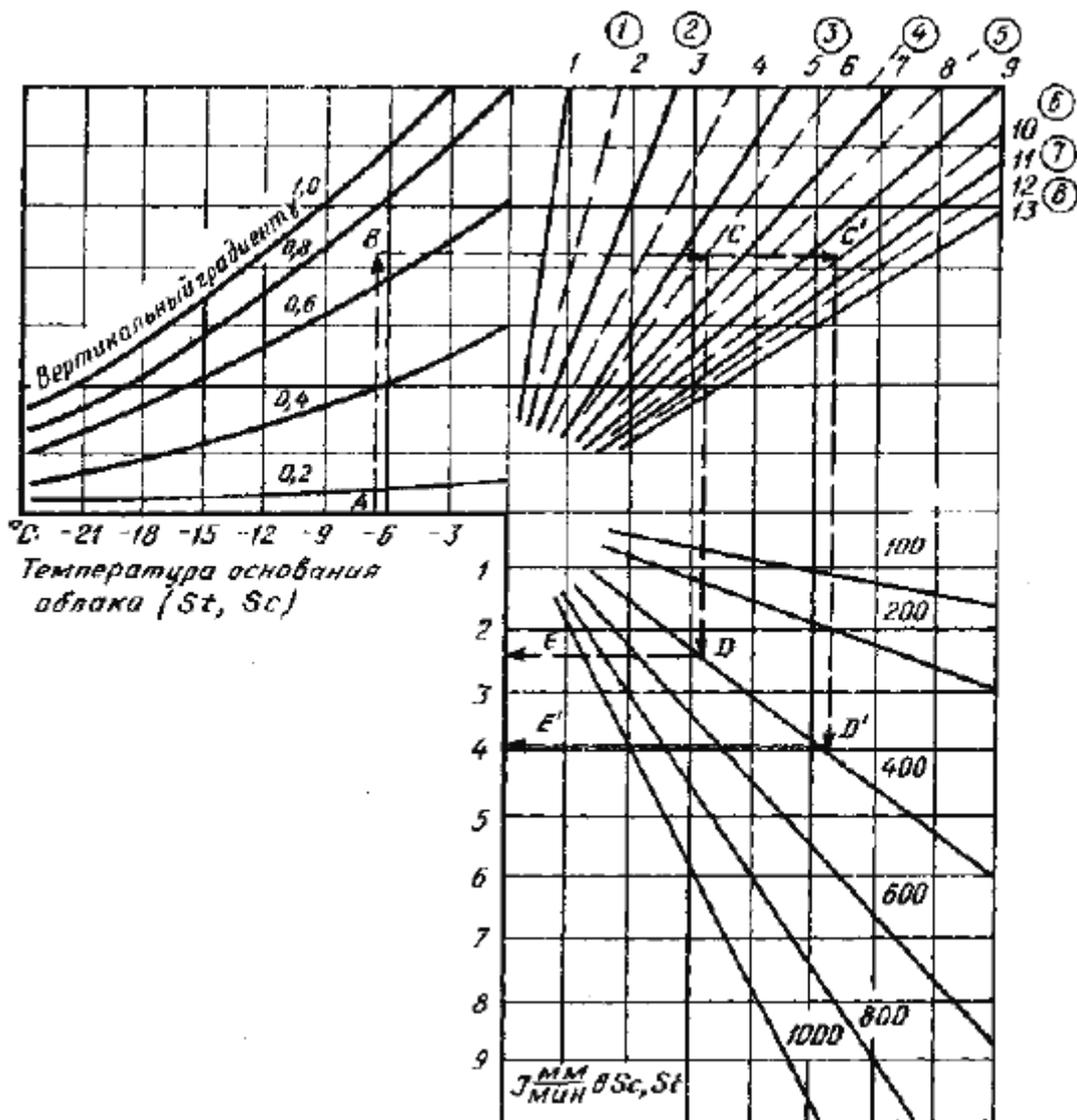


Рисунок 2.4.4 - Номограмма для определения интенсивности обледенения

Интенсивность обледенения, как уже было замечено ранее, зависит от водности облачного покрова и от их фазового состояния. На рисунке 2.4.5 представлен график зависимости интенсивности обледенения от водности облаков при температуре ниже нуля градусов и расписанной для разных скоростей полёта[10].

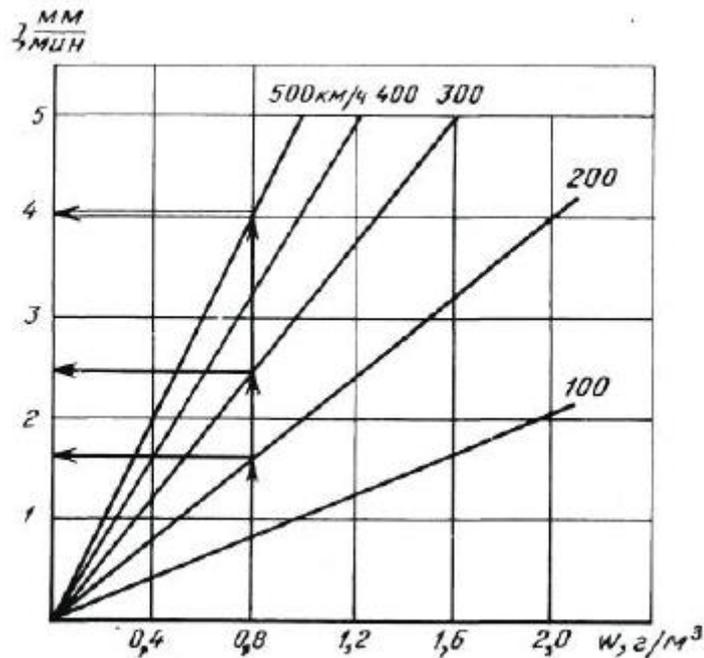


Рисунок 2.4.5 - Зависимость интенсивности обледенения от влажности облаков при различных скоростях полета

2.5 Сообщения SIGMET об обледенении

Сообщения SIGMET – это выпускаемая органом метеорологического слежения информация о фактическом или ожидаемом возникновении определенных явлений погоды по маршруту полета и других явлений в атмосфере, которые могут повлиять на безопасность полетов воздушных судов.

Сообщения SIGMET выпускаются на такие явления как, грозы, турбулентность, обледенение, горные волны, пыльная буря, песчаная буря, радиоактивное облако.

В сообщениях SIGMET можно указать о наблюдаемом или прогнозируемом явлении на высотах от земли до 650 эшелона в пределах ответственности конкретного ОМС.

Сообщения о явлениях в SIGMET кодируются буквами WS.

Пример сообщения о прогнозируемом обледенении:

WSRS31 RUMA 120800

ULLL SIGMET 7 VALID 120900/121200 ULLI-

ULLL SANKT-PETERBURG FIR SEV ICE (FZRA) FCST ENTIRE FIR
SFC/FL100 MOV E 30KMH NC=

В данном сообщении говорится о том, что с 9 до 12 часов по всей зоне ответственности органа метеорологического слежения Санкт-Петербург прогнозируется сильное обледенение от земли до эшелона 100, зона смещается на восток со скоростью 30 км/ч и интенсивность данного явления не меняется[6].

На Рисунке 2.5.1 представлена структура сообщения SIGMET.

1		2		3		
Индекс и наименование FIR, FIR/UIR (M)		Описание явления (M)		Наблюдается или прогнозируется (M)		
<C ₁ C ₁ C ₁ C ₁ > <наименование>FIR[UIR]		<явление>		OBS [AT <GGggZ>] или FCST [AT <GGggZ>]		
4	5	6	7	8	9	10
Местоположение (C)	Вертикальная протяженность или уровень (C)	Смещение или ожидаемое смещение явления (C)	Изменение интенсивности явления (C)	Срок прогноза (окончание периода действия SIGMET) (C)	Местоположение явления (C)	Повторение элементов (C)
Географическое местоположение явления указывается с помощью географических координат или ссылкой на весь FIR	[SFC/]FLnnn или [SFC/]nnnnM или FLnnn/nnn или TOP FLnnn или [TOP] ABV FLnnn или [nnnn]/nnnnM или [nnnnM]/FLnnn или TOP [ABV] FLnnn или *TOP [BLW] FLnnn	MOV <направление>, [<скорость>KMH] или STNR	INTSF или WKN или NC	[FCST AT <GGggZ>]	[координаты]	[AND]**

Рисунок 2.5.1 - Структура сообщения SIGMET

3. ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ЗАМЕРЗАЮЩИХ ОСАДКОВ НА АЭРОДРОМЕ «СЫКТЫВКАР» И ПОДБОР КРИТЕРИЕВ ДЛЯ ИХ ПРОГНОЗА

3.1 Физико-географическое расположение и описание аэродрома «Сыктывкар»

Сыктывкар расположен в равнинной местности на юго-западной территории Республики Коми. Географические координаты аэродрома 61,5° с.ш. 50, 8° в.д. Разница с ВСВ +3 часа. В самой республике 70% территории занято лесами и примерно 15% болотами, что влияет на климатические условия региона.

Аэродром «Сыктывкар» находится перед горной системой Северный Урал, примерно в четырехстах километрах от гор, что способствует задержке фронтальных систем в данном регионе.

Аэродром расположен в черте города, в юго-восточной её части. С запада, севера и северо-востока аэродром огибают жилые постройки, на юго-востоке лесной массив и с юга большое влияние на погоду на аэродроме оказывает река Сысола, за счёт нее с юга чаще начинаются туманы и низкая облачность.

Также за счёт близкого расположения города в отопительный сезон часто привносится печным отоплением дополнительное количество ядер конденсации, что способствует возможности появления кратковременных туманов и низкой облачности.

Высота аэродрома над уровнем моря на аэродроме составляет 104м, относительно прилегающей городской части, аэродром находится в низине, с разницей с городом в 20-40 м по превышению над уровнем моря.

3.2 Климатическая характеристика аэродрома «Сыктывкар» и близлежащих территорий

Сыктывкар находится в атлантико-континентальной области умеренного климатического пояса по классификации Б. П. Алисова. Климат Сыктывкара умеренно-континентальный с непродолжительным, но довольно теплым летом и холодной продолжительной зимой.

Зима длится с октября по первую половину апреля. Температура в зимнее время может опускаться до -45°C . Изредка при вторжении атлантической воздушной массы случаются оттепели. Средняя температура воздуха положительная с апреля по сентябрь. Смена сезонов происходит, как правило, резко.

За год в Сыктывкаре выпадает от 512 мм(2010г.) до 820 мм(2012г.) осадков. Наибольшее количество осадков приходится на летние месяцы, в среднем 227 мм. Снежный покров устанавливается обычно в октябре и держится до конца апреля.

Максимальная высота снежного покрова 93 мм(2010г.). Преобладание холодного арктического воздуха зимой и теплого континентального летом создаёт контрасты температур в годовом ходе.

Климат Сыктывкара обусловлен его географическим положением, а также частой сменой воздушных масс во все сезоны года со стороны Атлантического океана и полярного бассейна. Воздушные массы со Средиземного и Чёрного моря проникают в данный район редко.

Большую часть года в районе Сыктывкара преобладает циклоническая циркуляция. Область высокого давления в основном формируют стационарные и сибирские антициклоны. Зимой преобладает циклоническая деятельность в среднем с одним или двумя периодами установления над территорией обширного антициклона, приносящего холодную морозную погоду на длительное время. Весной преобладает антициклоническая циркуляция. Летом и осенью также преобладает циклоническая циркуляция.

С малоподвижными глубокими циклонами, которые долго задерживаются перед Уральскими горами или над бассейном Оби, связаны длительные периоды холодной и ненастной погоды. Теплая погода наблюдается в тёплых секторах циклонов, в размытых барических полях и сопровождается ливневыми осадками.

Сухая и жаркая погода устанавливается при стационарном антициклоне над востоком и юго-востоком европейской территории России. Осенью отмечается наибольшая повторяемость циклонов.

В конце осеннего сезона осадки могут выпадать в виде снега и мокрого снега. Поле высокого давления обусловлено влиянием сибирских и скандинавских антициклонов. В сентябре наблюдается возвращение к тёплой и солнечной погоде с похолоданием в ночное время.

Средняя многолетняя годовая температура составляет $+2,1^{\circ}\text{C}$. Средняя месячная температура самого холодного месяца января $-14,8^{\circ}\text{C}$, самого тёплого месяца июля $+18,1^{\circ}\text{C}$. Отрицательная среднемесячная температура наблюдается с ноября по март, положительная с апреля по октябрь. Абсолютный минимум $-41,1^{\circ}\text{C}$ отмечался в декабре, абсолютный максимум наблюдался в августе $+34,7^{\circ}\text{C}$. Максимальная продолжительность безморозного периода 116 дней в 2013 году. Средняя дата установления снежного покрова 10 ноября, а средняя дата схода снежного покрова 22 апреля.

Среднее годовое количество осадков составляет 631,1 мм. Осадки в течение года распределяются неравномерно. Наиболее высокая относительная влажность воздуха наблюдается в октябре (87%), наиболее низкая в мае (61%).

Среднее количество дней с туманами в году - 7,1; с грозами - 18,9; с метелью - 1,4; с замерзающими осадками - 10,7. Среднее количество ясных дней составляет 90,8, пасмурных 207,8.

Данные средних, максимальных и минимальных значений величин приведены за период с 2008 по 2014 года.

3.3 Условия образования замерзающих осадков

По обработанным данным авиационной погоды в коде Metar с 2017 по 2022 год было обнаружено 126 случаев выпадения замерзающих осадков. Для каждого случая были проанализированы данные температурно-ветрового зондирования.

Из 126 случаев в 17 не было выявлено слоя инверсии, но при этом в 4 из них ситуация на температурно-ветровом зондировании была близка к изотермической, то есть температура была постоянной на некоторой высоте.

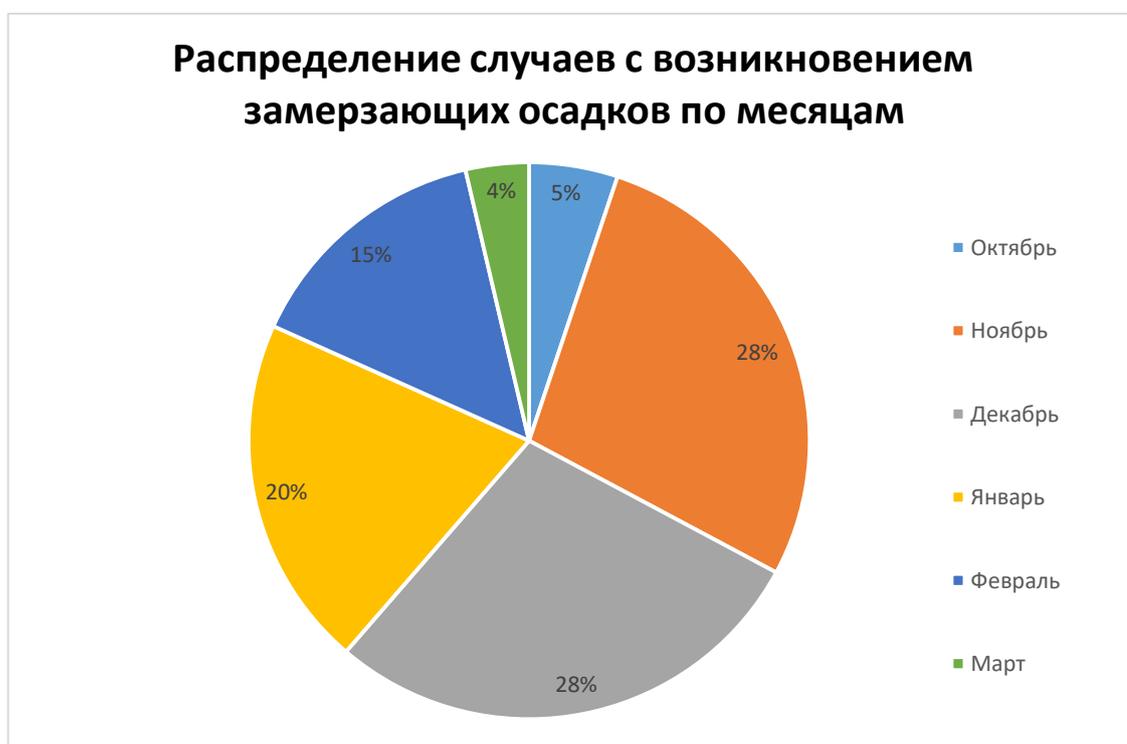


Рисунок 3.3.1 - Распределение случаев с возникновением
замерзающих осадков по месяцам

На Рисунке 3.3.1 представлено распределение выпадения замерзающих осадков по месяцам с 2017 по 2022 год. Мы видим, что наибольшее количество случаев приходится на ноябрь и декабрь (38 и 39 соответственно),

чуть меньше на январь(28 случаев), февраль(20 случаев), и не больше 7 случаев в октябре и марте.

Не в каждом году замерзающие осадки наблюдались в октябре и марте, так как это зависит от времени начала и окончания гололёдного периода, а оно каждый год разное. Однако из пятилетней выборки, два года не было замерзающих осадков в феврале – зимой 2017-2018 и 2020-2021 гг.

Самое раннее появление замерзающего дождя за исследуемый период было зафиксировано 15 октября 2020 года и самое позднее появление 18 марта 2020 года, таким образом «сезон гололёда» в 2020 году был с наибольшей продолжительностью.

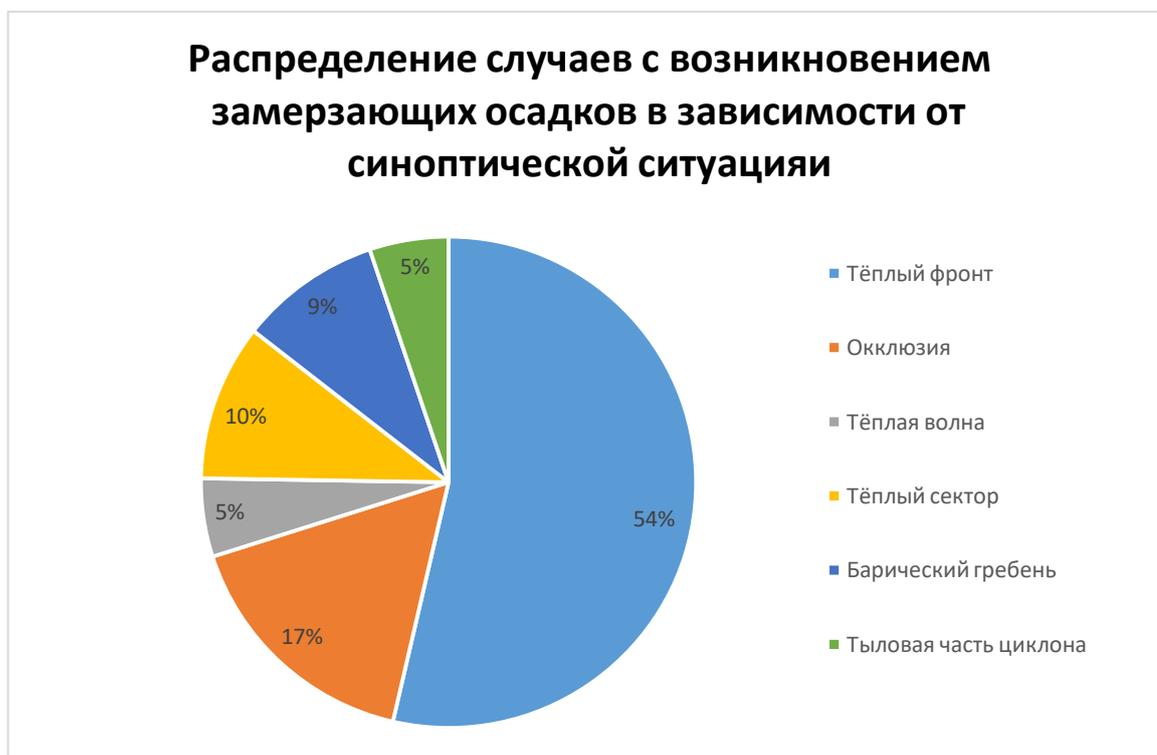


Рисунок 3.3.2 - Распределение случаев с возникновением замерзающих осадков в зависимости от синоптической ситуации

Наиболее часто встречающаяся синоптическая ситуация для выпадения замерзающих осадков (Рисунок 3.3.2) – зона тёплого фронта и окклюзия по типу тёплого фронта. Также примерно по 10 случаев произошли в тёплом секторе и барическом гребне антициклона и несколько случаев замерзающих

осадков было зафиксировано в тыловой части циклона и на тёплой волне холодного фронта.

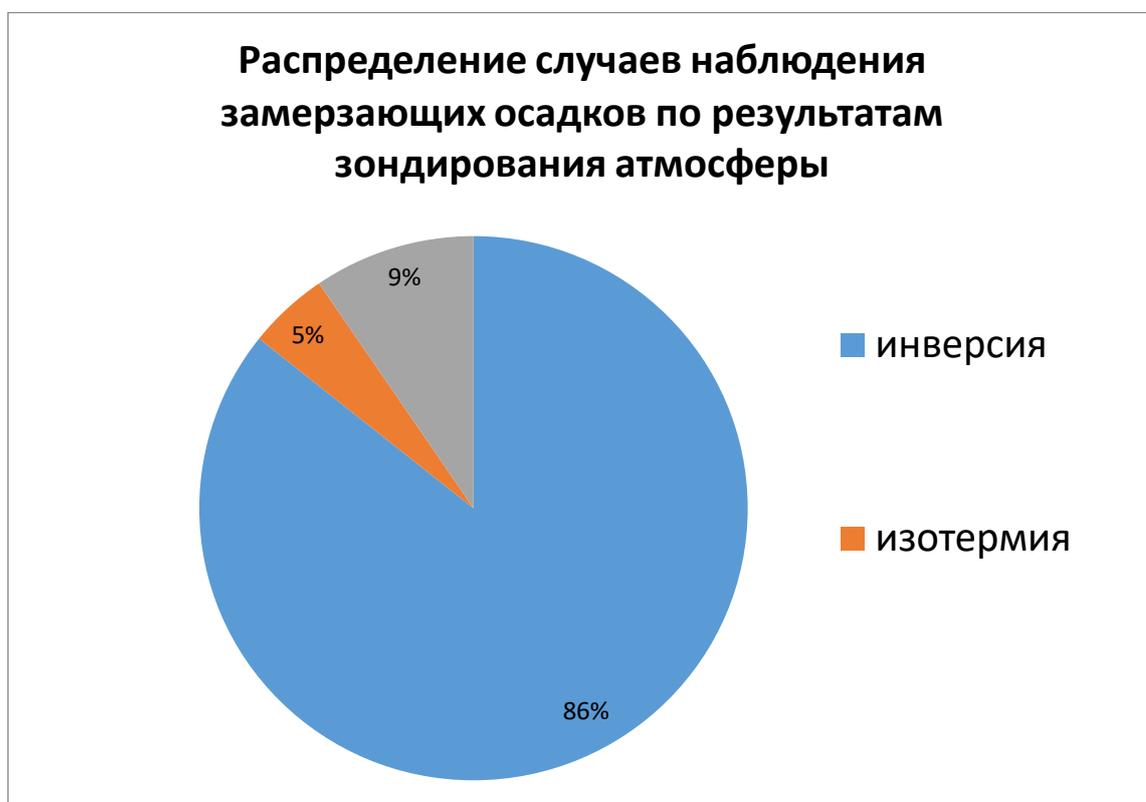


Рисунок 3.3.3 - График распределения случаев наблюдения замерзающих осадков по результатам зондирования атмосферы

В 86% рассмотренных случаев при выпадении замерзающих осадков присутствовала температурная инверсия. 4% случаев имели изотермическое распределение или близкое к нему и 10% имели обычный ход кривой температуры, т.е. температура воздуха понижалась с увеличением высоты.

На Рисунке 3.3.4 представлен пример температурно-ветрового зондирования за 12 ВСВ 19 ноября 2020 года случая замерзающих осадков.

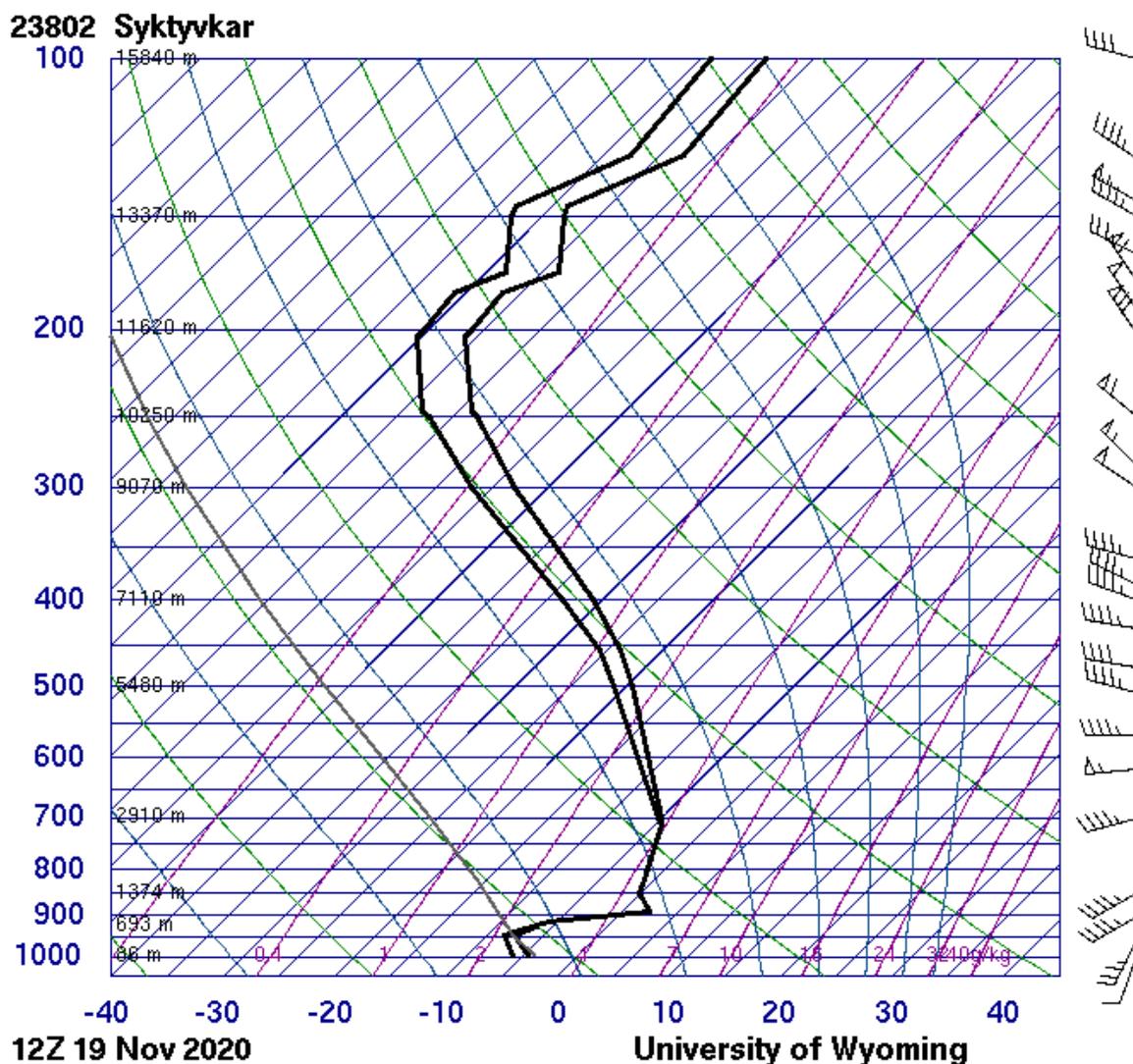


Рисунок 3.3.4 - Пример температурно-ветрового зондирования за 12ВСВ 19 ноября 2020 года

Для примера температурной инверсии был выбран наиболее показательный случай 19 ноября 2020 года. Замерзающий дождь в этот день шёл несколько раз. В первый раз он начался в 10:16 и закончился в 12:00, второй начался в 12:48 и закончился в 13:00 и в третий раз он начался в 16:44 и закончился в 17:41. В этот день была довольно мощная инверсия, в которой температура переходит через ноль градусов, делая скачок на 10,2 градуса, при этом вертикальная протяженность слоя инверсии всего 491 метр.

Максимальная температура в инверсии достигает 2,4 градуса Цельсия. Сам слой инверсии находится между 519 и 1010 метрами.

Синоптическая ситуация для данного случая была довольно благоприятной для возникновения замерзающих осадков (Рисунок 3.3.5).

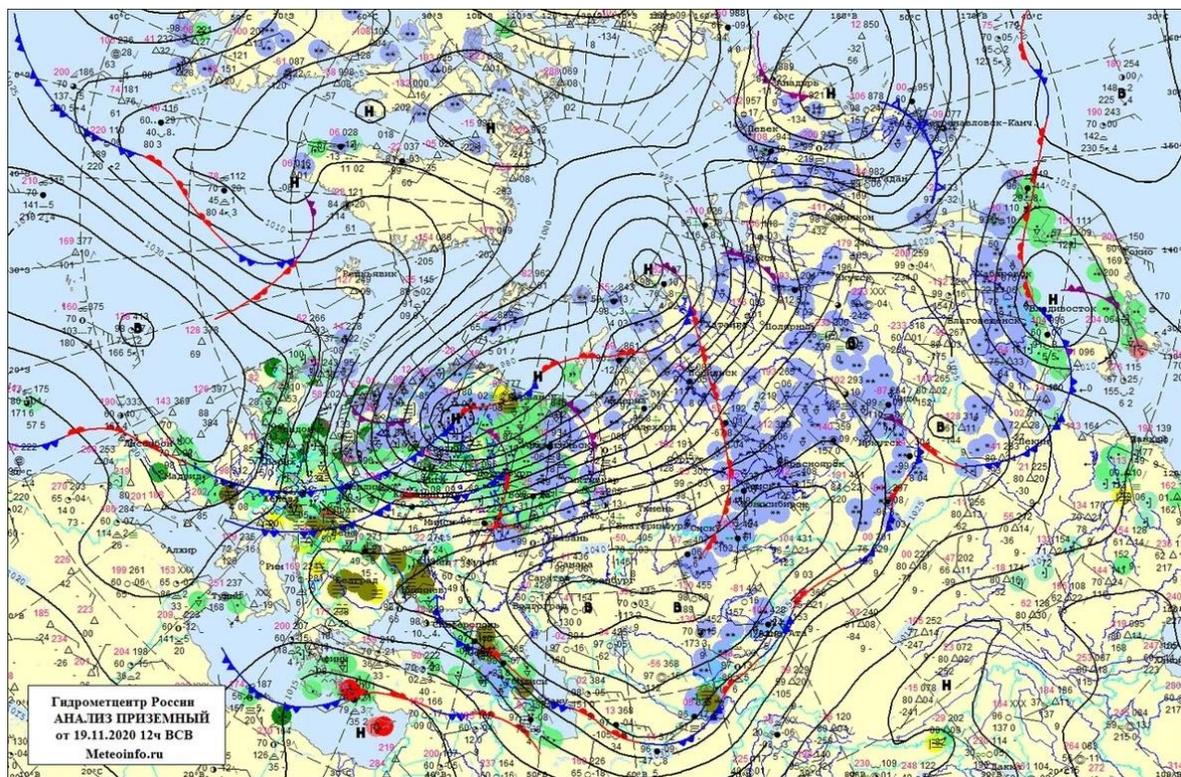


Рисунок 3.3.5 - Синоптическая карта за 19.11.2020 12ВСВ

На приземной карте за 12 часов мы видим, что некоторое время назад пункт Сыктывкар прошла окклюзия по типу тёплого фронта и в данный момент к пункту прогноза подходит тёплый фронт.

Этим можно объяснить, что замерзающие осадки в этот день шли волнами, первая волна была до 12 часов и связана она была с окклюзией, а последующая была связана уже с приближающимся тёплым фронтом.

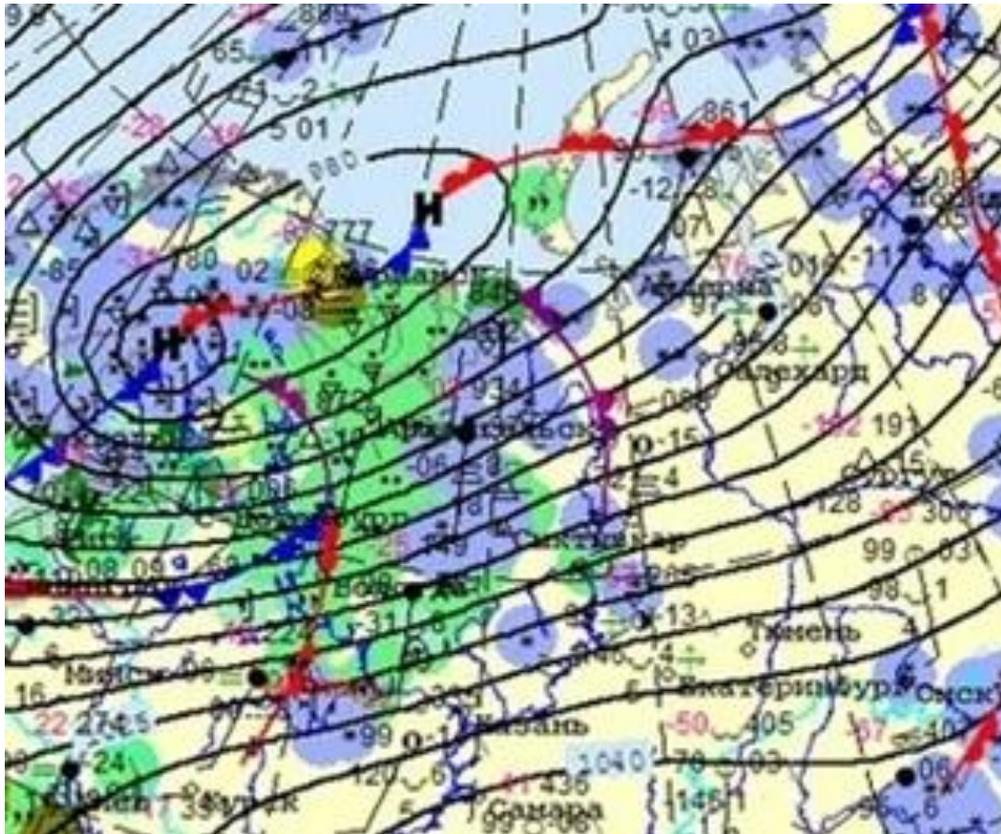


Рисунок 3.3.6 - Синоптическая карта за 19.11.2020 12ВСВ

На Рисунке 3.3.6 можно увидеть, что фронты смещаются на северо-восток, приземная температура за 12 ВСВ -4°C . Видно, что тёплый фронт несёт за собой осадки в виде дождя и соответственно положительные температуры.

Считается, что замерзающий дождь выпадает при температуре воздуха в среднем от 0 до -5 , однако в период с 2017 по 2022 год были случаи наблюдения замерзающего дождя и при -16 градусах Цельсия.

3.4 Характеристики инверсии, влияющие на возникновение замерзающих осадков, которые можно использовать для прогноза

В прогнозе гололёда методом Ягудина рассматривается температура на уровне 850 гПа, высота изотермы -10 градусов и температура у поверхности земли.

Рассмотрим три инверсии с разными ситуациями.

Инверсии были выбраны при разной температуре, при наиболее благоприятной температуре для образования замерзающих осадков (-3°C), при температуре, «выпадающей» из графиков метода Ягудина (-9°C) и при минимальной температуре, при которой наблюдались замерзающие осадки за период с 2017 по 2022 года (-16°C).

Так как последний случай в единственном числе, то данные температурно-ветрового зондирования были взяты за ближайший срок к зафиксированным замерзающим осадкам, а в остальных же случаях выбирался такой день, чтобы замерзающие осадки наблюдались максимально близко к сроку зондирования атмосферы (Рисунки 3.4.1 - 3.4.6).

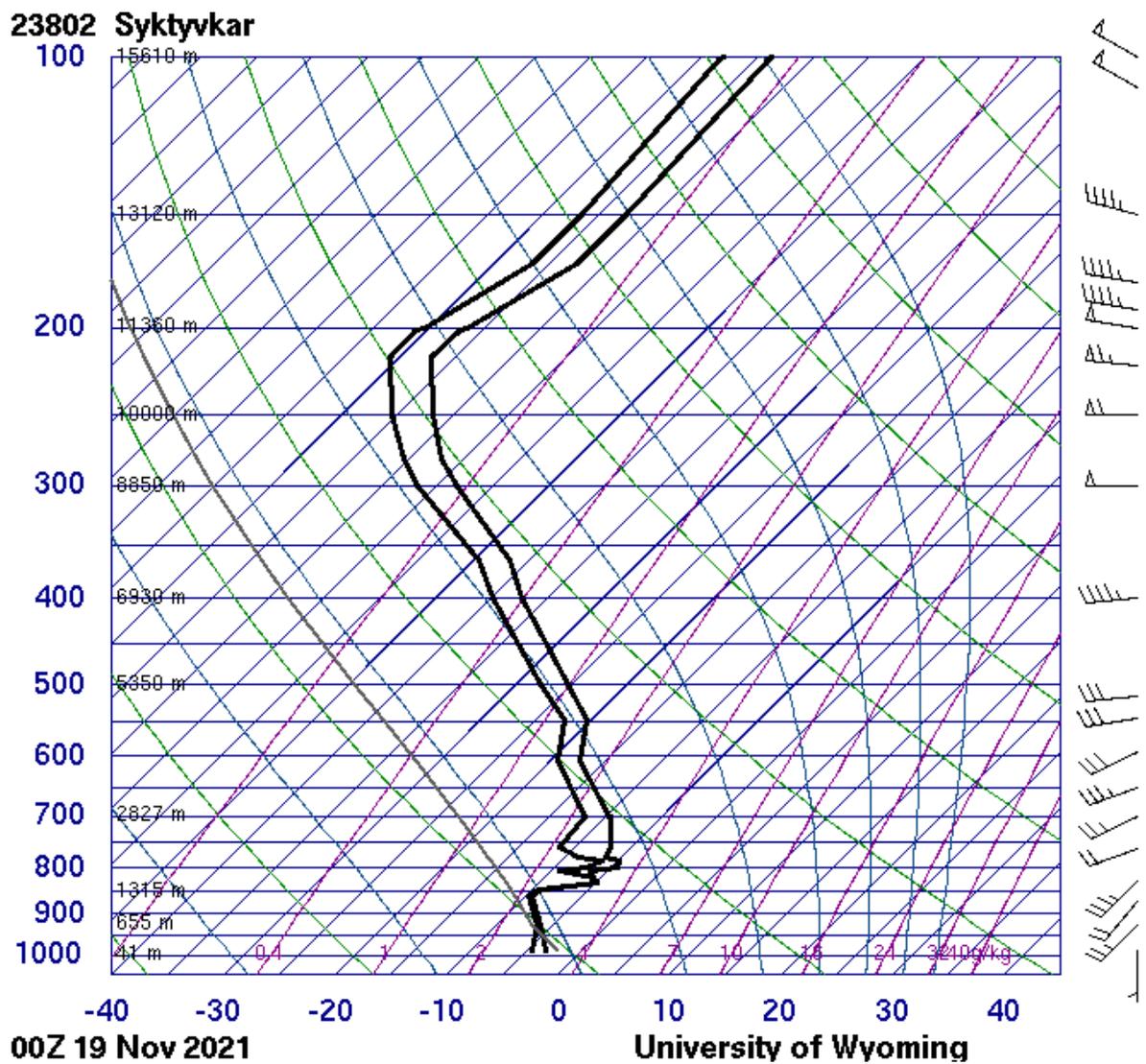


Рисунок 3.4.1 - Температурно-ветровое зондирование атмосферы за 19 ноября 2021 года 00ВСВ при приземной температуре выпадения замерзающих осадков -3°C

Данный зонд имеет две инверсии с началом на уровне примерно с 850 гПа. Температура на высоте не пересекает нулевую изотерму, оставаясь отрицательной на всех уровнях.

PRES hPa	HGHT m	TEMP C
1000.0	41	
990.0	117	-3.1
925.0	655	-6.1
923.0	672	-6.2
873.0	1107	-8.7
861.0	1215	-9.3
850.0	1315	-9.1
847.0	1342	-8.9
832.0	1481	-4.7
826.0	1538	-5.1
821.0	1586	-5.5
806.0	1730	-6.5
804.0	1749	-5.9
799.0	1798	-4.3
786.0	1927	-4.7
777.0	2017	-6.3
762.0	2169	-6.6
758.0	2210	-6.7
701.0	2816	-9.5
700.0	2827	-9.7
650.0	3392	-13.7

Рисунок 3.4.2 - Значения температур по высотам
за 19 ноября 2021 года 00ВСВ

Из рисунка 3.4.2 мы видим, что температура на уровне 850 гПа только начинает повышаться, с неё начинается инверсия. Если мы применим к этому случаю расчетный метод Ягудина, то по температуре на поверхности 850 гПа метод не покажет отрицательный результат, а по высоте минус десятой изотермы у нас получится умеренный гололёд.

Можно сделать вывод о том, что не всегда поверхность 850гПа является удобной для прогноза замерзающих осадков и возможно стоит рассмотреть не температуру на конкретной изобарической поверхности, а максимальную температуру в слое инверсии.

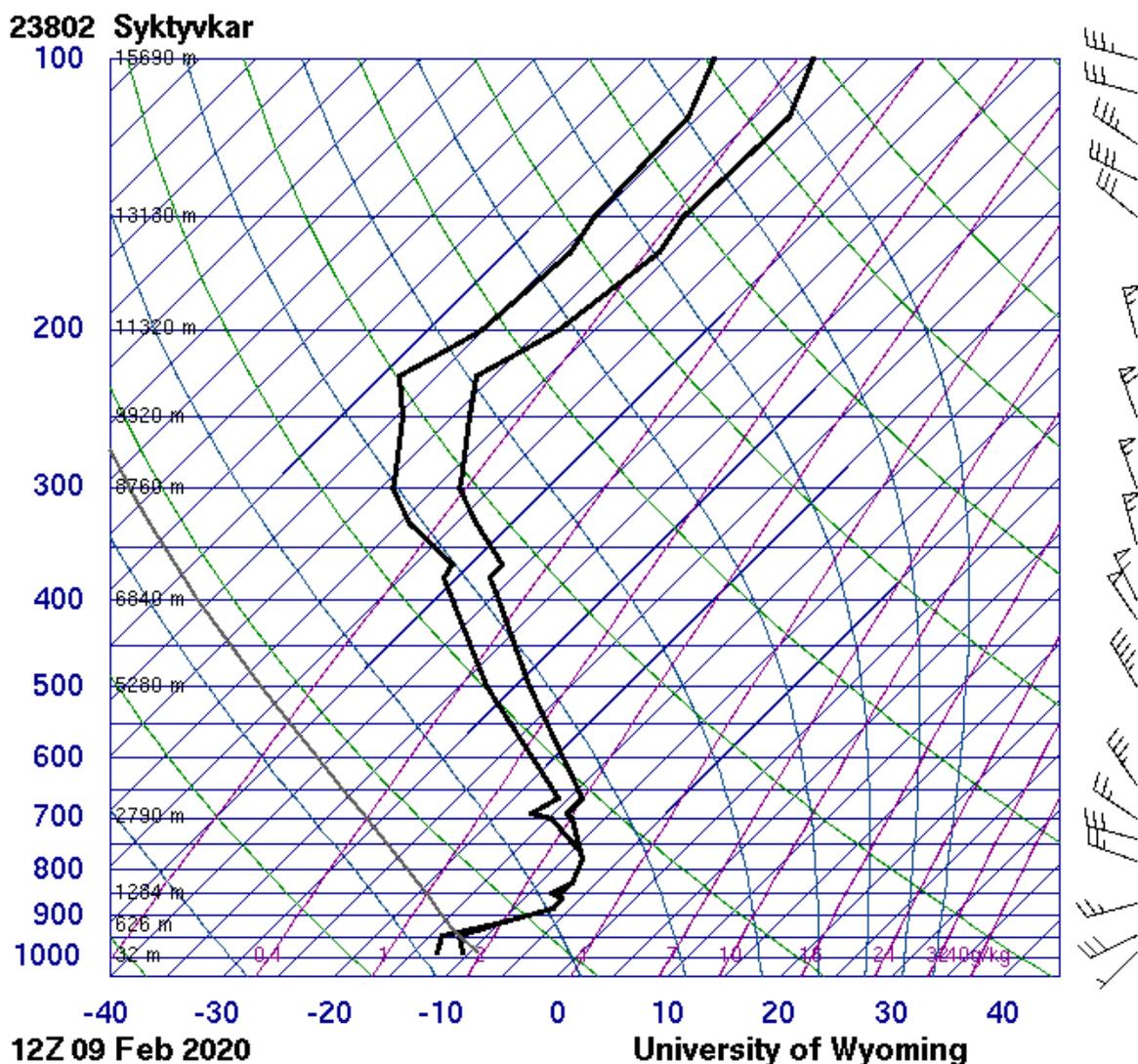


Рисунок 3.4.3 - Температурно-ветровое зондирование атмосферы за 9 февраля 2020 года 12ВСВ при приземной температуре выпадения замерзающих осадков -9°C

В данном случае (Рисунок 3.4.3) инверсия начинается с поверхности примерно 950 гПа и в отличие от первого случая имеет более резкий ход температуры в пределах инверсионного слоя.

PRES hPa	HGHT m	TEMP C
1000.0	32	
989.0	117	-10.5
946.0	455	-12.5
945.0	463	-12.4
925.0	626	-10.7
919.0	676	-10.2
913.0	727	-9.7
882.0	995	-6.5
870.0	1102	-6.5
861.0	1184	-6.5
850.0	1284	-7.1
827.0	1498	-7.1
783.0	1925	-8.2
778.0	1975	-8.3
764.0	2116	-9.1
740.0	2362	-10.5

Рисунок 3.4.4 - Значения температур по высотам
за 9 февраля 2020 года 12ВСВ

В данном случае температура на уровне 850 гПа сравнительно более высокая, поэтому могла бы попасть в область гололёда по графику Ягудина. Но даже если примерно продолжить график, включив в него температуру -9°C, то для образования замерзающих осадков в таком случае температура на поверхности 850 гПа должна быть от 0°C до -3°C, т.е. гораздо выше.

Резкий ход кривой температуры можно описать мощностью инверсии в градусах и в метрах, рассмотрев, есть ли пороговое значение мощности инверсии, при которой можно прогнозировать возникновение замерзающих осадков.

На Рисунке 3.4.5 представлено температурно-ветровое зондирование атмосферы за 9 января 2019 года 12 ВСВ при приземной температуре выпадения замерзающих осадков -16°C.

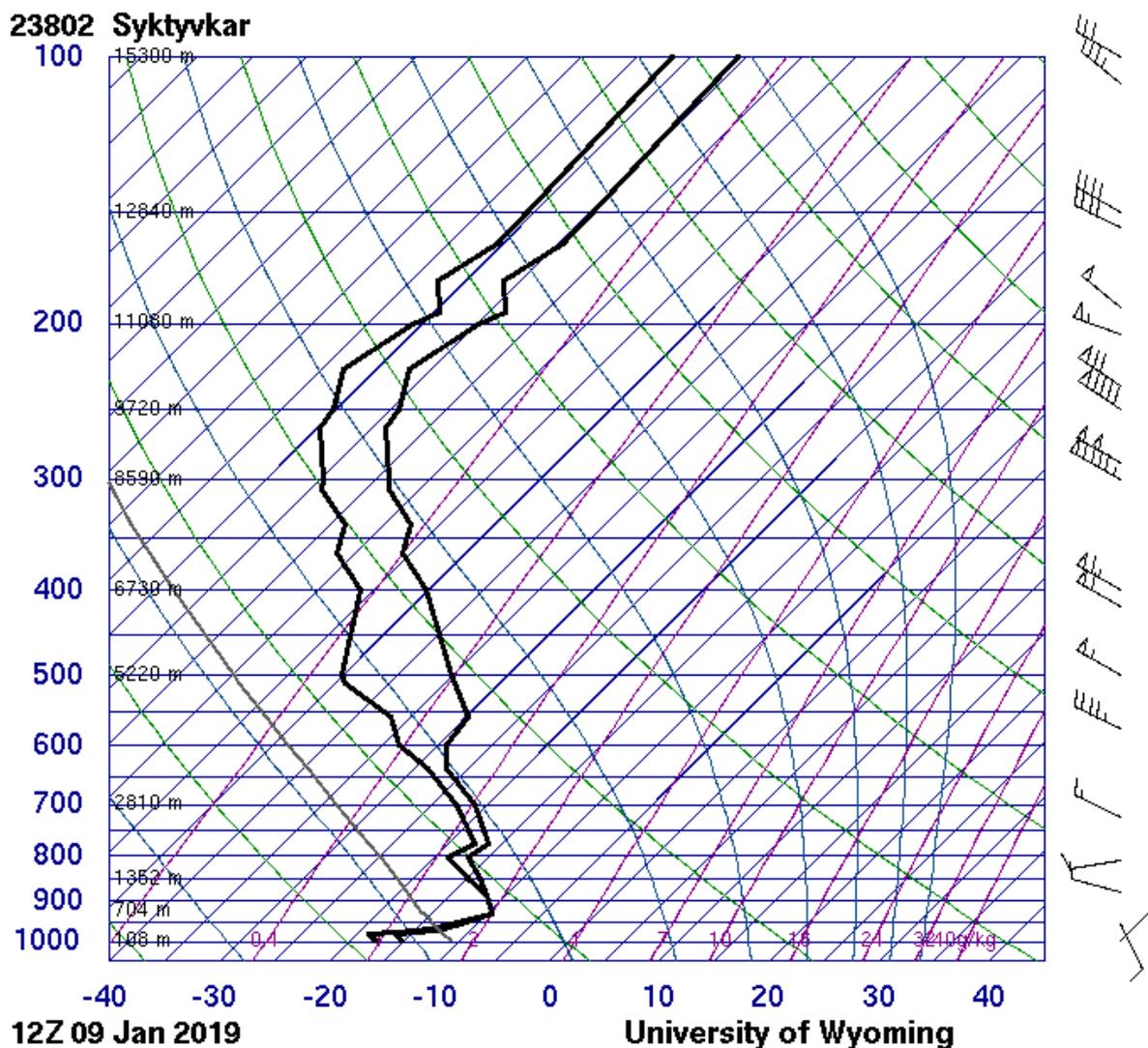


Рисунок 3.4.5- Температурно-ветровое зондирование атмосферы за 9 января 2019 года 12ВСВ при приземной температуре выпадения замерзающих осадков -16°C

В данном случае слой инверсии находится достаточно близко к земле, на уровне примерно 978 гПа. И как можно заметить, в данном случае температура на уровне 850 гПа уже не входит в слой инверсии, хотя и является теплее, чем температура у поверхности земли. Ход кривой в инверсии, как и в случае 9 февраля 2020 года довольно резкий.

PRES	HGHT	TEMP
hPa	m	С
1000.0	108	
999.0	117	-15.3
982.0	246	-16.3
978.0	277	-16.5
976.0	292	-14.5
969.0	347	-12.3
954.0	467	-11.2
932.0	646	-9.5
930.0	662	-9.6
925.0	704	-9.7
885.0	1044	-11.7

Рисунок 3.4.6 - Значения температур по высотам
за 9 января 2019 года 12BCB

В данном случае из-за довольно низких температур даже примерно посчитать по методу Ягудина не представляется возможным, и максимальная температура в инверсии соответственно не входит в рамки графика для прогноза. Однако за исследуемый период наблюдалось три случая возникновения замерзающих осадков при температуре -14– -15°C.

Возможно, для очень сильных инверсий стоит попробовать посчитать на сколько изменяется в слое инверсии, приравненная к 100м на 1°C.

3.5 Расчет критериев для прогноза замерзающих осадков и их анализ

Исходя из написанного ранее, для каждого случая наблюдаемых замерзающих осадков по данным температурно-ветрового зондирования были посчитаны максимальная температура в инверсии, мощность инверсии в градусах Цельсия, глубина инверсии в метрах и изменение температуры в слое инверсии в 1°C на 100 метров.

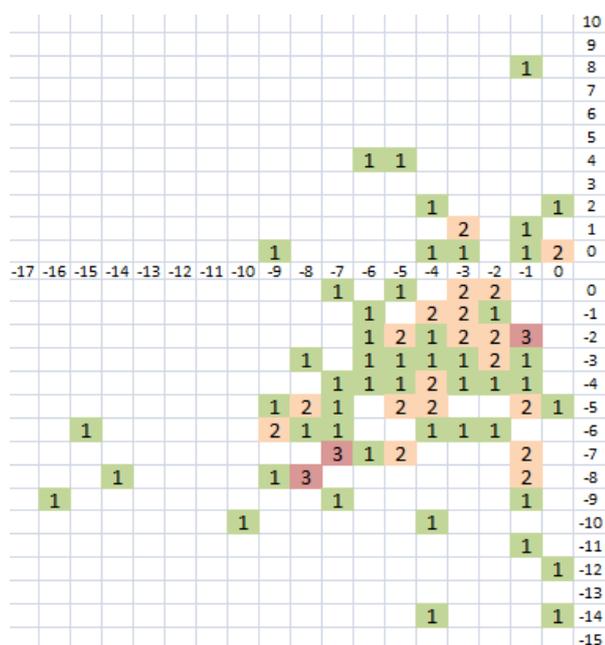


Рисунок 3.5.1 - Распределение случаев наблюдаемых замерзающих осадков при различной температуре (ось абсцисс) от максимальной температуры в инверсии (ось ординат)

Исходя из данного графика мы можем судить о том, что граничная температура в -7°C для данного региона не является верной, так как довольно большое количество случаев замерзающих осадков было при более низких температурах.

По данному графику можно чётко проследить наличие сосредоточенного количества случаев при приземной температуре от 0 до -9°C и максимальной температуре в инверсии также от 0 до -9°C .

На основе данных, полученных при расчёте, был создан график для прогноза замерзающих осадков по прогностической температуре и максимальной температуре в слое инверсии, снятой по атмосферному зонду, где красной линией очерчена зона с наиболее вероятным возникновением замерзающих осадков, а оранжевой менее вероятная зона выпадения замерзающих осадков.

С помощью этого рисунка мы можем заметить, что на данной территории не так много случаев «классического» гололёда, когда

температура в инверсии переходит через 0 градусов к положительным температурам.

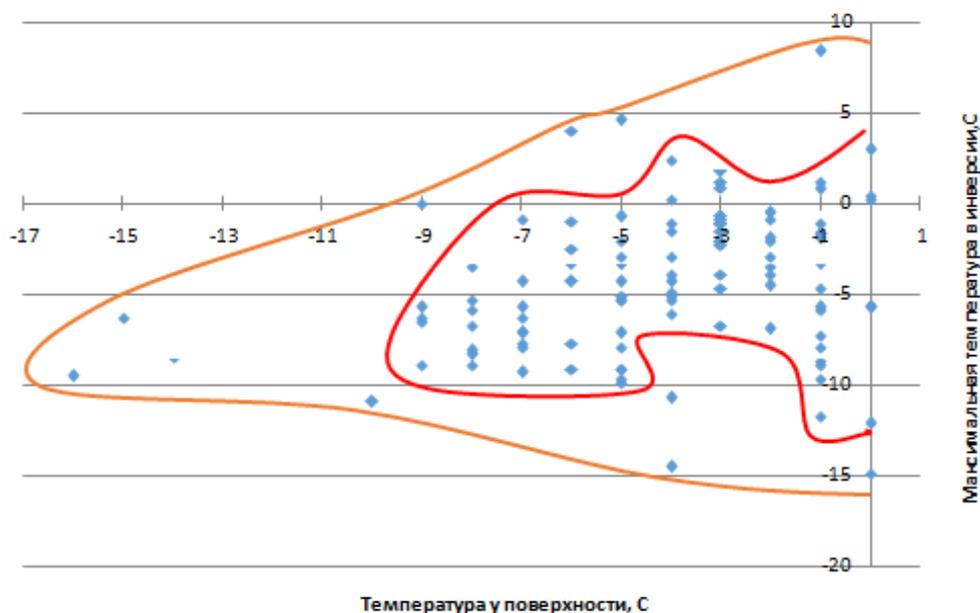


Рисунок 3.5.2 - График для прогноза замерзающих осадков на аэродроме Сыктывкар

Данный график содержит эмпирические значения, полученные за 2017-2022 год. Максимальная температура бралась в наиболее тёплой инверсии, если их наблюдалось несколько.

Маленькое количество точек при положительной температуре объясняется малым количеством данных случаев, при этом такая ситуация является наиболее благоприятной для возникновения замерзающих осадков.

Случаи при температуре -10°C и ниже являются географической особенностью данного региона.

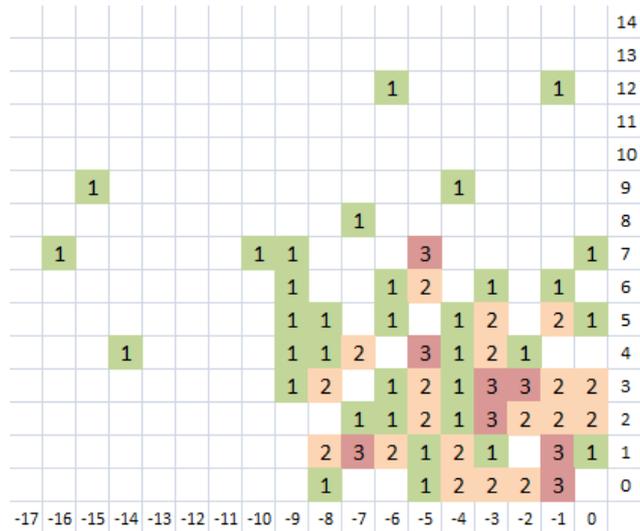


Рисунок 3.5.3 - Распределение случаев наблюдаемых замерзающих осадков при различной температуре (ось абсцисс) от мощности инверсии в градусах Цельсия (ось ординат)

Данное распределение было сделано с целью выявить минимальную мощность инверсии при которой возникают осадки, но как видно из распределения, данную величину вывить не является возможным, так как гололёд довольно часто возникал и при маленькой мощности температурной инверсии.

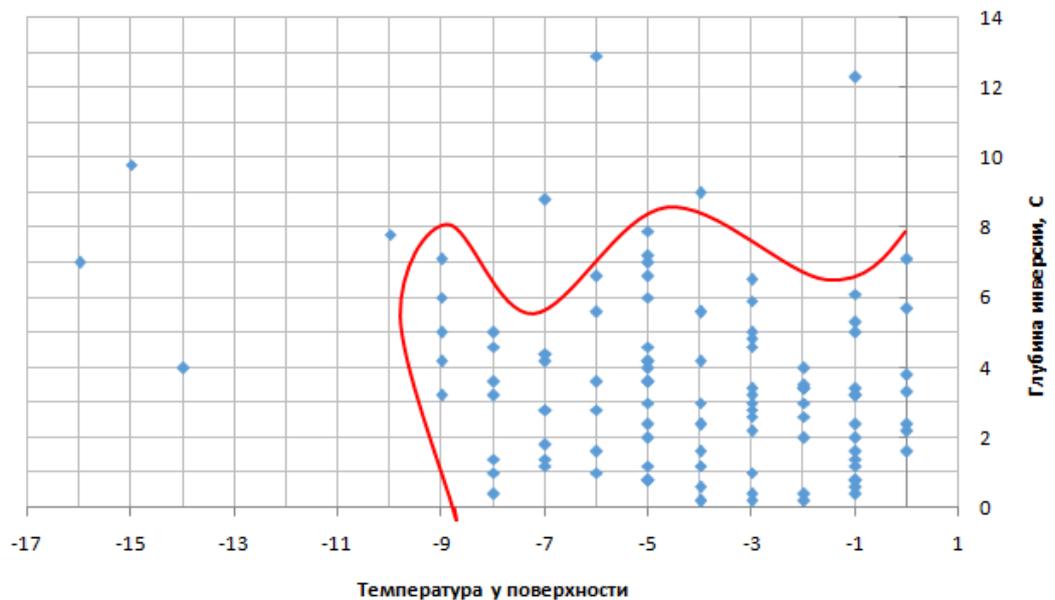


Рисунок 3.5.4 - Зависимость глубины инверсии (°С) от фактической температуры у поверхности

Если мы попробуем провести красным цветом зону, где случаев наблюдалось больше, то будем упускать заведомо более благоприятные случаи при большой мощности инверсии. Следовательно, данный критерий не подходит для прогноза замерзающих осадков.

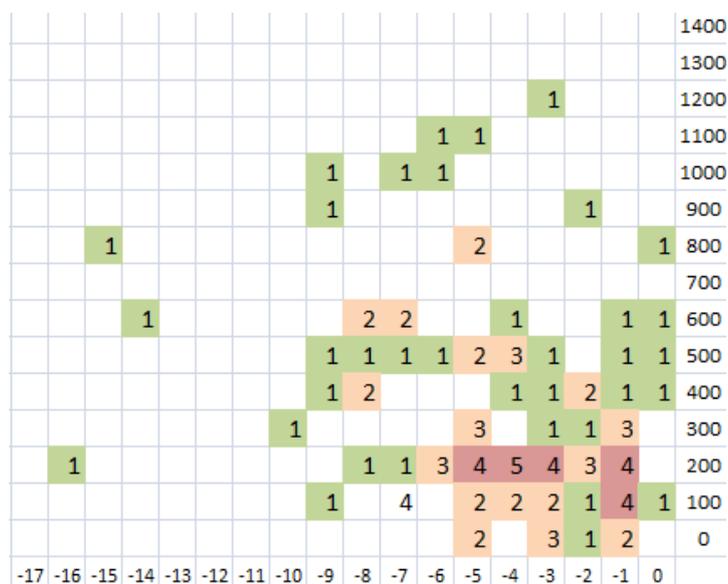


Рисунок 3.5.5 - Распределение случаев наблюдаемых замерзающих осадков при различной температуре (ось абсцисс) от глубины инверсии в метрах (ось ординат)

Данное распределение также было сделано с целью определить границы значений глубины инверсии при наблюдаемых замерзающих осадках, однако полученная граница от 0 до 600 метров даёт слишком сильный разброс для прогноза.

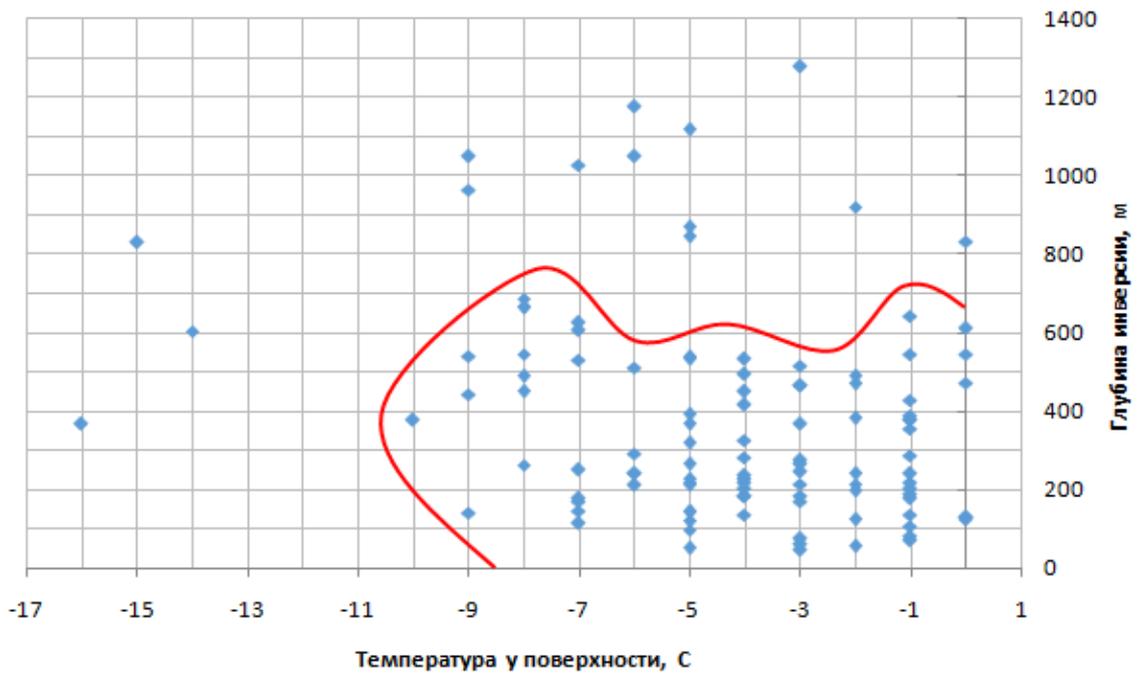


Рисунок 3.5.6 - Зависимость глубины инверсии (м) от фактической температуры у поверхности

Для данного графика высоты были взяты с наибольшей и наименьшей поверхности слоя инверсии, как показано в рисунке 3.5.7.

PRES hPa	HGHT m	TEMP C	DWPT C
1018.0	117	-7.5	-9.9
1000.0	254	-8.7	-10.7
985.0	371	-8.5	-10.3
971.0	485	-5.0	-7.2
947.0	684	1.0	-1.9
936.0	777	3.8	0.6
925.0	873	3.6	-3.4
923.0	890	3.5	-3.7
897.0	1121	2.2	-7.8
875.0	1319	0.4	-8.2
850.0	1550	-1.7	-8.7

Рисунок 3.5.7- Пример значений высоты и температуры в слое инверсии

В основном, замерзающие осадки возникают при инверсии мощностью менее 800 метров. Самая большая глубина инверсии из наблюдаемых случаев составляла 1277 метров.

Полученные данные, что замерзающие осадки идут в основном при глубине инверсии от 0 до 600 метров, а чаще всего при инверсии глубиной 100-200 метров также объясняются и тем, что редко, когда инверсии имеют большую глубину, поэтому эти данные скорее показывают среднее значение для любой инверсии.

Полученный критерий лучше не использовать для прогноза замерзающих осадков из-за ненадежности данных.

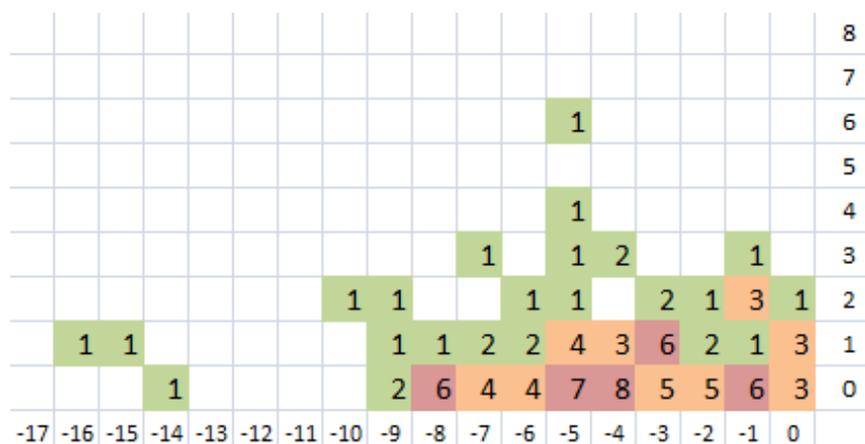


Рисунок 3.5.8- Распределение случаев наблюдаемых замерзающих осадков при различной температуре (ось абсцисс) от изменения температуры в слое инверсии в 1°C на 100 метров (ось ординат)

Распределение на рисунке 3.3.8 было создано с целью выявить нижнюю границу изменения температуры в слое инверсии в 1°C на 100 метров, так как чем сильнее изменяется температура в инверсии, тем больше вероятность возникновения замерзающих осадков.

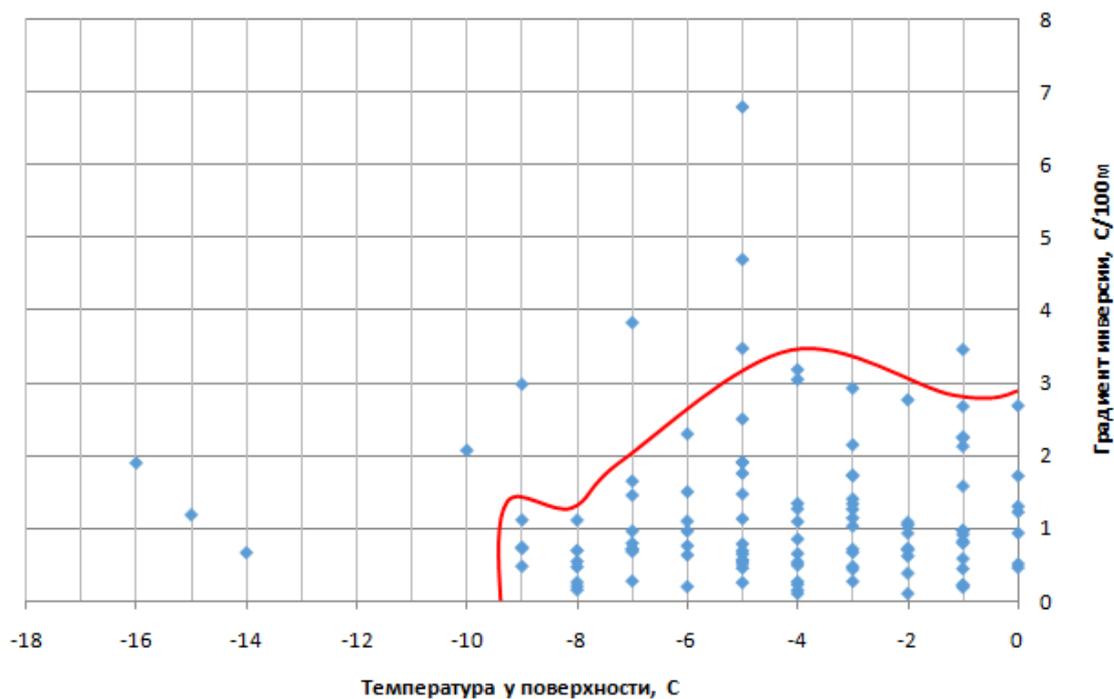


Рисунок 3.5.9- Зависимость изменения температуры в слое инверсии в 1°C на 100 метров от приземной температуры

Красной зоной на данном графике очерчена область с наибольшей повторяемостью замерзающих осадков. Так как явно выделить здесь нижнюю границу значений не представляется возможным, были рассмотрены значения только от 0 до 1.

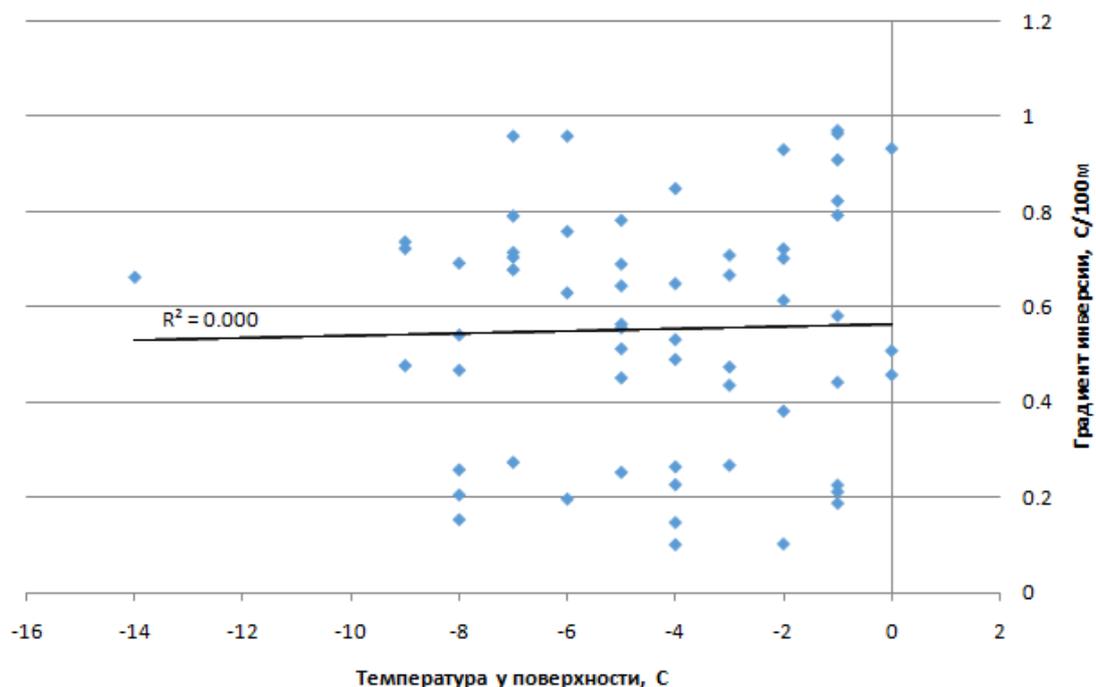


Рисунок 3.5.10- Зависимость изменения температуры в слое инверсии в 1°С на 100 метров от приземной температуры в значениях от 0 до 1

Так как точки были рассредоточены, была проведена линия тренда, но даже её коэффициент достоверности аппроксимации R^2 был равен 0, что означает, что линия тренда не является достоверной.

Таким образом, данный критерий также не подходит для прогноза замерзающих осадков.

3.6 Успешность прогнозов замерзающих осадков на аэродроме «Сыктывкар»

На аэродроме Сыктывкар для прогноза замерзающих осадков используется метод Ягудина.

Всего доступно для изучения было 357 прогнозов с 2019 по 2022 год. Из них 125 прогнозов наличия явления с его фактическим подтверждением, 14 прогнозов, не предсказавших явление, хотя оно наблюдалось, 100 прогнозов перестраховок, когда по прогнозу явление было предсказано, но

фактически не наблюдалось и 118 прогнозов об отсутствии явления и его на самом деле не наблюдалось. Эти данные можно представить в виде матрицы.

	П	$\bar{П}$	Σ
Ф	125	14	139
$\bar{Ф}$	100	118	218
Σ	225	132	357

Таблица 3.6.1 - Матрица успешности прогнозов по методу Ягудина

При этом в данной матрице учитываются случаи оправданного прогноза гололёда, когда явление зафиксировано не на самом аэродроме, а на станциях штормового кольца, то есть на недалеко удалённых от аэродрома станциях. Таких случаев всего было 13, такие прогнозы считаются успешными.

Также был проведён расчёт по критерию точности прогнозов Обухова, с целью выявить насколько высока точность прогнозов методом Ягудина в данном регионе.

$$Q = 1 - \left(\frac{n_{12}}{n_{10}} + \frac{n_{21}}{n_{20}} \right), \quad (3.6.1)$$

где Q – доля успешных прогнозов при известной повторяемости фаз;
 n_{12} – это число неоправдавшихся прогнозов о наличии явления;
 n_{21} – число неоправдавшихся прогнозов о наличии явления, когда оно отсутствовало;
 n_{10} – общее число наблюдавшихся явлений;
 n_{20} – общее число случаев, когда явление не наблюдалось[5].

То есть формула содержит ошибку первого и второго рода. В данном случае, если в результате расчёта мы получаем -1 это означает, что прогноз ошибочный, если получаем 0, то прогноз случайный, а если получаем 1, то прогноз считается идеальным.

Стоит сразу сказать, что идеальных прогнозов не существует, таким образом, всем прогнозам следует лишь стремиться к единице.

Посчитав по данной формуле, мы получим, что $Q=0.44$, что является неплохим результатом для сложнопрогнозируемого явления.

Чтобы разобраться, что именно прогнозируется лучше, а что хуже данным методом рассмотрим оправдываемость всех отдельных частей.

Оправдываемость прогноза факта наличия явления:

$$U_{\text{н.я.}} = \frac{n_{11}}{n_{10}} * 100\% \quad (3.6.2)$$

Предупрежденность факта наличия явления:

$$P_{\text{н.я.}} = \frac{n_{11}}{n_{01}} * 100\% \quad (3.6.3)$$

Оправдываемость прогноза факта отсутствия явления:

$$U_{\text{о.я.}} = \frac{n_{22}}{n_{20}} * 100\% \quad (3.6.4)$$

Предупрежденность факта отсутствия явления:

$$P_{\text{о.я.}} = \frac{n_{22}}{n_{02}} * 100\%, \quad (3.6.5)$$

где n_{11} – это число случаев, когда прогноз предсказал наличие явления;
 n_{22} – количество случаев, когда прогноз предсказал отсутствие явления;

n_{01} – общее количество прогнозов о наличии явления;

n_{02} – общее количество прогнозов об отсутствии явления.

Посчитав по данным формулам, были получены следующие значения:

$$U_{н.я.} = 89.9\%$$

$$P_{н.я.} = 55.6\%$$

$$U_{о.я.} = 54.1\%$$

$$P_{о.я.} = 89.4\%$$

Из этих данных можно сделать вывод, что метод лучше считает случаи с наличием явления, чем с отсутствием.

Также был создан график прогноза замерзающих осадков по эмпирическим значениям на аэродроме «Сыктывкар».

Так как работа проводилась для аэродрома Сыктывкар, а не для всей местности, в данном случае было принято решение убрать из статистики те 13 случаев, когда замерзающие осадки наблюдались вблизи аэродрома, но на самом аэродроме наблюдателями замечены не были. Все те же случаи были рассчитаны и по данному методу, получив как итог следующую матрицу.

	П	$\bar{П}$	Σ
Ф	119	7	126
$\bar{Ф}$	104	114	218
Σ	223	121	344

Таблица 3.6.2 - Матрица оправдываемости прогнозов по предложенному графическому методу

Для данного случая $Q=0,47$, что на $0,03$ больше, чем по методу Ягудина. Следовательно, можно сказать, что точность прогнозов предложенным методом несколько выше, чем методом Ягудина.

$$U_{н.я.}=94.4\%$$

$$P_{н.я.}=53.4\%$$

$$U_{о.я.}=52.3\%$$

$$P_{о.я.}=94.2\%$$

По полученным данным можно судить, что предложенный метод лучше прогнозирует наличие явления и хуже прогнозирует его отсутствие, чем метод Ягудина.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Замерзающие осадки, связанные с прохождением тёплого фронта прогнозировать не так сложно, но когда они возникают по другим факторам, прогноз сильно затрудняется.

Метод прогноза, используемый на метеорологической сети на данный момент (Метод Ягудина) имеет хорошие результаты, но не учитывает местные особенности, поэтому уточнённые методы могут поднять оправдываемость данного явления.

На аэродроме «Сыктывкар» замерзающие осадки могут наблюдаться в октябре по март, с выраженным максимумом в ноябре, декабре и январе.

В основном, синоптической ситуацией, сопровождающей замерзающие осадки, является тёплый фронт(54%) и фронт окклюзии(17%).

В 64% случаев замерзающие осадки наблюдались при наличии в атмосфере температурной инверсии, при этом в большей части случаев температура в инверсии не переходила на положительные значения.

Мощность температурной инверсии при замерзающих осадках, по эмпирическим данным, в основном не превышает 7°C, а глубина инверсии обычно не превышает 600 метров.

Изменение температуры в слое инверсии, приравненное к 1 градусу на 100 метров не даёт точных критериев, которые можно было бы использовать для прогноза возникновения замерзающих осадков.

На аэродроме Сыктывкар по фактическим данным следует расширить температурные границы для прогноза замерзающих осадков до -9°C.

Так как уточнённые методы создаются по эмпирическим данным, то они будут лучше предсказывать наличие явления и хуже его отсутствие.

В дополнение к методу прогноза замерзающих осадков Ягудина был предложен метод, основанный на зависимости максимальной температуры в инверсии от приземной прогностической температуры. Данный метод

рекомендуется использовать совместно с методом прогноза гололёда Ягудина для создания более точного прогноза.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. С. Зверев Синоптическая метеорология 1968 г. с 581-583 с. 619-623
2. В. И. Воробьев Практикум по синоптической метеорологии 1983 г с 218-220
3. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. Часть 1. С. Л. Белоусов с 545-550
4. Богаткин О. Г. Основы авиационной метеорологии. 2009 г. с. 206-210
5. Хандожко Л. А. Экономическая метеорология. 2005 г с.146
6. University of Illinois Urbana-Champaign. Cyclones and Fronts the development of freezing rain. Электронный ресурс. 2010. URL: [http://ww2010.atmos.uiuc.edu/\(Gh\)/guides/mtr/cld/prcp/zr/cond/cyc.rxml](http://ww2010.atmos.uiuc.edu/(Gh)/guides/mtr/cld/prcp/zr/cond/cyc.rxml) (Дата обращения: 06.11.2022).
7. NOAA National Weather Service. Электронный ресурс. URL: https://www.weather.gov/source/zhu/ZHU_Training_Page/winter_stuff/winter_wx/winter_wx.html (Дата обращения: 06.11.2022).
8. Воробьев В.И. Синоптическая метеорология 1991 г. с. 594-596
9. Г.П. Лещенко, Г.В. Перцель, Е.Г. Лещенко. Метеорологическое обеспечение полетов 2010 г с. 30-33
10. Расследование авиационных происшествий и инцидентов, связанных с метеорологическими факторами. Методическое пособие. 2009 г. с. 87-94