

ГЛАВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ СЛУЖБЫ
ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР

ИНСТИТУТ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ МЕТЕОРОЛОГИИ

Ф. Я. КЛИНОВ

ИЗМОРОЗЬ
И ГОЛОЛЕД
В НИЖНЕМ
300-метровом
СЛОЕ
АТМОСФЕРЫ

Под редакцией
д-ра техн. наук
В. В. ПИОТРОВИЧА

48224

БИБЛИОТЕКА
Ленинградского
Гидрометеорологического
Института

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЕ
ИЗДАТЕЛЬСТВО
ЛЕНИНГРАД · 1970

551.5.141.62

УДК 551.574

В монографии излагаются результаты четырехлетних наблюдений за изморозью и гололедом в нижнем 300-м слое атмосферы на высотной метеорологической мачте Института экспериментальной метеорологии в Обнинске. Описывается методика измерений, приводятся данные о распределении отложений с высотой, фотографии характерных образований изморози и льда, особенности роста и испарения (отвала) отложений. В ряде примеров рассматривается связь отложений с метеорологическими характеристиками нижнего 300-м слоя атмосферы, особенно при «холодных» облаках и тумане, когда наблюдались наиболее интенсивные отложения.

Монография рассчитана на проектировщиков, строителей и эксплуатационников высотных жилых зданий, радиотелевизионных и энергетических сооружений, специалистов по вопросам обледенения судов и самолетов, метеорологов и климатологов, занимающихся вопросами технической метеорологии и прикладной климатологии. Монография представляет интерес и для студентов высших учебных заведений, избравших своей специальностью метеорологию и климатологию.

Клинов Филипп Яковлевич

ИЗМОРОЗЬ И ГОЛОЛЕД В НИЖНЕМ 300-метровом СЛОЕ АТМОСФЕРЫ

Титульный редактор Вильгельм Владиславович Пиотрович

Редактор В. И. Кузьменко. Художник В. П. Сысало
Худож. редактор И. Н. Кошаровский

Технич. редактор М. И. Браинина. Корректор З. Т. Тимченко

Сдано в набор 4/IV 1970 г. Подписано к печати 8/IX 1970 г. М-12375.
Формат бумаги 60×90^{1/16}. Бумага типографская № 1 и мелованная
Бум. л. 3,625+1 вкл. Печ. л. 7,5. Уч.-изд. л. 6,99. Тираж 500 экз. Зак. 2482.
Цена 71 к.

Гидрометеорологическое издательство, Ленинград, В-53, 2-я линия, д. 23
Ленинградская типография № 4 Главполиграфпрома Комитета по печати
при Совете Министров СССР, Ленинград, Ф-68, Садовая ул., 55/57.

СОДЕРЖАНИЕ

От редактора	4
Предисловие	5
Цель задачи наблюдений	7
Общие характеристики отложений	8
Изменение отложений по высоте и во времени	12
Особенности роста и испарения (таяния) отложений	19
Охват, залежь, отвалы и опадание отложений	22
Наблюдения за процессом отложения гололеда и изморози	26
Некоторые метеорологические характеристики нижнего слоя атмосферы при отложениях	34
Стационарные наблюдения за низкими облаками и туманами в нижнем слое атмосферы	38
Метеорологические характеристики нижнего слоя атмосферы при низких облаках	43
Выводы	60
Приложение. Метеорологические условия при гололедно-изморозевых отложениях, приведенных в таблицах	63
Литература	67
Таблицы отложений изморози и гололеда в нижнем 300-м слое атмосферы	69

ОТ РЕДАКТОРА

Приведенные в монографии сведения о гололедно-изморозевых отложениях в нижнем 300-м слое атмосферы получены впервые. До сих пор наблюдения за гололедом и изморозью проводились на небольших высотах, в основном на высоте 2 м над землей. В связи с этим очевидна ценность публикуемых данных.

В монографии приведены данные о структуре отложений, их количественных величинах, интенсивности роста и испарения и другие, которые могут быть использованы в качестве справочных сведений. Подробно рассмотрены на отдельных примерах метеорологические характеристики нижнего 300-м слоя атмосферы в условиях низких облаков и туманов при отрицательных температурах, когда наблюдались наиболее интенсивные процессы отложений.

Представляют также интерес публикуемые фотографии отложений; они могут рассматриваться как альбом гололедно-изморозевых отложений в нижнем слое атмосферы.

Приведенные автором характеристики форм отложений и выводы, особенно количественные оценки, а также имеющиеся сведения о гололедно-изморозевых отложениях могут быть полезны для многих практических целей.

В. В. Пиотрович

ПРЕДИСЛОВИЕ

В последние годы значительно увеличился спрос на информацию о гололедно-изморозевых отложениях в нижнем слое атмосферы до высоты в несколько сот метров. Возникла необходимость количественных и качественных оценок отложений, установления характера их изменений по высоте, во времени и в связи с погодными условиями и определения структурных особенностей.

Представление об этих сторонах гололедно-изморозевых отложений дается в настоящей монографии по наблюдениям на 300-м мачте Института экспериментальной метеорологии в Обнинске, выполненным в период 1964—1967 гг.

Знание распределения гололедно-изморозевых отложений в нижнем слое атмосферы важно в проблеме обледенения самолетов (особенно малой авиации), при расчетах гололедных и ветровых нагрузок на сооружения, особенно высотные, для определения теплового режима высотных зданий, электроизоляционных свойств отложений на высоковольтных линиях, в связи с проблемой ухудшения слышимости на линиях связи при высокочастотных передачах и др.

Изучение связей гололедно-изморозевых отложений в нижнем слое атмосферы с метеорологическими элементами необходимо для разработок по прогнозированию отложений.

Этим перечнем, конечно, не может быть ограничена значимость знаний о гололедно-изморозевых образованиях в нижнем слое атмосферы.

В работах А. Д. Заморского [5], В. В. Бургсдорфа и Н. С. Муретова [1], В. Е. Бучинского [2], [3], Б. П. Вейнберга [4], П. А. Шумского [14] и др. были опубликованы данные об образовании гололеда и изморози на небольших высотах, преимущественно на уровне 2 м над землей. В предлагаемой монографии излагаются результаты наблюдений за этими явлениями в нижнем 300-м слое атмосферы, частично опубликованные [7], [8].

Они развивают перечисленные исследования, в том числе и эпизодические наблюдения автора в нижнем 500-м слое атмосферы в Верхоянске [6].

В наблюдениях и первичной обработке материалов участвовал коллектив сотрудников Института экспериментальной метеорологии в составе В. Д. Андреева, А. Н. Александровой, С. А. Арнаутовой, Л. Т. Ливадной, В. Г. Масленциной, Н. А. Самарской, В. М. Старикова, Н. Г. и В. Г. Стефановых и др. Особо следует отметить В. С. Сторожко и М. Д. Яценко, выполнявших фотографии отложений, а также Г. Н. Ильичеву, вложившую большой труд в проведение наблюдений, обработку их материалов и оформление монографии.

Программа и методика наблюдений были разработаны автором. Им же осуществлялось руководство наблюдениями и фотографированием, а также анализ материалов наблюдений.

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ НАБЛЮДЕНИЙ

Гололедно-изморозевые отложения образуются при определенных метеорологических условиях в атмосфере. Поэтому наблюдения отложений сочетались с общими метеорологическими наблюдениями на 300-м метеорологической мачте в Обнинске [9].

Наблюдения отложений включали:

а) систематические дневные в 13—14 час. и эпизодические ночные в 24-01 час определения формы (структуры), толщины и веса изморози и гололеда на горизонтальных металлических стержнях (диаметром 15 мм) ограждения балконов мачты;

б) эпизодические измерения отложений в случае их большой интенсивности на теле мачты и на выступающих конструктивных деталях ее — громоотводе, вертикальных стойках, реях и других предметах;

в) отдельные наблюдения процессов роста и структурных особенностей отложений на предметах разной конфигурации, разной физической природы, в частности на смазываемых поверхностях;

г) определение охвата отложениями поверхности предметов (стержни, тело мачты, ее арматура), отвалов отложений с них и опадание на поверхность у основания мачты;

д) отдельные серии дистанционной регистрации роста и испарения отложений с помощью автоматического гололедографа;

е) фотографирование отложений для фиксации внешнего вида и структуры их, а также микрофотографирование начального процесса отложения на поверхности предмета;

ж) метеорологические наблюдения. Они включали систематическое измерение температуры и скорости ветра стандартными метеорологическими приборами у наблюдаемых отложений и отдельные серии дистанционной регистрации температуры и скорости ветра в период роста и испарения отложений с помощью автоматических приборов;

и) наблюдения за уровнями нижней и верхней границ низкой облачности визуально по мачте и с помощью приборов в период роста отложений.

Комплекс наблюдений использован в целях: а) установления частоты и длительности явлений, б) выявления распределения отложений изморози и гололеда в нижнем 300-м слое атмосферы, в) оценки интенсивности роста и испарения (таяния) отложений, парусности и отвала их и г) выявления связей этих характеристик отложений с метеорологическими условиями.

ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОТЛОЖЕНИЙ

Сезон гололедно-изморозевых отложений в нижнем слое атмосферы в районе Обнинска длится обычно с ноября по апрель, т. е. около полугода. Наибольшая продолжительность отложений

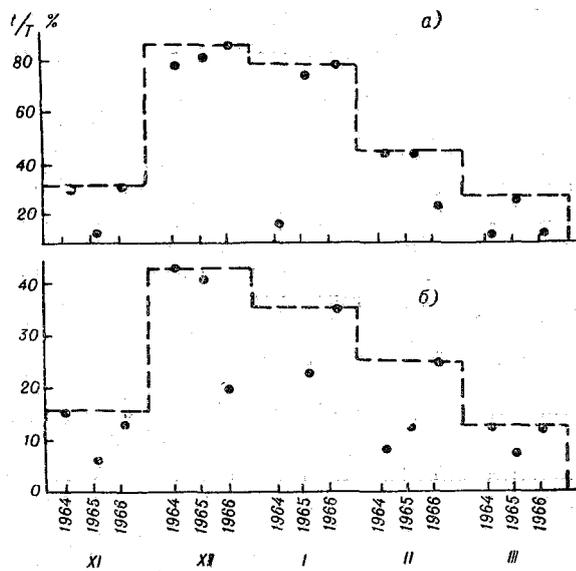


Рис. 1. Процентное отношение (точки) суммарной длительности периодов отложений (а) и периодов низкой облачности (б) ко всему месячному интервалу времени по наблюдениям 1964—1967 гг.

отмечалась в декабре и январе и изредка в феврале. В 75% случаев гололедно-изморозевые отложения в нижнем слое атмосферы образовывались при низких облаках. В отдельных случаях образование и сохранение отложений наблюдались во вла-

гонасыщенном подоблачном слое атмосферы, когда нижняя граница облачности находилась вблизи верхнего уровня мачты (310 м). В 25% случаев отложения отмечались в ясную погоду при радиационном выхолаживании поверхности земли и прилегающего воздуха.

Максимальная длительность периодов отложений и низкой облачности (рис. 1) приходится на декабрь и январь (соответственно около 80 и 40% всего интервала времени), меньшая на февраль и еще меньшая — на ноябрь и март (соответственно около 30 и 15%). В апреле отложения наблюдались не более чем в 5—10% времени и только в первые дни месяца.

Следует иметь в виду, что длительность существования гололедно-изморозевых отложений всегда больше длительности периода низких облаков, в которых образуются отложения, ибо отложения сохраняются некоторое время спустя после исчезновения низких облаков.

В нижнем 300-м слое атмосферы наблюдались следующие формы отложений: зернистая изморозь, кристаллическая изморозь, гололед и смешанные отложения (преимущественно в сочетаниях гололед — зернистая изморозь и гололед — кристаллическая изморозь). Изредка отмечались сочетания: зернистая изморозь — кристаллическая изморозь, гололед — зернистая изморозь — кристаллическая изморозь. В этих случаях гололед и зернистая изморозь являлись сохранившимися остатками прежних отложений.

При всех погодных условиях и температурах ниже некоторого предела (точно температуры не установлены) у предмета образовывался плотный лед рекристаллизационного происхождения, более твердый и цепкий на поверхности предмета, чем обычный гололед или лед, наблюдавшийся в результате подтаивания зернистой и кристаллической изморози.

Повторяемость различных форм отложений за сезоны 1964—1967 гг. представлена на рис. 2, из которого очевидно явное преобладание зернистой изморози (50%). Зернистая изморозь в смеси с гололедом наблюдалась в 25% случаев. Гололед и кристаллическая изморозь наблюдались соответственно в 13 и 12% случаев.

Систематическое определение толщины и веса отложений на металлических стержнях ограждения балконов проводилось на площадках, оборудованных на отметках 25, 73, 121, 169, 217, 265 и 301 м. Стержни эти охватывали мачту по восьмигранному периметру с длиной стороны 2 м на расстоянии 1,5 м от тела мачты и на высоте около 1 м от пола балкона. Такое их расположение уменьшало влияние возмущений воздуха у мачты и ее арматуры на рост отложений на стержнях. Диаметр стержня (15 мм) отличался от принятого при стандартных наблюдениях за отложениями (5 мм), но соответствовал размерам проводов

линий высоковольтных передач, электрифицированного транспорта и арматурных деталей высотных сооружений.

Измерение отложений на стержнях велось в первый сезон наблюдений (1963/64 г.) на наветренной стороне, а в последующие — на стороне наибольших отложений. При измерении участок отложений длиной 20 см отделялся от остального отложения надпилем его наживкой, счищался в кювету, оттаивался

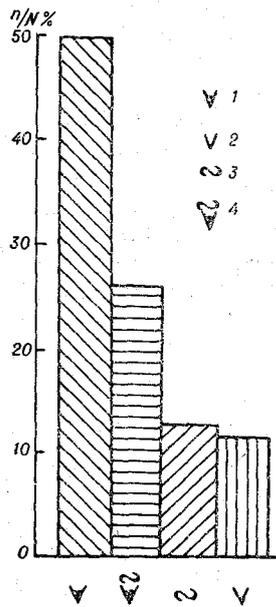


Рис. 2. Повторяемость процентного отношения числа случаев образования (n) зернистой (1) и кристаллической (2) изморози, гололеда (3) и смеси зернистой изморози и гололеда (4) к общему числу случаев обледенения ($N=233$) по наблюдениям 1964—1967 гг.

1) $n=115$, 2) $n=27$, 3) $n=31$, 4) $n=61$.

в помещении, и объем воды замерялся мензуркой. Вес взятого отложения умножением на коэффициент $K=5$ приводился к величине отложения на 1 пог. м.

Туман отмечался тогда, когда горизонтальная видимость уменьшалась до 1000 м, а низкая облачность — при четко обозначенной нижней границе затуманивания мачты на уровне 40—50 м и выше.

Зернистая изморозь, гололед и смешанные отложения зернистой изморози и гололеда наблюдались главным образом в низких облаках или в тумане, а также при переходе низких облаков в туман и наоборот. Кристаллическая изморозь в основном наблюдалась в исследуемом 300-м слое атмосферы при радиационном выхолаживании.

Таблица I

Наибольшие величины отложений на стандартных образцах за 1964—1967 гг., отмеченные на разных уровнях, и наблюдавшиеся при этом погодные условия

Низкая облачность				Туман			Низкая облачность и туман				Радиационное выхолаживание
z м	∇	∞	∇∞	∇	∞	∇∞	∇	∇	∞	∇∞	∇

Наибольший размер отложений (мм)

301	180	170	180	90	23	160	250	—	40	90	70
265	170	160	200	85	20	120	230	—	35	120	50
217	110	90	80	55	50	100	140	—	25	130	45
169	70	20	70	50	30	90	110	—	15	70	60
121	30	50	50	53	12	50	60	—	—	55	60
73	—	10	—	22	9	30	20	20	—	—	25
25	—	5	—	—	7	—	20	10	—	—	20
2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	15

Наибольший вес отложений (г/м)

301	2320	2475	4420	695	180	2290	2970	—	900	1780	270
265	1000	1670	2140	550	170	1600	2440	—	220	1560	160
217	560	1082	1390	400	150	970	1670	—	—	770	140
169	570	310	1840	400	120	750	1430	—	240	520	130
121	180	880	390	260	110	500	560	—	—	290	150
73	—	100	—	160	90	320	180	70	—	—	20
25	—	—	—	—	70	—	70	20	—	—	10
2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

По данным табл. I видно, что наибольшие размеры имели отложения зернистой изморози и смешанные отложения зернистой изморози и гололеда в низкой облачности и при смене низкой облачности туманом и наоборот. Наибольший вес имели смешанные отложения зернистой изморози и гололеда при низкой облачности, наименьшие — кристаллической изморози при радиационном выхолаживании. Толщина и вес отложений зернистой изморози, гололеда и их смеси увеличивались с высотой. Наибольшие значения кристаллической изморози (при радиационном выхолаживании) в ряде случаев наблюдались на промежуточных уровнях исследуемого 300-м слоя. (Заметим, что в приведенной выше таблице последнее обстоятельство ступе-

вается, так как в ней указаны предельные значения наблюдавшихся отложений кристаллической изморози.)

Наибольшие отложения наблюдались на нестандартном предмете (тресе). Они имели толщину 300 мм, вес 17 кг/м и отмечались главным образом в низких облаках.

Таблица II

Наибольшая длительность (в часах) отложений на разных высотах в нижнем 300-м слое атмосферы и соответствующие им погодные условия

z м	Низкая облачность			Туман			Туман и низкая облачность			Радиационное выхолаживание
	∇	∞	∇∞	∇	∞	∇∞	∇	∞	∇∞	∇
301	415	100	280	60	—	10	45	105	10	55
265	415	100	160	60	—	10	45	105	10	55
217	320	95	250	60	—	10	45	105	10	55
169	170	80	285	20	25	10	45	60	10	55
121	85	50	240	20	25	10	45	35	10	55
73	50	50	—	20	25	—	5	35	—	55
25	5	25	—	—	10	—	—	35	—	30
2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	15

Из табл. II видно, что длительность сохранения отложения с высотой увеличивается. Наибольшая длительность наблюдается при отложении зернистой изморози, гололеда и смешанных отложениях, образовавшихся в низких облаках, в сравнении с образовавшимися в тумане и при радиационном выхолаживании.

Длительность периодов сохранения отложений зависит от продолжительности соответствующих погодных условий.

ИЗМЕНЕНИЕ ОТЛОЖЕНИЙ ПО ВЫСОТЕ И ВО ВРЕМЕНИ

На рис. 3 приведен пример характерного изменения по высоте толщины отложений и веса их по наблюдениям в зиму 1964/65 г. Профили отложений, аналогичные представленным на этом рисунке, были зафиксированы и в зимы 1965/66 и 1966/67 гг. Характерный вид отложений в нижнем слое атмосферы представлен в табл. I для зернистой изморози, гололеда

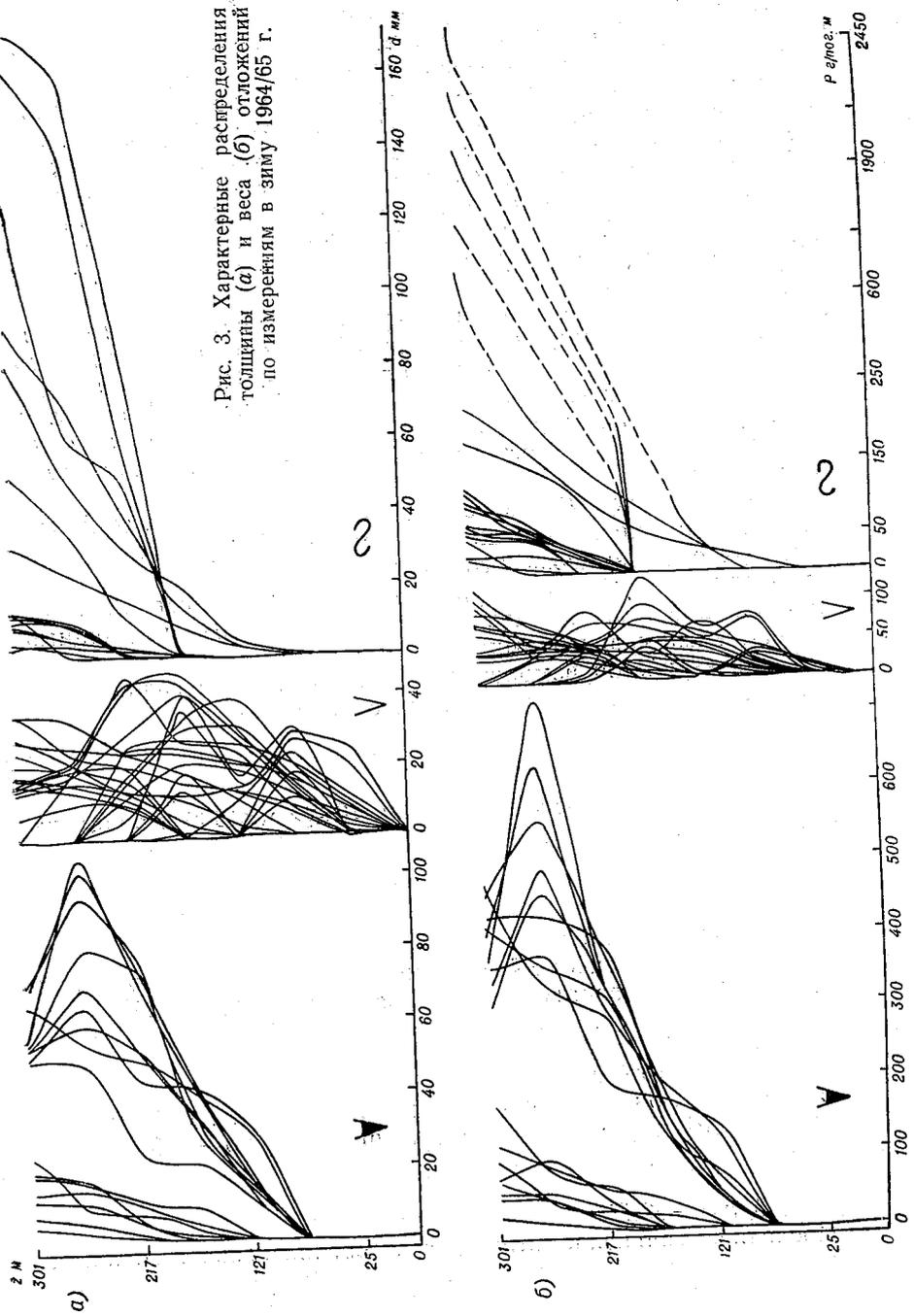


Рис. 3. Характерные распределения
толщины (а) и веса (б) отложений
по измерениям в зиму 1964/65 г.

и смешанного отложения гололеда и зернистой изморози и в табл. 2 — для кристаллической изморози.

Фотографирование широко применялось при исследовании обледенения на мачте. В большинстве случаев оно выполнялось в замутненной атмосфере (облаке, тумане и т. д.) с руки зеркальным фотоаппаратом „Зенит“ при съемке общего вида отложений с расстояния 2 м, а для структурных — 10—50 см. Наиболее четкие структурные снимки получались с расстояния 18—20 см при применении переходных колец. Фотообработка материалов была обычной.

По фотографиям отложений с учетом масштаба можно достаточно точно определить толщину отложений. Фото являлись контролем обычных измерений обледенения. По фотографиям, сделанным в смежные сроки измерений, а также за очень малые интервалы времени, определялось изменение размеров отложений и вычислялась скорость роста и испарения (таяния) обледенения.

Размер d и вес P смешанных отложений распределяются по высотам примерно так же, как соответствующие характеристики зернистой изморози и гололеда.

Профили с наибольшим увеличением веса отложений с высотой в нижнем 300-м слое могут быть описаны следующими эмпирическими уравнениями:

а) для зернистой изморози при высоте нижней границы облаков $z > 120$ м и температуре в интервале от -7 до -4°

$$P = az + b,$$

где $a = 0,06$, $b = 7,8$;

при низкой облачности в границах $70 \leq z \leq 300$ м и в том же интервале температур

$$P = az^b,$$

где $a = 278 \cdot 10^{-5}$, $b = 2,07$;

б) для кристаллической изморози при тумане в границах $0 \leq z \leq 301$ м и температуре в интервале от -25 до -11°

$$P = a + b(z + c)^2,$$

где $a = 80$, $b = 3 \cdot 10^{-3}$, $c = 169$;

в) для гололеда при низкой облачности в границах $150 \leq z \leq 301$ м и интервале температур от -9 до $-0,9^\circ$

$$P = az + b,$$

где $a = 3,0$, $b = -50,7$.

Последнее уравнение относится к распределению гололеда в облаках, нижняя граница которых сохраняется на уровне 150 м.

Коэффициенты a , b , c получены по данным предельно наблюдавшихся значений и зависят от вида отложений, температуры и влажности воздуха, водности туманов и низких облаков.

В некоторых случаях профили кристаллической и зернистой изморози и гололеда отличались от указанных выше, были более сложными. Наиболее устойчивыми являются профили смешанных отложений, наименее устойчивыми — профили зернистой изморози и гололеда из-за подвижности границы низкой облачности и неоднородности ее структуры (спектра капель, водности и др.).

Наблюдались как однородные отложения во всем слое, чаще всего кристаллической изморози при радиационном выхолаживании или зернистой изморози при низких облаках, так и разных видов по высотам. Например, гололед близ земли и зернистая изморозь на верхних уровнях, кристаллическая изморозь внизу и смешанная с зернистой изморозью вверху и др.

Разные отложения по высотам наблюдались в низких облаках при нулевой изотерме внутри облака. Тогда в теплой нижней или верхней части облака вследствие подтаивания прежних отложений зернистой изморози образовывался гололед оплавления, а в холодном слое, где температура была ниже 0° , сохранялась или нарастала зернистая изморозь.

Возникновение отложений разных видов вызывалось также сменой погодных условий. Например, на отложениях зернистой изморози, возникших в низких облаках, из-за последующего радиационного выхолаживания образовывалась кристаллическая изморозь и т. д.

Метеорологическая мачта в Обнинске (высота 310 м) в периоды гололедно-изморозевых отложений увеличивалась в весе. Максимальный вес отложений достигал 14 т, что составляло 5% общего веса металлоконструкции.

На поверхности мачты отмечались разные формы отложений: кустистые и ячеистые, сплошные полосы без определенной границы и полосы, занимающие четко ограниченную часть поверхности (табл. 3).

Кустистые отложения наблюдались в местах обтекания мачты облачными частицами, а ячеистые — в местах прямого удара облачных частиц о поверхность мачты, где воздушный поток с частицами был как бы пульсирующим. Сплошная полоса отложения, по-видимому, обуславливалась равномерным обтеканием мачты частицами. При индикации шелковинкой линии тока воздуха (см. ниже) у границы ограниченной полосы отложений шелковинка сникала, что свидетельствовало о срыве здесь воздушного потока. Показательно в этом случае образование отложения, выступающего за линию срыва в месте выступа на мачте.

Парусность тела мачты и ее конструкций обычно учитываются при расчете горизонтальной ветровой нагрузки на нее по формулам:

$$P_{\text{ветр}} = c_x \rho \frac{u^2}{2},$$

$$c_x = f(u, x, s),$$

где c_x — аэродинамический коэффициент обтекания мачты, ρ — плотность воздуха, u — скорость ветра, x — шероховатость поверхности мачты, s — миделево сечение тела мачты с отложениями на ней.

В расчетах используются значения коэффициентов c_x и x , определяемые по продувкам модели с отложениями в аэродинамической трубе.

Парусность мачты, рассчитанная для условий максимального количества гололедно-изморозевых отложений, составляла 810 м², а без отложений — 740 м². Таким образом, парусность отложений на мачте составляла 10% ее общей парусности.

Отложения наблюдались на деталях конструкции мачты — на ее реях, тросах, ограждениях и т. д., а также на метеорологических датчиках.

Установление характера отложений изморози и льда на датчиках и определение возможных погрешностей измерения метеорологических элементов вследствие этого важны для оценки метеорологических условий образования и разрушения гололедно-изморозевых отложений.

В табл. 4 приведен пример обрастания датчика температуры зернистой изморозью (а), датчика направления ветра — гололедом (б), крыльчатки анемометра — зернистой изморозью (в) и гололедом (г) и чашечек анемометра — зернистой изморозью (д).

Своеобразное обрастание крыльчатки анемометра гололедом (г) возникло вследствие растекания по ребру крыльчатки капелек переохлажденной воды.

Скорости ветра, полученные по датчикам с отложениями изморози и льда на них, были совершенно искажены, так как чашечки и крыльчатки не вращались. Погрешность измерения температуры менее существенна, и часто ею можно было пренебречь.

Фотографии отложений на вертикальных стержнях, проводах и тросах представлены в табл. 5. На фигурной поверхности стержня и троса отложение повторяло форму этой поверхности (а — гололед на рифленом стержне, б — зернистая изморозь на крученом тросе). Это характерно для малой интенсивности обледенения. На других стержнях (в, г), тросе (д) и проводе (е) в структуре отложения заметен рост вдоль направления ветра, которое составляло угол с осью предмета — стержня, троса, провода.

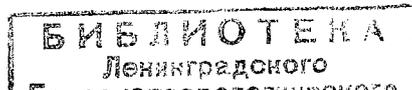
В изменении отложений во времени выделялись стадии роста, устойчивого состояния и испарения (таяния) гололедно-изморозевых отложений, а также отвала их с тела мачты и ее конструктивных деталей. Отвалы наблюдались при таянии отложений в месте контакта их с поверхностью предмета. При повышении температуры воздуха выше 0° у поверхности предмета образовывалась водная пленка и сцепление отложения с предметом резко падало. Отложение отваливалось, не успевая ни растаять, ни тем более испариться.

Стадии роста, устойчивого состояния и испарения (таяния) отложений наблюдались в различной последовательности, например:

- 1) рост — устойчивое состояние — испарение (таяние);
- 2) рост — испарение (таяние);
- 3) рост — устойчивое состояние — испарение (таяние) — рост — отвал;
- 4) рост — устойчивое состояние — рост — испарение (таяние);
- 5) рост — устойчивое состояние — рост — устойчивое состояние — испарение (таяние).

В зависимости от последовательности погодных условий (в тумане, при низкой облачности, во влагонасыщенном подоблачном слое вблизи нижней границы облаков и при радиационном выхолаживании) естественно ожидать нарастание отложений, типичных для текущей погоды, на отложения, образовавшиеся в предшествующих погодных условиях. Так, в период прояснения, когда погодные условия благоприятствовали радиационному выхолаживанию, на отложениях зернистой изморози, ранее образовавшихся в тумане и при низкой облачности, происходило нарастание кристаллической изморози.

В примере на рис. 4 а виден ход отложения на уровнях измерения 169, 217, 265 и 301 м в условиях чередования облачной и ясной погоды. Ход этот, нанесенный по ограниченному числу измерений (отмечены звездочками), приближенно отвечает изменению нижней границы облачности. Начало и конец периода отложения на высотах отмечались соответственно при появлении и исчезновении облачности на уровнях измерений, что видно по вертикальным пунктирным линиям, связывающим начало и конец периода отложения с высотой нижней границы облачности. Заметим, что из-за недостаточной частоты измерений начало испарения (таяния) отложений (момент времени t_n у звездочки) отмечалось несколько раньше момента повышения нижней границы облачности над уровнем измерения (момент времени $t_{гр}$ у кружочка на верхнем уровне). В примере на рис. 4 б на высоте 301 м постоянно сохранялись облака и шло нарастание отложения. На высоте 73 м условия менялись: облачность опускалась до этого уровня лишь временно, и только в это время шел рост отложений.



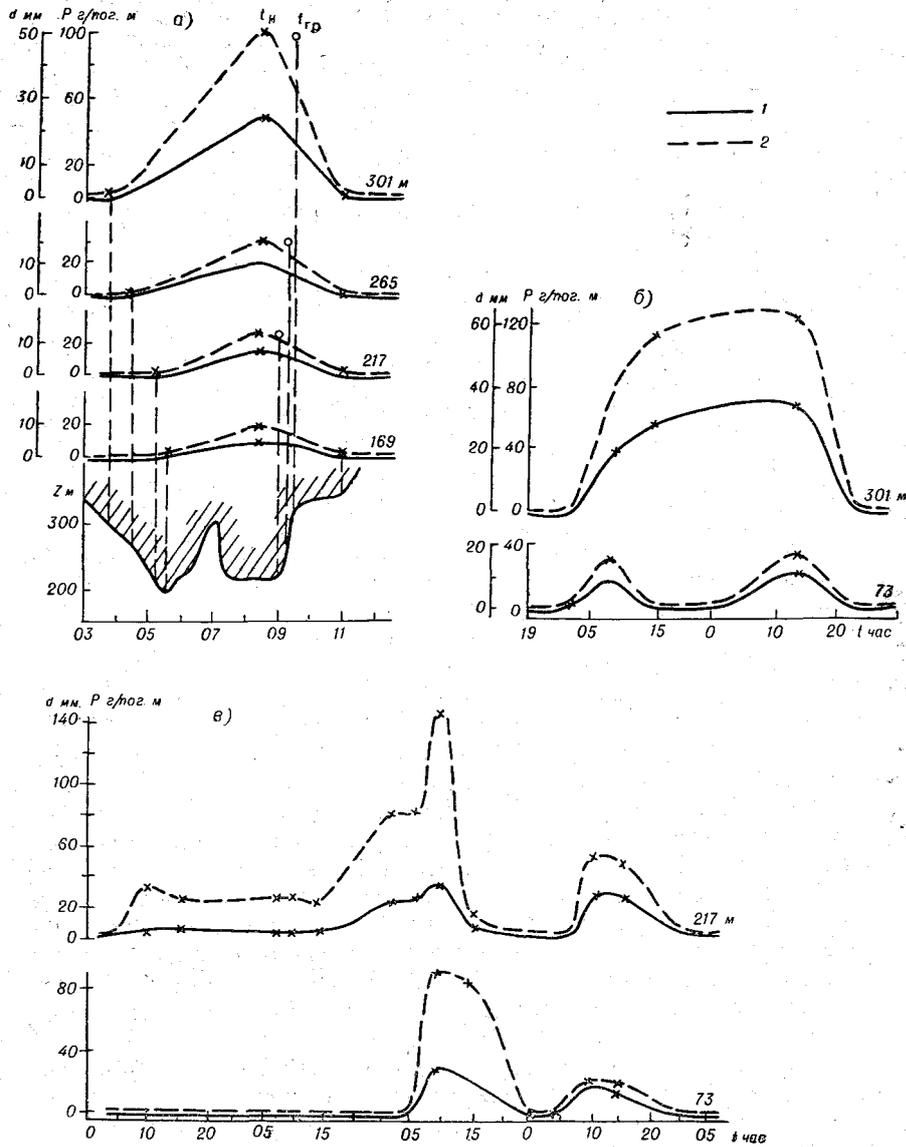


Рис. 4. Примеры связи изменения отложений с ходом нижней границы низкой облачности по наблюдениям 25 января 1964 г. (а) и характерные изменения отложений на разных уровнях по наблюдениям 26—27 января 1964 г. (б) и 14—17 февраля 1964 г. (в).

1) изменение толщины, 2) изменение веса.

ОСОБЕННОСТИ РОСТА И ИСПАРЕНИЯ (ТАЯНИЯ) ОТЛОЖЕНИЙ

Рост и испарение (таяние) отложений характеризуются определенной структурой и видом отложений на предметах. В табл. 6 приведен пример отложения на цилиндрической трубе громотвода мачты (высота 310 м). С разных сторон цилиндра образовались отложения разных видов. В центре наветренной стороны (а) нарастал чистый гололед, сбоку (б) — матовый гололед и плотная зернистая изморозь, с подветренной стороны (в) — сплошь зернистая изморозь.

В табл. 7 изображен вертикально стоящий стержень громотвода, упирающийся на рифленый металлический лист. Этот рисунок дает представление о связи интенсивности и вида отложения на рифленом листе с условиями обтекания стержня громотвода воздухом с частицами.

Отношение толщины „эффективного“ слоя воздуха h_0 , несущего поток частиц на гладкий цилиндр, к диаметру этого цилиндра D , согласно [1], зависит от диаметра капелек (частиц) δ , скорости потока v и диаметра цилиндра

$$\frac{h_0}{D} = f\left(\frac{\delta^2 v}{D}\right).$$

Обтекание цилиндра воздухом при наличии на нем отложений заметно отличается от обтекания гладкого цилиндра, поэтому характеристика h_0/D и ее связь с параметрами δ , v , D нуждается в уточнении.

Форма и интенсивность обрастания деталей сооружения изморозью и льдом связаны, в частности, с направлением натекающего потока частиц, аэродинамикой обтекания детали, конфигурацией и размером предмета. Если предмет имеет сложную конфигурацию, то сложны и линии тока воздуха, обтекающего предмет, и конфигурация отложения на нем.

Для выявления линий тока были применены шелковинки, которые вводились в поток на тонких стальных спицах. Эти шелковинки устанавливались вдоль разрастания отложения (табл. 8¹); наблюдалось согласование распределения отложения вокруг стойки с распределением линий тока около предмета.

В табл. 9 приведены наблюдавшиеся отложения на разных деталях оборудования мачты. Здесь видны разнообразные и сложные формы отложений. Это говорит о том, что линии тока вдоль этих предметов имели разную и сложную конфигурацию.

¹ На табл. 8 иглы, введенные в отложения, выделяются строгой линейностью, а шелковинки на фоне поля отложения извилистые.

По радиусам кривизны вихревых форм отложений на предметах были определены радиусы кривизны воздушных вихрей у предметов. Радиусы кривизны вихрей на деталях лебедки мачты составляли от 120 до 270 мм, на чаше локатора — от 85 до 170 мм, от 120 до 500 мм, от 800 до 4400 мм; на реях — от 25 до 90 мм, от 40 до 220 мм; на цилиндре мачты — до 1130 мм.

По известной скорости ветра u в месте „вихревых“ отложений и их размеру R могут быть определены частоты ветровых пульсаций ν , действовавших на предмет (сооружение) в месте отложений, по формуле

$$\nu = \frac{u}{2R}.$$

Эти частоты при $u=8\div 10$ м/сек составили $2(1\div 10^2)$ сек⁻¹.

Наблюдавшаяся форма отложений на сооружении и его деталях позволяет выявить отдельные особенности аэродинамики сооружения.

Сложность форм отложений на теле мачты показана в табл. 10. Здесь очевидна связь формы отложений с обтекаемостью воздухом самих отложений и деталей мачты. На теле мачты различались ячеистая структура отложения у оси натекавшего на мачту воздушного потока (стрелочка слева) и продольные наросты отложения на периферии натекавшего на мачту воздушного потока (стрелочка справа).

Некоторые особенные формы отложений на деталях и конструктивных узлах мачты представлены в табл. 11. Это вихревые отложения на чаше локатора (а), многоярусные отложения на горизонтальном металлическом стержне диаметром 15 мм и вертикальной металлической трубе диаметром 60 мм (б), торцевой нарост на металлической трубке диаметром 25 мм и металлическом цилиндре диаметром 120 мм (в) и ворсистое отложение на защитном цилиндре гололедографа диаметром 120 мм и металлическом стержне диаметром 15 мм (г).

Ярусность нарастания была вызвана сменой погодных условий.

Торцевой нарост наблюдался по контуру трубы навстречу потоку частиц отложения. Ворсистое отложение было на предмете, имевшем шероховатую поверхность. На выступах поверхности начиналось образование зародышей отложения, впоследствии разросшихся. Эту шероховатость можно сгладить смазкой.

В табл. 12 приведены примеры необычного обрастания 5-мм провода сплошным массивом с круговым охватом, с улиточным заворотом при повороте отложения на том же вертикально расположенном проводе и нарастание зернистой изморози на ледяной основе, которая на фотографии выделяется темным цветом.

В табл. 13 приведен пример нароста зернистой изморози

на гололеде, образовавшемся вследствие перекристаллизации изморози в гололед. Для наглядности нарост сфотографирован спереди (*а*), справа (*б*) и слева (*в*). Наличием такого нароста в определенной мере объясняется часто наблюдающееся устойчивое сохранение отложений на вертикальном стержне или проводе.

В табл. 14 у троса видна гололедная трубка (более темная) очень цепкая и очень прочная, на которой зернистая изморозь держалась в течение нескольких недель.

Гололедные трубки имели концентричное строение, как и выросшее на них отложение изморози. Гололед наблюдался также в виде отдельных включений в отложение. Гололедные трубки и включения льда, по-видимому, имеют рекристаллизационное происхождение, т. е. они образовались вследствие перехода зернистой изморози в гололед.

В общем переход зернистой изморози у поверхности предмета в гололед повышает устойчивость отложения.

При резком понижении температуры воздуха были отмечены случаи перехода зернистой и кристаллической изморози в чистый гололед, часто ноздреватого вида (табл. 15 и 16).

На вертикальных стержнях диаметром 15 мм наблюдались отложения „лапчатой“ формы (табл. 17). Угол „раствора“ этого отложения связан, по-видимому, с вариациями направления и пульсацией натекающего потока. При лапчатой форме нароста местами прекращается доступ потока частиц к поверхности предмета. В результате этого в отложении создаются полости, и оно имеет малую плотность.

В табл. 18 видно зернистое отложение на швеллерном конструктивном узле подъемного крана. Нарост в этом случае как бы расширяется к основанию отложения. В отличие от лапчатой формы отложения такой нарост, по-видимому, связан с устойчивым направлением поступления облачных частиц на предмет.

В ряде случаев наблюдалось увеличение размеров отложения на краях обтекаемых предметов. Так, на вращающейся крыльчатке анемометра основное отложение нарастало с ребра. Отложение „с ребра“ наблюдалось и у неподвижных предметов различных сечений и конфигураций. В табл. 19 показано отложение по краю плоскости лопасти перпендикулярно ее поверхности. Направление ветра отмечено стрелкой φ . В табл. 20 такое отложение видно на кронштейне сложной конфигурации (труба диаметром 60 мм) и проводе диаметром 4 мм. В табл. 21 отложение концентрируется на периметре деталей: кольцевое отложение по краю круглой пластинки (*а*), шестиугольное отложение по периметру шестигранной гайки (*б*), отложение вдоль боковых граней пластинки (*в*, *г*), по граням фигурных деталей (*д*).

Рост отложения преимущественно на краях предмета может быть назван „краевым эффектом“. Это явление наблюдалось также и при поставленном специально опыте по изучению процесса захвата предметом частиц отложений.

В опыте на стержень накладывалась очищенная от эмульсии стравленная и смазанная вазелином фотопленка, риска на которой совмещалась с осью стержня. Стержень с пленкой выдерживался 1—2 минуты в натекавшем потоке облачной массы.

Развернутая пленка с осевшими на ней частицами фотографировалась с помощью микрофотоустановки. Фотографировали

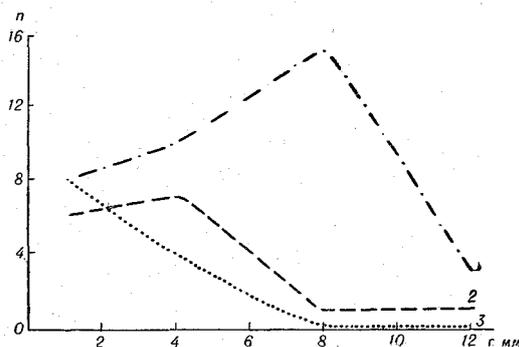


Рис. 5. Распределение числа частиц n отложения различных размеров, осевших на $0,1 \text{ мм}^2$ поверхности проволоки на расстоянии r от оси, в опыте 25 января 1965 г. при температуре -4°C и скорости ветра 7 м/сек.

1) $r = 0,060 \div 0,100$ мм; 2) $r = 0,025 \div 0,050$ мм; 3) $r < 0,020$ мм.

участки пленки, находящиеся на различном расстоянии от риски. На каждом кадре определялось число осевших частиц и их размеры.

На рис. 5 дан график распределения „крупных“, „средних“ и „мелких“ частиц, осевших на площади $0,1 \text{ мм}^2$ поверхности пленки, в зависимости от расстояния до риски (оси).

Из графика видно, что число крупных частиц резко убывает с расстоянием от оси, для средних частиц убывание наблюдается с некоторого расстояния от оси и для мелких частиц это убывание отмечается на большем расстоянии от оси, чем для средних. Таким распределением частиц по поверхности обтекаемого предмета может быть объяснен отмеченный выше краевой эффект роста отложений. К краю проволоки происходит оседание мелких частиц, а их, по-видимому, большинство.

На предмете сложной конфигурации отложение повторяет ее, а на выделяющихся деталях отложение выступает, как бы выпячивается. Такое выпячивание видно в табл. 22.

ОХВАТ, ЗАЛЕПЬ, ОТВАЛЫ И ОПАДАНИЕ ОТЛОЖЕНИЙ

Для оценки обрастания деталей мачты в зависимости от их конфигурации определялось отношение размера отложения на предмете (d) к размеру предмета (D). Это отношение у раз-

ных деталей мачты на разных уровнях имело значения от 1 до 27 и зависело от структуры отложения, длительности периода роста отложения, конфигурации детали до и после нарастания на ней отложения.

На одном и том же тросе это отношение при гололеде доходило до 10, а при образовании зернистой изморози — до 25.

Оценка величины d/D указывает на зависимость ее от материала предмета, его шероховатости, конфигурации вида отложения на предмете и пр.

Важной характеристикой является коэффициент охвата поверхности предмета отложением (K) — отношение периметра отложения l к периметру предмета L . Коэффициент K входит в расчетную формулу нормативных гололедных нагрузок. Он определяется по контуру отложения на предмете, обрисованному на специальном шаблоне, который прикладывается к торцу измеряемого образца отложения. Значения его приведены в табл. III.

Таблица III

Коэффициент охвата металлического стержня (диаметром 15 мм) разными видами отложений по наблюдениям за 1965—1967 гг.

z м	1965/66 г.							1966/67 г.							
	V		∞		V∞		V	V		∞		V∞		V	
	от	до	от	до	от	до	до	от	до	от	до	от	до	от	до
301	0,1	1,0	0,1	0,3	0,1	1,0	0,3	0,2	1,0	0,3	0,5	0,2	1,0	0,4	0,5
265	0,1	1,0	0,1	0,3	0,1	1,0	0,3	0,2	1,0	0,3	0,6	0,2	1,0	0,4	0,5
217	0,1	1,0	0,1	0,3	0,1	1,0	0,3	0,4	0,8	0,4	0,5	0,2	1,0	0,3	0,5
169	0,1	1,0	0,1	0,5	0,1	0,6	0,3	0,4	0,8	0,2	0,5	0,3	1,0	0,3	0,5
121	0,1	0,5	0,1	0,4	0,1	0,4	0,3	—	0,6	0,2	0,7	0,2	1,0	0,2	0,6
73	0,1	0,3	—	—	0,1	0,3	0,3	—	—	0,4	0,5	—	—	0,3	0,6
25	—	—	—	—	—	—	0,3	—	—	—	0,4	—	—	0,3	0,6
2	—	—	—	—	—	—	0,3	—	—	—	—	—	—	0,3	0,6

Наибольший охват отложениями отмечался при отложении зернистой изморози и ее смеси с гололедом.

Коэффициент охвата горизонтальных жестко укрепленных предметов (стержень, поручни ограды и др.) не превышал 0,5—0,6; жестко вертикально укрепленных предметов (пластинка, труба, приемник гололедографа и др.) составлял 0,5—1,0. Свободно подвешенные и поэтому колеблющиеся тросы, как

правило, покрывались отложениями полностью, и коэффициент охвата составлял 1,0.

Рисунок 6 составлен для случаев отложений на металлическом стержне преимущественно зернистой изморози в облаках, нижняя граница которых не опускалась ниже 50—70 м.

Предельное значение коэффициента охвата до уровня примерно 150 м достигало 0,6, в слое около 150—200 м — 0,9, выше 200 м — 1,0.

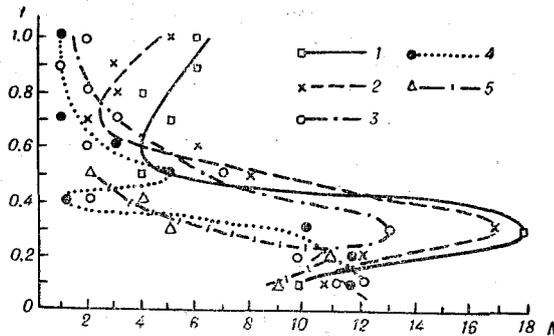


Рис. 6. Число случаев (N) с различным охватом отложением металлического стержня диаметром 15 мм в зиму 1965/66 г. на разных высотах.

1) 301 м, 2) 265 м, 3) 217 м, 4) 169 м, 5) 121 м.

Полный охват отложениями поверхности наблюдается у тросов и проводов как подвижных, так и неподвижных. Такое круговое обрастание может быть объяснено как „обкатыванием“ тросов и проводов натекающими частицами, так и вихревой циркуляцией воздуха вокруг троса (провода). Пример такого кругового обрастания представлен на табл. 23 для горизонтально и вертикально расположенных тросов. В структуре отложения на вертикальном тросе прослеживается вихревое нарастание отложения.

При горизонтальном положении троса (провода) и полном охвате отложением вес его составлял 75% веса отложения на вертикально расположенном тросе (проводе).

Для приводимого в табл. 23 случая величина нагрузки составляла 17,1 кг/м на вертикально расположенном тросе и 12,8 кг/м на горизонтальном.

Полный охват отложениями предметов находится в непосредственной связи с явлением, которое может быть названо залипа-

нием или залестью¹. Примеры такого залипания (залепи) отложений представлены в табл. 24, 25, 26.

В табл. 24 даны примеры залепи конструктивного узла ограждения балкона мачты — вертикальной стойки диаметром 60 мм и горизонтальных ограждающих прутьев диаметром 25 и 15 мм. Этот узел ограждения хорошо виден по табл. 25. Здесь же показана залесть узлов ограждения балкона и большого нароста отложения на опытной крестовине с вертикальным стержнем диаметром 40 мм (виден очищенным) и горизонтальными стержнями диаметром 15 мм.

Видимые в табл. 25 *a* модели образца крыла и полусферы сфотографированы очищенными от отложений.

Укажем, что наблюдавшееся отложение на кабеле диаметром 18 мм, показанное в табл. 26, помимо заметной дополнительной весовой нагрузки на кабель, увеличивает его парусность иной раз в 10 раз.

Увеличение площади поверхности сооружений из-за залепи, а равно и значительная шероховатость последней повышают ветровую нагрузку на сооружение.

В приведенных примерах залесть отложений на стойках с перилами достигала площади 0,3—0,6 м².

Для безопасности работ вблизи сооружений, подверженных интенсивному обледенению, важно знание процессов отвала отложений с них и на каком расстоянии от сооружения наблюдаются отвалы отложений.

Повышение температуры после длительного холодного периода, во время которого были отложения на сооружении, вообще говоря, может служить предвещающим условием ожидания опасного явления опадания отложений. Значительные отвалы наблюдались после сильного обледенения при повышении температуры воздуха до значений, близких к 0° и выше.

Отвал отложения связан с подтаиванием отложения у поверхности предмета, где образуется тонкая жидкая пленка, резко ослабляющая сцепление отложения с предметом. Отложение под влиянием своего веса и давления ветра отваливается от предмета. Отвалившиеся отложения имеют вид стержней или комьев (табл. 27).

Результат опадания комьев вокруг мачты иллюстрируется табл. 28 и стержней — табл. 29.

В первом случае в снеге видны круглые углубления, во втором — углубления продолговатые. В табл. 30 более четко на заснеженной поверхности у мачты сняты следы отвалов — стержневых и комьевых.

¹ Залестью названо образование, когда несколько деталей предмета покрываются одним слоем отложения.

Таблица IV

Характеристика опавших отложений по наблюдениям в зимы
1963—1966 гг.

Зима	1963/64	1964/65	1965/66
Число дней с опаданием	5	4	6
Число обломков на 1 м ²	3,8	0,1	1,5

Диаметр следов отвалов на поверхности до 0,5 м, длина их до 2—3 м и ширина — до 0,1—0,2 м. Наибольший вес опавших отложений составляет 10—15 кг. Отложения наблюдаются в среднем на расстоянии 100—150 м от мачты, но в отдельных случаях на расстоянии 50—70 м и даже 200 м.

Эти данные, а также характеристики опадания, приведенные в табл. IV, следует учитывать при планировании оградительных и других сооружений у высотной мачты.

**НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ПРОЦЕССОМ
ОТЛОЖЕНИЯ ГОЛОЛЕДА
И ИЗМОРОЗИ**

Наблюдения за процессом образования гололеда и изморози проводились на мачте главным образом в облачности, где процессы роста и отложений были достаточно интенсивными. Изучался рост отложения на поверхности предметов из разных материалов и конструкций (проводе, пластинке, изогнутом листе, профиле самолетного крыла, полусфере и цилиндре), на смазанных и несмазанных поверхностях их, а также по-разному обращенных к натекающей облачной массе и выдержанных в ней разное время. Образовавшиеся отложения фотографировались.

Введение в поток воздуха у предмета шелковинок давало представление об условиях обтекаемости потоком отложения. Посредством микрофотографии изучалось распределение частиц отложения по поверхности предмета.

Наблюдения показали, что распределение размера и веса отложений с высотой подобно распределению скорости роста и испарения их:

$$\pm \psi_d = \frac{d_{t_I} - d_{t_{II}}}{t_1 - t_2},$$

$$\pm \psi_p = \frac{P_{t_I} - P_{t_{II}}}{t_1 - t_2}.$$

На рис. 7 приведены примеры характерных профилей кристаллической и зернистой изморози в феврале 1964 г. Профили эти даны для размера d и веса P и обозначены буквой b . Рядом

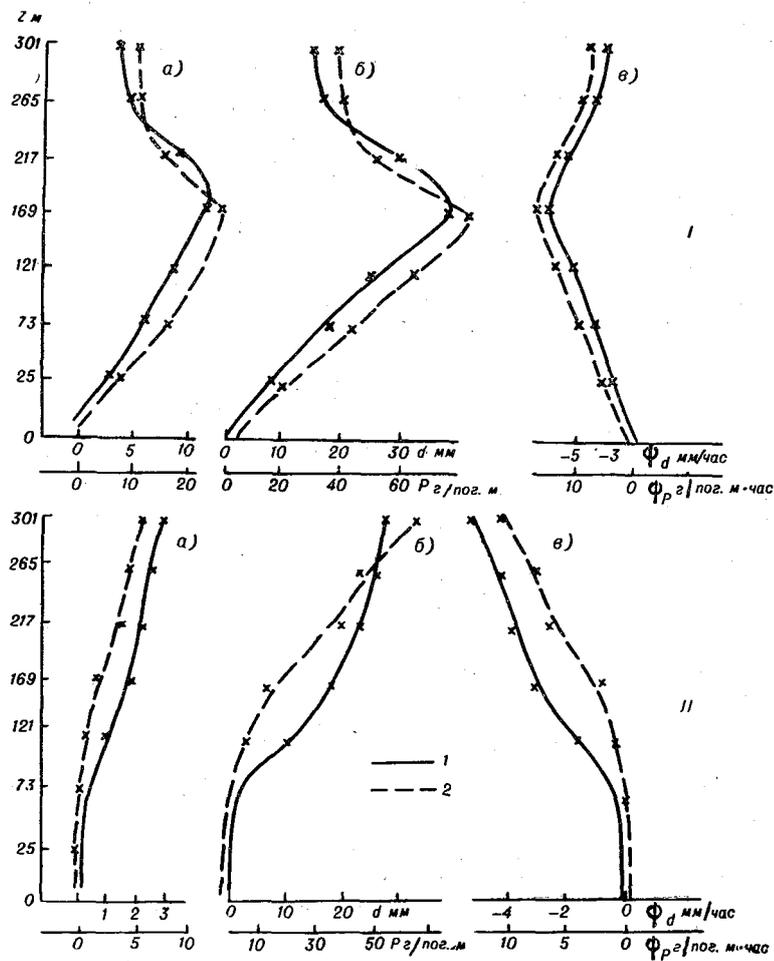


Рис. 7. Распределение с высотой толщины, веса и скоростей роста и испарения отложений зернистой изморози 11 февраля 1964 г. (I) и кристаллической изморози 13 февраля 1964 г. (II).

I) толщина отложений, 2) вес отложений; I. а) 6–9 ч., б) 9 ч., в) 9–14 ч.; II. а) 23–9 ч., б) 9 ч. 30 м., в) 9–13 ч.

z м	Низкая облачность						Туман					
	∇		∞		∇∞		∇		∞		∇∞	
	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-

Размер

301	$\frac{0,9}{12}$	$\frac{0,3}{14}$	$\frac{0,6}{7,5}$	$\frac{0,3}{20}$	$\frac{0,2}{1,3}$	$\frac{0,01}{12}$	$\frac{0,2}{9,4}$	$\frac{0,2}{15}$	$\frac{0,2}{2,0}$	$\frac{0,2}{0,3}$	$\frac{1,0}{4}$	$\frac{0,1}{12}$
265	$\frac{0,7}{11}$	$\frac{0,2}{10}$	$\frac{0,3}{7,0}$	$\frac{0,3}{10}$	$\frac{0,5}{7,0}$	$\frac{0,2}{7,0}$	$\frac{1,3}{9,0}$	$\frac{0,1}{5,0}$	$\frac{0,2}{1,1}$	$\frac{0,3}{0,4}$	$\frac{0,2}{11}$	$\frac{0,3}{12}$
217	$\frac{0,5}{7,2}$	$\frac{0,1}{7,0}$	$\frac{0,2}{7,5}$	$\frac{0,2}{8,3}$	$\frac{0,9}{2,0}$	$\frac{0,3}{5,0}$	$\frac{1,0}{7,2}$	$\frac{0,2}{2,5}$	$\frac{0,2}{2,5}$	$\frac{0,2}{0,6}$	$\frac{0,2}{5,2}$	$\frac{0,2}{5,0}$
169	$\frac{0,3}{9,1}$	$\frac{0,2}{5,1}$	$\frac{0,2}{3,0}$	$\frac{0,1}{6,0}$	$\frac{0,6}{2,0}$	$\frac{0,2}{4,4}$	$\frac{0,4}{7,0}$	$\frac{0,6}{2,5}$	$\frac{0,01}{1,5}$	$\frac{0,1}{0,8}$	$\frac{0,3}{3,1}$	$\frac{0,1}{4,1}$
121	$\frac{0,2}{3,1}$	$\frac{0,2}{5,8}$	$\frac{0,1}{4,0}$	$\frac{0,2}{2,2}$	$\frac{0,8}{1,0}$	$\frac{0,1}{2,0}$	$\frac{0,02}{4,0}$	$\frac{0,06}{1,9}$	$\frac{0,02}{0,6}$	$\frac{0,1}{0,5}$	$\frac{0,4}{2,0}$	$\frac{0,3}{2,5}$
73	$\frac{0,1}{2,0}$	$\frac{0,1}{2,0}$	$\frac{0,07}{0,1}$	$\frac{0,1}{2,0}$	—	—	$\frac{0,01}{2,0}$	$\frac{0,01}{1,1}$	$\frac{0,01}{0,3}$	$\frac{0,01}{0,4}$	$\frac{0,1}{1,1}$	$\frac{0,1}{1,5}$
25	$\frac{0}{1,5}$	$\frac{0,1}{1,0}$	$\frac{0,05}{0,05}$	$\frac{1,1}{1,1}$	—	—	—	—	$\frac{0}{0,06}$	$\frac{—}{2,3}$	—	—
2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Бес

301	$\frac{1,5}{97}$	$\frac{1,0}{331}$	$\frac{4}{120}$	$\frac{2}{60}$	$\frac{1,5}{222}$	$\frac{2}{147}$	$\frac{2}{40}$	$\frac{2}{29}$	$\frac{2}{14}$	$\frac{2}{2}$	$\frac{42}{78}$	$\frac{54}{105}$
265	$\frac{1,0}{80}$	$\frac{0,5}{157}$	$\frac{5}{58}$	$\frac{25}{195}$	$\frac{25}{172}$	$\frac{0,5}{120}$	$\frac{0,9}{55}$	$\frac{0,5}{22}$	$\frac{0,9}{10}$	$\frac{—}{3}$	$\frac{5}{78}$	$\frac{9}{49}$
217	$\frac{1,5}{42}$	$\frac{1,0}{83}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{1}{123}$	$\frac{0,3}{72}$	$\frac{2}{48}$	$\frac{7}{32}$	$\frac{0,2}{14}$	$\frac{—}{7}$	$\frac{0,2}{2}$	$\frac{—}{3}$	$\frac{26}{42}$
169	$\frac{1,5}{62}$	$\frac{1,0}{21}$	$\frac{0,5}{32}$	$\frac{10}{21}$	$\frac{2}{41}$	$\frac{0,6}{22}$	$\frac{15}{33}$	$\frac{2}{23}$	—	$\frac{0,8}{1,0}$	$\frac{—}{30}$	$\frac{90}{31}$
121	$\frac{0,6}{15}$	$\frac{1,0}{15}$	$\frac{2}{25}$	$\frac{4}{7}$	$\frac{6}{26}$	$\frac{2}{16}$	$\frac{15}{35}$	$\frac{5}{13}$	—	$\frac{0}{5}$	$\frac{—}{27}$	$\frac{90}{14}$
73	$\frac{1,0}{1,5}$	$\frac{0,5}{2}$	$\frac{0,6}{22}$	$\frac{—}{2}$	—	—	$\frac{5}{7}$	$\frac{6}{20}$	—	—	$\frac{—}{52}$	—
25	—	—	—	—	—	—	—	—	$\frac{—}{3}$	$\frac{6}{—}$	—	—
2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Таблица V

Переменные погодные условия								Радиационное выхолаживание	
∇		∞		∇∞		∇		∇	
+	-	+	-	+	-	+	-	+	+

$\frac{\text{мм}}{\text{час}}$

$\frac{1,1}{12}$	$\frac{0,1}{10}$	$\frac{0,1}{3,5}$	$\frac{0,1}{1,1}$	$\frac{0,3}{1,5}$	$\frac{0,2}{9,0}$	-	-	$\frac{1,0}{7,0}$	$\frac{0,5}{30}$
$\frac{1,0}{12}$	$\frac{0,1}{10}$	$\frac{0,1}{3,5}$	$\frac{0,2}{1,5}$	$\frac{0,4}{2,0}$	$\frac{0,3}{12}$	-	-	$\frac{0,9}{6,0}$	$\frac{0,4}{21}$
$\frac{0,5}{11}$	$\frac{0,2}{5,0}$	$\frac{0,09}{3,0}$	$\frac{0,2}{1,1}$	$\frac{0,2}{2,5}$	$\frac{0,4}{13}$	-	-	$\frac{0,7}{4,0}$	$\frac{0,2}{5,0}$
$\frac{0,3}{7,3}$	$\frac{0,3}{10}$	$\frac{0,01}{1,0}$	$\frac{0,1}{0,5}$	$\frac{0,09}{1,1}$	$\frac{0,2}{5,5}$	-	-	$\frac{0,4}{8,0}$	$\frac{0,1}{7,5}$
$\frac{0,2}{4,0}$	$\frac{0,1}{6,0}$	$\frac{0,01}{0,5}$	$\frac{0,1}{0,5}$	$\frac{0,01}{0,8}$	$\frac{0,1}{3,5}$	-	-	$\frac{0,3}{8,1}$	$\frac{0,2}{9,5}$
$\frac{0,1}{2,1}$	$\frac{0,2}{4,3}$	$\frac{0,06}{-}$	$\frac{0,7}{-}$	-	-	$\frac{0,3}{4,0}$	$\frac{0,6}{1,0}$	$\frac{0,8}{8,0}$	$\frac{0,1}{6,5}$
$\frac{0,1}{2,0}$	$\frac{0,1}{3,0}$	-	-	-	-	$\frac{0,5}{-}$	$\frac{0,8}{-}$	$\frac{0,5}{7,0}$	$\frac{0,1}{5,0}$
-	-	-	-	-	-	-	-	$\frac{0,1}{4,0}$	$\frac{0,1}{3,6}$

$\frac{\text{г}}{\text{м} \cdot \text{час}}$

$\frac{3}{140}$	$\frac{3}{439}$	-	-	-	-	-	-	$\frac{1}{28}$	$\frac{0,5}{60}$
$\frac{5}{116}$	$\frac{3}{360}$	-	-	-	-	-	-	$\frac{1,3}{28}$	$\frac{1}{24}$
$\frac{4}{68}$	$\frac{1}{200}$	-	-	-	-	-	-	$\frac{0,2}{15}$	$\frac{0,5}{16}$
$\frac{2}{56}$	$\frac{2}{282}$	-	-	-	-	-	-	$\frac{1}{13}$	$\frac{1}{10}$
$\frac{2}{68}$	$\frac{2}{20}$	-	-	-	-	-	-	$\frac{1,7}{13}$	-
-	-	-	-	-	-	-	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{11}$	$\frac{2}{7}$
$\frac{5}{-}$	$\frac{3,5}{-}$	-	-	-	-	$\frac{1}{1,5}$	$\frac{2}{3,5}$	$\frac{1,5}{5}$	$\frac{7}{0,5}$
-	-	-	-	-	-	-	-	$\frac{2}{-}$	-

нанесены соответствующие профили скорости роста (a) и испарения (σ) этих отложений $+\psi_{d,p}(z)$.

Профили скорости роста и испарения изморози по высоте согласуются с профилями их веса и размера.

Возрастание с высотой величин отложений зернистой изморози и гололеда и скорости их роста и испарения, определенные из выражения

$$\xi_d = \frac{d_{z_I} - d_{z_{II}}}{z_I - z_{II}}$$

(аналогично для ξ_p и $\xi_{\psi_{d,p}}$), имели следующие значения: $\xi_d = 1,2$; $\xi_{\psi_d} = \pm 1,3$; $\xi_p = 1,7$; $\xi_{\psi_p} = \pm 1,7$, т. е. примерно одинаковые.

Отсюда по известной форме и скорости роста или испарения отложения в одной точке внизу можно определить приближенный профиль отложения по высоте.

Случаи несовпадения распределения по высоте отложений зернистой изморози и их скоростей роста и испарения наблюдались сравнительно редко.

Иногда отмечалось уменьшение отложений с высотой, начиная с некоторого уровня, из-за испарения на верхних уровнях, где скорость ветра увеличивалась, или же из-за различий в структуре облачной массы.

Различием структуры облаков на разных высотах может быть объяснено наблюдавшееся чередование слоев с ростом и испарением отложений.

Отмечавшееся иногда уменьшение с высотой утолщения отложения ($\psi_d < 0$) и увеличение веса отложения ($\psi_p > 0$) могло иметь место при изменении структуры отложения на более плотную.

Возрастание и убывание величин d , P , $\pm\psi_{d,p}$ приблизительно одинаковы ($\xi = 2 \div 3$). Это указывает на возможность оценить по наблюдавшейся величине и скорости роста отложения на одной высоте распределение его на других высотах.

Скорость (интенсивность) роста и испарения отложений определялась в промежутках времени между последовательными измерениями отложений. Промежуток этот составлял до 10 час. и более. При таянии отложений измерения учащались до 1—3 час. В 10-часовом промежутке мог происходить рост или испарение отложений. Следовательно, разность замеренных отложений, отнесенная к длительному интервалу времени, определяла среднюю результирующую скорость роста или испарения отложений. За более короткие отрезки времени интенсивность роста и испарения должна быть больше.

Определенные в опытных измерениях за 1964—1967 гг. скорости роста (+) и испарения (−) отложений $\pm\psi_{a,p}$ представлены в табл. V, где в числителе дано наименьшее, а в знаменателе — наибольшее из наблюдавшихся их значений.

Приведенные в таблице большие значения уменьшения отложений условно отнесены к испарению. Они относятся к случаям таяния отложений при положительной температуре воздуха.

Величины максимальной скорости роста и испарения отложений следует рассматривать как заниженные из-за сравнительно короткого периода наблюдений.

Для получения представления о процессе роста отложения на предмете был поставлен специальный эксперимент.

Образец — медный провод диаметром 0,7 мм и длиной 2 мм закреплялся на предметном столике микрофотоустановки так, что был обращен своей осью перпендикулярно направлению натекающей облачной массы — (направлению ветра).

Микрофотоустановка состояла из стереоскопической микрофотонасадки МФН-5 со стереомикроскопом МБС-2 и фотокамерой „Зенит-3М“. Зеркальный видоискатель фотокамеры позволял наблюдать за фотографируемым объектом — проволокой или пластиной толщиной менее 1 мм и до 10 мм, на грани и поверхности которых исследовались рост, распределение и испарение отложений.

При применявшемся 15—17-кратном увеличении наблюдались ледяные зерна и отвердевшие капельки, выпадавшие из облачной массы на поверхность провода. В поле зрения они мерцали. Оседание частиц было неравномерным во времени и по длине образца. Оно происходило одиночными частицами и группами их.

Из рис. 8 видно, как резко менялось в течение 8 мин. число осевших частиц (от 10 до 70 в минуту). Скорость утолщения (мм/мин.) отложения зернистой изморози, полученная сопоставлением последовательно снятых фотографий отложений за период более 2 час., также сильно варьировала. Характер отложений виден из табл. 31. Наблюдение проводилось в низких облаках при постоянной скорости ветра 2 м/сек. и температуре $-4,3^{\circ}$. Скорость утолщения v была в пределах $(0,6 \div 2,2) \cdot 10^{-2}$ мм/мин., т. е. до 1,5 мм/час. Это соизмеримо со средней скоростью роста зернистой изморози по срочным наблюдениям на стержнях (см. выше).

Наблюдения за обледенением разных материалов с разной шероховатостью поверхности велись на стержнях из металла, эбонита, стекла (с гладкой поверхностью), на деревянном бруске и изогнутом многожильном тросе с шероховатой поверхностью (табл. 32). Они были смонтированы на одной стойке.

При достаточно длительном (до 10 час. и более) пребывании этих предметов в облачности все они покрывались отложениями независимо от материала и шероховатости поверхности.

Надо полагать, что вначале, когда рост отложения происходил непосредственно на поверхности предмета, сказывалось влияние формы предмета, шероховатости его поверхности и пр. Но, по-видимому, задержка отложений на чистой поверхности предмета из различного материала, разной формы, шероховатости и даже при разной смазке их поверхности (см. ниже) была незначительной.

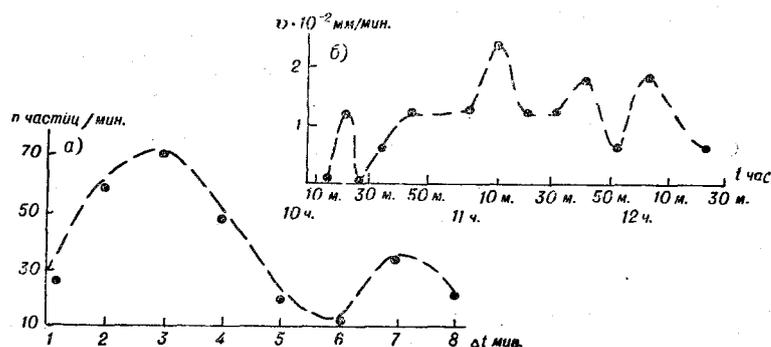


Рис. 8. Изменение со временем количества осевших частиц на предмет (а) и увеличение толщины отложения на нем (б) 14 марта 1967 г.

Отложения наблюдались и на пульсирующих (вибрирующих) образцах при частоте пульсации 50 гц и более. В общем, вибрация предмета до определенной частоты не оберегает предмет от обледенения. Например, нить оледенела при частоте пульсации в диапазоне 50—100 гц. Частота вибрации нити определялась по выдержке при фотографировании ее.

Вообще вибрация предмета оказывает двойное действие на процесс гололедно-изморозевых отложений на нем. При вибрации, когда тело движется против натекающего потока, нанос частиц отложений увеличивается и уменьшается при движении тела по направлению потока. Вибрация при достаточной интенсивности и частоте ее, наверное, может отрывать частицы отложения от предмета, и поэтому целесообразны исследования в этом направлении в целях борьбы с обледенением таким способом.

Пример нарастания отложения на гидрофобной полихлорвиниловой пластинке представлен в табл. 33. На фото видно появление первых очагов отложения зернистой изморози (в) и дальнейший ее рост, более значительный по краям (а, б).

Очаговое нарастание отложения по плоскости пластины и более интенсивный рост отложения по ее краю очевидны и в наблюдении нарастания гололеда (г).

Влияние смазки предмета на нарастание отложения изучалось на специальной установке (табл. 34 а). В гнезде деревянного бруса устанавливались на металлических стержнях два гидрофобных полихлорвиниловых диска (1, 2), первый из которых был покрыт незамерзающей смазкой, и стержни из различных материалов (металл, эбонит и др.), часть из которых (3, 4, 5) также смазывалась незамерзающей смазкой. Образцы выдерживались в течение нескольких часов на открытой площадке мачты в облаках на уровне 300 м.

Первое время интенсивность нарастания отложения на несмазанных образцах (2, 6, 7, 8) была заметно больше, чем на смазанных (1, 3, 4, 5). По-видимому, вначале большинство частиц сдувалось со смазанной поверхности предмета под воздействием ветра. Однако со временем некоторые из натекавших частиц отложения закреплялись в „шероховатостях“ смазанной поверхности, и после этого рост отложения резко усиливался.

В табл. 34 б, в показано обрастание стержней и дисков после нескольких часов экспозиции. На несмазанной и смазанной поверхностях размер отложений примерно одинаков.

Наблюдения за нарастанием отложений на разных предметах при разной ориентации их велись при сравнительном постоянстве температуры воздуха, скорости ветра и влажностности среды.

В табл. 35 приведено положение предметов и вид их до и после образования на них отложений.

На пластинке отложение происходило преимущественно с наветренной стороны. Наблюдалось изгибание прежнего отложения с края при смене ветра на противоположный. Такая особенность роста наблюдалась и на модели полусферы.

Характер отложения на цилиндре определялся главным образом условиями обтекания цилиндра потоком частиц, которые зависят и от ориентации предмета относительно потока.

Обрастание изогнутого листа начиналось с внутренней центральной части, в которую ударял поток, и затем распределялось по всему листу.

Отложения на модели крыла (табл. 36) в начальных стадиях роста наблюдались преимущественно у ребер. Это создавало иную конфигурацию и обтекаемость модели крыла (вместе с отложением). Поэтому в последующем влияние формы крыла на обрастание его почти не сказывалось. Рост отложения происходил преимущественно навстречу натекающему потоку.

Полусфера располагалась выгнутой и выпуклой сторонами в направлении потока (табл. 37). Характер роста и отложения

те же, что и для пластины (см. табл. 35 а). По контуру полусферы происходило нарастание отложения навстречу потоку, когда полость была обращена к нему. Если полость полусферы была обращена в сторону, противоположную натекающему потоку, то при определенных скоростях натекания отложение во внутренней подветренной части полусферы образовывало ячеистую структуру, что было обусловлено наблюдавшимися мелко-масштабными вихревыми возмущениями в этом месте. В качестве примера отложений изморози и гололеда на приборе дана иллюстрация в табл. 38.

**НЕКОТОРЫЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ
НИЖНЕГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ
ПРИ ОТЛОЖЕНИЯХ**

Метеорологические наблюдения в нижнем слое атмосферы для характеристики условий образования гололеда и изморози включали автоматические дистанционные измерения температуры, влажности воздуха, скорости и направления ветра на уровнях наблюдения отложений 25, 75, 121, 169, 217, 265, 301 м.

Аппаратура измерений включалась с заблаговременностью 3—6 час. по синоптическому прогнозу низкой облачности, туманов, антициклонической погоды, при которых наблюдались процессы роста отложений. Измерения продолжались при наступлении этих явлений до их окончания и в течение нескольких часов спустя после них.

В периоды гололедно-изморозевых отложений и сопутствующих им низкой облачности и туманам метеорологом-наблюдателем велись наблюдения за нижней границей низкой облачности по затуманиванию мачты и по приборам, за верхней границей низкой облачности и туманов. Наблюдения за верхней границей велись при подъемах наблюдателей на мачту. Ежечасно на пульте — индикаторе дистанционных измерений — отсчитывались температура, скорость и направление ветра на уровнях 8 и 301 м. Кроме того, велись наблюдения за видимостью по ориентирам и прибору, за давлением и барической тенденцией по наземным измерениям и за атмосферными явлениями. Наблюдения регистрировались в журнале-дневнике погоды, в котором отмечались начало и конец периода гололедно-изморозевого отложения. При измерении отложений на расстоянии 20—25 см от них велись измерения скорости ветра ручными анемометрами Фусса и АРИ и температуры психрометром Ассмана. Данные метеорологических наблюдений были использованы в анализе связи метеорологических элементов и основных характеристик гололедно-изморозевых явлений.

Распределение по высоте толщины отложения обуславливается температурой и влажностью воздуха, скоростью ветра и другими факторами и в особенности высотой расположения облаков и содержанием в них частиц.

Наблюдались случаи образования отложений при отсутствии облачности и радиационного выхолаживания. По-видимому, в атмосфере существуют значительные вариации относительной

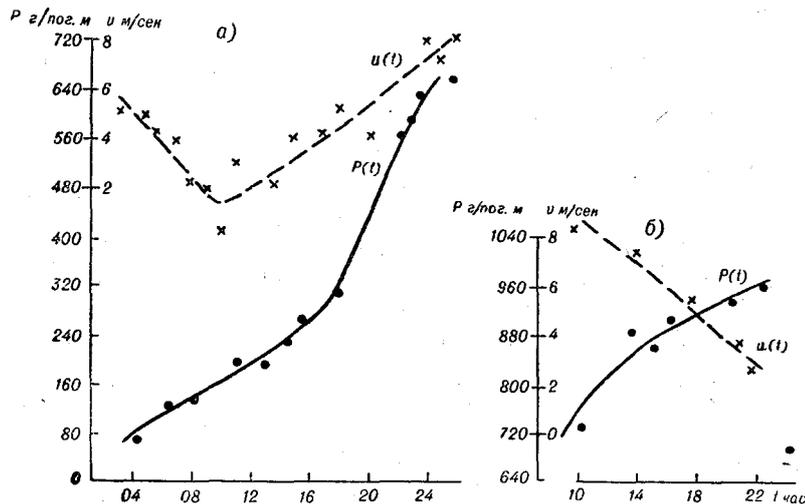


Рис. 9. Изменение веса отложения и соответствующий ему ход скорости ветра на уровне 300 м.

- а) 28 ноября 1965 г. $\phi = \text{const}$, $e = 96 \div 100\%$;
- б) 22 декабря 1965 г. $\phi = -0,7 \div 1,0^\circ \text{C}$, $e = 97\%$.

влажности, достигающей до 100% без образования видимых глазу облаков или туманов.

В некоторых случаях при сравнительно низких температурах ($-6, -9^\circ$) отмечалась независимость отложений от скорости ветра, при более высоких температурах ($-4, -5^\circ$) — обратная зависимость и при температуре, близкой к нулю, связь величины отложения и скорости ветра не отмечалась. Можно предполагать, что при сравнительно низких отрицательных температурах связи частиц отложения достаточно прочные и усиливающийся ветер, увеличивая нанос частиц на отложение, уже „не в силах“ сорвать их с отложения. При более высоких отрицательных температурах связь частиц отложения ослабевает, и при возрастании скорости ветра число наносимых частиц отложения оказывается меньше числа частиц, срываемых ветром с отложения. При температуре воздуха, близкой к нулю, связь частиц отложения слабая, и число частиц, наносимых на

отложение, может оказаться равным числу частиц, срываемых ветром с отложения.

Ниже иллюстрируются отдельные примеры связей величины отложения и некоторых метеорологических характеристик атмосферы на уровне измерения.

На рис. 9 приведены примеры наблюдавшихся изменений с течением времени интенсивности отложения и скорости ветра при почти постоянной температуре воздуха и меняющейся влажности и при постоянной относительной влажности и меняющейся

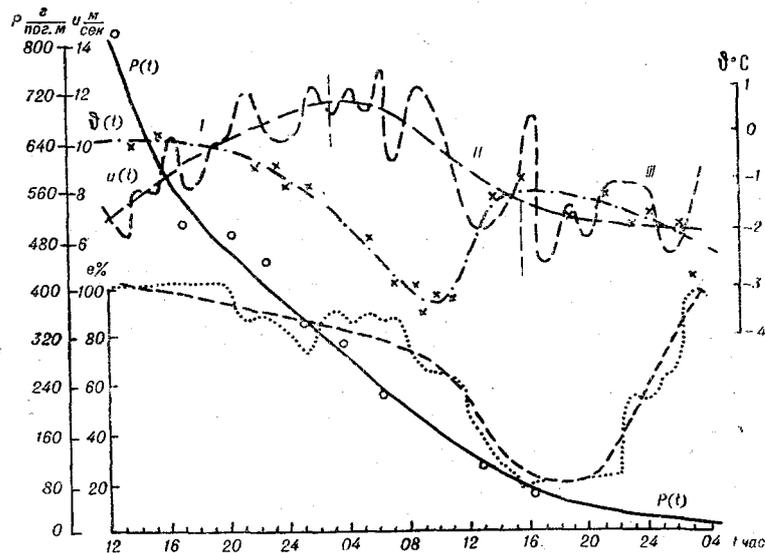


Рис. 10. Совмещенный график изменений веса отложений, температуры и влажности воздуха и скорости ветра при отложении 9—11 марта 1966 г.

температуре воздуха. В случае *a* усиление скорости ветра с 10 час. опережает возрастание интенсивности отложения. В случае *б* рост отложения ослабевает при убывании скорости ветра. Изменение интенсивности роста отложения в последнем примере связано главным образом с уменьшением или увеличением наноса частиц на предмет. Влияние температуры воздуха менее заметно.

На рис. 10 в примере испарения отложения уменьшение скорости испарения происходило как при увеличении, так и при убывании скорости ветра. Уменьшение отложений при возрастании скорости ветра часто связано с превалированием отрыва частиц над их поступлением. Отрыв, как говорилось и ранее, зависит от прочности сцепления частиц отложений с поверх-

ностью предмета и с отложением. Она связана с температурой, а также с шероховатостью и структурой отложения. Чаще всего интенсивность испарения падает при убывании скорости ветра.

Весьма важно, в каком слое облачности находится предмет, в верхнем, среднем или нижнем, какова мощность облаков и их водность.

Связь интенсивности отложения с расстоянием предмета от нижней границы низких облаков представлена на рис. 11.

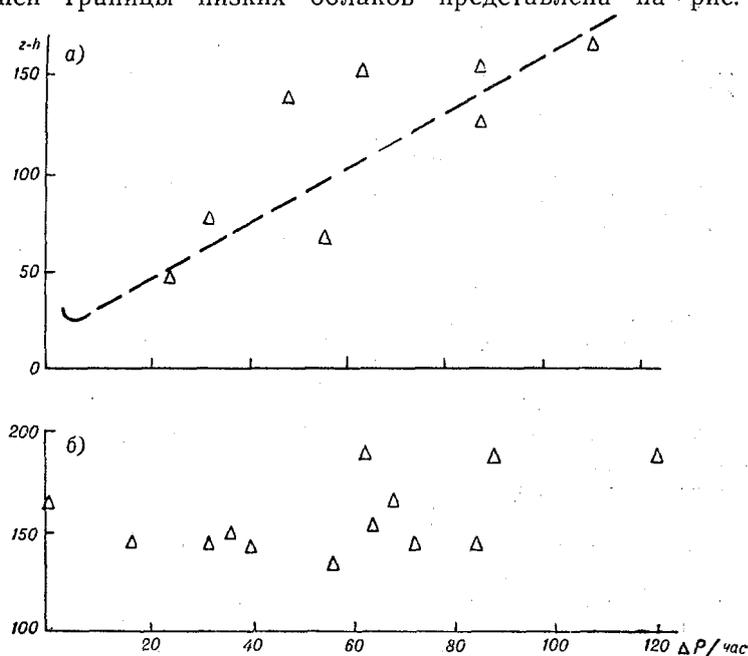


Рис. 11. Связь интенсивности отложения с расстоянием между предметом ($z-h$) и нижней границей облаков (h) при понижении температуры 18—19 февраля 1966 г. (а) и при повышении ее до значений, близких к 0°C , 4 декабря 1965 г. (б).

В первом случае намечается тенденция некоторой зависимости интенсивности отложения от величины ($z-h$), где z — уровень измерения в нижней облачности над ее нижней границей h . Это, по-видимому, обусловлено увеличением прочности сцепления части отложения с понижением температуры в облаке и с возрастанием скорости ветра с высотой. Во втором примере указанной выше зависимости нет.

При расположении нижней границы низких облаков выше места нахождения предмета, который оказывается в подоблач-

ном слое атмосферы, намечается падение интенсивности образования отложения с расстоянием от нижней границы облака, так как от этой границы к земле влажность воздуха убывает.

На рис. 12 приведены различные изменения веса отложения в низких облаках, когда нижняя граница облаков оставалась

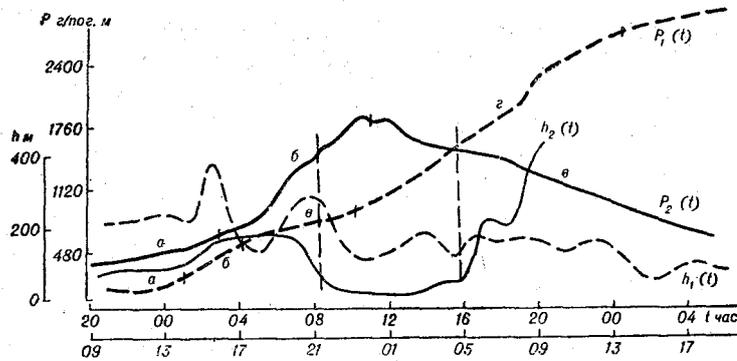


Рис. 12. Совмещенный график изменения веса отложения и нижней границы облаков 15—17 января 1965 г. при $z=265$ м (1) и 4—5 марта 1965 г. при $z=193$ м (2).

ниже уровня расположения предмета. В случае когда с некоторого времени (1 час) температура воздуха поднималась выше 0° , наблюдалось уменьшение отложения в облаках [кривая $P_2(t)$].

Вообще связи интенсивности роста отложения с метеорологическими элементами сложны. Сложный характер связей вызван воздействием многих факторов на процессы отложения, ход которых во времени мог быть различным. Установление этих связей является настоящей задачей будущих исследований.

СТАЦИОНАРНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА НИЗКИМИ ОБЛАКАМИ И ТУМАНАМИ В НИЖНЕМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ

Гололедно-изморозевые явления в нижнем слое атмосферы наблюдались главным образом в низких облаках при отрицательной температуре во всей их толще и в условиях холодной и теплой адвекции воздуха. В низких облаках, являющихся питательной средой гололедно-изморозевых отложений, протекали наиболее интенсивные процессы образования этих отложений.

С условиями образования низкой облачности, изменчивостью ее границ, с разрывами в ней и ее разрушением связаны стадии роста, устойчивого состояния, испарения и отвалов гололедно-изморозевых отложений в нижнем слое атмосферы. В этой

связи важным является знание метеорологических характеристик слоя в ожидании и в процессе образования, изменчивости, разрывов и разрушения низкой облачности, изменчивости ее основных характеристик — уровня граничных полей, мощности и структуры облачности и др.

Определяющими метеорологическими характеристиками слоя могут быть его стратификация, изменения метеорологических параметров во времени, прогрев и перенос масс воздуха в слое, перемещение в нем мезонеоднородностей и др.

Сказанное в равной мере относится к туманам приземным и приподнятым, особенно адвективного происхождения.

Наблюдения с рабочих площадок высотной мачты (табл. 39) позволяют непрерывно и в течение длительного времени проследить изменчивость верхней границы низкой облачности и туманов, структурные особенности их граничных полей и облачные элементы на этой границе. Наблюдения стационарны и потому достаточно надежны.

В табл. 40 приведены примеры наблюдавшегося верхнего граничного поля низкой облачности на уровне 250—300 м, тумана на уровне 100—150 м и расслоения в низких облаках на уровне около 200 м.

В этом примере очевиден в структуре верхней границы низкой облачности ее слоисто-кучевой характер (Sc), в структуре верхней границы тумана ее слоистый характер (St) с различными валами. В случае расслоения низкой облачности на слоистую (St) внизу и слоисто-дождевую (Ns) вверху граничные поля их представлялись ровными (гладкими) без видимых на них облачных элементов.

При фотографировании тумана и низкой облачности на фоне мачты (табл. 41) выявляется очертание их границ (табл. 42, 43) как по ядру дисперсной массы (1), так и по „оболочке“ — граничной прозрачной прослойке (2). По этому очертанию очевидны структурные особенности границ, форма и размеры облачных элементов на ней. Размеры эти определяются средней их толщиной по вертикали $l_v = h_v - h_n$, где $h_{v, n}$ — соответственно уровни верхней и нижней границ облачного элемента, и протяжением по горизонтали $l_r = ut$. Здесь u — скорость горизонтального смещения облачного элемента при допущении, что он не трансформируется. Последнее наблюдается в интервале 2—3 мин. и немногим более. Скорость горизонтального смещения облачного элемента принимается равной скорости ветра на уровне его смещения. Время t определяется в промежутке между временными границами оцениваемого облачного элемента. Размеры эти, определенные по фотографиям (см. табл. 42, 43 и др.), составляли: $l_v = 25 \div 150$ м, $l_r = 100 \div 800$ м, $l_0 = 25 \div 125$ м (l_0 — толщина прозрачной оболочки низкой облачности).

Изменения уровня нижней границы низких облаков, регистрируемые в метеорологической практике фотолокационным и триангуляционным методами, выражают не физическое колебание этой границы, а изменение уровней отражения сигналов от проходящих облачных элементов. Эти уровни могут заметно отличаться от естественных уровней нижней границы низкой облачности, так как оптические сигналы отражаются от разных глубин облачных элементов, в которые они проникают по-разному в зависимости от плотности этих элементов. Из табл. 42 очевидно, что уровни нижней границы низких облаков по фототметкам на мачте (1 и 2) и отметкам, зарегистрированным триангуляционным методом (3), могут различаться на 50 м и более. Отсюда, погрешности регистрации нижней границы облачности у уровней 25—50 м могут достигать 100—150%, а у уровней 100—150 м — 30—35%, что заметно превышает принятую погрешность прибора регистрации нижней границы низкой облачности, равную 15%. Это свидетельствует о возможной погрешности обобщений по действующей методике автоматической регистрации нижней границы низких облаков.

Уровень границы низкой облачности и тумана, определяемой как линия видимого разграничения дисперсной системы, в атмосфере на фоне мачты оценивается с достаточно большой точностью — до 1—2 м, что в относительной мере к диапазону измеряемых уровней их границы во всем нижнем 300-м слое атмосферы составит от 0,5 до 5%.

Для временных изменений нижней границы низкой облачности с малыми облачными элементами характерен сравнительно ровный ход этой границы при ее регистрации. Пульсации уровня нижней границы низкой облачности около ее среднего хода при этом малы. Для временных изменений нижней границы низкой облачности с крупными элементами у этой границы ее зарегистрированный ход характеризуется резкой сменой уровня границы — это ход с большими по амплитуде пульсациями. При сплошной массе низкой облачности у ее нижней границы без выделяющихся облачных элементов зарегистрированный ход этой границы сглаженный, без пульсаций.

Таким образом, по временному ходу уровня нижней границы низкой облачности при непрерывной ее регистрации можно качественно и в определенной мере количественно судить о структурной особенности низкой облачности у ее нижней границы. В этой особенности различаются ровный слоистый, слоисто-кучевой и кучевой характер поверхности граничного поля.

Вообще наблюдение за низкой облачностью и туманом, их образованием и разрушением, трансформацией их элементов „сверху вниз“ значительно эффективнее наблюдений „снизу вверх“. В первом случае контуры дорог, здания, трубы, участка

леса, речная излучина и др. на фоне подстилающей поверхности земли могут служить выразительными видовыми объектами и масштабированными привязками. Во втором случае наблюдения ведутся на фоне слабо контрастирующего неба, особенно при облаках среднего и верхнего ярусов над нижней облачностью и в отсутствии контурных объектов и масштабированной привязки.

В табл. 44 представлен пример прослеживаемой трансформации облачных элементов верхнего граничного поля. При слежении за фиксированной точкой, например видимым темным пятном на верхнем граничном поле низкой облачности, может быть оценена скорость трансформации этого облачного элемента.

В задаче известны: L — расстояние от точки наблюдения на мачте до фиксированной точки облачного элемента — „пятна“ (последний привязывается к видимому наземному ориентиру с известным расстоянием L), t — время прослеживания облачного пятна между фотографиями a и z (см. табл. 44), φ — угловое расстояние между пятнами этих снимков, u — скорость ветра на уровне прослеживаемого пятна.

Если расстояние по прямой между метками (точками) пятна (см. табл. 44 a и z) есть l , а скорость смещения этой метки пятна — скорость его трансформации — „расползания“ есть $u_{\text{смщ}}$ то

$$u_{\text{смщ}} = l/t.$$

Но

$$l = L \sin \varphi,$$

следовательно,

$$u_{\text{смщ}} = L/t \cdot \sin \varphi.$$

Отсюда, скорость трансформации $u_{\text{тр}}$ рассматриваемого облачного элемента определяется из выражения

$$u_{\text{тр}} = u - u_{\text{смщ}} = u(1 - L/ut \cdot \sin \varphi).$$

В рассматриваемом случае при $t=9$ мин., $u=5$ м/сек., $\varphi=30^\circ$ и $L=1500$ м относительная скорость трансформации облачного элемента составляла

$$\frac{u_{\text{тр}}}{u} \approx 0,7,$$

т. е. скорость смещения облачной массы, принимаемая за скорость фиксированной на ней точки, не равна скорости ветра на этом же уровне.

Ниже для наглядности приводятся несколько примеров зво-

люции низкой облачности и трансформации ее элементов по данным наблюдений с верхних уровней мачты в Обнинске.

В табл. 45 приводятся последовательные стадии разрушения низкой облачности на уровне 200—250 м. Таблица 46 иллюстрирует образование облачной гряды на верхнем граничном поле низкой облачности на уровне 150—250 м. Гряда сохранялась единой, отрываясь от основной массы низкой облачности. Эта основная масса низкой облачности со временем рассеивалась, и лишь затем всплывшая над ней облачная гряда разрушалась в кучевые формы. Неразрывность облачной гряды обуславливалась, надо полагать, ее самостоятельными от основной массы низкой облачности термогидродинамическими связями, которые сохранялись до рассеивания основного слоя низкой облачности. Этот слой низкой облачности являлся как бы экранирующим во взаимодействии подстилающей поверхности и облачной гряды над ним.

В табл. 47 представлено интенсивное образование кучевых форм низкой облачности с трансформацией ее элементов в процессе разрушения облачности на уровне 250—300 м.

Таблица 48 иллюстрирует разрушение низкой облачности в последовательности стадий образования в ее толще „рвов“, проталин, разрывов, ее кучевания и рассеяния. Эти процессы наблюдались в слое 200—250 м.

Атмосферный слой между подстилающей поверхностью и нижней границей низкой облачности, особенно при длительном устойчивом ее периоде, может в первом приближении рассматриваться изолированно от атмосферного слоя над этой низкой облачностью. При этом у нижнего подоблачного слоя атмосферы различаются граничные условия у поверхности земли — на нижней („жесткой“) границе слоя и у нижней границы низких облаков — на верхней („мягкой“) границе нижнего слоя атмосферы.

Условия у поверхности земли могут характеризоваться средней температурой поверхности, испарением влаги с нее или конденсацией на ней водяных паров, прогревом (охлаждением) припочвенного слоя и теплообменом этого слоя с вышележащими слоями, излучением и отражением длинноволновой радиации и др. У нижней поверхности низких облаков имеет место процесс динамического равновесия водяных паров, их конденсация и испарение соответственно с выделением и поглощением тепла, поглощение, излучение и отражение длинноволновой радиации и др.

До появления и по исчезновении низкой облачности (обозначим через НО) можно различить „краевые“ — начальные и конечные условия:

а) по „закрытости“ небосвода — балльности и форме облаков, например, верхнего яруса (обозначим через ВЯ) до и

среднего яруса (обозначим через СЯ) после периода низкой облачности или соответственно среднего яруса до и безоблачного неба (0/0) после периода низкой облачности и др.;

б) по термическим и динамическим характеристикам нижнего слоя атмосферы — профилям и временному ходу метеорологических параметров, турбулентным и радиационным характеристикам в этом слое и др.;

в) по наблюдавшимся особым метеорологическим явлениям — осадки, метели и др.

Краевые условия по закрытости небосвода (п. „а“) различались по схемам:

СЯ—НО—ВЯ	(I)
ВЯ—НО—СЯ	(II)
СЯ—НО—0/0	(III)
0/0—НО—СЯ	(IV)
ВЯ—НО—0/0	(V)
0/0—НО—ВЯ	(VI)
ВЯ—НО—ВЯ	(VII)
СЯ—НО—СЯ	(VIII)
0/0—НО—0/0	(IX).

В наблюдениях под Москвой (Мячиково) эти схемы в течение 1962—1965 гг. отмечались в нижеследующем числе случаев *n*:

Схема	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
<i>n</i>	15	15	12	18	5	14	16	51	9

Следовательно, наиболее часто отмечались случаи по схемам: СЯ—НО—СЯ (VIII) и 0/0—НО—СЯ (IV), наименее часто по схеме ВЯ—НО—0/0 (V).

Остальные схемы отмечались в одинаковой мере часто.

Краевые условия по пп. „б“ и „в“ будут частично рассмотрены ниже.

МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НИЖНЕГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ ПРИ НИЗКИХ ОБЛАКАХ

Интенсивные гололедно-изморозевые процессы в нижнем слое атмосферы наблюдались в основном в низкой облачности. В этой связи в ряде наблюдений были сравнительно подробно рассмотрены отдельные метеорологические характеристики нижнего слоя атмосферы в периоды низкой облачности и гололедно-изморозевых процессов в этом слое.

На рис. 13 представлено изменение температуры, скорости и направления ветра, нижней границы низких облаков по наблюдениям 4—6 февраля 1964 г. При этом отфильтрованы пульсации температуры и скорости ветра временного масштаба $\tau \leq 1$ часа, так как они исключены и в изменении низкой гра-

ницы низких облаков, которая наносится по разовым отметкам ее уровня через час.

Промежуток времени этих изменений охватывает несколько часов до появления низкой слоистой облачности, при ее наличии, включая трехчасовой разрыв в ней, и несколько часов после ее повышения и перехода в слоисто-кучевую.

В изменении температуры и ее производных характеристик — локального прогрева воздуха на уровнях подоблачного слоя атмосферы (25—170 м) и вертикального градиента температуры в слое — отмечаются характерные интервалы, обозначенные нами через *A*, *B*, *B*, . . . , *C*. В этих интервалах прослеживаются особенности изменения скорости и направления ветра, вертикальных градиентов скорости ветра, а также мезомасштабные вихревые неоднородности [12], [13], обозначенные стрелочками и римскими цифрами.

Подробное рассмотрение этих особенностей по интервалам показывает отклонение временных изменений температуры и других метеорологических характеристик при низких облаках и в их разрывах от суточного хода этих характеристик при безоблачной погоде. Это отклонение также свидетельствует о взаимном влиянии процессов образования, изменчивости разрывов и разрушения низкой облачности и метеорологических условий в нижнем слое атмосферы. В метеорологических условиях нижнего слоя атмосферы может „ощущаться“ низкая облачность в предусловиях ее появления и в некотором интервале после разрушения (в ее „последствии“).

В рассматриваемом случае за 8—10 час. до наступления устойчивого периода низкой облачности в интервале *A* (с 19 до 22 час.) не отмечалось практически ни нагрева, ни охлаждения слоя, средний градиент температуры в слое составлял $0,8^{\circ}/100$ м. За 4—8 час. до периода возникновения низкой облачности (интервал *B*) произошел нагрев слоя с интенсивностью $(1,8 \div 2,4) \cdot 10^{-2}$ $^{\circ}/\text{час}$. Средний градиент температуры при этом несколько уменьшился по сравнению с интервалом *A* (до $0,6$ — $0,7^{\circ}/100$ м). Для интервалов *A* и *B* показательно некоторое увеличение скорости ветра при сравнительно неизменном его направлении. Вертикальный градиент скорости ветра в слое от интервала *A* к интервалу *B* в среднем увеличился от 1,9 до 2,2 м/сек. на 100 м.

За 2 часа до появления низкой облачности (интервал *B*) продолжался нагрев слоя с интенсивностью около $2,4 \cdot 10^{-2}$ $^{\circ}/\text{час}$., вертикальный градиент температуры равнялся в среднем около $0,7^{\circ}/100$ м, а вертикальный градиент скорости ветра составлял 2,4—2,7 м/сек. на 100 м. В этом интервале наблюдалась вихревая динамическая мезонеоднородность *I*.

В интервалах *A*, *B*, *B* за несколько часов до появления низкой облачности происходил нагрев слоя, не связанный с нормальным суточным ходом температуры.

За 1—2 часа, а иногда и менее до появления низкой облачности в интервале *Г* наблюдалось ослабление интенсивности нагрева слоя до значения $1,5 \cdot 10^{-2}$ °/час. При этом вертикальные градиенты температуры и скорости ветра оставались без изменения.

Для интервала *Д* показательное появление низкой облачности и быстрое опускание ее нижней границы с интенсивностью 1 м/мин. При этом нагрев слоя усилился, а вертикальные градиенты температуры и скорости ветра уменьшились. Последнее свидетельствует об усилении перемешивания в слое. Нагрев слоя происходил, возможно, от выделившегося тепла конденсации водяных паров у нижней границы облачности при наращивании ее снизу.

Для интервала *Е* характерно значительное повышение нижней границы низкой облачности с интенсивностью 1,4 м/мин. При этом происходил интенсивный нагрев слоя и отмечалось увеличение вертикальных градиентов температуры и скорости ветра, что явно свидетельствует об ослаблении перемешивания в слое.

В интервале *Ж* нагрев слоя продолжался, но с меньшей интенсивностью. В этом интервале наблюдалась вихревая динамическая мезонеоднородность *И* и хорошо согласующееся с ней изменение нижней границы облачности. Вертикальный градиент температуры в интервале *Ж* оставался постоянным и составлял 0,8—1,0°/100 м. Вертикальный градиент скорости ветра уменьшался до 1,4 м/сек. на 100 м, что свидетельствовало об усилении перемешивания, которое, возможно, связано с отмеченной мезонеоднородностью.

В интервале *З* в отсутствии нагрева слоя, при неизменном в сравнении с предшествующим интервалом *Ж* вертикальном градиенте температуры, близком к адиабатическому, и несколько возросшем вертикальном градиенте скорости ветра, отмечалось хорошее согласование устойчивого хода температуры, скорости и направления ветра с относительным постоянством нижней границы облачности. В интервале *И* имело место охлаждение слоя, постоянство вертикального градиента температуры в слое, возрастание во времени вертикального градиента скорости ветра вследствие увеличения скорости ветра на верхних уровнях слоя, постоянство направления ветра — отсутствие вихревых движений воздуха и при этом кратковременное, но интенсивное повышение нижней границы низкой облачности (1,6 м/мин).

Для интервала *К* характерно согласование нагрева слоя с постоянством вертикальных градиентов температуры и скорости ветра в слое, с хорошо выраженной вихревой динамической ме-

зонеоднородностью *III* и значительным понижением нижней границы облачности (1,1 м/мин.). Согласование нагрева слоя с понижением уровня нижних облаков, очевидно, возможно по следующим причинам: а) конденсации нижней границы низкой облачности вследствие присутствия водяных паров с выделением теплоты конденсации в слое, б) засасывание низкой облачности вихревой мезонеоднородностью, несколько разреженной внутри. В интервале *L* согласуются установившийся сглаженный ход температуры, скорости и направления ветра и нижней границы облачности при значительных колебаниях ее высоты (± 40 м); при этом не наблюдались ни нагрев, ни охлаждение слоя. Эти характеристики в интервале *L* в рассматриваемом случае предшествуют окончанию периода низкой облачности и прояснению неба.

В интервале *M* в облачном разрыве при ясном небе имело место заметное охлаждение слоя с значительным изменением вертикальных градиентов температуры и скорости ветра, что свидетельствует об изменении устойчивости в слое.

В интервале *N* с появлением облачности среднего яруса за 2—3 часа до наступления нового периода низкой слоистой облачности при постоянстве вертикальных градиентов температуры и скорости ветра происходил значительный нагрев слоя. На переходе из интервала *M* (охлаждение слоя) в интервал *N* (нагрев слоя) наблюдалась вихревая динамическая мезонеоднородность *IV*, роль которой пока не исследовалась. Эта, как и подобная ей мезонеоднородность *I*, наблюдалась за несколько часов до появления облачности.

В интервале *O* при неизменных в сравнении с предшествующим состоянием вертикальных градиентах температуры и скорости ветра с появлением низких облаков продолжался нагрев слоя, но с пониженной интенсивностью.

В интервале *P* за 1—1,5 часа до резкого повышения нижней границы слоистых облаков и появления слоисто-кучевой облачности нагрева слоя не было, но имело место увеличение вертикального градиента температуры и значительное уменьшение вертикального градиента скорости ветра к моменту окончания периода низкой облачности и появлению облачности слоисто-кучевой. Последовательность интервалов *O*, *P* прямо связана с вихревой мезонеоднородностью *V* длительностью около 5 час. (8—13 час).

За последовательностью интервалов *O*, *P* в интервале *R* наблюдался переход от нагрева слоя к его охлаждению при большом вертикальном градиенте температуры и интенсивном динамическом перемешивании в слое (малый вертикальный градиент скорости ветра). Этот интервал хорошо согласуется во времени с мезонеоднородностью *VI*.

За показатель связи изменчивости высоты нижней границы облаков с изменчивостью условий устойчивости (перемешивания) в нижнем подоблачном слое атмосферы в качестве упрощенной характеристики перемешивания приняты вертикальные разности температуры и скорости ветра в слое между уровнями 25 и 170 м.

Прослеживалось хорошее согласование длительности промежутков понижения, повышения и постоянства хода нижней границы низких облаков и ходов вертикальной разности температуры и скорости ветра в подоблачном слое атмосферы 25—170 м (рис. 14, участки 1—2, 2—3, 3—4, . . .). При этом понижение нижней границы облаков в основном согласовывалось с уменьшением вертикальной разности температуры и скорости ветра, т. е. с усилением перемешивания, а повышение нижней границы низких облаков — с увеличением вертикальной разности температуры и скорости ветра, т. е. с ослаблением перемешивания в слое (см. рис. 14, участки 2—3, 3—4, 4—5, 7—8). Возможны и более сложные связи между ходом нижней границы низких облаков и ходом вертикальной разности температуры и скорости ветра (см. рис. 14, участки 1—2, 5—6, 6—7 с рассогласованными ходами отдельных из рассматриваемых характеристик).

Следует отметить опережающий на 30—60 мин. сдвиг хода вертикальной разности скорости ветра в подоблачном слое, который может рассматриваться как возможный прогностический признак изменения уровней нижней границы низких облаков и возникновения гололедно-изморозевых отложений.

На рис. 15 тахоизоплетами и ходом вертикальной разности температуры и скорости ветра описывается естественный разрыв нижней облачности, с которым связывается стабилизация или испарение гололедно-изморозевых отложений в нижнем слое атмосферы. В облачном разрыве имеет место заметное сближение тахоизоплет как по вертикали, так и по горизонтали. Это в некоторой мере выделяет структуру слоя в разрыве облаков.

Вообще в облаках нижнего яруса (НО) имеют место разрывы сквозные (РС), когда над облаками нижнего яруса небо безоблачное, разрывы со средним прикрытием (РСП), когда облака нижнего яруса прикрыты средней облачностью, и с верхним прикрытием, когда облака нижнего яруса прикрыты верхней облачностью. Возможны случаи, когда над разрывом нижней облачности находятся одновременно слои облаков среднего и верхнего ярусов.

В рассматриваемом примере в облачном разрыве заметно заметное колебание и общее убывание вертикальной разности температуры до величины ниже адиабатической и возрастание этой разности до величины, близкой к адиабатической, при появлении над облачным разрывом среднего прикрытия. Последнее свидетельствует об ослаблении термической устойчи-

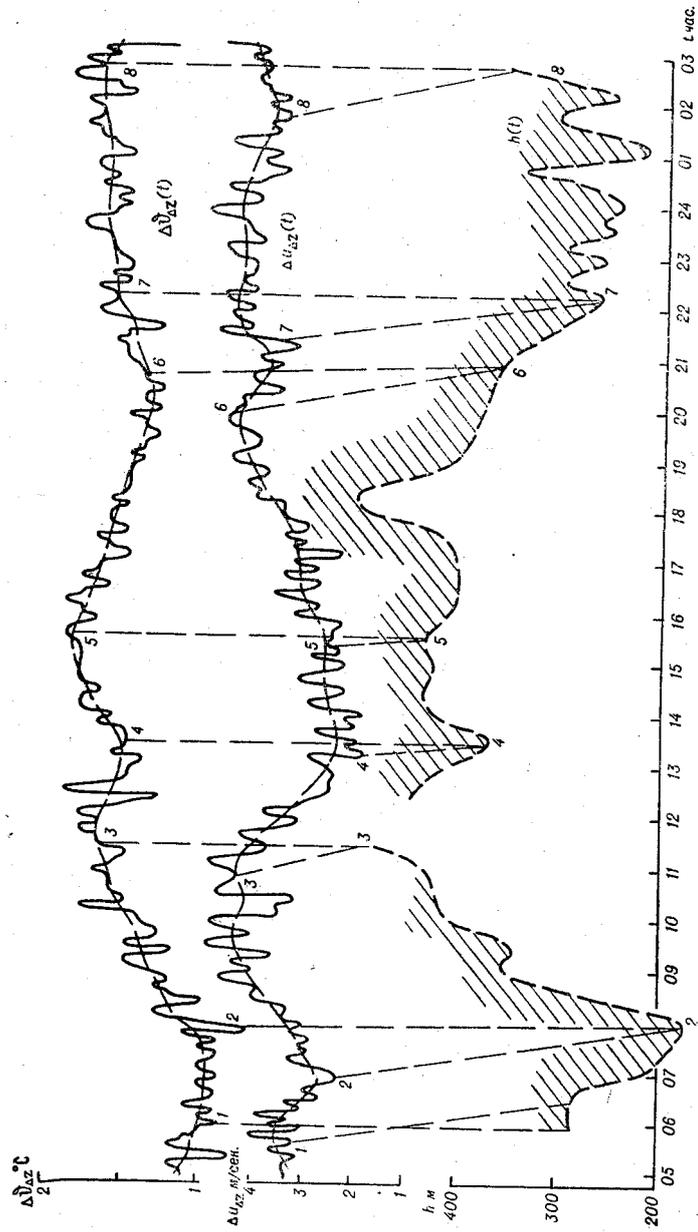


Рис. 14. Ход вертикальной разности температуры $\Delta\Phi_z$ и скорости ветра Δu_z в подоблачном слое $\Delta z = 25 \pm 170$ м и ход уровня нижней границы низких облаков $h_{\text{н}}$ 5—6 февраля 1964 г.

восте атмосферного слоя и как бы предвещает появление низких облаков, а с тем и усиление процессов гололедно-изморозевых отложений.

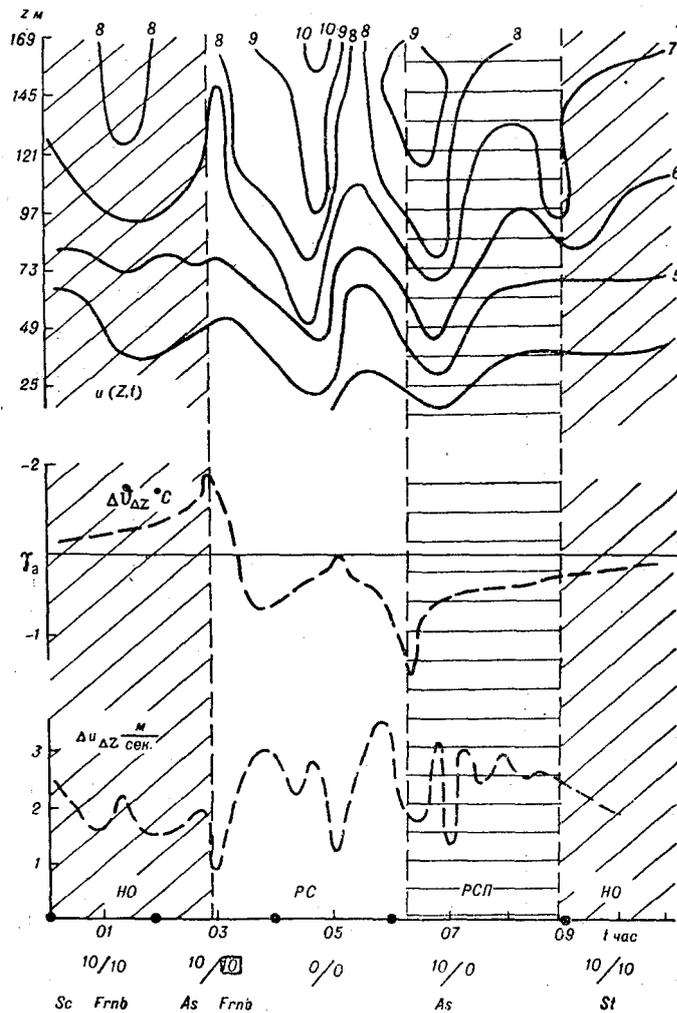


Рис. 15. Тахоизоплеты и ход вертикальной разности температуры $\Delta\theta_{\Delta z}$ и скорости ветра $\Delta u_{\Delta z}$ в облачном разрыве в слое $\Delta z=25\div 75$ м 6 февраля 1964 г.

Заметное колебание в облачном разрыве наблюдается также у вертикальной разности скорости ветра. При этом колебание этой характеристики в разрыве значительно больше колебаний

в нем вертикальной разности температуры. Количественные оценки изменения вертикальной разности скорости ветра Δu_z до облачного разрыва (НО), в сквозном облачном разрыве (РС), в разрыве со средним прикрытием (РСП) и после него (НО), выраженные через разность между максимальной и минимальной ее значениями $A_{\Delta u}$ и через наибольший период ее колебаний $T_{\Delta u}$, представлены в табл. VI.

Таблица VI

Количественные оценки изменения вертикальной разности скорости ветра

Условия облачности	Низкие облака (НО)				Сквозной разрыв (СР)			
	t час. мин.	0 40	1 20	1 40	2 30	3 00	3 30	5 00
Δu_z м/сек.	1,5	2,5	1,5	2,3	1,0	3,2	1,0	4,2
$A_{\Delta u}$ м/сек.	1,0		1,2		2,2		3,4	
$T_{\Delta u}$ мин.	60				120			

Условия облачности	Разрыв (РСП)			Низкие облака (НО)			
	t час. мин.	6 30	7 00	8 00	9 00	10 00	11 00
Δu_z м/сек.	1,5	1,2	2,8	2,4	2,3	2,2	2,1
$A_{\Delta u}$ м/сек.	3,4	2,2		2,2			
$T_{\Delta u}$ мин.	120	60		—			

Из этой таблицы очевидно 2—3-кратное увеличение $A_{\Delta u}$, $T_{\Delta u}$ при сквозном разрыве в низкой облачности и убывание после разрыва.

Абсолютное значение величины Δu_z при наличии низких облаков от 0 ч. 40 м. до 1 ч. 40 м. изменяется менее чем в 2 раза, при исчезновении низких облаков с 2 ч. 30 м. до 3 ч. 00 м.— более чем в 2 раза; при сквозном разрыве в низких облаках с 3 ч. 00 м. до 5 ч. 00 м.— более чем в 3 раза; перед появлением среднего прикрытия с 5 ч. 00 м. до 6 ч. 30 м.— в 3—4 раза; при

разрыве в низких облаках со средним прикрытием с 6 ч. 30 м. до 8 ч. 00 м.— почти в 2 раза; на границе разрыва в низких облаках со средним прикрытием низкими облаками и в последующем их промежутке — с 8 ч. 00 м. до 12 ч. 00 м.— приближается к единице. В разрыве $\Delta u_z A_{\Delta u}$ в 1,5—2,0 раза больше, чем при низких облаках до и после разрыва. Примерно то же наблюдается и для $T_{\Delta u}$.

В рассматриваемом примере очевидно (см. рис. 14, 15), что решающую роль играет не термический фактор ($\Delta \theta_z$), а фактор динамический (Δu_z) и изменчивость последнего в случаях, близких рассматриваемому, может быть показателем возможных изменений уровня нижней границы облаков и эффективности разрыва в них и соответственно изменений гололедно-изморозевых процессов в низких облаках.

Представленный на рис. 16 ход температуры и скорости ветра до появления тумана, при тумане и низких облаках (заштрихованы) и по их исчезновении явно отличается от суточного хода этих параметров в ясную погоду. Это проявляется в различии хода температуры и скорости ветра по уровням слоя, при резком изменении хода температуры (*a, б*) мезомасштабными изменениями ходов параметров, интенсивном послеполуденном прогреве слоя и др. Различие во временном изменении температуры до тумана и при тумане (промежутки *I, II, III*) связано с адвекцией тепла в верхней части слоя. Резкое изменение хода температуры (промежутки *III, IV*) связано с повышением верхней границы тумана.

Показательным для рассматриваемых условий является изменение стратификации слоя, представленное на рис. 17 последовательными профилями температуры и скорости ветра.

Задолго до появления тумана в промежутке *I* (профили в 2 часа) имело место инверсионное распределение температуры с примерно одинаковым во всем слое вертикальным градиентом от 1,5 до 2,2°/100 м и струйное распределение скорости ветра [11—13] с мерой остроты (выпячивания) струи $\xi_u = 1,2$. Наблюдавшаяся в это время мощная инверсия связана как с интенсивным ночным выхолаживанием слоя, так и с адвекцией тепла в его верхней части, что отчетливо видно по ходу температуры на рис. 16.

За 1—2 часа до появления тумана в промежутке *II* (профили в 4 часа) при общем инверсионном распределении температуры в слое в средней его части на уровне 200—250 м наблюдалась инверсионная прослойка повышенной интенсивности (до 5°/100 м), согласующаяся во времени со струйным распределением скорости ветра у этого уровня ($\xi_u = 1,3$), несколько больше предшествующей. При появлении тумана в этом же промежутке *II* (профили в 6 час.) распределение температуры в нижней

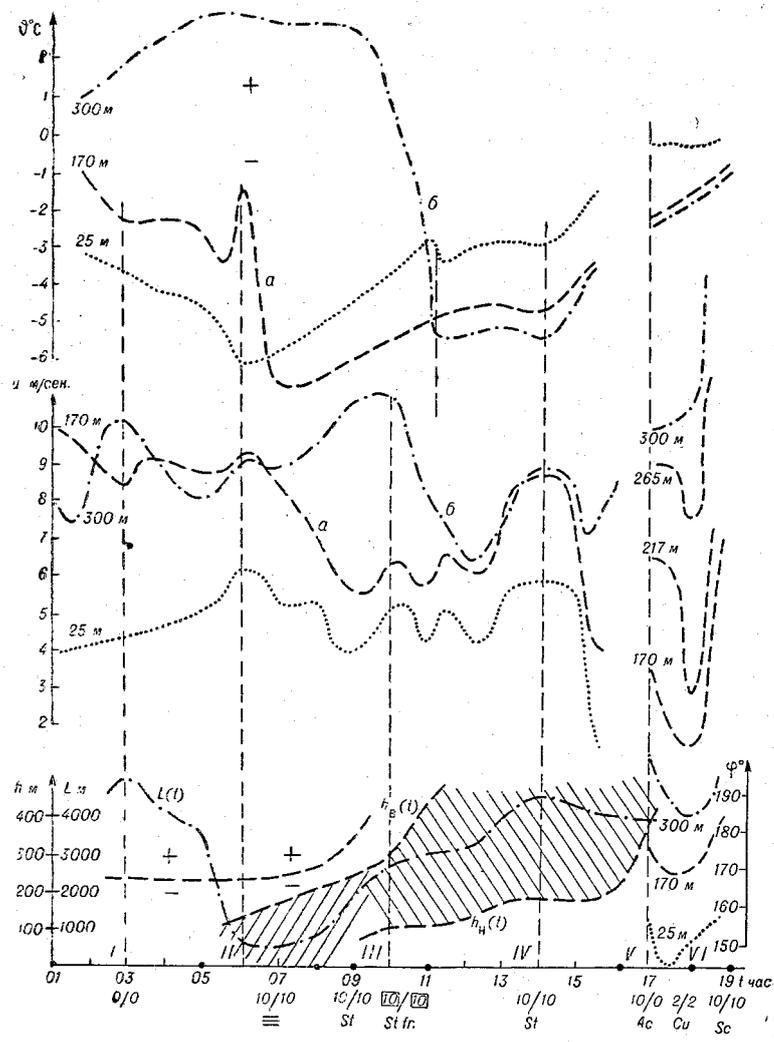


Рис. 16. Ход температуры, скорости ветра, верхней и нижней границ тумана и низких облаков в предусловиях их образования, при них и по их исчезновении 16 марта 1965 г.

части слоя, где образуется туман, становится изотермическим — переходным к последующему распределению. В средней части слоя над туманом приподнятая инверсия увеличивалась с интенсивностью до $10^\circ/100$ м и мощностью 100—150 м; в этой же части слоя отмечалось струйное распределение скорости ветра с $\xi_u = 1,1$, несколько меньшей в сравнении с предшествующей.

В промежутке III при повышении верхней границы тумана (профили в 8 час.) профиль температуры в толще тумана нормализовался; над верхней его границей в средней части слоя 150—250 м сохранялась интенсивная приподнятая инверсия до $10^\circ/100$ м, над которой наблюдалась слабая инверсия с градиентом температуры $0,8^\circ/100$ м. В этих условиях отмечалось ослабление экстремума профиля скорости ветра ($\xi_u = 1,0$) и

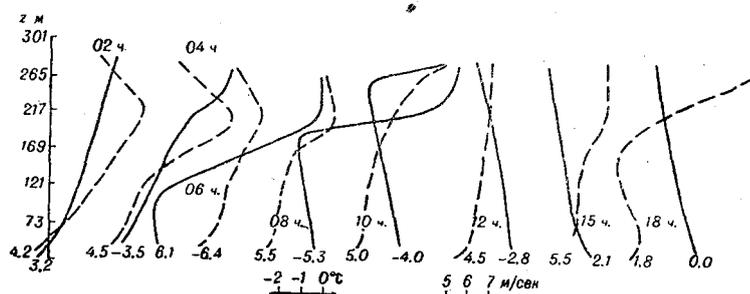


Рис. 17. Профили температуры и скорости ветра в предусловиях тумана и низкой облачности, при них и по их исчезновении 16 марта 1965 г.

подъем „струи“ одновременно с повышением уровня приподнятой инверсии над растущим туманом, переходящим в низкую слоистую облачность. При этом имело место увеличение вертикального градиента скорости ветра с высотой, особенно вблизи уровня приподнятой инверсии (см. профили температуры и скорости ветра в 10 час.).

В промежутке IV, при низкой слоистой облачности с верхней границей выше 300 м, профили температуры и скорости ветра (12 час.) становятся во всем 300-м слое атмосферы нормальными, т. е. с убыванием температуры с высотой и возрастанием скорости ветра, и сохраняются такими почти до конца периода низкой облачности — до 15 час. (промежуток V).

Для промежутка VI, вскоре после исчезновения облаков нижнего яруса, при облачности среднего яруса характерно нормальное распределение температуры и сложное послойное распределение скорости ветра с необычайно большой в верхней части слоя величиной вертикального градиента — до 8 м/сек. на 100 м (см. профили в 18 час.). Профили такого типа наблюдались од-

новременно с вихревой динамической мезонеоднородностью, которая сразу следует за периодом низкой облачности и на рис. 16 представлена согласованными изменениями скорости и направления ветра. Мезонеоднородность эта связана с мезомасштабным возмущением во фронтальной зоне теплого фронта, проходившего район наблюдений.

Для смены условий перед туманом, при тумане, низких облаках и далее показательно изменение скорости ветра на различных уровнях в слое между конечным и начальным моментами каждого из промежутков $I+VI$ (см. рис. 16). Величину эту обозначим через Δu_i ($i=I, II \dots$). Изменение ее в зависимости от высоты приведено на рис. 18, на котором различаются области положительных (знак „+“ и вертикальная штриховка) и от-

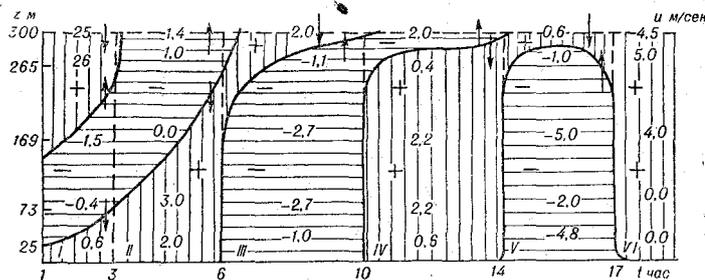


Рис. 18. Распределение изменения скорости ветра по уровням в слое между конечным и начальным моментами промежутков (Δu_i) в предусловиях тумана и низких облаков, при них и по их исчезновении 16 марта 1965 г.

рицательных (знак „-“ и горизонтальная штриховка) значений. Положительные области отвечают областям роста скорости ветра, а отрицательные — ее убыли. Области эти согласуются с промежутками $I+VI$. Изменения величины областей внутри промежутков не рассматриваются. Особенности распределения величин Δu_i по промежуткам $I+VI$ (см. рис. 16, 18) сводятся к следующим.

В промежутке I (за 3—4 часа до появления тумана) имел место рост скорости ветра в нижней и верхней частях 300-м слоя и уменьшение ее в средней части. В промежутке II (перед самым появлением тумана) в нижней части слоя отмечался рост скорости ветра, а в верхней — уменьшение. В промежутке III (при тумане и появлении за ним низкой слоистой облачности) рост скорости ветра наблюдался в верхней части слоя, а в средней и нижней частях — уменьшение. В промежутке IV (при устойчивом режиме низкой облачности) отмечался рост скорости ветра в нижней и средней частях слоя и уменьшение в верхней. В промежутке V (при рассеянии низкой слоистой облачности)

рост скорости ветра наблюдался в верхней части слоя, а уменьшение — в средней и нижней ее частях. В промежутке VI (в отсутствии низкой облачности) рост скорости ветра имел место во всем 300-м слое атмосферы.

Естественно предположить, что в каждом из рассмотренных промежутков в смежных по слою областях роста и уменьшения скорости ветра имел место перенос количества движения из области уменьшения скорости ветра в область ее роста. Такой перенос (на рис. 18 он показан стрелочками) возможен как внутри 300-м слоя атмосферы, так и вне его, так как этот слой является незамкнутой системой.

В наблюдениях 19—20 января 1966 г. прослеживалась связь устойчивой низкой облачности и ее исчезновения, что обусловлено процессом адвекции тепла и в нижнем слое атмосферы с образованием и исчезновением гололедно-изморозевых отложений.

Рассматриваемые условия описываются ходом температуры, скорости и направления ветра и нижней границы облачности на рис. 19 и трансформацией профилей температуры и скорости ветра на рис. 20. На рис. 19 заштрихованы упрощенная (по данным с трех уровней) фронтальная зона теплого фронта и области инверсии (1) и струйного распределения скорости ветра (2) в нижнем 300-м слое атмосферы. На рис. 20 заштрихована зона аномального распределения температуры (приподнятая инверсия) и скорости ветра (струйное распределение скорости ветра) в нижнем 300-м слое атмосферы.

Для условий, предшествующих резкому повышению нижней границы облаков нижнего яруса, сопровождающихся снегопадом и метелью, и ослабления роста отложений в рассматриваемом случае показательными являются характер изменения температуры и скорости ветра и трансформация их профилей в интервале 22—02 часа. За 4—5 час. до резкого повышения нижней границы облаков нижнего яруса, сопровождавшегося снегопадом и метелью и ослаблением роста отложений, отмечалась перестройка хода температуры по уровням. Перестройка эта связана с возникновением сверху слоя приподнятой инверсии, которая образуется вследствие натекания (адвекции) сверху слоя теплого воздуха. Мощность инверсии увеличивается с опусканием ее нижней границы. Понижение нижней границы инверсии обусловлено наклоном передней поверхности фронтальной зоны теплого фронта. Этот наклон может быть определен по начальным точкам фронтального нагрева (обозначены на рис. 19 крестиками) на пространственно-временной сетке в координатах $z, \Delta t v_{cp}$. Здесь Δt — предопределяющий интервал, а v_{cp} — скорость перемещения фронтальной зоны. По конечным точкам фронтального нагрева (на рис. 19 обозначены крестиками) строится задняя поверхность фронтальной зоны находящегося

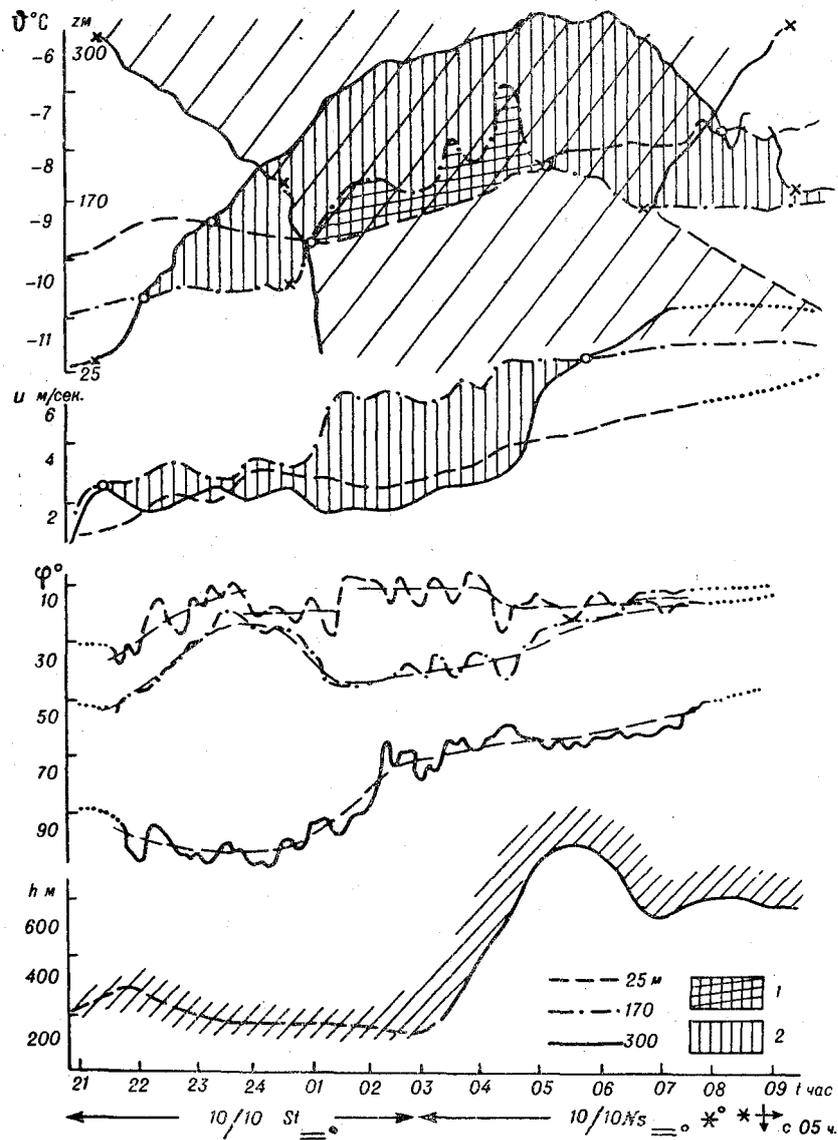


Рис. 19. Ход температуры, скорости и направления ветра, высоты нижней границы облаков в слое атмосферы до 300 м 19—20 января 1965 г.

теплого фронта, ширина которого во времени T час. может быть оценена в рассматриваемом примере по изменению температуры на уровнях 170 и 300 м как разность значений между начальными и конечными точками фронтального нагрева. Количественно эта характеристика представляется величинами:

z м	T час	T_{170}/T_{300}
170	6	$1/2$
300	12	

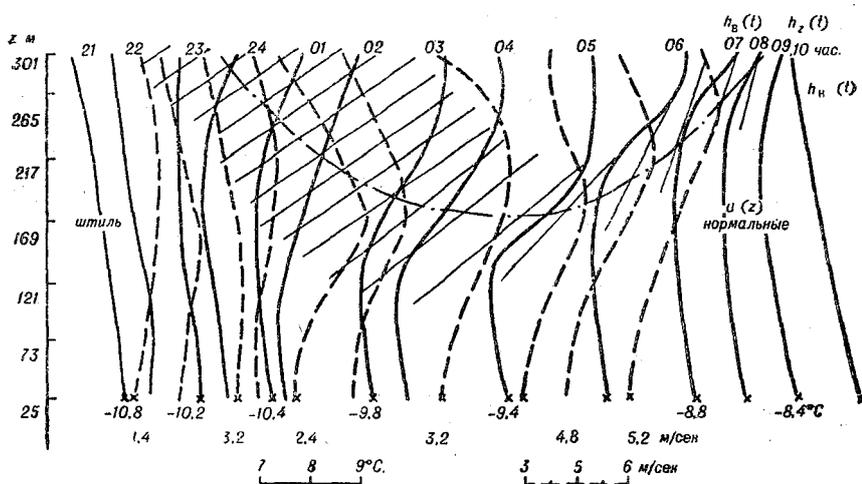


Рис. 20. Трансформация профилей температуры и скорости ветра в нижнем 300-м слое атмосферы 19—20 января 1965 г.

Отсюда очевидна „конусная“ форма фронтальной зоны теплого фронта в верхней части нижнего слоя атмосферы. В нижней части слоя эта зона растекается под влиянием подстилающей поверхности.

Опускание нижней границы инверсии (слоя адвекции) Δh за интервал Δt при начальной скорости опускания v_0 можно определить как $\Delta h = v_0 \Delta t$. В рассматриваемом примере скорость опускания инверсии, определенная между уровнями 170 и 25 м ($\Delta h = 145$ м) по моментам пересечения кривых $\varphi(t)$ уровней 300 м и 170 м и уровней 170 и 25 м (на рис. 19 обозначены кружочками), будет равна $v_0 = \Delta h / \Delta t \approx 1,4 \cdot 10^{-2}$ м/сек. Это вычисление приближенное, так как использованы только три точки в 300-м слое.

После периода со слабым ветром (2—3 м/сек.), предшествовавшего резкому повышению нижней границы низких облаков, снегопаду, метели и ослаблению роста отложений, в ходе скорости ветра в слое наблюдалось медленное ее увеличение с близкими значениями во всем слое, а также хода скорости ветра, связанного с появлением струйного распределения скорости ветра в слое. Период аномального струйного распределения может быть определен по пересечениям кривых изменения скорости на рис. 19 (заштрихованная область).

В рассматриваемом примере с ограниченным числом ходов (по три) длительность периода аномального струйного распределения скорости ветра в слое до уровня 170 м составляла $T=9$ час.

По изменению направления ветра можно различить „вихревые“ движения воздуха. Количественные оценки этого движения (изменение направления ветра в характерном интервале времени) и интенсивность его изменения (угловая скорость ω) представлены в табл. VII.

Таблица VII

Характеристика	Часы								
	22 — 24			24 — 02			02 — 08		
z м	25	170	300	25	170	300	25	170	300
$\Delta\varphi_i^\circ$	-30	-30	$\pm(5-10)$	$\pm(5-10)$	30	-30	$\pm(5-10)$	-30	-30
$\pm\psi_\varphi^\circ/\text{час}$	15	15	—	—	15	15	—	15	15

Знаком „+“ обозначен правый поворот вектора скорости ветра, знаком „-“ левый поворот. При низкой слоистой облачности (St) характерен интервал 22—24 часа, при повышении ее нижней границы 24—02 часа, при появлении слоисто-дождевой облачности (Ns), осадков и метелей, ослаблении роста отложения 02—08 час. Эти интервалы количественно различимы по оценке $\Delta\varphi_i$ и неразличимы по оценке $\psi_\varphi = \omega$.

Для метеорологических условий нижнего слоя атмосферы в последовательности этих характерных интервалов очевидна большая вихревая активность верхней и средней (но не нижней) частей слоя.

Таким образом, ход направления ветра, предшествующего резкому повышению нижней границы низких облаков, снегопаду, метели и ослаблению роста отложений, описывает динамические вихревые мезонеоднородности, которые являются как бы предвестниками резкой смены погодных условий, т. е. настора-

живающими признаками, вполне различимыми даже аппаратурой автоматического слежения.

Такое прослеживание возможной смены погодных условий в нижнем слое атмосферы позволяет предсказать изменение гололедно-изморозевых процессов в слое.

По трансформации профилей температуры и скорости ветра (см. рис. 20) в структуре слоя различается зона аномального распределения температуры и скорости ветра (приподнятая инверсия, струйное распределение скорости ветра) — ее появление, изменение и исчезновение в нижнем 300-м слое атмосферы.

При этом в предусловиях резкого повышения нижней границы низких облаков и ослабления роста отложений показательно:

а) появление и увеличение мощности и интенсивности инверсионного распределения температуры, понижение нижней границы и вообще всей приподнятой инверсии;

б) появление и обострение струйного распределения скорости ветра.

Здесь также показательна большая активность верхней части слоя.

С резким повышением нижней границы низких облаков ко времени выпадения осадков и метели мощность инверсии уменьшается, уменьшается также острота (выпячивание) струйного распределения скорости ветра. Приподнятая инверсия и струйное распределение скорости ветра „уходят“ за уровень 300 м. Показательные характеристики приподнятой инверсии — ее верхней (в) и нижней (н) границ $h_{в, н}$, ее мощности H , вертикального градиента температуры $\gamma_{\vartheta_{инв}}$, струйного распределения скорости ветра — уровень ее экстремальной величины $h_{э}$, сама экстремальная величина $u_{э}$ и мера остроты ее распределения в слое $\xi_{и}$ в рассматриваемом случае наблюдались в пределах, указанных в табл. VIII.

Т а б л и ц а VIII

$h_{н}$ м	H м	$\gamma_{\vartheta}/100$ м	$h_{э}$ м	$u_{э}$ м/сек.	$\xi_{и}$
100	50	1,3	150	3,0	1,0
250	250	4,3	300	9,0	1,0

Во временном ходе этих характеристик прослеживаются некоторые тенденции их изменения. Например, заметно понижение нижней и верхней границ приподнятой инверсии и увеличение ее мощности в условиях, предшествующих резкому повышению нижней границы слоистых облаков, и повышение нижней и верхней границ приподнятой инверсии и постоянство ее мощности в период перехода низкой слоистой облачности в слоисто-дож-

девую с осадками и метелью и др. Соответственно рассматриваемым условиям, предшествующим резкому повышению нижней границы низких облаков и др. и этим наступающим условиям, отмечается понижение и повышение уровня экстремума скорости ветра и обострение и сглаживание струйного распределения скорости ветра в слое.

выводы

По изложенным выше результатам исследований могут быть сделаны следующие выводы:

1. Сезон гололедно-изморозевых отложений в нижнем 300-м слое атмосферы в климатическом районе Москва — Обнинск — Калуга длится в течение полугода с ноября по март — начало апреля. В сезоны 1964—1967 гг. наибольшая длительность отложения отмечалась в ноябре — в течение 20—30 % времени, декабре — 80—85 %, январе — 75—80 %, феврале — 40—45 %, в марте — 15—20 % и в апреле — не более 5—10 %.

2. В основном наблюдались формы отложения:

а) зернистая изморозь, гололед и смешанные отложения зернистой изморози и гололеда в тумане и главным образом в низких облаках;

б) кристаллическая изморозь при радиационном выхолаживании слоя.

Зернистая изморозь и в смеси с гололедом отмечалась в разные годы в 50—75 % случаев, гололед и кристаллическая изморозь — в 10—15 % случаев.

3. Отложения на стандартных образцах — 15-мм стержень — наблюдались толщиной до 250 мм, весом до 3000 г/м. Наибольшие отложения, из наблюдавшихся в сезоны 1964—1967 гг., достигали у верхних уровней мачты (250—300 м) на ограждении балконов толщины 300 мм и веса около 4000 г/м, а на подвешенном тросе при круговом охвате его отложением — толщины 200 мм и веса 17 000 г/м.

4. Длительность периодов существования отложений обычно возрастала с высотой; при этом наибольшая длительность на уровне 25 м составляла до 35 час., а на уровне 300 м — до 415 час. Наиболее длительно отмечались зернистая изморозь, гололед и их смеси в случае низких облаков. Наиболее короткие периоды отложения наблюдались при изморози в условиях радиационного выхолаживания нижнего слоя атмосферы.

5. Для зернистой изморози, гололеда и смеси этих отложений характерно возрастание размера и веса их с высотой. Максимум образований кристаллической изморози отмечался на промежуточном уровне рассматриваемого слоя. Рост и испарение отложений в сезоны 1964—1967 гг. протекали с интенсивностями в диапазонах 0,1—20 мм/час — 0,5—430 г/м в час.

По измеренной начальной интенсивности роста и испарения

отложения и при известном начальном отложении может быть predetermined ее конечное значение, если сохраняются те же условия погоды, по формуле

$$P_k = P_n + \psi_p \Delta t.$$

Здесь P_n — начальный размер или вес отложений, P_k — конечный, Δt — интервал расчетного времени.

6. Одновременно наблюдались различные виды отложений на одном предмете — гололед на передней наветренной поверхности предмета, матовый гололед и плотная зернистая изморозь сбоку и зернистая изморозь с подветренной стороны предмета.

7. Форма отложения на предметах и деталях сооружения связана с конфигурацией их, относительным направлением натекающего на них потока частиц и аэродинамикой обтекания предмета отложениями. В тех случаях, когда линии тока у поверхности предмета имели сложную форму, такую форму имело и отложение.

Отложения на узлах сооружения позволяют выявить аэродинамику их, а по формам распределения отложений можно выявить пульсации ветра, воздействующие на сооружение.

8. В основании зернистой и кристаллической изморози на предметах в результате перекристаллизации изморози в ряде случаев образовывался гололед, который является очень прочной основой отложения и часто обуславливает длительное его сохранение.

9. Наблюдается увеличение отложений к краям предмета и на их выделяющихся деталях. Поэтому для уменьшения ветровой нагрузки на сооружения следует применять обтекаемые и „утопленные“ детали.

10. Соотношение размеров отложения и предмета очень разное и зависит от конфигурации предмета, длительности нарастания, обтекаемости предмета как до, так и после обрастания отложениями.

Охват отложением качающихся предметов (тросов и проводов) обычно является полным (круговым), т. е. коэффициент охвата $K=1$.

Опадание отложений с мачты высотой 310 м происходило в радиусе до 200—300 м, вес опавших отложений — до 15 кг. Опадание происходило при температуре воздуха около 0° .

11. При длительном (несколько часов и более) пребывании предметов в условиях, благоприятных гололедно-изморозевым процессам, — в тумане, низких облаках, при радиационном выхолаживании в холодный период года — отложением покрываются все предметы независимо от материала (металл, эбонит, стекло, дерево и др.), шероховатости поверхности, конфигурации предмета и его покрытия применявшимися смазками. Шероховатость и конфигурация предмета имели существенное значе-

ние лишь в самом начале образования отложения, которое начиналось на выступах тела, в том числе малых, а потом на остальной поверхности. Отложения наблюдались и при вибрации предмета с частотами до 50 гц и немногим более.

12. При постоянстве условий роста отложений характер и структура отложений на предмете обусловлены направлением натекающего на предмет потока частиц и конфигурацией предмета. Последняя определяла его обтекаемость.

13. Рост и устойчивое состояние, испарение (таяние) отложения и время окончания этих процессов могут быть охарактеризованы лишь совокупностью ряда метеорологических элементов: температурой и влажностью воздуха, скоростью ветра, расположением предмета в облачности, содержанием частиц в ней и др. Зависимость размера отложения, интенсивности его роста и испарения, например, только от скорости ветра вне связи с влажностью воздуха, его температурой, месторасположением предмета в облаке, тумане и т. д. была неопределенная. Связь величины отложения со скоростью ветра в разных диапазонах температуры воздуха наблюдалась как прямо, так и обратно пропорциональная.

Это связано с прочностью сцепления отложения с поверхностью предмета и частиц отложения между собой. В зависимости от этого при увеличении скорости ветра может происходить преобладание осевших частиц над их сносом и наоборот. Сцепление частиц отложения зависит от температуры и других факторов.

14. Процесс отложения частиц на предметах идет неравномерно в связи с изменением во времени метеорологических элементов — повышением или понижением температуры воздуха, возрастанием или убыванием скорости ветра и т. д. Важное значение имеет положение предмета в облаках, мощность и структура (водность и капельный спектр) которых меняется со временем. Величина и структура отложения, интенсивность его роста и испарения являются результатом воздействия этих многочисленных обстоятельств. Отсюда и наблюдающееся многообразие явлений обледенения предметов в естественных условиях.

15. Наиболее интенсивные гололедно-изморозевые отложения в нижнем слое атмосферы наблюдаются главным образом в холодной низкой облачности. Характеристики метеорологического режима нижнего слоя атмосферы, предшествующие появлению холодной низкой облачности и обуславливающие ее исчезновение, являются показательными для процессов гололедно-изморозевых явлений в слое. С изменением границ, мощности, структуры и разрывов в низкой облачности связан характер гололедно-изморозевого процесса — рост и испарение отложения, изменение интенсивности этих процессов, стабилизация отложения и др.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Метеорологические условия при гололедно-изморозевых отложениях, приведенных в таблицах

№ таблицы	Дата	Температура воздуха (°C)		Относительная влажность воздуха (%)	Скорость ветра (м/сек.)	Уровень наблюдений (м)
		от	до			
1 а	28 XII 1965 г.	-1,3	-2,8	97-100	2-5	73-301
1 б	22 XII	-0,8	-2,0	100	6-7	121-265
1 в	6 XII	-0,8	4,0	100	10-14	8-301
2 а	25 XI	-7	-9	50-75	1-8	1,5-169
2 б	8 III	-11	-18	85-90	0-2	25-301
3 а	15 XII 1964 г.	-2,8	-4,5	93-94	6-8	—
3 б, в, г, д	20 XII 1966 г.	-17,0	-20,0	94	4-10	301
4 а	8 I	-10	-7	90	11-14	265
4 б	11 I	-12	-9	86-90	5-7	265
4 в	18 XII 1965 г.	-0,2		99	5-7	265
4 г	6 XII	-4	-0,8	99	5-7	265
4 д	24 III 1966 г.	-5	-1	65	8-13	265
5 а, б	12 XI	-1,0	-0,5	100	4-8	169
5 в	16 XI	-0,9	-0,2	100	4-6	169
5 г, д, е	12 XI	-1,0	-0,5	100	4-8	169
6	7 IV 1964 г.	-3	-0,5	90	18-20	310
7	7 IV	-3	-0,5	90	18-20	310
8 а	1 III 1966 г.	-1	-0,0	89-93	6-10	310
8 б	25 II	-1,7	-1,0	98-99	2-5	310
9 а	25 XI 1965 г.	-4	-0,8	99-100	2-5	265
9 б	11 XI 1966 г.	0	-8,5	52-95	8-17	265
9 в	6 I	0	-8,5	99	8-17	265
9 г	26 I	-10		87-94	1-6	310
9 д	20 I	-11	-7	87-92	1-6	310
10 а, б, в	6 I	-6	-1	94-99	1-6	217
10 г	30 XII 1965 г.	-7	-4	94-100	1-6	265
11 а	30 XII	-7	-4	94-100	1-6	265
11 б	4 I 1966 г.	-4		90-94	7	217
11 в	12 XI	-1,0	0,5	100	4-8	217
11 г	8 I	-10	-7	90	11-14	265

Продолжение

№ таблицы	Дата	Температура воздуха (°C)		Относительная влажность воздуха (%)	Скорость ветра (м/сек.)	Уровень наблюдений (м)
		от	до			
12 а	5 III 1965 г.	-4	-0,5	93	11-14	301
12 б	21 XII 1964 г.	-11	-3	98	5-8	301
12 в	28 I 1965 г.		-14	91	5-8	217
13 а	28 I		-14	91	5-8	217
13 б, в	30 XII	-7	-4	94-90	5-8	310
14 а	30 XII	-7	-4	94-99	8-12	265
14 б, в	6 I 1966 г.		-6	99	5-8	265
15	15 I	-24	-18	72-82	10-17	169
16	10 I 1967 г.	-13	-10	44-80	8-17	169
17 а	8 I	-10	-7	89-90	11-14	310
17 б	28 XII 1965 г.		-4	94-100	5-8	310
18 а	30 XII	-7,6	-6	88-95	8-12	310
18 б	12 I 1966 г.	-8	-0,9	87-91	5-8	310
19	30 XII 1964 г.		-10	94	5-13	310
20	16 III 1965 г.	-5,1	-3,0	70-94	7-13	169
21	16 III	-5,1	-3,0	70-94	5-8	169
22 а	8 I 1966 г.	-10	-7,0	89-90	11-14	310
22 б	5 I 1965 г.		-3	99	6-8	314
23 а	15 I 1966 г.		-10	87	10	217
23 б, в	30 XII 1965 г.	-7	-4	94	10	217
24 а	15 I 1966 г.		-10	87	10	310
24 б	21 I	-12	-7	92	9-14	310
24 в	10 I	-11	-7	88	10	169
25 а	5 I 1965 г.		-3	99	6-8	310
25 б	22 XII 1964 г.	-11	-3	98	5-8	265
26	18 XII	-3,5	-2	96	7-13	310
27 а	10 I 1967 г.	-14	-11	95-98	5-11	169
27 б	18 II 1966 г.	-2	-0,5	99	4-5	169
27 в, г	2 III	-1,8	-0	99	7	169
28	15 I		-10	87	10	169
29	18 I	-11,3	-8	86-90	4-10	169

Продолжение

№ таблицы	Дата	Температура воздуха (°C)		Относительная влажность воздуха (%)	Скорость ветра (м/сек.)	Уровень наблюдений (м)
		от	до			
30 а	18 I 1966 г.	-11,3	-8	86-90	4-10	169
30 б	15 I	-10		87	10	169
31	14 III 1967 г.	-4,3		97	2	310
32 а	21 I 1966 г.	-12	-8,5	88-89	10-15	310
32 б	24 I	-7,5	-6,2	92-95	10-15	310
32 в	20 I	-9	-6	90-92	4-10	310
32 г	24 I	-7,5	-6	92-95	4-10	310
33 а	1 III	-1	0	89-93	6-10	310
33 б, в	26 II	-3	-1,5	81-84	3-5	310
33 г	4 III	-2	-0,1	99-100	5-9	310
34	16 XI	-1,2	0	100	2-9	310
35 а	4 I	-3	-1,5	81-84	3-5	310
35 б	8 I	-10	-7	90	11-14	310
35 в	10 I	-13	-8	44-80	8-17	310
35 г	19 XII	-10		85-95	5-10	310
35 д	15 II	-6	-0,9	99	5-10	310
36 а	19 XII 1965 г.	-7	-4	99	1	310
36 б	15 II 1966 г.	-6	-0,9	99	1	310
36 в	26 I	-10	-0,1	100	1-6	310
36 г	28 XII 1965 г.	-4		93	2-4	310
37 а	8 I 1966 г.	-10	-7	90	11-14	310
37 б	15 II	-6	-0,9	99	11-14	310
37 в	28 I	-10	-0,1	99	1-6	310
37 г	18 II	-2	-0,5	99	4-5	310
37 д	4 I	-3	-1,5	99	7	310
38 а	8 I	-7	-10	86-90	8	265
38 б1	11 I	-9	-12	86-90	3-5	265
38 б2	18 XII 1965 г.	-0,2	-12	84-99	1-2	265
38 б3	6 XII	-0,8	-4	99	4-7	265
38 б4	24 III 1966 г.	-1	-5	55-65	—	265
39	25 IX 1965 г.	-9	-13	70-90	0-1	120

Продолжение

№ таблицы	Дата	Температура воздуха (°C)		Относительная влажность воздуха (%)	Скорость ветра (м/сек.)	Уровень наблюдений (м)
		от	до			
40	20 X 1964 г.	2,0	2,5	91—98	2	300
41	—	—	—	—	—	—
42	9 III 1966 г.	-0,1	2,0	90—100	2—8	—
43	4 VI	9	18	88—98	1—5	—
44	12 IV	12	13	20—80	5—0	—
45	20 X 1964 г.	2,0	3,0	70—77	7—8	217—300
46	25 IX 1965 г.	-9	-13	70—90	0—1	120
47	2 IX	11	13	80—90	4—5	—
48	12 IV 1964 г.	1,5	2	75	9	200—250

ЛИТЕРАТУРА

1. Бургсдорф В. В., Муретов Н. С. (ред.) Гололедные нагрузки линий электропередач в СССР. Тр. ВНИИЭ, вып. 10, т. 1. Госэнергоиздат, 1960.
2. Бучинский В. Е. Атлас обледенения проводов. Гидрометеиздат, Л., 1965.
3. Бучинский В. Е. Гололед и борьба с ним. Гидрометеиздат, Л., 1965.
4. Вейнберг Б. П. и др. Лед. Свойство, возникновение и исчезновение льда. Гостехиздат, 1940.
5. За морский А. Д. Атмосферный лед (иней, гололед, снег и град). Изд-во АН СССР, 1955.
6. Клинов Ф. Я. Вода в атмосфере при низких отрицательных температурах. Изд-во АН СССР, 1960.
7. Клинов Ф. Я. 300-м метеорологическая мачта и комплекс ее аппаратуры как метод исследования нижнего слоя атмосферы. Метеорология и гидрология, № 1, 1965.
8. Клинов Ф. Я. Некоторые характеристики метеорологического режима нижнего 300-м слоя атмосферы. Тр. ИПГ, вып. 2, 1965.
9. Клинов Ф. Я. О гололедно-изморозевых отложениях в нижнем 300-метровом слое атмосферы. Вопр. прикладной климатологии. Инф. письмо № 15. Гидрометеиздат, 1966.
10. Клинов Ф. Я. К исследованиям гололедно-изморозевых отложений в нижнем 300-метровом слое атмосферы. Труды ГГО, вып. 200, 1966.
11. Клинов Ф. Я. Об изменчивости высоты верхней границы тумана и низкой облачности в нижнем слое атмосферы. Метеорология и гидрология, № 8, 1966.
12. Клинов Ф. Я. Некоторые особенности метеорологического режима нижнего слоя атмосферы при низкой облачности и в тумане. Тр. ИПГ, вып. 10, 1967.
13. Клинов Ф. Я. К вопросу о распределении температуры, скорости и направления ветра с высотой в нижнем слое атмосферы. Метеорология и гидрология, № 5, 1968.
14. Шумский П. А. Основы структурного ледоведения. Изд-во АН СССР, 1955.

