



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

Кафедра метеорологических прогнозов

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему: «Анализ условий образования обледенения в районе прогнозирования
АМЦ Архангельск»

Исполнитель Асташкина Надежда Алексеевна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат географических наук, доцент
(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)

«29» мая 2024 г.

Санкт-Петербург
2024

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Сокращения	3
Введение	4
1. Обледенение как опасное явление для авиации	6
1.1 Определение и основные характеристики обледенения	6
1.2 Основные причины образования обледенения	6
1.3 Метеорологические факторы обледенения	6
1.4 Синоптические факторы обледенения	7
1.5 Интенсивность обледенения	7
1.6 Классификация обледенения	8
2. Физико-географическое описание аэродрома Талаги (г. Архангельск)	9
2.1 Географическое описание аэродрома	9
2.2 Характеристики аэродрома	9
3 Анализ случаев с обледенением на аэродроме талаги (г. Архангельск).	11
3.1 Анализ распределения интенсивности обледенения	13
3.2 Анализ распределения обледенения по эшелонам	14
3.3 Анализ диапазона температур за 2020 г.	16
3.4 Анализ распределения синоптических ситуаций	20
3.5 Расчет вероятности возникновения обледенения по методу Годске	23
3.6 Расчет интенсивности обледенения по методу Абрамович К.Г.	35
Заключение	39
Список использованной литературы	42

СОКРАЩЕНИЯ

ВС – воздушное судно

UTC - всемирное координированное время

НГО – нижняя граница облаков

Cb – кучево-дождевая облачность

St – слоистая облачность

Sc – слоисто-кучевая облачность

Ns – слоисто-дождевая облачность

Ac – высоко-кучевая облачность

As – высоко-слоистая облачность

АВ-6 – авиационный журнал

GMT- среднее время по Гринвичу

ИКАО- международная организация гражданской авиации

ULAA- код аэропорта Архангельск

CAT I - категории минимумов при инструментальном заходе на посадку и посадке

АМЦ- авиационный метеорологический центр

FL- эшелон полета

MOD- умеренное

SEV- сильное

ВВЕДЕНИЕ

Характер погоды, ее изменения оказывают значительное влияние на авиацию. От условий погоды зависят подготовка и полеты воздушного судна. Некоторые погодные явления могут сильно усложнить, а иногда и сделать невозможным полет. Обледенение одно из наиболее неблагоприятных метеорологических явлений [2].

Обледенение увеличивает вес воздушного судна, ухудшает аэродинамические характеристики, искажает ряд приборов, выводит из строя системы и двигатели, ухудшает видимость в кабине пилота. Поэтому прогнозирование обледенения занимает важное место в прогнозировании погодных условий полета. Даже при наличии современного оборудования, используемого для обеспечения безопасности полетов, возможность налипания льда на самолет не исключена [3, 2].

Образуется обледенение в результате замерзания переохлажденных облачных или дождевых капель, и реже от сублимации водяного пара.

В случае обледенения различают интенсивность (скорость роста льда), вид и структуру льда образования, а также форму отложения на поверхности ВС [4].

Цель данного исследования - проанализировать условия образования обледенения в районе прогнозирования АМЦ Архангельск, а также оценить эффективность и оправдываемость методов прогноза обледенения с использованием различных методик.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- Создать архив данных случаев обледенения на основе данных журнала бортовой погоды, журнала АВ-6 и данных метеорологического зондирования атмосферы за период 2019 - 2021 гг.

- Рассчитать: число случаев с обледенением, их распределение по интенсивности, месяцам, эшелонам, форме облачности;

- Рассмотреть синоптические ситуации в дни с обледенением;
- Изучить температуру и влажность в зоне образования обледенения;
- Проанализировать взаимосвязь между сопутствующими явлениями погоды и различными барическими образованиями;
- Апробировать методы прогноза обледенения и оценить их успешность.

1. ОБЛЕДЕНЕНИЕ КАК ОПАСНОЕ ЯВЛЕНИЕ ДЛЯ АВИАЦИИ.

1.1. Определение и основные характеристики обледенения

Обледенение - одно из самых опасных метеорологических явлений, от которого зависит безопасность полетов разного вида ВС.

Обледенение- отложение льда на поверхности воздушного судна, главным образом на лобовых частях и лопастях винтов, температура которых не выше 0°C. Из-за этого увеличивается вес ВС, искажаются показания приборов, нарушаются работа двигателя и системы в целом. Этот процесс может сильно ухудшить аэродинамические качества летательного аппарата, а иногда привести к авиационным происшествиям [1, 2, 4].

Обледенению подвержены не только самолеты, но и разного вида ВС, как в полете, так и на стоянке [3, 2].

1.2. Основные причины образования обледенения

Обледенение возникает, когда в воздухе на высоте полета присутствуют переохлажденные облачные капли, а поверхность летательного аппарата имеет отрицательные температуры (учитывая кинетическое нагревание) - это самый распространенный и опасный случай. Также обледенение возможно вследствие сублимации водяного пара при резком снижении воздушного судна в более теплый, влажный воздух [1, 3].

1.3. Метеорологические факторы обледенения

Обледенение может происходить в диапазоне температур от +2 до -50°C, при этом наиболее часто встречается в облаках, тумане, мокром снеге и переохлажденных осадках с температурой от 0 до -20°C [1, 3].

Обледенение возникает если:

- температура поверхности самолета отрицательная, а в воздухе присутствует сконденсированная влага (разного вида осадки и облака).
- температура воздуха в диапазонах от 0 до -20°C и от 0 до -10°C.
- облачность высотой до 2500 м, состоящая из переохлажденных капель и кристаллов [1, 3].

1.4. Синоптические факторы обледенения

Наиболее частое, опасное и интенсивное обледенение ВС наблюдаются в зоне атмосферных фронтов. Это связано с большой протяженностью фронта и наличием в его облачности значительного количества переохлажденных осадков [3].

В зоне холодного фронта, обледенение наблюдается в теплом воздухе, а его интенсивность зависит от типа фронта. Умеренная интенсивность обледенения бывает на холодном фронте первого рода, а сильная интенсивность на холодном фронте второго рода. На теплом фронте, также, как и на холодном, обледенение встречается в теплом воздухе (от -10 до -20°C). На фронте окклюзии обледенение происходит в точке окклюзии около холодного фронта.

Во внутримассовой облачности, обледенение зависит от водности и формы облака [1].

1.5. Интенсивность обледенения

Скорость нарастания льда, толщина слоя льда на ВС в единицу времени называется интенсивностью обледенения. Измеряется интенсивность в миллиметрах в минуту [2].

Различают слабое (не более 0,5 мм/мин), умеренное (от 0,5 до 1,0 мм/мин) и сильное обледенение (от 1,0 до 1,5 мм/мин и больше). Степень нарастания льда зависит от интенсивности обледенения, скорости самолета и продолжительности полета в зоне опасного явления [4].

1.6. Классификация обледенения

Виды обледенения: прозрачный лед, матовый лед, белый лед, изморозь и иней.

Прозрачный лед возникает при температурах от 0 до -5°C , когда самолет проходит под или в облачности, состоящей из крупных переохлажденных капель.

Матовый лед наблюдается при температурах от -5 до -10°C , когда ВС летит в облаках, состоящих из капель различной величины.

Белый лед возникает при температуре ниже -10°C , в облаке состоящем из однородных маленьких капель.

Изморось наблюдается при температуре ниже -10°C , когда при полете в облаках замерзают капли и ледяные кристаллы.

Иней возникает в процессе сублимации [3].

По форме отложения льда различают: профильное (ниже -20°C), желобковое (от -5 до -8°C) и хаотическое (немного ниже или выше 0°C) [1].

2. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ АЭРОДРОМА ТАЛАГИ (АРХАНГЕЛЬСК).

2.1. Географическое описание аэродрома

Аэропорт Талаги (Архангельск) является крупнейшим аэропортом федерального значения в регионе. Аэродром занимает площадь около 1.5 тысяч гектар и имеет две взлетно-посадочные полосы. Расположен в Талажском Авиагородке в 6 км к северо-востоку от города, с высотой 19 метров над уровнем моря.

Архангельск находится на берегу Северной Двины одной из крупнейших судоходных рек на севере России. Климат - умеренный, морской. Он формируется в условиях малой солнечной радиации, под влиянием воздушных течений с Атлантического океана. Средняя температура января составляет -12,8°C, июля +16,3°C. Годовое количество осадков составляет 607мм. Среднегодовая температура +1,3°C.

Для Архангельска характерна сильная изменчивость погодных условий, высокая влажность и частые выпадения осадков [7].

2.2. Характеристики аэродрома

Часовой пояс GMT: UTC +3

Координаты аэропорта: 64°36'01" с. ш. 40°43'00" в. д.

Местоположение: Талажский Авиагородок, в 6 км к северо-востоку от города

Высота над уровнем моря: 19 м

Индекс местоположения аэродрома по ИКАО: ULAA

Магнитное склонение: 16°восточное

Взлетно-посадочные полосы аэропорта:

Курс 80°/ 260°

Маркировка 08/26

Размеры, м 2500x44

Категория ИКАО САТ I

Магнитные курсы посадки 081/261

Покрытие Асфальтобетон

Класс В [7].

На рисунке 1 представлена схема аэродрома Талаги.

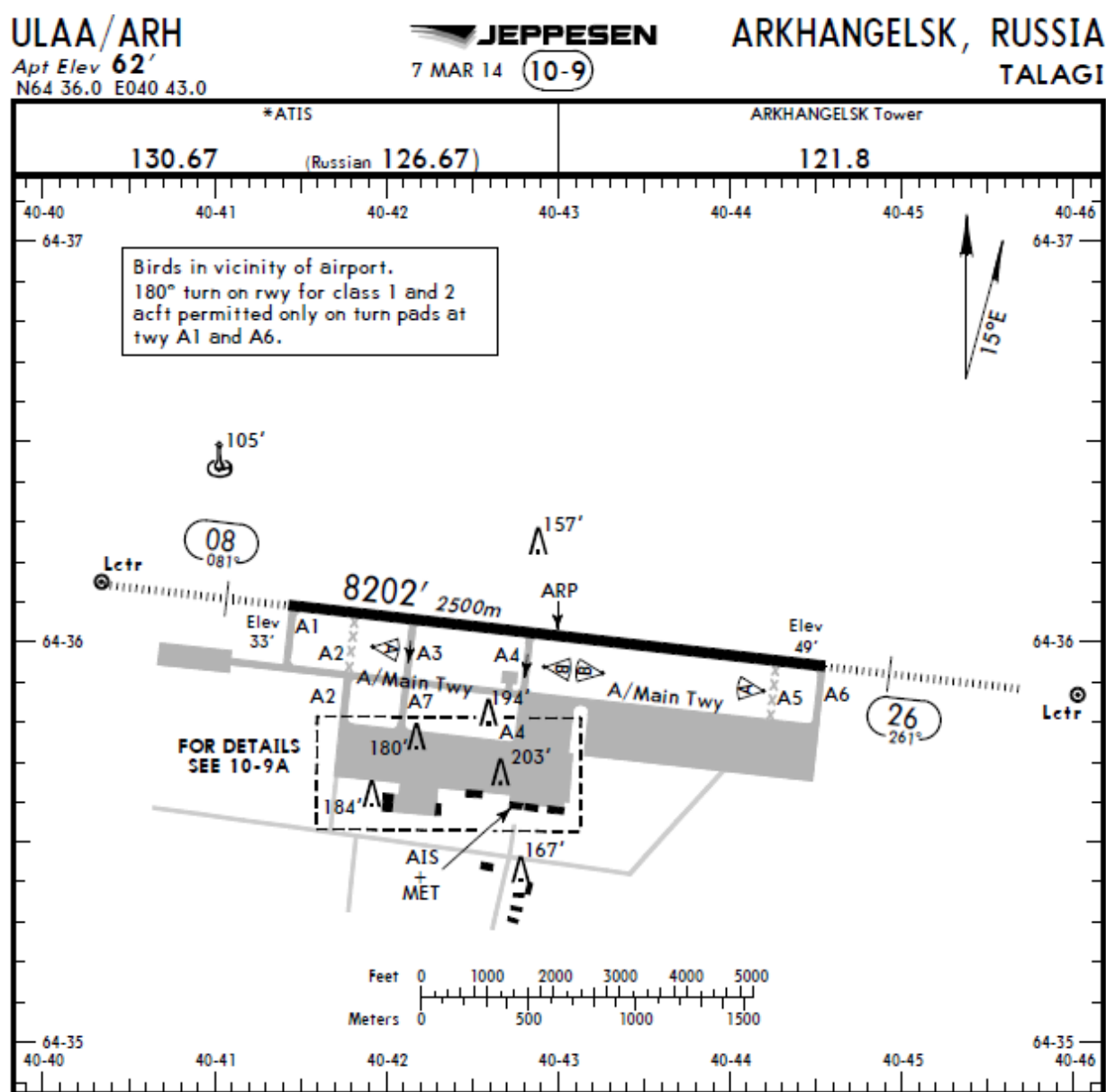


Рисунок 1- Схема размещения аэродрома Талаги

3. АНАЛИЗ СЛУЧАЕВ С ОБЛЕДЕНЕНИЕМ НА АЭРОДРОМЕ ТАЛАГИ (Г. АРХАНГЕЛЬСК).

В таблице 1 и на рисунке 2 представлено количество случаев обледенения на аэродроме Архангельск за период с 2019-2021 гг.

Таблица 1– Повторяемость случаев с обледенением по месяцам за период с 2019-2021 гг.

	2019	2020	2021	количество явлений в каждом месяце	повторяемость
январь	-	24	8	32	12
февраль	19	21	9	49	19
март	12	8	4	24	9
апрель	2	3	7	12	5
май	11	5	4	20	8
июнь	1	2	1	4	2
июль	-	1	1	2	1
август	4	1	-	5	2
сентябрь	3	1	2	6	2
октябрь	8	7	5	20	8
ноябрь	16	11	8	35	13
декабрь	16	19	18	53	20
итого	92	103	67	262	100

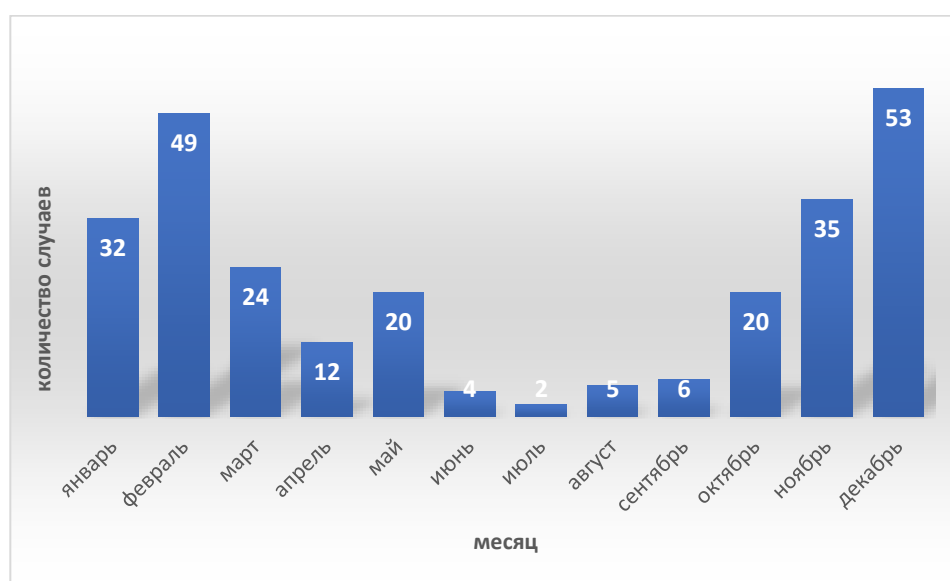


Рисунок 2- Количество случаев обледенения в период с 2019-2021 гг.

На представленной диаграмме изображена повторяемость случаев с обледенением по месяцам в АМЦ Архангельск за период с 2019-2021 гг. (Рисунок 3).

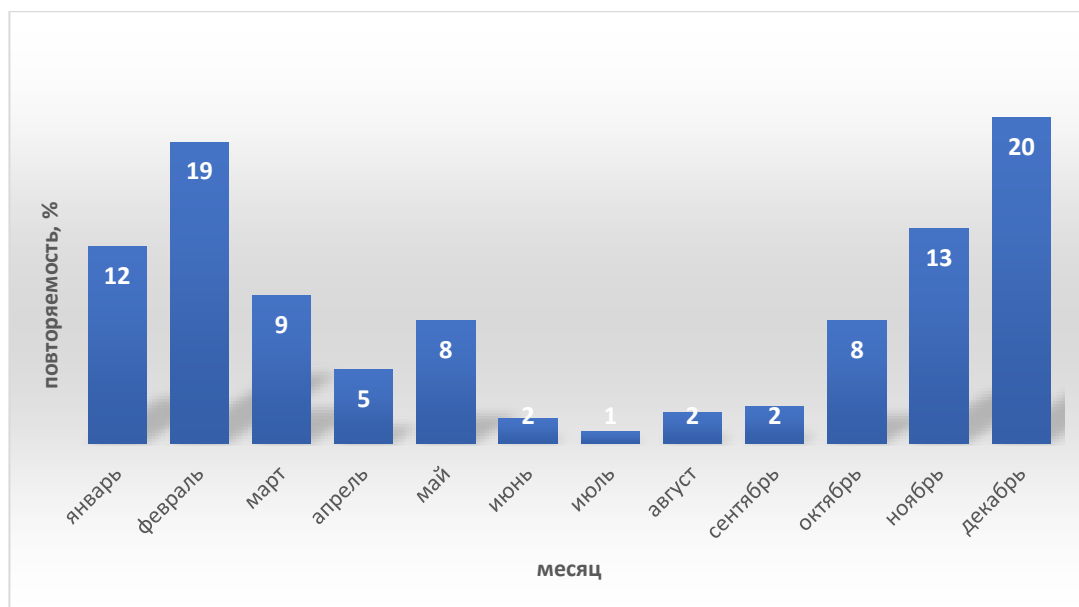


Рисунок 3 – Повторяемость случаев обледенения за период с 2019-2021 гг.

Годовое распределение по месяцам за весь период исследования показало количество и повторяемость обледенения в осенне-зимний период более высоким. Сумма явлений с ноября по февраль составила 169 случаев, 65% (Таблица 1). Это связано с наличием разного вида осадков, большой влажностью и низкой температурой окружающего воздуха в диапазоне от 0°C до -20°C и меньше. В это время года форма облаков St и Sc являются преобладающими над континентом. Такие облака в большинстве случаев являются водяными переохлажденными или смешанными, или кристаллическими. Этим объясняется большая вероятность обледенения в осенне-зимний период.

В период с марта по октябрь обледенение отмечалось реже - 35% или 93 случаев (Рисунок 3).

3.1. Анализ распределения интенсивности обледенения

Принято считать обледенение слабым, когда лед откладывается со скоростью от 0,01 до 0,5 мм/мин, умеренным —от 0,51 до 1,0 мм/мин и сильным при отложении льда больше 1,0 мм/мин. В большинстве случаев во время полета в облаках преобладает слабая или умеренная интенсивность обледенения [5].

Рассмотрим распределение интенсивности обледенения в АМЦ Архангельск за период с 2019-2021 гг. (Таблица 2) и (Рисунок 4).

Таблица 2 – Распределение обледенения по интенсивности

	количество явлений			повторяемость		
	слабое	умеренное	сильное	слабое %	умеренное %	сильное %
2019-21						
январь	14	16	2	5.3	6.1	0.8
февраль	19	24	6	7.3	9.2	2.3
март	12	11	1	4.6	4.2	0.4
апрель	6	6	0	2.3	2.3	0.0
май	8	11	1	3.1	4.2	0.4
июнь	1	3	0	0.4	1.1	0.0
июль	2	0	0	0.8	0.0	0.0
август	4	1	0	1.5	0.4	0.0
сентябрь	0	6	0	0.0	2.3	0.0
октябрь	7	12	1	2.7	4.6	0.4
ноябрь	13	22	0	5.0	8.4	0.0
декабрь	25	25	3	9.5	9.5	1.1
итого	111	137	14	43	52	5

Из таблицы 2 видно преобладающее количество умеренного обледенения- 137 случаев, что составляет 52%. Немного меньше наблюдалось слабого обледенения- 111 явлений или 43%.

Вероятно, преобладающее количество этих интенсивностей связано с наличием достаточной влаги в воздухе (разновидность осадков, облака) и отрицательными температурами воздуха, и поверхности ВС.

Ниже представлена повторяемость интенсивности обледенения за период 2019-2021 гг. (Рисунок 4).

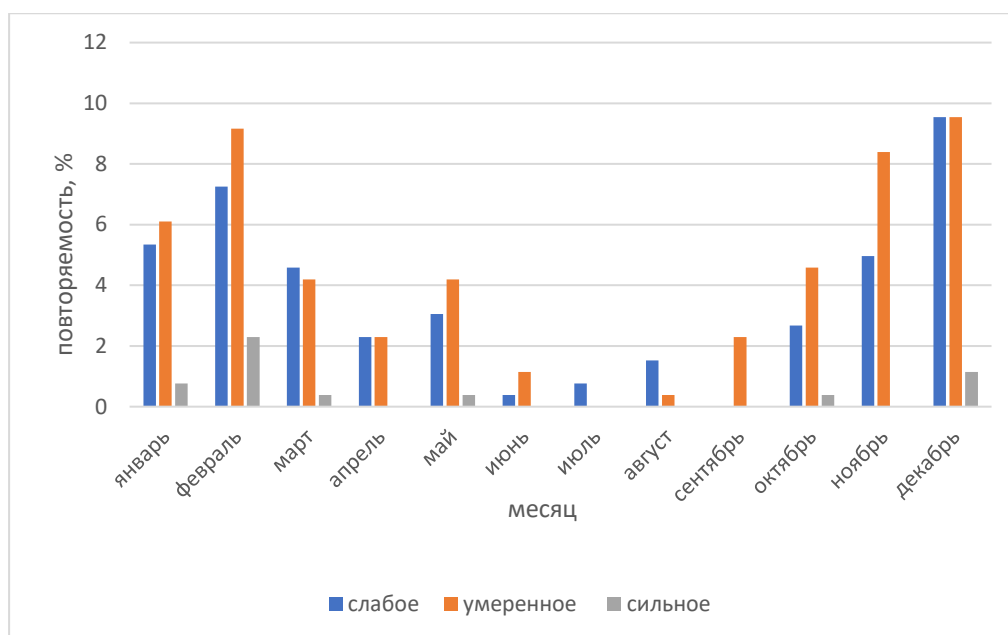


Рисунок 4 - Повторяемость интенсивности обледенения по месяцам

Сильное обледенение составило всего 5% - 14 случаев (Рисунок 4). Такая интенсивность возможна, если фронтальные или внутримассовые облака не распространяются выше уровня изотермы -10° , или если такие облака имеют характер кучево-дождевых, то сильное обледенение в них возможно на больших высотах при температуре ниже -35°C .

3.2. Анализ распределения обледенения по эшелонам

По данным бортовой погоды области прогнозирования АМЦ Архангельск, были рассмотрены случаи обледенения на различных высотах за период 2019-2021 гг.

В таблице 3 и на рисунке 5 представлена повторяемость обледенения по эшелонам на аэродроме Архангельск за весь исследуемый период.

Таблица 3- Распределение обледенения по эшелонам

2019-21	эшелон				повторяемость			
	FL 0-50	FL 51-100	FL 101-200	FL <200 (300)	FL 0-50	FL 51-100	FL 101-200	FL <200 (300)
январь	26	3	3	0	9.9	1.1	1.1	0.0
февраль	29	15	3	2	11.1	5.7	1.1	0.8
март	15	6	0	3	5.7	2.3	0.0	1.1
апрель	5	5	0	2	1.9	1.9	0.0	0.8
май	4	10	5	1	1.5	3.8	1.9	0.4
июнь	1	0	3	0	0.4	0.0	1.1	0.0
июль	1	0	0	1	0.4	0.0	0.0	0.4
август	1	2	1	1	0.4	0.8	0.4	0.4
сентябрь	0	4	2	0	0.0	1.5	0.8	0.0
октябрь	7	7	3	3	2.7	2.7	1.1	1.1
ноябрь	23	10	1	1	8.8	3.8	0.4	0.4
декабрь	27	15	10	1	10.3	5.7	3.8	0.4
итого	139	77	31	15	53	29	12	6

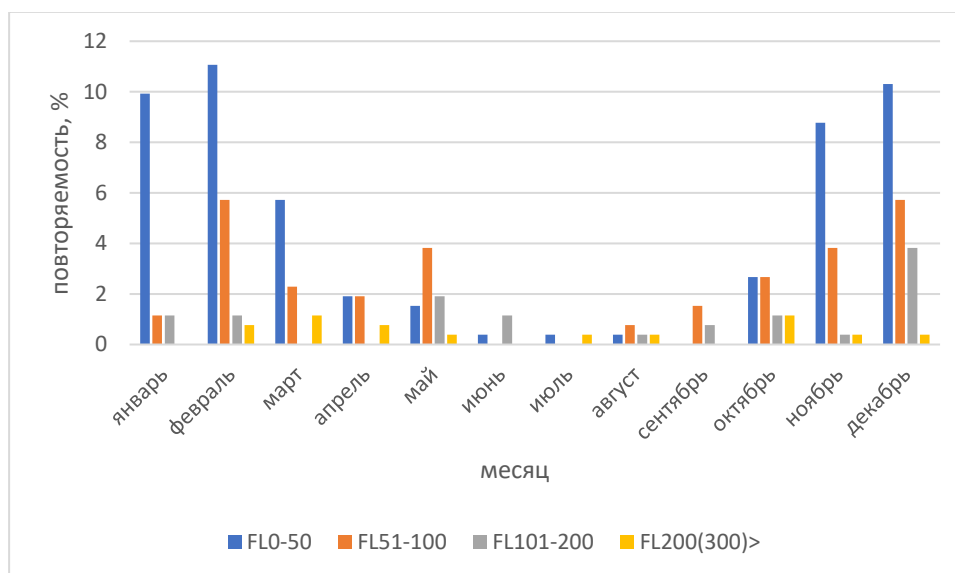


Рисунок 5- Повторяемость по эшелонам с 2019-2021 гг.

Наибольшее количество случаев обледенения наблюдается в осенне-зимние месяцы на эшелонах FL0-50 и FL51-100, а наименьшее количество случаев (на эшелонах FL101-200 и выше) в теплое время года (Рисунок 5).

По данным таблицы 3 можно сделать вывод, что наибольшее количество случаев с обледенением (139) наблюдалось на эшелонах FL0-50 (от 0 до 1500

метров) с повторяемостью 53%. В холодную половину года обледенение наиболее вероятно в нижнем слое тропосферы в облаках, состоящих из переохлажденных водяных капель. Воздушное судно, находясь в нижней половине тропосферы (при взлете или посадке), обычно имеет небольшие скорости 400—500 км/час. При таких скоростях кинетический нагрев воздушного судна еще недостаточно большой, чтобы перекрыть низкие температуры окружающего воздуха.

На эшелоне FL51-100 (от 1530 до 3000 метров) повторяемость составила 29% (77 случаев). Для этих высот характерно наличие фронтальной и внутримассовой облачности, а также переход воздушного судна слоя инверсии.

В верхней половине тропосферы, в перисто-слоистых и перистых облаках, обледенение вероятно, когда в связи с развитием вертикальных движений облака приобретают форму кучево-дождевых. При этом интенсивное обледенение может наступить при очень низкой температуре воздуха, до -40°C .

31 случай с повторяемостью 12% был зафиксирован на высоте FL101-200 (3030- 5000 метров).

Выше эшелона FL200 (6000 метров) наблюдалось всего 15 случаев (6%). Это связано с наличием в большей степени ледяных кристаллов, нежели переохлажденных капель в облаке на этих высотах.

3.3. Анализ диапазона температур за 2020 г.

Рассмотрим диапазон температур для случаев с обледенением на АМЦ Архангельск за 2020 год (Таблица 4).

Данные температуры были также взяты из данных радиозондов за год с наибольшим количеством случаев обледенения (2020 г.).

Таблица 4- Диапазон температур для случаев с обледенением на АМЦ
Архангельск за 2020 г.

	диапазон температур			
2020г.	больше 0	от 0 до -10	от -10 до -20	меньше -20
январь	0	16	6	2
февраль	0	15	4	2
март	0	4	2	2
апрель	0	2	1	0
май	0	2	1	2
июнь	0	1	1	0
июль	0	0	0	1
август	0	0	0	1
сентябрь	0	0	1	0
октябрь	2	4	1	0
ноябрь	1	6	3	1
декабрь	0	9	9	1
итого	3	59	29	12
итого в %	3	57	28	12

На рисунке 6 указана повторяемость диапазона температур для прогноза обледенения на АМЦ Архангельск за 2020 г.

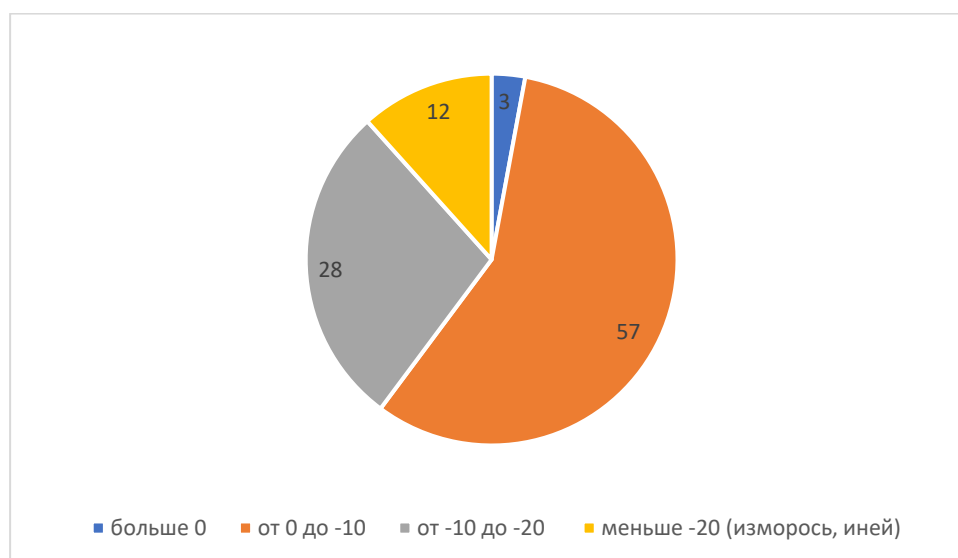


Рисунок 6 - Диапазон температур для прогноза обледенения за 2020 г.

По данным таблицы можно сделать вывод, что наибольшее количество случаев с обледенением наблюдалось при температурах от 0 до -10°C (59 случаев или 57%). Эти значения температуры являются наиболее опасными в отношении обледенения, так как чаще всего встречаются в самых нижних слоях тропосферы. Отсюда следует, что обледенение наиболее вероятно до высоты приблизительно 3 км. Обледенение будет встречаться при этом чаще всего в слоистых облаках.

В диапазоне температур от -10 до -20°C было зафиксировано 29 случаев, 28%. Обледенение при таких температурах может наблюдаться в высококучевых облаках, располагающиеся обычно выше 3 км. Капли в этих облаках могут существовать в переохлажденном состоянии при температурах значительно ниже -10°C , поэтому можно встретить обледенение, иногда до сильного.

Обледенение при температуре больше 0°C наблюдалось всего в 3 случаях, 3%. При таких температурах обледенение возможно, если реактивный двигатель воздушного судна работает на больших оборотах, происходит уменьшение давления и охлаждение воздуха в воздухозаборнике. В условиях высокой относительной влажности наружного воздуха при температурах 0°C и выше из-за конденсации может начаться интенсивное образование льда (Рисунок 6) [1].

12 случаев (12%) с обледенением наблюдались при температуре -20°C и меньше.

Как уже сказано выше, обледенение наиболее часто встречается в облаках, тумане, мокром снеге и переохлажденных осадках в диапазоне температур от 0 до -20°C . Поэтому отдельно рассмотрим случаи с обледенением при температуре -20°C и ниже (Таблица 5).

Таблица 5 - Случаи с температурой ниже -20 °С

Случаи с t ниже -20					Тропопауза	
Температура	Дата	Срок	Давление	Высота	Давление	Температура
-25.9	12.01	0	500	5250	265	-59
-34.6	21.01	12	499	5064	243	-57
-53.7	9.02	12	300	8810	220	-67
-21.9	29.02	0	649	3243	274	-59
-27.1	16.03	0	475	5693	201	-63
-51.9	25.03	12	278	9554	222	-63
-51.5	15.05	12	344	7805	344	-51
-22	21.05	0	545	4807	276	-55
-22.1	6.07	12	398	7276	194	-52
-20.5	29.08	12	468	6083	231	-59
-34.1	28.11	12	399	7178	198	-64
-20.9	25.12	12	672	3161	213	-69

Обледенение при температурах ниже -20°С может наблюдаться в облачности, в которой несмотря на переконденсацию капель на кристаллы и выпадение осадков, происходит непрерывное поступление влаги, в связи с этим быстрое укрупнение новых капель. В таком облаке, несмотря на осадки, будут находиться кристаллы в смеси с большим количеством капель. Если внутримассовые или фронтальные облака имеют характер кучево-дождевых, то обледенение в них возможно на больших высотах.

Для анализа случаев обледенения с температурой ниже -20°С, были рассмотрены данные радиозондирования и облачности с сайта РП5 (Таблица 5) [10].

Из таблицы видно, что все случаи не превышали высоты тропопаузы, а значит есть вероятность наличия облаков на этих высотах, так как обледенение возможно при наличии облачности, где температура ниже 0°С.

Рассмотрим облачность в сроки с обледенением при -20°С и ниже.

В большинстве случаев наблюдалась слоисто-дождевая и высокослоистая облачность (Ns, As). В них содержатся кристаллы или кристаллы в смеси с очень мелкими каплями. Обледенение в таких облаках либо совсем отсутствует, либо имеет очень небольшую интенсивность.

Также наблюдались кучево-дождевые облака (Cb). Этот вид облачности может вызвать сильное обледенение, причем оно возможно при температуре до -40°C.

В случаях, где наблюдалась высококучевая облачность (Ac), капли могут существовать в облаках в переохлажденном состоянии при температурах до -30°C.

3.4. Анализ распределения синоптических ситуаций

Для определения синоптических ситуаций со случаями обледенения, был выбран архив карт погоды wetter3.de, рассчитанный на основе данных модели GFS в США и модели немецкой метеорологической службы ICON, а также других моделей [8].

На рисунке 7 и в таблице 6 указана повторяемость и количество синоптических ситуаций на аэродроме Архангельск за 3 исследуемых года.

Таблица 6 - Синоптические ситуации в период с 2019-2021 гг.

Синоптическая ситуация	количество
центр циклона	30
юж. Часть циклона	45
тыловая часть циклона	6
передняя часть циклона	14
теплый фронт	19
холодный фронт	8
фронт окклюзии	14
антициклон	27
гребень	20
ложбина	30
седловина	18
малоградиентное поле	25
теплый сектор	6
Всего	262

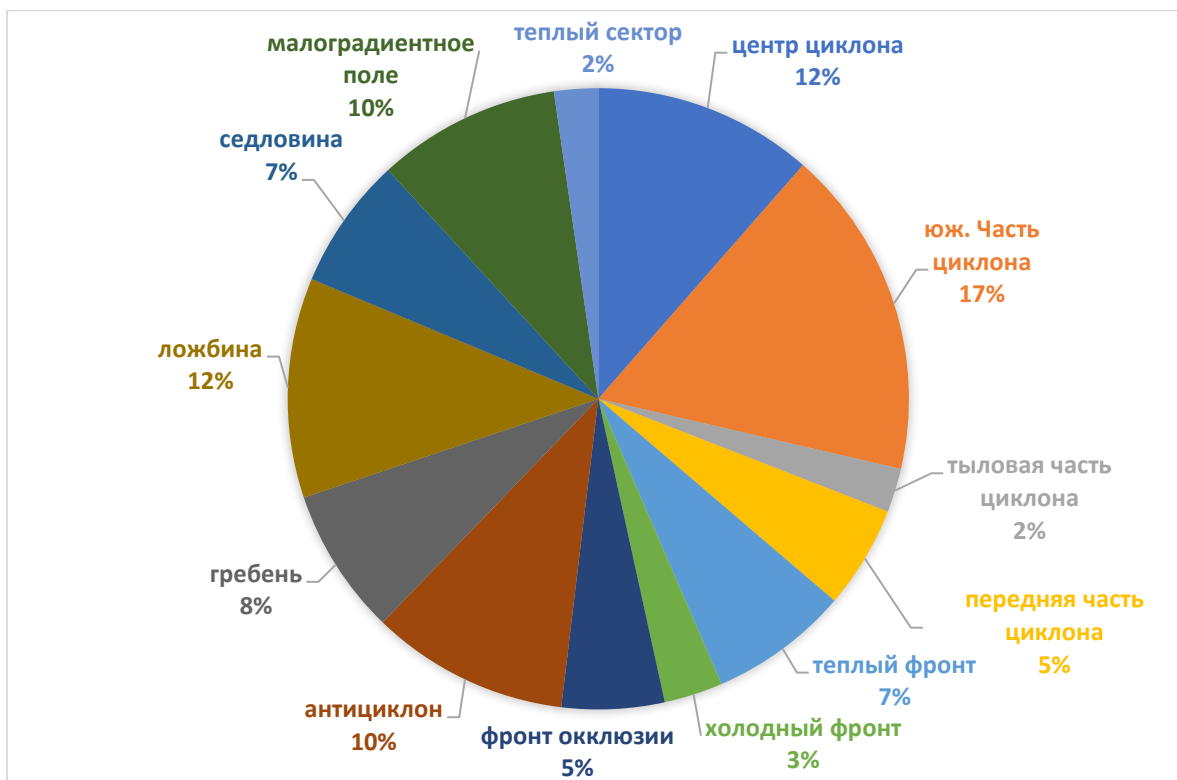


Рисунок 7 - Повторяемость синоптических ситуаций

По данным таблицы 6 и рисунку 7 можно сделать вывод, что наибольшее количество случаев с обледенением (172 случаев или 65%) наблюдалось в зоне пониженного давления, а остальные синоптические ситуации с обледенением составили 35% (Рисунок 7).

В зоне низкого давления (172 случаев или 65%) с наибольшей повторяемостью были определены следующие синоптические ситуации: южная часть циклона (17%), центр циклона (12%) и ложбина (12%). Из фронтов с наибольшей повторяемостью наблюдался теплый фронт -7% (Таблица 6). Для этого фронта обледенение характерно от самой нижней своей части, до высоты значительного понижения облачности (1-1,5 км).

В остальных барических образованиях повторяемость обледенения составила 35% или 90 случаев, из которых с наибольшей повторяемостью наблюдались антициклон (10%) и малоградиентное поле (10%) (Рисунок 7). Для малоградиентного поля характерны низкие значения барических градиентов

повышенного или пониженного давления и возникающие при конвекции осадки внутримассового характера.

Приведем пример синоптической ситуации при которой было зафиксировано обледенение. 21.11.2021 г. в 06:48ч. по UTC. В 00:00, погоду аэродрома Архангельск определял центр циклона (Рисунок 8).

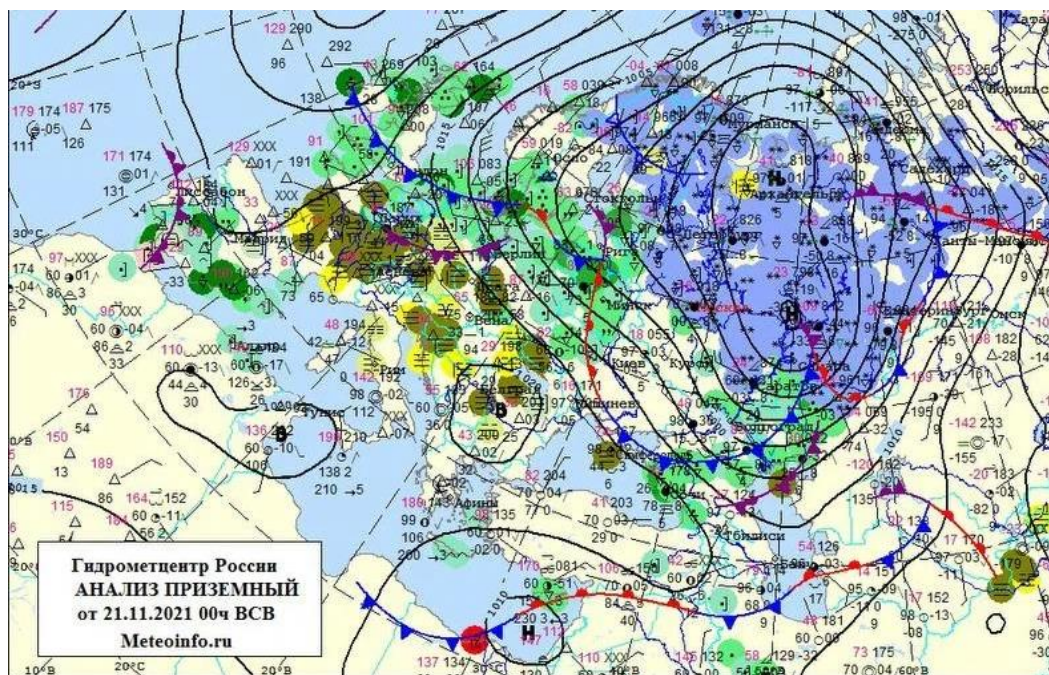


Рисунок 8 – Приземная карта погоды от 21.11.2021. 00 ВСВ

Циклон, определявший погоду Архангельска 21 ноября 2021 года, располагался над центральной частью Европы и носил в себе два центра. Первый центр данного циклона находился в районе Архангельска, а второй (с фронтальной системой) над Самарской областью. В районе Архангельска наблюдались осадки в виде снега, местами туман (Рисунок 8).

По данным зондирования за срок 00ч. в приземном слое атмосферы Архангельска наблюдалось: давление 978 гПа, температура -2.7°C , дефицит точки росы составлял -3.7°C и влажность воздуха 93%.

3.5. Расчет вероятности возникновения обледенения по методу Годске

Для расчетов по этому методу были взяты данные радиозондов, запускаемых на аэродроме два раза в сутки. Они позволяют дистанционно измерить основные метеорологические параметры атмосферы, такие как температура воздуха, точка росы, относительная влажность и т.д.

За весь исследуемый период (2019-2021 гг.), был выбран год с наибольшим количеством случаев обледенения (2020 г.). По данным бортовой погоды области прогнозирования АМЦ Архангельск, были произведены расчеты оправдываемости метода Годске.

Ниже указаны данные для расчетов (Таблица 7) и результаты расчетов (Таблица 8) по этому методу за 2020 год.

Таблица 7 - Расчет оправдываемости метода Годске по данным АМЦ Архангельск за 2020 г.

Дата	Эшелон полета***	Интенсивность	t	td	Тн.л.
07.01.2020	0-50FL	слабое	-5.3	-5.8	-4
	0-50FL	слабое	-5.3	-5.8	-4
08.01.2020	0-50FL	умеренное	-3.1	-3.4	-2.4
	0-50FL	слабое	-4.3	-4.3	0
09.01.2020	51-100FL	умеренное	-18.3	-25.2	-55.2
10.01.2020	0-50FL	слабое	-10.3	-11.3	-8
	0-50FL	умеренное	-10.3	-11.3	-8
12.01.20	101-200FL	сильное	-25.9	-28.1	-17.6
14.01.2020	0-50FL	слабое	-4.5	-6	-12
	0-50FL	слабое	-4.5	-6	-12
	0-50FL	умеренное	-4.5	-6	-12
	0-50FL	умеренное	-9.8	-11.8	-16
15.01.2020	0-50FL	умеренное	-9.8	-11.8	-16
	0-50FL	слабое	-1.2	-1.7	-4
	0-50FL	умеренное	-8.9	-9.2	-2.4
20.01.2020	0-50FL	слабое	-5.9	-5.9	0
	0-50FL	слабое	-6.7	-7.1	-3.2
	0-50FL	умеренное	-6.1	-6.5	-3.2
	0-50FL	умеренное	-6.1	-6.5	-3.2
21.01.2020	51-100FL	слабое	-12.3	-12.3	0
	101-200FL	умеренное	-34.6	-36.8	-17.6
	0-50FL	слабое	-2.7	-2.7	0
24.01.2020	101-200FL	умеренное	-18.1	-18.9	-6.4
25.01.20	51-100FL	слабое	-17.7	-19.4	-13.6
02.02.2020	0-50FL	умеренное	-6	-7.3	-10.4
	0-50FL	умеренное	-6	-7.3	-10.4
03.02.2020	0-50FL	слабое	-6.3	-8.6	-18.4
	0-50FL	слабое	-6.3	-8.6	-18.4
08.02.2020	0-50FL	слабое	-11.5	-12.5	-8
	0-50FL	слабое	-11.5	-12.5	-8
09.02.2020	0-50FL	слабое	-4.8	-6.2	-11.2
	0-50FL	слабое	-3.8	-5.3	-12
	0-50FL	слабое	-3.8	-5.3	-12
	51-100FL	умеренное	-5.8	-12.8	-56
	51-100FL	умеренное	-6.3	-13.3	-56
	200(300)FL	слабое			
	>		-53.7	-60.7	-56

Прогноз обледенения по формуле 1:

$$T_{\text{н.л.}} = -8D = -8(T - T_d), \quad (1)$$

где: $T_{\text{н.л.}}$ - температура насыщения над льдом
 D - дефицит температуры точки росы на уровне
 T - температура
 T_d - точка росы

В случае если температура насыщения надо льдом выше температуры окружающего воздуха, то велика вероятность наличия обледенения на этом уровне [1].

Таблица 8 - Прогноз обледенения по формуле Годске в 2020 г.

2020г.	прогноз по формуле Годске	
	верный	ложный
январь	17	7
февраль	3	18
март	1	7
апрель	1	2
май	1	4
июнь	0	2
июль	0	1
август	0	1
сентябрь	0	1
октябрь	1	6
ноябрь	2	9
декабрь	10	9
итого	36	67
итого в %	35	65

На рисунке 9 указана повторяемость общей оправдываемости метода Годске.

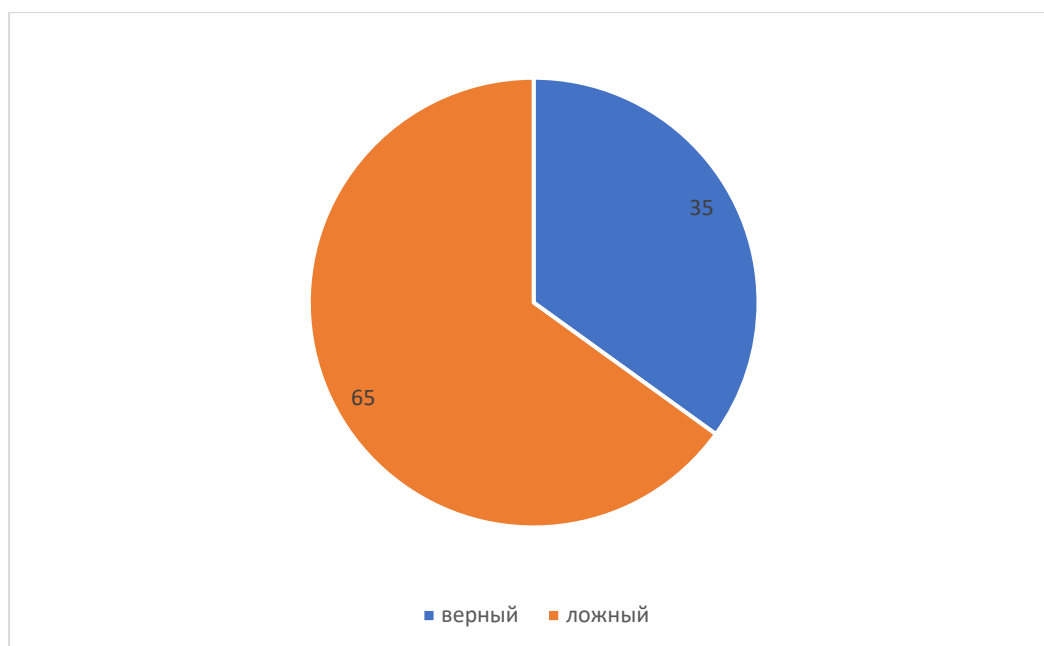


Рисунок 9 - Оправдываемость прогноза по формуле Годске

Общая оправдываемость по методу Годске за 2020 год составила всего 35% или 36 случаев, фактически было зафиксировано 103 случая (Рисунок 9). Вероятнее всего причиной таких результатов послужил большой промежуток времени (12 часов) между сроками измерений радиозондов, с которых были взяты данные для расчетов. Такая периодичность запуска радиозонда не дает диагностику вертикального профиля атмосферы в режиме реального времени.

Исходя из рекомендаций Годске (использования своего метода прогноза до высоты 2000м), отдельно были рассмотрены случаи с отсутствием и наличием обледенения до указанной высоты за 2020 год.

Для расчетов по этому методу (до высоты 2000м), были также взяты данные радиозондов, запускаемых на аэродроме два раза в сутки и также был выбран год с наибольшим количеством случаев обледенения (2020г.).

По данным бортовой погоды области прогнозирования АМЦ Архангельск, были произведены расчеты оправдываемости метода Годске. Ниже указаны данные для расчетов (Таблица 9) и результаты расчетов (Таблица 10) по этому методу (Формула 1) до высоты 2000м для случаев с фактически отсутствующим обледенением, но со схожими для этого явления синоптическими ситуациями.

Таблица 9 - Расчет оправдываемости метода Годске для случаев с отсутствующим обледенением по данным АМЦ Архангельск за 2020 г.

Дата	Время получения	Наблюдаемое явление **	Эшелон полета****	Wyoming			Тнл	Прогноз
				T	Td	f		
02.01.2020	06.27	200/20MS	FL020	-7.5	-8.2	95	-5.6	ИСТИНА
	1300	270/09MPS	FL020					
3.01.2020	06.22	250/15MPS	FL020	-0.9	-1.3	97	-3.2	ЛОЖЬ
	08.10	296/120KT-62 TEMPO FBL TURB	FL350					
	08.35	240/15MPS	FL020	-0.3	-0.3	100	0	ИСТИНА
	10.45	270/105KT-67 OVC CLD	FL380					
04.01.2020	10.50	287/103KT-60 TEMPO FBL TURB	FL340					
	08.33	250/17MPS	FL020	-4.7	-7.7	80	-24	ЛОЖЬ
	18.44	270/10MPS	FL020	-4.9	-6.1	91	-9.6	ЛОЖЬ
05.01.2020	0820	31009MPS	FL020	-8.7	-11.7	79	-24	ЛОЖЬ
	1315	29009MPS	FL020					
	1415	30011MPS	FL020					
06.01.20	08.45	250/18MPS	FL020	-5.5	-11.5	63	-48	ЛОЖЬ
	1825	26015MPS	FL020	-7.1	-7.6	96	-4	ИСТИНА

Таблица 10 - Прогноз обледенения по формуле Годске для случаев с отсутствующим явлением за 2020 г.

2020г.	Прогноз по формуле Годске, когда явления не было	
	ИСТИНА	ЛОЖЬ
январь	14	15
февраль	4	23
март	1	23
апрель	1	14
май	1	13
июнь	-	6
июль	-	-
август	-	-
сентябрь	-	4
октябрь	-	3
ноябрь	-	21
декабрь	5	8
итого	26	130
итого, %	17	83

На рисунке 10 указана повторяемость оправдываемости метода Годске для случаев с отсутствующим обледенением на АМЦ Архангельск за 2020 г.



Рисунок 10 - Оправдываемость прогноза по формуле Годске для случаев с отсутствующим обледенением за 2020 г.

Всего за 2020 год было рассмотрено 156 случаев с фактически отсутствующим обледенением. В 130 случаях или 83%, метод Годске не дает прогноза обледенения, а в 26 случаях (17%) явление прогнозируется (Рисунок 10). Это вполне хорошие показатели, т.к. обледенение фактически не наблюдалось, а значит и не должно было прогнозироваться.

Рассмотрим также данные для расчетов (Таблица 11) и результаты расчетов (Таблица 12) по методу Годсе (Формула 1) до высоты 2000м, для случаев с фактически наблюдавшимся обледенением.

Всего за 2020 год было рассмотрено 79 случаев с фактически наблюдавшимся обледенением до высоты 2000м. В 51 случае или 65%, метод Годске не дает прогноза обледенения, а в 28 случаях (35%) явление прогнозируется (Рисунок 11).

Таблица 11- Расчет оправдываемости метода Годске для случаев с наблюдавшимся обледенением по данным АМЦ Архангельск за 2020 г.

Дата	Эшелон полета****	Время наблюдения	Данные зондирования		Тн.л.	Прогноз
			t	td		
07.01.2020	FL020	08.39	-5.3	-5.8	-4	ИСТИНА
	FL020	11.04	-5.3	-5.8	-4	ИСТИНА
08.01.2020	FL033/050	05.46	-3.1	-3.4	-2.4	ИСТИНА
	FL030	07.30	-4.3	-4.3	0	ИСТИНА
09.01.2020	FL100	13.00	-18.3	-25.2	-55.2	ЛОЖЬ
10.01.2020	FL050/030	07.21	-10.3	-11.3	-8	ИСТИНА
	FL050/030	08.31	-10.3	-11.3	-8	ИСТИНА
12.01.20	FLSFC/FL170	06.55	-25.9	-28.1	-17.6	ИСТИНА
14.01.2020	FL020	06.33	-4.5	-6	-12	ЛОЖЬ
	FL020	08.38	-4.5	-6	-12	ЛОЖЬ
	FL020	12.52	-4.5	-6	-12	ЛОЖЬ
	FL020/050	14.02	-9.8	-11.8	-16	ЛОЖЬ
	FL020/050	16.18	-9.8	-11.8	-16	ЛОЖЬ
15.01.2020	FL011	09.44	-1.2	-1.7	-4	ЛОЖЬ
	FL050/030	11.39	-8.9	-9.2	-2.4	ИСТИНА
	FL040	13.41	-5.9	-5.9	0	ИСТИНА
20.01.2020	FL020/005	06.09	-6.7	-7.1	-3.2	ИСТИНА
	FL030/010	06.57	-6.1	-6.5	-3.2	ИСТИНА
	FL005/030	08.58	-6.1	-6.5	-3.2	ИСТИНА
	FL050/070	12.26	-12.3	-12.3	0	ИСТИНА
21.01.2020	FL005/190	08.20	-34.6	-36.8	-17.6	ИСТИНА
	FL020	10.40	-2.7	-2.7	0	ИСТИНА
24.01.2020	FL090/110	08.24	-18.1	-18.9	-6.4	ИСТИНА
25.01.20	FL090	08.15	-17.7	-19.4	-13.6	ИСТИНА
02.02.2020	FL005/030	10.00	-6	-7.3	-10.4	ЛОЖЬ
	FL007/030	17.41	-6	-7.3	-10.4	ЛОЖЬ
03.02.2020	FL043/053	05.20	-6.3	-8.6	-18.4	ЛОЖЬ
	FL053	07.10	-6.3	-8.6	-18.4	ЛОЖЬ
08.02.2020	FL030	07.55	-11.5	-12.5	-8	ИСТИНА
	FL030	09.25	-11.5	-12.5	-8	ИСТИНА
09.02.2020	SFC/FL030	06.15	-4.8	-6.2	-11.2	ЛОЖЬ
	FL008	08.16	-3.8	-5.3	-12	ЛОЖЬ
	FL011	10.55	-3.8	-5.3	-12	ЛОЖЬ
	FL010/090	12.30	-5.8	-12.8	-56	ЛОЖЬ
	FL010/100	12.40	-6.3	-13.3	-56	ЛОЖЬ
	FL 300	14.52	-53.7	-60.7	-56	ЛОЖЬ
13.02.2020	FL020	0411	-2.7	-4.9	-17.6	ЛОЖЬ
	FL015	06.36	-0.9	-3.3	-19.2	ЛОЖЬ
	FL050/080	12.52	-12.5	-13.8	-10.4	ИСТИНА
14.02.2020	FL010/020	06.19	-4.3	-7.1	-22.4	ЛОЖЬ
	FL014/030	0850	-4.5	-7	-20	ЛОЖЬ
18.02.20	FL020	0844	-0.7	-1.7	-8	ЛОЖЬ
21.02.2020	1300/1400	04.40	-13.1	-16.8	-29.6	ЛОЖЬ
23.02.2020	FL010/060	09.14	-6.1	-7.4	-10.4	ЛОЖЬ
29.02.2020	FL110	06.57	-21.9	-26	-32.8	ЛОЖЬ

Таблица 12 - Прогноз обледенения по формуле Годске для случаев с наблюдавшимся явлением за 2020 г.

2020г.	Прогноз по формуле Годске, когда явление было	
	Прогнозирует	Не прогнозирует
январь	13	6
февраль	3	16
март	-	5
апрель	1	2
май	-	2
июнь	-	-
июль	-	-
август	-	-
сентябрь	-	-
октябрь	-	5
ноябрь	2	8
декабрь	9	7
итого	28	51
итого в %	35	65

На рисунке 11 указана повторяемость оправдываемости метода Годске для случаев с наблюдавшимся обледенением на АМЦ Архангельск за 2020г.



Рисунок 11 - Оправдываемость прогноза по формуле Годске для случаев наблюдавшимся обледенением за 2020 г.

Оправдываемость этого метода для случаев, когда явление наблюдалось не выше 2000м и общая оправдываемость метода за 2020 г. показывают одинаковые результаты (Рисунок 11) и (Рисунок 9). В обоих случаях причиной таких результатов вероятнее всего послужил большой промежуток времени между сроками измерений радиозондов, с которых были взяты данные для расчетов. Ограничения по высоте для этого метода не повлияли на результат прогноза.

Также были произведены расчеты матриц сопряженности и критериев успешности прогнозов для случаев с наблюдавшимся и не наблюдавшимся обледенением. Все прогнозы обледенения (наличия и отсутствия) в Архангельске за 2020 г. обобщаются в виде таблицы сопряженности. Построение такой таблицы сводится к сопоставлению двух величин – того, что прогнозировалось и то, что фактически наблюдалось. Сначала строится таблица сопряженности методических прогнозов, затем инерционных и/или случайных [6].

Матрицы сопряженности методических (Таблица 13) и случайных (Таблица 14) прогнозов обледенения в Архангельске за 2020г. представлены ниже.

Таблица 13 - Матрица сопряженности методических прогнозов за 2020 г.

МЕТОДИЧЕСКИЙ			
	П	<u>П</u>	Σ
Ф	28	51	79
<u>Ф</u>	26	130	156
Σ	54	181	235

Таблица 14- Матрица сопряженности случайных прогнозов за 2020 г.

случайный			
	П	<u>П</u>	Σ
Ф	18	61	79
<u>Ф</u>	36	120	156
Σ	54	181	235

- где: n_{11} - случаи оправдавшихся прогнозов наличия явления ($\Pi \sim \Phi$)
 n_{12} - случаи неоправдавшихся прогнозов отсутствия явления, ошибки пропуски ($\Pi \sim \Phi$)
 n_{10} - случаи наличия явления ($\Sigma \Phi$)
 n_{21} - случаи неоправдавшихся прогнозов наличия явления, ошибки страховки ($\Pi \sim \underline{\Phi}$)
 n_{22} - случаи оправдавшихся прогнозов отсутствия явления ($\underline{\Pi} \sim \underline{\Phi}$)
 n_{20} - случаи отсутствия явления ($\Sigma \underline{\Phi}$)
 n_{01} - случаи прогнозов наличия явления ($\Sigma \Pi$)
 n_{02} - случаи прогнозов отсутствия явления ($\Sigma \underline{\Pi}$)
 N - общее число прогнозов
 Π - обледенение прогнозировалось
 Φ - обледенение наблюдалось
 $\underline{\Pi}$ - обледенение не прогнозировалось
 $\underline{\Phi}$ - обледенение не наблюдалось

В таких матрицах связь прогноза и факта выражена числом случаев n_{ij} .
 При этом i - номер строки, j - номер столбца.

По данным матрицы сопряженности методических прогнозов можно сделать вывод, что 51 случай составляли ошибки пропусков и 26 случаев составляли ошибки страховки. При этом оправдавшиеся прогнозы с наличием

и отсутствием явления составили 28 и 130 случаев, а общее число прогнозов 235 (Таблица 13).

Для данных методических прогнозов обледенения критерии успешности рассчитывались по следующим формулам:

Общая оправдываемость прогнозов (для методических и случайных) выражается формулой:

$$p = \frac{n_{11} + n_{22}}{N} \cdot 100 \quad (2)$$

$$p_{сл} = \frac{n_{11}^{сл} + n_{22}^{сл}}{N} * 100 \quad (3)$$

Оправдываемость прогноза факта наличия явления выражается формулой:

$$U = \frac{n_{11}}{n_{10}} * 100\% \quad (4)$$

Предупрежденность факта наличия явления выражается формулой:

$$\Pi = \frac{n_{11}}{n_{01}} * 100\% \quad (5)$$

Оправдываемость прогноза факта отсутствия явления выражается формулой:

$$U_{\text{отс.}} = \frac{n_{22}}{n_{20}} * 100\% \quad (6)$$

Предупрежденность факта отсутствия явления выражается формулой:

$$\text{Пб. т.} = \frac{n_{22}}{n_{02}} * 100\% \quad (7)$$

Критерий точности прогнозов по М.А. Обухову рассчитываются по формуле:

$$Q = 1 - \left(\frac{n_{12}}{n_{10}} + \frac{n_{21}}{n_{20}} \right) \quad (8)$$

Критерий надежности прогнозов Н.А. Багрова рассчитывается по формуле:

$$H = \frac{p - p_{сл}}{1 - p_{сл}} \quad (9)$$

Результаты расчетов критериев успешности методических прогнозов представлены в таблице 15.

Таблица 15- Результаты расчетов критериев успешности методических прогнозов в %

Название критерия	Обозначение	Расчет по формуле
Общая оправдываемость прогнозов	р	67.2
Оправдываемость прогноза факта наличия явления	U	35.4
Предупрежденность факта наличия явления	П	51.9
Оправдываемость прогноза факта отсутствия явления	Уб.т.	83.3
Предупрежденность факта отсутствия явления	Пб.т.	71.8
Критерий точности прогнозов по М.А. Обухову	Q	0.2
Критерий надежности прогнозов Н.А. Багрова	H	-0.1
Общая оправдываемость случайных прогнозов	рсл	58.7

Анализируя результаты расчетов критериев успешности методических прогнозов, можно сделать вывод, что критерий общей оправдываемости (р) имеет низкую оправдываемость (67.2%). Оправдываемость прогноза факта наличия обледенения (U) составила лишь 35.4%. Предупрежденность факта наличия явления (П) – 51.9%. Оправдываемость прогноза факта отсутствия обледенения ($U_{б.т.}$) – 83.3%. Предупрежденность факта отсутствия явления ($П_{б.т.}$) – 71.8%. Критерий точности прогнозов по М.А. Обухову (Q) – 0.20%, что меньше условного порога (0.6%). Критерий надежности прогнозов Н.А. Багрова (Н) -0.1 находится ниже условного порога (Таблица 15).

Совокупность этих критериев позволяет более качественно оценить успешность прогноза. В данном случае только показатели оправдываемости ($U_{б.т.}$) и предупрежденность ($П_{б.т.}$) факта отсутствия явления показали результат близкий к успешному. Остальные критерии оказались невысокими.

3.6. Расчет интенсивности обледенения по методу Абрамович К.Г.

Рассмотрим прогноз интенсивности обледенения, который выражается следующей формулой:

$$L = -0,017H - 0,488T + 0,875, \quad (10)$$

где: Н - высота нижней границы облачности, десятки метров
 Т - температура нижней границы облачности, °С

Следует ожидать умеренное или сильное обледенение, если $L \geq 0$. Если же $L \leq 0$, то обледенение будет слабой интенсивности.

Для расчета прогностических значений интенсивности обледенения по формуле 10, были выбраны данные бортовой погоды с подтвержденными случаями обледенения, для определения высоты нижней границы облачности и

данные зондирования за 2020 год, для определения температуры нижней границы облачности (Таблица 16). Результаты этих расчетов указаны в таблице 17.

Таблица 16 - Данные для анализа прогноза условий интенсивности обледенения за 2020 г.

Дата	АВ-6	wyoming	формула L	L>0
	Ннго	Тнго	Интенсивность	MOD/SEV
07.01.2020	450	-4	-4.8	ЛОЖЬ
	360	-4.5	-3.0	ЛОЖЬ
08.01.2020	240	-1	-2.7	ЛОЖЬ
	300	-1.1	-3.7	ЛОЖЬ
09.01.2020	990	-7.5	-12.3	ЛОЖЬ
10.01.2020	700	-3.4	-9.4	ЛОЖЬ
	450	-3.2	-5.2	ЛОЖЬ
12.01.20	100	-4.2	1.2	ИСТИНА
14.01.2020	240	-1	-2.7	ЛОЖЬ
	360	-2.9	-3.8	ЛОЖЬ
	570	-4.3	-6.7	ЛОЖЬ
	450	-4	-4.8	ЛОЖЬ
	510	-4.4	-5.6	ЛОЖЬ
15.01.2020	270	-0.5	-3.5	ЛОЖЬ
	360	-1.1	-4.7	ЛОЖЬ
	390	-1.2	-5.2	ЛОЖЬ
20.01.2020	180	-8.4	1.9	ИСТИНА
	180	-8.4	1.9	ИСТИНА
	100	-8.6	3.4	ИСТИНА
	270	-7.9	0.1	ИСТИНА
21.01.2020	150	-1.2	-1.1	ЛОЖЬ
	140	-1	-1.0	ЛОЖЬ
24.01.2020	600	-7.5	-5.7	ЛОЖЬ
25.01.20	480	-11.1	-1.9	ЛОЖЬ
02.02.2020	210	-13	3.6	ИСТИНА
	220	-13	3.5	ИСТИНА
03.02.2020	140	-4.7	0.8	ИСТИНА
	330	-3	-3.3	ЛОЖЬ
08.02.2020	270	-7	-0.3	ЛОЖЬ
	240	-7.1	0.3	ИСТИНА
09.02.2020	150	-2.5	-0.5	ЛОЖЬ
	240	-2.8	-1.8	ЛОЖЬ
	360	-3.1	-3.7	ЛОЖЬ
	330	-3	-3.3	ЛОЖЬ
	300	-2.9	-2.8	ЛОЖЬ
	300	-2.9	-2.8	ЛОЖЬ
13.02.2020	480	-1.8	-6.4	ЛОЖЬ
	330	-1.1	-4.2	ЛОЖЬ
	600	-2.8	-8.0	ЛОЖЬ
14.02.2020	390	-2.9	-4.3	ЛОЖЬ
	330	-2.5	-3.5	ЛОЖЬ
18.02.20	300	-0.4	-4.0	ЛОЖЬ
21.02.2020	900	-9.5	-9.8	ЛОЖЬ
23.02.2020	180	0.6	-2.5	ЛОЖЬ
29.02.2020	450	-9.1	-2.3	ЛОЖЬ
02.03.2020	180	0.1	-2.2	ЛОЖЬ

Таблица 17- Прогноз интенсивности обледенения в 2020 г.

Интенсивность обледенения		
2020г.	MOD/SEV ICE	NO ICE
январь	5	19
февраль	4	17
март	0	8
апрель	0	3
май	0	5
июнь	0	2
июль	0	1
август	0	1
сентябрь	0	1
октябрь	0	7
ноябрь	0	11
декабрь	6	13
итого	15	88
итого в %	15	85

На рисунке 12 показана повторяемость оправдываемости прогноза интенсивности обледенения за 2020г.

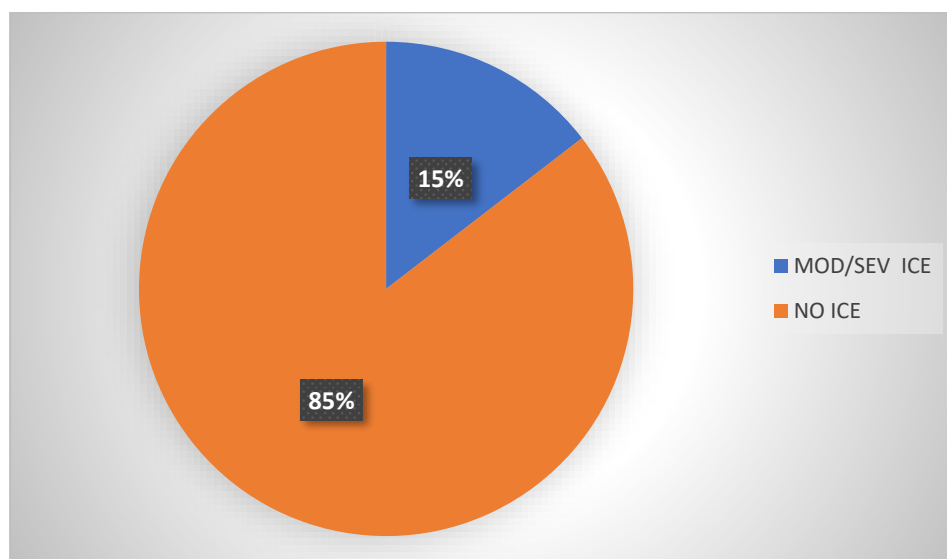


Рисунок 12- Оправдываемость прогноза интенсивности обледенения

В таблице 18 указана повторяемость фактически наблюдавшейся интенсивности на АМЦ Архангельск в 2020г.

Таблица 18 - Повторяемость фактически наблюдавшейся интенсивности в 2020г.

повторяемость %	
MOD/SEV ICE	FBL ICE
45	55

Всего за 2020 год было зафиксировано 103 случая. По рассчитанным данным можно сделать вывод, что наибольшее количество случаев прогнозировалось со слабым обледенением (88 случаев или 85%), повторяемость фактически наблюдавшегося слабого обледенения при этом составляла 55% (Таблица 18). Сильное и умеренное обледенение прогнозировалось в 15 случаях с оправдываемостью 15%, при этом повторяемость фактически наблюдавшегося сильного и умеренного обледенения составляла 45% (Рисунок 12).

Этот метод удобен в применении, в нем, с помощью данных о температуре (Т) и высоты нижней границы облачности (Н), можно легко спрогнозировать интенсивность обледенения. Одна из проблем, связанная с низкой оправдываемостью этого метода, заключается в отсутствии периодичности запуска радиозонда, с которого берутся данные о температуре.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В период, когда в районе аэродрома Архангельск существует большая вероятность обледенения, важно качественно и эффективно спрогнозировать его, чтобы максимально обеспечить безопасность полета воздушного судна.

В данной работе был проведен анализ случаев обледенения с различными метеорологическими условиями в районе прогнозирования АМЦ Архангельск.

Распределение обледенения по месяцам за 2019-2021гг. показало количество и повторяемость обледенения в осенне-зимний период более высоким, 169 случаев или 65%. Это связано с наличием разного вида осадков, большой влажностью и низкой температурой окружающего воздуха в диапазоне от 0°C до -20°C и меньше. В теплый период (с марта по октябрь) обледенение отмечалось реже - 35% или 93 случаев.

Был также проведен анализ интенсивности обледенения в АМЦ Архангельск за период с 2019-2021гг. Преобладающее количество случаев составляет умеренное обледенение - 137 случаев (52%). Немного меньше наблюдалось слабого обледенения- 111 явлений или 43%. Это связано с наличием достаточной влаги в воздухе (разновидность осадков, облака) и отрицательными температурами воздуха, и поверхности ВС при его небольших скоростях. Сильное обледенение составило всего 5% - 14 случаев.

При анализе распределения обледенения по высотам (эшелоном), наибольшее количество случаев обледенения (216) с повторяемостью 82%, наблюдается в осенне-зимние месяцы на эшелонах FL0-50 и FL51-100. Это объясняется тем, что в холодную половину года обледенение наиболее вероятно в нижнем слое тропосферы в облаках, состоящих из переохлажденных водяных капель. Воздушное судно, находясь в нижней половине тропосферы (при взлете или посадке), обычно имеет небольшие скорости 400—500 км/час. При таких скоростях кинетический нагрев воздушного судна еще недостаточно большой, чтобы перекрыть низкие температуры окружающего воздуха.

Наименьшее количество случаев (46) с повторяемостью 18%, на эшелонах FL101-200 и выше, в теплое время года. Это связано с наличием на этих высотах в большей степени ледяных кристаллов, нежели переохлажденных капель в облаке.

Был проведен анализ диапазона температур случаев с обледенением за 2020г. Наибольшее количество случаев с обледенением наблюдалось при температурах от 0 до -10°C (59 случаев или 57%). Эти значения температуры являются наиболее опасными в отношении обледенения, так как чаще всего встречаются в самых нижних слоях тропосферы.

В диапазоне температур от -10 до -20°C было зафиксировано 29 случаев, 28%. Обледенение при таких температурах может наблюдаться в высококучевых облаках, располагающиеся обычно выше 3 км.

Обледенение при температуре больше 0°C наблюдалось всего в 3 случаях, 3%.

12 случаев (12%) с обледенением наблюдались при температуре -20°C и меньше. Обледенение при таких температурах может наблюдаться в облачности, в которой несмотря на переконденсацию капель на кристаллы и выпадение осадков, происходит непрерывное поступление влаги, в связи с этим быстрое укрупнение новых капель.

Также был проведен анализ повторяемости случаев с обледенением в различных синоптических ситуациях. Наибольшее количество случаев с обледенением (172 или 65%) наблюдалось в зоне пониженного давления, а остальные синоптические ситуации с обледенением составили 35%.

В зоне низкого давления (172 случаев или 65%) с наибольшей повторяемостью были определены следующие синоптические ситуации: южная часть циклона (17%), центр циклона (12%) и ложбина (12%). Из фронтов с наибольшей повторяемостью наблюдался теплый фронт -7%. Для этого фронта обледенение характерно от самой нижней своей части, до высоты значительного понижения облачности (1-1,5 км).

В остальных барических образованиях повторяемость обледенения составила 35% или 90 случаев, из которых с наибольшей повторяемостью наблюдались антициклон (10%) и малоградиентное поле (10%). Для малоградиентного поля характерны низкие значения барических градиентов повышенного или пониженного давления и возникающие при конвекции осадки внутримассового характера.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богаткин О.Г. «Авиационная метеорология», О.Г. Богаткин – С.-П.: изд. РГГМУ, 2005. – 318 с.
2. Яковлев А.М. «Авиационная метеорология», изд. Транспорт, 1971.- 276с.
3. Позднякова В.А. «Практическая авиационная метеорология», – г. Екатеринбург, 2010. – 70 с.
4. Блохина В.И. «Авиационные прогнозы», 2010.-67с.
5. Пчелко И.Г. «Авиационная метеорология», гидрометеорологическое изд. 1963.- 336с.
6. Метеорологические прогнозы и их экономическая полезность: учебное пособие / Я. В. Дробжева, О. В. Волобуева. - Санкт-Петербург: Адмирал, 2016. - 115 с.
7. Характеристика физико-географических условий полета. [Электронный ресурс]: <https://studfile.net/preview/14536513/page:3/>
8. Архив погоды. [Электронный ресурс]: <https://www1.wetter3.de/>
9. Данные зондирования. [Электронный ресурс]: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>
10. РП5. [Электронный ресурс]: <https://rp5.ru/map/3/0/0/en>