

10. Корниенко Е.Е. Структура и эволюция некоторых типов кучево-дождевых облаков // Труды УкрНИГМИ. 1980. Вып. 172. С. 3-70.
11. Облака и облачная атмосфера/под ред. Мазина И.П., Хргиана А.Х. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 720 с.
12. Руководство по применению радиолокаторов МРЛ-4, МРЛ-5 и МРЛ-6 в системе градозащиты. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 232 с.
13. Browning K.A. The structure and mechanism of hailstorms. Met. Mon., 1977, v. 16, JMb 38. P.45-47.
14. Chisholm A.J., Renick J.H. Supercelle and multicell Alberta hailstorms. In. Proc. Intern. Cloud Physics Conf., London, 1972. P.67-68.
15. Knight C.A., Hail W.D., Raskowski P.M. Visual cloud histories related to first radar echo formation in northeast Colorado cumulus. J. Clim. And Appl. Meteorol., 1983, v.22, #6. P. 1022-1040.
16. NHRE, 1982: Hail storms of the central High Plains, Colorado Associated University Press, Boulder, Colorado. 282 p.

E.I. Danov, T.E. Danova

INTERPRETATION OF THE RESULTS OF RADAR OBSERVATIONS HAIL CLOUDS BY USING TWO-WAVE MRL

Parameters of convective clouds in the early stage on the Black Sea Coast from the moment of occurrence of the first radioecho up to a maximum are investigated. It was revealed that the cloud cell nascent in the temperature of $-10,0\sim-31,0^{\circ}\text{C}$, with a high degree of probability will de hail, and the dynamic parameters of the growing cells which characterize rate of change in time of maximum radar reflectivity of the cloud height and zone of increased water content inside are defined. The size of a hail depends on time of growth of the specified parameters. These patterns can be used in practice over the short-term forecast of shower and hail, to prevent hail.

Key words: radar meteorological, dynamic parameters, short-term forecast of shower and hail.

Evgeniy I. Danov, Director of Odessa Uniformed Services on Active Influence on Hydrometeorological processes; Ukraine 65070, Odessa, 20 Varnenskaya St.

Tatyana E. Danova, Candidate of Geographic Sciences, Reader of Atmospheric Physics and Climatology Department, Odessa State Environmental University; Ukraine 65016, Odessa, 15 Lvovskaya St.; danova8@mail.ru

УДК 551.501.8.:551.509.322

Н.И. Толмачева

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТУРБУЛЕНТНОСТИ В ОБЛАКАХ И БЕЗОБЛАЧНОЙ АТМОСФЕРЕ

Рассмотрены пульсации скорости ветра и температуры в облаках, турбулентные участки в облаках и безоблачном пространстве, интенсивность турбулентности. Показана возможность комплексного использования аэрологической и радиолокационной информации для изучения особенностей развития турбулентности в облачной среде. Выявлены зависимости характеристик турбулентности от типа облачности. Проанализированы эмпирические функции распределения ширины турбулентных слоев для слоистообразных, волнистообразных, кучевообразных облаков и безоблачного пространства.

© Толмачева Н.И., 2015

Толмачева Наталья Игоревна, кандидат географических наук, доцент кафедры метеорологии и охраны атмосферы Пермского государственного национального исследовательского университета; 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15; nitolmacheva@yandex.ru

Ключевые слова: скорость ветра, облачность, пульсации, турбулентность, температура воздуха, эмпирическая модель.

Облака влияют на погодные условия и климат регионов и в зависимости от процессов образования классифицируются на слоистообразные, волнистообразные и конвективные. Облака вносят искажения в поля скорости ветра, температуры и влажности атмосферы, поэтому они и окружающее их безоблачное пространство рассматриваются как единое образование — облачная атмосфера [1].

Атмосферная турбулентность как хаотическое вихревое движение воздуха занимает важное место в формировании погодных условий. Она является фактором, определяющим образование и развитие облаков различных форм, атмосферных фронтов, циклонов, т. е. определяет погоду. Для ее предсказания необходимы знания о характеристиках турбулентности, например, в уравнения гидродинамического прогноза входит турбулентное напряжение трения, без которого система уравнений незамкнута, поэтому необходимы эмпирические данные о турбулентности в атмосфере.

Получение информации об интенсивности турбулентности, ее пространственной и спектральной структуре в облаках различных форм и безоблачном пространстве является важной задачей исследования атмосферы [2-4]. Имеются сведения о турбулентности ясного неба, возникающей на границах струйных течений и влияющей на полет самолетов. Кроме того, известно, что в облаках всех видов турбулентность развита сильнее, чем в окружающей атмосфере [4, 8-9]. Она является важным фактором, оказывающим большое влияние на развитие процессов осадко- и облакообразования. Поскольку интенсивность турбулентности в облаках больше, чем в окружающем безоблачном пространстве, она представляет опасность для полетов различных летательных аппаратов [3]. Знание характеристик турбулентности (ее интенсивности, коэффициентов турбулентного перемешивания) необходимо для работ по численному моделированию процессов образования облаков и осадков, активного воздействия на облака.

Измерения характеристик турбулентности в облаках долгое время проводились с помощью шаров-пилотов, метеорологических радиолокаторов и самолетов. Шаропилотный способ применялся в основном в конвективных облаках и позволял получать сведения только об интенсивности турбулентности в ограниченном диапазоне масштабов [7]. Принцип радиолокационных измерений турбулентности в облаках основывался на взаимосвязи спектра пульсаций интенсивности радиосигнала от облаков с флуктуациями скорости частиц в них [2]. В этом случае делались априорные предположения о свойствах турбулентности (изотропия пульсаций скорости ветра, увлечение отражающих частиц воздухом). Основное количество информации об атмосферной турбулентности на высотах получено во время полета самолетов; она лежит в основе различных моделей турбулентности в атмосфере. Измерение турбулентности с борта рейсового самолета не предоставляет сведений о турбулентности в облаках, поскольку «Наставление по проведению полетов гражданской авиации» запрещает пилотам рейсовых самолетов полеты в облаках. Данные, которые основывались на регистрации перегрузок самолета, позволяли определять только протяженности турбулентных зон и интенсивность турбулентности, выраженной в четырех условных градациях, что недостаточно для решения задач физики облаков.

Поэтому необходимо получение информации комплексным способом, т.е. разработка точной методики расчета данных, определения объектов исследования, разных погодных условий, что обеспечит хорошую интерпретацию данных. Для решения научных и прикладных задач разрабатываются эмпирические модели атмосферной турбулентности. Под моделью турбулентности будем понимать статистически обеспеченные характеристики турбулентности, отражающие распределение интенсивности и спектральной структуры. Существующие эмпирические модели атмосферной турбулентности не дают представления о том, как облака влияют на турбулентный режим атмосферы. Модели о турбулентности основываются на экспериментальных данных, полученных во время полетов рейсовых самолетов вне облачности. Интенсивность турбулентности в облаках бывает значительной и существенно изменяет структуру поля ветра и температуры в атмосфере. Необходима модель турбулентности облаков различных форм и окружающего пространства для исследования процессов возникновения и развития облаков различных форм, изучения взаимосвязи микрофизических и термодинамических процессов в облаках, разработки численных моделей [10, 12-14].

Процессы, приводящие к формированию облаков, во многом определяют их динамическую структуру и турбулентный режим, поэтому генетическая классификация облаков использовалась в

качестве параметра для анализа данных об атмосферной турбулентности. Предварительные исследования [9-13] показали, что облака деформируют поля основных метеорологических элементов в атмосфере (поля ветра, температуры, влажности) не только внутри облаков, но и в окружающем их пространстве. В конвективных облаках типа *Cu* и *Cb* турбулентность развита сильнее, чем в облаках других форм, например, амплитуды горизонтальных и вертикальных пульсаций скорости ветра внутри *Cb* достигали 20 м/с [3]. В связи со сложностью измерений пульсаций скорости ветра внутри облаков сведений о характеристиках турбулентности в облаках недостаточно. Площадь турбулентной зоны в 5 раз может превышать площадь конвективного облака и турбулентные зоны живут дольше облачности, с которой связаны, поэтому при исследованиях турбулентности в облаках следует рассматривать само облако и прилегающую к нему часть атмосферы, структура которой изменяется под влиянием облака.

Многие факторы осложняют изучение характеристик в зоне облаков, например, малые горизонтальные размеры *Cu*—*Cb* препятствуют получению спектров пульсаций в широком диапазоне, в слоистообразных и волнистообразных облаках мала интенсивность пульсаций. Наряду с исследованиями турбулентности в облаках важно изучить и структуру пульсаций скорости ветра над облаками, под ними, между облачными слоями.

Исходный материал. Основная часть материала получена при исследованиях фронтальных облачных систем при различных условиях атмосферы. Параметром статистического распределения характеристик турбулентности служит форма (тип) облака по генетической классификации, тесно связанная с термодинамическими характеристиками и микрофизическим строением облака. Тип облачности определялся по данным метеорологического радиолокатора МРЛ-5 и аэрологической станции г. Пермь (периоды исследования 1996-2000 гг. (предварительные) и 2005-2012 гг.). Для описания пространства, заключенного в 500-м слое над верхней или под нижней границей облаков, используется термин «в окрестности облаков». Данные, объединенные в группы над облаками и под облаками, соответствуют тем или иным типам облачности; в группу вне облаков включены данные, полученные в тех случаях, когда облачность не наблюдалась. Объем используемых данных приведен в табл. 1, где показано число случаев турбулентности в облаках различных форм и их окрестности.

Таблица 1

Число случаев турбулентности в облаках различных форм и безоблачном пространстве

Количество случаев	Формы облачности и части безоблачного пространства							
	<i>Cs</i>	<i>As</i>	<i>Ns</i>	<i>Cu</i>	<i>Cb</i>	Над облаком	Под облаком	Вне облака
К	2365	4467	8951	9856	10657	35673	42143	76542

Пространства, где $\sigma > 0,1 \text{ мс}^{-1}$ считались возмущенными (турбулентными), пульсации скорости ветра и температуры на этих участках подвергались статистической и спектральной обработке согласно методике, изложенной в [3]. Участки, на которых среднеквадратические значения пульсаций не превышали приведенного значения, относились к спокойным.

Характеристики турбулентности в облачной атмосфере. Структура пульсаций скорости ветра и температуры в облаках очень неоднородна, внутри облаков наблюдаются области с повышенной турбулентностью (турбулентные зоны), где пульсации скорости ветра практически однородны. Интенсивность пульсаций скорости ветра в турбулентных зонах может отличаться более чем на порядок. Кроме возмущенных (турбулентных зон) внутри облаков различных типов наблюдались области, в которых отсутствовала турбулентность, — так называемые невозмущенные или спокойные зоны, за исключением конвективных облаков, где спокойные зоны не наблюдались. Для турбулентности в облаках характерно чередование спокойных и турбулентных зон, следовательно, перемежаемость турбулентности в облаках типичная и для атмосферной турбулентности в целом. Применялось деление на спокойные и возмущенные зоны — $0,1 \text{ мс}^{-1}$ для пульсаций скорости ветра и $0,02^\circ\text{C}$ для пульсаций температуры. Критерием для разделения спокойных и турбулентных зон служили рассчитанные для этих зон среднеквадратические пульсации горизонтальной и вертикальной компонент скорости ветра σ_u и σ_w [3]. Границы турбулентных зон, определенные по пульсациям горизонтальной и вертикальной компонент скорости ветра, практически совпадали. Отметим, что протяженность возмущенных

зон достаточно велика, чтобы получить статистически обеспеченные характеристики турбулентности. В возмущенных зонах облаков наблюдалась и повышенная интенсивность пульсаций температуры воздуха, среднеквадратические значения температурных пульсаций превышали $0,02^{\circ}\text{C}$, а в спокойных зонах значения пульсаций температуры малы. Такая методика исследования турбулентности в облачной атмосфере оказалась эффективной для исследования пространственной структуры турбулентности.

Пульсации скорости ветра и температуры в зоне облаков. Анализ данных о пульсациях скорости ветра в турбулентных зонах облаков показал, что внутри турбулентных зон распределение пульсаций компонент скорости ветра хорошо описывается законом нормального распределения Гаусса. Пульсации горизонтальной и вертикальной компонент скорости ветра для каждого турбулентного участка нормировались на соответствующие среднеквадратические величины, рассчитывались относительные пульсации: $\tau = u_i / \sigma_u$; $\mu = v_i / \sigma_w$. Приведем кривую нормального распределения и значения эмпирических функций распределения (накопленной повторяемости) относительных пульсаций скорости ветра по всей высоте для облачности (рис. 1).

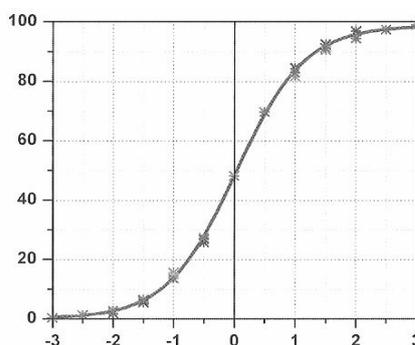


Рис. 1. Накопленная повторяемость $F(\tau)$ относительных пульсаций скорости ветра σ_u в облаках Cs-As, Ns, Cu, Cb, %

Зависимость функций $F(\tau)$ и $F(\mu)$ от формы облачности не наблюдалась и нет различий между функциями распределения пульсаций скорости ветра для горизонтальной и вертикальной компонент. Разброс значений по всей высоте в облаках любой формы не выходил за пределы 2%. Отличия значений $F(\tau)$ и $F(\mu)$ от кривой нормального распределения (рис. 1) также не выходили за пределы 3%. Распределение относительных пульсаций скорости ветра уже нормального говорит о вероятности слабых пульсаций, что связано с наличием внутри турбулентных зон небольших спокойных участков. Проверка нормальности распределений пульсаций скорости ветра проводилась и с помощью значений асимметрии, эксцесса, дисперсий этих параметров. В большинстве случаев распределение пульсаций скорости ветра можно считать нормальным.

Переменяемость турбулентности. Отношение суммарной протяженности спокойных и возмущенных зон является характеристикой неоднородности турбулентности и называется степенью переменяемости турбулентности. Обозначим через d и r протяженности турбулентного и спокойного участков в облаках определенной формы. Суммарную протяженность всех зон обозначим D , тогда относительная протяженность турбулентных зон, которая характеризует переменяемость турбулентности, рассчитывается как d/D .

Таблица 2

Переменяемость турбулентности и протяженность турбулентных и спокойных зон

Характеристика	Cs-As	St	Ns	Cu	Cb	Слоистообразные	Волнистообразные	Кучевообразные	Над/под обл.	Вне обл.
d	26,5	18,5	21,5	13,5	16,5	20,5	23,0	15,0	19,0	26,5
r	40,5	21,0	45,0	17,5	0,5	51,5	12,5	0	22,5	47,2
d/D	0,44	0,71	0,42	0,83	0,96	0,48	0,75	1,00	0,38/0,57	0,21

Относительная протяженность турбулентных зон для различных групп классификации приведена в табл. 2. В слоистообразных облаках верхнего и среднего ярусов относительная доля

турбулентных зон составила 44%. Суммарная доля таких участков в волнистообразных облаках вдвое больше и составляла более 75%. В кучевообразных облаках спокойные участки отсутствовали. Значение d/D , равное 0,44 для облаков Cs-As, связано с тем, что в группу могли войти и другие облака верхнего яруса. Над и под облаками относительная протяженность турбулентных зон чуть ниже или почти такая же, как в среднем в облаках. Для волнистообразных облаков картина другая, отношение минимально над облаками, а максимально — в облаках. Относительная протяженность турбулентных зон минимальна в безоблачном пространстве около 21%. Вне облаков значения всех параметров ниже, турбулентные зоны появляются реже.

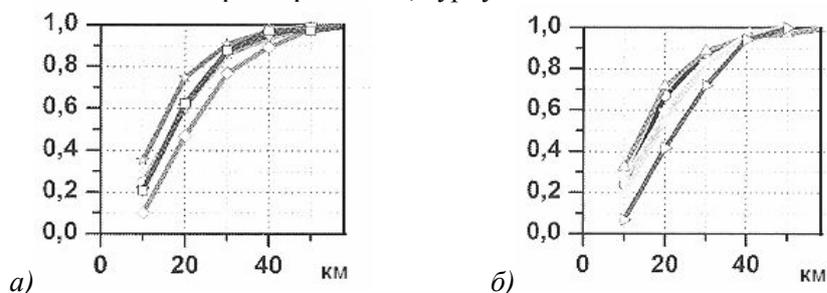


Рис. 2. Эмпирические функции распределения ширины турбулентных слоев $F(\mu)$ для слоистообразных, волнистообразных, кучевообразных облаков (а) и безоблачного пространства (б) (над, под и вне облаков)

Турбулентные зоны в облаках и безоблачном пространстве. О возможной протяженности турбулентных и спокойных зон можно судить по средним значениям d и r , эмпирическим функциям распределения (накопленным повторяемостям) их длин $F(\tau)$ и $F(\mu)$ (рис. 2). В волнистообразных облаках протяженность таких зон в 50% случаев меньше 15 км, в 90% случаев не превосходила 20 км. Протяженности турбулентных зон в облаках других форм приблизительно такие же, только в Сu турбулентные зоны были короче, а в Сb — длиннее. Средние значения турбулентных зон в облаках всех форм и безоблачном пространстве составляли 11-16 км, но в Cs-As они короче — 3 км, а в Сb длиннее — 17 км. Турбулентные зоны в облаках оказались более протяженными, чем в над и под облаками (рис. 2). В 90% случаев абсолютная протяженность турбулентных зон в безоблачном пространстве, над и под облаками не превышала 22-27 км, а в облаках — 25-40 км.

Протяженность спокойных зон в облаках и вне колеблется в широких пределах, наиболее протяженные зоны в слоистообразных облаках и внеоблачном пространстве составляют около 30 км. Под и над облаками они в среднем короче — 18-21 км. Наиболее короткими оказались спокойные зоны в волнистообразных облаках — около 9-10 км. Функции распределения показали, что спокойные участки в волнистообразных облаках существенно меньше турбулентных, например, в 60% случаев — не более 10 км. Слоистообразным облакам характерны более протяженные спокойные зоны, функции для подоблачного и надоблачного зон почти совпали. В волнистообразных облаках спокойные зоны более короткие, функции распределения для подоблачного и надоблачного слоев различны. Под облачностью в 90% случаев спокойные зоны не превышали по протяженности 20-24 км, а над — 31-36 км. Самыми протяженными оказались спокойные зоны в безоблачном пространстве, где длины отдельных зон достигали максимума.

Кривые плотности распределения имели максимум 7-19 км в области d и r . В распределениях для слоистообразных облаков во фронтальной облачности отмечался второй максимум 26-32 км, свидетельствующий о наличии мезомасштабной структуры в зоне фронта. Пространственную структуру турбулентности в облаках можно представить как чередование спокойных и турбулентных зон. В исследовании проведен анализ и установлены статистические параметры размеров этих зон в облаках различных форм, определена доля облачного объема с зонами турбулентности d/D .

Интенсивность турбулентности. На рис. 3 представлены кривые накопленной повторяемости $F(\tau)$ для слоев с различными значениями среднеквадратических пульсаций скорости ветра σ_u ; чем интенсивнее турбулентность в зоне возмущения, тем больше ее ширина. Линейные размеры турбулентных зон зависят от порогового значения, но не так сильно (рис. 3), например,

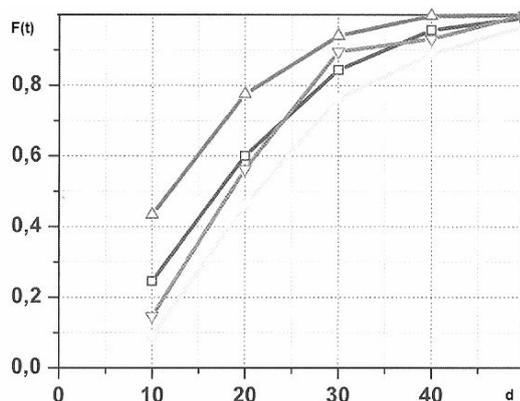


Рис. 3. Зависимость функции распределения протяженности турбулентных зон $F(t)$ от интенсивности турбулентности ($\sigma_u > 0,2$; $\sigma_u = 0,2$; $\sigma_u < 0,2$)

увеличение порогового значения σ_u в 3 раза от $0,1 \text{ мс}^{-1}$ до $0,3 \text{ мс}^{-1}$ увеличивает медианное значение размера турбулентной зоны только на 20%. Следовательно, принятое пороговое значение для разделения спокойных и турбулентных зон позволяет представить структуру турбулентности в облаках в виде локальных и перемежаемых зон. Доля облачного объема d/D , занимаемого возмущенной областью, сильно зависит от σ_u (рис. 4).

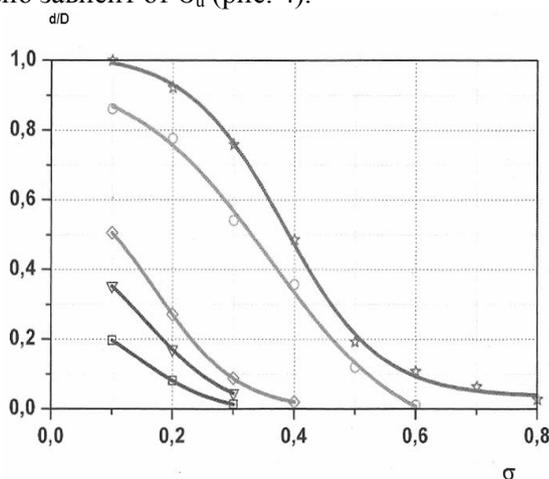


Рис. 4. Доля облачного объема d/D занятого турбулентной областью σ_u

В слоистообразных облаках участки со среднеквадратическими значениями пульсаций скорости ветра, превышающими $0,4 \text{ мс}^{-1}$, очень редки, в волнистообразных облаках редко доходят до $0,5 \text{ мс}^{-1}$, а в зонах затопленной конвекции в 20% случаев превосходят $0,5 \text{ мс}^{-1}$. Таким образом, в слоистообразных облаках турбулентные зоны могут занимать от 20 до 50 % облачного объема, в 50 % случаев их слой не превышает 16 км. В волнистообразных облаках возмущенные области заполняют более 70% объема облака, а протяженность в 50% случаев не превышает 12 км.

Турбулизованность облачной атмосферы. Турбулентность можно представить в виде перемежающихся возмущенных и спокойных зон, она неоднородна, но пульсации скорости ветра и температуры в возмущенных зонах подчиняются закону нормального распределения. Следовательно, в турбулентной среде распределения пульсаций компонент скорости ветра и пульсаций температуры полностью определяются среднеквадратическим значением пульсаций, а степень турбулизованности облачной атмосферы — протяженностью возмущенных и спокойных слоев. Средние значения дисперсий пульсаций и размеров турбулентных зон характеризуют структуру турбулентности в облачной атмосфере. Значение дисперсий пульсаций для турбулентной зоны определяется с шириной турбулентного участка, например, если σ_u^2 , σ_t^2 — дисперсии пульсаций скорости ветра и температуры, d — ширина турбулентного участка, то средняя интенсивность пульсаций компонент скорости ветра и температуры в возмущенных зонах

описывается средней дисперсией. Данные о средних стандартных отклонениях пульсаций скорости ветра и температуры для анализируемой облачности представлены в табл. 3

Внутри слоистообразных облаков, над и под ними интенсивность пульсаций одинакова, средние стандартные отклонения для пульсаций скорости ветра составили $0,26-0,27 \text{ мс}^{-1}$, для пульсаций температуры — $0,06-0,07^\circ\text{С}$. В волнистообразных облаках значения выросли до $0,30-0,33 \text{ мс}^{-1}$ и $0,08-0,09^\circ\text{С}$. Интенсивные пульсации наблюдались в конвективных облаках, где максимальные значения σ составили $0,46 \text{ мс}^{-1}$ и $0,15^\circ\text{С}$. Из табл. 3 видно, что величины средних стандартных отклонений пульсаций с учетом спокойных участков разделили облака и их окрестности по степени интенсивности турбулентности. Турбулизованность пространства вне облаков, над и под облачностью меньше, чем в облачности, следовательно, ее развитие меняло структуру турбулентных движений.

Таблица 3

Средние стандартные отклонения пульсации горизонтальной и вертикальной компонент пульсаций скорости ветра и пульсаций температуры $(\sigma_u^2)^{1/2}$, $(\sigma_t^2)^{1/2}$ в турбулентных слоях в облачности

Характеристика	Cs-As	St	Ns	Ci	Cb	Слоистообразные	Волнистообразные	Кучевообразн.	Над/под обл.	Вне обл.
$(\sigma_u^2)^{1/2}$	0,26	0,33	0,26	0,38	0,46	0,26	0,30	0,41	0,25	0,19
$(\sigma_t^2)^{1/2}$	0,04	0,08	0,06	0,12	0,15	0,07	0,09	0,13	0,06	0,03

Спектры пульсаций ветра и температуры. Важными характеристиками турбулентности являются спектральные плотности пульсаций скорости ветра, которые позволяют оценить распределение дисперсий и кинетической энергии пульсаций по волновым числам. Для расчетов использовались данные о пульсациях, полученные в слоях шириной 6 км и более (в мелких слоях сложно получить статистически точные спектральные характеристики).

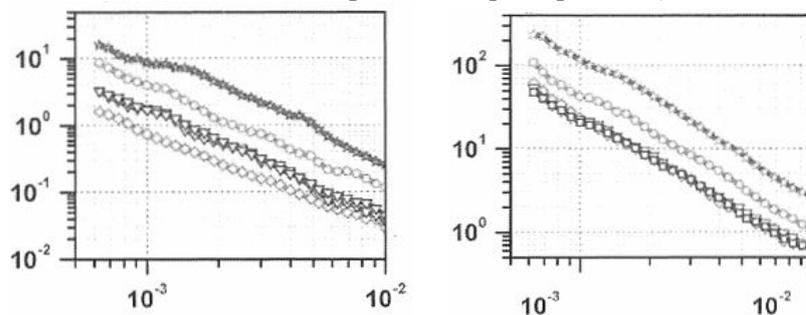


Рис. 5. Спектральные плотности пульсаций температуры и скорости ветра в облачности

На рис. 5 приведены кривые средних спектральных плотностей пульсаций для различных облаков. В диапазоне длин волн от 200 до 700 м ход кривых для облаков и безоблачного пространства соответствовал закону $-5/3$. Отклонения наблюдались в длинноволновом участке спектра на кривых для конвективных и волнистообразных облаков, в них на длинах волн 800 м наблюдался локальный максимум, в слоистообразных облаках — плавный ход кривых. Причиной перечисленных особенностей является конвекция, которая обуславливает появление еще и мезомасштабного источника кинетической энергии турбулентности. В кучевообразных облаках это неупорядоченная в основном термическая конвекция, в волнистообразных облаках — ячейковая, где в половине случаев наблюдается потенциальная неустойчивость, когда фактический вертикальный градиент температуры превышает влажноадиабатический, в слоистообразных облаках (Ns, Cs-As) такая ситуация наблюдается редко.

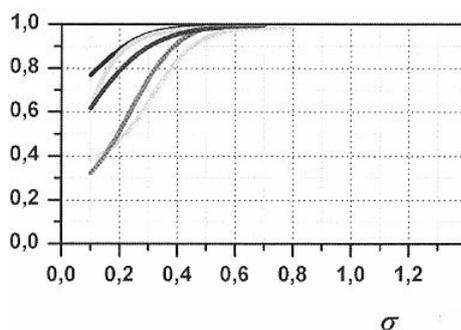


Рис. 6. Функции распределения (накопленные повторяемости) среднеквадратических пульсаций скорости ветра

Эмпирическая модель. В модели исследуются средние значения, функции распределения, сглаживающие функции для таких величин, как пульсации компонент скорости ветра и температуры воздуха, среднеквадратические значения пульсаций горизонтальной и вертикальной скорости ветра и температуры, ширина турбулентных зон, спокойных зон, перемежаемость турбулентности, спектральные плотности пульсаций скорости ветра и температуры, коэффициент турбулентности и анизотропия. Слои, в которых среднеквадратические значения пульсаций не превышали $0,1 \text{ мс}^{-1}$, предполагались спокойными, остальные турбулентными. Вид обобщенных функций распределения (накопленных повторяемостей) среднеквадратических пульсаций горизонтальной компоненты скорости ветра и среднеквадратических пульсаций температуры воздуха в облачной атмосфере представлен на рис. 6.

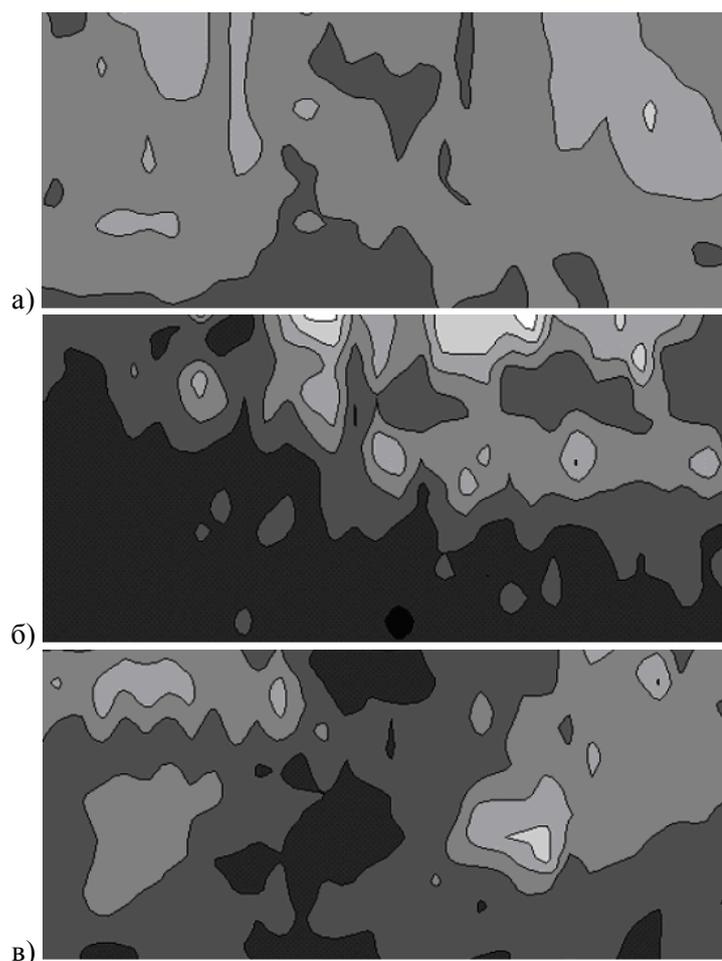


Рис. 7. Эмпирическая модель распределения среднеквадратических пульсаций скорости ветра в безоблачной (а), облачной (б) атмосфере и околооблачном пространстве (в)

Выше на рис. 7 приведена эмпирическая модель распределения среднеквадратических пульсаций скорости ветра в безоблачной, облачной атмосфере и околооблачном пространстве.

Выводы

Во фронтальных и внутримассовых слоистообразных, волнистообразных облаках, над и под ними, вне облачном пространстве изменчивость турбулентности очень большая, что проявляется в заметном различии характеристик турбулентности и перемежаемости возмущенных и спокойных слоев. Построены эмпирические функции распределения стандартных отклонений пульсаций компонент скорости ветра и температуры, исследованы распределения спокойных и турбулентных слоев в облаках. Во всех типах облачности в диапазоне длин волн от 150 до 600 м средние спектральные плотности пульсаций вписывались в закон $5/3$. Оценена степень анизотропии пульсаций скорости ветра и установлено, что в облаках слоистообразных форм преобладает горизонтальная компонента пульсаций, а в конвективных — вертикальная.

Сильная турбулентность в облаках слоистых форм и развитие участков интенсивных осадков связывались с затопленной конвективной облачностью, которая дополнительно исследовалась по радиолокационной информации. Статистические и спектральные характеристики турбулентности применены в эмпирической модели. Материалы исследования могут быть использованы в разработке численных моделей образования облачности.

Библиографический список

1. Мазин И.П., Хргиан А.Х. Облака и облачная атмосфера. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 648 с.
2. Матвеев Л.Т. Динамика облаков. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 312 с.
3. Толмачева Н.И. Исследование турбулентности в облачной среде // Вопросы прогноза погоды, климата, циркуляции и охраны атмосферы. Пермь, 2000. С. 26–28.
4. Толмачева Н.И. Объективный анализ тропопаузы над Уралом // Вопросы прогноза погоды, климата, циркуляции и охраны атмосферы. Пермь, 1997. С. 66–73.
5. Толмачева Н.И. Объективный анализ полей осадков по радиолокационным и станционным измерениям // Вопросы прогноза погоды, климата, циркуляции и охраны атмосферы. Пермь, 1998. С. 44–58.
6. Толмачева Н.И. Булгакова О.Ю. Метеорологические радиолокаторы и радионавигационные системы управления воздушным движением: учеб. пособие. Пермь, 2007. 154 с.
7. Толмачева Н.И., Калинин Н.А. Аэрология: учебник. Пермь, 2011. 336 с.
8. Толмачева Н.И. Дистанционные методы исследования мезометеорологических процессов: учеб. пособие. Пермь, 2010. 200 с.
9. Толмачева Н.И. Исследование динамики конвективной облачности по радиолокационной информации // Географический вестник. Перм. гос. ун-т. Пермь, 2010. №4(15). С. 63–68.
10. Толмачева Н.И., Ермакова Л.Н. Восстановление метеорологических полей по спутниковым и радиолокационным изображениям облачности // Географический вестник / Перм. гос. ун-т. Пермь, 2010. №1 (12). С. 61–68.
11. Толмачева Н.И., Ермакова Л.Н. Исследование параметров облачности и явлений по данным спутникового и радиолокационного зондирования // Географический вестник. Перм. гос. ун-т. Пермь, 2011. №3 (18). С. 59–69.
12. Толмачева Н.И., Ермакова Л.Н. Динамика развития градовой облачности в Пермском крае // Географический вестник. Перм. гос. ун-т. Пермь, 2011. №4 (19). С. 59–66.
13. Толмачева Н.И., Крючков А.Д. Термодинамические характеристики фронтальной облачности // Географический вестник. Перм. гос. ун-т. Пермь, 2013. №2 (25). С. 73–76.
14. Толмачева Н.И. Исследование условий развития конвекции в атмосфере // Географический вестник. Перм. гос. ун-т. Пермь, 2012. №2 (21). С. 60–68.

N.I.Tolmacheva

RESEARCH OF CHARACTERISTICS OF TURBULENCE IN CLOUDS AND CLOUDLESS ATMOSPHERE

Pulsations of speed of a wind and temperature in clouds, turbulent sites in clouds and cloudless space, intensity of turbulence are considered. Possibility of complex use of the aerologic and radar-tracking

information for studying of features of development of turbulence in the cloudy environment is shown. Dependences of characteristics of turbulence on overcast type are revealed. Empirical functions of distribution of width of turbulent layers for clouds and cloudless space are analysed.

Key words: speed of a wind, overcast, pulsations, turbulence, air temperature, empirical model.

Natalia I. Tolmacheva, Candidate of Geographic Sciences, Reader of Meteorology Department, Perm State University. Bukireva St. 15, Perm, 614990, Russia; nitolmacheva@yandex.ru