

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Ж.В. Рыбакова

ОБЛАКА И ИХ ТРАНСФОРМАЦИЯ

*Научный редактор
кандидат географических наук И.В. Кузевская*

Томск
Издательский Дом Томского государственного университета
2020

УДК 551.576

ББК 26.23

Р93

Рыбакова Ж.В.
Р93 Облака и их трансформация / науч. ред. И.В. Кужевская. –
Томск : Издательский Дом Томского государственного универ-
ситета, 2020. – 234 с.

ISBN 978-5-94621-880-1

Работа посвящена одному из удивительных атмосферных явлений – облакам. В ней содержатся сведения об условиях погоды, формирующих те или иные облака, о метеорологических величинах в различных облаках, их микрофизическом строении и особенностях пространственно-временного распределения.

Настоящая работа адресована студентам-метеорологам, а также студентам естественнонаучного профиля, может быть интересна специалистам, работающим в области метеорологии и широкому кругу читателей.

УДК 551.576

ББК 26.23

Рецензенты:

кандидат физико-математических наук *В.Г. Блинкова*

кандидат географических наук *А.И. Кусков*

ISBN 978-5-94621-880-1

© Рыбакова Ж.В., 2020

© Томский государственный университет, 2020

Содержание

Введение.....	5
1. Облака верхнего яруса	11
1.1. Внешний вид и диагностические признаки.....	11
1.1.1. Перистые облака (<i>Cirrus, Ci</i>)	11
1.1.2. Перисто-слоистые облака (<i>Cirrostratus, Cs</i>).....	13
1.1.3. Перисто-кучевые облака (<i>Cirrocumulus, Cc</i>)	14
1.2. Условия образования	15
1.3. Микроструктура облаков верхнего яруса.....	18
1.4. Пространственно-временная структура облаков верхнего яруса.....	21
1.4.1. Повторяемость облаков верхнего яруса	21
1.4.2. Количество облаков верхнего яруса и их горизонтальная протяженность	22
1.4.3. Границы и мощность облаков верхнего яруса	22
1.4.4. Некоторые метеовеличины и их профили, характерные для облаков верхнего яруса	23
2. Облака среднего яруса	26
2.1. Внешний вид и диагностические признаки.....	26
2.1.1. Высоко-слоистые облака (<i>Altostratus, As</i>).	26
2.1.2. Высоко-кучевые облака (<i>Alto cumulus, Ac</i>).....	29
2.2. Условия образования	31
2.3. Микроструктура облаков среднего яруса.....	35
2.4. Пространственно-временная структура облаков среднего яруса.....	38
2.4.1. Повторяемость облаков среднего яруса	38
2.4.2. Количество, высота расположения, мощность и устойчивость во времени облаков среднего яруса	40
2.4.3. Некоторые метеорологические величины и их профили, характерные для облаков среднего яруса.....	41
3. Облака нижнего яруса.....	46
3.1. Внешний вид и диагностические признаки.....	46
3.1.1. Слоисто-дождевые облака (<i>Nimbostratus, Ns</i>)	46
3.1.2. Слоистые (<i>Stratus, St</i>) и слоисто-кучевые (<i>Stratocumulus, Sc</i>) облака	47
3.2. Условия образования	51
3.3. Микроструктура облаков нижнего яруса	55
3.3.1. Микроструктура слоисто-дождевых облаков (<i>Nimbostratus, Ns</i>)	55
3.3.2. Микроструктура слоистых (<i>St</i>) и слоисто-кучевых (<i>Sc</i>) облаков	57
3.4. Пространственно-временная структура облаков нижнего яруса	59
3.4.1. Повторяемость облаков нижнего яруса	59

3.4.2. Количество облаков нижнего яруса и их горизонтальная протяжённость	61
3.4.3. Границы и мощность облаков нижнего яруса	62
3.4.4. Некоторые метеорологические величины и их профили, характерные для облаков нижнего яруса	66
4. Облака вертикального развития	70
4.1. Внешний вид и диагностические признаки.....	70
4.1.1. Кучевые облака (<i>Cumulus, Cu</i>)	70
4.1.2. Кучево-дождевые облака (<i>Cumulonimbus, Cb</i>)	73
4.2. Условия образования облаков вертикального развития	77
4.3. Микроструктура облаков вертикального развития	88
4.4. Пространственно-временная структура облаков вертикального развития	93
4.4.1. Повторяемость облаков вертикального развития	93
4.4.2. Количество облаков вертикального развития и их горизонтальная протяжённость	94
4.4.3. Границы и мощность облаков вертикального развития	98
4.5. Некоторые метеорологические величины и их профили, характерные для облаков вертикального развития.....	103
4.5.1. Режим движения в облаках вертикального развития и околооблачном пространстве	104
4.5.2. Распределение температуры и влажности в облаках вертикального развития и в околооблачном пространстве	118
4.6. Формирование и выпадение осадков из облаков вертикального развития	127
5. Облачность в горах	132
6. Стратосферные и мезосферные облака	151
6.1. Стратосферные облака	151
6.2. Мезосферные облака	154
7. Трансформация облаков	157
Заключение.....	165
Список использованной литературы	167
Снимки облаков	173

ВВЕДЕНИЕ

Облака – многообразные атмосферные явления, которые наблюдаются на всех метеостанциях. Они представляют собой аэрозольную среду, в которой вода находится в двух или трёх фазовых состояниях, на некоторой высоте над подстилающей поверхностью.

Облака позволяют правильно оценить физическое состояние атмосферы, определить характер атмосферного процесса и стадию его развития, иными словами, специалист использует данные об облачности для диагноза, а затем – и прогноза погоды. В ряде случаев облака – предвестники атмосферного процесса, и в любом случае – «лакмусовая бумажка» этого процесса, ибо всегда свидетельствуют о причинах своего образования. Формирование и динамика облаков – доказательство постоянных изменений физического состояния атмосферы, указание на конкретное звено в цепи атмосферного процесса.

Для практической деятельности необходимо знать о турбулентном режиме в облаках, судить о направлении и скорости ветра на соответствующих высотах, о наиболее вероятном профиле температуры воздуха и некоторых других метеорологических величин при конкретных формах облачности.

Облачность, особенно плотная и низкая или мощная, может в значительной мере затруднить работу авиации. При низкой облачности осложняются условия взлёта и посадки самолётов. В капельных переохлаждённых облаках может произойти обледенение воздушного судна, в смешанных кучево-дождевых облаках – резкая смена восходящих и нисходящих потоков, а в ряде случаев – и грозовые разряды. Таким образом, изучение возможности и условий полётов в облаках стали специальной задачей метеорологии.

Велико влияние облаков на сельскохозяйственное производство. С облаками связаны осадки, ослабление потоков солнечной радиации, возможность или невозможность заморозков и ночных понижений температуры, интенсивность испарения с почвы и транспирация растений.

Количество и форма облаков оказывают влияние на настроение и даже на психику человека, то радуя его своей красотой или отсутствием на небесном своде, то нагнетая чувства опасности, беспокойства, безысходности. Недаром при обосновании размещения курортов всегда учитыва-

ется режим облачности в местах предположительного строительства курортного или лечебного учреждения.

Облака оказывают влияние на круговорот воды в природе, на радиационный и тепловой баланс подстилающей поверхности и атмосферы, в целом системы «подстилающая поверхность – атмосфера».

От облаков и связанных с ними осадков зависит самоочищение атмосферы. Облака являются одним из факторов формирования и колебаний климата Земли.

Сегодня специалисты проявляют интерес к целому ряду облачных параметров – высоте нижней границы и мощности облаков, водности и степени развития турбулентного перемешивания в них, микрофизической структуре, которая определяет видимость и возможность обледенения, а также пропускающую способность потоков солнечной радиации и земного излучения, отражательную способность облаков и т.д. При этом спектр интересующих специалистов облачных характеристик постоянно расширяется, растут требования к их количеству и особенно к качеству со стороны всех заинтересованных потребителей такой информации.

Следует отметить, что интерес человека к облакам был большим всегда. Наблюдения за облаками начинались с наземного прослеживания за высотой их расположения, внешним видом и их изменениями, а также за последующими погодными условиями.

Первоначально эти наблюдения не имели систематического характера и были локальными. Древние писания, поэтические откровения всех времён и народов свидетельствуют о постепенном расширении наблюдений человека за облачностью, хотя и простое созерцание облаков даже в древние времена носило глубокий смысл и ставило перед человеком много вопросов.

Неспециалиста многообразие и постоянное изменение облаков приводят к мысли о случайности их появления и изменений, о невозможности их классификации. Недаром Даниил Гранин в известном романе «Иду на грозу» писал: «Ветры, облака, дожди, колебания температуры – все то, чем занимается метеорология, все возникло из сцепления бесчисленных случайностей, они зависимы друг от друга, и невозможно было в этом клубке разыскать начала и концы... Но в этой сложнейшей науке издавна существовал наиболее трудный раздел – облака... стремление исследовать облака было уже само по себе героизмом. В самом развитии облака крылась великая тайна... Нет и, наверное, не было двух более или менее одинаковых облаков. Даже наиболее по типу сходные, они отличаются

всем – и толщиной, и формой, и возрастом, и поведением. У каждого своя судьба. Тут все меняется причудливо, неповторимо, иногда долгими часами. И все же должны быть у них какие-то общие черты. Что-то объединяет их. Но что, как, где?» [1].

Заслуга создания первой классификации облаков принадлежит французскому естествоиспытателю Ж.Б. Ламарку [2]. В 1802 г. он писал: «Тем, кто занимается метеорологией, весьма важно обращать внимание на форму облаков. Ведь, помимо особых или случайных форм, облакам присущи некоторые формы, неподвластные случайности, каковые при современном положении науки полезно распознавать и исследовать». Ламарк предложил сначала пять, затем семь основных форм облаков, и не его вина в том, что эта классификация не получила признания.

В 1803 г. английский химик-фармацевт Лука Говард предложил свою классификацию. Неудивительно, что фармацевт ввёл латинские термины для обозначения форм облаков, которые считал основными (*Cirrus*, *Cumulus*, *Stratus*) и из которых при переходе одних форм в другие возникают новые формы. Классификация Луки Говарда в последующие годы дополнялась учёными разных стран, а латинские термины для обозначения форм (видов, разновидностей) облачности навсегда закрепились в метеорологической науке [2].

Со временем систематизация наблюдений привела к созданию международной морфологической классификации и атласа облаков. Издание первого атласа облаков относится к 1896 г., затем уже переработанный атлас (по переработанной классификации облаков) издавался в Европе дважды – в 1929–1932 и 1956 гг. [3]; в нашей стране атлас облаков переиздавался в 1957 и в 1978 гг. [4, 5].

Углубление познаний об облаках связано с исследованиями в области физики облаков. В конце XIX в. учёные разных стран, прежде всего самых развитых, обратили внимание на термодинамику облаков. Наибольший интерес был проявлен к кучево-дождевым, особенно грозовым, и отчасти кучевым облакам. Изучение грозовых облаков привело к большому количеству углублённых наблюдений за электрическими свойствами атмосферы. Последующие шаги были сделаны в направлении установления связей облачных образований с порождающими их атмосферными процессами.

В синоптических исследованиях наметились и успешно развивались два направления – исследования системы облаков с последовательной сменой их форм при прохождении циклонов (французская синоптическая

школа) и исследования связи облаков с характером воздушных масс и типами атмосферных фронтов (норвежская синоптическая школа).

Исследования внутреннего строения облаков обязаны развитию метеорологических приборов и техники в целом. Аэрологические и самолётные наблюдения, а позднее – ракетные и спутниковые, позволили сделать большие шаги в теории метеорологической науки. Появились теоретические разработки в области образования осадков, прогноза осадков и условий полётов в облаках, а с развитием микрофизических исследований облаков – и в области активного воздействия на облака с целью их рассеивания или вызывания осадков.

В настоящее время за облаками наблюдают снизу (наземные наблюдения на метеостанциях) и сверху (спутниковые наблюдения). Такой подход позволил соотнести крупномасштабное и местное, «увидеть» циклоны, фронты и другие объекты синоптического анализа. В результате к сегодняшнему дню накоплена значительная информация об облаках, которая, однако, не является исчерпывающей. Наименее изученной является облачность над горными районами, где приходится переосмысливать такие характеристики, как высота нижней границы, формы облаков, суточный ход количества и степени развития облаков и многие другие.

Настоящая работа преследует цель расширить сведения об облаках специалистов, работающих в сфере метеорологии, углубить знания студентов-метеорологов в области систематизации, процессов образования, микрофизического строения облаков, их диагностики и оценки состояния атмосферы. Автор использует литературные источники, а при рассмотрении облачности над Алтаем привлекает результаты собственных исследований и исследований студентов Томского государственного университета, выполненных под руководством автора.

Основные формы облачности формируются в тропосфере, и разделение облаков по семействам производится по расположению их нижней границы в определённом слое тропосферы – нижней, средней и верхней. Так, семейство облаков нижнего яруса (табл. 1, В) включает в себя облачность, имеющую нижнюю границу до двух километров, семейство облаков среднего яруса (табл. 1, Б) – от двух до шести километров, семейство облаков верхнего яруса (табл. 1, А) – выше шести километров.

Следует отметить, что водность, плотность, оптические свойства облаков, их микрофизическая структура и некоторые другие характеристики и свойства в большей мере обязаны расположением облака в определённом слое атмосферы по вертикали.

Таблица 1

Морфологическая классификация облаков [6, 7]

Семейство	Форма	Вид	Число разновидностей
А	I. Перистые (<i>Cirrus, Ci</i>)	1. Нитевидные (<i>fibratus, Ci fib.</i>) 2. Плотные (<i>spissatus, Ci spiss.</i>)	3 2
	II. Перисто-кучевые (<i>Cirrocumulus, Cc</i>)	1. Волнистые (<i>undulatus, Cc und.</i>) 2. Кучевообразные (<i>cumuliformis, Cc cuf.</i>)	1 1
	III. Перисто-слоистые (<i>Cirrostratus, Cs</i>)	1. Нитевидные (<i>fibratus, Cs fib.</i>) 2. Туманообразные (<i>nebulosus, Cs neb.</i>)	
Б	IV. Высоко-кучевые (<i>Alto cumulus, Ac</i>)	1. Волнистые (<i>undulatus, Ac und.</i>) 2. Кучевообразные (<i>cumuliformis, Ac cuf.</i>)	4 4
	V. Высоко-слоистые (<i>Altostratus, As</i>)	1. Туманообразные (<i>nebulosus, As neb.</i>) 2. Волнистые (<i>undulatus, As und.</i>)	3 3
В	VI. Слоисто-кучевые (<i>Stratocumulus, Sc</i>)	1. Волнистые (<i>undulatus, Sc und.</i>) 2. Кучевообразные (<i>cumuliformis, Sc cuf.</i>)	3 4
	VII. Слоистые (<i>Stratus, St</i>)	1. Туманообразные (<i>nebulosus, St neb.</i>) 2. Волнистые (<i>undulatus, St und.</i>) 3. Разорвано-слоистые (<i>fractus, St fr.</i>)	1
	VIII. Слоисто-дождевые (<i>Nimbostratus, Ns</i>)		
Г	IX. Кучевые (<i>Cumulus, Cu</i>)	1. Плоские (<i>humilis, Cu hum.</i>) 2. Средние (<i>mediocris, Cu med.</i>) 3. Мощные (<i>congestus, Cu cong.</i>)	1 1
	X. Кучево-дождевые (<i>Cumulonimbus, Cb</i>)	1. Лысые (<i>calvus, Cb calv.</i>) 2. Волосатые (<i>capillatus, Cb cap.</i>)	1 3

Кроме перечисленных, выделяется ещё и семейство облаков вертикального развития (табл. 1, Г), нижняя граница которых может располагаться в большом диапазоне высот по вертикали.

Таким образом, облачность подразделяется на четыре семейства. Внутри каждого семейства выделяют различные формы облачности, внутри каждой формы – виды и разновидности (см. табл. 1).

Так выглядит морфологическая классификация облаков (от греч. *morphe* – форма), т.е. классификация по внешнему виду и высоте расположения их нижней границы. Эта классификация используется наблюда-

телями на метеостанциях и хороша тем, что наблюдатель может качественно выполнить наблюдения, не владея специальными познаниями об условиях формирования или микрофизической структуре облаков. Последние, несомненно, самые важные критерии различия облаков, стали основой для двух других классификаций – генетической (от лат. *gen, genesis* – рождение, происхождение) и классификации по микрофизическому строению (агрегатному состоянию, водности, форме кристаллов, концентрации облачных частиц и т.д.).

Безусловно, для специалиста-метеоролога необходимо умело соединять сведения, которые можно получить по всем имеющимся классификациям облаков, ибо только такое полное представление об облачности и даёт возможность увидеть облако как носителя конкретного атмосферного процесса, понять, почему те или иные оптические и электрические явления связаны с определёнными формами облаков.

В настоящей работе будет сделана попытка рассмотреть облачность с разных сторон – внешней (по морфологической классификации), внутренней (по микрофизическому строению), причинно-следственной (причины образования и трансформации облачности, т.е. по генетической классификации), а в некоторых случаях – дать отдельные метеорологические величины и их профили, характерные для той или иной облачности.

1. ОБЛАКА ВЕРХНЕГО ЯРУСА

1.1. Внешний вид и диагностические признаки

Облака верхнего яруса тонкие и белые, лишь в ночное время они кажутся более плотными. Все облака верхнего яруса отличаются большой пропускающей способностью – сквозь них просвечивают Солнце, Луна и даже яркие звезды, угадывается голубой цвет неба. При всех этих облаках предметы днём дают тени. Облака верхнего яруса в значительной мере пропускают не только солнечную радиацию, но и земное излучение – они не спасают от ночных понижений температуры и заморозков подстилающую поверхность и прилегающий слой воздуха.

Семейство облаков верхнего яруса включает в себя три формы облаков (см. табл. 1) – перистые, перисто-слоистые и перисто-кучевые. Эти облака образуются в верхней тропосфере, т.е. выше 6 км, поэтому, учитывая температуру воздуха на данной высоте, устойчивое их состояние – кристаллическое. При высокой скорости ветра этого слоя они приобретают волокнистое строение – нити, волокна, крючки и т.д.

Сказанное имеет отношение прежде всего к перистым облакам, которые расположены в самой верхней части тропосферы, где наиболее велики скорости ветра, но и у перисто-слоистых есть разновидность (перисто-слоистые волокнистые), имеющая выраженную волокнистую структуру. Что же касается перисто-кучевых, то более или менее отчётливо связь с волокнами прослеживается и у них.

1.1.1. Перистые облака (*Cirrus*, *Ci*)

Перистые облака очень тонкие, отличаются выраженной волокнистой структурой, но иногда имеют более плотные части (*Cirrus spissatus*).

Высота расположения нижней границы *Ci*, как и всех других облаков, зависит от притока солнечной радиации к подстилающей поверхности, т.е. в нижних широтах она выше, чем в высоких, летом выше, чем зимой, днём выше, чем ночью.

Высота основания перистых облаков в умеренных широтах чаще всего составляет 7–10 км [4, 5, 8], повышаясь летом и уменьшаясь зимой.

В тропических районах с более мощной тропосферой и высокой тропопаузой перистые облака имеют значительно более высокую нижнюю границу (17–18 км), мало меняющуюся от сезона к сезону. В приполюсных районах перистые облака расположены очень низко. Согласно [3–5, 9], в очень холодном воздухе *Ci* могут в виде «алмазной пыли», искрящейся на солнце, распространяться до подстилающей поверхности.

Толщина слоя *Ci* может достигать нескольких километров, но может быть и значительно меньше – несколько сотен метров [4, 5]. Согласно [9], этот диапазон ограничен значениями 0,2–3,0 км.

Осадки из перистых облаков не достигают Земли: они выпадают в виде очень мелких кристаллов, которые падают медленно и уже на больших высотах испаряются. Лишь в арктических районах, где эти осадки выпадают у самой подстилающей поверхности, они достигают измеряющих осадки приборов (осадкомеров), но и в этом случае такие осадки неизмеримы [5].

Среди других атмосферных явлений, связанных с перистыми облаками, следует отметить гало – систему оптических явлений, в числе которых наблюдаются радужные круги вокруг Солнца или Луны радиусом 22 и 46° (красный цвет расположен на внутренней части), а чаще – части этих кругов, ибо перистые облака обычно представляют собой дискретные волокна (нити). Заметим, что гало более характерно для перисто-слоистых облаков.

Перистые облака имеют два вида:

1. *Cirrus fibratus* (*Ci fib.*) – волокнистые, нитевидные.

Разновидности:

а) *Cirrus uncinus* (*Ci unc.*) – когтевидные;

б) *Cirrus vertebratus* (*Ci vert.*) – хребтовидные;

в) *Cirrus intortus* (*Ci int.*) – перепутанные.

2. *Cirrus spissatus* (*Ci sp.*) – плотные.

Разновидности:

а) *Cirrus incus-genitus* (*Ci ing.*) – грозовые (послегрозовые);

б) *Cirrus floccus* (*Ci floc.*) – хлопьевидные.

Ci fib. и их разновидности различаются лишь расположением нитей (волокон). Так, *Ci unc.* имеет вид параллельных или почти параллельных нитей, концы которых загнуты вверх; часто на одном конце заметны утолщения. *Ci vert.* напоминают скелеты рыб: от более плотной средней части облаков в обе стороны расходятся нити. *Ci int.* – разбросанные по небу клубки или пятна из перепутанных нитей.

Все *Ci sp.* имеют различные уплотнения неправильной формы, волокнистая структура которых, однако, выражена не столь ярко по сравнению с *Ci fib.* *Ci sp.* связаны, как правило, с распадающимися кучево-дождевыми облаками. Если перистые облака еще сохраняют очертания наковальни, то их классифицируют как *Ci ing.* (реже эту разновидность отмечают, когда сильный ветер на больших высотах срывает часть наковальни у ещё не распадающихся кучево-дождевых облаков). *Ci floc.* – хлопья, соединённые с нитями так, что хлопья оказываются включёнными в поле волокон (нитей) перистых облаков, а не просто окружёнными последними.

1.1.2. Перисто-слоистые облака (*Cirrostratus, Cs*)

Такие облака имеют вид белой или голубоватой тонкой однородной или почти однородной пелены, иногда слегка волокнистого строения. От перистых облаков перисто-слоистые отличаются тем, что пелена последних более однородна и, кроме того, непрерывна.

Одним из диагностических признаков перисто-слоистых облаков является гало – целая система оптических явлений, основные детали которой – окрашенные концентрические круги вокруг Солнца или Луны и неокрашенные вертикальные и горизонтальные круги, проходящие через Солнце или Луну. У окрашенных кругов красный цвет располагается внутри, фиолетовый – снаружи.

При пересечении окрашенных и неокрашенных кругов гало наблюдаются усиления яркости в виде столбов, крестов, ложных солнц и других деталей. В ряде случаев перисто-слоистые облака настолько тонкие, что их не видно, однако наличие окрашенных столбов свидетельствует о том, что они все-таки имеются на небесном своде.

Следует отметить, что в перисто-слоистых облаках наблюдается наиболее полная картина гало (в отличие от облаков перистых), поскольку эти облака занимают весь небесный свод или значительную его часть, являясь однородными и сплошными.

Высота основания *Cs* в умеренных широтах составляет 6–8 км [4, 5], в арктических широтах гораздо ниже. Толщина слоя – от сотни метров до нескольких километров (этот диапазон уточнён в [9]: 0,5–5,0 км).

Осадки из перисто-слоистых облаков не достигают земли; лишь при очень низких температурах (например, в Восточной Сибири, согласно [5]), *Cs* дают ледяные иглы или слабый снег.

Перисто-слоистые облака имеют два вида:

1. *Cirrostratus fibratus* (*Cs fib.*) – нитевидные. Облака имеют хотя бы слабое волокнистое строение в белой пелене.

2. *Cirrostratus nebulosus* (*Cs neb.*) – туманообразные. В случае этих облаков отмечается однородная белая или голубая пелена, иногда настолько тонкая, что может быть обнаружена только по наличию гало.

1.1.3. Перисто-кучевые облака (*Cirrocumulus*, *Cc*)

Как и все облака верхнего яруса, перисто-кучевые – белые и тонкие, частично волокнистой структуры, поскольку представляют собой мелкие волны, хлопья, рябь, которые могут непосредственно переходить в покров *Ci* или *Cs*. В больших количествах эти облака, как правило, не наблюдаются и редко прослеживаются вне связи с *Ci* или *Cs*. Возможно, *Cc* образуются при волновых и восходящих движениях в поле *Ci* или *Cs*. Вообще эти облака наблюдаются редко и, по мнению некоторых специалистов, являются переходной формой между другими формами облаков.

Высота основания облаков в умеренных широтах – 6–8 км [4, 5]. *Cc* – маломощные облака. Средняя их толщина составляет 0,2–0,4 км по [4, 5] и 0,2–1,0 км по [9].

Следует отметить, что наибольшие различия в количественных характеристиках облаков верхнего яруса, согласно данным литературных источников, имеются по толщине *Cc* (имеющиеся различия в высотах оснований *Ci*, *Cs*, *Cc* по [4, 5, 9] не могут считаться принципиальными).

Осадки из *Cc* не выпадают. При малой мощности этих облаков в них не формируются облачные частицы, способные преодолеть восходящие движения, т.е. стать осадками.

Среди атмосферных явлений отмечаются гало (отдельные детали) и радужная окраска краёв облака и его отдельных участков (иризация).

Перисто-кучевые облака имеют два вида:

1. *Cirrocumulus undulatus* (*Cc und.*) – волнистые – в виде мелких волн или даже мелкой ряби.

Разновидность одна – *Cirrocumulus lenticularis* (*Cc lent.*) – чечевицеобразные – отдельные облака, утончающиеся к краям (т.е. формой напоминают чечевицу).

2. *Cirrocumulus cumuliformis* (*Cc cuf.*) – кучевообразные – мелкие башенки или хлопья, растущие вверх.

Разновидность одна – *Cirrocumulus floccus* (*Cc flocc.*) – хлопьевидные – нежные белые полупрозрачные или, во всяком случае, тонкие хлопья, разбросанные по небу (иногда расположены в виде небольших скоплений). При этом главным диагностическим признаком *Cc* следует считать высоту их расположения – на одном уровне с *Ci* или *Cs*, в которые часто *Cc* и переходят непосредственно. Это следует учесть, поскольку *Cc* можно спутать только с высокими *Ac*, от которых первые отличаются, кроме высоты расположения, еще и волокнистой структурой, чаще выраженной по краям; нередко со временем волокнистая структура становится все более выраженной, а волнистая и хлопьевидная постепенно утрачиваются, и облака классифицируются уже как *Ci fib*.

1.2. Условия образования

По условиям образования описанные три формы облаков верхнего яруса различаются, но перистые и перисто-слоистые облака в большей мере близки между собой. Перисто-слоистые и перистые входят в состав облачных систем фронтальных зон. Эти формы облаков сменяют друг друга при прохождении тёплых фронтов, медленно смещающихся холодных фронтов (первого рода), фронтов окклюзии.

Перистые облака отмечаются и в других ситуациях. Так, они могут наблюдаться не только в зоне фронтов, но и в тех случаях, когда фронта уже нет, хотя своим происхождением *Ci* и были «обязаны» фронту. Все-таки перистая облачность образуется в тех слоях, куда водяной пар может быть доставлен мощными механизмами – крупномасштабными вертикальными движениями во фронтальных зонах (тёплый фронт, фронт окклюзии, холодный фронт первого рода) или при выраженном турбулентном перемешивании и яркой конвекции, что имеет место при образовании кучево-дождевых облаков с их кристаллическими вершинами (чаще всего при быстросмещающемся холодном фронте – второго рода). Впоследствии кристаллические вершины в случаях разрушения кучево-дождевых облаков и в некоторых других ситуациях диагностируются как облака перистые. В любом случае *Ci* – обычно фронтальные облака, как и *Cs*.

Для образования *Cc* необходимо возникновение волновых и конвективных движений в верхней тропосфере. Возможно, в большинстве случаев *Cc* порождаются этими движениями в поле *Ci* или *Cs*, поскольку

наблюдаются обычно в связи с такими формами. Достаточно часто *Cs* наблюдаются перед холодными фронтами второго рода [4, 5, 9], перед самими кучево-дождевыми облаками, купола которых создают гребни волн, моделирующихся в упругой среде.

В последние годы исследователи указывают на возможность внутри-массовых *Ci–Cs*, которые занимают значительно меньшие площади, чем фронтальные, и наблюдаются сравнительно редко.

Анализ данных И.Г. Пчелко [10] по повторяемости перистых и перисто-слоистых облаков при основных ситуациях, когда они наблюдаются, показывает, что в центральной части циклонов *Ci* и *Cs* присутствуют всегда, во фронтальных зонах эти облака, как правило, прослеживаются (в ряде случаев *Ci* и *Cs* не отмечались, по-видимому, из-за того, что они не всегда видны в системе многослойной облачности). Значительно реже *Ci* и *Cs* наблюдались в однородной воздушной массе, особенно холодной. Результаты, полученные И.Г. Пчелко, хорошо согласуются с выводами Г.Д. Решетова [11]: стопроцентная повторяемость *Ci–Cs* отмечается при прохождении теплых фронтов и фронтов окклюзии, 92% – в случае холодных фронтов.

Анализируя данные [10, 11], следует учитывать факт, затрудняющий изучение этого вопроса. Так, существование облаков нижнего и среднего ярусов, безусловно, указывает на активный процесс облакообразования. С завершением последнего элементы облаков быстро испаряются, а сами облака разрушаются. В отличие от облаков нижнего и среднего ярусов для облаков верхнего яруса указанная последовательность событий совсем не обязательна. Дело в том, что для образования элементов облаков верхнего яруса, как и облаков более низких ярусов, также необходимо условие достижения насыщения над водой. Однако после замерзания образовавшихся капель для дальнейшего существования кристаллов в облачности требуется лишь наличие насыщения надо льдом (упругость насыщения над водой больше, чем надо льдом).

Это условие выполняется гораздо легче, а значит и чаще, особенно под тропопаузой, где и прослеживаются облака *Ci* и отчасти *Cs*. В результате перистые облака могут длительное время существовать и после прекращения активной фазы в процессе их образования.

Многолетние наблюдения за облаками позволяют выявить некоторые детали в образовании облаков верхнего яруса, его видов и разновидностей. При приближении тёплого фронта сначала наблюдаются перистые облака, сменяемые перисто-слоистыми.

Исследование облачности привело к предположению о том, что в случаях, когда процесс облакообразования охватывает самые верхние и тонкие слои воздуха, формируются *Ci fib.* и *Ci unc.* [12].

Осадки из перистых и перисто-слоистых облаков, как и из других форм фронтальной облачности, выпадают, но подстилающей поверхности не достигают, лишь «засевая» нижележащую облачность. При этом кристаллы, выпадающие из *Ci–Cs*, образуют слабонаклонную облачную полосу, которая с подстилающей поверхности воспринимается как почти горизонтальная облачная нить. Большой или меньший изгиб полос падения образуется, согласно [12], в зависимости от характера изменения градиента ветра с высотой от слабоизогнутых волокон – *Ci fib.* – до загнутых крючков – *Ci unc.* Если же градиент ветра изменяется неравномерно с высотой или по горизонтали (ветер с высотой то усиливается, то ослабевает или резко изменяется по направлению), то нити, волокна полос падения располагаются хаотически. В этом случае облачность классифицируется как *Ci intortus*, т.е. перепутанные – снопы, клубки и более сложные фрагменты облачной картины. Вполне понятно, что, поскольку эти облака наблюдаются чаще при сложном профиле ветра или при выраженной турбулентности, *Ci intortus* связан чаще с фронтальной системой холодного фронта, чем теплого, либо прослеживается вне видимой связи с фронтом.

В целом облачная картина тёплого фронта выглядит следующим образом. Чем дальше от фронта, тем слои облакообразования более тонкие и лишь в самой верхней части содержат перистые облака [12]. По мере приближения к фронту все большие слои воздуха охвачены облакообразовательными процессами. При этом отдельные полосы падения не просматриваются в общем облачном слое: нити и волокна перистых облаков сменяются сначала полупрозрачными *Cs fib.*, где ещё сохраняется волокнистая структура, а затем – однородной пеленой *Cs neb.*

Итак, в большинстве случаев – при обширных системах перистых и перисто-слоистых облаков – они наблюдаются при прохождении фронтов, причём чаще тёплых фронтов и фронтов окклюзии, поэтому *Ci* и *Cs* в целом считаются фронтальными облаками. Однако отмечаются и случаи, когда перистые и перисто-слоистые облака не связаны с фронтами. В этом случае внутримассовые *Ci–Cs* занимают значительно меньшие площади, чем фронтальные. Эти облака наблюдаются редко, а механизм их образования на сегодняшний день недостаточно ясен. Предположительно, такие облака образуются благодаря турбулентному перемешиванию воздуха под инверсией, связанной с тропопаузой [12].

Подводя итоги сказанному, следует сделать вывод о том, что формирование видов и разновидностей перистых и перисто-слоистых облаков зависит от распределения характеристик ветра в верхней тропосфере и от мощности слоя облакообразования.

Если же в слое перистых или перисто-слоистых облаков зарождается волновое движение, то распространяющаяся волна приводит к смене *Ci* или *Cs* правильной рябью *Cc und.* В то же время *Cc und.* нередко наблюдаются перед холодными фронтами второго рода, являясь в этих случаях его предвестниками.

1.3. Микроструктура облаков верхнего яруса

При температурах ниже -25°C облака, согласно [9, 12], преимущественно чисто кристаллические.

Поскольку перистые и перисто-слоистые облака наблюдаются в слоях с достаточно низкими температурами, они имеют кристаллическую структуру. Механизмы зарождения кристаллов приведены в [13]. Облака верхнего яруса, согласно наблюдениям Х. Вейкмана (1949) [14], можно подразделить на три группы:

1. Облака, образующиеся вследствие активных и быстротекущих процессов, когда образование и рост кристаллов в них происходит при сильном пересыщении относительно льда. К этой группе относятся перисто-кучевые облака и некоторые разновидности перистых (например, *Ci unc.*, некоторые *Ci spiss.*).

2. Облака, возникающие в результате медленных процессов, когда достигается лишь незначительное пересыщение относительно льда. В эту группу отнесены перисто-слоистые и перистые облака, переходящие в перисто-слоистые [14].

3. Облака с промежуточной активностью процессов образования облаков между двумя первыми группами.

Интересно, что указанные группы облаков имеют характерное микрорфизическое строение. Так, типичная форма облачных элементов у облаков первой группы – пучки из двух и более кристаллов, которые выглядят совершенно одинаково: пустотелые призмы с внутренней полостью в виде пирамиды, вершина которой направлена к центру пучка. Грань внешнего основания призмы не заполнена и имеет вид округлённого шестиугольного кольца. Последнее, согласно [14], свидетельствует о том, что рост кристалла происходит настолько быстро, что из-за преимущественного

отложения льда по углам и рёбрам грань основания оформилась только по краям. Сказанное характерно и для боковых граней призм: нередко хорошо заметен более быстрый рост граней вдоль рёбер, на которых возникают бортики. Кристаллы такой формы образуются только при наличии интенсивного притока водяного пара, а в данном случае – при сильном пересыщении относительно льда.

Для облаков второй группы характерны одинаковые заполненные и обычно короткие кристаллы – призмы, толстые пластинки, кристаллы неправильной формы. Значительно реже встречаются отдельные снарядики, длинные столбики, кристаллы-близнецы (два кристалла соединены основаниями). В [14] отмечается, что в отличие от кристаллов первой группы облаков во второй группе пучки кристаллов не наблюдаются. Кроме того, во второй группе облаков все кристаллы, за исключением лишь неправильных, имеют хорошо сформированные сплошные грани и основания. Указанные особенности кристаллов, как и сама их форма, – доказательство того, что рост кристаллов в этой группе облаков происходит при малом пересыщении относительно льда.

Третья группа облаков – промежуточная между двумя первыми: кристаллы, составляющие эти облака, представляют собой некоторую переходную форму между пустотелыми призмами первой группы и целиком заполненными короткими столбиками второй. Иногда облака этой группы состоят из пучков призм, как это характерно для облаков первой группы, но пучки состояются не из пустотелых призм, а из призм с заполненными основаниями, хотя имеются и воздушные включения.

Последующие исследования несколько уточнили выводы Х. Вейкмана, но именно его работа признана классической. Так, согласно [12], при очень низких температурах зарождаются облака, состоящие из мелких ледяных кристаллов. Эти мелкие облачные кристаллы А.Н. Боровиков [12, 15] разделил на два основных типа:

1. Столбики, или шестигранные призмы, длиной до 0,1–0,3 мм, иногда с пустотами с одного или обоих концов, либо с одним заострённым концом («снарядики»); перистые облака состоят преимущественно из таких кристаллов.

2. Мелкие шестиугольные пластинки (тонкие или более толстые – до 100 мкм толщиной) размером до 0,4 мм, в которых часто видна внутренняя лучистая структура. Тонкие пластинки появляются при температурах от –4 до –18°C, а толстые – при более низких температурах. Пластинки чаще наблюдаются в перисто-слоистых облаках, но при этом реже по

сравнению с призмами, часто пустотелыми и нередко соединёнными в комплексы.

В [16–18] приводится повторяемость различных форм кристаллов в облаках при различных температурах.

Подводя итог сказанному, следует отметить, что перистые и перисто-кучевые облака состоят из кристаллов в виде столбов или призм, комплексы из них в литературе называют «пучки». Перисто-слоистые облака также чаще состоят из призм или столбов, однако пластинки более характерны для этих облаков по сравнению с другими облаками верхнего яруса [5], хотя их повторяемость ниже, чем повторяемость других форм кристаллов. Согласно [12, 19], пластинчатые формы кристаллов в перистых облаках встречаются в 25% случаев и реже от общего содержания кристаллов.

К сказанному остается добавить, что при температурах воздуха выше -30°C исследователи [19, 20] допускают существование облаков верхнего яруса, в частности перистых, смешанного фазового состава. В процессе своего развития перистые облака могут проходить капельную стадию, о чем свидетельствует наличие жидкой среды в перистых облаках при температуре ниже -35°C [19].

Обратил на себя внимание следующий факт. В Арктике и Антарктике при той же температуре повторяемость капельных облаков несколько выше, а кристаллических – ниже, чем в умеренных широтах [21]. Объяснение этому факту следует искать в том, что в полярных широтах воздух чище, а капли мельче, чем при той же температуре в умеренных широтах, следовательно, вероятность их замерзания в полярных широтах ниже. В тропиках по тем же причинам наблюдается обратная картина – вероятность появления кристаллов в облаках выше, чем при тех же температурах в умеренных широтах [21].

Водность (лёдность) облаков зависит от нескольких факторов. Замечено, что с понижением температуры воздуха лёдность облаков $\text{Ci}-\text{Cs}$ в среднем заметно уменьшается. При этом лёдность кристаллических облаков почти на порядок ниже водности капельно-жидких облаков в том же диапазоне температур [8, 22].

Среднее значение лёдности в перистой облачности составляют $0,01-0,03 \text{ г/м}^3$ [12, 23], но в отдельных случаях эта величина может превысить $0,1-0,2 \text{ г/м}^3$ [23]. Безусловно, лёдность перистых облаков невелика (в кристаллической части слоисто-дождевых облаков она составляет, согласно [24], $0,05 \text{ г/м}^3$, а в конвективных облаках – $0,5 \text{ г/м}^3$). Исследования более позднего периода уточнили данные по лёдности перистых облаков. Так,

например, в [24] отмечается, что при средней лёдности в перистых облаках в несколько тысячных г/м^3 в *Ci unc.* эта величина чаще всего превышает $0,1 \text{ г/м}^3$, а в головке «когтя», где зарождается снег, может достигать 1 г/м^3 .

В целом лёдность *Ci* и *Cs* оценивается в несколько тысячных г/м^3 , а *Cs* – от нескольких тысячных до сотых г/м^3 [5]. С понижением температуры воздуха лёдность облаков верхнего яруса заметно уменьшается, а с высотой она убывает почти в два раза на 1 км над основанием облака [21].

1.4. Пространственно-временная структура облаков верхнего яруса

1.4.1. Повторяемость облаков верхнего яруса

Согласно [19], перистые облака покрывают около 20% поверхности Земли. Перистые облака среди облаков верхнего яруса наиболее распространены. Например, в районе Москвы они составляют 71% от общего числа случаев облаков верхнего яруса; перисто-слоистые встречаются реже (22,2%) и совсем редко – перисто-кучевые (6,8%) [25].

В [21] приведены значения повторяемости перистых облаков над территорией бывшего СССР в различные сезоны года. Так, зимой над европейской территорией страны повторяемость *Ci* составляет 12–16%, над территорией Сибири она убывает к востоку и над некоторыми местами составляет только 7% (лишь в Омске эти значения составляют 30%, что, возможно, связано с регенерацией циклонов за Уралом). Над Восточной Сибирью и Дальним Востоком зимой в поле повторяемости отмечаются неоднородности, а над более южными районами она велика: Ашгабад – 33%, Алматы – 34%, Кош-Агач – 30% (по данным в январе). В летнее время повторяемость перистых в годовом ходе имеет минимальные значения (юг Средней Азии, Северный Казахстан), но над югом Сибири и над Дальним Востоком, где в это время нередко проходят фронты, повторяемость этой формы облаков увеличивается (от 34% в Минусинске до 49% в Чите и 56% в Иркутске). Над Дальним Востоком, согласно [21], повторяемость перистых облаков летом достигает 44%.

Перисто-слоистые облака, согласно [21], появляются чаще зимой, чем летом. Зимой распределение *Cs* в общих чертах аналогично распределению перистых облаков, хотя повторяемость перисто-слоистых несколько ниже, чем перистых. Особенно мала повторяемость перисто-слоистых зимой над Средней Азией и южной частью территории России [21]. Летом,

с ослаблением циклонической деятельности, C_s в основном уступают место перистым. Лишь над югом Западной Сибири, согласно [21], повторяемость перисто-слоистых более высокая: 14% в Минусинске и 17% в Иркутске.

1.4.2. Количество облаков верхнего яруса и их горизонтальная протяженность

Характерной чертой облаков верхнего яруса является большое разнообразие их количества. Если для перисто-слоистых характерен сплошной покров или небо закрыто в значительной степени (повторяемость градаций 7–9 баллов и 10 баллов составляет по 43% каждая), то для перистых облаков наиболее характерно количество 4–6 баллов (37%), а градации 7–9 баллов и 1–3 балла встречаются реже – 31 и 22% соответственно [26].

Горизонтальная протяженность облаков C_s в [9] оценивается в 10 – 10^2 км, а C_i и C_s – в 10^2 – 10^3 км. При этом сплошные поля C_i и C_s , протяженность которых составляет несколько тысяч километров, отмечаются редко. Важные уточнения горизонтальной протяженности C_i приводятся в [19]: фронтальные перистые, связанные с крупномасштабными восходящими движениями, имеют протяженность 10 – 10^3 км, но облака, связанные с мезомасштабными движениями, имеют меньшую протяженность: 10^{-1} – 10^2 км. Таким образом, горизонтальная протяженность облаков зависит от процессов, их породивших, а данные, приведенные в [9], отражают протяженность фронтальных облаков C_i – C_s , какими они обычно и являются [10, 27].

1.4.3. Границы и мощность облаков верхнего яруса

Имеющиеся в литературных источниках данные о нижней границе облаков верхнего яруса согласуются очень хорошо. Так, в [5] средняя высота перистых облаков в умеренных широтах оценивается в 7–10 км, перисто-слоистых и перисто-кучевых – в 6–8 км. В [9] приводятся данные исследований А.М. Боровикова и И.П. Мазина, согласно которым нижняя граница C_s изменяется в пределах 6–9 км, C_s – 5–9 км, C_i – 6–10 км.

В любом случае при решении вопроса об уровне образования облаков верхнего яруса следует помнить, что этот уровень самым тесным образом зависит от изменения высоты тропопаузы. Именно поэтому уровень образования перистых облаков, согласно [12, 19], с уменьшением широты места увеличивается, и в тропиках зарегистрированы максимальные высоты нижней границы облаков – 20 км.

Высота нижней границы облаков верхнего яруса имеет чётко выраженный годовой ход [12, 28]: летом облака расположены выше, чем зимой. Эта разница может составлять от нескольких сотен метров до 1–1,5 км.

Высота верхней границы облаков верхнего яруса также тесно связана с изменением высоты тропопаузы, поскольку развитие этих облаков ограничено изотермией или слабой инверсией тропопаузы. Так, согласно [26], 95% всех облаков верхнего яруса не пересекает границу тропопаузы и 87% не достигает ее; всего 5% облаков превышало тропопаузу на высоту не более 500 м. Чаще всего верхняя граница облачного слоя располагается на расстоянии 1–2 км под тропопаузой.

Мощность перистых облаков варьирует от сотен метров до нескольких километров [5], составляя в среднем 0,2–3 км [19], и изменяется от синоптических условий (над циклонами и фронтами – от нескольких сотен метров до 5–6 км, а над антициклонами – всего 0,3–0,5 км). Согласно [19], наиболее мощные *Ci* наблюдаются на тёплых фронтах. В этом случае мощность перистых облаков составляет примерно 2,5 км и практически не зависит от сезона; на холодных фронтах средняя мощность перистых облаков несколько ниже – 2,1 км; на фронтах окклюзии мощность перистых облаков в среднем 0,8–2,1 км, но может достигать в отдельных случаях и 3 км. Внутримассовые перистые – облака малой мощности: 0,7–1,0 км в зависимости от сезона [19].

Перисто-кучевые облака имеют исключительно малую мощность – 0,2–0,4 км [5], а перисто-слоистые – от сотен метров до нескольких километров. Примером большой мощности облаков *Cs* могут служить облака этой формы в районе экватора, где их мощность составляет 3–4 км [21].

1.4.4. Некоторые метеовеличины и их профили, характерные для облаков верхнего яруса

Характерной чертой облаков верхнего яруса являются высокие значения вертикального градиента температуры [26]: в большинстве случаев они близки к влажноадиабатическим, но нередко доходят и до значений сухоадиабатического градиента. Среднее годовое значение вертикального градиента температуры (γ) в облаках верхнего яруса составляет 0,72°C/100 м. Согласно [26], максимальная повторяемость γ приходится на градацию 0,61–0,80°C/100 м (45% всех случаев) и абсолютно преобладают значения γ в диапазоне 0,61–1,00°C/100 м (77% всех случаев).

Интересно отметить, что в случае перистых облаков γ несколько меньше, чем в перисто-слоистых облаках. Так, преобладающие значения γ в диапазоне $0,61\text{--}1,00^\circ\text{C}/100\text{ м}$ в *Cs* встречаются в 81% случаев, а в *Ci* – в 73% случаев. Несколько различаются и средние годовые значения γ в облаках этих форм: в *Cs* γ составляет $0,77^\circ\text{C}/100\text{ м}$, в *Ci* – $0,69^\circ\text{C}/100\text{ м}$ [26]. При этом более высокие значения γ отмечаются в *Cs* над более южными станциями (Ташкент, Алматы, где $\gamma = 0,82^\circ\text{C}/100\text{ м}$) по сравнению с более северными (Новосибирск, Екатеринбург, где $\gamma = 0,73^\circ\text{C}/100\text{ м}$). Вертикальные градиенты температуры над облаками верхнего яруса значительно ниже, чем в облаках [26].

Следует отметить, что вертикальный градиент температуры не только зависит от формы облаков, но и не остается постоянным при одной и той же форме облаков на одной и той же широте места. Так, А.Х. Хргиан [29] показал, что в облаках верхнего яруса наибольшие γ характерны для перистых облаков волокнистого и нитевидного строения, а наименьшие наблюдаются в облаках с ровными или размытыми гранями облаков *Ci*; в облаках с обеими неровными, всхолмленными, бугристыми поверхностями вертикальный градиент имеет довольно высокие значения.

Проведённые к настоящему времени исследования позволяют рассмотреть температурный режим нижней и верхней границ облаков верхнего яруса. Показано, что в облаках верхнего яруса наибольшая повторяемость температур на нижней границе приходится на градации $-30\text{...}-39^\circ\text{C}$ и $-40\text{...}-49^\circ\text{C}$ (по 29%); в целом кривая повторяемости значений температуры на нижней границе облачных слоёв симметрична. Среднее значение температур за год на нижней границе составляет $-41,2^\circ\text{C}$ [26]. Приведённые данные достаточно хорошо согласуются с данными других учёных. Так, согласно [29], средние температуры в перистых облаках составляют на нижней границе $-20\text{...}-50^\circ\text{C}$, причём минимальные температуры наблюдаются зимой, максимальные – летом.

В [26] отмечается, что средние значения температуры воздуха в перисто-слоистых облаках заключены в пределах $-25\text{...}-55^\circ\text{C}$. Такое устойчивое распределение температур на нижней границе приводит к мысли об однородности условий образования облаков. Вместе с тем более детальное рассмотрение температурного режима облаков верхнего яруса обнаруживает характерные различия его в облаках различных форм. Так, например, температуры на нижней границе перистых облаков значительно ниже, чем у перисто-слоистых, а среднее годовое значение температуры на нижней границе облаков *Ci* составило $-42,7^\circ\text{C}$, в то время как у *Cs* $-37,4^\circ\text{C}$ [26].

Повторяемость значений температур на нижней границе облаков по градациям подтверждает этот вывод: наибольшая повторяемость приходится на градацию $-40...-49^{\circ}\text{C}$ у *Ci* и на градацию $-30...-39^{\circ}\text{C}$ у *Cs*. Повторяемость температур от -40°C и ниже составляет у *Ci* 60 %, а у *Cs* – всего лишь 32% [26].

Отчётливо, согласно [26], представляется и связь годовых значений температуры нижней границы облаков с количеством облаков – отмечается тенденция повышения температуры нижней границы по мере увеличения количества облаков (как в случае *Ci*, так и в случае *Cs*).

Что касается температуры на верхней границе облаков верхнего яруса, то наибольшая повторяемость (около 70% всех случаев) приходится на диапазон $-40...-59^{\circ}\text{C}$, т.е. по сравнению со значениями температур на нижней границе облаков наблюдается сдвиг на 10° в сторону более низких температур. Средняя годовая температура на верхней границе облаков составляет $-47,3^{\circ}\text{C}$.

Интересно отметить, что, в отличие от повторяемости значений температур отдельно для *Ci* и *Cs* на нижней границе облачности, на повторяемость температур на верхней границе облачности обеих форм количество облаков влияния почти не оказывает [26].

Видимость в среднем составляет в перистых облаках 0,9–1,4 км, но минимальные значения могут, согласно [30], составить 90 м. В тропической зоне эти значения снижаются до 0,2–0,5 км и 70 м соответственно [30]. Если же говорить о диапазоне видимости, то в одном и том же перистом облаке видимость может изменяться от 0,2–0,5 до 2–4 км [11]. Отмечается и изменение видимости с высотой – наименьшие её значения наблюдаются в средней части перистых облаков.

Скорость ветра при перистых облаках изменяется от 20 до 200 км/ч [23]. Верхняя граница перистых облаков часто совпадает с уровнем максимальной скорости ветра. Выше этого уровня облака образуются редко, а если и образуются, то бывают тонкими [19]. Расположение перистых облаков связано со струйными течениями (областями очень высоких скоростей): слева от оси струйного течения (если смотреть в направлении ветра) небо чаще безоблачное, справа – значительная облачность [23].

2. ОБЛАКА СРЕДНЕГО ЯРУСА

2.1. Внешний вид и диагностические признаки

Облака среднего яруса имеют менее яркий цвет, чем облака верхнего яруса – беловатый, светло-серый, иногда синевато-серый. Сквозь облака среднего яруса солнце видно, как через матовое стекло, или вообще не просвечивается, но положение солнца можно определить по увеличению яркости в облачном массиве. Тени от предметов на земле в случае облаков среднего яруса нерезкие или даже отсутствуют. Облака развиваются в средней тропосфере – нижняя их граница расположена в пределах от 2 до 6 км в умеренных широтах.

Следует отметить, что исследование облаков среднего яруса представляет определённые трудности. Границы расположения облаков таковы, что невозможно исследовать облака с помощью одного самолёта: для винтомоторных самолётов очень часто верхняя граница облаков находится за пределами их «практического потолка», а для полётов скоростных самолётов представляет определённые трудности нижняя граница облаков. Для визуального наблюдения с земли высоко-слоистых облаков трудности создают наблюдающиеся одновременно с ними облака нижнего яруса (слоисто-дождевые облака), экранирующие облака среднего яруса; в случае наблюдения этих облаков с искусственных спутников Земли они оказываются перекрытыми облаками верхнего яруса, прежде всего перисто-слоистыми.

Сказанное необходимо учитывать, имея данные непосредственных наблюдений за облаками, данные статистического анализа всех параметров облаков среднего яруса.

Семейство облаков среднего яруса включает в себя две формы облаков (см. табл. 1) – высоко-слоистые и высоко-кучевые.

2.1.1. Высоко-слоистые облака (*Altostratus*, *As*).

Обычно нижняя граница *As* оценивается высотой 3–6 км, мощность составляет 0,5–3,0 км (чаще 1–2 км), горизонтальная протяженность – 10^2 – 10^3 км [4, 5, 9, 24]. Однако нижняя граница облаков этой формы может опуститься и ниже в холодный период. Так, например, высота

нижней границы высоко-слоистых облаков составляет в средних широтах до 2 км, а в Арктике в отдельные месяцы зимы даже опускается ниже 2 км, т.е. выходит за пределы обычных высот формирования облаков среднего яруса и составляет 1 600 м зимой, в летнее время – 2 500 м [24].

Средняя толщина As – 1–2 км, максимальная – 2,38–4,35 км [24], но в высоких широтах она может быть меньше – около 500 м. По сравнению с высоко-кучевыми облаками облака высоко-слоистые, несомненно, более мощные, что связано с процессами их формирования.

Внешне высоко-слоистые облака – серая или синеватая однородная пелена, на нижней поверхности которой иногда заметны слабо выраженные волны и борозды [5]. Пелена As постепенно закрывает все небо. Эти облака могут одновременно наблюдаться на разных уровнях, т.е. быть многослойными, а толщина безоблачных прослоек между облачными слоями составляет от десятков метров до километра [21, 31].

Солнце и Луна просвечивают сквозь эти облака слабо, но положение их можно определить всегда. В тонких As отмечаются радужные кольца непосредственно около Солнца или Луны с фиолетовым цветом внутри, а красным – снаружи, это – венцы [4, 5].

Осадки из As выпадают, однако в средних широтах летом, а также в низких широтах они не достигают подстилающей поверхности по нескольким причинам:

а) летом нижние границы облаков находятся выше, чем зимой, и выпадающим осадкам приходится проходить больший путь от облаков к подстилающей поверхности;

б) летом выпадают жидкие осадки, которые испаряются быстрее, чем кристаллические, ибо силы сцепления частиц в них меньше, чем в твёрдом теле, что облегчает испарение;

в) летом выпадающие осадки проходят свой путь к земле в поле более высоких температур, чем зимой, что усиливает испарение;

г) относительная влажность в подоблачном слое летом меньше, чем зимой, следовательно, выпадающие летом осадки от облака к земле движутся в более ненасыщенном воздухе, чем зимой.

Зимой выпадающие атмосферные осадки имеют диагностический смысл, ибо даже очень тонкие As дают осадки, регистрируемые осадкомером, причем эти осадки имеют обложной характер – обложной снег.

В переходные периоды As могут дать слабый обложной дождь, но чаще такие осадки не достигают подстилающей поверхности. Возможность достижения подстилающей поверхности осадками из As весной и осенью

зависит от нескольких факторов: от мощности и высоты нижней границы облаков, поля температуры воздуха в слое между облаком и подстилающей поверхностью и особенно от состояния подстилающей поверхности (степени покрытия снежным покровом). Чаще всего при сохранившемся (установившемся) снежном покрове выпадающие из *As* осадки подстилающей поверхности достигают.

Высокослоистые облака имеют два вида:

1. *Altostratus nebulosus* (*As neb.*) – туманообразные.
2. *Altostratus undulatus* (*As und.*) – волнистые.

As neb. имеют вид однородного серого слоя, *As und.* – волнистую нижнюю границу.

Разновидности этих видов *As* одни и те же:

- а) *Altostratus translucidus* (*As trans.*) – просвечивающие;
- б) *Altostratus opacus* (*As op.*) – непросвечивающие;
- в) *Altostratus praecipitans* (*As pr.*) – дающие осадки.

При *As trans.* Солнце и Луна просвечивают, как через матовое стекло, иногда могут появиться слабые тени от предметов; эти облака сходны с наиболее плотными *Cs*, но имеют серый цвет и расположены ниже.

Через *As op.* Солнце и Луна не просвечивают, но их расположение определяется по светлomu расплывчатому пятну на облаке [5]; облака представляют собой сплошной серый, местами более светлый или более тёмный покров.

Из *As pr.* выпадают осадки, которые достигают земли (даже из тонких *As*) в зимнее время, поэтому зимой определение *As pr.* не представляет трудности. В тёплый период, когда осадки подстилающей поверхности не достигают, следует обратить внимание на нечёткую нижнюю границу, что имеет место у облаков, из которых выпадают осадки.

В некоторых случаях у начинающего работать наблюдателя имеются трудности в отличиях *As* от некоторых форм облачности, в частности от перисто-слоистых (*Cs*), высоко-кучевых (*Ac*), слоистых (*St*) и даже слоисто-дождевых (*Ns*). Эти трудности преодолимы, если помнить, что от *Cs* облака *As* отличаются по характеру просвечивания Солнца, а зимой *As* отличаются и как облака, дающие осадки; от *Ac* отличаются более однородной структурой, в которой просветы отсутствуют; от *Ns* облака *As* отличить вообще нетрудно, ибо *Ns* Солнце и Луну не просвечивают и, кроме того, летом эти облака легко различимы по выпадению осадков из *Ns*; от *St* облака *As* также различаются по возможности наблюдателя при *As* четко указать направление расположения Солнца и Луны, что невоз-

можно сделать при *St*, более того, нижняя поверхность *As* обычно ровная, а у *St* – чаще разорванная.

Облака *As* встречаются часто – повсеместно в среднем за год их повторяемость составляет примерно 18% среди облаков других форм: по 23% зимой и весной, 11% летом и 16% осенью [32].

2.1.2. Высоко-кучевые облака (*Alto cumulus*, *Ac*)

Высота нижней границы *Ac* в умеренных широтах изменяется в достаточно широких пределах – от 2 до 6 км, а в тропических широтах – от 3 до 6 км. Сезонные колебания высоты нижней границы облаков незначительны [21].

Толщина *Ac* в 40–50% случаев не превышает 200 м, а в 70–80% – 400 м [21]. Обычно толщина *Ac* составляет 200–700 м [5]. Географические и суточные различия в значениях толщины *Ac* незначительны. Итак, в целом *Ac* – маломощные облака. Исключение составляют лишь высоко-кучевые башенковидные – их мощность может достигать и нескольких километров.

В среднем поля *Ac* покрывают видимый небесный свод на 7–8 баллов [3].

Ac – светлые, иногда сероватые или синеватые облака в виде волн, гряд, хлопьев, чечевиц, башенок. Иногда они сливаются в сплошной покров сравнительно небольшой мощности, но часто между облачными элементами видно голубое небо. Одни облака носят отпечаток волновых движений, другие – процесса конвекции.

Высоко-кучевые облака наблюдаются довольно часто и имеют много разновидностей, относящихся к двум видам.

1. *Alto cumulus undulatus* (*Ac und.*) – волнистые; располагаются рядами (грядами) различной протяженности и могут наблюдаться лишь на отдельных участках облачного массива.

Разновидности:

а) *Alto cumulus translucidus* (*Ac trans.*) – просвечивающие; состоят из ограниченных облачных элементов и имеют неоднородную плотность;

б) *Alto cumulus opacus* (*Ac op.*) – плотные (непросвечивающие), образуют почти сплошной покров, но в любом случае на нижней его поверхности достаточно отчетливо видны темные волны, гряды, пластины;

в) *Alto cumulus lenticularis* (*Ac lent.*) – чечевицеобразные, имеют вид удлиненных с обеих сторон больших чечевиц, отчего разновидность и получила свое название; длина чечевиц достигает 20–30 км, толщина – нескольких сотен метров [24, 33];

г) *Alto cumulus inhomogenus* (*Ac inh.*) – неоднородные; в случае этой разновидности либо слой облаков имеет волнистое строение, неодинаково выраженное в отдельных местах, либо имеют место два слоя облаков, расположенных на разных уровнях.

2. *Alto cumulus cumuliformis* (*Ac cuf.*) – кучевообразные, т.е. облака с явными признаками развития по вертикали; могут быть либо обособленными, либо слившимися массами высоко-кучевых облаков. Иногда гряды *Ac* возникают из растекающихся кучевых мощных облаков.

Разновидности:

а) *Alto cumulus floccus* (*Ac floc.*) – хлопьевидные, похожие на мелкие распадающиеся кучевые облака и, бесспорно, обусловлены конвекцией; имеют вид белых хлопьев облаков, разорванных по краям, сравнительно быстро меняющих свои очертания;

б) *Alto cumulus castellanus* (*Ac cast.*) – башенковидные, имеют вид белого или чуть сероватого слоя (гряды) облаков, над которыми видны развивающиеся вверх белые массы, похожие на небольшие облака вертикального развития (отличаются от последних общим основанием) и напоминающие башенки; башенки могут иметь разную высоту, свидетельствуя о неодинаковой устойчивости атмосферы в разных частях слоя воздуха; в отдельных случаях башенки даже напоминают уменьшенные кучево-дождевые облака;

в) *Alto cumulus cumulogenitus* (*Ac cug.*) – образовавшиеся из кучевых облаков; разновидность определяет направление процесса – растекание кучевых мощных или кучево-дождевых облаков, если их вершины достигли среднего яруса; безусловно, облака свидетельствуют об увеличении устойчивости атмосферы, их легко определить, если следить за динамикой облаков;

г) *Alto cumulus virga* (*Ac vir.*) – с полосами падения осадков; полосы падения осадков направлены от облака наклонно или прямо вниз, а затем загибаются из-за разных скоростей ветра на разных уровнях.

Итак, при высоко-кучевых облаках осадки не регистрируются, можно наблюдать лишь полосы падения (при этом дается разновидность *Ac vir.*), но отдельные капли могут иногда достичь подстилающей поверхности.

Часто в *Ac* наблюдаются венцы. Кстати, по параметрам венцов иногда определяются размеры облачных частиц. Сквозь тонкие края *Ac* просвечивают Солнце и Луна, вокруг которых венцы и образуются. Сквозь центральные части уплотнений в облаке (волн, пластинок) Солнце и Луна обычно не просвечивают. Тогда края облаков, проходя вблизи Солнца или Луны, окрашиваются слабыми радужными тонами (иризация).

Высоко-кучевые облака могут наблюдаться вместе с высоко-слоистыми, возможны и переходы As в As или As в As .

Много общего у As со слоисто-кучевыми и перисто-кучевыми облаками. As могут уплотняться и опускаться, и тогда они переходят в слоисто-кучевые облака. В этом случае Солнце и Луна перестают просвечивать, поэтому данные формы облаков не следует путать. От перисто-кучевых As отличаются по отсутствию связи последних с перистыми и перисто-слоистыми, что характерно для перисто-кучевых облаков. Кроме того, различен их цвет – у As окраска более тусклая, иногда даже сероватая. Отличается также и размер отдельных облачных элементов этих облаков.

As могут наблюдаться и с фронтальными кучево-дождевыми облаками [4, 5].

2.2. Условия образования

Высоко-слоистые облака (As) – фронтальные, следовательно, главный фактор их образования – это крупномасштабные движения тёплого воздуха вдоль клина холодного. В системе тёплого фронта они располагаются за перисто-слоистыми облаками перед слоисто-дождевыми, а в системе облаков холодного фронта 1-го рода проходят после слоисто-дождевых перед перисто-слоистыми. Указанный переход может быть как непосредственным, так и с чередованием облачных слоев с безоблачными промежутками. Последний вариант наиболее характерен для распадающихся фронтальных облачных систем [5].

В облачной системе тёплого фронта, где Ci – Cs наблюдаются раньше, чем As , выпадающие из первых кристаллы приводят к тому, что As чаще развиваются как смешанные облака, которые в холодный период могут дать сильный снегопад, оставаясь тонкими и прозрачными [24]. На некотором расстоянии от центра циклона или над горной страной As могут быть не единой облачной массой, а распадаться на два слоя [34].

При прохождении холодного фронта смена Ns – As – Cs более быстрая, чем при тёплом фронте, ибо скорость перемещения первого выше. Кроме того, эта смена менее «правильная» [34].

Адиабатическое охлаждение при сравнительно медленных крупномасштабных восходящих движениях в циклонах и на атмосферных фронтах приводит к образованию относительно однородных облачных полей, к которым относятся и As . В целом, согласно [32], повторяемость As в 2,5 раза меньше повторяемости высоко-кучевых и слоисто-кучевых облаков.

Что касается высоко-кучевых облаков, то большое количество разновидностей свидетельствует о многообразии процессов их образования. Основные из этих процессов – волновые движения воздуха на высоко расположенных границах инверсии, волновые движения на слабонаклонённых фронтальных поверхностях, волновые движения над горными препятствиями, растекание мощных кучевых облаков в слое 2–5 км, особенно при наличии инверсии (так образуются *Ac cig.*, которые на дальнейшей стадии развития могут перейти в *Ac opac.* и *Ac trans.*), конвективные движения воздуха в слое выше 2 км (так образуются *Ac cast.* и *Ac floc.*) [5]. Облака *Ac* могут возникнуть благодаря проникающей конвекции [35, 36]. Под проникающей конвекцией понимается подъём отдельных масс воздуха при относительно спокойном состоянии окружающего воздуха. Дискретные массы воздуха нагреваются у поверхности земли либо в результате притока солнечной радиации к подстилающей поверхности, над которой стационарирует воздух, либо при перемещении воздуха, где он нагревается от более тёплой подстилающей поверхности. Нагретый воздух устремляется вверх, может достичь уровня конденсации и пересечь его. Тогда начнется процесс конденсации, а выделяющаяся при этом скрытая теплота увеличивает подъёмную силу движущихся вверх масс воздуха, которые в этом случае напоминают по форме большие пузыри (верхняя их часть имеет сферическую форму и является более тёплой, а нижняя – менее теплая – похожа на шлейф).

Если поднимающийся воздух встретит на своём пути слой инверсии, то сразу «погасить» скорость он не сможет, следовательно, войдет в более тёплый слой. В нём поднимающийся воздух окажется холоднее, плотнее и начнет опускаться. При опускании воздух нагреется, станет менее плотным и снова начнет подниматься; при подъёме охладится и, зайдя в слой инверсии, вновь опустится. Очевидно, что в приведённом примере возникает волнообразное движение, которое может стать причиной возникновения волнистых облаков *Ac und.*

Указанный вид (*Ac und.*) может образоваться и в других случаях. Так, при прохождении быстро смещающегося холодного фронта (второго рода) тёплый воздух не успевает отодвигаться и оказывается вытесненным холодным воздухом вверх; подъём осуществляется до тех пор, пока поднимающийся воздух теплее окружающего; на уровне выравнивания температур, несколько продвинувшись вверх по инерции, воздух производит толчок вышерасположенного воздуха, чего бывает достаточно для волнового движения. Получив импульс, этот воздух несколько поднимается

вверх, охлаждается, затем опускается и нагревается; в упругой среде эти движения повторяются, поэтому перед холодным фронтом второго рода нередко появляются *Ac und.* и являются предвестниками этого фронта.

Другой вариант – при перетекании воздуха через горы воздух совершает подъём, затем опускание, что порождает в упругой среде волновое движение, которое прослеживается за горным препятствием. В гребнях волн воздух совершает подъём, следовательно, приближается к состоянию насыщения, в ложбинах – опускание и удаление от состояния насыщения. С гребнями волн может быть связан процесс облакообразования, если гребни расположены выше уровня конденсации, в ложбинах облачность либо не наблюдается, либо она заметно уменьшает свою толщину. В любом случае визуально облачность воспринимается как волнистая.

В случаях волновых движений над горным препятствием часто наблюдается разновидность волнистых *Ac* – чечевицеобразные облака (*Ac lent.*). Эти облака, являясь, безусловно, орографическими, могут наблюдаться не только в районах сложного рельефа, но и, оторвавшись от породившего их рельефа, в местах, удаленных от него; в этом случае облака малоподвижные, как бы застывшие по ветру. Понятно, что орографические облака возникают с подветренной стороны хребтов и гор. Наиболее широкая центральная часть чечевицы приходится на гребень волны, а утонение – на переходные части от гребня к ложбине, в ложбине – безоблачные промежутки или значительно более тонкие облака, ибо, как уже указывалось выше, в ложбинах волн воздух совершает нисходящее движение и, нагреваясь, удаляется от состояния насыщения.

Волны могут простирались в горизонтальном направлении на несколько километров, а облачные элементы в их гребнях определяются большим числом факторов – температурной стратификацией и степенью развития турбулентных движений, высотой и шириной горного препятствия, скоростью набегающего на препятствие потока, положением уровня конденсации [2].

Иногда, когда в соседних слоях наблюдаются различные скорости ветра, при некоторых условиях видимые с земли чечевицеобразные облака наслаиваются друг на друга и создают впечатление стопки тарелок. Такие явления наблюдали, например, авторы [37].

В некоторых случаях в горах может наблюдаться такая интересная картина: вершина отдельного пика или горы увенчана «шапкой» облака или гору окружает «ожерелье» облаков – в зависимости от высоты уровня конденсации. Эти облака порождены волновым движением и класси-

фицируются как *Ac und.* Кстати, и «шапки», и «ожерелья», кажущиеся неподвижными и постоянными, в каждый момент времени создаются все новыми массами воздуха, которые поднимаются и приближаются к состоянию насыщения, а прежние опускаются и удаляются от этого состояния.

Волнистообразные облака над невысокими горами испытывают суточный и годовой ход как повторяемости, так и мощности; наибольшие значения отмечаются утром и вечером. Дневной минимум связан с перегревом хребта относительно окружающего воздуха, но над ледяными и снежными вершинами орографические волны предположительно увеличиваются; ночной минимум связан с малыми скоростями ветра по горизонтали, что сказывается на ослаблении процесса волнообразования. Над очень высокими хребтами волнистообразные облака не имеют выраженной периодичности [24].

Высоко-кучевые вида кучевообразные (*Ac cuf.*) всегда связаны с вертикальными движениями и часто имеют явную связь с облаками вертикального развития. Так, расположенные правильными рядами разновысотные башенки указывают на неустойчивость в слое наблюдения: если башенки растут, то они могут превратиться в облака вертикального развития; если башенки уменьшаются, то облака приобретают затем вид полос, которые впоследствии сближаются.

В первом случае увеличивается неустойчивость атмосферы, во втором – неустойчивость уменьшается и сменяется устойчивостью. Таким образом, при благоприятных условиях *Ac cast.* превращаются в кучевые мощные и даже в кучево-дождевые облака, но с более высоким основанием, чем в тех случаях, когда они образуются в результате конвекции и турбулентных движений в нижних слоях, а не являются продуктом трансформации облаков. Впрочем, оба случая больше характерны для тёплого периода, особенно лета, когда неустойчивость атмосферы увеличивается от утренних к полуденным и послеполуденным часам.

Ac cig., как понятно уже из названия разновидности, связаны с уменьшением неустойчивости атмосферы и ростом ее устойчивости, ибо именно в этом случае происходит растекание кучевых мощных или кучево-дождевых облаков. Похожи на распадающиеся кучевые облака и *Ac floc.*, но продукты их распада – более мелкие (белые хлопья с разорванными краями).

Кроме того, *Ac* могут возникнуть в результате разрушения облачных систем атмосферных фронтов. Так, вдоль линии быстро смещающегося холодного фронта (холодного фронта второго рода) фронтальные кучево-дождевые облака нередко эволюционируют, переходя в другие формы,

в частности в Ас. Таким образом, Ас связаны как с внутримассовыми, так и с фронтальными кучево-дождевыми облаками.

В целом Ас очень часто наблюдаются летом, занимая первое место среди облаков разных форм (68%), но и зимой Ас занимают второе место [32, 38] по повторяемости над территорией России и сопредельных государств (31%).

2.3. Микроструктура облаков среднего яруса

Облака среднего яруса расположены в широком диапазоне высот, где вода может находиться в любом фазовом состоянии. Так, согласно [7, 39], в Ас можно выделить несколько зон. По [39], в Ас выделяются следующие зоны:

- а) зона водная – капли при положительных температурах (фаза тёплых капель);
- б) зона ледяных кристаллов (кристаллическая фаза);
- в) зона смеси переохлаждённых капель и кристаллов (смешанная фаза).

Названные фазы могут встречаться в различных сочетаниях. По данным [39], водяная и кристаллическая фазы наблюдаются в облаках Ас одинаково часто, при этом полностью водяные облака составляют всего 24%, а чисто кристаллические – 37%, т.е. 61% облаков имеют лишь одну фазу. Из числа всех капельных облаков 90% являются переохлажденными, и лишь 10% облаков фиксируются при положительных температурах [39]. Последнее подтверждает мысль о том, что переохлаждённое состояние – это преобладающее состояние фронтальных капельных облаков [4, 5, 21].

В целом в 39% случаев Ас бывают более сложного агрегатного строения, чем только капельные или только кристаллические. Из этого числа в 21% случаев имела место смешанная фаза [39], когда капли и кристаллы встречались в слое облака одновременно, а в 8% случаев зоны капель и кристаллов располагались друг над другом; отмечались и более сложные сочетания в Ас – смешанная фаза над водной и кристаллическая фаза над смешанной. Все-таки, согласно [39], чаще Ас бывают смешанного (39%) и кристаллического (37%) строения. В [38] дается уточнение – зимой Ас имеют смешанное строение в 36–46% случаев, кристаллическое – в 44–49%, капельное – в 10–15% случаев; летом преобладают капельные облака – 62% (смешанные – 30%, кристаллические – всего 8%). Таким образом, прослеживается сезонный ход повторяемости фаз в Ас [39]: кристаллическая фаза чаще встречается в январе (85%), а водяная, наоборот, – в июле (89%).

По высоте в облаках As фазы распределяются следующим образом. От нижней границы облака до уровня 2 км над поверхностью земли вероятности переохлаждённой и кристаллической фаз очень близки. Выше 2 км повторяемость твёрдой фазы непрерывно растёт и на высоте 5,3 км достигает 65%. В то же время повторяемость переохлаждённой водной фазы растёт с высотой значительно медленнее. Максимальные значения её достигаются на уровне 3,5 км (40%), и затем она несколько уменьшается. При этом зимой область наибольшей повторяемости переохлажденной зоны расположена между 1,5 и 2,5 км, а летом – между 3,5 и 5,0 км. В летнее время до высоты 2 км переохлажденная зона отсутствует. Сказанное относится к тем случаям, когда As имеет нижнюю границу, расположенную несколько ниже 2 км, хотя формально уровень образования As как облака среднего яруса должен быть от 2 до 6 км.

Итак, As – достаточно сложные облака, что подтверждает и их микроструктура, поскольку большие диапазоны температур и большая протяжённость приводят к образованию в них не только различных фаз, но и размеров и форм облачных частиц.

Смешанными As могут стать как в результате образования твёрдой фазы непосредственно в водном облаке, так и при выпадении в водное облако кристаллов из вышерасположенных облаков [12]. Длительное время As могут существовать как смешанные облака. Перестройка осуществляется постепенно за счёт «перегонки» воды с капель на кристаллы. Новообразованные капли быстро испаряются, поэтому капли в смешанных облаках значительно мельче, чем в водных – наиболее часто встречаются капли радиусом 2–3 мкм [12]. Через определённое время облако может стать полностью кристаллическим.

В [40] дана повторяемость фазового состояния As при различных температурах. Максимальная повторяемость капельной структуры As наблюдается в диапазоне температур от 0 до $-2,0^{\circ}\text{C}$ (64,9%), кристаллической – при температурах от -32 до -34°C (83,5%), смешанной – при температурах от -12 до -14°C (39,1%). При наблюдающихся температурах в слоях образования As смешанное и кристаллическое состояния преобладают и имеют почти равную вероятность [9, 32, 39]. В высоко-слоистых облаках наиболее часто встречаются температуры (от -8 до -12°C), при которых происходит интенсивная «перегонка воды» с капли на кристалл, следовательно, кристаллическая фаза в этих облаках встречается сравнительно часто.

В [12] показано, что каждой фазе развития облака соответствует определенный характер микроструктуры. Так, в начале развития наблюдается

обычно смешанная микроструктура облака. В фазе активного облакообразования также наблюдается смешанная микроструктура. При этом происходит интенсивная «перегонка воды» с капли на кристалл. Согласно [12], регенерация капель вначале происходит во всей толще облака, но по мере ослабления восходящих движений – только в отдельных слоях. Таким образом, устанавливается слоистое распределение фаз: вверху – кристаллы, внизу – капли. Далее, по мере ослабления восходящих движений, образование капель ослабевает и, наконец, прекращается. Облако становится кристаллическим. Кристаллы различных форм продолжают расти и в конечном итоге выпадают. Итак, по микроструктуре облака *As* можно судить о его возрасте.

В *As* наблюдаются следующие формы кристаллов: тонкие пластинки и дендритные формы (при температурах от 0 до -15°C), толстые пластинки, столбики, пульки (при температурах от -15 до -30°C) [24]. В капельной среде облаков *As* средний радиус составляет 5 мкм, а модальный радиус (радиус наиболее часто встречающихся капель) – 4,5 мкм [40].

Что касается фазового состояния высоко-кучевых облаков, то они являются капельно-жидкими либо с примесью отдельных кристаллов (в этом случае отмечаются как смешанные) – такие варианты почти равновероятны и в сумме составляют примерно 90% [36, 38]. Именно из облаков с примесью отдельных кристаллов и выпадают осадки, которые, правда, не достигают земной поверхности (68% из всех случаев выпадения осадков из *As* – по данным [38]).

Все сказанное подтверждает два вывода относительно облаков *As*: для этих облаков наиболее характерно капельно-жидкое состояние (примесь отдельных кристаллов не создает вместе с каплями «настоящего» смешанного в фазовом состоянии облака). Вместе с тем даже и небольшая примесь кристаллов повышает вероятность выпадения осадков из *As*, поскольку смещает капельно-жидкое облако в сторону свойств облака смешанного, для которого как раз характерно выпадение осадков.

В [21] отмечается, что 88% облаков *As* являются капельными и смешанными, что хорошо согласуется с данными [36], но в [21] уточняется – такая повторяемость фазового состояния *As* относится к зимнему периоду, летом 80% *As* – облака капельно-жидкие. В годовом же выводе *As* более чем в два раза чаще бывают капельными, чем смешанными (примесь отдельных кристаллов).

Что касается кристаллического строения, то оно не характерно для *As* в любой период года и лишь зимой достигает 12% от общего числа случаев. Таким образом, *As* отличаются от *As* по микрофизическому строению,

поскольку в годовом выводе *As* чаще бывают кристаллическими (40% случаев), либо смешанными (36% случаев).

Если в *As* бывают кристаллы, то это – толстые пластинки, столбики или объединенные по несколько вместе столбики [4, 5]. Из-за особенностей своего микрофизического строения и мощности *As* не образуют значительных участков с полосами падения осадков (*As vir.*), как это бывает у *As*. Причины же различия этих облаков – в факторах их образования, что и определяет почти все параметры облаков: они лишь корректируются свойствами подстилающей поверхности, над которой образуются и перемещаются.

2.4. Пространственно-временная структура облаков среднего яруса

2.4.1. Повторяемость облаков среднего яруса

Повторяемость высоко-кучевых облаков (*As*) достаточно велика во все сезоны года. В [32] получены данные о соотношении повторяемости облаков *As* и *As* в различные сезоны года над территорией России и сопредельных государств (табл. 2).

Таблица 2

Повторяемость облаков, % [32]

Сезон	Форма облачности	
	<i>As</i>	<i>As</i>
Зима	23	31
Весна	21	44
Лето	11	68
Осень	16	44
Год	18	45

Как следует из данных табл. 2, летом *As* встречаются в два раза чаще, чем зимой. При более детальном подходе, согласно [21], *As* реже бывают с октября по март, т.е. в холодный период года, по сравнению с тёплым (с апреля по сентябрь) периодом. При этом в холодное время максимальные значения повторяемости *As* приходятся на дневные часы, а в тёплый период – на утренние; минимальные значения повторяемости *As* фиксируются в вечерние либо ночные часы.

Сказанное выше связано с определенной стратификацией атмосферы в течение суток в каждый из периодов года, поскольку облака *As* не

наблюдаются при большой неустойчивости атмосферы (в это время формируются облака вертикального развития), как и при устойчивой атмосфере. Вместе с тем некоторые разновидности *Ac*, например *Ac und.*, нередко встречаются при инверсии над облачным слоем, т.е. устойчивый слой располагается с определённой высоты.

Достаточно высокая повторяемость облаков *Ac* связана с тем, что эти облака составляют весьма большую и разнообразную по видам и разновидностям группу, обязанную своим существованием многообразным процессам облакообразования. На территории России и сопредельных государств [9, 21] летом *Ac* чаще бывают в предгорных южных районах – в Тбилиси и Алматы (51%), над Камчаткой (52–56%), над Дальним Востоком (36–41%), над другими предгорными и отчасти горными районами, например над южным берегом озера Иссык-Куль (43%). Зимой повторяемость *Ac* увеличивается от 13% в Восточной Сибири до 31% над Средней Азией и южными районами России. В целом, однако, летом *Ac* во всех районах появляются чаще, чем зимой, а с понижением температуры (во времени или пространстве) их повторяемость заметно снижается.

Повторяемость высоко-слоистых облаков (*As*) в целом в два с половиной раза меньше повторяемости *Ac*, хотя в течение года это соотношение не остается постоянным. Наибольшая разность в значениях повторяемости этих форм облачности прослеживается летом, когда в годовом ходе у *Ac* наблюдаются максимальные значения повторяемости, а у *As* – минимальные (см. табл. 2). В зимнее время различие между повторяемостями рассматриваемых форм облачности значительно меньше.

Итак, *As* в отличие от *Ac* чаще наблюдаются зимой, чем летом – различие в повторяемости достаточно велико. Согласно [21], в два-три раза *As* чаще появляются зимой по сравнению с летом. Это связано с природой облаков *As*. Данная форма облачности связана с зонами атмосферных фронтов. В зимнее время температурные контрасты увеличиваются, следовательно, фронтальные процессы усиливаются. В это время увеличиваются повторяемость, мощность, водность облаков *As*. Согласно [32], повторяемость *As* зимой почти повсеместно возрастает до 18–30%, причем в Салехарде и Енисейке она достигает даже 40%. Часто в холодный период *As* наблюдаются над Восточной Сибирью, но на Дальнем Востоке, в области зимнего муссона, *As* встречаются реже (13%). В летнее время над Россией и территорией сопредельных государств *As* встречаются нечасто, но над Камчаткой и Чукоткой повторяемость этой формы облачности выше относительно других районов.

2.4.2. Количество, высота расположения, мощность и устойчивость во времени облаков среднего яруса

Балл облаков среднего яруса высокий: *As* обычно занимает весь небесный свод, *Ac* чаще всего наблюдаются в количестве 7–8 баллов. В то же время *Ac trans.*, являясь медленно размывающейся во времени облачностью, с течением процесса снижает и свой балл. Иногда не столь высокое количество на небесном своде демонстрируют и орографические *Ac*.

В целом горизонтальная протяжённость *As* как облака фронтального на один-два порядка выше, чем облаков *Ac* [9].

Высота расположения и *As*, и *Ac* подвержена некоторым годовым колебаниям: летом они расположены выше, чем зимой. Более того, в тёплый период года выражены и суточные изменения высоты облаков (днём она больше); эти изменения практически не прослеживаются в зимнее время [34].

Основания *Ac* расположены в более широком диапазоне высот – от 2 до 6 км, тогда как *As* – от 3 до 6 км [12]. Впрочем, в [7] имеется указание на то, что и *As* могут располагаться от 2 км.

Высота основания облаков увеличивается от высоких широт к низким.

Являясь облаками фронтального типа, *As* в целом, безусловно, более мощные облака, чем *Ac*. Если же сравнивать мощность *As* с мощностью отдельных видов и разновидностей *Ac*, то окажется, что обычно *Ac* – и вовсе маломощные облака, лишь *Ac cast.* имеют большую мощность. У облаков *As* имеется тенденция к изменению мощности в течение года: зимой эти облака более мощные.

Различия между мощностью *As* и *Ac* прослеживаются всегда – и в географическом, и в сезонном плане. Это свидетельствует о том, что главным фактором формирования вертикальной протяжённости облака является генетический, т.е. происхождение облака, другие же факторы лишь усиливают или ослабляют действие основного. По этой причине фронтальные облака, связанные с крупномасштабным подъёмом воздуха во фронтальной зоне, по мощности превосходят облака других форм в одном и том же семействе.

Следует, однако, учитывать тот факт, что *Ac* могут одновременно прослеживаться на разных уровнях и представлять собой многослойную систему – на разных высотах, варьируя от 2 до 6 км, могут располагаться даже соседние части облачных полей. Сказанное затрудняет оценку мощности облака *Ac*.

В [32] рассмотрена устойчивость *As* во времени. Более устойчивыми являются *As op.* – типично фронтальные облака. *As trans.* менее устойчивы

во времени – их продолжительность в два раза меньше (*As op.* фиксируются 5–6 ч подряд при максимальном значении 60 ч). *As trans.* зимой сохраняются 2–4 ч, летом – 1–2 ч. Впрочем, зимой над Западной Сибирью эти облака могут сохраняться до 40 ч, что является максимальным значением.

2.4.3. Некоторые метеорологические величины и их профили, характерные для облаков среднего яруса

Наиболее существенным для физического состояния облаков является распределение температуры и влагосодержания.

Колебания значений температуры на нижней границе облаков среднего яруса значительны, поскольку эти облака расположены в широком диапазоне высот.

Так, температура на нижней границе *As* имеет годовую амплитуду примерно 40°C [12]: от 10 до –30°C. Наибольшая повторяемость температуры на нижней границе *As* приходится на температуры от –7 до +5°C, при этом несколько преобладают отрицательные температуры (около 55% от общего числа случаев).

Если же рассмотреть повторяемость отрицательных температур по сезонам, то окажется, что во все сезоны, кроме лета, отрицательные температуры встречаются чаще положительных на нижней границе *As* [12]: зимой 63%, весной 52%, летом 30%, осенью 51%.

Из приведённых данных следует, что в переходные сезоны положительные и отрицательные температуры на нижней границе *As* почти равновероятны, зимой преобладают отрицательные температуры, летом – положительные. Данные, приведённые в [12], достаточно хорошо согласуются с данными в [9], где указано, что диапазон наибольшей повторяемости температур на нижней границе *As* составляет от –5 до +5°C при преобладании отрицательных температур.

Что касается температур на нижней границе *Ac*, то их диапазон не меньше, чем у *As*, поскольку высотный диапазон шире. В то же время положительные температуры в *Ac*, в том числе на нижней границе облака, – явление редкое [24].

В целом для облаков среднего яруса средние многолетние значения температуры на нижней границе для территории России и сопредельных государств изменяются [32] и находятся в следующих пределах в центральные месяцы разных сезонов: от –14°C (Баку, Ашгабад) до –31°C (Иркутск) в январе, от –6°C (Баку) до –19°C (в Иркутск) в апреле, от 1°C (Тбилиси) до

–6°C (Алматы, Санкт-Петербург, Архангельск) в июле, от –4°C (Баку, Ашгабад) до –20°C (Ереван) в октябре. По данным Москвы, Риги, Санкт-Петербурга, Омска, Екатеринбурга, Новосибирска для центральных месяцев сезонов средние многолетние температуры на нижней границе облаков среднего яруса составляют: от –18 до –21°C в январе; от –11 до –17°C в апреле; от –3 до –6°C в июле; от –10 до –17°C – в октябре, причём, как правило, наиболее низкие значения наблюдаются над Новосибирском.

На верхней границе облаков среднего яруса, по данным над территорией Украины [41], где было проведено 300–400 измерений в *Ac* и 300–600 – в *As*, получены следующие средние значения: при *Ac* температуры составили –18°C зимой, –12°C весной, –6°C летом, –11°C осенью; при *As* температуры на верхней границе ниже, чем при *Ac*, и составляют –20°C зимой, –18°C весной, –10°C летом, –15°C осенью. Безусловно, различия в значениях температур на верхней границе *Ac* и *As* связаны с происхождением этих облаков, ибо *As* как облака фронтального типа имеют большую мощность, чем *Ac*.

Приведённые данные для территории Украины [41] интересно сопоставить с данными [32], полученными над Москвой. Так, на верхней границе *As* над Москвой отмечались температуры –28,3°C зимой, –26,1°C весной, –10,6°C летом, –20,6°C осенью. Лучше всего согласуются данные для лета, поскольку, как известно, летом температурные контрасты между широтами сильно уменьшаются по сравнению с другими сезонами. Зимой, весной и осенью температуры на верхней границе *As* над Москвой заметно ниже, чем над Украиной.

Исключительный интерес представляют профили температуры в облаках. Диапазон значений вертикального градиента температуры (γ) в *As* достаточно широк. В среднем внутри *As* γ несколько меньше влажно-адиабатического: 0,47°C/100 м – у нижней границы, 0,49°C/100 м – в середине облака, 0,55°C/100 м – вблизи верхней границы.

В *Ac* γ в среднем составляют 0,6–0,7°C/100 м, причем максимальные значения наблюдаются в верхней части облака. Если облачный слой *Ac* разрушается, то ослабевает и инверсия над *Ac*. Наибольшие положительные значения γ фиксируются при *Ac cast.*, который наблюдается нечасто (в этом случае всегда отмечается активная конвекция), в других же случаях γ невелик и составляет в целом 0,57–0,69°C/100 м [33].

В [21] среди большого разнообразия распределения температуры с высотой выделены четыре типа:

1) под облачным слоем и до некоторой высоты над облаком температура непрерывно понижается;

2) над облаком расположен инверсионный слой, куда иногда облако частично проникает;

3) слой инверсии температуры охватывает весь облачный слой или его существенную часть;

4) один слой инверсии находится над облаком, другой – внутри облака.

Повторяемость этих типов стратификации атмосферы неодинакова для облаков As и Ac. Так, у Ac повторяемость первого и второго типа в сумме составляет 89% общего числа случаев, причем повторяемость второго типа несколько выше. У As наибольшая повторяемость – 64% – первого типа, т.е. в более половины случаев зондирования атмосферы температура в As непрерывно понижается с высотой, включая подоблачный слой. Повторяемость второго типа стратификации при As наблюдается в два раза реже, чем при Ac. Что касается третьего и четвертого типа стратификации, то они в сумме при обеих формах облаков среднего яруса составляют 11–12%, следовательно, повторяемость их невелика. Сказанное хорошо согласуется с выводами, сделанными в [42]: как правило, As располагаются в слое падения температуры с высотой, инверсии же в As отмечаются сравнительно редко.

В [21] для трёх первых выделенных типов стратификации приведены средние значения γ : $0,65^{\circ}\text{C}/100$ м для As и $0,68^{\circ}\text{C}/100$ м для Ac при первом типе, $0,70^{\circ}\text{C}/100$ м для As и $0,78^{\circ}\text{C}/100$ м для Ac при втором типе, $0,33^{\circ}\text{C}/100$ м для As и $0,26^{\circ}\text{C}/100$ м для Ac при третьем типе.

Данные анализа типов стратификации атмосферы при облаках среднего яруса, приведённые в [21], достаточно хорошо согласуются с выводами для As в [42], где рассматривается повторяемость следующих типов стратификации атмосферы при As: подынверсионный, безынверсионный, надынверсионный, инверсионный, частично инверсионный и межынверсионный. Такое подробное деление по типам стратификации не привело к изменению основного вывода, сделанного в [21]: чаще всего (в 67% от 2 035 случаев) As располагаются в слое падения температуры с высотой; инверсионный слой над облаком, согласно [42], отмечается при As ещё реже, чем по данным [21], и составляет 18% случаев.

Верхняя граница безынверсионных облаков Ac в 68% случаев имеет развитый «рельеф» [24] в виде валов или куполов, причём чем выше положительное значение γ , тем ярче этот «рельеф» выражен. Если же над Ac имеют место инверсии температуры, то γ в инверсионном слое, согласно [24], имеет значения от $-0,05$ до $-0,82^{\circ}\text{C}/100$ м. Если же не выделять отдельные виды и разновидности Ac, то при этих облаках в среднем

стратификация атмосферы влажностоустойчивая, а вертикальные скорости невелики [9].

В [12] приводятся данные о распределении удельной влажности в облаках: в *As* она изменяется от 1 г/кг до 9 г/кг при среднем значении 5 г/кг и наибольшей повторяемости значений 3 г/кг. Область максимальных значений удельной влажности отмечается у основания облака, а с высотой ее значения убывают.

Положение области наибольших значений удельной влажности совпадает с положением области наибольших значений водности: если *As* – облако достаточно мощное, то наибольшая водность фиксируется в нижней части, а если *As* – не слишком мощное облако, то наибольшая водность фиксируется в средней его части, но с развитием облака перемещается в нижнюю часть [43]. Согласно [43], средняя водность в *As* составляет 0,17 г/м³, максимальная водность в *As* оценивается величиной 0,2 г/м³ в [9], однако в [5] значения водности расширены в сторону более высоких значений – от 0,2 до 0,5 г/м³.

При более точной оценке значения водности целесообразно было бы приводить отдельно для капельной и кристаллической частей *As*. По оценке, приводимой в [9], в капельной части *As* водность колеблется от 0,002 г/м³ до 0,55 г/м³.

Вертикальный градиент удельной влажности (γ_s) имеет значения до 1 г/кг на 1 км, а в среднем – 0,5 г/кг на 1 км.

Водность в *As* в целом ниже, чем водность фронтальных облаков *As*. Что же касается значений водности в *As*, они несколько различаются, по оценке различных исследователей. Так, в [7] приведена водность *As* в пределах от 0,16 до 0,24 г/м³, в [44] – от 0,2 до 0,3 г/м³. В [5] водность *As* оценивается значением от 0,1 до 0,2 г/м³. Интересно, что в [38, 45] абсолютная водность *As* и *As* оценена одинаковым значением 0,07 г/м³ в холодное полугодие; в тёплое полугодие значения этой величины различны для *As* и *As* и составляют 0,21 г/м³ и 0,13 г/м³ соответственно [38].

Подтверждением распределения температуры и влагосодержания в *As* и *As* являются осадки, которые формируются в этих облаках и выпадают из них. Как уже упоминалось выше, осадки в *As* формируются и выпадают всегда, но в тёплый период не достигают подстилающей поверхности. В *As*, если осадки и выпадают (*Ac virga*), то они видны лишь как полосы падения, а до подстилающей поверхности могут долетать только отдельные капли. Иначе говоря, атмосферные осадки при *As* не регистрируются.

Среди других особенностей, связанных с распределением температуры и влагосодержания в облаках среднего яруса, следует отметить обледенение самолётов. При облаках *As* в 70% всех случаев [39] это явление приходится на интервал температур от 0 до 3°C, а при температуре ниже –5...–6°C обледенения, за редким исключением, не бывает. В то же время, обледенение самолётов в облаках возможно вплоть до значений –10°C (кристаллический налёт незначительной толщины). В *Ac* обледенение самолётов наблюдаться может, но в *As* это явление более интенсивно и, следовательно, опасно [25].

3. ОБЛАКА НИЖНЕГО ЯРУСА

3.1. Внешний вид и диагностические признаки

Облака нижнего яруса полностью закрывают небесный свод покровом, через который не просвечивают Луна и Солнце (могут иногда лишь слабо просвечивать через тонкие края этих облаков). Определить положение Солнца при этих облаках не представляется возможным в силу достаточно большой поглощательной способности всех облаков нижнего яруса. Тени от предметов на земле при облаках данного семейства не наблюдаются. Нижняя граница этих облаков может располагаться очень низко – всего несколько сотен или даже десятков метров от подстилающей поверхности (в отдельных случаях – и несколько метров). Облака нижнего яруса часто ухудшают видимость, затрудняя работу транспорта, особенно авиации, поскольку в любом случае нижняя граница этих облаков находится на высоте до двух километров.

Семейство облаков нижнего яруса включает в себя три формы облаков (см. табл. 1) – слоисто-дождевые, слоистые и слоисто-кучевые.

3.1.1. Слоисто-дождевые облака (*Nimbostratus*, *Ns*)

Внешний вид облаков – низкий бесформенный слой. При выпадении осадков слой облаков представляется однородным, однако в перерывах между осадками прослеживается неоднородность этого слоя – он как бы просвечивает местами. Основной тон облачного слоя – темно-серый, в отдельных случаях появляется синеватый или желтоватый оттенок. Обычно под слоем *Ns* располагаются другие облака нижнего яруса – слоистые разорванные (*Stratus fractus*, *St fr.*), в частности их разновидность – разорванно-дождевые (*Fractonimbus*, *Frnb.*) – мрачные тёмные низкие обрывки облаков (клочковатый вид). В любом случае представляется затруднительным установить высоту расположения слоисто-дождевых облаков из-за выпадающих осадков, полосы которых размывают основание *Ns*. В массе *Ns* иногда возникают отдельные кучево-дождевые облака [12].

Внутри, согласно [12], слоисто-дождевые облака весьма неоднородны и включают довольно большие светлые пространства и даже безоблачные слои, что подтверждают наблюдения в горах.

Данные облака, как правило, закрывают собой всё небо без просветов. Высота основания не превосходит 1 км, причём ниже всего *Ns* расположены вблизи линии фронта. Мощность облаков колеблется в значительных пределах от 1 до 5 км и даже более [5, 9, 24]. Иногда такая большая мощность служила поводом для неверного определения *Ns* как облаков вертикального развития, чему способствовал и тот факт, что внутри массы *Ns* иногда возникают отдельные облака вертикального развития – кучево-дождевые (*Cumulonimbus*, *Cb*). Такие явления встречаются при прохождении холодного фронта [5]. В зоне же тёплого фронта отдельные сильно развитые по вертикали участки слоисто-дождевых облаков постепенно трансформируются в *Cb*, что более характерно для теплого периода. Подтверждением этого процесса являются выпадающие атмосферные осадки ливневого характера на фоне обложных осадков, тогда как для *Ns* характерны только обложные осадки. Характер осадков является надёжным диагностическим признаком *Ns*, если наблюдатель не видел предшествующего состояния неба. Виды и разновидности *Ns* не выделяются, поскольку внешние различия между такими плотными, водными, дающими устойчивые обложные осадки облаками не прослеживаются. От *As* облака *Ns* отличаются размытым основанием, непрозрачностью, более тёмным цветом, а летом – и выпадением осадков.

3.1.2. Слоистые (*Stratus*, *St*) и слоисто-кучевые (*Stratocumulus*, *Sc*) облака

Учитывая невысокую повторяемость слоистых облаков, а также тот факт, что при самолётном зондировании наблюдатель не всегда чётко разделяет облака *St* и *Sc* (некоторые параметры получены исследователями совместно для обеих форм), их, как правило, при рассмотрении не разделяют, указывая, когда имеющаяся информация позволяет, на различия каждой из форм.

По внешнему виду слоистые облака очень похожи на туман – весьма однородный слой серого цвета, иногда с оттенком жёлтого. Часто *St* определяют как низкую серую пелену, чаще однородную, иногда сильно изорванную в нижней части настолько, что от нижней части свисают неправильные клочья [28]. Как правило, слоистые облака закрывают всё небо, но могут наблюдаться и в виде разорванных облачных масс (*Stratus fractus*). Слоистые облака обычно не просвечивают, хотя, согласно [12], могут наблюдаться все стадии *St* – от разбросанных по небу обрывков до плотного слоя.

Слоистые облака настолько низкие, что могут сливаться с наземным туманом [4]. Нередко эти облака закрывают верхние части строений – вышки, высотные дома. Вместе с тем, как указывается в [3, 4, 9, 32], слоистые облака чаще имеют нижнюю границу на высоте 100–700 м.

В случае разорванных или тонких облаков, когда в течение небольшого времени через края *St* просвечивают Солнце или Луна, образуются яркие венцы. Впрочем, венцы – нечастое оптическое явление при слоистых облаках.

Осадки, как правило, не выпадают. В отдельных случаях – при плотных и низких облаках – может выпадать морось, реже – мелкий снег или мелкие снежные зёрна, что заметно ухудшает видимость.

Слоистые облака (*Stratus*, *St*) имеют три вида:

1. *Stratus nebulosus* (*St neb.*) – туманообразные.
2. *Stratus undulatus* (*St und.*) – волнистые.
3. *Stratus fractus* (*St fr.*) – разорванные.

Последний вид имеет одну, но очень интересную разновидность – *Fractonimbus* (*Frnb.*) – разорванно-дождевые. Эти облака образуют клочковатый покров (или отдельные обрывки) под облаками, дающими сильные или длительные осадки (кучево-дождевыми, слоисто-дождевыми и даже высоко-слоистыми и слоисто-кучевыми плотными, если последние две формы дают осадки). Несмотря на название, *Frnb.* не дают осадков, а лишь пронизываются ими из вышерасположенных облаков. Видимо, название облака получили ошибочно. Как уже указывалось в п. 3.1.1, *Frnb.* – низкие мрачные изорванные облака, которые по праву считаются облаками плохой погоды. Дело в том, что эти облака формируются в зонах осадков, где относительная влажность высока, поэтому и говорят, что разорвано-дождевые облака «сопровождают» облака, дающие осадки.

Слоисто-кучевые облака (*Stratocumulus*, *Sc*) во многом сходны с высококучевыми облаками, но расположены гораздо ниже и состоят из более крупных облачных элементов. В промежутках между ними облачный покров утончается иногда настолько, что может просвечивать Солнце или Луна, но голубое небо, в отличие от *Ac*, видно редко. Чаше все-таки наблюдаются непросвечивающие облака [12].

Что касается высоты нижней границы *Sc*, то она оценивается в пределах 0,5–1,5 км в [3], 0,6–1,5 км в [4, 5] и 0,4–2,0 км в [9, 24]. Таким образом, *Sc* расположены выше облаков *St*. Мощность же облаков *Sc*, по данным [4, 5], составляет 0,2–0,8 км, но в [9, 24] она оценивается в пределах

0,1–1,0 км. Таким образом, слоисто-кучевые облака несколько более мощные по сравнению с облаками высоко-кучевыми, но, по данным [9, 24], не отличаются существенно по мощности от слоистых облаков.

Сравнительно редко при Sc наблюдаются венцы – при просветах в облаках или при наличии тонких частей у краёв облака, когда непродолжительное время просвечивает Солнце или Луна.

Осадки из Sc чаще всего не выпадают. Зимой может выпадать редкий непродолжительный снег, причём не только из плотных, но и из просвечивающих слоисто-кучевых облаков. В тёплое время года слабый непродолжительный дождь из мелких капель (нечто похожее на морось) может выпасть из плотных слоисто-кучевых облаков.

Слоисто-кучевые облака (*Stratocumulus*, Sc) имеют два вида:

1. *Stratocumulus undulatus* (Sc und.) – волнистые; состоят из крупных гряд (валов), пластин (плит) или иных крупных элементов. Указанные элементы чаще сливаются в сплошной волнистый покров серого цвета, реже облачные элементы разделены более тонким облачным слоем (голубое небо, как уже указывалось выше, видно редко, но через утончённый облачный слой между облачными элементами иногда просвечивают Солнце и Луна).

Разновидности:

а) *Stratocumulus translucidus* (Sc trans.) – просвечивающие; облачные элементы не сливаются друг с другом либо имеются промежутки между соседними грядами. В любом случае в промежутках может быть виден верхний слой облаков, более тонких и освещённых, реже – голубое небо.

б) *Stratocumulus opacus* (Sc op.) – плотные (непросвечивающие); облачные элементы сливаются, но на нижней поверхности облака отчётливо различаются валы, гряды, отдельные пластины или другие элементы; сама нижняя поверхность облака также достаточно отчётлива;

в) *Stratocumulus lenticularis* (Sc lent.) – чечевицеобразные; изолированные облачные массы вытянутой горизонтальной формы с утолщением в середине; облака характерны для полярных областей и горных стран (у крутых подветренных склонов гор).

2. *Stratocumulus cumuliformis* (Sc cuf.) – кучевообразные; и внешний вид, и динамика этих облаков демонстрируют их связь с кучевыми облаками.

Разновидности:

а) *Stratocumulus castellanus* (Sc cast.) – башенковидные; из облачного слоя, расположенного в нижнем ярусе, в отдельных местах поднимаются вверх то башенки и купола, то пузыри, образующие как бы пузырьчатую

пену в верхней части облака. Характерным для этой облачности является общее основание всех башенок, пузырей, куполов, которые не являются изолированными облачными массами в отличие от кучевых облаков;

б) *Stratocumulus diurnalis* (*Sc diur.*) – растекающиеся дневные; разновидность появляется после растекания кучевых облаков; поскольку растекание происходит в дневные часы, образование этой разновидности свидетельствует об увеличении устойчивости в атмосфере днём, что случается нечасто, в частности о наличии низко расположенной инверсии, под слоем которой и происходит растекание;

в) *Stratocumulus vespertalis* (*Sc vesp.*) – растекающиеся вечерние; вечером, при ослаблении конвекции, происходит растекание оснований кучевых облаков; имеют внешний вид гряд облаков, плоских и удлиненных;

г) *Stratocumulus mammatus* (*Sc mam.*) – вымеобразные; выпуклые части на основании облака обращены вниз; на фоне других облаков имеют вид шарообразных облачных масс.

Если встает вопрос о различии облаков нижнего яруса между собой, то следует помнить следующие основные диагностические признаки этих облаков:

1. У *St* нижняя поверхность чаще разорванная, у *Sc* – чётко очерченная, а у *Ns* – чётко не различима из-за полос выпадения осадков.

2. *Ns* не имеют волнистой структуры, в то время как она характерна для *Sc op.*; у *St* же, являющихся еще более однородными облаками, чем *Ns*, даже у вида *St und.*, волнистое строение выражено настолько слабо, что различается с трудом (из-за большой длины волны при низком расположении облаков).

3. Облака *St* и *Sc* никогда не дают обложных осадков, что является ярким признаком *Ns*.

4. Всё-таки главный признак определённой формы облаков – это характер атмосферного процесса, ибо *Ns* – обычно облака фронтального типа, а *Sc* и *St* образуются преимущественно внутри однородных воздушных масс, за исключением разновидности слоистых облаков *Frnb.*, которые сопровождают облака фронтального типа, дающие осадки, а также подфронтальных облаков. Последние могут сформироваться в нижнем слое холодного воздуха, ограниченные сверху инверсией, создаваемой тёплым воздухом фронтального происхождения.

Отличие облаков нижнего яруса от облаков среднего яруса указано выше.

3.2. Условия образования

Все облака являются носителями процесса, а слоисто-дождевые (*Ns*) – фронтального процесса.

Основная причина образования облаков *Ns* – крупномасштабное восходящее движение воздуха вдоль наклонной фронтальной поверхности вблизи линии фронта и связанное с этим движением охлаждение воздуха [31]. Подъём воздуха является медленным, но длительным – в течение нескольких часов при скорости несколько сантиметров в секунду [8, 24].

Являясь фронтальными облаками, *Ns* чаще всего являются частью облачной системы *Ns–As* (иногда *Ns–As–Cs*) или даже *Ns–Cb* (кучево-дождевые облака). В любом случае облачная система имеет достаточно большую горизонтальную протяжённость. *Ns* входят в облачную систему как тёплого, так и холодного фронта (медленно смещающегося фронта).

В случае тёплого фронта облачная система, включающая в себя *Ns*, наиболее обширна. Наибольшая мощность системы *Ns–As* наблюдается около приземной части атмосферного фронта.

Над холодными, медленно смещающимися фронтами также может образоваться система облаков *Ns–As*, но она имеет меньшую протяжённость по сравнению с аналогичной облачной системой тёплого фронта. Указанная особенность нередко наблюдалась автором при работе с оперативной спутниковой информацией и хорошо согласуется с данными [21], где указывается, что над линией холодного фронта *Ns* часто перерождаются в *Cb*. В этом случае в тылу *Cb* нисходящий поток (компенсирующее движение относительно потока восходящего) разрушает *Ns* – возможно даже прояснение.

В случае тёплого фронта слой *As* постепенно уплотняется и снижается до перехода в *Ns*. Переход от *As op.* к *Ns* постепенный, поэтому резкой границы между ними нет. Важно, следовательно, иметь надёжный признак перехода *As* в *Ns*. В летнее время диагностический признак – выпадение обложных осадков; в зимнее время обложные осадки становятся более устойчивыми и интенсивными при появлении *Ns*.

Ns могут образовываться и из *Sc op.* В последнем случае элементы *Sc* (отдельные хлопья, пластины, волны и т.д.) постепенно сливаются между собой и одновременно снижаются. Переход считается завершённым, когда полностью исчезает волнистая структура, характерная для *Sc*, а нижняя граница облаков перестает быть чётко различимой из-за появления полос выпадения обложных осадков [21, 32].

Поля слоистых (*St*) и слоисто-кучевых (*Sc*) облаков формируются в обширных антициклонах, они характерны, например, для длительно существующих зимних антициклонов, в частности облака *Sc* часто связаны с промежуточными антициклонами, возникающими при волновой деятельности на атмосферных фронтах [21].

Долгое время слоистые и слоисто-кучевые облака не привлекали к себе внимания исследователей, поскольку эти формы облачности не имеют большой протяжённости и значительной вертикальной мощности; не исследовался и механизм формирования этих облаков. Ещё в конце XIX в. считалось, например, что слоистые облака – это всегда приподнятый слой тумана [12].

Первые же сведения относительно облаков *St* и *Sc* указывают на наличие инверсии над облачным слоем, позднее была высказана мысль об адвекции тёплого воздуха как фактора образования слоистых облаков [12, 24, 46].

В настоящее время известно, что низкая облачность, какой являются *St* и *Sc*, может образоваться и при адвекции тепла, и при адвекции холода [47–49].

Рассмотрим механизм образования низких облаков в каждом из этих случаев.

В холодное время года над сильно выхоленной сушей низкая облачность может образоваться за счёт адвекции тепла в нижнем слое и последующего охлаждения воздуха от подстилающей поверхности. Холодная половина года благоприятствует установлению устойчивой стратификации над материком, чаще всего инверсионной. С другой стороны, в движущемся воздухе формируются сдвиги ветра, которые создают динамическую турбулентность. В нижней части турбулизированного слоя инверсия разрушается, а в верхней – лишь ослабляется из-за уменьшения сдвигов ветра и, следовательно, уменьшения интенсивности турбулентного обмена с высотой [8, 47].

Наличие инверсии или изотермии препятствует переносу влаги в более высокие слои, поэтому скопление влаги под приподнятой инверсией или изотермией приводит к достижению состояния насыщения и появлению низкой облачности [12, 21]. Образованию *St* и *Sc* в большой мере благоприятствуют ядра конденсации, которых вполне достаточно в слоях образования этих облаков.

В настоящее время считается, что усиление динамической турбулентности в слое 0–300 м является необходимым условием формирования

низкой облачности [46, 47]. Такая турбулентность в зоне инверсий приводит к перераспределению тепла и влаги: температура воздуха выше уровня примерно 300 м понижается, а ниже – на ту же величину повышается. Облачность образуется в слое понижения температуры, захватывая частично или полностью слой инверсии. Перенос влаги осуществляется из слоя с более низкими температурами в слой с более высокими температурами, т.е. сверху вниз, что приводит к последующей эволюции низких облаков – опусканию их нижней границы [8, 47].

Образование *St* и *Sc* в холодный период чаще всего бывает именно при адвекции тепла (85% от общего числа случаев) [47].

Формирование облачности *St* и *Sc* возможно и при адвекции холода [47]. При этом процессе устанавливается стратификация, близкая к влажноустойчивой, а турбулентным фактором становится термический, определяемый вертикальным градиентом температуры. Понятно, что такие условия образованию инверсии не способствуют. При этих условиях роль задерживающего слоя играет обычно изотермия или слой со слабым падением температуры с высотой.

Для образования облачности необходимо, чтобы весь слой вплоть до задерживающего слоя был достаточно увлажнённым. При стратификации, близкой к влажнонеустойчивой, чаще образуются отдельные облачные массы – *Sc*, при малых изменениях температуры во всем слое – сплошная облачность *St*.

Чаще всего процесс образования низкой облачности при адвекции холода имеет место в тёплое время года.

Если распределение температуры в пограничном слое атмосферы близко к влажноадиабатическому, а затем имеет место процесс конденсации, то вся охваченная этим процессом часть становится неустойчивой. Неустойчивость слоя увеличивается из-за излучения тепла верхней границей образовавшихся облаков. Это излучение способствует и уменьшению устойчивости непосредственно в верхней части облаков, что приводит к образованию в ней конвективных ячеек с восходящим движением в центре каждой из них [32]. Если в такой ситуации имеются сдвиги ветра, то ячейки вытягиваются параллельно ветру, образуя *St und.* и *Sc und.*, а при более сильной конвекции – даже *Sc cuf.*, в частности *Sc cast.* *Sc cumuliformis* связаны с конвективными процессами. Из них *Sc cast.* особенно близки по условиям образования к облакам вертикального развития. *Sc diurnalis* и *Sc vespertalis* являются результатом растекания по горизонтالي кучевых облаков.

Облака *Sc*, чаще *Sc und.*, в частности *Sc lent.*, могут образоваться и при орографических возмущениях (разд. 5).

Наконец, *St* могут явиться следствием радиационного излучения подстилающей поверхности и охлаждения от неё прилегающего слоя воздуха, который отдаёт тепло этой поверхности и приближается к состоянию насыщения. Кроме того, при подъёме тумана (разрушении тумана в его нижней части) образуется облачность приподнятого тумана, которая классифицируется как *St neb.*

Следует отметить, что в любом случае формирование плотного слоя *St* и *Sc* может занимать значительное время – до 10 ч и более. Понятно, что такие облака характерны для стабилизировавшихся процессов, например для зимних, длительно сохраняющихся антициклонов или над большими областями постоянных морских течений. Этот вывод подтверждается и тем, что ночные слоистые облака в летнее время над побережьями успевают сформироваться лишь в виде тонких и не очень устойчивых слоев *St neb.* [21].

Определённый период времени не было единого мнения по поводу причин образования несколько необычных облаков – *Sc mam.* В 1909 г. А. Вегенер [50] высказал предположение, что облака *mammatus* являются «обращённой формой» обычных волнистых облаков, когда поверхность раздела располагается ниже облаков. Позднее к этому взгляду примкнули Г. Берг и целый ряд советских исследователей [12]. Они считали необходимым наличие устойчивого слоя ниже облаков, который ограничивает конвекцию снизу.

В ячейках *mammatus* нисходящее движение имеет место в середине ячеек, а восходящее – на периферии. Нисходящее движение в центральной части ячеек приводит к выносу частиц осадков или облачных частиц из породившего их облака. Однако указанный процесс не приводит к формированию открытых ячеек с отсутствием облачности в центральной части. Следовательно, для образования *Sc mam.* необходима большая водность или значительная концентрация частиц в облаке. Такие условия наблюдаются сравнительно редко, поэтому редки и вымеобразные облака. Характерно, что они наблюдаются в нижнем ярусе, т.е. в нижней тропосфере – наиболее водном атмосферном слое. Только в этом случае нисходящие движения не только не приводят к прояснению, но и опускают нижнюю часть облака, формируя типичный вид этой разновидности слоисто-кучевых облаков.

Заметим, что в среднем ярусе облаков – в средней тропосфере, имеющей более низкую водность, отсутствие облачности в открытых ячейках

As und. как раз связано с нисходящими движениями в центральных частях ячеек.

В целом благоприятными условиями возникновения облаков *St* и *Sc*, согласно [12, 47], являются:

1) наличие тонкого приземного слоя атмосферы (мощностью не более 1-1,5 км), ограниченного сверху инверсией или изотермией, в котором формируются облака; если инверсия фронтальная, то под ней образуются подфронтальные *St fr.*, в частности, *Frnb.*; чаще всего все-таки инверсия является инверсией оседания;

2) значение относительной влажности у подстилающей поверхности 80% и более;

3) вертикальный градиент температуры под инверсией более 0,3°C на 100 м высоты (чаще чем в половине случаев рассматриваемой облачности градиент оказался больше 0,6°C на 100 м);

4) высота инверсии больше высоты уровня конденсации (в 85% случаев при облачности инверсии расположены выше уровня конденсации);

5) адвекция тепла в холодное время года и адвекция холода в тёплое время года;

6) умеренное турбулентное перемешивание в слое формирования облачности.

3.3. Микроструктура облаков нижнего яруса

3.3.1. Микроструктура слоисто-дождевых облаков (*Nimbostratus*, *Ns*)

Слоисто-дождевые облака (*Ns*) – это облака смешанного строения. Их нижняя часть состоит из капель, поскольку она находится близко к подстилающей поверхности, т.е. в поле достаточно высоких температур; в верхней части *Ns* располагаются кристаллы, основная форма которых – ледяные столбики, в небольшом количестве имеются пластинки [32]. Относительно формы кристаллов научных расхождений нет. Известно, что существует два основных типа облачных кристаллов [12, 15]:

1. Столбики или шестигранные призмы длиной до 0,1–0,3 мм, иногда с пустотами с одного или с обоих концов либо с одним заострённым концом. Такие кристаллы образуются при низких температурах (от –15°C и ниже) и из быстро замерзающих кристаллов воды (конденсационные следы за самолетом). В более тёплых облаках, какими являются *Ns*, столбики могут вырастать в иглы длиной 2–3 мм.

2. Мелкие тонкие или более толстые (до 100 мкм) шестиугольные пластинки размером до 0,4 мм, в которых часто видна внутренняя структура в виде лучей. Тонкие пластинки появляются от -4 до -18°C , толстые – при более низких температурах.

Кроме того, в отдельную группу выделены объёмные (неправильные) формы – пирамиды и бесформенные кристаллы. Согласно [15], в нижней части *Ns* в смеси с каплями могут быть тонкие пластинки и иглы, в средней части *Ns* – толстые пластинки, столбики, пирамиды и бесформенные кристаллы, в верхней части – столбики, пучки столбиков.

Уточнения по форме кристаллов даны А.М. Боровиковым. Схема распределения форм кристаллов в *Ns* такова. В нижней тропосфере (температуры воздуха от 0 до -15°C), в нижней части системы *Ns–As*, имеются тонкие пластинки и дендритные формы. В средней тропосфере (температуры воздуха от -15 до -30°C) верхняя часть системы *Ns–As* состоит из толстых пластинок, столбиков, пулек.

Слоисто-дождевые облака (*Ns*) – это очень водная облачность. Наибольшие значения влажности наблюдаются при положительных температурах. Что касается значений влажности и ледности в *Ns*, они несколько различаются по данным литературных источников. Так, согласно [45], влажность в холодное полугодие составляет $0,19 \text{ г/м}^3$, в тёплое – $0,28 \text{ г/м}^3$; ледность в *Ns* чаще всего не превосходит $0,05 \text{ г/м}^3$ и крайне редко превышает $0,2 \text{ г/м}^3$. В *Ns* ледность растёт сверху вниз – от $0,02 \text{ г/м}^3$ при температурах -25°C до $0,2 \text{ г/м}^3$ при $0 \dots -5^{\circ}\text{C}$, т.е., согласно [24], достаточно чётко зависит от температуры; влажность тоже зависит от температуры: убывает от $0,33 \text{ г/м}^3$ при 5°C до $0,15 \text{ г/м}^3$ при -15°C . Средняя влажность капельной фракции в *Ns* вначале вырастает с высотой, а затем (с высоты 200–300 м) остаётся почти без изменений [24]. В умеренных широтах влажность *Ns* составляет $0,35 \text{ г/м}^3$, а в арктических – $0,2 \text{ г/м}^3$.

По данным [5], влажность *Ns* составляет $0,1\text{--}0,5 \text{ г/м}^3$, а ледность крайне редко превышает $0,2 \text{ г/м}^3$. По-видимому, средним значением влажности в *Ns* следует считать, согласно [24], $0,15\text{--}0,35 \text{ г/м}^3$, ледности – $0,02\text{--}0,2 \text{ г/м}^3$.

В жидко-капельной части *Ns* средняя влажность слабо меняется с высотой при температурах от -20 до -10°C у нижней границы, но имеет выраженный уровень максимальной влажности ближе к нижней границе при температурах на ней от -5 до -10°C .

Интересно отметить, что представления о микрофизическом строении облаков несколько изменялись со времени издания «Атласа облаков» в 1957 г. до 1978 г., когда был издан второй «Атлас облаков». Так, в [4]

указывается, что в верхней части *Ns* кристаллы преимущественно имеют форму столбиков, а в нижней – пластинок. В нижней части преобладают капли воды с примесью снежинок и крупных капель дождя, что зависит от температуры воздуха. В [4] также отмечается, что большинство капель в *Ns* имеют радиусы 7–8 мкм с колебаниями от 2 до 72 мкм. Почти через 20 лет в [5] сделаны заметные уточнения по микрофизическому строению *Ns*. Так, указывается, что в верхней части облаков имеются кристаллы в виде столбиков и комплексов столбиков, в средней – толстых пластинок, столбиков и бесформенных кристаллов, в нижней – тонких пластинок и игл. Капли радиусом 6–7 мкм расположены в средней и нижней частях облака, здесь же находятся капли дождя при положительных температурах, снежинки и хлопья – при отрицательных. В [24] средним значением радиуса капель в *Ns* также считается 6–7 мкм.

Число капель с размером более 75 мкм в *Ns*, дающих осадки, составляет до $3\,000\text{ м}^{-3}$ [9].

3.3.2. Микроструктура слоистых (*St*) и слоисто-кучевых (*Sc*) облаков

В большинстве случаев *St* и *Sc* – облака капельные, редко – смешанные и очень редко – кристаллические [5, 48–51]. Лишь в Арктике наблюдаются смешанные *St* и *Sc* в значительном числе случаев [30]. *St* и *Sc* – низкие облака, находящиеся в поле достаточно высоких температур. Тем не менее следует отметить, что в облаках *St*, в отличие от *Sc*, и при отрицательных температурах преобладает капельное строение, о чем свидетельствуют данные [51].

Средний размер капель у *St* составляет 10–12 мкм, а в *Sc* – 8–16 мкм. Средний радиус капель в *St* составляет 4,5 мкм, в *Sc* – 5,0 мкм [15]; диапазон изменения значений среднего радиуса в *St* – 2,8–7,6 мкм, а в *Sc* – 5,1–12,8 мкм [51]. Все имеющиеся данные свидетельствуют о том, что слоистые облака (*St*) являются наиболее мелкокапельными из всех существующих облаков. Внутри *St* из-за сравнительно высоких температур, связанных с очень низким расположением облаков, зарождается очень мало кристаллов. Если же они есть, то это – тонкие пластинки и иглы [15].

В [4] отмечается, что радиус мельчайших капель в *St* чаще всего составляет 2–5 мкм с колебаниями 1–29 мкм; в *Sc* преобладающий радиус мелких капель – 5–7 мкм при колебаниях 1–60 мкм. Таким образом, в первом «Атласе облаков» советского издания явно указывается на

некоторое различие микроструктуры *St* и *Sc*. Позднее учёные не раз приходили к выводу о том, что облака этих двух форм более схожи в микрофизическом строении, чем казалось ранее. Так, опубликованные в [5] размеры капель *St* и *Sc* не выглядят столь различными, как в [4]: преобладающий размер капель в *St* составляет 4–5 мкм, в *Sc* – 5 мкм, данные по водности тоже схожи: 0,1–0,5 г/м³ в *St* и 0,2–0,5 г/м³ в *Sc*.

Следует отметить, что значения водности увеличиваются с ростом температуры воздуха, поэтому как максимальные, так и средние значения водности в *St* и *Sc* зависят от широты места наблюдения, времени года и даже суток, высоты уровня в облаке, мощности облака, теплофизических свойств подстилающей поверхности, которая во многом определяет профиль температуры воздуха. Вообще водность низко расположенных к подстилающей поверхности облаков значительно сильнее зависит от свойств этой подстилающей поверхности, чем облаков среднего яруса. В результате приводимые в литературных источниках данные по водности облаков *St* и *Sc* кажутся мало согласующимися. В зависимости от времени, места и условий наблюдений значения водности *St* и *Sc* колеблются в достаточно широких пределах. Так, для *St* эти колебания составляют 0,1–0,67 г/м³, для *Sc* – 0,06–1,3 г/м³, средняя же водность облаков оценивается для *St* в 0,33 г/м³, для *Sc* – в 0,30 г/м³ [36, 48, 49].

Прослеживается линейная зависимость водности *St* и *Sc* от температуры воздуха, причём по данным [48, 49] водность облаков *St* оказалась даже немного (на 0,03 г/м³) выше, чем в *Sc*. При одной и той же температуре воздуха водность зависит от уровня её измерения по отношению к границам облаков. В *St* и *Sc* водность вблизи нижней границы обычно быстро растёт с высотой, затем рост её замедляется. В верхней части облака водность достигает максимальных значений вблизи верхней границы.

Положение уровня максимальной водности зависит от мощности облачного слоя – с увеличением мощности увеличивается расстояние уровня максимальной водности от верхней границы облака. Согласно [48, 49], для облаков мощностью 100–200 м уровень максимальной водности находится на расстоянии 25 м от верхней границы, а для облаков мощностью 500–600 м – на расстоянии 93 м. В среднем же уровень максимальной водности располагается на 70 м ниже верхней границы облака: максимальные значения водности в *St* и *Sc* фиксируются в среднем на уровне, равном 4/5 их мощности [40, 48, 49]. Достаточно хорошо приведённые данные согласуются с выводами в [15, 24]. В [15] отмечается, что в *St* и *Sc* толщиной до 700–800 м водность с высотой растёт почти до

самой верхней границы, затем резко убывает, однако при большей толщине облака водность обычно убывает с высоты 600–700 м. Интересно, что по данным [12] облака *St* оказываются менее водными, чем *Sc*, а по данным [36], которые согласуются с [48, 49], более водными являются *St*. Так, согласно [12], водность в капельных *Sc* составляет в среднем $0,19 \text{ г/м}^3$, в *St* – $0,18 \text{ г/м}^3$, а в редко встречающихся смешанных облаках водность заметно ниже, причём она особенно мала в *St* – $0,08 \text{ г/м}^3$ ($0,14 \text{ г/м}^3$ в *Sc*); максимальные значения водности выше в облаках *Sc* – $0,63 \text{ г/м}^3$, а в *St* – лишь $0,35 \text{ г/м}^3$. По мнению авторов [12], *St* – менее водные по сравнению со *Sc*, возможно, из-за более частого выпадения осадков.

В [9, 45] данные по водности приведены отдельно для тёплого и холодного полугодий. Так, в *Sc* водность составляет $0,16 \text{ г/м}^3$ в холодное полугодие и $0,25 \text{ г/м}^3$ – в тёплое; в *St* эти значения – $0,23$ и $0,27 \text{ г/м}^3$ соответственно.

Обобщая все имеющиеся данные по водности *St* и *Sc*, следует отметить, что средняя водность в *St* чаще всего составляет $0,2\text{--}0,3 \text{ г/м}^3$ при колебаниях $0,1\text{--}0,7 \text{ г/м}^3$, средняя же водность в *Sc* находится в пределах $0,2\text{--}0,6 \text{ г/м}^3$ при колебаниях $0,1\text{--}1,3 \text{ г/м}^3$. При этом нередко значения водности в *Sc* и *St* различаются весьма мало.

3.4. Пространственно-временная структура облаков нижнего яруса

3.4.1. Повторяемость облаков нижнего яруса

В глобальном масштабе [32] облака *Sc* встречаются чаще, чем *Ns*. При этом облака *Ns* имеют повторяемость в 2,5–3 раза ниже. Особенно мала она над океаном в широтном поясе 30° ю.ш. – 30° с.ш., где составляет 4–5%, а в более высоких широтах увеличивается почти до 20%. В общих чертах вышеуказанные особенности сохраняются и в распределении повторяемости *Ns* над континентами. Таким образом, и над океанами, и над континентами слоисто-дождевые облака заметно чаще наблюдаются в высоких широтах по сравнению с тропическими.

Повторяемость облаков *St* и *Sc* над континентом примерно на 20–30% ниже, чем над океаном, причём в высоких широтах повторяемость этих облаков выше, чем в низких [32]. В целом облака *St* встречаются реже, чем *Ns* и особенно *Sc*, поскольку последние образуются в самых разных ситуациях, например при растекании кучевых облаков на разных уров-

нях, под слоями инверсий, при размывании атмосферных фронтов, могут быть связаны с вторжениями холодного воздуха.

Что же касается распределения облаков нижнего яруса по сезонам года, то наибольшую повторяемость облака *Ns*, *St* и *Sc* имеют зимой, наименьшую – летом [30], что связано с летним уменьшением контрастов температур по горизонтали и ослаблением циклонической деятельности, которая, в свою очередь, связана с фронтальными системами облаков (куда входит *Ns*), и менее благоприятными условиями для образования *St* и *Sc*, чем зимой. Летом *Ns* и особенно *St* наблюдаются редко. В целом *Sc* наблюдаются летом чаще, чем *St* и *Ns*, но и в другие сезоны года *Sc* наблюдаются чаще иных форм облачности нижнего яруса. В среднем годовом выводе повторяемость облаков *Sc*, *St* и *Ns* над территорией России и сопредельных государств составляет 42, 10 и 16% соответственно [30].

Итак, среди других форм облачности нижнего яруса особенно мала повторяемость *St*. По данным некоторых исследователей среднее её значение над территорией России и сопредельных государств – около 6% [32].

Зимой повторяемость *St* несколько выше, чем летом, за исключением Дальнего Востока. Возможно, повторяемость облаков *St* невелика потому, что в нижних облачных слоях довольно редко отсутствует волновое движение, которое не характерно для *St*. Зимой, в холодной и менее подвижной атмосфере, повторяемость *St* возрастает над европейской территорией России и сопредельных государств до 19%, а в Средней Азии – до 11%, зато она очень мала в Сибири и на Дальнем Востоке (около 1%), но над Камчаткой, в условиях высокой влажности и частой смены погодных условий, составляет 9% [32].

Летом с усилением конвективных или волновых движений в атмосфере образуются не *St*, а *Sc*. В это время повсюду над территорией России и сопредельных государств повторяемость *St* равна 2,8%, а над Средней Азией – 0,1%, но на Дальнем Востоке, в условиях муссонного климата, облака *St* наблюдаются часто – в 21% случаев [32].

В некоторых районах *St* зимой наблюдаются очень часто, являясь, по мнению многих учёных, весьма распространённой формой облаков.

Sc связаны с большей неустойчивостью атмосферы, чем *St*, поэтому повторяемость облаков *Sc*, в отличие от *St*, достаточно велика и летом. Уменьшение повторяемости *St* в летнее время связано с усилением конвекции, турбулентных движений или волновых процессов в атмосфере, что приводит к образованию *Sc* или даже к преобразованию *Sc* из *St*, ибо во многом *St* и *Sc* похожи.

В [32] отмечается, что в сухих районах Азии летом редко образуются и *St*, и *Sc*.

Зимой повторяемость *Sc* достаточно велика над Кавказом (32% случаев) и даже над Средней Азией составляет 17% случаев. В Сибири и над Дальним Востоком в условиях влияния Азиатского антициклона и сухого зимнего муссона повторяемость *Sc* невелика [32].

3.4.2. Количество облаков нижнего яруса и их горизонтальная протяжённость

Количество облаков – это степень покрытия облачностью небесного свода в поле зрения наблюдателя. На станциях гидрометеорологической сети оценка количества облаков производится по десятибалльной системе, т.е. 10% небесного свода, покрытого облачностью, соответствует 1 баллу. Поскольку наблюдатель в любом случае обозревает лишь ограниченную часть небесного свода, которая ко всему ещё и зависит от степени закрытости горизонта, для объективной характеристики той или иной формы облаков необходимо указать их среднюю горизонтальную протяжённость, а также возможные колебания этой величины.

Горизонтальная протяжённость и, следовательно, балл облачности зависят от формы облаков, последняя же есть проявление определенного атмосферного процесса; горизонтальная протяжённость облаков характеризует масштабность атмосферного процесса, в определённой мере её отражает и балл облачности.

В связи с вышесказанным ясно, что облака *Ns*, являющиеся фронтальными, а также облака *St* и в большой мере *Sc* чаще покрывают весь видимый небесный свод или большую его часть (горизонтальная же протяжённость фронтальных *Ns* и облаков *St* и *Sc*, конечно, имеет различные значения) [24]. Указанные формы облаков чаще наблюдаются в холодное полугодие, поэтому зимой и осенью повторяемость градаций 10 баллов и 7–9 баллов значительно выше, чем весной и особенно летом. Как отмечено в [9], осенью и зимой в умеренных и полярных широтах (редко в тропиках) часто наблюдаются обширные, протяжённостью в тысячи километров, поля плотных и низких *St* и *Sc*. Что касается *Ns*, то в холодное полугодие, в условиях наибольших контрастов температур, фронтальная зона облачности имеет наибольшую протяжённость. В [21, 32] приводятся данные, позволяющие уверенно заключить, что в широтном поясе 50–60° с.ш. над океанами и несколько севернее над материками отмечается

максимум балла облачности, связанного с отчётливым влиянием циклонических зон в холодное полугодие. Это сказывается, в частности, в увеличении повторяемости Ns и, следовательно, балла облачности. В это же время в области влияния Азиатского (сибирского) зимнего антициклона в холодное время года отмечается небольшой балл облачности. Западно-Сибирский отрог (гребень) этого сезонного образования изменяет свою ориентацию, поэтому уменьшает облачность то в Новосибирске и Томске, то в Омске или Екатеринбурге, то даже в Москве, то настолько ослабляется, что в значительной мере сокращает зону своего влияния. В результате, как отмечается в ряде исследований, например в [32], облачность в среднем не характеризует эволюцию этого антициклона, поскольку в зимнее время не очень заметно сказывается на ходе средних значений балла облачности, различаясь в зависимости от района наблюдения. В целом же в умеренной зоне северного полушария балл облачности в большой мере определяется именно довольно высокой повторяемостью облаков нижнего яруса.

Что касается оценки горизонтальной протяжённости этих облаков, на сегодняшний день мы имеем лишь общее представление об этой важной метеорологической величине. Так, в [9, 24] приведены порядки этой величины. В [12] указывается, что St и Sc образуют обширные поля протяжённостью в сотни километров. Согласно [9, 24], горизонтальная протяжённость Ns составляет 10^2 – 10^3 км, а St и Sc – 10 – 10^3 км.

3.4.3. Границы и мощность облаков нижнего яруса

Высота расположения нижней границы облаков имеет большое практическое значение. Так, высоты менее 600 м, волнистая и изорванная граница затрудняют взлёт и особенно посадку самолётов и вертолётов. С низкой облачностью связано ухудшение видимости. В силу исключительной важности высоты нижней границы облаков нижнего яруса эта метеорологическая величина всегда привлекала к себе внимание исследователей и практиков.

В настоящее время имеется целый ряд данных о нижней границе облаков нижнего яруса, причём в довольно большом диапазоне значений. Дело в том, что высота расположения низких облаков достаточно сильно зависит от притока тепла к подстилающей поверхности, поэтому эта величина проявляет отчётливую широтную, годовую и даже суточную изменчивость. Кроме того, прослеживается зависимость и от характера

подстилающей поверхности. Сказанное в большей мере относится к облакам *St* и *Sc*, чем к фронтальным облакам *Ns*.

Согласно [21], высота облаков *St* и *Sc* заметно увеличивается летом и уменьшается зимой (лишь в Приморском районе в условиях муссонного климата эти изменения имеют обратный знак); в облаках *Ns* сезонный ход высоты нижней границы не столь отчётлив. Нижняя граница у *St* и *Sc* изменяется от 0,45 км в Красноярске зимой до 2 км во Львове летом. Интересно, что в [41] сделана попытка разделить *St* и *Sc* по высоте нижней границы в разные сезоны года над Украиной, что не привело к заметным результатам.

По данным И.П. Мазина и С.М. Шметера [24], приводимым затем в различных трудах, например в [9], облака *Ns* могут иметь такую же низкую нижнюю границу, как и *St* – 0,1–1,0 и 0,1–0,7 км соответственно. Тем не менее, по мнению авторов многочисленных публикаций, а также практиков, более низкой значительно чаще является слоистая облачность. Действительно, нередко *St* начинается почти у самой подстилающей поверхности – облачность приподнятого тумана, например, закрывая верхнюю часть наземных сооружений.

Согласно [9, 24], облака *Sc* имеют нижнюю границу в пределах высот 0,4–2,0 км.

По значительному числу наблюдений в Украине Т.Н. Заболоцкая [41] показала, что над Украиной высота нижней границы *Ns* (в среднем 1,0–1,3 км) примерно равна высоте нижней границы *Sc* (в среднем 1,0–1,2 км), стандартные отклонения от средних месячных значений составляют 0,5–0,6 км для *Sc* и 0,4–0,5 км для *Ns*. Что же касается облаков *St*, то среднемесячные значения высоты нижней границы этих облаков почти не изменяются – примерно 0,4 км при стандартных отклонениях 0,1–0,2 км.

Таким образом, и в Украине *St* являются самыми низкими облаками, однако значение нижней границы облаков нижнего яруса в этом регионе с достаточно большим притоком радиации, конечно, выше, чем в Москве, Екатеринбурге, Красноярске и других городах средних широт, данные по облачности над которыми приводятся в [21]. В [12] также показана зависимость высоты нижней границы облаков от места расположения точки наблюдения: в Москве у облаков *St* нижняя граница небольшая и составляет 0,47 км, наибольшее значение этой величины зафиксировано в Индии – 1,4 км; у облаков *Sc* нижняя граница изменяется от 0,98 км в Гамбурге до 2,8 км в Мадрасе [12]. По данным [48, 49] средняя высота нижней границы у облаков *St* составляет до 200 м, а у *Sc* – 400–600 м.

В преобладающем большинстве случаев облака *St* и *Sc* однослойные, но могут состоять из нескольких слоёв, что очень редко бывает у *St* и несколько чаще у *Sc*. Достаточно редко облака *Sc* наблюдаются над *St* или *St* и *Sc* располагаются под облаками других форм [48, 49]. Замечено [21], что в случае однослойной облачности нижняя ее граница отмечается несколько выше, чем в случае многослойной.

Данных о верхней границе облаков значительно меньше, чем о нижней. В первых «Атласах облаков» помещались даже снимки верхней облачной поверхности. Впоследствии эти снимки не включались в «Атлас облаков» и практически не упоминались в литературных источниках. Тем не менее известно, что верхняя поверхность облаков *St* обычно плотная и слегка волнистая в отличие от нижней, которая как уже упоминалось, «изорвана» на клочья, из-за которых высота нижней границы *St* может за считанные минуты меняться метров на 30–50; летом верхняя граница облаков *St* и *Sc* расположена выше, чем зимой, в среднем на 1 км по данным над Москвой и Санкт-Петербургом [40]. Высота верхней границы *Ns* колеблется в зависимости от того, образуют ли эти облака единый слой с облаками *As* или даже с *As* и *Cs*.

В [41] по данным, полученным в Украине, сделана попытка получить колебания верхней границы облаков в течение года. Эти колебания не превысили 0,1–0,3 км, однако в [52] сделан вывод о том, что в *St* максимальные высоты верхней границы отмечают зимой, минимальные – летом. В *Sc* максимальные высоты верхней границы отмечаются летом, минимальные – зимой. Эти выводы сделаны по большому числу наблюдений в различных физико-географических районах.

Таким образом, данные [40, 41, 52] хорошо согласуются относительно облаков *Sc* – более высокая верхняя граница наблюдается летом относительно зимы. Что касается *St*, то кажущиеся разногласия связаны с тем, что высота верхней границы этих облаков заметно не меняется в течение года, как, впрочем, и у *Ns*.

В [12] приведены средние значения температуры на нижней и верхней границах для двух форм облачности – *St* и *Sc*: на нижней границе температуры в среднем составляют зимой $-9,0^{\circ}\text{C}$, весной $-5,0^{\circ}\text{C}$, летом $+1,2^{\circ}\text{C}$, осенью $-0,8^{\circ}\text{C}$; на верхней границе – зимой -10°C , весной $-0,1^{\circ}\text{C}$, летом $+1,2^{\circ}\text{C}$, осенью $+0,04^{\circ}\text{C}$. В среднем же за год температуры на нижней и верхней границах имеют значения $-2,8$ и $-4,7^{\circ}\text{C}$ соответственно.

Что касается мощности облаков, то она во многом зависит от происхождения облака, следовательно, от процесса в котором оно зарождается

и развивается, и, кроме того, от притока радиации, т.е. от широты места, года, сезона и суток. По данным, приведённым в [12], мощность St и Sc составляет несколько сотен метров. Таким образом, облака St и Sc являются маломощными: толщина облаков Sc не превосходит 0,6 км, St – 1 км, хотя в некоторых случаях Sc и St достигают значения толщины более 1,5–1,6 км. Обычно толщина Sc колеблется в пределах 0,1–0,6 км, а у St – 0,2–1,0 км. Иначе говоря, облака обеих форм характеризуются малой мощностью. Замечено, что более холодные облака менее мощные [21, 48].

Фронтальные облака Ns отличаются большой или по крайней мере значительной мощностью. Визуально, однако, в сплошной серой и желтовато-серой пелене, местами как будто просвечивающей, не всегда возможно оценить мощность Ns . В среднем за год толщина Ns ($As-Ns$) составляет, согласно [21], 1,7 км, при размывании тёплых фронтов толщина Ns уменьшается летом до 1,5 км. Указанное уменьшение толщины Ns ($As-Ns$) летом происходит главным образом в результате ослабления циклонической деятельности, поскольку контрасты температур зимой значительно больше, чем летом. Наибольшая толщина у облаков Ns ($As-Ns$) отмечается весной, когда она составляет примерно 2 км [21]. Это связано, с одной стороны, с еще достаточными контрастами температур во фронтальных зонах, а с другой – с уже начавшимся влиянием усиленной конвекции. Вместе с тем над северо-западными районами нашей страны, где циклоническая деятельность проявляет себя в течение всего года, средняя толщина Ns ($As-Ns$) составляет 1,8–2,3 км; наибольшие значения Ns ($As-Ns$) достигаются в холодный период – 2,8 км.

В [9] приводятся данные о том, что облака Ns могут достигать мощности 5 и даже 10 км. Однако на краю циклонов распадающиеся Ns имеют малую мощность (1–2 км) и не дают осадков [12]. Вообще следует отметить, что данные о мощности Ns имеют достаточно широкий диапазон значений. В [9] возможные значения мощности Ns оцениваются в диапазоне 1–10 км, в [53] – от 0,8–1,0 до 3 км. Кроме того, в статистике облаков встречаются данные самолётных зондирований, когда к Ns отнесены облака мощностью менее 0,5 км. По мнению авторов [53], эти облака – расслоившиеся Ns , а данные по их толщине относятся к отдельным прослойкам расслоившихся Ns , а не ко всему слою облаков. Упоминание о том, что уменьшение толщины Ns ($As-Ns$) может быть следствием расслоённости фронтальных облаков, находят подтверждение во многих исследованиях.

По-видимому, средней толщиной Ns следует считать значения 1,5–3,5 км, максимальной – более 5 км. Малую мощность – 1–2 км – облака имеют

на краю распадающихся циклонов [12], а при упоминании о мощности менее 1 км речь идет об отдельных прослойках расслоившихся *Ns*.

3.4.4. Некоторые метеорологические величины и их профили, характерные для облаков нижнего яруса

В случае облаков *St* и *Sc* устанавливается вполне характерный профиль температуры воздуха.

Так, в подоблачном слое при *St* и при *Sc* преобладают вертикальные градиенты температуры в диапазоне от $0,61^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$ до $1^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$, при этом средний градиент под облаками *St* составляет, согласно [48, 49], $0,71^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$, а под *Sc* – $0,64^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$.

Совсем иная картина наблюдается внутри облаков *St* и *Sc*: в большинстве случаев (примерно 65% от общего числа случаев) при переходе в облачный слой вертикальный градиент температуры γ уменьшается, примерно в 30% увеличивается, и лишь в 3–6% случаев не изменяется. В *St* увеличивается повторяемость инверсионных градиентов. Средние же градиенты внутри *St* составляют $0,37^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$, а внутри *Sc* – $0,53^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$ [48, 49]. Степень устойчивости в *St* и *Sc* различается. Так, согласно [21], в *St* в среднем стратификация близка к безразличной или слабо устойчивой (разность вертикального градиента температуры и влажноадиабатического градиента изменяется от нулевых значений до $0,1^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$), менее устойчивая стратификация появляется в случаях более высоких температур воздуха, при которых, впрочем, облака *St* наблюдаются редко. В облаках же *Sc* в среднем наблюдается близкая к влажнеустойчивой или влажнеустойчивая стратификация, и только при сравнительно низких температурах (ниже -10°C) стратификация становится влажнустойчивой. Таким образом, в облаках *Sc* стратификация реже бывает влажнустойчивой, чем в облаках *St*. Этот вывод подтверждают и данные [47]: при стратификации, близкой к влажнеустойчивой, чаще наблюдаются отдельные облачные массы (в этом случае образуются *Sc*), при малых же изменениях температуры во всем слое бывает сплошная облачность *St*.

В [12] показано, что распределение температур в *St* и *Sc* может быть двух видов:

- 1) вертикальный градиент температуры γ близок к влажноадиабатическому и мало изменяется с высотой; зимой и весной γ имеет более низкие значения, летом и осенью – более высокие;

2) в верхней части облачного слоя имеется тонкий слой инверсии – облако как бы вклинивается в расположенную над ним основную инверсию; мощность слоя инверсии в облаке очень мала и составляет в среднем 0,13 км зимой и 0,15 км летом, однако отрицательный вертикальный градиент температуры больше зимой.

Интересно, что результаты [12] совпадают с результатами [54]. В любом случае со временем стратификация температуры в облаке и над ним меняется: верхняя часть облака, где даже летом создается отрицательный радиационный баланс, охлаждается, благодаря чему облако растет. Поскольку этот процесс ярче выражен зимой, то и второй вид температурной стратификации чаще встречается зимой.

Облака *St* и *Sc* представляют собой подынверсионные либо расположенные в верхней части пограничного слоя облака, причем *Sc* в целом расположены в более высокой части пограничного слоя. Среди различных типов стратификации атмосферы при облаках *St* и *Sc* явно преобладающим является подынверсионный – инверсии над этими облаками являются наиболее характерной их особенностью. *St* и *Sc* часто называют подынверсионными облаками. Инверсии над облаками *St* и *Sc*, согласно [48, 49], более 70% случаев, при этом над облаками *St* средние значения вертикального градиента составляют $-1,65^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$, но и над *Sc* эти же значения лишь несколько ниже и составляют $-1,51^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$. В [9] средние значения вертикального градиента температуры γ приведены совместно для *St* и *Sc*: в подоблачном слое γ составляет $0,62\text{--}0,70^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$ в зависимости от места наблюдения, в облачном слое эти же значения увеличиваются до $0,71\text{--}0,80^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$, а над облаками γ принимает отрицательные значения, которые составляют от $-0,67$ до $-2,08^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$ [9]. Детально распределение температуры с высотой под облаком, в облаке и над облаком рассмотрено в [42], где выделено 20 типов профилей температуры. Показано, что над территорией Украины надоблачные инверсии встречаются примерно в 70% случаев при *St* и более чем в 60% случаев при *Sc* [42].

Мощные фронтальные облака *Ns* практически целиком располагаются в слое с падением температуры с высотой [24]. По данным анализа результатов около 10 тысяч самолётных зондирований облачных слоев над Украиной [21], непрерывное падение температуры с высотой встречается примерно в половине всех случаев (40–60%). Лишь в самых мощных *Ns* наблюдаются более сложные типы вертикального распределения температуры. Над *Ns* инверсии встречаются редко, однако почти всегда там

расположен достаточно устойчивый слой. По этой причине над *Ns* резко ослабляется турбулентный обмен, что приводит к стабилизации высоты и формы верхней границы облака.

Температуры на нижней границе облаков нижнего яруса тесно связаны с температурой у подстилающей поверхности и имеют чётко выраженный годовой ход. В целом разность температур на нижней и верхней границах облаков почти полностью определяется толщиной облака, поскольку в среднем вертикальный градиент температуры в облаках колеблется в сравнительно небольших пределах. Так, для *St* и *Sc* разность температур на нижней и верхней границах составляет примерно 1–4°C, а для облаков *Ns* эта разность в среднем оценивается величиной 5–10°C [21]. Замечено также [24], что внутри облаков нижнего яруса летом температура обычно выше, а зимой – ниже 0°C.

Рассмотрим распределение влажности с высотой при облаках нижнего яруса. В подоблачном слое облаков *St* и *Sc* чаще всего удельная влажность несколько убывает с высотой [12]. Согласно [55], при адвекции холода удельная влажность с высотой убывает (в 87% от общего числа случаев), а при адвекции тепла и в случаях без какой-либо адвекции чаще всего удельная влажность с высотой растёт.

В облаках *St* и *Sc* при любой адвекции в 80% от общего числа случаев удельная влажность с высотой убывает; рост удельной влажности с высотой может наблюдаться лишь при температурных инверсиях в облаке, причем случаи заметного возрастания удельной влажности с высотой редки. Наибольшее убывание удельной влажности с высотой отмечалось при адвекции холода, а при адвекции тепла изменение удельной влажности с высотой почти не прослеживается [12, 55].

В облаках *Ns* область максимальных значений удельной влажности, как правило, находится на высоте 1–2 км внутри облака, а с высотой удельная влажность убывает [12, 55].

Из облаков *Ns*, *St* и *Sc* выпадают атмосферные осадки. Из облаков *Ns* выпадают только обложные осадки (снег, дождь или мокрый снег), отличающиеся средней, медленно меняющейся со временем интенсивностью и значительной продолжительностью. Обложные осадки всегда свидетельствуют о прохождении атмосферных фронтов и, следовательно, о смене воздушных масс в системе циклонических образований. В зимнее время обложные осадки выпадают только из *Ns*. Их интенсивность составляет 0,016–0,025 мм/мин, лишь иногда достигая 0,04–0,05 мм/мин (интенсивность морозящих осадков, например, на порядок

ниже) [21, 56]. Осадки из облаков *Ns* выпадают, как правило, на большой площади.

Если из облаков *Ns* длительные осадки выпадают в течение всего года, то из *St* и *Sc* осадки выпадают не всегда. Нередко осадки выпадают в виде мороси или снежных зёрен (*St*), слабых осадков, похожих на морось или слабый снег (*Sc*). Исследования [48, 49] показали, что слабый снег и снежные зёрна образуются чаще всего при мощности облаков от 200 до 400 м, а морось – при мощности 400–800 м. Морось практически отсутствует, если мощность облаков меньше 400 м [48, 49].

Образование и выпадение осадков из облаков *St* и *Sc* определяется двумя факторами – мощностью облака и температурой на верхней границе. Так, в интервале температур от -5 до -14°C с повышением температуры вероятность образования осадков сохраняется лишь при одновременном увеличении мощности облаков. Количество осадков из облаков *St* и *Sc* составляет небольшую величину [48, 49, 51] – 0,05–0,2 мм; продолжительность выпадения осадков не превышает 5 ч.

Осадки из облаков, находящихся выше 450 м, обычно не достигают подстилающей поверхности. Дождь и снег формируются в облаках мощностью не менее 1 000 м [12], поэтому в *St* и часто в *Sc* образуются только совсем мелкие осадки.

С облаками *Ns*, *St* и *Sc* связано обледенение самолётов [9].

4. ОБЛАКА ВЕРТИКАЛЬНОГО РАЗВИТИЯ

4.1. Внешний вид и диагностические признаки

В семейство облаков вертикального развития входят различные кучевые облака – от небольших и невысоких облаков хорошей погоды до крупных башен кучевых мощных облаков, а также громады кучево-дождевых облаков, иногда сходящихся настолько, что наблюдателю открывается единое поле нижнего слоя облаков, а неопытному наблюдателю трудно даже отличить их от слоисто-дождевых облаков.

Все облака вертикального развития – это отдельные облачные массы, развивающиеся по вертикали и имеющие сложное электрическое строение [57]. В целом ряде случаев они и внешне имеют вид отдельных облаков. Однако и тогда, когда эти облака образуют единый облачный покров, следует помнить, что он крайне неоднороден, ибо состоит из отдельных облачных масс, каждая из которых, в свою очередь, неоднородна.

Облака вертикального развития имеют две основные формы: кучевые (*Cumulus*) и кучево-дождевые (*Cumulonimbus*). Латинское слово «*Cumulus*» означает «холм» или «куча». Таким образом, название облака характеризует его внешний вид и процессы образования.

4.1.1. Кучевые облака (*Cumulus*, *Cu*)

Облака зарождаются в виде небольших облачных масс неправильной формы. Впоследствии эти массы укрупняются, уплотняются и начинают расти вверх. С развитием по вертикали у кучевых облаков, которые становятся всё более неоднородными, даже визуально появляются куполообразные или кучевообразные клубящиеся вершины. Основания облаков по сравнению с ослепительными белыми вершинами часто имеют относительно тёмный цвет – сероватый или даже синеватый. Всё облако имеет вид объёмной облачной массы, но основание у этих плотных облаков плоское, почти горизонтальное. Иногда кучевое облако и в целом является плоским, а не объёмным. Такие облака выделены в отдельную разновидность.

Обычно кучевые облака имеют резкие очертания, лишь при сильном порывистом ветре их края могут быть разорванными [4, 5, 8]. Иногда наблюдаются небольшие клочья кучевых облаков *Cumulus fractus* (кучевые разо-

рванные). Эти облака, согласно [24], не являются устойчивой разновидностью, а представляют собой или зарождающиеся *Cu*, или разрушающиеся.

Что касается расположения кучевых облаков и их количества, то встречаются разнообразные варианты, зависящие от физического состояния атмосферы, характера подстилающей поверхности, притока солнечной радиации, степени увлажнения воздуха. Отдельные кучевые облака обычно располагаются по небу беспорядочно, хотя иногда образуют гряды или цепочки. В этом случае основания отдельных облаков находятся на одном уровне [4, 5]. Вместе с тем кучевые облака могут быть на небесном своде не только в виде отдельных редких облаков, но и в виде значительного облачного скопления, которое занимает почти весь небесный свод.

Высота основания кучевых облаков может колебаться в довольно широких пределах в зависимости от значений относительной влажности у подстилающей поверхности и притока тепла к ней. Чаще всего кучевые облака начинаются в нижнем ярусе, хотя высота нижней границы этих облаков может выходить за пределы нижней тропосферы. Высота же верхней границы кучевых облаков и, следовательно, их мощность изменяются от сотни метров до нескольких километров, отражая степень неустойчивости атмосферы.

Центральные части кучевых облаков закрывают Солнце полностью, а края могут просвечивать, при этом сравнительно редко образуются венцы. Осадки из кучевых облаков в умеренных и высоких широтах не выпадают (лишь в тропиках из кучевых могут выпасть слабые ливневые дожди). Вместе с тем даже в умеренных широтах из кучевых облаков иногда могут выпасть отдельные капли дождя или очень кратковременный и редкий дождь. Такие облака нередко рассеиваются еще до момента достижения каплями подстилающей поверхности. Момент же, когда капля доходит до земли, оказывается «дождем с ясного неба» [4, 5].

Кучевые облака по структурно-морфологическим признакам подразделяются в порядке увеличения их вертикальной протяженности (мощности) на три вида:

1. *Cumulus humilis* (*Cu hum.*) – кучевые плоские.
2. *Cumulus mediocris* (*Cu med.*) – кучевые средние.
3. *Cumulus congestus* (*Cu cong.*) – кучевые мощные.

Плоские кучевые облака (*Cu hum.*) слабо развиты по вертикали, причем их вертикальная протяженность меньше горизонтальной. Эти облака считаются «облаками хорошей погоды», поскольку часто наблюдаются в антициклонических условиях, когда рост кучевых облаков ограничен сверху

устойчивым слоем – изотермией или даже инверсией. Вершины облаков *Cu hum.* плоские, с небольшой выпуклостью в центре. Эти облака обычно наблюдаются в тёплое полугодие, в хорошую установившуюся погоду. Как правило, над сушей они возникают утром, около 10 ч, в околополуденные часы достигают наибольшего развития (по [8], к 15–16 ч), иногда переходят в *Cb*, а к вечеру растекаются, нередко переходя в слоисто-кучевые вечерние растекающиеся облака (*Sc vesp.*). Исключительно редко *Cu hum.* встречаются зимой и не демонстрируют суточного хода в своем развитии.

Cu hum. имеют разновидность *Cumulus fractus* (*Cu fr.*) – кучевые разорванные. Как уже упоминалось, эти облака не являются устойчивой разновидностью кучевых облаков, они – единственные среди облаков вертикального развития – либо не имеют плоского основания, либо оно выражено нечётко. Характерная особенность *Cu fr.* – разорванный, клочковатый вид и быстро меняющиеся очертания. В отличие от других облаков *Cu hum.* облака *Cu fr.* могут наблюдаться и при плохой погоде. Тогда *Cu fr.* не имеют связи с *Cu hum.* (в иных случаях *Cu fr.* обнаруживают связь с *Cu hum.*, представляя собой зарождающиеся или недоразвитые *Cu hum.* либо продукты разрушения кучевых облаков различных видов, в частности *Cu hum.*), зато нередко прослеживаются вместе с облаками *St fr.* (*Frnb.*) или *Sc*.

У кучевых средних облаков (*Cu med.*) вертикальные размеры примерно равны горизонтальной протяжённости или даже несколько больше ее. Верхняя кромка этих облаков состоит из двух-трех полусферических «шапок». Вершины *Cu med.* клубятся больше, чем у *Cu hum.* Нередко *Cu med.* являются переходной формой от кучевых плоских к кучевым мощным облакам. В [5] высказана рекомендация: когда *Cu hum.*, начиная расти в высоту, утрачивают приплюснутый вид, но не достигают еще значительного развития, их следует отмечать как *Cu med.*

Мощные кучевые облака (*Cu cong.*) сильно развиты по вертикали. Их вертикальная протяженность в 1,5–2 раза превышает размер основания (их «диаметр»). По оценкам отдельных наблюдателей, это превышение может быть и значительно больше. Вершины *Cu cong.* состоят из нескольких куполов. Согласно [58, 59], ширина куполов колеблется от сотен метров до 1,5–2 км, а ширина мелких выступов («протуберанцы») на верхней кромке облака редко превышает 200–300 м.

В то время как вершины облаков *Cu cong.* ослепительно белые и сильно клубятся, их основания затемнены. При особенно сильном развитии *Cu cong.* объединяются в большие группы, образуя сложные нагромождения разной мощности, которые чаще всего преобразуются в кучево-

дождевые облака. *Cu cong.* имеет разновидность *Cumulus congestus pileus* (*Cu cong. pil.*) – мощные кучевые облака с «шапочкой» (с «вуалью»).

Эта «шапочка» в виде обрывка пелены или вуали располагается горизонтально или несколько приподнята к вершине облака. «Шапочка», или «вуаль», появляется, когда вершины *Cu cong.* при росте вверх достигают уровня кристаллизации.

Подъём воздуха и, следовательно, образование облаков прекращаются с высоты расположения слоя инверсии или изотермии (или даже замедленного падения температуры с высотой). Если инверсия находится на высоте 2,5 км, то облака слабо развиты по вертикали. Нередко под слоем инверсии облака *Cu* растекаются, образуя почти сплошной слой *Sc* [8].

Иногда на небесном своде могут наблюдаться все виды кучевых облаков одновременно. Такая картина свидетельствует об отсутствии в тропосфере задерживающих слоёв. Итак, развиваясь, кучевые облака могут превратиться в кучево-дождевые, а могут наблюдаться одновременно с последними. Легко определить кучевые облака при боковом расположении от наблюдателя, когда он полностью видит облако. Затруднение с определением кучевого облака появляется тогда, когда наблюдается только нижняя поверхность с некоторыми неровностями и иногда – с рваными краями.

Чтобы не спутать облака *Cu* со слоисто-кучевыми, необходимо помнить о том, что кучевые облака не образуют непрерывного слоя (в отличие от слоисто-кучевых), поэтому следует в промежутках между облаками постараться рассмотреть резко очерченные края, поднимающиеся вверх. Кучевые и кучево-дождевые облака различаются прежде всего по выпадению ливневых осадков из последних. Кроме того, у кучево-дождевых облаков верхняя часть имеет волокнистое строение, поскольку она кристаллическая, а основание – более тёмный тон, чем у кучевых. Вместе с тем наблюдения с борта самолёта показали, что явные признаки перистого строения всегда связаны лишь с одним видом кучево-дождевых облаков и одной разновидностью этого вида – кучево-дождевыми с наковальной [60]. Эволюционируют кучевые облака чаще либо в *Cb*, либо в *As*, что связано с направлением развития процесса.

4.1.2. Кучево-дождевые облака (*Cumulonimbus*, *Cb*)

Облака очень сильно развиты по вертикали – имеют вид горообразных облачных масс с вершинами обычно волокнистого строения. Это

связано с тем, что у кучево-дождевых облаков основание расположено в нижнем километровом слое, а вершина – в верхней тропосфере, где скорости ветра имеют высокие значения и, следовательно, вытягивают облачные частицы в виде кристаллов по направлению ветра (подобно перистым облакам). Кучево-дождевое облако – это облако контрастов в поле яркости: облака белые, основания тёмные, иногда синеватые, а отдельные участки – свинцовые. Впрочем, различные оттенки серого можно проследить и на отдельных участках боковых граней облака.

В тёплое время года облака *Cb* очень мощные, в холодное – более плоские. Иногда они наблюдаются в виде отдельных облаков, но могут представлять собой и облачное скопление, и даже облачный вал (при прохождении быстро смещающегося холодного фронта).

Солнце и Луна сквозь облака *Cb* никогда не просвечивают. Осадки имеют ливневый характер – ливневый дождь, ливневый снег, ливневый мокрый снег, крупа и даже град. С кучево-дождевыми облаками связаны грозовые процессы. При ливневом дожде часто наблюдается радуга. Таким образом, кучево-дождевые облака очень яркие в своих проявлениях.

Облака *Cb* имеют два вида:

1. *Cumulonimbus calvus* (*Cb calv.*) – «лысые».
2. *Cumulonimbus capillatus* (*Cb cap.*) – «волосатые».

«Лысыми» названы облака без перистовидной верхней части, которые похожи на округлые белоснежные купола лишь слегка волокнистого строения.

Cb calvus имеют разновидность *Cumulonimbus calvus arcus* (*Cb calv. arc.*) – «лысые с грозовым валом». Эта разновидность отмечается, когда в передней части надвигающегося облака прослеживается дугообразный облачный вал из облаков *Cu fr.* и *Frnb.*, прохождение которого сопровождается шквалом – внезапным резким усилением ветра.

«Волосатыми» названы облака за хорошо выраженное волокнистое перистовидное строение верхней части. В надвигающемся облаке перистовидные волокна похожи на «веер» или на «волосы», а при наблюдении сбоку часто имеют вид «наковальни». В этих случаях зарождающиеся перистовидные облака постепенно распространяются по горизонтали.

Cb capillatus имеют три разновидности:

а) *Cumulonimbus capillatus arcus* (*Cb cap. arc.*) – «волосатые с грозовым валом». Признаки у этой разновидности такие же, как у *Cb calv. arc.* Их различает лишь выраженное волокнистое строение вершины у *Cb cap. arc.*;

б) *Cumulonimbus incus* (*Cb inc.*) – с наковальной. Эта разновидность отмечается, когда верхняя перистовидная часть облака растекается над ним в стороны и приобретает форму гигантской наковальни;

в) *Cumulonimbus humilis* (*Cb hum.*) – плоские. Разновидность отмечается, если облака сравнительно мало развиты по вертикали, хотя имеют все характерные признаки кучево-дождевого облака (выпадение ливневых осадков, волокнистое строение верхней части или перистовидная форма вершины, тёмное основание облака). Облака характерны для холодного времени года.

Считается, что определение *Cb* трудности не представляет, однако неопытный наблюдатель может спутать их с кучевыми мощными или со слоисто-дождевыми. В любом случае полезно помнить о том, что *Cb* дают ливневые осадки (*Ns* – обложные, а *Cu cong.* осадков в умеренных и высоких широтах не дает). Вместе с тем следует учитывать, что *Cb* образуются не только в результате развития *Cu cong.* по вертикали, но иногда и в слое *Ns* (в случае холодных фронтов). Кроме того, летом нередко с ярусной слоистообразной облачностью в зоне тёплого фронта формируются и *Cb*. Тогда *Cb* замаскированы другими формами облачности, поэтому самолёт может попасть в опасную зону [61].

Если надфронтальный тёплый воздух влажнонеустойчив, то в облачную систему тёплого фронта конвективные облака вкрапливаются не только летом. Летом же конвекция может стать настолько мощной, что на тёплом фронте образуются грозовые *Cb*, которые поднимаются до тропопаузы или даже выше. Поэтому с тёплым фронтом могут быть связаны грозы [24]. Впрочем, грозы могут проявлять себя и при прохождении холодных фронтов в тёплый период.

По мнению многих исследователей, используемая классификация облаков является для кучево-дождевых облаков упрощённой. В [24] рассмотрена возможность создания классификации для *Cb* на основании данных о структуре радиоэха. В результате выделены одноячейковые, мультячейковые и суперячейковые *Cb*, причем за ячейку принят элемент облака, с которым связан локальный максимум радиоотражаемости. В ячейке объединены восходящие и нисходящие потоки, расположенные по соседству друг с другом и характерные для развитых по вертикали облаков – *Cu cong.* и особенно *Cb*. Каждая из ячеек на протяжении жизни облака проходит три стадии развития, поэтому соседние ячейки различаются по своему возрасту. Внешне одноячейковые, мультячейковые и суперячейковые облака различаются достаточно определённо. Мультячейковые

облака состоят из нескольких ячеек и отличаются многокупольными вершинами с неодинаковыми их высотами на разных сторонах облака. Последнее и свидетельствует о неодинаковом возрасте разных ячеек. Многокупольные вершины заканчиваются наковальнями на разных высотах и под разными углами наклона друг к другу, поскольку скорость и направление ветра изменяются с высотой.

Суперячейковые *Cb* отличаются внешне однокупольной формой, которую «венчает» гигантская наковальня.

Если одноячейковые *Cb* чаще всего бывают ливневыми (град выпадает редко, а в случаях выпадения интенсивность его мала), то с мультячейковыми связано большинство случаев интенсивных осадков, градобитий и гроз [24]; если же сформировались наиболее мощные и протяжённые по горизонтали суперячейковые *Cb*, то с ними связано большинство катастрофических градобитий.

Предложенная в [24] классификация кучево-дождевых облаков, безусловно, более глубоко и детально отражает физические процессы развития этих облаков. Тем не менее на сети гидрометеостанций для *Cb* традиционно используется классификация, приведенная в [3–5, 9, 21] и других источниках, поскольку наблюдателю легче ориентироваться по ней. К тому же, в случае кучево-дождевой облачности часто видна лишь нижняя поверхность слившихся облаков, поэтому наблюдатель не только не видит форму их верхней части и число куполов, но и может даже затрудняться в отличии *Cb* от *Ns*, если он неопытен и не проследил историю атмосферного процесса. Рекомендации для неопытного наблюдателя и диагностические признаки облаков *Ns* и *Cb* указаны выше.

Следует отметить, что работа по уточнению классификации *Cb* осложняется высокой их динамикой – быстрым изменением внешнего вида, всех параметров облаков, сменой стадий развития. Вместе с тем в [24] сделаны убедительные выводы, которые используются не только в научных разработках, но и приведены в учебной литературе [6, 7].

Итак, облака *Cb* отличаются внешне от облаков *Cu* по двум признакам:

- 1) вершины *Cb* имеют перистое строение;
- 2) из *Cb* выпадают ливневые осадки.

Правда, согласно [60], явные признаки перистого строения всегда наблюдаются только в *Cb inc.* *Cb calv.* внешне признаков оледенения не обнаруживают – ничем не отличаются от *Cu cong.*, однако из первых идут ливневые осадки. Разрушаясь, *Cb* могут породить облака верхнего яруса (все три формы), облака среднего яруса (обе формы) и, кроме того, *Sc* [24].

В суточном ходе повторяемости кучевообразных облаков максимальные значения отмечаются над сушей в дневные часы, над водной поверхностью – в ночные [24]. Причина различий – неодинаковый нагрев суши и воды в течение суток. Что же касается кучево-дождевых облаков, то их развитие происходит во второй половине дня (в первой половине облака развиваются как кучевые до перехода их в *Cb* в послеполуденные часы), поэтому максимальная повторяемость *Cb* приходится на вечер.

4.2. Условия образования облаков вертикального развития

Еще в 1867 г. К. Фламарион и Э. Годар описали быстрое развитие вверх кучевых облаков днём и оседание их вечером [21]. Следует отметить, что кучевые и особенно кучево-дождевые облака (в отличие, например, от слоистых и слоисто-кучевых) всегда привлекали к себе внимание специалистов.

Кучевые облака возникают в тех случаях, когда в атмосфере имеются благоприятные условия для длительного нарушения горизонтальной однородности поля плотности воздуха, в результате чего образуются интенсивные восходящие конвективные потоки [62].

В образовании облаков *Cu* и *Cb* большую роль играет рельеф местности. Над склонами холмов и гор воздух может нагреться больше, чем над равниной, и устремиться вверх. По этой причине в горах часто образуются конвективные облака – *Cu* и *Cb*. Нередко кучевообразные облака развиваются при интенсивном вытеснении тёплого воздуха вторгающимся холодным воздухом в верхнюю тропосферу, что имеет место при прохождении холодного фронта второго рода. Мощные конвективные облака в большинстве случаев (90–99%) являются фронтальными [63]: чаще всего они развиваются летом на холодных фронтах, значительно реже – на тёплых и на фронтах окклюзии.

Над морем кучевообразные облака развиваются главным образом при вторжении холодного воздуха в ночные часы, когда поверхность воды и нижний слой воздуха оказываются теплее более высоких слоёв [8]. Создаётся неустойчивая стратификация атмосферы, что приводит к образованию кучевых облаков.

Все кучевые облака свидетельствуют о характере стратификации атмосферы, в которой они формируются и развиваются, и, следовательно, о силе конвективных движений; кучево-дождевые облака характеризуют ещё и интенсивность турбулентного перемешивания слоёв воздуха [64].

Кучевые плоские (*Cu hum.*) формируются в тех случаях, когда неустойчивость воздуха невелика, а рост облаков ограничен сверху слоем повышенной термической устойчивости – изотермией или даже инверсией. *Cu hum.* образуются при некотором перегреве отдельных масс воздуха по сравнению с рядом расположенными. Именно поэтому обширные облака *Cu hum.* особенно часто наблюдаются в антициклонических условиях, в тёплое время года.

Кучевые средние облака (*Cu med.*) образуются при более благоприятных для конвекции условиях, чем *Cu hum.*, – при отсутствии задерживающих слоёв в нижней тропосфере и большей влажнонеустойчивости.

Согласно [58, 59], жизненный цикл внутримассовых *Cu hum.* и *Cu med.* от их зарождения до распада превышает 15–30 мин. При этом наблюдаемый облачный покров из кучевых облаков включает в себя облака, находящиеся как в стадии образования, так и в стадии распада. Скорость распада зависит от интенсивности подпитки облаков снизу и от влажности окружающего воздуха. Чем он суше, тем быстрее процесс бокового вовлечения окружающего воздуха в конвективный элемент облака приводит к ослаблению и исчезновению в нём подъёмной силы, а значит, и к разрушению облака.

Рано утром приземный слой стратифицирован очень устойчиво, причём во внутриконтинентальных районах в нижнем 200–300-метровом слое в это время обычно наблюдается инверсия [59]. Разрушение приземной инверсии происходит снизу. К 8–9 ч утра вблизи земли стратификация становится неустойчивой, поэтому развивается конвекция. В это же время на некоторой высоте ещё сохраняется инверсия. Пока существует этот задерживающий слой, температура воздуха под ним повышается благодаря радиационному нагреванию от земли. Выше инверсии температура продолжает понижаться. К 10 ч в нижней половине пограничного слоя неустойчивость возрастает и происходит «взрывное» увеличение мощности конвективного слоя – во всей нижней половине пограничного слоя стратификация становится неустойчивой, а в верхней устанавливается стратификация, близкая к безразличной. Интересно, что турбулентность в течение суток неодинаково влияет на конвекцию: рано утром, в период начала развития конвекции, турбулентность способствует её развитию; в дальнейшем турбулентность (неупорядоченное движение) начинает подавлять процесс конвекции (упорядоченного движения).

Достаточно сильное влияние на развитие термической конвекции оказывает неоднородность подстилающей поверхности – рельеф, раститель-

ный покров, близость водоёмов, тип почв. К неравномерному нагреву подстилающей поверхности может привести различие, связанное с любой из вышеприведённых её особенностей, а также их сочетанием. Неравномерное прогревание подстилающей поверхности облегчает формирование термиков. В этом случае образуются локальные скопления *Cu hum.* и *Cu med.*, но *Cu cong.* формируются редко [59].

Для формирования *Cu cong.* требуется более неустойчивая стратификация воздуха и в большем слое, чем при *Cu med.* и тем более при *Cu hum.* В летние дни термическая конвекция может развиваться и в зоне атмосферных фронтов, если только нет сплошной слоистообразной облачности, которая препятствует прогреву подстилающей поверхности. Развитие мощных кучевых и кучево-дождевых облаков может происходить около фронтов всех типов, но наиболее интенсивно – перед быстро смещающимися холодными фронтами, когда из-за большей крутизны их передней части и высокой скорости смещения тёплый воздух интенсивно вытесняется вверх. Неустойчивость холодной массы за фронтом также благоприятствует образованию очень мощных облаков вертикального развития разных форм.

При развитии кучевых облаков внутри одной воздушной массы, что встречается гораздо чаще, чем в околофронтальных зонах, в случаях отсутствия в тропосфере задерживающих слоёв все виды *Cu* могут наблюдаться одновременно, демонстрируя различные этапы развития кучевых облаков над отдельными участками подстилающей поверхности.

Куполообразные возвышенности («шапки»), из которых состоят *Cu cong.* и *Cu med.*, представляют собой верхние части наиболее крупных внутриоблачных конвективных элементов [58, 59]. Все основные характеристики кучевых средних и мощных облаков определяются только этими конвективными элементами.

Конечные формы кучевых облаков исследованы в [65], где выведены две их формы:

- 1) облака, прекращающие свой рост по всей высоте облачного столба;
- 2) облака, вершины которых продолжают расти, но в горизонтальном направлении.

Вторая форма конечной стадии развития кучевого облака является основной. Она характеризуется симметричным горизонтальным или односторонним горизонтальным распространением вершины облака в направлении ветра.

Итак, в первом случае поток затухает внутри облака, во втором – сохраняется, но у вершины облака он сменяет своё направление на горизонтальное. Первый случай в [65] подразделен на две подгруппы:

а) распад у облаков начинается с основания – нижние части, не получающая подтока влаги, постепенно испаряются, оставляя лишь следы верхних частей;

б) испарение начинается в средней части облака или ближе к вершине, поэтому облако распадается на две части – верхнюю и нижнюю. Возможны и смешанные случаи, когда наблюдается несколько типов конечных стадий развития облака, однако чаще бывают приведенные выше варианты.

Таким образом, характер распада кучевого облака может дать важные сведения о потоках, обусловивших существование этого облака.

В целом ряде случаев конечная стадия кучевого облака приводит не к разрушению его, а к переходу в другую форму – форму более высокой степени конвекции и турбулентности. Когда вершины мощных кучевых облаков (*Cu cong.*) достигают уровня, на котором температура значительно ниже нулевого значения, в них образуются ледяные кристаллы, иногда в значительном количестве. При этом облако может либо сохранять куполообразную форму, характерную для кучевых облаков, либо образовывать перистые облака в виде пучков и даже покровов. Такие облака, имеющие кристаллические вершины, являются уже кучево-дождевыми и поэтому дают осадки. Начало кристаллизации вершины кучевого облака демонстрируют уже *Cu cong. pil.* – мощные кучевые с «вуалью».

В отличие от облаков других семейств формы облаков вертикального развития связаны между собой непосредственно – любой *Cb* начинал свое развитие как *Cu*. Однако не любое кучевое облако станет кучево-дождевым. Это зависит от того, насколько облако вырастет по вертикали и сможет ли подняться выше уровня кристаллизации. Облака растут вверх до тех пор, пока конвективные элементы не разрушатся в результате интенсивного перемешивания [36] или пока они не утрачивают своей подъёмной силы. Последнее в большой мере зависит от степени термической неустойчивости и от перегрева воздуха у подстилающей поверхности до его подъёма.

Таким образом, вертикальное развитие облаков определяется распределением температуры с высотой в воздухе, окружающем конвективные элементы, и особенностями турбулентного перемешивания.

В процессе развития *Cb calv.* может перейти в *Cb incus*. Этот переход проходит двумя путями [60]. В одних случаях полосы перистых облаков

как будто бы «выбрасываются» из верхней части облаков *Cb calv.* После этого (через несколько минут) вершина *Cu* (при обзоре сверху) становится уплощённой. Струи перистых облаков из вершин облака слегка приподнимаются, затем растекаются в стороны и вниз, образуя, по выражению автора [60], «перистый зонтик». В других случаях переход из *Cb calv.* в *Cb inc.* происходит иначе – верхняя часть *Cb calv.* спокойно растекается по горизонтали, одновременно появляется и перистая структура. В этом случае *Cb incus* имеют очень плотные наковальни.

Иногда автор [60] наблюдал оледенение вершин *Cu cong.*, когда их касались облака *Ci* или если растущее облако *Cu cong.* соприкасалось своей вершиной со старыми наковальнями (*Ci incus-genitus*). Дело в том, что процесс разрушения облаков *Cb* начинается в нижней (капельной) части облака и практически не захватывает его наковальни. Последние могут сохранять свою форму часами. Постепенно они разрушаются, превращаясь в *Ci ing.* Однако старые наковальни и перистые облака, возникшие при разрушении *Cb*, могут, согласно [60], снова и снова явиться катализаторами, вызывающими быстрое оледенение растущих *Cu cong.* в момент их соприкосновения.

Облака вертикального развития, по своему происхождению связанные с интенсивными восходящими упорядоченными и турбулентными движениями, в отличие от облаков других форм, имеют большую вертикальную составляющую скорости движения воздуха. По этой причине, согласно [36], облачные частицы проходят расстояние в несколько километров – от основания до вершины облака – менее чем за 20 мин. При этом разные облачные частицы имеют свои скорости подъёма, а соседние частицы, близкие между собой по направлению и скоростям движения, образуют конвективные элементы – устойчивые конвективные потоки.

Элементами конвекции («термиками») могут быть «пузыри» или «струи». Пузыри – это элементы с полусферической передней частью тёплого воздуха и шлейфом более холодного. Струи – вертикальные или наклонные столбы воздуха со сравнительно мало изменяющимся диаметром, связанные с более нагретыми участками подстилающей поверхности по сравнению с соседними участками. Там, где термик достигает уровня конденсации и пересекает его, зарождается облако.

Развитию конвекции способствует термическая неустойчивость атмосферы, когда вертикальный градиент температуры (γ) превышает адиабатический градиент температуры. Поднимающийся термик увлекает в своё движение окружающий воздух, обычно более холодный и сухой.

Этот процесс замедляет подъём термика, процесс конденсации и уменьшает водность облака.

Различные конвективные элементы приводят к формированию отдельных башенок, которые непрерывно изменяют свои очертания – растут вверх, частично испаряются (особенно вблизи вершин) и, наконец, разрушаются.

Итак, кучево-дождевые облака возникают в результате ярко выраженной конвекции и развитого турбулентного обмена в воздухе с неустойчивой стратификацией.

Конвекция, как известно, может быть свободной или вынужденной. В первом случае вверх поднимаются отдельные перегретые массы воздуха над неоднородной подстилающей поверхностью. Во втором случае конвекция связана с крупномасштабным подъёмом тёплой воздушной массы вдоль клина холодной (в зоне тёплого фронта или медленно смещающегося холодного фронта, т.е. холодного фронта первого рода), либо с вынужденным подъёмом воздуха вдоль склонов гор и возвышенностей, либо с вытеснением вверх тёплого воздуха быстро смещающейся холодной воздушной массой, когда тёплая масса не успевает отодвигаться по горизонтали (холодный фронт второго рода), либо при сходимости потока у границ поверхностей с разной шероховатостью. Следует отметить, что близ холодного фронта возникает иногда облачный вал кучево-дождевых облаков.

Изменения в стратификации атмосферы, характере подстилающей поверхности под облаками и, конечно, характере атмосферного процесса проявляются в динамике кучевых и особенно кучево-дождевых облаков.

По оценкам исследователей, формирование облака вертикального развития происходит быстрее, чем разрушение. Так, согласно [24], лишь облака мелкой конвекции имеют продолжительность жизни десятки минут, а в целом развитые кучевые облака существуют не менее часа, хотя могут иметь и значительно более продолжительную жизнь; распад же даже такого мощного облака, каким является *Cb*, занимает примерно 30 мин [21], причем начинается обычно снизу. Понятно поэтому, что нередко наковальня и перистые облака, связанные с вершинами кучево-дождевых, переживают облако, их породившее.

Обычно выделяют три этапа жизни *Cb*: рост, зрелость и диссипация (распад) [66]. Это деление производится по характеру распределения крупномасштабных вертикальных движений внутри облака.

Для первого этапа характерно наличие восходящих потоков во всем облаке. В зрелой стадии в нижней части облака появляются области

с господством нисходящих движений. В стадии диссипации нисходящие движения преобладают во всей толще облака.

По результатам исследований, проведенных в Высокогорном геофизическом институте [66], время существования облака можно разделить и на четыре стадии: первая стадия – образование отдельных мелких облаков при конвективном подъёме воздуха в виде отдельных термиков; вторая – от начала образования устойчивых конвективных потоков одного направления движения и скоростей облачных частиц до накопления влаги в облаке для последующего выпадения осадков; третья стадия – выпадение осадков и параллельное накопление влаги в облаке; четвертая – стадия разрушения. Нередко первые две стадии объединяют в одну, чего, по мнению авторов [66], не следовало бы делать, поскольку время объединения термиков в струю колеблется в широких пределах, в то время как период аккумуляции влаги, необходимой для выпадения ливневых осадков, примерно постоянен. Понятно, что стадии эволюции *Cb* должны включать в себя и стадии кучевого облака.

В [8] в развитии кучевообразных облаков также выделено четыре стадии. К первой стадии относятся маломощные *Cu* – «кучевые облака хорошей погоды». Эта стадия продолжается до тех пор, пока облака не достигнут уровня изотермы 0°C. При этом горизонтальные размеры облаков изменяются от сотен метров до 2–3 км. Восходящие движения усиливаются от 1–2 м/с в начальной стадии до 5 м/с – в конце стадии (в центральной части облака).

Во второй стадии облака развиты по вертикали (начиная от *Cu cong.*). Верхняя половина облаков располагается в зоне отрицательных температур. Характерной особенностью этих облаков считают очень неровную, всхолмленную верхнюю поверхность, через которую отдельные облачные массы прорываются на несколько сотен метров выше основного уровня верхней кромки облака [8]. Это связано со значительным увеличением скорости восходящих движений воздуха (до 10–15 м/с в верхней половине облака). Вершины облаков хоть и сильно клубятся, но имеют достаточно чёткие очертания.

В третьей стадии верхняя часть облаков теряет округлые очертания из-за приобретения кристаллического строения. В результате «выбросов» пучков перистых облаков из вершин облака образуется наковальня (*Cb incus*), ориентированная в направлении ветра. Облако начинает давать осадки. В это время в облаке формируются сильные восходящие движения (в отдельных случаях – до 35–40 м/с), но в той части облака, откуда

выпадают осадки, восходящие движения сменяются нисходящими. Облако имеет большие размеры – 15–20 км по горизонтали, а верхняя граница летом над континентом достигает 8–9 км, нередко доходя до тропопаузы.

В четвертой стадии прекращается конвективный подъём воздуха, в большей части облака развиваются нисходящие потоки – *Cb* разрушается. Этот процесс начинается с нижней части облака и может завершиться за 20–30 мин. Лишь верхняя кристаллическая часть облака может сохраняться до нескольких часов, причем там, согласно [8], могут даже преобладать восходящие движения с небольшой скоростью – 1–3 м/с.

К недостаткам этой классификации, приведённой в [8], относится нечёткость в разделении облаков между второй и третьей стадиями развития. Так, ко второй стадии отнесены *Cb calv.*, которые не имеют перистой наковальни, хотя их вершины уже кристаллические, как у всех *Cb*.

А.Г. Балабуев [67] на основании исследований мощных кучевых облаков (*Cu cong.*) в горах показал, что период развития этих облаков от появления кучевых плоских до возникновения кучевых мощных колеблется в пределах от 1 до 4 ч. Стадия мощного кучевого облака может быть и последней, т.е. дальнейшее развитие и переход в стадию *Cb* не осуществляется. Однако в том случае, когда мощное кучевое облако переходит в стадию *Cb*, характерной особенностью является быстрота процесса по сравнению с предшествующей медленной стадией пребывания облака в фазе кучевого мощного. Обычно весь процесс вплоть до превращения в *Cb inc.* проходит не более чем за 1–2 ч, а иногда и меньше [66]. С момента перехода в стадию *Cb* появляются полосы падения осадков, одновременно могут развиваться грозовые явления. В [68] сделан вывод о том, что усиление грозовой активности – один из признаков градоносности *Cb*.

При условиях, когда предшествующая стадия до перехода в *Cb* проявляется в виде отдельных облаков, при последующем развитии облака имеют также вид отдельных, более или менее ограниченных облачных образований. Если же процесс протекает интенсивно и впоследствии сопровождается грозовыми и градовыми явлениями, облачные массы образуются путём слияния отдельных облаков. Слияние отдельных мощных кучевых облаков идёт путем их надвижения с наветренной стороны с последовательным ростом башен, переходом их в стадию *Cb calv.* и слиянием с предшествующим облаком. В результате образуется огромное облако *Cb*, сопровождающееся интенсивными ливневыми или даже градовыми явлениями [66]. Весь процесс формирования такого облака редко продолжается более 2–3 ч (процесс развития от кучевого плоского до

перехода в стадию кучевого мощного облака занимает около 4 ч, что хорошо согласуется с [67]).

Скорость вертикального движения в потоке растёт с высотой до тех пор, пока облако не достигнет слоя, где вертикальный градиент температуры (γ) станет равным или меньше адиабатического градиента. Когда же достигается стадия *Cb incus*, рост облаков постепенно прекращается. Согласно [66], выпадение осадков и нисходящие потоки воздуха приводят к «отсечению» термиков, поднимающихся от подстилающей поверхности, и, следовательно, к прекращению «подпитывания» облака водяным паром снизу. В результате полностью прекращается рост облака вверх.

В [32] приведены средние и максимальные значения периодов непрерывной продолжительности существования облаков *Cb* над различными физико-географическими районами территории России и сопредельных государств, а также сделаны выводы о том, что зимой образование кучево-дождевых облаков связано с холодными фронтами, поэтому над северо-западными и центральными районами европейской части России и сопредельных государств, где нередко прослеживаются эти фронты в зимний период, средняя продолжительность существования *Cb* достигает 4 ч (при максимальной 19–20 ч над Москвой и Санкт-Петербургом), а над остальными районами изменяется в пределах 1–3 ч.

В летний период, когда *Cb* бывают и фронтальными, и внутримассовыми, средняя продолжительность их существования равна 3–4 ч, а максимальная над отдельными районами – около суток и более (Новосибирск, Хабаровск, Москва, Днепропетровск – 20–22 ч, Санкт-Петербург, Самара – 30–33 ч, Харьков – 48 ч). При этом различия в средних значениях продолжительности существования *Cb* в летнее время над различными районами невелики, в отличие от зимнего времени. Это понятно, поскольку летом большой прогрев подстилающей поверхности и прилегающего к ней слоя воздуха осуществляется в большом диапазоне широт.

Следует заметить, что зимой изолированные кучево-дождевые облака в средних широтах (особенно в континентальных районах) наблюдаются крайне редко, а в высоких широтах и вообще не встречаются.

Как уже указывалось выше, развитые облака *Cb* имеют ячеековое строение. Согласно [24, 66], кучево-дождевые облака состоят из одной или нескольких конвективных ячеек, каждая из которых на протяжении жизни облака проходит через три стадии развития. Начальная стадия – рост ячейки; растущие облака *Cb* имеют вид *Cb calv.* (напряжённость электрического поля в этих облаках хоть и велика, но недостаточна для

перехода их в грозовые [57]). Следующая стадия – *Cb incus*. Вершиной последних является «наковальня» кристаллического строения. Заключительная стадия развития *Cb* – стадия диссипации (распада). Вначале разрушается нижняя (капельная) часть облака и уменьшается высота его верхней границы. Из-за малых скоростей нисходящих движений и столь же малых скоростей испарения кристаллов остатки верхних частей облаков *Cb* и после разрушения полей кучево-дождевых облаков могут существовать часами. Иногда весь небосвод покрывается перистыми облаками различных видов.

Стадии развития облачной ячейки выделены в зависимости от преобладания знака вертикальной скорости, т.е. от направления движения по вертикали. Так, в начальной стадии преобладает восходящее движение, а в верхней части ячейки появляются частицы крупы. Во второй стадии восходящее движение преобладает в центральной части ячейки, а на периферии отчётливо проявляется нисходящее движение; верхняя часть ячейки полностью кристаллическая, кроме того, даже в средней части имеются как капли, так и частицы крупы. Эта стадия соответствует внезапному началу выпадения ливневых осадков из облака. В последней стадии развития ячейка разрушается. В это время нисходящее движение воздуха охватывает всю ячейку, поэтому подток водяного пара снизу прекращается, а выпадающие осадки постепенно размывают облако.

Согласно [7], первая стадия продолжается 10–15 мин, вторая – 15–30 мин, третья – около 30 мин; возможны отклонения от приведённых временных интервалов, иногда значительные. Так, например, в [24] продолжительность первой стадии оценивается в 10–20 мин, второй – в 20–50 мин, третьей – более 30 мин. Таким образом, наибольшие отклонения связаны со второй стадией развития ячейки, зато данные о продолжительности первой и третьей стадий согласуются достаточно хорошо.

Сначала облако возникает как одноячейковое. Через 15–20 мин после зарождения первой ячейки, когда она уже достигла стадии зрелости, в 20–30 км и обычно справа от общего направления движения облака возникает дочерняя ячейка, которая впоследствии проходит все три стадии развития. Кучево-дождевые облака, состоящие из нескольких ячеек, называются мультіячейковыми. Составляющие такие облака ячейки находятся на разных стадиях развития. Возникновение всё новых дочерних ячеек поддерживает существование мультіячейкового облака, поэтому оно может жить в течение нескольких часов. Дочерние ячейки через некоторое время после возникновения сливаются с первичными. Это происходит следующим образом. Первая ячейка имеет большее раз-

витие по вертикали по сравнению с дочерней. Чем больше развита ячейка по вертикали, тем выше скорость ее горизонтального переноса. Следовательно, первичная ячейка догоняет дочерние и сливается с ними. В результате появляется мультячейковое кучево-дождевое облако с многокупольными вершинами. Эти вершины расположены на разных высотах (в зависимости от возраста ячеек) и в случае зрелых облаков заканчиваются наковальнями под разными углами наклона друг к другу (в зависимости от изменения направления и скорости ветра с высотой). Наковальни мощных многоячейковых кучево-дождевых облаков иногда настолько велики, что закрывают всю видимую часть небосвода [21].

Одноячейковые и мультячейковые облака различаются по форме, размерам, выпадающим из них осадкам и другим характеристикам. Большая часть одноячейковых облаков типа *Cb calv.* приблизительно цилиндрична, но несколько асимметрична [21, 24]; диаметр таких облаков, согласно [7], редко превышает 5–7 км (в [66] приведены более высокие значения). В [24] отмечена интересная особенность одноячейковых облаков: для них характерна очень малая продолжительность стадии зрелости. Кроме того, одноячейковые *Cb* чаще всего бывают ливневыми – град из них выпадает редко, а в случаях выпадения интенсивность его мала. Нередко одноячейковые облака не являются самостоятельным классом кучево-дождевых облаков, а просто играют роль начальной стадии облаков мультячейковых [24].

Форма и размеры мультячейковых облаков могут быть самыми разнообразными в зависимости от взаимного расположения ячеек внутри облака, а также от их количества и размеров [21]. Некоторые исследователи отмечают, что часто многоячейковые облака *Cb* внешне напоминают вид цветной капусты. Общая продолжительность существования мультячейковых облаков *Cb* достигает нескольких часов. С ними связано большинство случаев интенсивных осадков, градобитий, гроз [24]. Мультячейковые облака обычно фронтальные, в то время как одноячейковые, если они не являются начальной стадией мультячейкового облака, являются, скорее, внутримассовыми. Фронтальные *Cb*, как правило, объединяются в сплошные или почти сплошные облачные валы. В этом случае трудно даже и говорить о размере отдельного кучево-дождевого облака [21].

Самыми долгоживущими, мощными и протяжёнными в горизонтальном направлении являются суперячейковые облака. Они представляют собой одну квазистационарную ячейку, диаметр которой в отдельных случаях может превышать 15–20 км. Внешне суперячейковые *Cb* имеют

однокупольную форму. Скорости восходящих движений внутри суперячейковых *Cb* могут достигать 50 м/с. В отличие от мультячейковых *Cb*, где ячейки сравнительно быстро меняют свои характеристики (скорости, размеры), в суперячейковых облаках они остаются практически неизменными в течение 10–15 мин и даже дольше.

Благоприятные условия для суперячейковых облаков – значительный поворот скорости ветра с высотой (чаще всего правый). При таких условиях создается замкнутая мезомасштабная циркуляция из восходящего потока тёплого влажного воздуха вблизи правого переднего сектора облака (по отношению к направлению его движения) и нисходящего потока в тыловой части. Эта циркуляция обеспечивает подток влаги в облако, поэтому последнее существует длительное время [24].

Град из суперячейкового облака выпадает преимущественно в зоне нисходящего движения – в тыловой и центральной частях облака. С этими облаками связано большинство катастрофических градобитий.

Иногда наблюдаются отклонения от схемы эволюции кучево-дождевых облаков, изложенной выше. Так, *Cb* может переходить в стадию зрелости, а затем разрушиться без образования наковальни. Согласно [24], такие случаи наблюдаются в переходные сезоны в умеренной зоне, поскольку запасы энергии неустойчивости малы и восходящие потоки не очень сильны, – растекание воздуха в вершине *Cb* происходит не очень интенсивно, и «наковальня» не формируется.

4.3. Микроструктура облаков вертикального развития

В литературе отсутствуют не только детальные, но хотя бы надёжные (статистически обеспеченные) данные большинства характеристик по микроструктуре кучевых (*Cu*) и кучево-дождевых облаков (*Cb*). Это связано с целым рядом причин. Так, в облаках указанных форм средний радиус капель в восходящих потоках заметно (примерно в 1,5 раза) больше, чем в потоках нисходящих. Кроме того, значения среднего радиуса капель в этих облаках зависят от интенсивности вовлечения в них окружающего (более сухого) воздуха, времени жизни облака и многих других факторов. Более того, невозможность производить измерения в наиболее развитых по вертикали облаках – *Cu cong.* и *Cb* – создает дефицит данных, который в неполной мере компенсируется данными зарубежных исследователей и сбрасываемых зондов. Следует учитывать и тот факт, что многие характеристики микроструктуры облаков, полученные для отдельных *Cu* или

Cb, не могут быть в полной мере распространены на все облака той или другой формы в силу различий в мощности и высоте расположения нижней границы облаков.

При всех вышеуказанных сложностях в изучении облаков вертикального развития на сегодняшний день всё-таки сложилась определенная картина их микроструктуры.

Все кучевые облака являются капельно-жидкими, лишь в редких случаях в наиболее мощных *Cu cong.* наблюдаются отдельные кристаллы. Самые мелкие капли находятся в нижней части облака, а в центральной и верхней частях – капли более крупные.

В [21] приводятся средние значения радиуса капель (в среднем для всего облака в целом) для кучевых и кучево-дождевых облаков умеренных широт: 3–4 мкм в *Cu hum.*, 4–5 мкм в *Cu med.*, 5–7 мкм в *Cu cong.* (в зависимости от мощности облака: при мощности $2,5 \pm 0,5$ км средний радиус капли составляет 5–6 мкм, при мощности 3–4 км – 6–7 мкм), 7–9 мкм в *Cb*.

Эти данные достаточно хорошо согласуются с результатами, приводимыми в [9, 15] по исследованиям А.М. Боровикова и И.П. Мазина: средний радиус капель в *Cu hum.* составил 2,5–3,5 мкм, в *Cu med.* 3,5–4,5 мкм, в *Cu cong.* 4,5–7,0 мкм. Интересно отметить, что в морских кучевых облаках низких широт, согласно [69], общая концентрация капель в десятки раз ниже, а средние размеры в несколько раз выше, чем в аналогичных облаках умеренных широт. В то же время концентрация капель радиусом более 100 мкм в *Cu* низких широт на порядок выше.

Понятно, что самые мощные из облаков вертикального развития – кучево-дождевые (*Cb*) – имеют и более сложную микроструктуру. В большей части облака, включая верхнюю половину, обнаружено большое количество и капель, и кристаллов [8]. В *Cb* капли всегда имеют очень широкий спектр размеров. Уже в 1960-х гг. [34] отмечалось, что в *Cb* встречаются капли с радиусами в диапазоне 2–100 мкм, кроме того, там же находятся капли осадков с радиусом $r \geq 100$ мкм. Наибольшая повторяемость капель в *Cb*, согласно [59], приходится на диапазон размеров 10–20 мкм, а кристаллов – на диапазон размеров 20–30 мкм.

Материалы, полученные при зондировании градовых облаков с помощью бронированного самолета-лаборатории Т-28, указывают на отсутствие в них зон больших концентраций крупных переохлажденных капель [70].

Нижняя часть *Cb* является капельной, а верхняя – смешанной и кристаллической. Согласно [24], капельную структуру кучево-дождевое

облако имеет в нижней части до изотерм $-12...-16^{\circ}\text{C}$, а выше этих изотерм и примерно до -40°C наблюдается смешанная структура, когда наряду с переохлаждёнными каплями имеются и кристаллы льда; в вершине же облака располагаются ледяные кристаллы неправильных форм. Критической температурой для капель является -41°C , при ней происходит быстрое замерзание, хотя в единичных случаях капли находятся в переохлаждённом состоянии и при значительно более низких температурах [2].

Кристаллические вершины имеют все *Cb*, включая *Cb calv.*, которые внешне не обнаруживают признаков оледенения.

Анализ материалов, приведённый в [24], позволяет связать микроструктуру кучево-дождевых облаков со стадией их развития. Так, устойчивое смешанное фазовое состояние облаков *Cb* свидетельствует об активной стадии формирования облака. В это время при активном подъёме масс воздуха влажность остается выше её значения насыщения над водой. В таком случае растут и капли, и кристаллы, причём скорости их роста заметно не различаются. Если же активный процесс завершился, то смешанное фазовое состояние становится неустойчивым – парциальное давление пара понижается, ибо интенсивность подъёма масс воздуха, связанная с понижением их температуры и приближением к состоянию насыщения, снижается. Когда парциальное давление станет ниже значения насыщения над водой, капли прекращают свой рост и начинают испаряться [64]. Далее происходит «перегонка» воды с капель на кристаллы. При этом размер капель непрерывно уменьшается. Известно, что в смешанных облаках капли более мелкие, чем в капельно-жидких. В зонах со смешанной фазой в *Cb* спектр размеров капель довольно узкий – чаще всего радиус капель составляет 2–3 мкм; в растущих *Cb* спектр размеров капель шире: радиус может достигать (ближе к верхней части облака) значений 7–9 мкм [24].

Переход части кучево-дождевого облака в кристаллическую фазу при низких температурах указывает, что это облако начало разрушаться [71]. Так, искусственное введение реагента в переохлаждённую часть облака обычно приводит к быстрой её кристаллизации и оседанию вершины. Однако через несколько десятков минут наблюдается регенерация облака – оно приобретает капельное или чаще смешанное строение. При естественном развитии процесса оледенение всей верхней части облака наступает только после затухания в облаке процессов активного облакообразования [71].

Согласно [72], существует три механизма зарождения кристаллов:

1) конденсация – замерзание (замерзают первоначально появившиеся капли);

- 2) сублимация пара на ядрах льдообразования;
- 3) столкновение первичных кристаллов с каплями.

При более высоких отрицательных температурах (до -25°C) основными являются первый и третий механизмы. При более низких отрицательных температурах (ниже $-25\ldots-30^{\circ}\text{C}$) заметным становится и второй (сублимационный) механизм.

В [15] приводится повторяемость различных форм кристаллов в облаках в зависимости от температур воздуха. Известно, что форма кристаллов сильно зависит от температуры и влажности, при которых они образуются. Основной формой ледяного зародыша является гексагональная призма. В интервале температур $-10\ldots-25^{\circ}\text{C}$ главной формой кристаллов является пластинчатая (пластины, звёздочки, снежинки). При температурах выше -10°C и ниже -25°C рост кристаллов происходит в направлении главной оси зародыша, поэтому образуются столбчатые формы частиц. При температурах ниже -35°C прослеживается тенденция к уменьшению размеров кристаллов и нарушению гексагональной формы [12, 73]. Учитывая значения температур в облаках *Cb*, можно предположить, что для верхней их части более характерны столбики и их пучки с некоторой примесью пластинок и объёмных кристаллов (пирамидальных, бесформенных).

Пластинки в [15] разделены на тонкие и толстые, причем показано, что тонкие пластинки имеют наибольшую повторяемость при более высоких отрицательных температурах (при температурах ниже значения -13°C повторяемость тонких пластинок в облаках резко снижается); толстые же пластинки чаще встречаются при температурах $-16\ldots-19^{\circ}\text{C}$. На эту же градацию приходится наибольшие значения повторяемости объёмных кристаллов. По мере понижения температуры все более возрастает доля столбиков и пучков столбиков, а при температурах -28°C и ниже кристаллы в облаках имеют только эти формы.

Таким образом, вершины градовых и грозовых облаков – наиболее мощных из кучево-дождевых – состоят исключительно из столбиков и их пучков.

Водность кучевых облаков, согласно [74, 75], изменяется в целом от $0,7\text{ г/м}^3$ в их нижней части, до $1,8\text{ г/м}^3$ – в верхней, достигая в отдельных случаях значений $5,4\text{ г/м}^3$. В зависимости от мощности кучевых облаков их водность распределяется следующим образом: $0,26\text{--}0,33\text{ г/м}^3$ в облаках небольшой мощности, $1,5\text{ г/м}^3$ – в облаках мощностью $4,5\text{--}5,0\text{ км}$, $2,26\text{ г/м}^3$ (иногда до $5,4\text{ г/м}^3$) – в областях восходящих токов в середине облака. По данным [15], максимальные значения водности в кучевых плос-

ких (*Cu hum.*) и средних облаках (*Cu med.*) составляют $0,8 \text{ г/м}^3$, а в кучевых мощных (*Cu cong.*) – $5,5 \text{ г/м}^3$, в кучево-дождевых облаках (*Cb*) – 10 г/м^3 .

Имеющиеся различия в значениях водности связаны с тем, что эта величина зависит от большого числа факторов. Вместе с тем во всех конвективных облаках водность быстро растет с высотой в нижней части облака, сохраняет высокие значения в значительной части облака, медленно возрастая с высотой. Только вблизи верхней границы облака наблюдается заметное уменьшение водности [8].

Следует отметить, что в [5] помещена весьма скромная информация по микрофизическому строению облаков вертикального развития: размер капель (средний радиус или диапазон изменения значения радиуса капель) не указан, средние значения водности для облаков *Cu* – от $0,2\text{--}0,5 \text{ г/м}^3$ в *Cu hum.* до $0,5\text{--}3 \text{ г/м}^3$ в *Cu cong.* и очень нечётко определены для *Cb* (от $0,5 \text{ г/м}^3$ до нескольких единиц).

Интересно, что данные, приводимые в [5], по водности *Cu* и *Cb* достаточно хорошо согласуются с данными американских ученых. Так, например, в [21] приводятся средние значения водности для *Cu* и *Cb* над США, которые составляют для обеих форм облачности $0,4\text{--}0,6 \text{ г/м}^3$.

С другой стороны, по мнению С.М. Шметера [59], водность на отдельных участках внутри *Cb* превышает 10 г/м^3 . Кроме того, в [59] приводятся данные о водности *Cb* над США, согласно которым в одном случае на высотах $8,6\text{--}11,6 \text{ км}$ наблюдались участки, на которых водность достигала $7\text{--}12 \text{ г/м}^3$, в другом случае – даже 43 г/м^3 . Г.К. Сулаквелидзе отмечал, что внутри верхней половины *Cb* водность достигает $20\text{--}30 \text{ г/м}^3$ [66].

Таким образом, из всех приведённых данных можно сделать вывод о том, что *Cb* – очень водные облака, самые водные среди облаков всех форм, поскольку в этих облаках имеется наибольшая концентрация крупных капель, вклад которых в общую водность облака особенно велик. Вместе с тем водность в *Cb* колеблется в широком диапазоне значений, поэтому средние значения водности лишь в определённой мере отражают общую картину. Максимальная же водность на отдельных участках *Cb* может составлять несколько десятков г/м^3 .

В целом для облаков *Cu* и *Cb* характерны увеличение средней водности с высотой и достижение максимальных значений в предвершинной части облака, однако иногда наблюдается двугорбая кривая распределения средней водности с высотой. Такое распределение, согласно [21], нередко встречается в кучевых облаках мощностью более $3\text{--}4 \text{ км}$.

Для грубых оценок средней водности кучевого облака мощностью до 3 км можно, согласно [21], считать, что средняя водность (в г/м³) втрое меньше, чем его мощность (в км).

4.4. Пространственно-временная структура облаков вертикального развития

4.4.1. Повторяемость облаков вертикального развития

Формирование кучевых облаков связано с конвекцией, поэтому амплитуда годового хода повторяемости этих облаков в континентальных районах очень велика. Согласно [21], зимний минимум особенно глубок для Сибири и Средней Азии (влияние наиболее континентальных климатов), но на Кавказе (в связи с влиянием орографии) и на Дальнем Востоке (влияние морских черт климата) годовой ход повторяемости кучевых облаков столь отчётливо не выражен.

Летом, при интенсивной конвекции, повторяемость кучевых облаков почти везде велика в пределах территории России и сопредельных государств. Так, в июле она составляет 37% – в Гаграх, 33% в Курске и Алматы. Лишь на Камчатке и в Средней Азии летом повторяемость кучевых облаков мала – 2–7% от общего числа случаев [21].

Осенью повторяемость *Сi* повсюду быстро уменьшается. Для зимы *Сi* не характерны, они появляются весной.

Годовой ход кучево-дождевых облаков во многом схож с годовым ходом кучевых облаков. Так, зимой повторяемость *Сb* мала почти над всей континентальной частью России и изменяется от долей до 1–3% от общего числа случаев. С апреля или мая повторяемость кучево-дождевых облаков возрастает, причём заметно, достигая максимальных значений чаще всего в июле: 28% – в Вильнюсе, 21% в Курске, 18% – в Енисейске, 13% – в Томске, но в любом случае июльские значения чаще всего бывают максимальными в годовом ходе [21]. Уменьшение повторяемости кучево-дождевых облаков в сентябре–октябре происходит медленнее, чем увеличение ее весной.

При всей схожести годового хода повторяемости *Сb* с ходом повторяемости *Сi* прослеживаются и некоторые различия. Так, *Сb* встречаются зимой за счёт фронтального происхождения кучево-дождевых облаков в зимнее время. Зато летом повторяемость облаков *Сi* выше, чем *Сb*, ибо не все кучевые облака развиваются до кучево-дождевых. По этой при-

чине в среднем по территории России и сопредельных государств летом на *Cu* приходится 27%, а на *Cb* – всего 13% от общего числа случаев.

От описанного распределения повторяемости *Cb* отличается юг Сибири (Горный Алтай). Например, на станциях Кош-Агач, Аккем, Кызыл летние значения повторяемости *Cb* высоки – до 26–35%.

Интересно отметить, что на Камчатке, Курильских и Командорских островах, на Сахалине (континентальная часть Дальнего Востока сюда не входит) расположена морская область зимней конвекции, где отмечающийся зимний максимум повторяемости *Cb* составляет несколько десятков процентов. Зимняя конвекция в указанной области связана с взаимодействием открытой воды океана, свободной ото льда, и холодного воздуха материкового происхождения (он может поступать, например, в тылу циклонов, имеющих в зимний сезон достаточно большую активность). В указанной области взаимодействия более тёплой водной поверхности со значительно более холодным воздухом имеет место интенсивная конвекция, которая развивается до стадии оледенения вершин. Летом в этой области *Cb* наблюдаются редко (адвекция холодного воздуха отсутствует). В области зимней конвекции наблюдаются зимние ливневые снегопады, иногда очень интенсивные (по данным Камчатки и Северной Японии).

На обширной территории России и сопредельных государств имеется ещё одна область зимней конвекции – на крайнем севере Мурманской области, но ее размеры и значения повторяемости *Cb* в ней меньше, чем в вышеуказанной восточной области [21].

4.4.2. Количество облаков вертикального развития и их горизонтальная протяжённость

В [58] обобщены данные о горизонтальных размерах кучевых облаков, их скоплений и в целом об облачных полях *Cu*.

Большинство исследователей внешний контур горизонтального сечения *Cu* считают эллипсом с максимальным размером – диаметром. По данным [76], над Украиной в 70% случаев диаметр кучевого облака не превышал 2 км и, согласно [21], над этой территорией значения среднего диаметра составляют 0,8 км в случае *Cu hum.*, 1,2 км – *Cu med.* и 1,6 км – *Cu cong.*

При мощности кучевого облака до 1,5 км горизонтальные его размеры обычно больше вертикальных, а более мощные облака «вытянуты вверх», превышая свои горизонтальные размеры. Если же мощность облака составляет примерно 1,5 км, значения диаметра и мощности близки [62].

Следует отметить, что имеющиеся данные о полях кучевых облаков относятся к территориям Украины и Молдовы, но они показательны [21] и для других районов умеренных широт.

Исследования, проведённые над Украиной, привели к выводам о том, что модальное значение балла облачности *Cu hum.* и *Cu med.* составляет 3 балла [76]. Вместе с тем средние суточные значения не отражают истинной картины. Дело в том, что ночью кучевые облака не наблюдаются или наблюдаются редко, а днём, особенно после 10 ч и вплоть до вечера, балл кучевой облачности превышает среднее значение. Так, согласно [76], в 10–11 ч. отмечается в среднем 3,1 балла облаков *Cu*, в 11–12 ч – 4 балла, в 13–14 ч – 5 баллов, в 15–16 ч – 4,6 балла, в 17–18 ч – 3,8 балла. С ростом балла облачности растут и средние размеры облаков: при увеличении балла от 1–3 до 7–9 средний диаметр облаков растёт от 1,3 до 1,6 км.

Исследования, проведённые в России и США, показали, что структура утренних и вечерних полей облаков неодинакова. Утром облака распределены по небосводу более или менее равномерно, а их локальные группы сравнительно редки. После полудня наиболее крупные («материнские») кучевые облака (обычно *Cu cong.*) часто бывают окружены большим количеством более мелких облаков, т.е. формируются группы *Cu*, в которых прослеживается недостаток *Cu med.* по сравнению с их количеством утром. Группы кучевых облаков имеют форму, близкую к круговой, а их горизонтальные размеры над Украиной [21] обычно не превышают 2–3 км (над Флоридой – 8–9 км). При этом у «материнских» облаков средний диаметр составляет 1,5 км, а у более мелких облаков, окружающих «материнские», средний диаметр имеет порядок сотен метров. Если оценить поля кучевых облаков в целом, то получится, что утром и днём преобладают более мелкие *Cu*, а вечером – более крупные [77].

Горизонтальные размеры кучевых облаков подвержены большому суточному ходу. По данным над Украиной, приведённым в [24], средний диаметр кучевых облаков от утренних значений (0,85–1,0 км) испытывает увеличение к полуденным (1,5 км), затем находится в пределах 1,45–1,53 км и, наконец, несколько увеличивается до 1,60 км в 18–19 ч. Итак, в период времени с 12 до 19 ч средний диаметр облака колеблется в пределах 1,45–1,60 км. В ранние утренние часы горизонтальные размеры кучевых облаков очень малы и не достигают одного километра. В ночное время над сушей *Cu*, как правило, отсутствуют. Используя метод слоя, Н.С. Шишкин [78] определил, что количество конвективных облаков растёт с увеличением вертикального градиента температуры, а неустой-

чивость воздуха, связанная с большими положительными значениями этого градиента, как известно, наибольшая около 14 ч. В результате наибольшего количества кучевых облаков следует ожидать в дневное время, тогда как наибольшего вертикального развития и связанной с ним горизонтальной протяжённости их – в вечернее.

В 1957 г. производилась аэрофотосъёмка кучевых облаков над Флоридой (США), что позволило автору [77] сделать некоторые выводы. Так, *Cu*, образовавшиеся первыми, обычно находятся далеко друг от друга. Через 30–60 мин они уже образуют обширные поля, в центре которых размещаются наиболее крупные и расположенные близко друг к другу *Cu*.

По данным [58], в умеренных широтах суточный ход количества облаков *Cu hum.* – *Cu cong.* выражен столь же отчётливо, как и их горизонтальной протяжённости. От 8 до 12 ч количество облаков резко увеличивается, достигая максимальных значений в 12–14 ч, а затем постепенно уменьшается к вечеру. В период от 20–21 ч до 6 ч утра внутримассовые кучевые облака обычно отсутствуют. Характерно, что наибольшее количество облаков *Cu hum.* – *Cu med.* отмечается в 11–13 ч, а *Cu cong.* – с 13 до 16–17 ч. Средний балл *Cu* в летние месяцы в районе Москвы оценивается в 3–5 баллов [7], а в 80% случаев не превышает 6 баллов.

Количество облаков *Cu* имеет и выраженный годовой ход. Зимой кучевые облака практически не встречаются в тех районах, где выражены изменения характера подстилающей поверхности в течение года, в марте они появляются, составляя 3,7 баллов в апреле и мае, а в июне или июле достигают максимума (4,1 балла), после чего уменьшаются до 3,5 баллов в сентябре [76].

В [9] горизонтальная протяжённость кучевых облаков оценивается значениями 1–5 км, но *Cu cong.* – 2–10 км, а *Cb* – 5–50 км.

Как показали фотографии с искусственных спутников Земли и самолётов, поля облаков *Cu hum.* и *Cu med.* покрывают площади, достигающие 10^5 – 10^6 км² [21]. Эта же информация позволила сделать вывод о том, что над крупными водоёмами и количество, и размеры облаков меньше, чем над сушей, что связано с различными теплофизическими свойствами почвы и воды.

Кучево-дождевые облака (*Cb*), во многом похожие на кучевые, особенно на кучевые мощные (*Cu cong.*), имеют и различия с ними – в форме, вертикальных и горизонтальных размерах, в характерном балле облачности.

Так, большая часть однокучевых облаков типа *Cb calv.* приблизительно цилиндрична, в то время как форма и размеры многоячеевых

облаков могут быть различными и зависят в основном от взаимного расположения конвективных ячеек внутри облака. Как указано в [21], внешне многоячейковые *Cb* часто напоминают кочан цветной капусты.

Оценить горизонтальный размер кучево-дождевого облака нелегко. Как правило, развитые *Cb* – *Cb incus* объединяются, поэтому оцениваются как сплошная облачность. По оценкам пилотов гражданской авиации, горизонтальные размеры *Cb* имеют наибольшую повторяемость в диапазоне 11–20 км, затем – в диапазоне 6–10 км. Диспетчеры гражданской авиации считают, что градация 11–20 км встречается почти в два раза чаще, чем градация 6–10 км. И пилоты, и диспетчерский состав отмечают, что *Cb* редко имеют диаметр более 50 км [38], что хорошо согласуется с данными, приведёнными в [9]. В [21] упоминается о необходимости корректировать все данные о *Cb*, поскольку полёты самолетов гражданской авиации проходят над облаками, следовательно, оценённые горизонтальные размеры относятся в основном к вершинам кучево-дождевых облаков. Если к тому же самолёт пролетает над наковальной, то пилот определит диаметр *Cb*, который, по [59], может в несколько раз превышать диаметр средней или нижней части облака.

Наковальни облаков *Cb incus* имеют большие горизонтальные размеры. Согласно данным [60], в 60% всех случаев (из 17 полетов) наковальня превосходила 30 км; в нескольких случаях длина *incus* достигала 60–70 км. Такие длинные наковальни характерны для фронтальных *Cb*, когда под общей наковальной могут быть расположены несколько *Cb*, наковальни которых сливаются.

Размеры кучево-дождевых облаков, в том числе горизонтальные, очень сильно зависят от атмосферных условий, времени года и суток, широты места, характера подстилающей поверхности. В [21] приводятся значения горизонтальных размеров радиоэха *Cb*, которые над различными районами США составляют 1,8–6,2 км (для сравнения – в Киеве средний диаметр *Cb* составляет 7 км). В целом же значения горизонтального диаметра кучево-дождевых облаков, как правило, заключены в интервале от 2–5 до 8–10 км. Площади кучево-дождевых облаков по радиоэху составляют, согласно [21], от десятков квадратных метров до сотен квадратных километров: в районе Москвы они составляют обычно 25–60 км², в районе Санкт-Петербурга – около 10 км² для внутримассовых ливневых *Cb* и около 40 км² для грозовых *Cb*, в районе Киева – около 42 км². В целом в 88% случаев ливневых *Cb* площадь радиоэха не превышает 70 км², но при грозовых облаках может составить значения и более 100 км².

Средний балл облаков *Cb* больше, чем *Ci*, и составляет чаще всего 7–9, хотя нередко случаи полностью закрытого небесного свода. В умеренных и особенно низких широтах *Cb*, как и *Ci cong.*, одиночными бывают редко, характернее их групповое объединение или расположение полосою (в последнем случае это – фронтальные облака, особенно связанные с быстро сдвигающимися фронтами).

Количество облаков *Cb* имеет суточный и годовой ход, но он проявляет отличия от ходов для кучевых облаков. Так, в суточном ходе наибольшая повторяемость кучево-дождевых облаков приходится на вторую половину дня, поскольку требуется время для развития конвекции, образования кучевых облаков и их роста до *Cb*.

В годовом ходе зимний минимум количества *Cb* не имеет таких низких значений, как в ходе кучевых облаков. Это связано с тем, что зимой наблюдаются *Cb* фронтального происхождения.

4.4.3. Границы и мощность облаков вертикального развития

Вертикальная структура облаков – расположение их границ и протяжённость между ними – важная характеристика любых облаков, имеет для *Ci* и *Cb* особое значение, поскольку непосредственно связана с состоянием атмосферы, при котором эти формы облаков формируются. Кроме того, такие формы могут в большой мере затруднить или даже сделать невозможной – в зависимости от вертикальной структуры – работу авиации. Вертикальная структура *Ci* и особенно *Cb* помогает также понять некоторые особенности земной атмосферы, в частности процесс увлажнения слоёв выше тропосферы.

Высота расположения нижней границы *Ci* и *Cb* облаков определяется в первую очередь относительной влажностью у подстилающей поверхности (в расчётные формулы для определения высоты нижней границы этих облаков входят дефицит точки росы у подстилающей поверхности, температура воздуха, от которой сильно зависит относительная влажность, а также непосредственно относительная влажность у подстилающей поверхности). Нижняя граница *Ci* и *Cb* поэтому изменяет свою высоту в течение года и суток, в зависимости от расположения места наблюдения.

В литературе имеются указания на колебания этой величины в широком диапазоне значений. Так, согласно [4, 5], в умеренных широтах основания кучевых облаков находятся на высоте 0,8–1,5 км, но в сухие жаркие периоды могут подняться до 2,5–3 км и выше. По [21], колебания

высоты нижней границы кучевых облаков ещё больше. Так, над равнинными районами умеренных широт основания кучевых облаков располагаются между 0,5 и 1,5–2,0 км. В Киеве, где значения относительной влажности у земли невелики, а летом – малы, высота нижней границы *Ci* более чем в 50% от общего числа случаев в летнее время превышает 1,8 км, а во влажном климате Санкт-Петербурга – в 80% случаев ниже 1,4 км. Над Москвой *Ci* чаще всего имеют основания на высотах 1,0–1,4 км [9]. В [8] диапазон значений высот нижней границы *Ci* расширен до 0,3–3,0 км. В низких широтах высота основания конвективных облаков находится, согласно [24], в среднем на 0,5–1,0 км выше, чем в умеренных широтах.

Годовой ход средней высоты нижней границы кучевых облаков по данным над Украиной и Молдовой [21] выглядят следующим образом: нижняя граница повышает свою высоту от 1,42 км в апреле до 1,77 км в июле и августе, сохраняя высокое значение 1,76 км в сентябре. Для зимнего периода кучевые облака не характерны.

Суточный ход этой же величины при тех же условиях (в период с апреля по сентябрь над теми же регионами) свидетельствует о повышении основания кучевых облаков с 10–11 ч до 17–18 ч (от 1,18 км до 1,95 км, причём в околополуденные часы – 12–14 ч – высота нижней границы составила 1,51–1,57 км). Над большей частью Европы и США максимальная повторяемость в околополуденные часы приходится на значения высоты нижней границы кучевых облаков, равные 1,2–1,6 км [12, 58]. Над Москвой наиболее вероятно расположение основания *Ci* на высотах 1–1,2 км утром и 1,6–1,8 км днём [79].

Обобщая приведённые данные, можно сделать вывод о том, что средняя высота основания *Ci* имеет минимальные значения утром и максимальные – в 16–18 ч местного времени, причём амплитуда суточного колебания может превышать 600–800 м.

В [58] описана общая картина начала развития кучевых облаков. Утром конвекция приводит к образованию *Ci fr.* на очень низком уровне. Дальнейшее развитие конвекции приводит к разрушению этих облаков, а в 9–10 ч кучевые облака снова возникают, но на большей высоте.

Понятие высоты верхней границы различных *Ci* в общем их поле является до некоторой степени условным, так как в каждый момент времени и в одном и том же районе индивидуальные облака имеют разную мощность, а следовательно, различную высоту верхней границы, которая зависит от стадии развития облака. Такая неодинаковость развития свидетельствует о неоднородности подстилающей поверхности и особенно типична для *Ci cong.*

Высота верхней границы кучевых облаков, как и высота основания, колеблется в широком диапазоне значений, в случае *Cu cong.* может в отдельных случаях достигать 7–8 км, а в тропических и экваториальных районах – даже 12 км [8, 58, 59]. В летние месяцы, согласно [63], вершины конвективных облаков достигают тропопаузы, в отдельных случаях – 12–13 км и более, в переходные сезоны высота вершин не превышает 7–7,5 км, зимой – 3–4 км.

Значения мощности кучевых облаков различаются не только для разных широт, времени года и суток, физико-географических особенностей места наблюдения, но и даже в одном и том же поле облаков можно встретить как *Cu* толщиной в десятки и сотни метров, так и *Cu* толщиной 1–2 км, а также более мощные *Cu cong.*

Среди кучевых облаков наибольшей изменчивостью мощности обладают *Cu cong.*, которые сильнее зависят от интенсивности конвекции. В умеренных широтах *Cu cong.* имеют мощности в пределах от 1–1,5 до 4 км, а иногда и до 5–5,5 км (Москва и Санкт-Петербург) [58]. В то же время *Cu hum.* и *Cu med.* имеют значения вертикальной мощности от нескольких десятков метров до километра (Москва и Санкт-Петербург). Наибольшая повторяемость приходится на градацию мощности 0,26–0,50 км в случае *Cu hum.* – *Cu med.* и 1–1,5 и 1,51–2,0 км – в случае *Cu cong.*

Если же рассматривать значения мощности кучевых облаков отдельно для каждой станции, то окажется, что над Москвой и Санкт-Петербургом [79] мощность составляет 0,4–0,6 км для *Cu hum.* и *Cu med.*, 1,9–2,0 км – для *Cu cong.* Над Украиной, согласно [21], средние мощности для *Cu hum.* равны примерно 0,5 км, для *Cu med.* – 1,13 км, для *Cu cong.* – 2,38 км. Кроме того, при оценке повторяемости различных значений мощности кучевых облаков всех видов над Украиной по градациям [76] оказалось, что наибольшие значения повторяемости приходятся на градации 1,01–1,50 км и 1,51–2 км, несколько меньше – на градации 2,01–2,50 км и 0,51–1 км. В целом же на градации мощности от 0,51 до 2,50 км приходится 78% от общего числа кучевых облаков.

Годовой ход средней мощности кучевых облаков можно проследить по данным для Украины и Молдовы за период с апреля по сентябрь (в зимнее время кучевые облака, как указано выше, очень редки) [21]: средняя мощность увеличивается от 0,5 км в апреле до 1,06–1,09 км в июне–августе, а в сентябре – заметно уменьшается (до 0,73 км).

В суточном ходе средняя мощность кучевых облаков увеличивается от 10–11 ч до полуденных (от 0,70 до 1,14 км), а затем, сохраняя довольно

высокие значения в 13–15 ч (1,08–1,07 км), уменьшается к 17–18 ч до значения 0,65 км.

Высота основания кучево-дождевых облаков оценивается в [4, 5] значением 0,4–1,0 км. Точно определить высоту нижней границы кучево-дождевых облаков трудно из-за выпадения из них интенсивных осадков. Наблюдатель визуально объединяет верхнюю часть слоя осадков с нижней частью облаков, в результате чего высота нижней границы *Cb* занижается. При радиолокационных наблюдениях радиоэхо от *Cb* объединяется с радиоэхом от осадков, следовательно, определение нижней границы *Cb* опять-таки затруднено. По грубым оценкам высота нижней границы *Cb* примерно равна средней высоте нижней границы *Cu* – 1–2 км. Согласно [8], высота основания *Cb* приходится на значения 0,6–2,0 км.

В умеренных широтах над территорией России и сопредельных государств средняя высота основания *Cb* составляет 1–1,5 км, причём летом наблюдаются максимальные значения, зимой – минимальные [21, 72].

В [7] приводятся значения повторяемости высоты нижней границы *Cb* в различных интервалах высот над европейской частью страны. При максимальной повторяемости значений высоты основания *Cb* в интервале 0,6–1,0 км весной и летом второе место среди всех занимает интервал 1,0–1,5 км, а осенью и зимой – интервал 0,3–0,6 км. Эти данные хорошо согласуются с вышеприведёнными.

С севера на юг значения высоты нижней границы в среднем возрастают. Одним словом, высота нижней границы кучево-дождевых облаков зависит от притока тепла к подстилающей поверхности, поскольку относительная влажность у земли, определяющая положение уровня конденсации, зависит от температуры подстилающей поверхности.

Верхняя граница кучево-дождевых облаков над европейской территорией страны расположена в среднем на уровне 4,5 км, хотя нередко достигает 11 и даже 14 км [8, 9]. В [24] сопоставляются данные о верхней границе *Cb* над территорией России и сопредельных государств, а также над территорией США – 16 и 18,7 км соответственно. В [58, 59] по большому материалу сделан вывод о том, что вершины *Cb* чаще всего находятся на высоте 8–12 км. Наибольшей протяжённостью по вертикали и высотой верхней границы обладают грозовые *Cb*.

Хорошо развитые по вертикали кучево-дождевые облака пронизывают большую часть тропосферы, достигая иногда 16–18 км, а в тропиках даже превышают 20 км [24, 58]. Итак, иногда вершины кучево-дождевых облаков достигают тропопаузы, а наиболее развитые могут порой прони-

кать вершинами в тропопаузу и даже «пробивать» ее, «заглядывая» в стратосферу.

Пересечение тропопаузы связано с большими запасами кинетической энергии, накопленной кучево-дождевыми облаками под тропопаузой. «Пробой» тропопаузы облегчается локальным уменьшением устойчивости над растущими *Cb*, связанными с интенсивными турбулентными и конвективными движениями в слое, близком к вершине.

Вовлечение окружающего воздуха в конвективные элементы мало уменьшает силу плавучести в той части вершины, которая проникла в стратосферу, поскольку понижение температуры из-за испарения облачных элементов, граничащих с безоблачными пространствами, частично или даже полностью компенсируется относительно высокими температурами вовлекаемого стратосферного воздуха [24].

По оценке, приведенной в [80], в стратосферу проникает от 20 до 60% воздуха, содержащегося в восходящем потоке под тропопаузой. Остальной воздух растекается в тропосфере, образуя наковальню. Наибольшее количество воздуха проникает сквозь тропосферу в крупных квазистационарных *Cb*. Таким образом, кучево-дождевые облака играют существенную роль в переносе водяного пара в стратосферу, куда обычные конвективные потоки не проникают. В отдельных случаях вершины *Cb* «пробивают» тропопаузу на 200–600 м, а иногда – на 2 100 м [59]. Тогда инверсия над облаком играет роль как бы тропопаузы, но на более высоком уровне.

Толщина (вертикальная мощность) кучево-дождевых облаков увеличивается с севера на юг, испытывая годовые колебания. В [4, 5] указывается, что толщина *Cb* составляет несколько километров. В [21] для европейской части нашей страны средняя толщина *Cb* оценена примерно в 4 км летом (в 90% от общего числа случаев вертикальная протяжённость облака меньше 9 км), а в переходные сезоны – меньше в 1,5–2 раза по сравнению с летом. Зимой *Cb* в средних широтах, особенно континентальных, встречаются редко, чаще – внутри облачной зоны *Ns–As* (по [21], «затоплены внутри *Ns–As*»), поэтому для средних широт в зимнее время надёжные значения толщины *Cb* указать трудно, хотя для отдельных *Cb* они и встречаются в литературе. Над центральной и южной частями России и сопредельных государств значения толщины *Cb* близки к 2–3 км, но иногда могут и превысить 6–7 км.

Согласно [7], средние значения толщины *Cb* составляют 1,5 км зимой, 3 км – весной, 4,6 км – летом, 2,6 км – осенью; по повторяемости значений мощности *Cb* в различных интервалах также можно проследить годовой

ход этой величины. Так, зимой наибольшая повторяемость толщины сравнительно редких *Cb* приходится на градацию 1–2 км, несколько меньшая повторяемость – на более низкие значения, весной – на интервалы 1–2 и 2–3 км, летом – на 2–3 км при увеличении повторяемости мощности *Cb* в интервале с более высокими значениями, осенью – на 1–2 и 0,5–1 км.

В тропических областях конвективные облака обладают большей вертикальной мощностью, чем внетропические [22].

Таким образом, в целом кучево-дождевые (отчасти и кучевые мощные) облака являются самыми мощными среди облаков всех форм.

4.5. Некоторые метеорологические величины и их профили, характерные для облаков вертикального развития

Свойства совокупности капель и кристаллов, какой является облако, зависят от температуры, влажности, характера и скорости движений воздуха в ней, а также от всех изменений в этой совокупности. Поскольку в облачной среде, особенно в кучевых и кучево-дождевых облаках, изменения в полях основных метеорологических величин наблюдаются непрерывно, капли и кристаллы постоянно находятся в процессе эволюции – возникают, растут, замерзают, сталкиваются, сливаются и слипаются, испаряются, иногда исчезают, выпадают из облака (если оно кучево-дождевое), представляя собой атмосферные осадки. Кроме того, в таких облаках, как кучево-дождевые, выпавшие осадки снова могут вернуться в облако и временно стать облачными частицами. Образование и развитие кучевообразных облаков всегда приводит к деформации полей метеорологических величин [62].

Поля всех метеорологических величин в конвективных облаках (кучевых и кучево-дождевых) представляют собой научный и практический интерес. В плоскости этого интереса – и понимание того, как образуется, развивается и разрушается конвективное облако, как складывается сложный процесс облакообразования в кучево-дождевых облаках. Кроме того, на определённых участках полей температуры и влажности в конвективных облаках могут создаться условия для обледенения самолётов. Особый интерес вызывает очень сложное поле вертикальных и горизонтальных движений в облаках вертикального развития, а также вокруг этих облаков. С этим полем связаны явления «болтанки» самолётов, микроструктура облаков, процесс формирования осадков, да и в целом динамика конвективного облака.

В настоящем разделе будут рассмотрены вопросы характера и скорости движений в кучевых и кучево-дождевых облаках, распределения температуры и влажности в них, а также в околооблачном пространстве, формирования и выпадения осадков.

4.5.1. Режим движения в облаках вертикального развития и околооблачном пространстве

Кучевообразные (конвективные) облака – *Cu* и *Cb* – образуются в почти вертикальных восходящих (конвективных) движениях – термиках. Термики – это устойчивые вертикальные потоки, имеющие характер струи или конвективного пузыря. Во втором случае потоки состоят из нескольких изолированных объёмов воздуха, поднимающихся друг за другом. Как уже упоминалось, пузырь состоит из более тёплой полусферической передней части и шлейфа более холодного воздуха в тыловой части. Согласно [9], пузыри живут недолго – кучевые облака, существующие часами, состоят из нескольких сменяющих друг друга пузырей.

В атмосфере наблюдаются и так называемые «трубы», с которыми также может быть связано образование конвективных облаков. Трубы зарождаются при слабом ветре над отдельными неравномерно нагретыми участками подстилающей поверхности, например над склонами, освещёнными солнцем, или над более тёплыми участками почвы, или над их границами. Кучевые облака могут рядами выстраиваться параллельно линии берега моря или линии раздела температуры (влажности) в нижней атмосфере. Под воздействием ветра атмосферные трубы могут изгибаться.

Таким образом, облака вертикального развития так или иначе связаны с конвекцией воздуха, в какой бы форме она ни проявлялась. Конвекцию усиливает неустойчивость воздуха, которая, как известно, ярче всего проявляется в летний период, в дневное время, а также при адвекции холодного воздуха на тёплую поверхность. Когда термик достигает уровня конденсации, в нём выделяется тепло, поэтому его подъём обычно ускоряется. При этом, если термик имел характер пузыря, то при ускорении пузыря может образоваться струя, увлекающая за собой непрерывный ток воздуха, как это и бывает в случае струи. За счёт увеличения скорости струя может «пробиться» и в устойчивые слои атмосферы, где она, охлаждённая в процессе адиабатического подъёма, продолжает свое движение в течение некоторого времени по инерции.

Конвективные облака – это в большинстве случаев изолированные массы воздуха, однако окружающий эти массы воздух тоже оказывается участником процессов развития облака, совершая компенсирующие движения относительно движений в облаке и также оказываясь частично вовлечённым в облачную систему. Более того, для кучевообразных облаков характерны процессы вовлечения воздуха из околооблачного пространства в систему облака через его боковую поверхность и процесс истечения воздуха из облака, т.е. обмен между облачным и околооблачным воздухом [62]. Обмен может осуществляться посредством как упорядоченных, так и неупорядоченных движений (турбулентная диффузия). Обычно отмечают преобладание вовлечения через границы нижних двух третей облака и истечения воздуха из его вершины. В [20] утверждается, что всё облако перемешивается с окружающим воздухом. Вклад турбулентного вовлечения максимален в менее развитых кучевых облаках, а в *Cb* (иногда в *Cu cong.*) основную роль должно играть упорядоченное вовлечение.

Вывод о распространении процессов вовлечения воздуха в облако и истечения воздуха из облака на всю толщу развитых кучевообразных облаков подтверждают исследования, проведённые в [81]. В них показано, что зона втока воздуха в *Cb* в период его развития расположена в слое до двух километров от поверхности земли, а в период выпадения осадков зона втока в *Cb* находится на высоте 5 км.

Итак, вовлечение может быть связано с двумя процессами:

1) у краев облака создается турбулентное перемешивание облачного и околооблачного воздуха, что приводит к вовлечению последнего в облачную систему;

2) движение компенсационного характера – вовлекаемый воздух пополняет убыль воздуха, ускоренно перемещающегося в струе вверх.

Вышеупомянутые стороны «жизни» облака нуждаются в тщательном изучении и осмысливании. При всех различиях в значениях параметров, характеризующих режим движения в конвективных облаках над разными территориями, на разных участках одного и того же облака, всё-таки возможно создать общую картину.

Наличие внутри облачной массы вертикальных воздушных потоков с различными горизонтальными сечениями является характерной особенностью всех видов и разновидностей кучевых облаков. Горизонтальные же размеры воздушных потоков изменяются от долей метра до десятков и сотен метров. Не следует считать, что в конвективных потоках скорость и направление сохраняются сколько-нибудь длительное время. Лишь в отно-

сительно широких воздушных потоках (с горизонтальными размерами примерно 10^2 – 10^3 м) значение и направление скорости сохраняются почти неизменными в течение нескольких минут. Такие крупные и сравнительно устойчивые потоки, согласно [58, 59], связаны с крупными термиками.

В облаках *Cu hum.* – *Cu med.* обычно имеется один, реже – два или три индивидуальных восходящих потока [58]. В *Cu cong.* их число может достигать до четырех-пяти, что находит своё подтверждение в многокупольной форме их вершин (каждому потоку соответствует свой купол).

Вблизи боковых граней всех видов кучевых облаков, а также между восходящими потоками воздух либо оседает, либо не имеет явно выраженного направления движения. В *Cu hum.* нисходящие движения локализуются вблизи боковых границ облака и чаще всего занимают не более 10–20% его площади сечения [58, 59].

В нижних двух третях облаков *Cu hum.* и *Cu med.* (если они не находятся в стадии распада) восходящие потоки занимают не менее 60–80% объема, а у *Cu cong.* доля облака, занятого восходящими потоками, составляет лишь 30–40%; в верхней же трети кучевых облаков восходящие потоки имеют меньшие скорости и занимают не более 20–30% объема облака. Остальная часть внутриоблачного воздуха чаще всего подвержена настолько сильному турбулентному перемешиванию, что даже трудно определить преобладающее направление движений. Сказанное особенно относится к облакам, которые уже завершили свой рост по вертикали.

Следует заметить, что взаимодействие конвекции и турбулентности носит достаточно сложный характер. С одной стороны, турбулентность способствует развитию конвекции, вызывая рост вертикального градиента температуры в устойчивых слоях (термический фактор турбулентности); в слоях, где вертикальный градиент температуры больше адиабатического, динамическая турбулентность (усиление ветра у поверхности земли после разрушения приземного устойчивого слоя) порождает спонтанную конвекцию. С другой стороны, турбулентность препятствует развитию конвекции, ослабляя упорядоченное направленное движение беспорядочными пульсациями скорости и направления движения воздушных частиц и, кроме того, уменьшая силу плавучести за счёт снижения подъёмной силы Архимеда. Последнее связано с тем, что с развитием турбулентности усиливается процесс вовлечения (в ходе турбулентного перемешивания на боковых границах облачной и безоблачных масс воздуха последние частично вовлекаются в облачную массу). Из-за вовлечения облако не только не суживается по мере ускорения восходящего

потока с высотой, но расширяется (при этом водность уменьшается, а вертикальные движения в нём ослабляются [9]).

Таким образом, при зарождении конвекции турбулентность способствует её развитию. В дальнейшем же, в стадии сильной конвекции, турбулентность больше ослабляет конвекцию. Согласно [24], достаточно крупномасштабные турбулентные возмущения могут разрушить уже сформировавшиеся термики. В обширных областях внутри кучевых облаков, где наблюдается определённое направление движения, значение скорости в восходящем (нисходящем) потоке изменяется с высотой; кроме того, скорости вертикального движения различаются даже в соседних конвективных потоках.

Источником всех вертикальных движений является подъёмная сила Архимеда, а строго говоря, сила плавучести, т.е. результирующая силы Архимеда и силы тяжести (в случае нисходящих движений она отрицательна). Эта сила возникает под влиянием двух причин: более высоких температур внутри облака (на стадии его развития) и более высокой удельной влажности облачного воздуха, т.е. более высоких виртуальных температур по сравнению с окружающим воздухом.

Таким образом, рассматриваемую силу можно оценить по разности плотностей облачной массы и окружающего его воздуха или по разности температур этих масс, точнее, по разности их виртуальных температур [12].

По разным оценкам, даже при отсутствии более высоких температур в облаке по сравнению с окружающим воздухом разница в плотностях (в облаке и околооблачном пространстве) за счёт разницы значений удельной влажности весьма часто достаточна для того, чтобы объяснить вертикальные скорости, реально наблюдаемые в кучевообразных облаках. Способствует конвекции и процесс конденсации.

Нисходящие потоки в облаке вызывают прежде всего процессы вовлечения в облако более сухого окружающего воздуха и последующего частичного испарения капель. Это приводит к понижению и температуры, и водности воздуха в облаке, что не только уменьшает подъёмную силу, но и формирует ее отрицательное значение (ему соответствует движение вниз).

В зрелых конвективных облаках (*Cb*) вклад в формирование нисходящего движения в облаке вносят осадки. Падающие капли дают тот импульс, который при неустойчивой стратификации может вызвать нисходящий поток. Иногда именно импульс осадков является первым для формирования нисходящего движения. Хорошо известно, что в тех слоях облака, где идёт дождь, наблюдаются сильные нисходящие потоки, кото-

рые нередко простираются вниз под основание облака [12]. Увлечение воздуха выпадающими осадками, согласно [60], является главной причиной развития нисходящих потоков.

В облаках мелкой конвекции – *Cu hum.* и *Cu med.* – скорость восходящих потоков составляет 5 м/с (иногда достигает 10–13 м/с), а в облаках *Cu cong.*, где наблюдаются сильные восходящие и нисходящие потоки, их скорость достигает 10–15 м/с, а иногда и более высоких значений [9, 38, 82].

Скорости восходящих потоков в кучевых облаках растут с высотой, достигая максимальных значений выше середины облака, в верхней части облака и над ним движение восходящее; в крупных облаках (*Cu cong.*) с несколькими восходящими потоками профиль вертикальной скорости имеет несколько частных максимумов [21]. В [24, 62] описаны случаи, когда *Cu cong.* имеет два максимума. Второй максимум связан с проникающей конвекцией, когда вершины кучевых облаков «пробивают» устойчивые слои и проникают в вышерасположенный влажноустойчивый слой. Понятно, что скорости вертикальных движений в этих слоях различаются сильно.

В [24] приведены данные о вертикальных движениях в зоне кучевых облаков над Украиной: наибольшие скорости вертикальных потоков составили 12 м/с в восходящих потоках и 6 м/с – в нисходящих. С увеличением мощности облака скорости восходящих потоков растут гораздо быстрее, чем нисходящих. В центральной части кучевых облаков шириной 0,6 диаметра облака во всем слое от основания до вершины облака воздух в 82% от общего числа случаев поднимается. Лишь непосредственно под верхней кромкой кучевых облаков более чем в половине случаев подъём сменяется медленным оседанием воздуха. Этот же вывод был ранее сделан в [62]. Кроме того, в [62] указано, что по результатам измерений воздух чаще всего оседает сбоку от *Cu* и над их вершинами. В 64% всех случаев воздух оседал в кольцевой зоне, окружающей облако и имеющей ширину до полутора его диаметров. Непосредственно у границы облака оседание воздуха отмечалось в 75–80% случаев.

С высотой в кучевом облаке увеличивается не только скорость восходящих движений, но и средний размер струй, охваченных восходящими движениями. Так, например, в [75] отмечается, что размер струй возрастает с высотой по крайней мере до 2–2,5 км.

Таким образом, в целом результирующее движение в конвективных облаках – восходящее. Этот вывод делается с учётом числа восходящих потоков, суммарной ширины восходящих струй, скорости восходящих потоков по сравнению с этими же параметрами нисходящих потоков.

Околооблачное пространство при облаках вертикального развития активно участвует в процессах динамики этих облаков, составляя с ними определённую систему. Так, все конвективные облака окружает область с нисходящими движениями. Сбоку от кучевых облаков и над их вершинами воздух чаще всего опускается. Это нисходящее движение связано с адиабатическим нагреванием воздуха, которое выражено более или менее отчётливо в зависимости от интенсивности оседания в окрестностях облаков.

Скорости окружающих нисходящих потоков при облаках мелкой конвекции *Cu hum.* и *Cu med.*, нагревающих окрестную атмосферу, составляют 3,5–9 м/с, при облаках *Cu cong.* эти скорости выше: 10–15 м/с, а в случае кучево-дождевых облаков достигают 30 м/с. Это связано с тем, что нисходящие движения вокруг облаков, как и внутри их, имеют в основном компенсационное происхождение, т.е. поддерживают баланс масс в зоне конвекции. Они компенсируют результирующее восходящее движение в облаке, поэтому чем интенсивнее конвекция, совпадающая с облачной массой, тем интенсивнее и оседание воздуха в массе безоблачной. Около *Cu cong.* [12, 83, 84] компенсирующие нисходящие движения наблюдаются вокруг верхней части, опускаясь ниже вершины примерно на 600 м. Непосредственно около облаков нисходящие движения могут наблюдаться и ниже, даже ниже их оснований. Согласно [21], над всеми видами и разновидностями кучевых облаков воздух опускается в слое толщиной от нескольких десятков метров до одной-двух сотен метров – в этом слое над кучевыми облаками воздух стратифицирован устойчиво. Если этот устойчивый надоблачный слой тонкий, а скорости восходящего вертикального движения в вершине кучевого облака большие, то облачный воздух, как уже указывалось выше, может и «пробить» устойчивый слой (за счёт накопленной кинетической энергии в более низких слоях) и подняться выше.

Выше надоблачного устойчивого слоя располагается конвективно-неустойчивый слой. Именно в этом случае кривая распределения вертикальной скорости с высотой и будет иметь два максимума, разделённых слоем с более низкими вертикальными скоростями в надоблачном устойчивом слое. Если же над облаком наблюдается более одного конвективно-неустойчивого слоя, что случается исключительно редко, то число максимумов на кривой распределения вертикальной скорости с высотой может превысить два.

В [60] рассмотрены случаи, когда восходящие струи в *Cb* «пробивают» не только слои изотермии и инверсии, а также облачные слои *Sc*, *As*,

Ас, но и слой тропопаузы. Иными словами, восходящий поток преодолевает очень устойчивый слой. Такие сильные восходящие потоки наблюдаются в центральной части вершины *Cb calv.* В стратосфере рост вершин *Cb calv.* резко замедляется по сравнению с верхней тропосферой, затем купола уплощаются и растекаются. Иногда при этом становится видимой перистая структура вершин. С.М. Шмелер [60] считает, что именно таким способом в стратосферу и поступает водяной пар.

Рассматривая восходящие движения и компенсирующие их нисходящие как в развитом облаке, так и в окрестностях всех конвективных облаков, интересно отметить особенность, связанную с соотношением горизонтальных сечений восходящих и нисходящих потоков. Общая площадь компенсационного оседания воздуха часто в два и более раз превышает общую площадь восходящих потоков, поскольку скорость опускания воздуха как компенсирующего движения меньше, чем его подъёма.

Интересно отметить, что площадь с оседанием воздуха около *Cu cong.* меньше, чем вокруг *Cu hum.* и *Cu med.* [21], так как нисходящие потоки, осуществляющие баланс масс, в *Cu cong.* составляют заметное количество и внутри облака.

Для кучевых облаков характерны как вертикальные, так и горизонтальные движения. Если с вертикальными движениями связан перенос водяного пара, центров конденсации, количества движения от подстилающей поверхности до верхней границы конвективного слоя, то посредством горизонтальных, в том числе горизонтальных турбулентных, движений осуществляется боковой обмен внутриоблачного воздуха с окружающей атмосферой [24, 59]. Вследствие конвективных и турбулентных движений происходит изменение атмосферной стратификации, что имеет большое значение для развития кучевой облачности.

Характерной особенностью поля кучевых облаков является наличие интенсивных изменений скоростей вертикальных и горизонтальных движений внутри облаков и в их окрестности. В околооблачной кольцевой зоне шириной 1–1,5 от диаметра облака, а для *Cu cong.* – даже два диаметра, пульсации скоростей горизонтальных потоков могут превышать 2–3 м/с [24]. Они максимальны у границ облака и убывают с удалением от них. Во всей зоне кучевого облака турбулентные пульсации скорости ветра в несколько раз превышают их значения в невозмущенной атмосфере, а суммарная площадь участков повышенной турбулентности сбоку от кучевого облака в 2–4 раза превышает площадь горизонтального сечения облака на этой же высоте. Интенсивность турбулентного переме-

шивания, имеющая максимальные значения у границ облака, особенно велика около основания и верхней кромки облачного слоя [59].

При развитии конвективных облаков интенсивность турбулентного обмена изменяется не только внутри самих облаков, но и в их окрестности. Значение коэффициента турбулентности (k) поэтому колеблется в очень широких пределах и зависит от формы и балла облачности, стадии развития облаков, условий, в которых это развитие имеет место.

Чем больше мощность кучевых облаков, тем выше степень турбулентных движений в них, что осложняет полёты самолётов из-за интенсивной «болтанки». Согласно [82], преднамеренно заходить в облака *Si cong.* запрещается, поскольку при сильной «болтанке» возникают большие перегрузки самолёта. Такие перегрузки могут оказаться выше допустимых и поэтому являются опасными.

В большинстве случаев пространственное расположение кучевых облаков позволяет избежать захода самолётов в них. Существуют две основные формы пространственного расположения кучевых облаков – хаотическая и регулярная [59]. Первая характерна для внутриконтинентальных районов с неоднородной подстилающей поверхностью, вторая часто наблюдается над океанами. Самым распространённым типом регулярного расположения кучевых облаков являются облачные полосы длиной от нескольких десятков до сотен километров.

Наиболее сложным в поле вертикальных и горизонтальных движений является самое развитое конвективное облако – кучево-дождевое. Важные звенья в представлении режима движения в развитых конвективных облаках получены исследователями Г. Байерсом и Г. Брейамом над территорией США.

Последующие исследования подтвердили вывод о том, что развитые конвективные облака имеют не просто струйное строение (сочетание конвективных потоков с определёнными направлением и скоростью движения), но и ячейковое (каждая ячейка как раз и имеет струйное строение), при этом каждая ячейка в составе облака является автономной.

По мнению Байерса и Брейама, как указано в [24], кучево-дождевое облако состоит из одной или нескольких конвективных ячеек, число которых может доходить до пяти-восьми. Каждая из ячеек последовательно проходит три стадии развития. Стадия выделяется в зависимости от преобладания знака вертикальной скорости: первая стадия – начальная, вторая – стадия зрелости, третья – стадия распада. В начальной стадии развития в большей части ячейки абсолютно преобладает восходящее движение

воздуха со скоростью 5–10 м/с, благодаря чему активно формируются частицы осадков. Растущее кучево-дождевое облако имеет вид *Cb calv*.

В стадии зрелости кучево-дождевое облако имеет вид *Cb inc*. В зрелых ячейках рядом с сильными восходящими потоками (вертикальные скорости достигают 25–50 м/с) возникает нисходящий поток (со скоростями 2,5–10 м/с). Восходящее движение наблюдается в центральной части ячейки, нисходящее – на периферии.

В нижней части ячейки и под ней формируется нисходящее движение за счёт увеличения в единичном объёме воздуха жидкой воды (в нижней части кучево-дождевого облака содержатся капли, в средней – капли и частицы крупы, в верхней – кристаллы) в сочетании с более низкой температурой воздуха.

За пределами ячейки в этой стадии отчётливо выражено нисходящее движение, которое приводит к сухоадиабатическому нагреву, тогда как в ячейке воздух при подъёме влажноадиабатически охлаждается.

В последней стадии нисходящее движение охватывает практически всю ячейку. Однако из-за малых скоростей оседания воздуха и испарения кристаллов при размывании облака остается наковальня в форме *Ci incus genitus* [24].

Если в кучево-дождевом облаке появляются дочерние ячейки, то облако становится мультиячейковым. В таком облаке, содержащем несколько ячеек на разных стадиях развития, распределение потоков более сложное, чем в одначейковом. Максимальные скорости восходящего движения наблюдаются в передней части облака (на высоте примерно 7 км), а в тыловой части преобладают нисходящие движения с максимальной скоростью около основания облака. Скорости нисходящего и восходящего потоков, как и в кучевых облаках, в кучево-дождевых облаках неодинаковы – скорости восходящего потока выше.

Еще более сложная картина потоков наблюдается в суперячейковых облаках. При благоприятных условиях (значительный поворот скорости ветра с высотой, чаще всего правый) восходящий поток, скорость которого может достигать 50 м/с, вблизи правого переднего сектора и нисходящий поток в тыловой части облака формируют замкнутую мезомасштабную циркуляцию. Эта циркуляция продляет жизнь облака, поскольку поддерживает пополнение облака влагой: в восходящий поток вовлекаются все новые массы воздуха справа от облака, где и образуются дочерние ячейки.

Восходящий поток в передней части суперячейкового воздуха настолько силен, что мелкие облачные частицы, выходя из переднего

выступа наковальни и падая вниз, опять могут быть унесены восходящими потоками в облако. Опускание и подъём облачных частиц в передней части кучево-дождевого облака может быть многократным, способствуя укрупнению облачных частиц.

В кучево-дождевом облаке скорость восходящего потока чаще всего растёт (хотя и немонотонно) от основания в сторону вершины, достигая максимальных значений в средней или предвершинной части, а затем убывает к вершине [66]. Такое распределение значений скорости восходящих потоков приводит к накоплению большого количества воды выше уровня максимальной скорости. И теоретические, и экспериментальные работы подтвердили существование этой зоны, водность которой в несколько раз выше тех значений, которые могут возникнуть при адиабатическом подъёме влажного воздуха. Эта зона получила название зоны аккумуляции. В ней и происходит накопление влаги до критического значения, при котором происходит выпадение осадков. Восходящие потоки существуют и в *Cb inc.*, но они слабы. В [60] указано, что над плоской поверхностью наковальни наблюдаются нисходящие потоки.

На уровне основания облака скорость поднимающихся масс воздуха обычно составляет около 1 м/с, но может достигать и 5 м/с. Такие значения измерены в облаках с наименьшими размерами. Однако в грозовых облаках восходящие потоки имеют скорости, превышающие значение 5 м/с и достигающие иногда 20 м/с и более [66].

Как правило, средние значения скорости конвективных струй внутри грозовых и градовых *Cb* на 2–3 м/с выше, чем в ливневых. Максимальные же значения восходящих движений в наиболее мощных грозовых и градовых облаках могут превышать и значение 50 м/с. В ливневых *Cb* максимальные значения вертикальной скорости составляют 30–40 м/с [21].

Ширина участков с наиболее высокими значениями вертикальной скорости (в середине или верхней трети облака) обычно не превышает 200–300 м. Внутри кучево-дождевых облаков, особенно зрелых и диссипирующих, всегда имеются участки, на которых воздух опускается. В растущих однопячейковых и суперпячейковых облаках зоны оседания воздуха расположены вблизи боковых границ облака, в первую очередь у тыловой границы относительно направления перемещения. В мультиспячейковых облаках нисходящие потоки развиваются также и во внутриоблачных участках, удалённых от боковой поверхности кучево-дождевых облаков [24, 58].

Если облако *Cb* пересекает несколько конвективно неустойчивых слоёв (вариант проникающей конвекции), то описанное выше распределение

скорости восходящего движения с высотой усложняется: в каждом из этих интенсивно неустойчивых слоев будет отмечаться свой частный максимум. Иногда вторичный максимум скорости наблюдается и в наковальне.

Что касается нисходящих потоков в облаке *Cb*, то наиболее мощный из них располагается в зоне осадков, а более слабые имеют компенсационное происхождение [24, 58] и внутри зрелых, особенно диссипирующих, облаков встречаются на всех высотах.

Каждой стадии эволюции кучево-дождевого облака соответствует характерная циркуляция воздуха в подоблачном слое. В слое под растущим *Cb* происходит «циклоническое» втекание воздуха. В зрелом облаке под восходящим внутриоблачным потоком наблюдается «циклоническое вытекание», а под нисходящим – «антициклоническое» втекание воздуха. Последнее преобладает под диссипирующими *Cb*.

Растекающийся в стороны воздух под нисходящими потоками кучево-дождевого облака у поверхности земли увеличивает давление, образуя так называемый «грозовой антициклон» [58]. Он является куполом относительно холодного воздуха и играет роль мезомасштабного холодного фронта, связанного с увеличением скорости и порывистости ветра (фронт шквалов). Горизонтальное перемещение этого купола приводит к вынужденному подъёму влажнонеустойчивого воздуха – так образуются *Cb arcus*.

Очень важная особенность отмечена в [82]: во время перехода *Cu cong.* в *Cb* наблюдаются исключительно интенсивные восходящие движения воздуха, поскольку облако в этот период сильно развивается в вертикальном направлении. В это же время в верхней части облака преобладают интенсивные восходящие движения, а нисходящие являются более слабыми. Одновременно в нижней и средней частях кучево-дождевого облака наряду с сильными восходящими движениями наблюдаются и значительные нисходящие движения – холодный воздух опускается вместе с осадками.

Согласно [24], горизонтальные размеры конвективной ячейки в *Cb* составляют от 1,0–1,5 км до нескольких километров. При этом отдельные и даже смежные ячейки очень слабо взаимодействуют друг с другом. Таким образом, мультячейковые (многоячейковые) *Cb* состоят из как бы автономных конвективных блоков, каждый из которых аналогичен одноячейковым облакам.

Все конвективные облака – и кучевые, и особенно кучево-дождевые – сильно зависят от сдвигов ветра (изменения скорости ветра с высотой). Большие сдвиги ветра разрушают кучевые облака, особенно облака мелкой

конвекции. Вместе с тем именно при больших сдвигах ветра образуются грозовые и градовые облака. По мнению И.П. Мазина, увеличение вероятности образования мощных *Cb* при больших значениях $\partial u/\partial z$ связано с тем, что осадки из наклонных (под действием сдвига ветра) облаков выпадают сбоку от основного восходящего потока [24]. В результате не происходит торможения конвекции падающими частицами осадков и увлечённым ими воздухом, не происходит и понижения температуры в облаке из-за испарения выпадающих осадков. Более того, испарение капель сбоку от восходящего потока увеличивает влажность воздуха около облака, поэтому вовлечение окружающего воздуха в конвективный элемент меньше ослабляет внутриоблачный подъём воздуха (известно, что интенсивность вовлечения увеличивается при пониженной влажности воздуха, окружающего конвективный элемент).

В [24] показано, что мощная термическая конвекция усиливается вертикальными сдвигами ветра.

Итак, сдвиги ветра способствуют образованию самых мощных кучево-дождевых облаков – грозовых и градовых, но подавляют развитие мелких кучевых облаков.

Вовлечение окружающего кучевые и кучево-дождевые облака более сухого воздуха осуществляется через боковые и верхнюю границы облака. Как уже указывалось, основные формы вовлечения – компенсационное и турбулентное. Первая форма связана с компенсацией масс, уносимых восходящими потоками, вторая – с турбулентным перемешиванием. В целом для всего конвективного облака вклады обеих форм вовлечения, согласно [21, 58], видимо, близки, хотя в разных частях облака может преобладать та или другая форма этого процесса. В [58] установлено: чем больше вертикальный градиент вертикальной скорости движения, тем интенсивнее компенсационное вовлечение; для турбулентного вовлечения такая зависимость не обнаружена.

Характерной особенностью в окрестностях кучево-дождевого облака является нисходящее движение, выраженное еще более ярко по сравнению с окрестностями кучевых облаков, даже *Cu cong.* Сбоку от верхней половины *Cb* воздух оседает со скоростью 0,5–1,5 м/с, что не исключает восходящих движений воздуха на отдельных участках околооблачного слоя с почти такими же скоростями [21]. Так, иногда рядом со зрелыми *Cb* возникает восходящее движение компенсационного характера по отношению к нисходящим движениям, которые являются, в свою очередь, компенсирующими относительно основных восходящих потоков в *Cb*.

Околооблачные слои воздуха с нисходящими движениями могут располагаться симметрично или асимметрично вокруг кучево-дождевого облака, что зависит от значений сдвига ветра. Так, при малом сдвиге ветра ($\partial u/\partial z$) ширина участков, на которых околооблачный воздух опускается, с разных сторон от *Sb* примерно одинакова, но при больших сдвигах ветра поле потоков воздуха вокруг *Sb* асимметрично, а перед передним краем облака (по направлению движения) располагается зона знакопеременных вертикальных движений [59, 84]. Над *Sb* воздух опускается в слое нескольких сотен метров. Однако замечено, что непосредственно над верхней кромкой растущих (или зрелых, с очень большими вертикальными сдвигами ветра) кучево-дождевых облаков имеется прослойка толщиной до 100–200 м с восходящими движениями.

Вместе с тем в целом в околооблачном пространстве среднее движение – нисходящее. Об этом свидетельствуют, как указано выше, все параметры вертикальных движений: число потоков, охваченных нисходящими движениями, их горизонтальная протяжённость, скорость нисходящих потоков по сравнению с восходящими.

В конвективных облаках, особенно в кучево-дождевых, а также в их окрестностях сильно развита турбулентность. Собственно говоря, интенсивное турбулентное перемешивание в атмосфере является одним из условий формирования таких облаков. По этой причине все характеристики турбулентности в конвективных облаках имеют более высокие значения по сравнению с облаками других форм, хотя в любых облаках наблюдается повышенная турбулентность – даже в слоистообразных облаках коэффициент турбулентности может быть, согласно [85], в несколько раз больше, чем во внеоблачной зоне. Что же касается кучевообразных облаков, то коэффициент турбулентности в кучевых облаках, согласно [21, 58], по данным измерений над Украиной даже в *Cu hum.* может достигать значений 80–100 м²/с и выше, а в *Cu cong.* – несколько сотен квадратных метров за секунду. При этом максимальные значения коэффициента турбулентности наблюдаются в верхней половине облака, поэтому они зависят от мощности облака и, следовательно, от его формы и вида (в *Cu cong.* максимальные значения коэффициента турбулентности примерно на 20% больше, чем в *Cu hum.*). Следует, однако, иметь в виду, что коэффициент турбулентности очень сильно изменяется от облака к облаку и даже от одного участка к другому внутри одного облака. Так, эти изменения составляют для кучевых облаков от нескольких единиц до 100–120 м²/с, а в самых мощных *Cu cong.* – 200–300 м²/с [58]. В кучево-

дождевых облаках коэффициент турбулентности составляет в среднем 300–600 м²/с, достигая в отдельных случаях 1 000–1 500 м²/с. Значения, превышающие 500 м²/с, прослеживаются на отдельных участках зрелых грозовых и градовых *Cb*, а для *Cb* в стадии распада коэффициент турбулентности составляет 100 м²/с и более низкие значения [7, 21].

Интенсивность турбулентного обмена в *Cb* растёт от нижней границы до уровня в верхней его части, расположенного на 1,5–2,0 км ниже верхней границы [59]. Об этом свидетельствует неправильная форма кристаллов в верхней части *Cb*. В [24] указано, что локальный максимум может наблюдаться вблизи уровня нулевой изотермы, где из-за таяния ледяных частиц при их движении воздух охлаждается, следовательно, здесь растёт вертикальный градиент температуры, увеличивая термический фактор турбулентности. Даже в наковальнях *Cb* коэффициент турбулентности значительно превосходит 100 м²/с. Весьма высоки и значения коэффициента турбулентности в перистых, образовавшихся из наковален *Cb* – *Ci inc.* и *Ci spiss.* (50–80 м²/с) [85].

Согласно [86], скорости турбулентных порывов в конвективных облаках велики. Так, амплитуды горизонтальных и вертикальных пульсаций скорости ветра внутри самых мощных из конвективных облаков (*Cb*) достигают 15–20 м/с [21]. Минимальная скорость турбулентных порывов отмечается в нижней половине *Cb* и равна 3 м/с [86].

Для кучевых и одноячейковых кучево-дождевых облаков характерно монотонное убывание коэффициента турбулентности по мере приближения к краям облака от его внутренних частей. В мультіячейковых *Cb* поле является результатом наложения локальных полей пульсаций в отдельных ячейках, а интенсивность турбулентного перемешивания в разных ячейках различна. Однако новые ячейки возникают на периферии кучево-дождевого облака, и именно в них турбулентность максимальна. Следовательно, в мультіячейковом *Cb* максимальные значения коэффициента турбулентности могут наблюдаться вблизи границ облака.

В окрестностях кучево-дождевых облаков зоны самой высокой турбулентности расположены впереди (относительно направления движения) облака *Cb*, что обусловлено его обтеканием воздушными потоками. Над *Cb* турбулентность ослабевает и на высоте 200–300 м над верхней границей облака принимает те же значения, что и в невозмущённой атмосфере.

Следует отметить, что сбоку от *Cb* и над ними значения коэффициента турбулентности редко превышают 100–200 м²/с; коэффициенты турбулентности под облаками выше, чем над ними и сбоку от них [21].

Сильная турбулентность в кучево-дождевых облаках создает перегрузки, угрожающие прочности самолётов, поскольку экипаж может встретить и восходящие, и нисходящие потоки воздуха со скоростями 20–30 м/с, причём эти потоки расположены на небольшом расстоянии друг от друга. В результате один и тот же самолёт может находиться под воздействием на разные свои части сильных потоков противоположного направления. Полёты в кучево-дождевых облаках запрещаются [82].

4.5.2. Распределение температуры и влажности в облаках вертикального развития и в околооблачном пространстве

Сложная система вертикальных движений в кучевообразных облаках формирует резко выраженную неоднородность термического поля. В этой сложной системе восходящих и нисходящих движений участвуют и облачные массы, и соседствующие с ними околооблачные. Те и другие составляют «возмущённую» атмосферу. В «возмущённой» атмосфере соседствуют перегретые и переохлаждённые участки, характерные для кучевообразных облаков. Воздух в конвективных потоках, связанных с восходящим движением, в начале развития облака (в более низких слоях, в облаках мелкой конвекции) перегрет, в нисходящих – переохлаждён. При этом чем шире конвективный поток, тем больше в нём перегрев воздуха [60]. Наибольший перегрев отмечается около оси облака, а к его краям убывает. Кроме того, на краях облака температура понижается и в процессе испарения облачных частиц в безоблачное пространство.

Согласно [60], в *Cu hum.* наиболее вероятны конвективные потоки поперечником около 100 м и перегревом в несколько десятых долей градуса. В самых развитых конвективных облаках – кучево-дождевых – поле температуры зависит от вида облака, поскольку *Cb calv.* и *Cb inc.* имеют свои особенности.

В случаях *Cb calv.* перегревы воздуха относительно невозмущённой атмосферы могут достичь нескольких градусов даже у самой верхней кромки облака. Горизонтальные размеры зон перегрева составляют несколько сотен метров, а иногда и километров. По мере удаления от оси облака, где перегрев наибольший, разность температур воздуха в верхней части *Cb calv.* и окружающем воздухе быстро убывает, переходит через нулевое значение вблизи края облака и, наконец, становится отрицательной – на краю облака за счёт испарения капель температура ниже, чем в невозмущённой атмосфере [60]. Если же действие указанного фактора

перекрывается адиабатическим нагреванием при нисходящих потоках, то температура на краях облака может быть выше, чем в невозмущённом пространстве.

Распределение температуры около верхней комки *Cb incus* существенно отличается от распределения при *Cb calv.* (были случаи, когда над *Cb calv.* разность температур в облаке и окружающем пространстве достигала 3°, а над *Cb inc.* эта же разность не превышает 0,9°). Более того, чаще всего на верхней границе наковальни температура воздуха ниже, чем в окружающем пространстве [60]. Встречающиеся здесь небольшие положительные аномалии показывают, что и в *Cb inc.* существуют восходящие потоки, но они слабы.

Весь слой с облаками *Cu* оказывается возмущённым в поле температуры даже при сравнительно небольшом количестве этих облаков [62]. Согласно [21], в подавляющем числе случаев температура на нижней границе кучевых облаков находится в диапазоне значений 3–15°C, что характерно для любого региона в умеренных широтах.

Температура на нижней границе кучевых облаков имеет суточный ход, связанный с ходом высоты расположения нижней границы, амплитуда которого составляет ± 2 –3°C.

Поскольку основания кучево-дождевых облаков располагаются чаще всего почти на тех же высотах, что и основания кучевых облаков, температура нижней границы *Cb* в тёплое время года имеет значения в том же диапазоне, что и температура на нижней границе *Cu*. Для холодного времени года кучевые облака нехарактерны и не имеют сколько-нибудь заметной повторяемости. Интересно, что увеличение высоты основания *Cb* от северных районов к южным не сопровождается существенным уменьшением температуры на этом уровне, поскольку рост высоты нижней границы *Cb* компенсируется увеличением температуры у подстилающей поверхности и, следовательно, в подоблачном слое.

Средние значения температуры на уровне основания конвективных облаков по данным Санкт-Петербурга, Москвы, Киева близки между собой (8,8, 8,1, 8,6°C соответственно); максимум повторяемости приходится на интервал 9–11°C; в 75% случаев колебания этой величины заключены в диапазоне 3–13°C, а полный диапазон колебаний составляет от –3 до 19°C [7].

Температура на верхней границе конвективных облаков зависит от их мощности. Поскольку мощность облаков мелкой конвекции (*Cu hum.*, *Cu med.*) в подавляющем большинстве случаев не превышает 1–2 км [21],

разность в температурах на нижней и верхней границах невелика – не более 13–15°C. Таким образом, *Cu hum.* и *Cu med.* являются преимущественно «тёплыми» облаками – температура в них выше 0°C.

У более мощных облаков *Cu cong.* верхняя половина чаще бывает переохлаждённой, на верхней границе температуры обычно имеют отрицательные значения: почти в половине случаев (по данным в районах Москвы, Киева, Санкт-Петербурга) значения находятся в интервале от –1,5 до –7,5°C [21]. При этом максимальная повторяемость значений температуры на верхней границе *Cu cong.* приходится на интервал от –1,5 до –4,5°C, а крайние значения этой величины заключены в диапазоне от –19,5 до 7,5°C [7]. Понятно, что повторяемость положительных температур убывает с увеличением мощности *Cu cong.* Например, над Киевом отрицательные значения температуры на верхней границе *Cu cong.* встречаются в 85% случаев [21].

Толщина кучево-дождевых облаков значительно больше толщины мощных кучевых облаков, поэтому в среднем температура верхней границы намного ниже, чем у *Cu cong.* Так, максимальная повторяемость температуры на верхней границе *Cb* приходится на интервал от –13 до –17°C, а крайние значения этой величины заключены в интервале от –1 до –37°C. Если же кучево-дождевые облака достигают уровня тропопаузы или «пробивают» её, то температуры верхней границы *Cb* в умеренных широтах могут составлять от –55 до –60°C, а в тропических широтах (с мощной тропосферой и, следовательно, высокой тропопаузой) – и более низкие значения, заключённые в интервале от –70 до –90°C. Таким образом, в большинстве случаев от 50 до 70–80% толщи кучево-дождевых облаков располагается выше нулевой изотермы [21]. Наиболее низкие температуры верхней границы наблюдаются у градовых и грозовых облаков, т.е. у самых высоких *Cb*. Как правило, именно они и «пробивают» тропопаузу.

Указанные предельные значения температуры на верхней границе самых мощных облаков не являются точными, ибо до вершин таких *Cb* самолёты не поднимались.

Следует отметить, что значения температуры, при которых происходит оледенение вершин развивающихся *Cu cong.*, не выявлены, однако по опытным данным эти температуры имеют значения в диапазоне от –23 до –6°C [21].

В целом поле температуры в облаках конвективных форм более сложное, особенно в *Cb*, чем в других облаках.

Кучевые облака в среднем являются «холодными» (разность температур в облаке и за его пределами на одной и той же высоте чаще бывает отрицательной), однако некоторые слои и даже целые облака, как указано выше, бывают и «тёплыми». Разность температур в облаке и около него зависит от стадии развития облака. Так, растущие облака большей частью толщи являются тёплыми, а основная часть зрелых и особенно распадающихся – холодными. Таким образом, в целом чаще всего разность температур в кучевом облаке и вокруг него имеет отрицательные значения, поскольку в облачном поле растущие облака составляют меньшинство – примерно 20 % всех кучевых облаков [21]. Согласно и [24], кучевые облака часто являются «холодными» вкраплениями в атмосферу, что особенно чётко выражено в случаях облаков мощностью более 2 км [20].

Термическая стратификация внутри кучевых облаков близка к безразличной [24, 87].

Из-за опасности полётов вблизи кучево-дождевых облаков, не говоря уже о полётах внутри них, данные о структуре полей метеорологических величин в зоне *Cb* до сих пор немногочисленны. В [86] проведен анализ полей метеорологических величин, в том числе поля температуры, в кучево-дождевых облаках. Согласно [86], внутри *Cb* есть участки и с положительными, и с отрицательными значениями отклонений температуры в облаке относительно окружающего воздуха.

В многоячейковых *Cb* может быть несколько участков со значительными отклонениями обоих знаков. При этом в одноячейковых облаках и индивидуальных ячейках, являющихся частью многоячейковых облаков, участки с наибольшими положительными отклонениями обычно расположены выше центра облака, а холодные участки совпадают с зоной осадков в нижней половине *Cb*. В растущих и зрелых *Cb* положительные отклонения (тёплые участки) или отсутствие отклонений отмечаются в двух нижних третях облака, а в верхней трети отклонения отрицательные (холодные участки). Распадающиеся *Cb* обычно холодные во всей своей толще. Как уже указывалось, аномально низкие температуры наблюдаются в вершинах *Cb*, «пробивших» тропопаузу [21].

Согласно [24, 86], в растущих и зрелых *Cb* тёплые участки связаны с более тёплыми относительно окружающего воздуха мезомасштабными восходящими потоками, за счёт которых облако развивается. В нижних двух третях облака разности температур между воздухом в облаке и за его пределами в среднем с высотой растут, достигая иногда 5–6°C [24]. В конце стадии зрелости значения указанной разности температур в верх-

ней части восходящего потока становятся отрицательными. Это означает, что подъём воздуха в самой верхней части *Cb* поддерживается уже не силами плавучести, которые определяются значениями разности температур в облаке и его окрестностях на одной и той же высоте, а запасами кинетической энергии, накопленной в нижней половине *Cb*.

Нисходящие потоки, особенно их средняя и нижняя части, обычно холоднее окружающего воздуха, а вблизи основания *Cb* – иногда на 4–5°C.

Итак, облака *Cu* и *Cb* не находятся в термическом равновесии с окружающей атмосферой [24]. Это связано с тем, что поля вертикальных движений и турбулентности внутри облака пространственно неоднородны, а воздух в окрестности этих облаков имеет свои параметры в выше-названных полях. В окрестности *Cu* и *Cb* знак разности температур в облаке и за его пределами зависит от того, какой из процессов выражен ярче: охлаждение из-за испарения облачных элементов или адиабатическое нагревание воздуха в нисходящих потоках.

Воздух под кучевыми облаками холоднее окружающего воздуха [62], следовательно, уровень конденсации достигается термиками по инерции. Под кучевой облачностью, в слое толщиной до нескольких сотен метров, разность температур под облаком и в невозмущённой части атмосферы чаще всего отрицательна. Под центральной частью кучевых облаков абсолютные значения разности составляют 0,3–0,5°C, хотя в отдельных случаях эти значения могут быть превышены в 1,5–2 раза [21]. Таким образом, слой конвекции расположен ниже уровня конденсации. Порции воздуха, которые достигли уровня конденсации по инерции (ускоренно поднимающийся воздух не может сразу «погасить» скорость по достижении слоя выравнивания температур с окружающим воздухом), получают дополнительный импульс благодаря выделившейся скрытой теплоте конденсации [62]. В результате эти порции воздуха поднимаются дальше, образуя кучевые облака. Итак, выше уровня конденсации частицы воздуха благодаря выделению теплоты конденсации приобретают дополнительную плавучесть.

Непосредственно над кучевым облаком преобладает охлаждение воздуха, вызываемое испарением здесь капель. В то же время на расстоянии в несколько десятков метров от вершины преобладает нагревание воздуха из-за его оседания над вершиной. Оседание воздуха усиливает устойчивость стратификации над полями кучевых облаков. Сбоку от *Cu* преобладающая часть внеоблачной зоны по мере развития облака разогревается [24], поэтому часто кучевые облака и являются холодными массами

в общем поле температуры, включающем в себя и поля кучевых облаков, и поля их окрестностей.

Выявлено различие в полях температуры над кучевыми облаками в зависимости от стадии развития облака. Оказалось, что над кучевым облаком может быть не только холодная, но и тёплая прослойка. Холодная надоблачная прослойка характерна для растущих кучевых облаков, а тёплая – для наиболее развитых облаков. В период распада кучевых облаков температурные возмущения над и под облаком постепенно исчезают.

Деформация поля температуры сбоку от кучевого облака происходит во всем конвективном слое. Вблизи боковой поверхности кучевого облака (на участках шириной примерно 0,4–0,7 горизонтального размера S_i на данном уровне) воздух холодный, а далее – вплоть до расстояния от облака, равного 1,0–1,5 его горизонтального размера, – располагается тёплый воздух [21, 62]. Причины такого расположения холодного и тёплого воздуха те же, что и проявляющиеся над кучевыми облаками: холодные участки возникают из-за потерь тепла на испарение облачных элементов, теплые – благодаря адиабатическому нагреванию опускающегося околооблачного слоя. Вблизи верхней трети S_i воздух почти всегда теплее, чем невозмущённая атмосфера [62].

Следует отметить, что понятие «холодных» и «тёплых» участков связано с небольшими разностями температур в околооблачном пространстве между возмущённой и невозмущённой частями воздуха: лишь близко к боковой границе облака указанная разность температур составляет 0,3–0,5°C, а с удалением от границы уменьшается [21].

Температурное поле в окрестностях кучево-дождевых облаков ещё более сложное, чем в окрестностях кучевых облаков.

Разности температур в мезомасштабных восходящих потоках и окружающем воздухе в тропосфере имеют максимальные значения в холодных зонах над растущими Cb , однако эти разности температур еще выше над Cb , пробившими тропопаузу. Так, указанные разности температур имеют значения более одного градуса в 29% случаев над тропосферными облаками и в 55% случаев – над Cb , пробившими тропопаузу [24].

Согласно [59], возмущения в поле температуры могут наблюдаться и в кучево-дождевом облаке, и вокруг него. Внутри облака возмущения температуры могут наблюдаться практически везде. Эти возмущения возникают в основном под действием двух факторов – вертикальных движений воздуха и фазовых переходов. Роль первых обусловлена адиабатическим нагреванием или охлаждением воздуха при перемещениях по

вертикали. Второй фактор связан с теми же вертикальными движениями, ибо восходящие потоки приводят к конденсации водяного пара и выделению скрытой энергии конденсации, а нисходящие – к испарению и затрате на этот процесс энергии.

Испарение происходит при любых нисходящих движениях – и в облаке, и за его пределами. Так, испарение происходит сбоку от облака, куда облачные элементы выносятся благодаря боковому турбулентному перемешиванию, и рядом с вершиной облака, куда облачные элементы попадают благодаря конвекции и вертикальным турбулентным потокам.

Перед растущими *Cb* нередко наблюдается холодная зона, которая, согласно [59], видимо, связана с восходящими движениями, сопутствующими обтеканию вершины. Сбоку от растущих *Cb* наблюдается более тёплая зона, обусловленная компенсирующими нисходящими движениями околооблачного воздуха.

Результаты [59] достаточно хорошо дополняются выводами [58, 86] о том, что наибольшие возмущения в поле температуры наблюдаются около быстро растущих и зрелых облаков, в первую очередь над купольной частью их вершин; рядом с облаком опускающийся воздух часто образует тёплые участки, где разность температур с восходящими конвективными потоками в облаке составляет не менее двух градусов. Эффект возмущения в поле температуры наблюдается, согласно [21], над *Cb* в слое до 300–500 м, причём довольно часто над участками с положительными значениями разности температур располагаются участки с их отрицательными значениями.

Область возмущённых значений в поле температуры в горизонтальном направлении достаточно велика и соизмерима с размерами облака *Cb*, вызывающего эти возмущения. Так, по данным [21], сбоку и над вершиной облака ширина и длина возмущённых участков близки к горизонтальным размерам *Cb*.

В целом результирующее движение в окрестности *Cb* оказывается нисходящим, поэтому вокруг кучево-дождевого облака (как и вокруг мощного кучевого) часто располагается тёплая воздушная оболочка [7]. Её толщина (по нормали к боковой поверхности облака), как и перепад температур в ней, увеличивается от основания облака к вершине: вблизи основания толщина составляет 50–200 м, а перепад температур 0,3–0,5°C; в средней части и у вершины толщина тёплой части увеличивается до 100–700 м при перепаде температур 0,5–3,0°C; над вершиной облака тёплый слой может прослеживаться до высоты 400–600 м, а перепад температур

над вершинами мощных кучевых и грозовых облаков иногда оказывается выше температуры окружающего воздуха на несколько градусов [7].

Таким образом, поскольку нижняя часть *Cb* более тёплая, чем верхняя, а в верхней части сильнее вертикальные движения и выше турбулентность, то около верхней части больше выражено и компенсирующее нисходящее движение, связанное с нагреванием воздуха; в более низких частях – средней и нижней – наблюдается менее интенсивное восходящее движение, которое связано и с менее интенсивным компенсирующим оседанием воздуха. В результате и горизонтальные размеры в «тёплой оболочке», и перепады температуры в ней (вокруг *Cb* и *Cu cong.*) ярче выражены над верхней частью облака и сбоку от верхней части.

Имеет смысл отметить еще одну важную особенность температурного поля в окрестностях *Cb*, указанную в [24]. Благодаря тому что перепады температур рядом с вершиной отличаются от перепадов у основания облака, значения вертикального градиента температуры сбоку от облака не равны их значениям в невозмущенной части атмосферы. Таким образом, асимметрия в поле температур приводит к асимметрии поля вертикального градиента температуры.

Вертикальный градиент температуры играет важную роль в формировании и динамике кучевообразных облаков. Чем больше вертикальный градиент температуры в воздухе, тем дольше сохраняется положительная разность температур между восходящим и окружающим воздухом, а именно эта разность температур и обуславливает подъём воздуха. С высоты расположения слоя инверсии или изотермии (иногда слоя замедленного падения температуры воздуха с высотой) подъём воздуха прекращается, следовательно, завершается и процесс развития конвективного облака [8].

В самой нижней части облака вертикальный градиент температуры близок к сухоадиабатическому, убывая с высотой до значения влажноадиабатического, а в верхней части облака снова возрастает, приближаясь к сухоадиабатическому (в зависимости от степени развития турбулентности) [88]. В [88] также отмечается, что вертикальный градиент температуры в основной толще облаков меньше, чем на их границах.

Распределение влажности в области облаков вертикального развития изучено явно недостаточно, а имеющиеся данные не позволяют пока получить целостную картину поля влажности в облаках *Cu* и *Cb*, а также в околооблачных слоях. Тем не менее прослеживаются некоторые особенности в распределении характеристик влажности.

Так, под кучевыми облаками относительная влажность монотонно растёт, достигая значения насыщения над водой на несколько десятков метров ниже того значения, которое определяется визуально. Абсолютная влажность под кучевыми облаками монотонно убывает, не дополняя картину поля влажности каким-либо особенностями, характерными для кучевых облаков.

У боковых границ облаков по мере удаления от них по горизонтали убывает и относительная, и абсолютная влажность [21]. Если приближаться к облаку по горизонтали, то за 500–1 000 км от него отмечается небольшое повышение влажности (на 10–15%), основной же рост влажности отмечается непосредственно у границ конвективных облаков (в слое 50–100 м) за счёт испарения попадающих сюда облачных частиц в процессе турбулентного обмена. Вместе с тем общей особенностью всех конвективных облаков – *Cu* и *Cb* – является наличие узкой зоны (шириной опять-таки 50–100 м) пониженной влажности, примыкающей непосредственно к зоне резкого увеличения влажности на границах облака. Такая зона прослеживается хотя бы с одной стороны облака [21]. Уменьшение влажности у границ *Cu* и *Cb*, видимо, связано с компенсирующими нисходящими движениями воздуха вблизи его боковых границ.

Итак, изменение влажности у боковых границ облака связано с тем, какой из двух факторов преобладает: испарение облачных частиц и, следовательно, увлажнение воздуха или удаление от состояния насыщения в процессе адиабатического нагревания при оседании околооблачного воздуха.

В [21] приводятся данные, полученные при пересечении облаков и околооблачного пространства в поле *Cu med.* на высоте $z = 2\ 100$ м, что выше нижней границы облаков на 50 м. Обнаружено, что в большинстве случаев в облаках абсолютная влажность составляет $7,5\text{ г/м}^3$, а в окружающем их воздухе – $5,0\text{--}5,5\text{ г/м}^3$ при минимальном значении $4,2\text{ г/м}^3$.

Над кучевыми облаками чётко прослеживается понижение значений абсолютной влажности по сравнению со значениями этой же величины и на том же уровне вдали от облака. Видимо, низкие значения влажности над облаком обусловлены нисходящими движениями воздуха и связанным с ними адиабатическим нагреванием.

Понятно, что имеющиеся данные о распределении влажности в облаках вертикального развития, как правило, получены в полях кучевых облаков. Однако выводы, сделанные по данным о распределении влажности в полях кучевых облаков, справедливы и для полей облаков кучево-дождевых.

С температурно-влажностными полями, а также с полем водности облаков вертикального развития могут быть связаны явления обледенения самолётов.

В переходные сезоны года, когда кучевые облака (*Cu med.* и *Cu hum.*) развиваются в слоях воздуха с отрицательной температурой, может возникнуть обледенение небольшой интенсивности (из-за небольшой горизонтальной протяжённости облаков мелкой конвекции самолёт находится в них в течение короткого промежутка времени). Зимой облака *Cu med.* и *Cu hum.* бывают редко, а летом эти облака не переохлаждены, поэтому они не связаны, как правило, с обледенением. Облака *Cu cong.* из-за значительной водности и большой горизонтальной протяжённости при отрицательных температурах дают умеренное и сильное обледенение [82].

Наиболее опасное обледенение связано при отрицательных температурах с самыми водными и протяжёнными из облаков вертикального развития – кучево-дождевыми.

4.6. Формирование и выпадение осадков из облаков вертикального развития

В умеренных широтах осадки выпадают из кучево-дождевых облаков и имеют ливневый характер (летом – ливневый крупнокапельный дождь и иногда град, зимой – ливневый снег и крупа, в переходные сезоны – ливневый мокрый снег и крупа, значительно реже – ливневый снег и град; последнее зависит от физико-географического положения рассматриваемого района). Обычно из *Cb* выпадают кратковременные осадки большой интенсивности. Нередко с *Cb* связаны грозовые явления.

Как уже указывалось выше, мощные *Cb* образуются при больших сдвигах ветра, поэтому осадки из наклонённых под действием сдвига ветра облаков выпадают сбоку от восходящего потока.

Для образования осадков в *Cb* необходимо большое количество водяного пара, ибо, по оценкам [24], лишь около половины количества водяного пара, попавшего внутрь *Cb*, расходуется на образование осадков.

При рассмотрении вопроса о выпадении осадков из какого-либо облака приходится последовательно решать три задачи: об укрупнении облачных частиц, о выпадении осадков и о достижении ими подстилающей поверхности.

Укрупнение частиц в капельном облаке, какими являются кучевые облака, связано с двумя процессами – конденсационным ростом капель и коагуляционным их ростом. В начальной стадии развития облака главная роль принадлежит конденсационному росту частиц, поскольку различие

в скоростях движения отдельных частиц еще невелика. После достижения ими размеров 20–60 мкм основную роль начинает играть коагуляция капель [32], т.е. их слияние, когда более крупная капля с большей скоростью падения догоняет более мелкие капли с меньшими скоростями движения и соединяется с ними, заметно при этом укрупняясь.

В облаках *Cb*, являющихся смешанными, т.е. имеющими наряду с жидкой фазой твёрдую, включается еще один механизм укрупнения облачных частиц – «перегонка» воды с капли на кристалл, поскольку упругость насыщения над льдом меньше, чем над водой. В результате при одном и том же значении упругости водяного пара в облаке, содержащем в непосредственной близости каплю и кристалл, эти облачные частицы могут находиться в совершенно разных условиях: капля – в ненасыщенном воздухе, поэтому она испаряется, а кристалл – в пересыщенном, поэтому он сублимирует водяной пар. Строго говоря, определённую роль играет то, что испарение с капли воды всегда интенсивнее, чем с кристаллов, в силу разного значения величины силы сцепления в жидкой и твердой среде. Кроме того, с уменьшением размера капель упругость насыщения над ними увеличивается (упругость насыщения над мелкими каплями больше, чем над крупными), что приводит к увеличению скорости испарения капель.

Таким образом, в смешанных облаках обычно происходит «перегонка» воды с капли на кристалл и с мелких капель на крупные. Наиболее эффективен первый из механизмов, причем скорость «перегонки» зависит от температуры воздуха. Максимальные значения разности упругости насыщения над водой и льдом достигаются при температуре -12°C , следовательно, при температурах, близких к этому значению, наблюдается и наибольшая скорость «перегонки» воды с капли на кристалл. Указанный механизм играет большую роль в укрупнении осадков: известно, что осадки с наибольшей вероятностью выпадают именно из облаков смешанного строения.

Следует отметить, что в тропических широтах слабые ливни могут дать и кучевые облака, что нехарактерно для более высоких широт.

Чем же отличаются мощные кучевые облака на разных широтах? Конечно же, в тропической зоне эти облака отличаются большей мощностью и водностью. Главное же отличие состоит в том, что в тропиках проявляет себя еще один механизм укрупнения облачных частиц в капельном облаке – «перегонка» воды с тёплой капли на холодную, поскольку на одном и том же уровне в облаке встречаются капли, движущиеся сверху вниз и снизу вверх (соседствующие потоки с противоположным направлением движения характерны для развитых кучевых и особенно кучево-

дождевых облаков). Упругость же насыщения над тёплой и холодной каплями имеет разные значения: над тёплой они больше, а над холодной меньше. В результате тёплая капля может оказаться в ненасыщенном воздухе и будет испаряться, а холодная – в пересыщенном, следовательно, на ней будет конденсация. Этот механизм заметную роль может сыграть лишь в тропиках, поскольку только на фоне высоких температур воздуха разность в упругостях насыщения над каплями с разными температурами достигает сколько-нибудь заметных значений. При более же низких температурах, какие наблюдаются в умеренных и высоких широтах, указанная разность мала и не играет заметной роли в укрупнении облачных частиц в кучевом облаке (в этом проявляется характер зависимости упругости насыщения от температуры). Нелишним будет заметить и то, что «перегонка» воды с тёплой капли на холодную в тропических широтах играет роль и в укрупнении облачных частиц в кучево-дождевых облаках.

Таким образом, в тропических широтах в укрупнении облачных частиц в *Cb* прослеживаются два родственных друг другу механизма – «перегонка» воды с капли на кристалл и «перегонка» воды с тёплой капли на холодную. Первый из них более значимый, ибо разность в упругостях насыщения над каплей и кристаллом больше, чем соответствующая разность над каплями с разными температурами.

Итак, под влиянием нескольких механизмов облачные частицы укрупнились. В какой-то момент произойдет выпадение их из облака. Это зависит от того, в какой момент облачная частица преодолеет силу сопротивления воздуха. Таким образом, момент выпадения осадков из облака определяется не только размером облачных частиц, но и скоростью восходящих потоков в облаке. В [66], например, представлена связь между величиной энергии неустойчивости и количеством осадков из *Cb*. Оказалось, что для формирования ливневых осадков необходимо, чтобы максимальная скорость вертикального движения была больше скорости падения капель радиусом 2,5–3,0 мм под действием силы тяжести.

Росту облачных частиц в *Cb* способствуют большие скорости восходящих движений и по той причине, что благодаря сильным восходящим потокам крупные капли и кристаллы длительное время могут находиться внутри облака и увеличивать свои размеры. Для этого, согласно [58, 59], достаточно, чтобы скорость восходящего потока составляла 4–8 м/с, что является обычным для *Cb*. Чем дольше облачные частицы будут находиться в облаке и продолжать расти, тем больше вероятность достижения ими подстилающей поверхности.

Осадки, выпадающие из облака, не сразу и не всегда достигают подстилающей поверхности. Дело в том, что влажность под *Cb* нередко довольно далека от насыщения, поэтому часть осадков испаряется, увеличивая влажность в подоблачном слое. Если оставшейся части осадков (после их частичного испарения) достаточно, чтобы не потерять направленное движение против сил сопротивления воздуха, то такие частицы могут достичь подстилающей поверхности. Однако по пути от облака осадки могут испариться, не достигнув подстилающей поверхности, а могут утратить направленное движение к ней, потеряв свою основную массу, и даже обрести противоположное направление движения, т.е. вверх – снова к облаку – под действием сильных восходящих движений (предварительно они несколько сносятся горизонтальной составляющей движения воздуха – ветром), которые характерны для *Cb*.

Следует отметить и еще один механизм укрупнения облачных частиц в суперячейковом облаке. Там мелкие облачные частицы выносятся восходящим потоком в более высокие слои облака, затем переносятся горизонтальным потоком (скорости ветра в верхней части кучево-дождевых облаков достаточно велики) в передний выступ наковальни, которая является отличительной чертой суперячейкового облака. Из этой облачной части частицы падают вниз, но могут опять оказаться вовлечёнными в восходящий поток. Подъём и опускание облачных частиц в передней части суперячейкового облака могут оказаться многократными, что приводит к образованию особенно крупных градин. Известно, что с суперячейковыми *Cb* связаны катастрофические градобития.

Наиболее крупный град, как правило, образуется во фронтальных *Cb* благодаря сильным восходящим движениям, которые не бывают постоянными не только в разных частях облака, но и в одной и той же его части в различные промежутки времени [89]. Повторив несколько раз подъём и спуск в облаке, облачная частица сильно укрупняется. При скорости восходящего потока более 50 м/с вверх могут подниматься крупнейшие градины, которые впоследствии будут проходить большой путь к нижней границе *Cb*, при этом активно коагулируя и сильно укрупняясь. Следовательно, основной механизм образования градин – гравитационная коагуляция [90].

Выпадение крупы [59] происходит чаще в переходные сезоны, когда температура у поверхности земли лишь немного превышает нулевое значение, чтобы крупинки не успели растаять. Летом крупа – довольно редкое явление и выпадает в основном в горных районах.

В отличие от крупы град наблюдается как в переходные сезоны, так и летом, причём даже в тропиках, где температуры очень высоки. Это связано с тем, что градины значительно больше, чем крупинки.

Образование крупы в *Cb* происходит благодаря процессу обзёрнения – налипания капель на кристаллы и последующего замерзания первых.

В целом средняя максимальная интенсивность ливневых осадков в умеренных широтах составляет 0,08–0,10 мм/мин [59]. Продолжительность индивидуальных ливней во внетропических районах редко превышает 20–30 мин из однопериодных *Cb* и 1–2 часа из мультисериальных и суперячеевых *Cb*.

Во время своего существования *Cb* постоянно пополняют свои водозапасы за счёт потоков влаги от подстилающей поверхности, а общее количество осадков, выпавших из одного только облака *Cb*, может, по оценкам учёных, превышать 1 млн т. Таким образом, *Cb* играют большую роль в круговороте воды в природе. Так, по данным [58], на долю ливневых осадков приходится около 80% от общей суммы осадков тёплого периода в Центрально-черноземной зоне в Украине, в западных частях Туркмении и Казахстана. Вместе с тем известно, что наиболее интенсивные осадки выпадают над океанической частью субтропиков.

Видимость в облаках вертикального развития различается в различных кучевых и кучево-дождевых облаках в той мере, в какой различаются их водность, концентрация облачных частиц и их размеры. Однако даже в кучевых облаках малой конвекции (*Cu hum.* и *Cu med.*) видимость составляет 35–45 м, а в *Cu cong.* – лишь 20–25 м. Еще меньше видимость в кучево-дождевых облаках. Так, в нижней и средней частях она составляет 10–20 м, а в верхней части, где преобладают кристаллы льда, видимость улучшается, составляя от нескольких десятков до нескольких сотен метров [82].

В облаках с наиболее значительной водностью и сильными восходящими и нисходящими движениями до больших высот могут возникнуть грозные электрические разряды. Такими облаками являются кучево-дождевые облака [57].

5. ОБЛАЧНОСТЬ В ГОРАХ

В условиях сложного рельефа процесс облакообразования имеет свои особенности: с одной стороны, облака формируются в более высоких слоях атмосферы, менее богатых влагой по сравнению с нижележащими; с другой стороны, подъём воздуха по горным склонам, в ряде случаев частично или полностью покрытых снегом, приводит к активизации процесса конденсации.

Таким образом, на процесс облакообразования вышеупомянутые факторы влияют в противоположных направлениях. Если поднимающийся воздух влажный, то влияние склонов сильнее. В этом случае облачность чаще наблюдается над более высокими горными областями, над хребтами и вершинами, нежели над пониженными участками – долинами и котловинами. Согласно [4, 5], нередко в течение целых месяцев высокие горы закрыты облаками, в то время как над долинами – ясное небо. Подобное явление мы наблюдаем в Горном Алтае, над Казахстаном, в Таджикистане. Если поднимающийся воздух сухой, то облачность располагается над горами примерно на той же высоте над подстилающей поверхностью, что и в долинах.

Над внутриконтинентальными горными районами, где воздух особенно сухой, облака располагаются весьма высоко. В таких случаях привычные высоты расположения облачности оказываются значительно ниже действительно наблюдаемых. В самом деле, над Памиром, согласно [4, 5], кучевые облака образуются на высотах 6–6,5 км, а высоко-кучевые являются сверхвысокими – расположены на 1–2 км выше обычных облаков *Ac*. На таких высотах значения температуры воздуха значительно ниже, чем на высотах обычных *Ac* и *Cu*, поэтому изменяется и их микроструктура – облачные капли замерзают, что нехарактерно ни для *Ac*, ни для *Cu*. Более того, возле облаков возникает тонкая пелена перистых облаков, которая в дальнейшем приобретает нитевидную структуру. Такие облачные ситуации автор наблюдала в Горном Алтае.

Замечено, что с появлением перистой пелены около кучевых облаков последние не развиваются в высоту. Они приобретают перистовидную структуру и быстро распадаются [4, 5]. В любом случае (суше или влажнее поднимающийся воздух) над горами облака наблюдаются часто – в большем или меньшем количестве.

Средняя разность температур между хребтом и долиной [36, 91] приводит к выводу о том, что горы являются приподнятыми источниками тепла и конвекция над ними имеет повышенную интенсивность. По данным, представленным в [91], особенно хорошим источником термиков является голая скалистая поверхность, ибо вследствие своих теплофизических свойств она нагревает воздух непрерывно, даже тогда, когда закрыта проходящими над ней облаками. Если же солнечные лучи падают на такую поверхность под благоприятными углами, то конвективная активность над ней резко увеличивается.

Для горных стран в тёплое время типичны кучевые облака, которые достаточно развиты. При спокойной погоде они наблюдаются над наиболее нагретыми склонами, обращёнными к Солнцу, в потоках восходящего воздуха. Такие кучевые облака постоянно находятся над одними и теми же участками горного хребта, а их вершины сносит ветром в сторону.

Иногда кучевые облака имеют вид высоких башен с узкими основаниями. Достигнув стадии *Cu cong.*, облака начинают сливаться в крупные облачные массы. Далее формируются наковальни [5]. После прохождения холодного фронта кучевые облака появляются в большом количестве с наветренной стороны гор, где они могут в отдельных местах нагромождаться, сливаться, наклоняться в направлении ветра [4].

Благодаря горно-долинной циркуляции может образоваться гряда кучевых облаков, параллельная оси хребта. Днём поднимающийся по относительно тёплому склону воздух образует вблизи вершины мощные конвективные струи. Последние поднимаются над горой и в случае достижения уровня конденсации могут образовывать гряду кучевых облаков [91]. Кучевые облака над вершинами нередко оказываются стационарными [5].

Ярким проявлением влияния гор на формирование облаков являются чечевицеобразные облака. В справочной литературе [92] эти облака определены как орографические. В [92] относительно природы облаков отмечается, что они «возникают на наветренной стороне или над гребнем хребта и тают на подветренной стороне, имея, таким образом, характер стоячих волн».

Следует заметить, что в настоящее время чечевицеобразные облака не только описаны по визуальным данным, в значительной мере исследован физический процесс их образования, но и решены уравнения для различных моделей атмосферы, в которых прослеживаются волны [35].

Чечевицеобразные облака встречаются в местах подъёма воздуха при перетекании его через горы. При этом движение воздуха может быть

возмущено на уровнях значительно выше горных вершин – при благоприятных условиях, согласно [36], вертикальное перемещение может доходить до километра и более. Контуры этих облаков характеризуют высоту и ширину горного препятствия, их породившего.

Обычно чечевицеобразные облака довольно тонкие (мощность до километра). Однако бывают случаи, когда волновые движения развиваются в уже имеющихся достаточно мощных облаках. Тонкие волнистые облака, согласно [36], могут наблюдаться и на очень больших высотах (до 10 км), а иногда и в стратосфере, на высоте 20–30 км (перламутровые облака).

На высоких уровнях волнистые облака появляются только в том случае, когда скорость ветра увеличивается с высотой. Таким образом, эти облака обычно связаны с сильными ветрами, которые переносят облачные частицы. Как отмечается в [36], хотя облако в целом остаётся стационарным в течение нескольких часов, отдельные облачные частицы могут существовать не очень длительное время – иногда всего несколько минут.

В гребнях подветренных волн часто наблюдаются местные горные облака – высоко-кучевые чечевицеобразные (*Ac lent.*). Иногда на подветренной стороне наблюдаются облачные гряды, вытянутые вдоль хребта. Такое явление имеет место в случаях, когда *Ac lent.* образуются в нескольких последовательно чередующихся параллельных гребнях.

Если гряды или отдельные чечевицеобразные облака возникли в гребнях волн за одиночными вершинами, то они длительное время сохраняют свой вид даже при сильном ветре. Тогда о потоках, протекающих через облака, свидетельствует волокнистая структура на краях этих облаков [5].

Чечевицеобразные облака могут быть многослойными. Если относительная влажность воздуха достаточно велика, то в гребне каждой волны в каждом из слоёв, охваченных волновыми движениями, образуются *Ac lent.* – на уровне хребтов или значительно выше (вплоть до тропопаузы). Длины волн (расстояние между отдельными валами или рядами чечевицеобразных облаков) достигают 4–19 км [4] и лишь в редких случаях бывают меньше. В [59] приведены результаты экспериментальных исследований горных волн: их длина чаще всего близка к 10 км, а вертикальные скорости в гребнях и котловинах составляют несколько метров в секунду, хотя иногда достигают 20–25 м/с. В [35] рассматривается вынужденное образование волн в устойчиво стратифицированном воздушном течении над препятствием. В установившемся состоянии эти волны являются стационарными относительно холмов и гор, послуживших причиной их образования.

При полётах планеров оказалось, что именно подветренные волны дают возможность достигать при парении очень больших – рекордных – высот. Однако эти же подветренные волны могут оказывать, согласно [35], некоторое локальное сопротивление тропосферным воздушным течениям и в некоторых случаях участвовать в развитии сильной турбулентности при ясном небе, что создаёт опасность для авиации.

В [35] представлены однослойная и двухслойная модели, а также более сложные модели – с тремя и более слоями; отмечено, что в результате переноса горными волнами энергии вверх и положительного количества движения вниз происходит падение атмосферного давления с подветренной стороны. При однослойной модели по мере удаления от хребта волны быстро затухают. Чаще всего, однако, реальная атмосфера состоит из двух или более значительных слоёв. Эти слои оказывают существенное влияние на структуру подветренной волны, которая сохраняется за препятствием значительно лучше, чем в случае однослойной модели.

На волновое движение оказывает влияние характер препятствия. Так, согласно [35], волны с подветренной стороны изолированного препятствия затухают быстрее, чем в случае двумерного хребта.

В зависимости от параметров гребня в волновом движении и таких характеристик, как вертикальный градиент температуры и влажность воздуха, в гребнях волн могут образовываться чечевицеобразные, серпообразные или даже кучевые облака (валообразное облако).

Ещё одним вариантом местной горной облачности являются «облачные флаги» – туманные облачные массы, как бы прикреплённые к различным частям вершин. Форма «флагов» может быть различной и довольно изменчивой. Если воздух неустойчив, то образуется плотный облачный флаг кучевообразной структуры («вершина курится») достаточно большой длины – до 1–2 км [4, 5].

Микроструктура «флагов» зависит от высоты, на которой образуется.

Так, над снежными вершинами (при низкой температуре и сильном ветре) «облачные флаги» состоят из ледяных кристаллов. Некоторые местные жители считают, что при определенной ориентации «флагов» впоследствии наступает дождливая погода.

При всей непохожести «облачных флагов» и чечевицеобразных облаков у них в определенной мере сходны причины образования.

Некоторые интересные формы и виды облаков наблюдаются в высокогорных долинах – в месте встречи холодного ледникового ветра, дующего с ледников вниз по долине, с более тёплым долинным ветром, дующим

в дневное время вверх по долинам. Там, на участках встречи, могут наблюдаться широкие полосы тумана, а иногда «взбросы» воздушных потоков в виде облачных столбов, в отдельных случаях весьма высоких, но довольно быстро тающих [4]. Варианты этих облачных проявлений зависят от соотношения температур во встречающихся потоках, абсолютных значений этих температур, влажности воздуха и скорости смещения потоков.

Слоистые облака нередко формируются в горных долинах, причём сначала они появляются в виде горизонтальных полос и даже обрывков около горных склонов, т.е. дискретных облачных масс, впоследствии эти облачные массы увеличиваются и заполняют всю долину. Описанная ситуация более характерна для вечернего, ночного и отчасти утреннего времени. В дневные часы эти облака либо разрушаются, либо трансформируются в кучевообразные [4, 5].

Многие исследователи среди характерных форм и видов облаков в горах, а также характерных облачных систем выделяют так называемое «облачное море» – слой облаков, создаваемый слоисто-кучевыми или слоистыми облаками, заполняющий горные долины в вечерние, ночные и ранние утренние часы. «Облачное море» наблюдается сверху, поскольку облачный слой в этом случае находится ниже наблюдателя. С восходом солнца, усилением конвективных и турбулентных движений разрушаются инверсионные слои, под которыми нередко наблюдаются *St* или *Sc*, а затем и сами облака. «Облачное море» не наблюдается в дневное время.

Иногда облачная масса слоистообразных облаков очень неоднородна из-за неоднородности подстилающей поверхности, над которой она формируется. Сказанное относится не только к облакам *St* и *Sc*, но и к облакам *Ns*. Все низкие облака в горах весьма неоднородны в отличие от этих же облаков в обычной ситуации. Внутри таких облачных слоёв имеются участки различной плотности и даже безоблачные слои [4].

Все характеристики в низких облаках в горных условиях быстро изменяются, в частности дальность видимости. Следует заметить, что при встрече горного и долинного воздуха образующаяся облачная масса очень неоднородна.

В горных условиях некоторые особенности приобретают и фронтальные облачные системы.

Когда на горы натекает мощный поток влажного воздуха, то конденсация водяного пара и образование облаков происходят главным образом на наветренном склоне. В случае атмосферного фронта над хребтом по-

является мощное облако системы *Ns–As* вместе с фронтальными *Cb*. Мощная облачная масса разрастается вверх и может значительно превысить высоту гор.

При переваливании потока через хребет происходит его адиабатическое нагревание и удаление от состояния насыщения. В ненасыщенном воздухе облачные капли начнут испаряться, и на некотором уровне испарятся все капли – облако исчезнет. Итак, на подветренной стороне гор на некотором уровне появляется длинный, вытянутый вдоль хребта облачный вал. Его называют фёновым валом, или фёновой стеной. Следовательно, нижняя граница фронтальной облачной системы с подветренной стороны располагается выше, чем нижняя граница этой же системы с наветренной стороны гор.

Наблюдение за облаками в горах сопряжено с определёнными трудностями и особенностями. Так, мощные фронтальные облака *Ns–As* или крупные *Cb* могут быть одновременно и выше, и ниже наблюдателя горной метеостанции. Наблюдатель при этом видит все неоднородности облачных слоёв, включая безоблачные участки. При прохождении холодного фронта (в массе *Ns* могут образоваться *Cb*) наблюдатель отмечает резкое ухудшение дальности видимости, а выпадающие осадки нередко имеют форму мелкой крупы [4]. Фронтальные облака *Ns* часто сочетаются с *Cb* [5].

Следует отметить и тот факт, что если кучевые облака имеют наибольшую повторяемость и мощность в дневное время, то кучево-дождевые облака – в вечернее. Это понятно, учитывая необходимость прохождения стадии кучевых облаков для последующего образования *Cb*.

В разных горных странах при общих характерных формах, видах, разновидностях облачности прослеживаются и некоторые общие черты в её режиме, но в то же время имеющееся своеобразие физико-географических особенностей и режима циркуляции проявляется в облачных полях над каждой из горных стран и даже в отдельных её районах.

Кафедра метеорологии и климатологии Томского государственного университета традиционно занимается исследованием климата Горного Алтая, в том числе режима облачности и осадков.

Нами обработан, обобщён и проанализирован большой фактический материал по количеству и формам облаков по данным наблюдений метеорологических станций и постов Республики Алтай в годовом и суточном периодах, вычислены характеристики изменчивости средних значений количества облаков и значений повторяемости облаков различных

семейств, характеристики распределения случайных значений относительно средних значений количества и повторяемости различных облаков в годовом и суточном периодах. В результате этой работы сложилась общая картина режима облачности в Горном Алтае.

Для холодного периода года (с октября по апрель) над территорией Республики Алтай наиболее характерной является облачность среднего и верхнего ярусов. При этом средние значения повторяемости облаков среднего яруса, как правило, несколько выше, чем верхнего. Облачность нижнего яруса и вертикального развития – явление крайне редкое в холодный период.

Такой режим облачности обусловлен Азиатским антициклоном, влияние северо-западной периферии которого определяет в холодный период погодные условия Горного Алтая. Это образование не связано с вторжениями влажного воздуха в исследуемый район. Нисходящие движения, характерные для антициклонических образований, приводят к тому, что облака вертикального развития не формируются. Достаточно низкое влагосодержание воздуха не способствует образованию облаков нижнего яруса *St* и *Sc*, а облака фронтального типа *Ns* и *Frnb* не наблюдаются, поскольку циклоническая деятельность и связанные с ней атмосферные фронты нехарактерны для этого периода над Горным Алтаем.

В холодном периоде отличается от других месяцев октябрь, когда благодаря западным и юго-западным потокам, а также благоприятной ориентации хребтов для проникновения влажного воздуха усиливаются процессы облакообразования. В октябре и отчасти в начале ноября, согласно [93], наблюдается волновая деятельность на холодных фронтах. В это время отмечаются наибольшие значения повторяемости облаков вертикального развития и нижнего яруса в холодном периоде.

Наибольший ход повторяемости по месяцам холодного периода прослеживается у облаков вертикального развития и нижнего яруса с максимальными значениями в октябре и минимальными в январе–феврале. Облачность верхнего и среднего ярусов преобладает во второй половине зимы – с января по март, но облачность среднего яруса почти во все месяцы и сроки наблюдений практически над всеми станциями Горного Алтая имеет наибольшие значения повторяемости по сравнению с другими семействами облаков. В пространстве повторяемость облачности всех семейств изменяется мало, лишь в Актру меньшая повторяемость облаков обусловлена влиянием фёнового эффекта. Некоторые особенности в режиме облачности отмечаются и на других станциях и постах. Например,

над Усть-Каном и особенно над Кош-Агачем облачность верхнего яруса в холодный период наблюдается чаще, чем среднего яруса. Облака среднего яруса над этими станциями занимают второе место по повторяемости.

Над Кош-Агачем облака вертикального развития в октябре встречаются чаще, чем в другие месяцы, но, в отличие от Усть-Кана, облака верхнего яруса и в ноябре наблюдаются чаще, чем облака вертикального развития.

Над обеими станциями облака нижнего яруса формируются очень редко. Над Кара-Тюреком в период с ноября по март и отчасти в апреле практически во все сроки наибольшую повторяемость имеют облака среднего яруса, затем верхнего; самую низкую повторяемость имеют облака вертикального развития. В октябре в дневные часы облака верхнего яруса встречаются чаще, чем среднего, более того, в околополуденные часы повторяемость облаков вертикального развития может превысить повторяемость облаков среднего яруса.

Над Актру, Бертеком, Усть-Коксой наибольшую повторяемость в холодный период имеют облака среднего яруса, затем идёт повторяемость облаков верхнего яруса. Однако в декабре (иногда и в январе) отмечается самая низкая повторяемость облаков среднего яруса (в это время чаще всего наблюдается ясное небо). Облака вертикального развития над этими станциями очень редки, особенно в центральные месяцы зимы, лишь в октябре и отчасти в ноябре их повторяемость увеличивается, затем опять падает. Редко наблюдаются и облака нижнего яруса.

Приведённые выше особенности режима облачности на некоторых станциях Горного Алтая подчёркивают сделанные выводы в целом для станций и постов этой горной страны: ясное небо чаще наблюдается в середине зимы и в самом начале весны. Облачность вертикального развития нехарактерна для холодного периода, ибо отсутствуют основные факторы ее образования – термическая конвекция и развитый турбулентный обмен. Более того, сказывается влияние Азиатского антициклона и связанные с ним нисходящие движения.

Ясное небо и облачность вертикального развития имеют ходы по месяцам холодного периода, обратные друг другу. Облака нижнего яруса из-за выраженных нисходящих движений воздуха и малого его влагосодержания нехарактерны для холодного полугодия. Характерными для холодного полугодия являются облака среднего и верхнего ярусов.

В тёплое время года (май–сентябрь) наибольшая повторяемость отмечается у облаков верхнего, среднего ярусов и вертикального развития.

В юго-восточном районе Алтая, например, облачность верхнего яруса, как и среднего, составляет примерно 1/3 часть (каждая) от облаков всех семейств, вместе взятых. Более детальный анализ показал, что облачность верхнего яруса имеет сглаженный ход по месяцам тёплого периода, однако с мая по июль повторяемость этой облачности несколько выше, чем в августе–сентябре, а повторяемость облаков среднего яруса выше в августе–сентябре по сравнению с повторяемостью в мае–июне.

Облака вертикального развития в летние месяцы (июль–август) имеют повторяемость до 30–50% повторяемости облачности всех семейств, но в переходные сезоны облака вертикального развития встречаются нечасто – 10–20% от общего числа случаев. Эти облака имеют максимальную повторяемость в июле, достаточно высокие значения с мая по август, а в апреле и сентябре в поле давления выражен Азиатский антициклон с характерными для него нисходящими движениями, поэтому облачность вертикального развития в эти месяцы не формируется.

Очень редко в тёплый период наблюдаются облака нижнего яруса, особенно на юго-востоке Алтая (на станции Кош-Агач, например, всего 2–5% от общего числа случаев приходится на облачность нижнего яруса, но и на других станциях повторяемость облаков нижнего яруса невелика, например над Турочаком она составляет менее 10%).

Наибольшая повторяемость облачности всех семейств в тёплом полугодии наблюдается в июле, когда преобладают континентальные воздушные массы с неустойчивой стратификацией [93], проявляет себя циклоническая деятельность [94], которая мало влияет на погоду юго-восточного района Алтая, где расположена станция Кош-Агач.

С мая по июнь в Горном Алтае возрастает повторяемость облаков нижнего яруса и вертикального развития, причём последняя – очень интенсивно. В течение всего тёплого периода облака верхнего и среднего ярусов имеют почти одинаковое значение повторяемости. В июле превалирует облачность вертикального развития, ибо все факторы её образования выражены ярко: термическая конвекция, турбулентный обмен, увеличение влагосодержания воздуха. Исключительно редко в июле встречается облачность нижнего яруса фронтального типа (*Ns* и *Fmnb.*). В августе повторяемость облаков вертикального развития уменьшается, и снова наибольшая повторяемость приходится на облачность верхнего и среднего ярусов. В сентябре по сравнению с летними месяцами несколько увеличивается повторяемость облаков нижнего яруса, что связано с выхолаживанием подстилающей поверхности при сравнительно высоком влагосодержании воздуха.

Поскольку такая сравнительно небольшая территория, как Горный Алтай, находится под влиянием трёх типов климата [95] – западно-сибирского, монгольского, среднеазиатского, атмосферные процессы и связанные с ними облакообразующие и осадкообразующие процессы могут значительно различаться даже в соседних его районах [96]. Различаются в этих районах и поля облачности, характеризующие атмосферные процессы. Эти различия касаются и фронтальной облачности, поскольку повторяемость фронтальных процессов также неодинакова в различных районах Алтая. Поэтому, например, над станцией Турочак (влияние западно-сибирского типа климата) фронтальная облачность наблюдается чаще, чем над Кош-Агачем (влияние монгольского типа климата). Максимальные значения повторяемости фронтальной облачности N_s и Fr_{nb} в тёплом полугодии отмечаются в переходные периоды, когда выражены фронтальные процессы; летом же, особенно в июле, Алтай характеризуется сильными конвективными движениями в условиях малоградиентного поля пониженного давления, поэтому формируется облачность вертикального развития. Следует отметить, что над станцией Кош-Агач фронтальная облачность нижнего яруса (N_s и Fr_{nb}) появляется очень редко на протяжении всех месяцев тёплого полугодия – средняя повторяемость этой облачности близка к нулевым значениям. Климат юго-восточного района Алтая, где расположена станция Кош-Агач, имеет полупустынные черты именно потому, что он защищён почти со всех сторон горными препятствиями, лишь вдоль долины реки Чуи имеется возможность проникновения влажного воздуха с северо-запада.

Таким образом, в Горном Алтае только облачность вертикального развития имеет ярко выраженный ход по месяцам тёплого периода с максимумом в июле: на всех станциях и постах повторяемость этой облачности увеличивается от апреля к июню, затем убывает от июля к сентябрю; кроме того, облака вертикального развития – наиболее характерная облачность тёплого периода: её средняя повторяемость выше, чем повторяемость облачности любого другого семейства.

Облака верхнего яруса имеют сглаженный ход от месяца к месяцу тёплого периода с максимальной повторяемостью в июне–июле (они встречаются чаще облаков других семейств, кроме облаков вертикального развития).

Ход повторяемости облаков среднего яруса от месяца к месяцу, как и облаков верхнего яруса, сглаженный, максимальные значения прослеживаются в апреле–мае, а в июне–августе на ряде станций и постов повторяемость этих облаков уступает повторяемости облаков верхнего яруса.

Облака нижнего яруса в целом имеют сглаженный ход: в переходные периоды их повторяемость несколько увеличивается за счёт фронтальной облачности (*Ns* и *Frnb.*), а летом – за счёт облаков *St* и *Sc*.

В тёплый период несколько ярче, чем зимой, прослеживаются различия в облачном режиме над отдельными станциями и постами, поскольку с усилением конвективных и турбулентных движений в тёплое время года увеличивается влияние неоднородностей подстилающей поверхности, создающих эти движения и отличающихся на каждой из станций. Приведём несколько примеров. В Актру повторяемость облаков среднего яруса несколько выше, чем верхнего, но по сравнению с другими станциями повторяемость облаков верхнего и среднего ярусов невелика. Исключительно редко наблюдаются облака нижнего яруса весной (реже, чем на других станциях). В этом проявляется влияние фёнового эффекта, обусловившего размывание облачности над долиной Актру. В то же время и ясные дни нехарактерны для Актру в тёплый период, особенно летом. Наиболее характерной является конвективная облачность – во все месяцы с мая по сентябрь её повторяемость выше повторяемости облаков других семейств.

Над Усть-Коксой более характерна облачность конвективного характера и среднего яруса (летом чаще встречаются облака вертикального развития, осенью и весной – среднего яруса); облака среднего яруса прослеживаются чаще, чем верхнего, ещё реже отмечаются облака нижнего яруса и ясное небо (летом чаще встречается облачность нижнего яруса, осенью и весной – ясное небо).

В Усть-Кане во все месяцы тёплого полугодия повторяемость облаков вертикального развития выше, чем облаков других семейств, а среди последних наибольшая повторяемость принадлежит облакам верхнего яруса. Реже всего наблюдаются облака нижнего яруса. Ясное небо наблюдается в апреле чаще, чем облака среднего и нижнего ярусов, а в период май–сентябрь занимает промежуточное положение между значениями повторяемости облаков этих двух семейств.

В Кош-Агаче облака вертикального развития имеют значительно более высокую повторяемость по сравнению с облаками всех других семейств, среди которых чаще всего встречается облачность верхнего яруса, затем – среднего. Облака нижнего яруса и ясное небо прослеживаются редко (летом чаще наблюдаются облака нижнего яруса, в переходные сезоны чаще бывает ясное небо – при очень малой повторяемости обоих состояний).

В Бертеке конвективная облачность имеет в период с мая по сентябрь наиболее высокую повторяемость, а значения повторяемости облаков верхнего и среднего ярусов различаются мало (несколько выше повторяемость облаков верхнего яруса). Облака нижнего яруса встречаются чаще, чем на других станциях Горного Алтая, зато ясное небо совсем не характерно для лета и наблюдается лишь весной и осенью.

Над Катандой и особенно над Кара-Тюреком повторяемость облаков всех семейств выше, чем над другими станциями. При высокой повторяемости облаков вертикального развития над этими станциями чаще, чем над другими, отмечается облачность среднего яруса. Интересно, что наибольшее значение повторяемости облаков среднего яруса над Кара-Тюреком в среднем многолетнем выводе приходится на июнь, тогда как над другими станциями в июне по сравнению с апрелем и маем это значение снижается.

Как следует из приведённых примеров, в отдельных деталях режима облачности на станциях Горного Алтая проявляется влияние орографических особенностей – высоты расположения места наблюдения, ориентации склонов, близости к месту наблюдения горных возвышенностей.

Попытки проследить суточный ход повторяемости облачности разных семейств привели к следующим выводам.

В холодный период наибольшая повторяемость облаков всех семейств приходится на околополуденные часы, наименьшая – на ночные, но в целом суточный ход повторяемости облачности выражен достаточно слабо. Процессы выхолаживания подстилающей поверхности очень характерны для зимнего периода в Горном Алтае и проявляются почти во все сроки наблюдений, различаясь лишь по интенсивности этого процесса.

В тёплый период повторяемость облачности всех семейств, за исключением нижней облачности фронтального типа, имеет выраженный суточный ход. Наибольшую амплитуду суточного хода имеет повторяемость облаков вертикального развития с максимумом в дневные часы (чаще в околополуденные) и минимумом в ночные или ранние утренние часы. Наиболее яркий суточный ход прослеживается в июле, когда более чётко выражен суточный ход температуры подстилающей поверхности и воздуха, степени развития конвективных и турбулентных движений, скорости испарения. В апреле и сентябре суточный ход повторяемости облаков вертикального развития имеет наименьшую амплитуду за тёплое полугодие.

Облака верхнего яруса также имеют максимальную повторяемость в дневные (реже утренние) часы, минимальная повторяемость приходится

на ночные сроки. У облаков среднего яруса прослеживается сложный суточный ход с двумя максимумами (в утренние и вечерние часы) и двумя минимумами (дневные и ночные часы). Суточный ход повторяемости облаков нижнего яруса отмечается лишь в летние месяцы, а в апреле–мае и сентябре имеет сглаженный вид. В июне–августе облака нижнего яруса чаще наблюдаются в утренние и вечерние часы и редко днём.

Таким образом, на станциях Горного Алтая в ночные часы повторяемость облаков всех семейств невелика. В это время ослаблены восходящие движения (и конвективные, и турбулентные), уменьшается влагосодержание воздуха. С восходом солнца усиливаются облакообразовательные процессы, а вместе с ними – повторяемость облаков всех семейств, однако от утренних к дневным часам продолжает увеличиваться лишь повторяемость облаков верхнего яруса и особенно вертикального развития; облачность среднего и нижнего ярусов для дневных сроков в тёплый период нехарактерна. К вечеру повторяемость облаков среднего и нижнего ярусов увеличивается, а вертикального развития и верхнего яруса уменьшается. В это время нередко отмечаются радиационные облака, характерные для утренних часов. Днём воздух «теряет устойчивость», т.е. стратификация изменяется: облака радиационного типа разрушаются, и с увеличением неустойчивости развиваются конвективные облака; с усилением восходящих движений увеличивается повторяемость и облаков верхнего яруса.

Нами был рассчитан средний балл общей и нижней облачности, а также повторяемость различных значений балла облачности. Оказалось, что в холодное полугодие средний балл общей облачности распределяется достаточно равномерно по месяцам, составляя 5–6 баллов. Лишь в феврале и октябре прослеживается незначительное увеличение значений данной величины (до 6–7 баллов).

В октябре наблюдаются усиление влагонесущих западных и юго-западных потоков над Горным Алтаем, усиление циклонической деятельности [93], а следовательно, и увеличение облачности. Однако уже в ноябре устанавливаются зимние циркуляционные процессы [97, 98]. Зимой Горный Алтай находится под влиянием северо-западной периферии Азиатского антициклона. В межгорных понижениях (все метеостанции Горного Алтая, кроме Кара-Тюрека, расположены в горных долинах при различной их ориентации, высоте над уровнем моря и разной степени закрытости горизонта, а также в широких межгорных котловинах) увлажнение воздуха мало. Здесь воздух застаивается, его выхолаживание способствует усилению процессов антициклогенеза. Этот процесс явля-

ется определяющим для облачных полей, поэтому по данным всех рассматриваемых станций и постов в течение холодного полугодия характеристики облачности распределяются по территории Горного Алтая неравномерно.

Поскольку в условиях описанной атмосферной ситуации нижняя облачность формируется редко, средний балл общей облачности оказывается в 5–6 раз выше среднего балла нижней облачности на всех станциях в течение всего холодного периода.

Кривые распределения повторяемости общей облачности по баллам почти совпадают для всех станций, включая Кара-Тюрек: наибольшая повторяемость общей облачности приходится на 10 баллов, несколько меньшая – на ясное небо, а минимальная – на 5–6 баллов.

Годовой ход нижней облачности параллелен ходу общей облачности с выраженным увеличением среднего балла в октябре, что хорошо согласуется с [93], поскольку в октябре и начале ноября над Горным Алтаем прослеживается максимальное развитие волновой деятельности на холодных фронтах, сопровождающееся влагонесущими западными и юго-западными потоками. Наименьший средний балл нижней облачности приходится на январь – центральный месяц зимы, когда наиболее выраженные нисходящие движения азиатского антициклона препятствуют образованию или сохранению низкой облачности, если она все-таки сформировалась.

Средний балл нижней облачности имеет низкие значения, которые изменяются в пределах двух баллов в течение холодного полугодия. Повторяемость низкой облачности, приходящейся на различные значения баллов, тоже невелика. Сказанное подтверждает вывод о том, что облака нижнего яруса, а также вертикального развития, основание которых расположено в пределах нижнего яруса, нехарактерны для Горного Алтая в холодное полугодие.

В суточном ходе максимальные значения среднего балла общей и нижней облачности приходятся на околополуденные часы, когда, хоть и незначительно, но даже в холодные периоды развиваются вертикальные токи; минимальные значения отмечаются ночью. В целом в холодном полугодии суточный ход среднего балла общей и нижней облачности сглажен, амплитуда колебаний невелика и составляет 1–1,5 балла, лишь в октябре амплитуда колебаний имеет более высокое значение.

Для характеристики изменчивости средних значений балла общей и нижней облачности, а также средних значений повторяемости облачности разных семейств рассчитывались среднеквадратические отклонения и

коэффициенты изменчивости (вариации). Анализ рассчитанных значений показал, что изменчивость даже для общей облачности велика (коэффициент вариации всегда превышает значение 0,5), для нижней облачности изменчивость ещё больше (коэффициент вариации превышает 1), лишь в октябре изменчивость балла общей и нижней облачности уменьшается. Особенно изменчивы средние значения повторяемости облаков вертикального развития и нижнего яруса.

В суточном ходе наименьшая изменчивость среднего балла общей и нижней облачности отмечается днём – в более благоприятное время для облакообразования.

Для оценки характера распределения отдельных значений балла общей и нижней облачности, повторяемости облаков разных семейств были рассчитаны коэффициенты асимметрии и эксцесса. Анализ полученных значений показал, что для общей облачности асимметрия для всего периода левосторонняя, следовательно, вероятнее появление общей облачности более высокого балла относительно среднего значения; распределение плосковершинное – кривые распределения вдавлены.

Для нижней облачности в течение всего холодного периода асимметрия правосторонняя – вероятнее появление облачности более низкого балла относительно среднего значения; во все месяцы холодного периода, кроме октября, распределение островершинное.

В целом распределение облачности над Горным Алтаем не соответствует закону нормального распределения, поскольку значения коэффициентов асимметрии и эксцесса имеют высокие значения.

Следует отметить, что различия между значениями характеристик облачности на разных станциях, включая станцию Кара-Тюрек, невелики, поэтому можно сделать вывод об основном влиянии на режим облачности в Горном Алтае в холодный период атмосферной циркуляции, влияние же физико-географических особенностей станций на облачный режим сколько-нибудь заметно в этот период не прослеживается.

В тёплом полугодии средний балл и общей, и нижней облачности увеличивается от апреля к июню–июлю, а затем уменьшается к сентябрю. Максимальные значения приходятся на июнь или июль. Средний балл общей облачности в июне–июле составляет 5–8 баллов, нижней – 3–6 баллов. Это связано с развитием циклонической деятельности в летние месяцы и увеличением неустойчивости атмосферы.

В апреле и сентябре средний балл общей облачности составляет 4–7 баллов, нижней – 1–4 балла, причём в апреле средний балл нижней

облачности меньше, чем в сентябре, а средний балл общей облачности больше в апреле. Последнее свидетельствует о том, что апрель, скорее, относится к зимнему периоду, когда Алтай находится под влиянием северо-западной периферии Азиатского антициклона.

В тёплом полугодии средний балл общей и нижней облачности испытывает выраженные суточные колебания с максимумом в дневные часы, когда наблюдается и наибольшая повторяемость облачности всех семейств, особенно облаков вертикального развития; минимум приходится на ночные часы. Так выглядит основной тип суточного хода, в котором максимальное дневное значение среднего балла составляет 6–8 баллов, а минимальное ночное – 4–5 баллов по общей облачности, по нижней облачности максимальное дневное значение среднего балла приходится на 4–6 баллов, а минимальное ночное – на 1–3 балла.

Кроме основного типа суточного хода количества нижней облачности в отдельные сроки в тёплый период ещё прослеживается и дополнительный – с утренним максимумом балла нижней облачности. Утренний максимум определяется влиянием радиационного выхолаживания земной поверхности в ночные часы, которое приближает воздух в приземном слое атмосферы к состоянию насыщения. Случаи указанного смещения максимума в суточном ходе среднего балла нижней облачности имеют место на всех станциях и особенно отчётливо проявляются на станции Турочак. Отмеченная особенность наблюдается и в других горных странах [99].

Все характеристики облачности – средняя повторяемость всех семейств, средний балл общей и нижней облачности – имеют и в тёплый период большую изменчивость. Особенно изменчиво количество нижней облачности. Наибольшие значения среднеквадратических отклонений от средних и коэффициентов вариации отмечаются в апреле и сентябре, менее изменчивы эти характеристики в июне и июле. При этом значения коэффициентов вариации среднего балла общей и нижней облачности больше 0,5 во все месяцы и сроки тёплого периода, за исключением значений в дневные сроки июня и июля. Коэффициенты вариации среднего балла общей облачности имеют более низкие значения, чем среднего балла нижней облачности, превышая в последнем случае 0,7–0,8. Большие значения среднеквадратических отклонений от средних и коэффициентов изменчивости среднего балла общей и нижней облачности свидетельствуют о сложном сочетании разнообразных факторов облакообразования; нижняя облачность более изменчива, поскольку очень неоднородны подстилающая поверхность и слой, прилегающий к ней, в условиях горной страны.

Летом, когда процессы облакообразования более устойчивы и наблюдаются максимальные значения среднего балла общей и нижней облачности, величины, характеризующие их изменчивость, имеют наименьшее значение. Наибольшие же значения среднеквадратических отклонений от средних значений и коэффициентов изменчивости отмечаются в апреле и сентябре. В это время Азиатский антициклон ещё или уже определяет в значительной мере погодные условия исследуемого района, поэтому процессы облакообразования маловероятны.

В тёплый период наблюдаются выраженные суточные колебания характеристик изменчивости среднего балла общей и нижней облачности, наиболее значительные в июне–августе, с минимумом в послеполуденные часы и максимумом – в ночные. Высокий средний балл облачности при малом коэффициенте изменчивости свидетельствует о том, что вертикальные движения и турбулентный обмен в дневные часы летом в Горном Алтае – устойчивые факторы образования облаков.

В то же время сравнительно высокий средний балл нижней облачности летом в ночные часы и особенно в ранние утренние (дополнительный тип суточного хода) обычно наблюдается при больших значениях среднеквадратических отклонений от средних значений и коэффициентов изменчивости. Это говорит о том, что эффективное излучение, радиационное выхолаживание подстилающей поверхности и прилегающего к ней нижнего слоя атмосферы – изменчивый фактор облакообразования, под влиянием которого облака формируются далеко не всегда, лишь при наличии благоприятных условий.

В целом среди облачности различных семейств наиболее изменчива в тёплый период облачность нижнего яруса, наименее – верхнего и среднего ярусов. Так, значения коэффициентов изменчивости повторяемости облаков верхнего и среднего ярусов имеют порядок 0,2–0,3 в течение всего тёплого полугодия, тогда как коэффициент изменчивости повторяемости облаков вертикального развития заметно изменяется в течение тёплого полугодия, составляя 0,3–0,5 в июле и 0,8–0,9 в апреле и сентябре.

Таким образом, анализ полученных характеристик распределения отдельных значений балла общей и нижней облачности, а также повторяемости облаков разных семейств относительно средних показал, что рассмотренные распределения в большинстве случаев отличны от нормального. Для распределения общей облачности чаще всего наблюдается левосторонняя асимметрия, тогда как для нижней облачности – правосторонняя, иначе говоря, для общей облачности вероятнее появление

облачности выше среднего значения, а для нижней облачности – ниже среднего балла. В большинстве случаев асимметрия умеренная и большая. Коэффициенты эксцесса имеют отрицательные значения, т.е. кривые распределения имеют плосковершинный вид – вдавлены. Плосковершинные кривые характерны и для распределения повторяемости всех семейств облачности.

Для более полного представления режима облачности в Горном Алтае нами было рассмотрено распределение дней с различной суммой баллов общей и нижней облачности за сутки по шести выделенным в [100] группам:

- 1 группа: ясные по общей и нижней облачности;
- 2 группа: облачные по общей, но ясные по нижней облачности;
- 3 группа: облачные по общей и нижней облачности;
- 4 группа: пасмурные по общей, но ясные по нижней облачности;
- 5 группа: пасмурные по общей и облачные по нижней облачности;
- 6 группа: пасмурные по общей и нижней облачности.

Пасмурными считались дни с суммой баллов за сутки 66–80, ясными – дни с суммой баллов 0–14, причём ни в один из сроков балл облачности не превышал 5 (дни с суммой до 14 баллов, когда хотя бы в один срок облачность превышала 5 баллов, присоединялся к облачным дням с суммой 15–65 баллов).

В холодном полугодии наибольшую повторяемость имеет вторая группа, лишь в октябре, когда на территорию Горного Алтая наиболее часто выходят циклоны [93], наблюдается некоторое уменьшение повторяемости второй группы; в целом же в течение холодного полугодия повторяемость этой группы изменяется мало. В октябре увеличивается повторяемость третьей и пятой групп облачности, которые и определяют состояние небесного свода; наименьшую повторяемость в октябре имеют вторая и четвертая группы, поскольку отсутствие нижней облачности нехарактерно для атмосферных процессов в октябре.

Шестая группа совсем не характерна для холодного полугодия, что связано с большим влиянием на погодные условия Горного Алтая в это время устойчивого барического образования – Азиатского антициклона. Ясные дни (первая группа) наиболее часто встречаются в декабре, реже всего – в октябре. Таким образом, выводы, полученные с помощью последнего метода рассмотрения режима облачности, хорошо согласуются с результатами по распределению среднего балла общей и нижней облачности, а также повторяемости различных семейств облаков. Наиболее

часто встречающаяся вторая группа облаков обусловлена высокой повторяемостью облаков среднего и верхнего ярусов в холодном полугодии в Горном Алтае.

В тёплом полугодии чаще всего встречаются третья и пятая группы облаков. Шестая группа и в тёплом полугодии не является характерной для Горного Алтая – за счёт того, что кучевая облачность, типичная для этого времени, не наблюдается в целом за сутки в таком количестве, которое необходимо для пасмурного дня по методике [100]. Четвертая группа тоже наблюдается редко, первая же группа – крайне редко, а если и встречается, то в переходные периоды; не набирает заметной повторяемости и вторая группа.

Таким образом, в тёплом полугодии, как правило, прослеживается нижняя облачность, причём, как показал анализ повторяемости облаков различных семейств, эта облачность представлена кучевой или кучево-дождевой. Все группы, связанные с отсутствием нижней облачности, прослеживаются в тёплом полугодии нечасто.

Полученные результаты исследования режима облачности в Горном Алтае дают возможность оценить методику, предложенную в [100], как позволяющую получить общую картину облачного режима, полезную для понимания атмосферных процессов в горных странах, где каждая станция и пост дают во многом отличающиеся данные, представляющие трудности для анализа режима облачности в целом регионе.

У любого исследователя облачного режима по наземным данным имеется некоторая неуверенность в объективности сведений, касающихся облаков среднего и верхнего ярусов, которые могут быть закрыты ниже-расположенной облачностью. Вставал такой вопрос и перед нами. Что касается холодного полугодия, в котором нижняя облачность наблюдается редко, этот вопрос не встает по крайней мере в отношении облаков среднего яруса. Сказанное в значительной мере справедливо и для переходных сезонов. Поэтому интересно было сопоставить данные наземных и спутниковых наблюдений для месяцев, когда процессы облакообразования выражены достаточно ярко. Результаты таких сопоставлений приведены, например, в [101].

Основные особенности режима облачности над Горным Алтаем представлены в [102].

6. СТРАТОСФЕРНЫЕ И МЕЗОСФЕРНЫЕ ОБЛАКА

6.1. Стратосферные облака

Облака в атмосфере формируются и в высоких слоях, расположенных выше тропосферы, где содержание водяного пара весьма мало (основным влагонесущим слоем, как известно, является нижний пятикилометровый слой, т.е. нижняя и средняя тропосфера).

Облака, сформированные выше тропосферы, не являются облаками основных форм, однако они несут бесценную информацию о слоях, в которых наблюдаются. Речь идёт о стратосферных облаках, называемых перламутровыми, и о мезосферных облаках, которые называют серебристыми.

В данном разделе поговорим о перламутровых облаках. Территории их появления ограничены. Ближайшими к нам районами наблюдения перламутровых облаков являются Аляска, Норвегия, Швеция, Финляндия. Систематические наблюдения за перламутровыми облаками начались в Осло в 1871 г.

Исследователи данного красивого и интересного явления отмечают, что перламутровые облака формируются и наблюдаются при наличии к западу от места их появления достаточно интенсивной циклонической деятельности, при соприкосновении воздушных масс с большими контрастами температур. Как правило, указанные облака наблюдаются при наличии в высоких слоях сильного струйного течения. В таких условиях в зоне соприкосновения холодной и тёплой воздушных масс со значительными контрастами температур имеются и различия в высотах расположения тропопаузы над этими воздушными массами.

В результате при развитой турбулентности создаются условия для выноса в стратосферу воздуха из тропосферы. Это связано с тем, что в данных условиях, как показано ещё в 1960 г. [103], наблюдаются разрыв тропопаузы и, как следствие, подъём воздуха до больших высот. В дальнейшем этот вывод был неоднократно подтверждён более поздними исследованиями.

Поднимающийся тёплый воздух адиабатически охлаждается и приближается к состоянию насыщения. Этот подъём происходит до тех пор,

пока температура поднимающегося воздуха не сравняется с низкой температурой воздуха в слоях стратосферы (температура составляет 193–195 К и может быть ниже).

Поступающая в стратосферу влага в сочетании с низкой температурой приводит к возникновению в стратосфере облачных слоёв. Важно также заметить, что выше слоя образования перламутровых облаков прослеживается температурная инверсия, которая помогает сложиться необходимой концентрации водной аэрозольной среды, какой и являются перламутровые облака.

Механизм выноса влаги в слои стратосферы можно рассмотреть и в ином масштабе. Над районами Атлантики воздух обладает большим влагосодержанием. В этих районах нередко формируются циклоны. Известно, что так называемый Исландский минимум является областью постоянного возникновения циклонов, особенно глубоких и частых в зимнее время, на севере Атлантического океана.

Над циклонами тропопауза поднимается относительно уровня её расположения над окружающими циклоны районами. Если эта, более высокая, тропопауза не соединяется с тропопаузой, расположенной вокруг циклона на более низком уровне хотя бы на сотню (сотни) метров, то влага может быть вынесена в стратосферу. На севере Атлантики, где, как уже указывалось, часто образуются глубокие и высокие циклоны с контрастными в температурном отношении воздушными массами, нередко происходит вынос водяного пара в стратосферу, особенно в зимнее время.

При перемещении указанных циклонов на восток механизмом образования перламутровых облаков являются и орографические особенности данного района – воздушные массы совершают, кроме того, вынужденный подъём под влиянием Скандинавских гор.

Итак, высокое влагосодержание воздуха Атлантики, сильные восходящие движения в циклонах, различия в расположении тропопаузы над разными контрастными воздушными массами и циклонами в целом по сравнению с окружающими циклоны районами, влияние орографии порождают вынос влажного тропосферного воздуха в стратосферу, где нередко и образуются перламутровые облака.

Западный перенос способствует некоторому перемещению перламутровых облаков в районы, расположенные восточнее относительно места их формирования, однако часть их подвергается рассеиванию при нисходящих движениях на подветренных склонах Скандинавских гор вследствие адиабатического нагревания воздуха. Вместе с тем не утихают

споры по поводу наблюдения перламутровых облаков над северо-западными и северными районами нашей страны.

Что касается высот образования перламутровых облаков, то чаще всего в литературных источниках указывается диапазон 22–25 или 20–30 км, но иногда этот диапазон расширен: например, в [104] указано, что перламутровые облака видны на высотах 17–32 км.

Наблюдатели отмечают, что перламутровые облака имеют красную, золотистую, зелёную, лиловато-розовую окраску и появляются в виде пятен, полос, волн, бледнеющих днём. Облака переливаются всеми цветами радуги, словно перламутр, за что и получили своё название. Часто перламутровые облака внешне сходны с чечевицеобразными облаками основных форм, однако стратосферные облака и более высокие, и более тонкие, и более прозрачные.

Скорее всего, появление перламутровых облаков зачастую связано с процессом возникновения горных волн. Формирование перламутровых облаков связано с дифракцией света на частицах этих аэрозольных сред. Вследствие указанного процесса облака и имеют радужную окраску.

Перламутровые облака могут образоваться в районах проникновения вершин кучево-дождевых облаков (*Cb*) в стратосферу: поступление влаги в достаточно холодные слои способно привести к образованию перламутровых облаков.

Перламутровые облака видны на фоне тёмного неба, когда слои атмосферы на больших высотах уже (или ещё) освещаются солнцем, т.е. после захода или перед восходом светила, чаще в гражданские (вечерние или утренние) сумерки, когда солнце опускается за плоскость горизонта не ниже чем на 6–8°.

В стратосфере Антарктиды температуры очень низки, поэтому здесь перламутровые облака образуются чаще, чем в северном полушарии.

Так как обычно стратосферные облака наблюдаются в полярных широтах, их иногда называют полярными стратосферными облаками.

Интерес к стратосферным облакам связан не только с их необычной красотой, но и с тем, что места наблюдения этих облаков совпадают с областями пониженного содержания озона. Вернее сказать, перламутровые облака являются признаком разрушения озонового слоя. Чем больше стратосферных облаков, тем меньшая концентрация озонового слоя фиксируется в местах наблюдения этих красивых облаков.

Стратосферные облака состоят из мелких частичек (переохлаждённых капелек или кристалликов) воды, азотной кислоты и некоторых других

кислот. Например, химические реакции между диоксидом азота и радикалом ОН приводят к образованию азотной кислоты. Некоторые реакции, связанные с гибелью озона, приведены в [105].

6.2. Мезосферные облака

Мезосферные, или серебристые, облака являются самыми высокими облаками в земной атмосфере. Эти облака формируются в верхней мезосфере, где наблюдаются наиболее низкие температуры воздуха. При падении температуры в достаточно мощном слое мезосферы, в условиях очень низких температур в её верхней части, да ещё и при наличии мезопаузы, которая является задерживающим слоем для водяного пара, аэрозолей, создаётся возможность формирования облаков, хотя содержание водяного пара здесь весьма мало.

Мезосферные облака наблюдаются на высотах 82–85 км, т.е. под самой мезопаузой. Что касается широтной зоны формирования серебристых облаков, то она значительно шире, чем у облаков перламутровых, и составляет в южном полушарии 40–60°, в северном – 46–71°, согласно [104], и 50–75°, согласно [92]. Вне указанных широтных поясов серебристые облака наблюдаются редко.

Мезосферные облака формируются в то время, когда Земля находится дальше всего от Солнца (в афелии), следовательно, температура в мезосфере принимает наиболее низкие значения. В северном полушарии этот период приходится на летние месяцы. Зимой в северном полушарии серебристые облака не наблюдались. В таких высоких слоях, каким является мезосфера, температура воздуха определяется уже не влиянием подстилающей поверхности, а астрономическим фактором – удалённостью нашей планеты от Солнца. В южном полушарии серебристые облака наблюдаются в то же время, что и в северном, но там в это время зима. Серебристые облака могут быть замечены не только в процессе наземных наблюдений, но и с борта космических кораблей.

При наземных наблюдениях мезосферные облака хорошо различимы в сумерки, когда они освещены Солнцем, которое уже опустилось за горизонт на 4°. Тогда облака освещаются рассеянным солнечным светом и, будучи очень тонкими и прозрачными, не перекрываются яркостью небесного свода.

Мезосферные облака имеют слегка голубоватый или серебристый оттенок, поскольку красный участок спектра ослаблен [9].

Структурные формы серебристых облаков различны:

1) туманообразная масса, т.е. почти однородный тонкий слой, который называют флёром;

2) широкие туманообразные полосы, более или менее размытые или достаточно резко очерченные;

3) полосы, связанные с волновыми движениями, выраженными в поле облаков в той или иной мере, с различными длинами волн (от 3–12 до 100 км и более, а иногда и до 250–280 км [106]);

4) вихри с различной степенью выраженности вихревой природы.

Обычно в полях серебристых облаков наблюдаются две и более структурные формы одновременно. Многослойность некоторых полей серебристых облаков свидетельствует о сложности структуры мезопаузы.

С борта космических кораблей мезосферные облака могут наблюдать не только на ночной, но и на дневной стороне Земли.

Впервые на дневной стороне Земли серебристые облака были зарегистрированы приборами с борта американского спутника OGO-6. Было замечено [106], что иногда поле серебристых облаков образует сплошную полосу, покрывающую половину и даже большую часть земного шара (в интервале географических широт 45–70° с.ш.). Наблюдения с искусственных спутников Земли (ИСЗ) подтвердили многоярусность полей серебристых облаков: чаще они имеют двоярусную и трёхярусную структуру. Возможно, это говорит о наличии не одного, а нескольких слоёв минимальной температуры, как это бывает в случаях двойной тропопаузы в более низких слоях.

Ядрами для появления облачных частиц на очень больших высотах могут быть частицы космического либо вулканического происхождения. Так, после извержений вулканов серебристые облака часто появляются над местами этих извержений.

Интересно, что очень яркие серебристые облака, покрывшие огромную площадь, отмечались после падения так называемого Тунгусского метеорита. Данный факт послужил поводом для организации работы, например, томских экспедиций в течение ряда лет на месте предполагаемого падения метеорита. В этих экспедиционных работах участвовали сотрудники и студенты Томского государственного университета, а также сотрудники других томских вузов.

Таким образом, перламутровые и серебристые облака различаются между собой временем образования, местами образования и цветом (оттенком).

Например, если серебристые облака видны в северном полушарии летом, то перламутровые – преимущественно зимой. Перламутровые облака – более редкое явление, наблюдающееся над определёнными территориями, вне которых они появляются в исключительных случаях. Серебристые облака наблюдаются в более широком диапазоне широт и занимают большие площади, чем перламутровые облака. По окраске эти облака тоже трудно перепутать, о чём упоминалось выше.

Случалось, что серебристые облака путали с высокими перистыми облаками, и это порождало большие споры в научной литературе. Следует помнить, что серебристые облака с увеличением яркости неба тускнеют, а затем и вовсе становятся невидимыми, в отличие от перистых облаков, которые хорошо заметны в любое время суток.

7. ТРАНСФОРМАЦИЯ ОБЛАКОВ

Облака, их формы, виды и разновидности всегда характеризуют состояние атмосферы, процессы, в ней протекающие. Состояние же атмосферы изменяется непрерывно. Понятно, что и облака, связанные с постоянным состоянием атмосферы, будут демонстрировать своё изменение. Более того, динамика облаков позволяет судить о направлении и скорости протекающих в атмосфере процессов.

Трансформация облаков связана и с изменением их оптических свойств, поскольку в ходе этого процесса изменяются макрофизические и микрофизические характеристики, в частности распределение облачных частиц по размерам и водность в целом. Распределения же облачных частиц по размерам отличаются у облаков разных форм (возможно, и у разновидностей одних и тех же форм).

Таким образом, весьма важно изучать все изменения в облачных полях. Эти изменения могут проявляться в смене облаков, изменении параметров и характеристик в облаках, не меняющих свои форму, виды или разновидности. Вместе с тем могут наблюдаться и изменения формы, вида или разновидности облаков.

Условимся, что трансформацией облаков будем считать изменение их форм, видов и разновидностей в одной и той же водной аэрозольной среде.

Не будем путать трансформацию облаков и их смену, когда одна аэрозольная среда сменяется другой, т.е. в ходе какого-либо атмосферного процесса облака сменяются в определённой последовательности, не являясь одной и той же водной аэрозольной средой.

Трансформация облаков может быть связана с возрастанием или убыванием энергии неустойчивости, с влиянием на облака орографии места, вообще с динамикой облаков, которая может быть обусловлена влиянием различных факторов.

Наиболее известная трансформация облаков связана с развитием облаков кучевых форм. Если неустойчивость позволяет кучевым облакам расти по вертикали, то они будут изменять вид от кучевых плоских (*Cu hum.*) до кучевых мощных (*Cu cong.*), а иногда и до кучево-дождевых.

С указанными облаками тесно связаны облака башенковидные (*Sc cast.*, *Ac cast.*) в нижнем и среднем ярусах. Особенно близки к облакам верти-

кального развития по условиям образования *Sc cast.* Действительно, если неустойчивость в слое, содержащем, например, слоисто-кучевые башенковидные облака (*Sc cast.*), будет возрастать на каких-то его участках, то усилятся восходящие движения различного характера (как упорядоченные, так и неупорядоченные). На соседних участках этого же слоя, где неустойчивость выражена слабее, будут иметь место компенсирующие нисходящие движения.

В результате соседствующих восходящих и нисходящих потоков на одних участках облачного слоя его вертикальная мощность увеличится, а на других уменьшится, что через определённое время может привести к полному размыванию данного облачного участка. В таком случае облачные массы становятся изолированными, следовательно, кучевыми, а впоследствии – даже кучево-дождевыми.

Впрочем, процесс может протекать и в обратном направлении. Скажем, неустойчивость в слое, содержащем кучевообразные облака, уменьшилась, что приведёт к оседанию указанных облаков. Тогда постепенно облака, например кучевые, сначала, уплотняясь, поменяют вид своей же формы, а затем могут стать башенковидными, т.е. изменят форму. Если направление процесса сохранится, они могут изменить вид внутри этой же, уже новой, формы. Хорошо известны вечерние растекающиеся и даже дневные растекающиеся слоисто-кучевые облака (*Sc vesp.*, *Sc diur.*), которые свидетельствуют об истории развития данного процесса.

При растекании мощных кучевых облаков (*Cu cong.*) могут возникнуть гряды высоко-кучевых облаков. Тогда они будут классифицированы как *Ac cuf.* В дальнейшем эти облака могут трансформироваться в *Ac opac.* и *Ac trans.* [107].

Эволюционируют кучевые облака всё-таки чаще всего либо в облака кучево-дождевые (*Cb*), либо в высоко-кучевые (*Ac*), что определяется направлением развития процесса.

Безусловно, к процессам трансформации относятся и упомянутые выше случаи, когда растущие кучевые мощные облака (*Cu cong.*) соприкасались своими вершинами со старыми наковальнями (*Ci incus-genitus*), утратившими связь с разрушающимися кучево-дождевыми облаками. Такие наковальни, практически не охваченные процессами разрушения при разрушенных нижних основных частях облаков *Cb* и длительно сохраняющие свою форму, могут служить катализаторами, вызывающими весьма быстрое оледенение проходящих под ними растущих мощных кучевых облаков (*Cu cong.*) в момент их соприкосновения.

К такому же эффекту может привести соприкосновение вершин растущих мощных кучевых облаков с перистыми облаками, возникшими в ходе разрушения кучево-дождевых облаков, если первые и не представляли собой наковальни.

Указанные выше очень интересные случаи оледенения вершин мощных кучевых облаков приводят к пониманию динамики кучевообразных облаков в целом.

Иными словами, соприкосновение капельной вершины мощных кучевых облаков с кристаллическими остатками облаков кучево-дождевых приводит к образованию облака со смешанным микрофизическим строением, т.е. кучево-дождевого облака.

Исследователи всех времён всегда уделяли повышенное внимание трансформации кучево-дождевых облаков, даже если такая трансформация не выходила за пределы этой формы. Как указывалось выше, моментом перехода кучевых мощных облаков (*Cu cong.*) в кучево-дождевые (*Cb*) является оледенение вершины облака. В стадии роста кучево-дождевые облака являются «лысыми» (*Cb calv.*). Такие облака обычно являются ливневыми, лишь в исключительных случаях в них могут проявить себя грозовые разряды, поскольку быстрое увеличение мощности облаков *Cb calv.* сопровождается увеличением в них напряжённости электрического поля [57]. После начала выпадения осадков из *Cb calv.* рост их мощности резко замедляется, а сами облака могут превратиться в *Cb cap.* Следующая ступень динамики этих облаков – образование наковальни, когда облака *Cb* становятся облаками *Cb inc.*

Пути перехода из *Cb calv.* в *Cb inc.* описаны выше в соответствующем разделе [107].

Таким образом, наиболее интенсивно кучево-дождевое облако (*Cb*) растёт вверх, являясь облаком *Cb calv.* Рост же *Cb cap.* резко замедляется, а *Cb inc.* – постепенно прекращается. Это связано с изменением значения, а впоследствии и знака энергии неустойчивости атмосферы в рассматриваемом слое [105].

Иногда на небесном своде появляются интересные облака, которые С.М. Шметер назвал *Cb calv. – Cb inc.* В случаях таких облаков с борта самолёта можно наблюдать одну или несколько куполообразных возвышенностей, поднимающихся над верхней границей наковальни кучево-дождевого облака.

Понятно, что эти купола являются вершинами облаков *Cb calv.*, которые растут ещё некоторое непродолжительное время (10–15 мин) после

образования наковальни. Такая своеобразная разновидность кучево-дождевых облаков не выделена в рамках морфологической классификации, поскольку указанные купола над верхней границей данных облаков при наземных наблюдениях, как правило, не видны. Заметим, что облака *Cb inc.* с плоской наковальней вверх не растут, более того, вершины таких *Cb* достаточно быстро опускаются.

При распаде кучево-дождевых облаков раньше по времени исчезает жидко-капельная часть облака, которая находится в нижней его части. Это связано с более высокими значениями упругости насыщения над водой (каплями) по сравнению с её значениями над кристаллами. В результате капли воды при замедлении и прекращении «поставки» влаги с подстилающей поверхности раньше, чем кристаллы, оказываются в ненасыщенном водяным паром воздухе, поэтому испаряются. В том же самом облаке и в то же время кристаллы ещё некоторое время находятся в воздухе, насыщенном водяным паром, поэтому сохраняются. Кроме того, как указывалось выше, в кучево-дождевом облаке имеются также слои, содержащие смесь капель и кристаллов. В этой сложной ситуации, конечно же, в самом выгодном положении находится верхняя часть облака, которая после распада нижней капельной части может сохраняться достаточно долго – в течение нескольких часов, а иногда и до суток. В результате подобная трансформация приводит к появлению облаков верхнего яруса.

Облака среднего яруса при распаде кучево-дождевых облаков наблюдаются реже, что связано с микроструктурой этих облаков. Понятно, что данные облака сохраняются в течение меньшего времени по сравнению с облаками верхнего яруса. Заметим ещё, что сохранение кристаллической части кучево-дождевых облаков при их диссипации связано и с малой скоростью оседания кристаллов в атмосфере, включая облачную часть, по сравнению с каплями, особенно при ослаблении восходящих потоков воздуха в слоях, содержащих *Cb*. Вследствие растекания наковальни кучево-дождевых облаков могут образоваться достаточно обширные поля облаков *Ci ing.*, переходящие на периферии этих полей в облака *Ci sp.*

Перистые плотные облака (*Ci sp.*), как указано выше, обычно связаны с распадающимися кучево-дождевыми облаками.

В результате трансформации кучево-дождевых облаков над Россией и сопредельными районами при диссипации этих облаков в верхнем ярусе прослеживаются не только перистые облака, но и облака перисто-кучевые (*Cc*).

Наблюдаются и случаи иного направления развития процесса трансформации. Так, например, наблюдались и описаны случаи, когда диссипирующее кучево-дождевое облако регенерирует. Это бывает тогда, когда с границей диссипирующего *Cb* соприкасается облако развивающееся – *Cb calv.* или *Cu cong.* В любом из этих случаев в уже распадающееся кучево-дождевое облако проникают термики с достаточным запасом энергии неустойчивости.

Результатом трансформации некоторых облаков при волновых движениях в атмосфере являются волнистообразные облака (в морфологической классификации это волнистые облака в разных высотных слоях атмосферы). Например, из областей пониженного атмосферного давления фронтальные облака *Ns–As* могут переноситься в области повышенного и высокого атмосферного давления – в антициклоны, в частности в их гребни.

В этих областях преобладающими являются нисходящие движения, под влиянием которых облака *Ns–As* трансформируются в волнистые облака *St und.*, *Sc und.* или *Ac und.* Важно заметить, что до упомянутой трансформации под влиянием нисходящих движений в областях высокого или хотя бы повышенного атмосферного давления формируется инверсия оседания (при адиабатическом сжатии воздуха, перемещающегося в сторону более высокого давления, его внутренняя энергия увеличивается, следовательно, температура повышается).

При такой расслоённости атмосферы, когда в её верхней части расположен более тёплый воздух, а в нижней – более холодный, на границе двух сред и формируются волновые движения [105, 108]. При этом чаще происходит трансформация облаков *Ns* в волнистообразные облака, чем облаков *As*.

Иногда трансформация облаков *Ns* в *St und.* и *Sc und.* происходит не при перемещении слоисто-дождевых облаков в барическом поле, а при изменении той части барического поля, в которой наблюдаются слоисто-дождевые облака – при заполнении ложбин, когда восходящие движения сменяются движениями нисходящими.

Нередки случаи процессов трансформации облаков среднего яруса *As* в *As* или *As* в *Ac*. Кроме того, *Ac* могут уплотняться и трансформироваться в *Sc*.

Высоко-кучевые облака могут возникнуть и в результате разрушения облачных систем атмосферных фронтов. Вообще заметим, что высоко-кучевые облака могут быть обязанными своим происхождением как внутримассовым, так и фронтальным облакам.

Волнистые облака могут появиться под влиянием процесса трансформации и в верхнем облачном ярусе. Если в поле перистых или перисто-слоистых облаков проявилось волновое движение, распространяющаяся волна приводит к трансформации указанных облаков в волнистые перисто-кучевые облака (*Cc und.*).

Нередко наблюдается трансформация облаков *Cs fil.* в облака *Ci fil.* или *Ci int.* Это зависит от того, является ли волокнистая структура *Cs fil.* упорядоченной или волокна несколько спутаны, т.е. располагаются непараллельно. В любом случае под влиянием волновых движений в промежутках между отдельными волокнами плотность аэрозольной среды облака может уменьшиться вплоть до полного исчезновения.

Иногда внутри слоя плотных перисто-слоистых облаков при их распаде, т.е. в процессе трансформации, могут образоваться облака *Ci fil.* и *Ci sp.* [109].

Если в облачных полях *Ci* и *Cs* появляются волновые или усиливаются конвективные движения, то в верхней тропосфере могут появиться перисто-кучевые облака (*Cc*) соответствующих видов и разновидностей. Так, при распространении волны в облачных полях перистых или перисто-слоистых облаков появляется правильная рябь *Cc und.*

Говоря о трансформации, невозможно обойти вниманием необычную разновидность – вымеобразные слоисто-кучевые облака (*Sc mammatus*). Эти облака, согласно выводу А. Вегенера [50], обязаны своим внешним видом волновому движению в слое уже сформированных облаков, имеющих высокую водность. Указанные облака, по мнению А. Вегенера, являются «обращённой» формой волнистых облаков, когда нисходящее движение приводит не к размыванию или хотя бы уплощению частей облачного слоя, связанных с адиабатическим нагреванием, а к опусканию этих частей слоя облаков. Такая трансформация возможна лишь при очень большой водности облаков, когда адиабатического нагревания недостаточно для полного или значительного испарения облачных частиц при их опускании. Часть облачных частиц сохраняется, являясь уже частицами *Sc tat.*

Важно заметить, что в случаях образования указанных выше облаков ниже их слоя прослеживался устойчивый слой, ограничивающий конвекцию снизу, что было впоследствии подтверждено другими исследованиями [12].

Понятно, что большой водностью обладают облака, расположенные ближе к подстилающей поверхности. Однако об облаках вертикального

развития речь не идёт, поскольку в них проявляют себя сильные восходящие движения, препятствующие проявлениям волновых движений.

У фронтальных слоисто-дождевых облаков восходящее движение связано с крупномасштабным подъёмом тёплой воздушной массой вдоль клина холодной воздушной массы. Понятно, что волновому движению в таких условиях проявиться тоже сложно. А вот когда такой облачный слой оказывается в условиях более высокого атмосферного давления, как было указано выше, трансформация его под влиянием волновых движений происходит достаточно часто.

Что касается облаков *St*, также относящихся к облакам нижнего яруса, то эти облака, хоть и очень низкие и, следовательно, формирующиеся в слое большой влажности, являются маломощными, характеризующими устойчивую атмосферу. Движения по вертикали в такой среде достаточно слабые, инверсия чаще всего расположена над облаками.

Обычные волнистые облака в подобных случаях могут наблюдаться, но не вымеобразные. Единственными облаками, которые могут иметь разновидность *mammatus*, являются слоисто-кучевые облака. У этих облаков имеется достаточно высокая водность, в них может быть проявлено волновое движение, в частности его «обращённая» форма.

Вместе с тем важно отметить, что условия, необходимые для трансформации слоисто-кучевых облаков, обладающих разновидностью «вымеобразные слоисто-кучевые облака», наблюдаются достаточно редко, поэтому указанные облака часто и не фиксируются.

Таким образом, появление на небесном своде разновидности *mammatus*, которая формально относится к *Sc cumuliformis*, свидетельствует о появлении волн в слое высокой водности.

Наиболее часто и быстро трансформация происходит в горных районах. Это связано с тем, что с изменением положения Солнца изменяется и положение склонов, им освещаемых, следовательно, стратификация воздуха над склонами различной ориентации и разной крутизны. Если, кроме того, изменяется направление ветра, то наветренные и подветренные склоны могут поменяться местами. Все указанные изменения неминуемо приведут к трансформации облаков.

Если же над районами со сложным рельефом проходят атмосферные фронты, то, например, фронтальные высоко-слоистые облака (*As*), как правило, под влиянием гор трансформируются в волнистые облака *Ac und*. Это связано с волновыми движениями над горами – волнами препятствий или орографическими волнами.

Подведём итоги. Трансформация возможна как внутри каждого из семейств облаков, так и из облака одного семейства в облако другого семейства.

Внутри одного и того же семейства процесс трансформации реализуется как при трансформации одной формы облаков в другую, так и при трансформации внутри одной и той же формы облаков.

В любом случае и сам факт трансформации, и, конечно же, характер этой трансформации однозначно свидетельствуют о направлении развития атмосферного процесса, а в ряде случаев – и о скорости протекания этого процесса.

Изменения в больших полях облаков под влиянием изменившихся атмосферных процессов были прослежены автором в ходе работы в течение ряда лет в Отделе анализа спутниковых данных в Западно-Сибирском региональном гидрометеорологическом институте.

Занятия, проводимые автором со студенческими группами в Томском государственном университете по дисциплине «Физика облаков и осадков», включали в себя фотографирование процессов трансформации облаков, а также сопоставление по синоптическим картам атмосферной ситуации в районе и во время, соответствующее наблюдаемой трансформации облаков. В ряде случаев, кроме того, проводились измерения метеорологических величин и прослеживались их изменения в период трансформации облаков.

Проведённая работа и анализ её результатов свидетельствуют о хорошем согласовании наличия и характера трансформации облаков с изменением атмосферных условий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Используемая в нашей стране и приводимая в основной метеорологической литературе классификация облаков имеет отличия от Международной классификации. Последняя издана на русском языке в 2007 г. [110]. В названиях и толковании форм облаков различий между классификацией, используемой в нашей стране, и Международной классификацией нет. Имеются различия в видах и разновидностях различных облаков.

На наш взгляд, в Международной классификации встречаются довольно сложные сочетания многих терминов в названиях облаков, которые не вносят уточнений относительно терминов, используемых в нашей стране, и не способствуют лучшему пониманию физики образования и динамики этих облаков.

Таким образом, классификация облаков, традиционно используемая в нашей стране, – и более стройная, и более «физичная». Последнее играет большую роль в восприятии облаков студентами и в использовании классификации наблюдателями гидрометсети. Автор, имея опыт применения обеих классификаций облаков в учебном процессе, пришла к выводу, что классификация, традиционно используемая в нашей стране, удобнее для рассмотрения физических процессов, протекающих в атмосфере, для понимания процессов облакообразования и просто для запоминания названий облаков. Противоречий же между упомянутыми классификациями нет.

Наука об облаках претерпела существенные изменения с того времени, когда были изданы первые классификации, первые описания облаков и атмосферных явлений, с ними связанных [111], до сегодняшнего дня.

Систематическое изучение облаков началось, по существу, около сорока лет тому назад, но за это время физика облаков прошла большой путь и превратилась в один из наиболее динамично развивающихся разделов метеорологии. Появились новые направления, такие, например, как динамика облаков при моделировании процессов облакообразования. В настоящее время выполняются расчёты времени образования и рассеивания облаков, оценено и учитывается влияние облачности на потоки радиации в различных участках спектра, на вид моделей общей циркуляции атмосферы, а также мезо- и микроциркуляции, на эффективное излу-

чение земли и её радиационный баланс и т.д. Предпринимаются попытки создать численные схемы прогноза облаков, осуществляются воздействия на них. Например, уточняется электрическая структура облаков. В [112] показано расположение по вертикали основных центров электрических зарядов. Установлено, что количество основных зарядов в *Cb* равно двум, реже трем. Определено положение основных зарядов в том и другом случае.

В [113] уточнены значения альбедо многих форм облаков. В последние десятилетия целый ряд исследований посвящен градовым процессам. В [114] установлена связь между количеством осадков в ливнях и вероятностью выпадения града, а в [68] обнаружена связь между грозовыми процессами и процессами градообразования. В [70] пересмотрено представление о принципах воздействия на градообразование и сроках внесения реагента относительно стадий развития *Cb*, а в [115] построена двумерная нестационарная модель конвективного облака, что дополняет [116].

Вместе с тем, чтобы до конца понять природу облакообразования, с большой точностью описать этот процесс и профессионально вмешиваться в него, необходимы ещё годы и десятилетия. Однако каждый год вносит что-то новое в наши знания об облаках, формируя более глубокое их понимание, и мы по-новому всматриваемся в разнообразные и исключительно интересные облака, без которых немыслимы наш земной пейзаж с его бесконечным разнообразием природы и наше земледелие.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гранин Д.А. Иду на грозу : избранные произведения. Л. : Худож. лит., 1969. 284 с.
2. Клосс Р., Фаси Л. Облака. Л. : Гидрометеиздат, 1970. 120 с.
3. Atlas International des Nuages. WMO, 1956. Vol. 1. 156 p.; Vol. 2. 224 с.
4. Атлас облаков / под ред. А.Х. Хргиана. Л. : Гидрометеиздат, 1957. 143 с.
5. Атлас облаков / под ред. А.Х. Хргиана, Н.И. Новожилова. Л. : Гидрометеиздат, 1978. 346 с.
6. Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. Л. : Гидрометеиздат, 1976. 639 с.
7. Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. Л. : Гидрометеиздат, 1984. 751 с.
8. Пчелко И.Г. Авиационная метеорология. Л. : Гидрометеиздат, 1963. 346 с.
9. Хргиан А.Х. Физика атмосферы. Л. : Гидрометеиздат, 1978. Т. 2. 319 с.
10. Пчелко И.Г. Метеорологические условия полетов на больших высотах. Л. : Гидрометеиздат, 1957. 56 с.
11. Решетов Г.Д. Облачность в верхней тропосфере // Труды Центрального института прогнозов. 1961. Вып. 81. С. 48–91.
12. Боровиков А.М., Гайворонский И.И., Зак Е.Г., Костарев В.В., Мазин И.П., Минервин В.Е., Хргиан А.Х., Шметер С.М. Физика облаков / под ред. А.Х. Хргиана. Л. : Гидрометеиздат, 1961. 459 с.
13. Мазин И.П., Невзоров А.П. О микроструктуре кристаллических облаков // Вопросы физики облаков. Л. : Гидрометеиздат, 1987. С. 37–49.
14. Weickmann H. Die Eisphase in der Atmosphäre // Ber dtsch. Wetter D. 1949. № 6. 53 S.
15. Боровиков А.М., Мазин И.П. Микрофизические характеристики облаков // Авиационно-климатический атлас-справочник СССР / под ред. Л.С. Дубровиной. М. : Гидрометеиздат, 1975. Вып. 3, т. 1. С. 127–148.
16. Акимов Н.М. Исследование ледяных кристаллов и частиц искусственных осадков при засеве зимних облаков // Вопросы физики облаков. Л. : Гидрометеиздат, 1978. С. 26–41.
17. Вейкман Х.К. Типы роста атмосферных ледяных кристаллов // Вопросы физики атмосферы. Л. : Гидрометеиздат, 1978. С. 97–101.
18. Волковицкий О.А., Никифорова Н.К., Павлова Л.Н., Петрушин А.Г., Сныков В.К. Модельные исследования оптических и аэродинамических свойств ледяных кристаллов // Вопросы физики облаков. Л. : Гидрометеиздат, 1978. С. 102–112.
19. Борисенко Е.П., Базлова Е.П., Ефимова Л.К. Перистая облачность и ее влияние на атмосферные процессы. Л. : Гидрометеиздат, 1989. 119 с.
20. Косарев А.Л., Мазин И.П., Невзоров А.П., Шугаев В.Ф. Микроструктура перистых облаков // Вопросы физики облаков. Л. : Гидрометеиздат, 1989. С. 160–186.
21. Облака и облачная атмосфера : справочник / под ред. И.П. Мазина, А.Х. Хргиана. Л. : Гидрометеиздат, 1989. 647с.
22. Минервин В.Е. Водность кристаллических облаков // Труды ЦАО. 1965. Вып. 64. С. 3–10.

23. Баранов А.М. Облака верхнего яруса и условия полетов в них. Л. : Гидрометеоздат, 1960. 99 с.
24. Мазин И.П., Шмелер С.М. Облака, строение и физика образования. Л. : Гидрометеоздат, 1983. 279 с.
25. Астапенко П.Д., Баранов А.М., Шварев И.М. Погода и полеты самолетов и вертолетов. Л. : Гидрометеоздат, 1980. 280 с.
26. Зак Е.Г. Температурная характеристика облаков верхнего яруса // Труды ЦАО. 1964. Вып. 55. С. 32–53.
27. Бурковская С.Н., Хргиан А.Х. Об одном случае наблюдения высоких перистых облаков // Труды ЦАО. 1964. Вып. 55. С. 54–59.
28. Облачный покров Земли / под ред. Л.М. Кравцова. М. : Гидрометеоздат, 1972. 24 с.
29. Хргиан А.Х. О формах перистых облаков // Труды ЦАО. 1969. Вып. 39. С. 39–44.
30. Косарев А.Л., Мазин И.П., Невзоров А.Н., Потемкин В.Г., Шугаев В.Ф. Некоторые микрофизические характеристики облаков разных географических районов // Вопросы физики облаков. Л. : Гидрометеоздат, 1979. С. 113–131.
31. Матвеев Л.Т. О причинах образования облаков // Метеорология и гидрология. 1978. № 8. С. 25–31.
32. Дубровина Л.С. Облака и осадки по данным самолетного зондирования. Л. : Гидрометеоздат, 1982. 216 с.
33. Хргиан А.Х. О строении высококучевых облаков // Труды ЦАО. 1974. Вып. 106. С. 33–51.
34. Тверской П.Н. Курс метеорологии. Л. : Гидрометеоздат, 1961. 700 с.
35. Госсард Э., Хук У. Волны в атмосфере. М. : Мир, 1978. 532 с.
36. Мейсон Б.Дж. Физика облаков : пер. с англ. Л. : Гидрометеоздат, 1961. 542 с.
37. Маркин В. На гребне воздушной волны // Наука и жизнь. 1979. № 8. С. 122.
38. Баранов А.М. Облака и безопасность полетов. Л. : Гидрометеоздат, 1983. 263 с.
39. Зак Е.Г. Характеристика фронтальной облачности по данным самолетных подъемов // Метеорология и гидрология. 1937. № 8. С. 15–28.
40. Матвеев Л.Т. Динамика облаков. Л. : Гидрометеоздат, 1981. 312 с.
41. Заболоцкая Т.Н., Крочак С.А., Рудько Ю.С. Характеристика слоисто- и волнисто-образных облаков, наблюдающихся над территорией Украины // Труды Украинского регионального НИИ. 1988. Вып. 229. С. 76–86.
42. Заболоцкая Т.Н., Крочак С.А., Рудько Ю.С. Температурный режим в облаках и околооблачном пространстве // Труды Украинского регионального НИИ. 1988. Вып. 229. С. 86–95.
43. Воробьев В.И. Высотные фронтальные зоны Северного полушария. Л. : Гидрометеоздат, 1968. 231 с.
44. Вейкман Х.К., Левин Л.Н., Мазин И.П. Вопросы физики облаков. Л. : Гидрометеоздат, 1978. 287 с.
45. Пономаренко И.Н., Заболоцкая Т.Н. Водность фронтальных облаков для степной части Украины по экспериментальным данным // Труды Украинского научно-исследовательского гидрометеорологического института. 1965. Вып. 48. С. 52–66.
46. Минервин В.Е. Турбулентность в нижнем слое атмосферы и в облаках нижнего яруса // Труды ЦАО. 1966. Вып. 71. С. 76–91.
47. Абрамович К.Г. Условия образования низких облаков. Л. : Гидрометеоздат, 1973. 122 с.

48. Половина И.П. Воздействия на внутримассовые облака слоистых форм. Л. : Гидрометеоздат, 1971. 215 с.
49. Половина И.П. Рассеяние переохлажденных слоистообразных облаков и туманов. Л. : Гидрометеоздат, 1980. 214 с.
50. Wegener A. Thermodynamik der Atmosphäre. Leipzig : Verlag von Johann Ambrosius Barth, 1911. 328 S.
51. Воронцов П.А. Строение облаков и условия обледенения самолетов // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 1951. Вып. 013. С. 72–77.
52. Белич Р.Б., Федорова А.А. Особенности годового хода высоты и температуры верхней границы облаков различных форм в основных физико-географических районах СССР // Труды ЦАО. 1971. Вып. 95. С. 140–151.
53. Кондратьев К.Я., Биненко В.И. Влияние облачности на радиацию и климат. Л. : Гидрометеоздат, 1984. 240 с.
54. Фейгельсон Е.М. Радиационные процессы в слоистообразных облаках. М. : Наука, 1964. 200 с.
55. Абрамович К.Г., Хргиан А.Х. Исследование условий возникновения слоистообразной облачности нижнего яруса // Труды ЦАО. 1960. Вып. 28. С. 3–48.
56. Алибегова Ж.Д. Пространственно-временная структура полей жидких осадков. Л. : Гидрометеоздат, 1985. 228 с.
57. Рыбакова Ж.В., Блинкова В.Г. Общая физика и некоторые аспекты физической метеорологии. Томск : Издательский Дом ТГУ, 2018. Ч. 3: Электричество. Магнетизм. 228 с.
58. Шметер С.М. Термодинамика и физика конвективных облаков. Л. : Гидрометеоздат, 1987. 288 с.
59. Шметер С.М. Физика конвективных облаков. Л. : Гидрометеоздат, 1972. 203 с.
60. Шметер С.М. Высокие кучевые облака // Труды ЦАО. 1960. Вып. 35. С. 3–20.
61. Баранов А.М. Фронтальные облака и условия полетов в них. Л. : Гидрометеоздат, 1964. 238 с.
62. Мазин И.П., Шметер С.М. О деформации полей метеорологических элементов в зоне кучевого облака // Вопросы физики облаков. Л. : Гидрометеоздат, 1978. С. 135–156.
63. Решетов Г.Д. Конвективная облачность на фронтах // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра СССР. 1967. Вып. 7. С. 41–49.
64. Рыбакова Ж.В., Блинкова В.Г. Общая физика и некоторые аспекты физической метеорологии. Томск : Издательский Дом ТГУ, 2017. Ч. 2: Молекулярная физика. Термодинамика. 196 с.
65. Динамика кучевых облаков / под ред. Ч.Э. Андерсона; пер. с англ. под ред. Н.И. Вульфсона. М. : Мир, 1964. 292 с.
66. Сулаквелидзе Г.К., Глушкова Н.И., Федченко Л.М. Прогноз града, гроз и ливневых осадков. Л. : Гидрометеоздат, 1970. 183 с.
67. Балабуев А.М. К вопросу формирования мощно-кучевых облаков в горных условиях // Труды института географии им. Вахушти АН Грузинской ССР. 1967. Т. 25, вып. 1. С. 5–13.
68. Сижажев С.М. Взаимосвязь грозовых и градовых явлений в кучево-дождевых облаках // Труды Высокогорного геофизического института. 1986. Вып. 65. С. 76–80.

69. Косарев А.Л., Мазин И.П., Невзоров А.Н., Потемкин В.Г., Шугаев В.Ф. Сравнение некоторых микрофизических характеристик облаков разных географических районов // Вопросы физики облаков. Л. : Гидрометеиздат, 1978. С. 113–134.
70. Абшаев М.Т. О новом методе воздействия на градовые процессы // Труды Высокогорного геофизического института. 1989. Вып. 72. С. 14–28.
71. Минервин В.Е., Моргунов С.П., Шупяцкий А.Б. Фазовая перестройка кучевых и кучево-дождевых облаков по радиолокационным наблюдениям // Труды ЦАО. 1971. Вып. 95. С. 76–99.
72. Мазин И.П., Невзоров А.Н. О микроструктуре кристаллических облаков // Вопросы физики облаков. Л. : Гидрометеиздат, 1987. С. 37–49.
73. Волковицкий О.А., Никифорова Н.А., Павлова Л.Н., Петрушин А.Г., Сныков В.П. Модельные исследования оптических и аэродинамических свойств ледяных кристаллов // Вопросы физики облаков. Л. : Гидрометеиздат, 1978. С. 102–112.
74. Скацкий В.И. Исследование водности кучевых облаков. М. : Гидрометеиздат, 1969. 69 с.
75. Вульфсон Н.И., Лактионов А.Г., Скацкий В.И. Структура кучевых облаков на различной стадии развития // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1973. Т. 9, № 5. С. 500–510.
76. Кучевые облака и связанная с ними деформация полей метеоэлементов / под ред. И.П. Мазина, С.М. Шметера // Труды ЦАО. 1977. Вып. 134. 127 с.
77. Планк В.Г. Конвекция кучевых облаков над Флоридой // Динамика кучевых облаков : сб. ст. / под ред. Ч.Э. Андерсона. М. : Мир, 1964. 292 с.
78. Шишкин Н.С. Облака, осадки, грозное электричество. Л. : Гидрометеиздат, 1964. 401 с.
79. Селезнева Е.С. О границах и вертикальной мощности конвективных облаков // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 1959. Вып. 93. С. 3–20.
80. Пастушков Р.С. Численное моделирование взаимодействия конвективных облаков с окружающей их атмосферой // Труды ЦАО. 1972. Вып. 108. 128 с.
81. Библашвили Н.Ш., Евстратов В.В., Ковальчук А.Н. Некоторые аспекты взаимодействия кучево-дождевого облака с окружающей средой // Труды Высокогорного геофизического института. 1985. Вып. 61. С. 93–97.
82. Баранов А.М., Мазурин Н.И., Солонин С.В., Янковский И.А. Авиационная метеорология. Л. : Гидрометеиздат, 1966. 286 с.
83. Вульфсон Н.И. Компенсационные нисходящие течения, обусловленные развивающимися кучевыми облаками // Известия АН СССР. 1957. № 1. С. 94–103.
84. Шметер С.М. Об одной из возможных причин образования гряд кучево-дождевых облаков // Метеорология и гидрология. 1966. № 10. С. 7–13.
85. Шметер С.М., Шнайдман В.А. Влияние турбулентности на вертикальный профиль ветра в облаках // Труды ЦАО. 1966. Вып. 71. С. 48–57.
86. Шметер С.М. Структура полей метеорологических элементов в зоне кучево-дождевых облаков // Труды ЦАО. 1969. Вып. 28. 119 с.
87. Синькевич А.А., Шишкин Н.С. Температурный режим кучевых облаков // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 1984. № 482. С. 45–49.
88. Мазин И.П. О стратификации температуры и влажности в облаках // Труды ЦАО. 1966. Вып. 71. С. 3–15.

89. Холевицкий З.З. Уральские градины – рекордсмены // Человек и стихия. Л. : Гидрометеиздат, 1988. С. 75–76.
90. Временные методические указания по организации и проведению противоработных работ / под ред. М.Т. Абшаева [и др.] ; Гл. упр. гидрометеорол. службы при Совете Министров СССР, Высокогорный геофиз. ин-т. Л. : Гидрометеиздат, 1974. 144 с.
91. Брейам Р.Р., Драгинис М. Механизм образования орографических кучевых облаков // Динамика кучевых облаков. М. : Мир, 1964. С. 11–14.
92. Хромов С.П., Мамонтова Л.И. Метеорологический словарь. Л. : Гидрометеиздат, 1974. 568 с.
93. Попова К.И. О циркуляции атмосферы над Алтаем в абляционный период // Гляциология Алтая. Томск : Том. гос. ун-т, 1965. Вып. 4. С. 238–255.
94. Попова К.И. О типах годового хода атмосферных осадков в Горном Алтае // Гляциология Алтая. Томск : Том. гос. ун-т, 1972. Вып. 7. С. 169–174.
95. Тронов М.В. Очерки оледенения Алтая. М. : Географиз, 1949. 400 с.
96. Рыбакова Ж.В. Структура бездождных и дождливых периодов в Алтайском крае : дис. ... канд. геогр. наук. Томск, 1975. 150 с.
97. Ключников Ю.И. Важнейшие черты климата Алтая в погодах // Вопросы комплексной климатологии. М. : Изд-во АН СССР, 1963. С. 101–108.
98. Кривоносов Б.М. Отдельные характеристики атмосферного давления над Горным Алтаем // Гляциология Алтая. Томск : Том. гос. ун-т, 1976. Вып. 11. С. 64–77.
99. Костинская Б.М. Суточный ход количества нижней облачности над территорией СССР // Труды НИЧАК. 1973. Вып. 83. С. 107–109.
100. Гальберин Б.М., Эсик В.Д. О повторяемости дней с различным количеством облаков // Труды Ленинградского гидрометеорологического института. 1974. Вып. 50. С. 62–72.
101. Рыбакова Ж.В., Коробова С.Н. Режим облачности в Горном Алтае по наземным и спутниковым данным // Актуальные вопросы геологии и географии Сибири : материалы науч. конф. Томск, 1998. Т. 4. С. 132–134.
102. Рыбакова Ж.В. Облачность в Горном Алтае // Проблемы гляциогидроклиматологии Сибири и сопредельных территорий : материалы науч.-практ. конф., посвященной 110-летию со дня рождения М.В. Тронова. Томск, 2002. С. 119–121.
103. Золотарёв М.А. Характеристика структуры тропопаузы // Труды ЦАО. 1960. Вып. 38. С. 32–54.
104. Хргиан А.Х. Физика атмосферы. М. : Изд-во Моск ун-та, 1986. 328 с.
105. Рыбакова Ж.В. Физическая метеорология (отдельные разделы). Томск : Изд-во Том. ун-та, 2013. 364 с.
106. Оптические исследования излучения атмосферы, полярных сияний и серебристых облаков с борта орбитальной научной станции «Салют-4». Тарту : Изд-во Акад. наук Эстонской ССР, 1977. 178 с.
107. Рыбакова Ж.В. Облака. Томск : Изд-во Том. ун-та, 2014. 176 с. + 108 л. ил.
108. Рыбакова Ж.В., Блинкова В.Г. Общая физика и некоторые аспекты физической метеорологии. Томск : Издательский Дом ТГУ, 2015. Ч. 1: Механика. 184 с.
109. Минервин В.Е. Формы перистых облаков, условия их возникновения и распада // Труды ЦАО. 1962. Вып. 39. С. 45–55.

110. Андреев А.О., Дукальская М.В., Головина Е.Г. Облака: происхождение, классификация, распознавание / под ред. А.И. Угрюмова. СПб. : Изд-во РГГМУ, 2007. 228 с.
111. Бирнбаум Г. Царство облаков. Популярное изложение атмосферных явлений. СПб. : Общественная польза, 1861. 469 с.
112. Машуков Х.М., Шугунов Л.Ж., Зашакуев Т.З., Зекореев Р.Х., Камбиев М.М., Машуков Х.Х. Некоторые результаты исследования структуры электрических зарядов в грозных облаках // Труды Высокогорного геофизического института. 1985. Вып. 61. С. 13–16.
113. Костяной Г.Н., Станевская Ю.Ф. Локальные значения альbedo облаков, полученные с СМЛ Ил-18 // Труды ЦАО. 1992. Вып. 180. С. 95–101.
114. Беленцова В.А., Федченко Л.М. О влиянии рельефа Северного Кавказа на распределение опасных конвективных явлений погоды // Труды Высокогорного геофизического института. 1986. Вып. 65. С. 34–51.
115. Когтева Е.А., Хаин А.П., Хворостьянов В.И. Двумерная нестационарная модель конвективного облака с детальным учетом микроструктуры капельной и кристаллической фаз // Труды ЦАО. 1989. Вып. 172. С. 41–55.
116. Коган Е.Л., Мазин И.П., Сергеев Б.Н., Хворостьянов В.И. Численное моделирование облаков. М. : Гидрометеоздат, 1984. 185 с.
117. Перламутровые облака [Электронный ресурс] // Экология производства : научно-практический портал. Электрон. дан. М., 2004. URL: <http://www.ecoindustry.ru/didyounknow/view/375.html> (дата обращения: 09.10.2019).
118. Полезные ресурсы [Электронный ресурс] // Минский планетарий. Электрон. дан. Минск, 2018. URL: <https://planetarium.by/poleznyie-resursyi/> (дата обращения: 12.10.2019).
119. Облака Серебряные [Электронный ресурс] // Стихи.ру. Электрон. дан. URL: <https://www.stihi.ru/2018/08/02/5032> (дата обращения: 12.10.2019).
120. Серебристые облака [Электронный ресурс] // Пикабу. Электрон. дан. URL: https://pikabu.ru/story/serebristyie_oblaka_4335779 (дата обращения: 09.10.2019).
121. Презентация Устный журнал «Как человек может помочь сохранить природу на нашей планете» [Электронный ресурс] // «Инфоурок» – курсы, тесты, видеолекции, материалы для учителей. Электрон. дан. Смоленск, [б. г.]. URL: <https://infourok.ru/prezentaciya-ustniy-zhurnal-kak-chelovek-mozhet-pomoch-sohranit-prirodu-na-nashey-planete-457023.html> (дата обращения: 09.10.2019).
122. Из-за лесных пожаров Омский воздух стал опасным для здоровья [Электронный ресурс] // СуперОмск : новости Омска и Омской области. Электрон. дан. Омск, 2010. URL: https://superomsk.ru/news/78741-iz_zha_lesnx_pojarov_omskiy_vozdux_stal_opasnym_dlya/ (дата обращения: 12.10.2019).
123. Жители Брянска сообщили о серьезном пожаре в Фокинском районе [Электронный ресурс] // БезФормата : новости Брянска и Брянской области. Электрон. дан. Брянск, 2008. URL: <http://bryansk.bezformata.com/listnews/bryanska-soobshili-osereznom-pozhare/74300838/> (дата обращения: 12.10.2019).

СНИМКИ ОБЛАКОВ



Перистые облака над горной страной



Перистые когтевидные облака (*Ci unc.*)



Перистые плотные облака (*Ci sp.*). Алтай.
Фото выпускницы А. Кулаковой



Перистые нитевидные облака (*Ci fib.*),
образовавшиеся в результате трансформации



Перисто-кучевые облака (Cc)



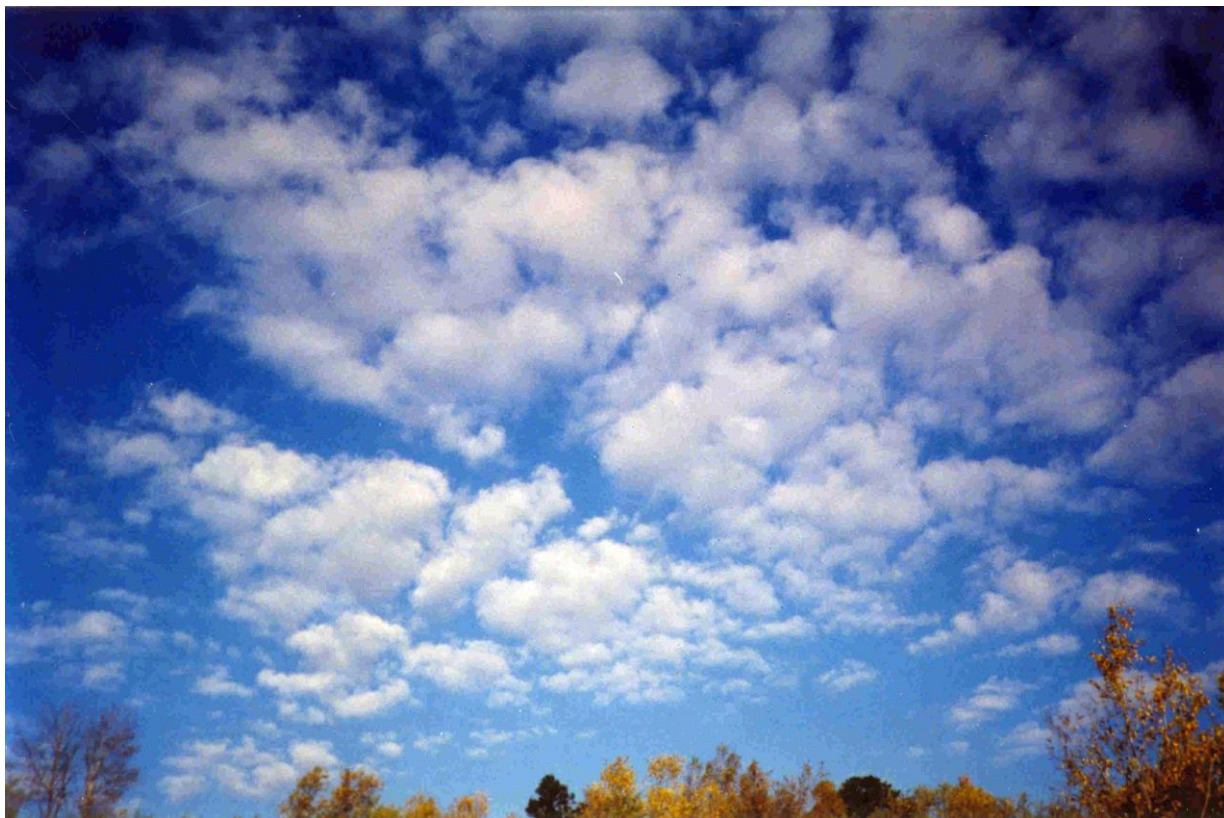
Перисто-слоистые облака. Гало. Фото выпускницы Е. Жирных



Оптическое явление гало в перистых нитевидных облаках (*Ci fib.*)



Высоко-кучевые облака (*As cuf.*). Томский р-н. Фото студ. О. Бисеровой



Высоко-кучевые облака (*Alto-cum.*). Томский р-н. Фото выпускницы С. Сорокиной



Высоко-кучевые волнистые, неоднородные облака (*As inh.*). Томск.
Фото выпускницы С. Сорокиной



Высоко-кучевые волнистые (*Ac und.*). Томск. Фото студ. С. Сорокиной



Высоко-кучевые облака (Ac). В отдельных частях облачного массива отчетливо прослеживается волновая структура (*Ac und.*). Фото выпускницы Ю. Денисенко



Высоко-кучевые просвечивающиеся (*Ac trans.*),
кучевые мощные (*Cu cong.*), перистые (*Ci*). Обское море.
Фото выпускницы С. Сорокиной



Высоко-кучевые чечевицеобразные облака (*Ac lent.*). Томская область.
Фото доцента М.А. Волковой



Высоко-кучевые чечевицеобразные облака (*Ac lent.*) над Алтаем.
Фото выпускницы А. Кулаковой



Высоко-кучевые плотные облака (*Ac op.*). Обское море. Фото выпускницы С. Сорокиной



Слоисто-кучевые облака (*Sc trans.*) на севере Томской области. Фото студ. К. Городиловой



Слоисто-кучевые облака, вечерние растекающиеся (*Sc vesp.*). Томская обл. Фото Н. Костюк



Низкие облака (Ns) с выпадением осадков
на переднем плане снимка. Фото выпускницы Е. Жирных



Слоистые облака (*St neb.*). Фото выпускницы Е. Жирных



Слоисто-кучевые облака. В центральной части снимка – чечевицеобразное облако (*Sc lent.*).
Фото выпускницы А. Кулаковой



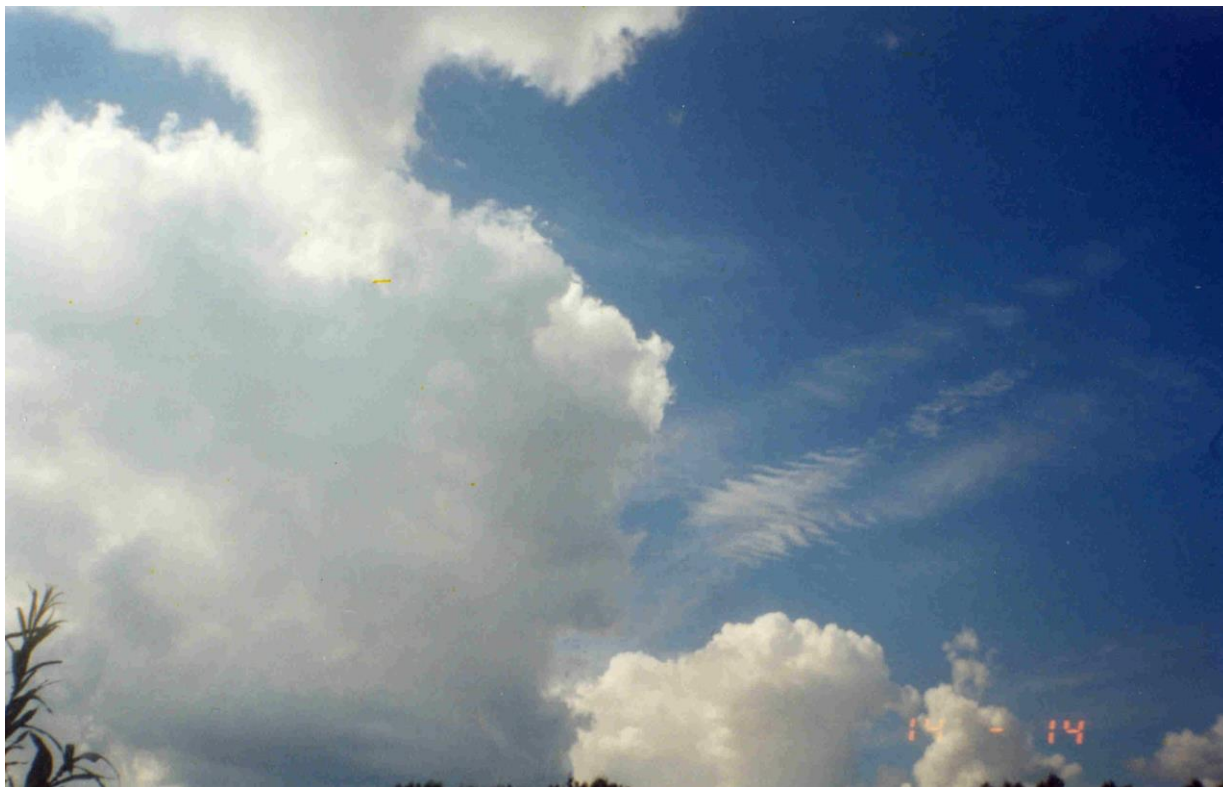
Облачное море – облака заполняют межгорное понижение Альп.
Фото выпускницы О. Вазим



Кучево-дождевое облако (*Cb*) с полосами падения осадков. Байконур.
Фото выпускницы Ю. Денисенко



Кучево-дождевые облака (*Cb*). Томский р-н. Фото студ. О. Бисеровой



Кучевые мощные облака (*Cu cong.*) и высоко-кучевые волнистые облака (*Ac und.*)
в правой части снимка. Фото Е. Белозеровой



Кучевые облака (*Cu cong.*) над Алтаем. Фото выпускницы А. Кулаковой



Кучево-дождевые облака (*Cb*) и перистые облака (*Ci ing.*) над Алтаем.
Видны полосы падения осадков. Фото выпускницы А. Кулаковой



Кучевые и перистые облака (*Cu hum.*, *Cu med.*, *Ci fib.*) над Алтаем.
Фото выпускницы А. Кулаковой



Кучевые облака (*Cu med.*), закрывающие вершину в Альпах.
Фото выпускницы О. Вазим



Кучево-дождевая облачность (*Cb*) над районом Сочи. Видна неровная нижняя граница облачности, часть которой закрывает горы. Фото старшего преподавателя кафедры метеорологии и климатологии М.А. Волковой



Облака вертикального развития в горах, частично застилающие межгорные понижения.
Кавказ. Фото С. Неизвестной



Облака в форме «ожерелья» в горах. Караташ. Фото студ. П. Обухова



Кучевые облака (*Cu*) над Курайской степью. Фото выпускницы А. Кулаковой



Мощное кучевое облако (*Cu cong.*) с борта самолета.
Фото выпускницы Н.Н. Новосельцевой



Облака в межгорных понижениях. Актру. Фото доцента И.В. Кужевской



Кучево-дождевое облако с наковальней (в центре) *Cb inc.*, кучевые облака.
Фото доцента Ж.В. Рыбаковой



Кучево-дождевое облако с наковальней (*Cb inc.*). Бишкек.
Фото доцента Ж.В. Рыбаковой



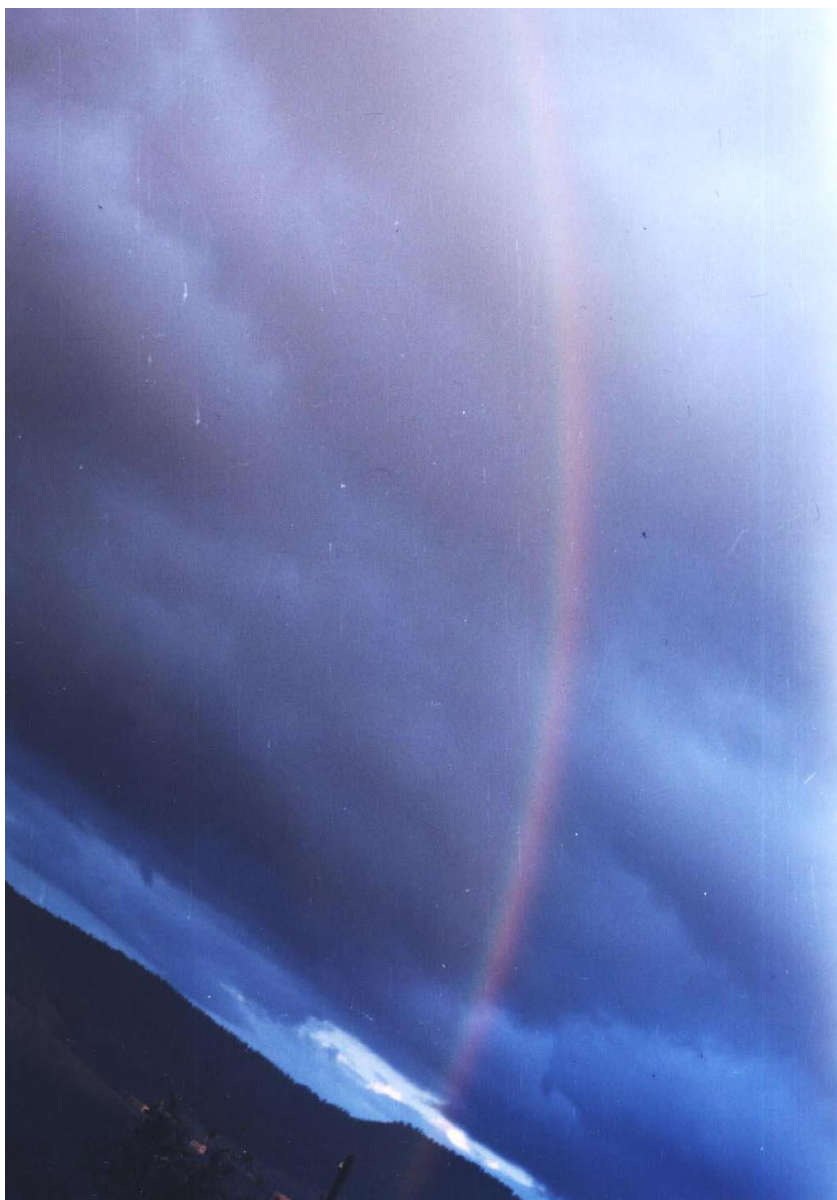
Смерч в Туапсе. Воронка в центре снимка. Фото выпускницы О. Прасловой



Кучево-дождевые облака (Cb). Молнии. Разряд облако-облако (в левой части снимка), разряд облако-земля (в центре снимка). Байконур. Фото выпускницы Ю. Денисенко



Шторм в Средиземном море. Молнии



Кучево-дождевое облако (Cb). Радуга. Таштагол.
(Кемеровская область). Фото аспирантки Е.В. Моховиковой



Кучевые и кучево-дождевые облака (*Ci* и *Cb*). Радуга. Казахстан.
Фото выпускницы Ю. Денисенко



Кучевые и кучево-дождевые облака (*Cu* и *Cb*). В центре снимка – полосы падения осадков и радуга.
Западные Саяны. Фото аспирантки Н.А. Черновой



Двойная радуга. Фото выпускницы Е.В. Моховиковой



Облака над эпицентром землетрясения в горном Алтае. Село Бельтир.
Фото М. Суховой



Чечевицеобразные облака (*Ac lent.*) в районе деятельности гейзеров. Камчатка.
Фото выпускницы Е. Жирных



Перламутровые облака [117]



Перламутровые облака [117]



Перламутровые облака [117]



Перламутровые облака [117]



Перламутровые облака [117]



Серебристые облака [118]



Серебристые облака [119]



Серебристые облака [120]



Серебристые облака [120]



Серебристые облака [120]



Облака при больших пожарах [121]



Облака при больших пожарах [122]



Облака при больших пожарах [123]

Научное издание

Рыбакова Жанна Вениаминовна

ОБЛАКА И ИХ ТРАНСФОРМАЦИЯ

Научный редактор И.В. Кужевская

Редактор Е.Г. Шумская
Оригинал-макет А.И. Лелююр
Дизайн обложки Л.Д. Кривцовой

Подписано к печати 29.01.2020 г. Формат 60×84 ¹/₁₆

Бумага для офисной техники. Гарнитура Times.

Усл. печ. л. 13,7.

Тираж 500 экз. Заказ № 4135.

Отпечатано на оборудовании
Издательского Дома
Томского государственного университета
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36
Тел. 8+(382-2)–52-98-49
Сайт: <http://publish.tsu.ru>
E-mail: rio.tsu@mail.ru

ISBN 978–5–94621–880–1



9 785946 218801