

МЕЗОСТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ АТМОСФЕРНЫХ ФРОНТОВ ПО РАДИОЛОКАЦИОННОЙ И СПУТНИКОВОЙ ИНФОРМАЦИИ

N.I. TOLMACHEVA, L.N. ERMAKOVA

MESOSTRUCTURAL PECULIARITIES OF THE ATMOSPHERIC FRONT ACCORDING TO
THE RADAR AND SPUTNIK INFORMATION

Пермский государственный университет, 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15, e-mail: lnermak@psu.ru

Приведены результаты численного анализа облачных структур по данным метеорологических радиолокаторов и метеорологических спутников Земли. Разработана методика комплексного анализа данных МРЛ и МСЗ, определены радиолокационные и спутниковые характеристики облачности, проанализированы суточный и годовой ход форм облачности, выявлены мезоструктурные особенности.

К л ю ч е в ы е с л о в а: метеорологический спутник, атмосферные фронты, облачные гряды, ячейки.
К е у о р д с: meteorological sputnik; atmospheric fronts; cloudy ridges; the cells.

Информация метеорологических спутников и радиолокаторов о состоянии облачного покрова широко используется в оперативной и научной деятельности. Изображение облачности в различных участках спектра электромагнитных волн как форма представления наблюдений с метеорологических спутников Земли (МСЗ) обладает рядом преимуществ – простотой получения, обработки и наглядностью. Спутниковые наблюдения играют важную роль при анализе состояния погоды над районами с редкой сетью метеорологических станций, а также дают целостную картину распределения облачности на достаточно больших территориях.

По данным метеорологических радиолокационных станций (МРЛ) составляют штормовые предупреждения, уточняют положение атмосферных фронтов, направление и скорость перемещения облачных систем. Одной из важных задач, решаемых с помощью МРЛ, является распознавание опасных явлений, обусловленных кучево-дождевыми облаками (ливневые осадки, гроза, град, шквал) [4]. Радиолокационные измерения являются простыми, оперативными и непрерывными во времени и пространстве. Данные наблюдений МРЛ, дополняя космические снимки, позволяют получить детальное представление об облачных полях.

В статье представлено исследование облачных структур по данным метеорологических радиолокаторов и метеорологических спутников Земли. Для достижения данной цели ставились следующие задачи: разработать методику комплексного анализа данных МРЛ и МСЗ; определить радиолокационные и спутниковые характеристики облачности; проанализировать суточный и годовой ход форм облачности; выявить мезоструктурные особенности облачности и распределение отражаемости в облачных структурах; найти связь между радиолокационной отражаемостью по информации МРЛ и тоном облачности по спутниковым данным [5, 6].

В качестве исходного материала использовалась база данных космических снимков со спутников NOAA за 2000–2002 гг. (около 7360 снимков), радиолокационные данные с МРЛ-5 (8995 карт) и приземные карты погоды за тот же период (рис. 1). Такое комплексное исследование по информации МРЛ и МСЗ по территории Пермского края проводится впервые.

Данные с МСЗ представлены в виде снимков облачного покрова территории, включающей 56–62° с.ш., 54–59° в.д. Характеристики полученной космической информации следующие: тип данных – АРТ, формат – DUF 2, спутник – NOAA. Данные радиолокатора представлены информацией, полученной с помощью автоматизированного метеорологического радиолокационного комплекса (АМРК) «Метеоячейка», действующего на базе МРЛ-5 (АМСГ Пермь Б. Савино) за 2000–2002 гг. АМРК «Метеоячейка» выводит радиолокационные изображения в виде карт облачности и явлений 400x400 км с разрешением 4x4 км. Район исследований представляет собой площадь 400x400 км на территории Пермского края с центром на станции Пермь. Для анализа использовались данные 13 станций: Бисер, Б. Соснова, Верещагино, Губаха, Кудымкар, Кунгур, Лысьва, Ножовка, Оса, Оханск, Пермь, Чермоз, Шамары.

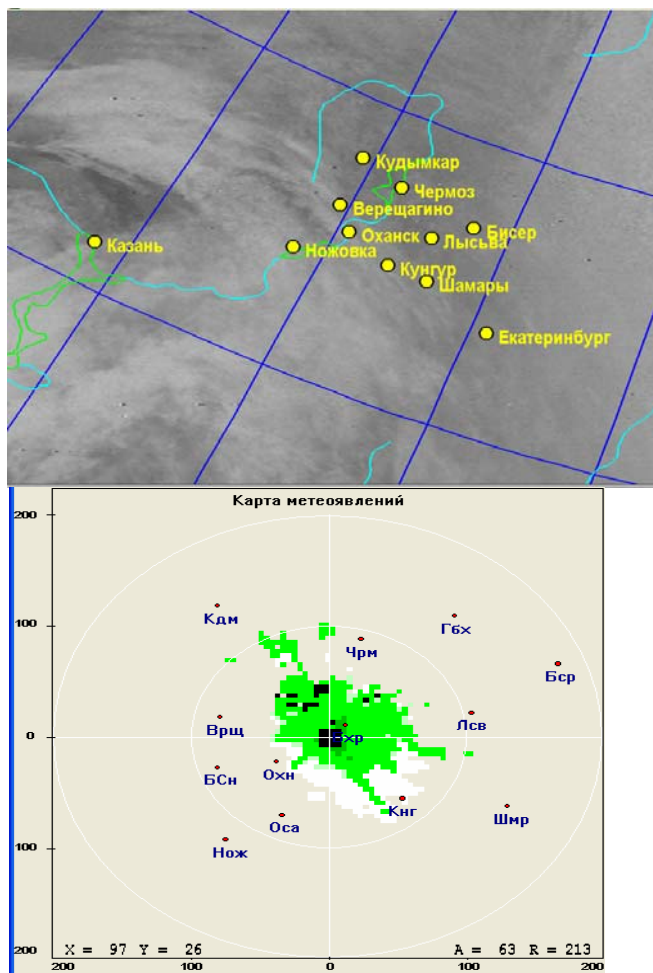


Рис. 1. Космический снимок облачности за 10.01.2001 г. (срок 11 ч 54 мин) и карта метеоявлений МРЛ за 10.01.2001 г. (срок 12 ч 21 мин)

Зону фронта естественно рассматривать как явление мезомасштабное: она создается действием крупномасштабных движений и имеет характерную структуру полей скорости и температуры, отличающуюся своеобразием динамических и кинематических свойств [3]. В данной статье исследуются явления, относящиеся к мезомасштабу α (потoki типа несущей полосы, облачные линии), к мезомасштабу β (полосовые структуры, струи нижних уровней, гряды) и мезомасштабу γ (конвективные ячейки, гипербароклинные зоны). Основное требование к наблюдениям, целью которых является изучение мезомасштабных структур, — высокое разрешение в пространстве и времени. Обычные сетевые аэрологические и метеорологические наблюдения позволяют построить только сглаженные картины пространственного и временного распределения в зоне раздела воздушных масс. Наиболее эффективным является путь комплексных экспериментов с использованием радиолокационной и спутниковой информации.

Одной из основных задач обработки спутниковых изображений является выделение различных однородных областей и последующая их классификация. Этой проблеме посвящены работы [1, 7]. Несмотря на существование большого числа методов и алгоритмов автоматической сегментации и классификации изображений, на практике они работают неэффективно, если предварительно не адаптированы под определенный круг задач и объектов, которые должны быть проанализированы. Достаточно иметь некоторый базовый комплекс программ, позволяющий проводить основные операции по сегментации и классификации данных. Применяемый в исследовании комплекс включает алгоритм сегментации по методу наращивания областей и три достаточно простых и понятных алгоритма классификации: по методу ближайшего соседа, по нормализованному расстоянию, по методу вычисления оценок. Анализ полученных результатов показал возможность распознавания и текстурных фрагментов в пространстве признаков низкой размерности.

Математическое обоснование и методика расчета комплексного критерия мезоструктуры по радиолокационной и спутниковой информации. В многомерном пространстве наблюдений $R^{(n)}$ имеется случайный вектор наблюдений U . Компоненты вектора наблюдений u_i — результаты измерений параметров радиолокационных и спутниковых наблюдений. Вектор наблюдений U характеризуется выборочной оценкой ковариационной матрицы $\hat{Q} = (q_{ij})_n^{(n)}$ и вектора средних $\hat{U} = (\hat{u}_i)_n$ [2]. В качестве несмещенных оценок их элементов используются

$$\hat{u}_i = \left(\frac{1}{N} \right) \sum_{k=1}^N u_{ik}, i = 1, \dots, n, \quad (1)$$

$$\hat{q}_{ij} = \frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N (u_{ik} - \hat{u}_i)(u_{jk} - \hat{u}_j), ij = 1, \dots, n, \quad (2)$$

где N — объем выборки.

Необходимо построить количественный показатель на классе линейных агрегатов компонент вектора наблюдений, обладающий максимальной информативностью. Целесообразность такого показателя косвенно обосновывает тот факт, что изменение любой компоненты вектора наблюдений связано с изменением вида мезоструктуры. Известно, что максимально информативным является линейный агрегат компонент вектора наблюдений, имеющий в качестве ядра собственный вектор ковариационной матрицы, отвечающий максимальному собственному числу. Поэтому в качестве критерия мезоструктуры (M) выбран

$$M = \hat{b} \text{diag} \left\{ (q_{11})^{-\frac{1}{2}}, \dots, (q_{nn})^{-\frac{1}{2}} \right\} (U - \hat{U}),$$

или в скалярной форме

$$M = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\hat{b}_i}{\sqrt{\hat{q}_{ii}}} \right) (u_i - \hat{u}_i),$$

где $\hat{b} = (\hat{b}_1, \dots, \hat{b}_n)$ — собственный вектор ковариационной матрицы \hat{Q} , отвечающий максимальному собственному числу, первая строка модальной матрицы $\text{mod } \hat{Q}$. Диагональная матрица $\text{diag} \{ \dots \}$ используется для нормирования компонент по средним квадратическим значениям.

Схема вычислительной процедуры определения элементов сводится к следующему. Осуществляется начальное приближение выборочных оценок ковариационной матрицы $\hat{Q}(t)$ и вектора средних в соответствии с (1) и (2). Затем определяются собственные числа $\hat{\lambda}_i(t)$, $i = 1, \dots, n$ путем решения характеристического уравнения матрицы $\hat{Q}(t) \det[\hat{\lambda}I - \hat{Q}(t)] = 0$, где I единичная матрица размера $n \times n$. Выбирается максимальное собственное число $\hat{\lambda}(t) = \max \{ \hat{\lambda}_i(t) \}$ и находится соответствующий ему собственный вектор $\hat{b}(t)$ из уравнения $\hat{\lambda}_m(t) \hat{b}^T(t) = \hat{Q}(t) \hat{b}^T(t)$ с учетом нормировки $\hat{b}(t) \hat{b}^T(t) = 1$. По мере поступления новых данных измерений оценки корректируются с помощью рекуррентных процедур.

Приведем примеры обработки изображений облачности (примеры классификации). Исследуем распределение вида рисунка облачного поля на основных атмосферных фронтах (теплый фронт, холодный фронт, фронт окклюзии) (рис. 2).

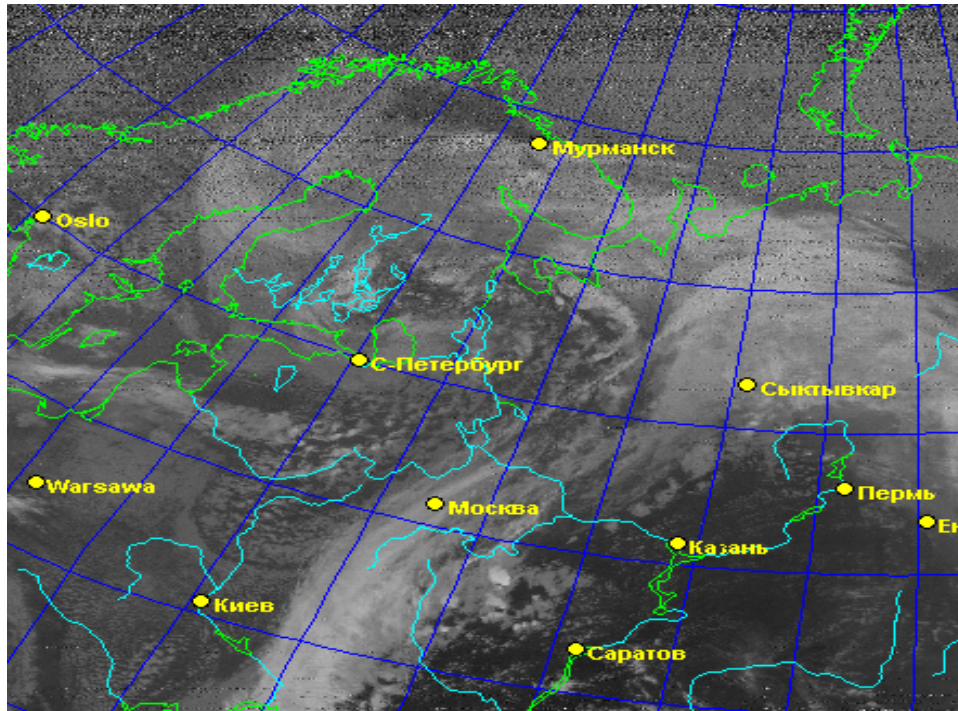


Рис. 2. Облачная система атмосферных фронтов на космическом снимке

Для этого выбраны (классифицированы) 4 вида мезоструктуры: облачные линии, облачные гряды, облачные ячейки и геометрически неправильная мезоструктура. Тип фронта определяется по спутниковым и радиолокационным данным (рис. 3, 4), уточняется с помощью приземных карт погоды.

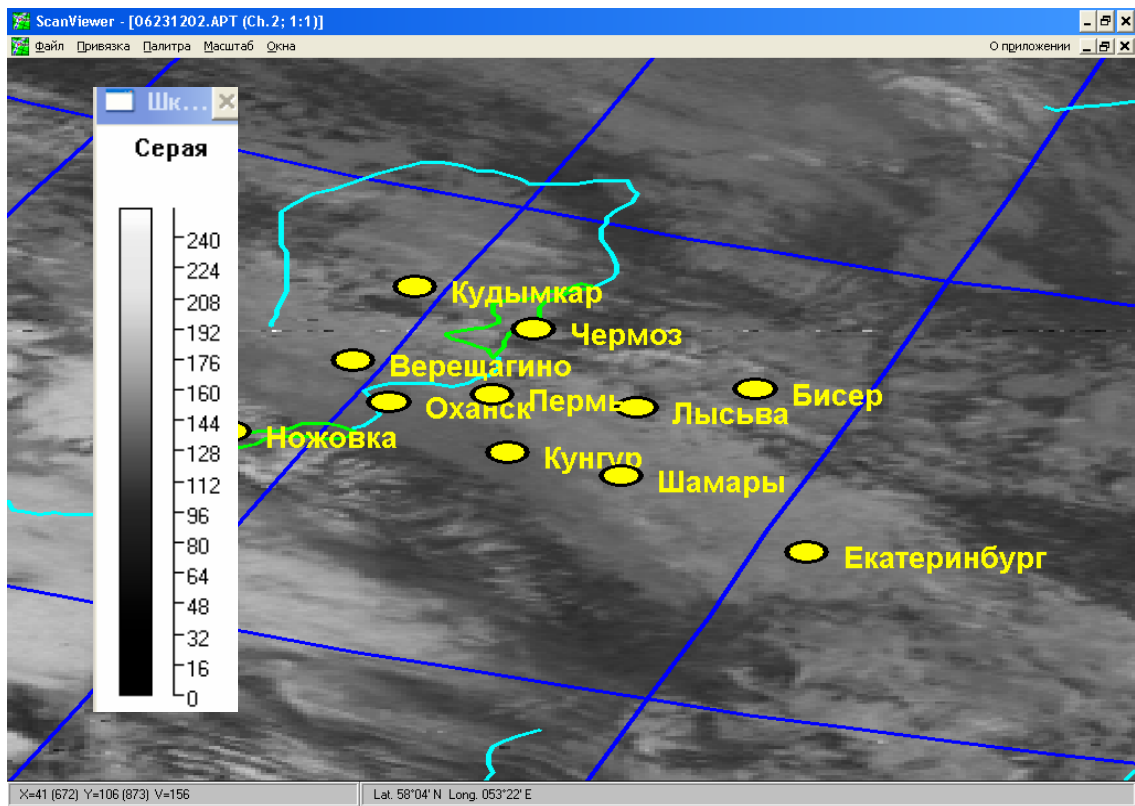


Рис. 3. Космический снимок в ИК диапазоне, полученный со спутника NOAA

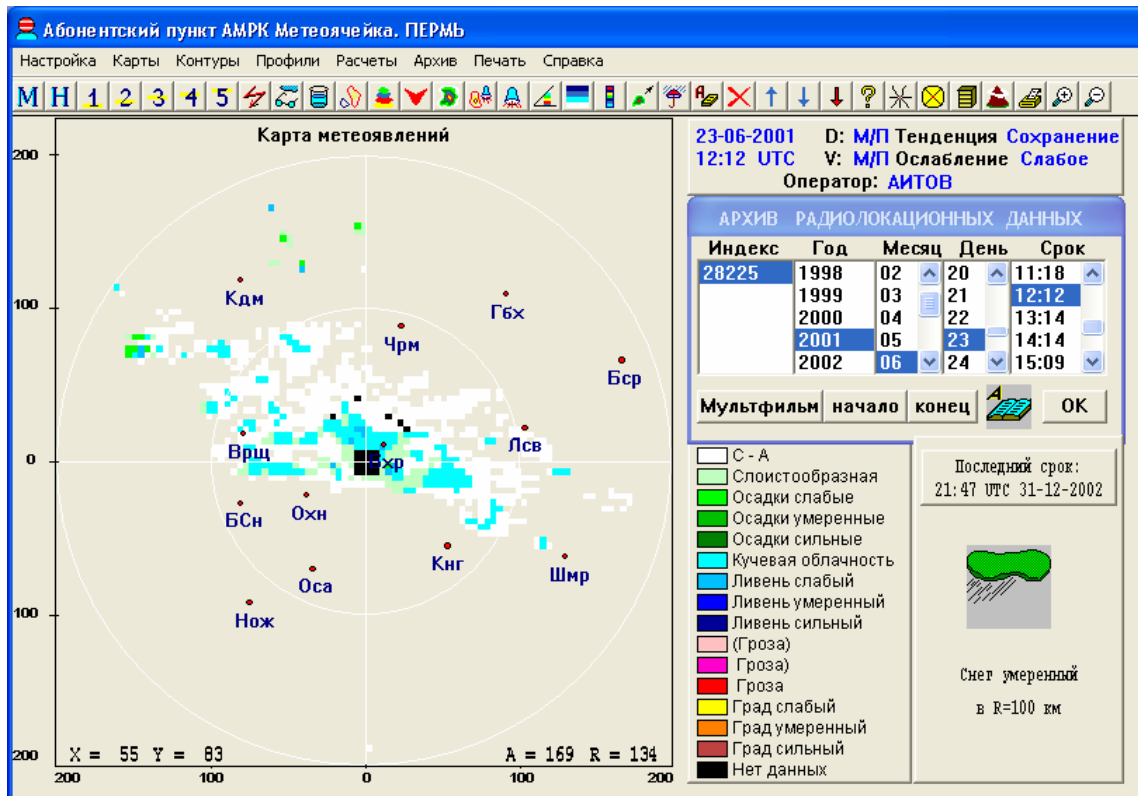


Рис. 4. Бланк-карта МРЛ

На рис. 5 представлена повторяемость прохождения основных атмосферных фронтов зимой. Чаще всего зимой наблюдается прохождение теплого фронта (39%) и фронта окклюзии (35%), реже – холодного (26%).

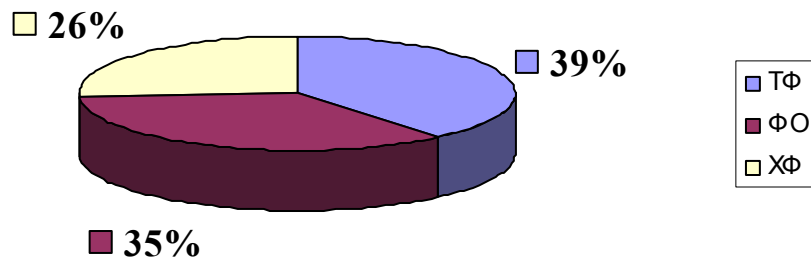


Рис. 5. Повторяемость атмосферных фронтов на территории Пермского края в зимний период

В табл. 1 представлено распределение рисунка облачного поля на фронтах.

Таблица 1

Распределение основных форм мезоструктуры на основных атмосферных фронтах зимой (число случаев, в скобках – %)

Тип фронта	Облачные линии	Облачные гряды	Облачные ячейки	Геометрически неправильная мезоструктура
Теплый фронт	19 (42)	1 (33,3)	1 (25)	9 (36)
Холодный фронт	14 (31)	1 (33,3)	1 (25)	5 (20)
Фронт окклюзии	12 (27)	1 (33,3)	2 (50)	11 (44)
Всего	45	3	4	25

Для зимнего периода на всех фронтах характерными структурными образованиями являются облачные линии (45 случаев). Это связано с тем, что зимой атмосфера более устойчива, чем в остальные сезоны, поэтому на фронтах преобладают упорядоченные вертикальные

движения и фронтальная облачность соответствует классической схеме. Развиваются слоистообразные облака большой протяженности и полосной структуры. Так как гряды и ячейки характеризуют неустойчивость атмосферы, то зимой они встречаются редко (3 и 4 случая соответственно). Геометрически неправильная мезоструктура свидетельствует о сложности распределения облачных элементов в пространстве и иногда наблюдается на размывающихся фронтах. Зимой такой рисунок облачного поля наблюдается 25 раз.

Облачность на теплом фронте чаще всего в зимний период представлена в виде линий (19 случаев), а также в виде геометрически неправильной мезоструктуры (9 случаев).

Аналогичное распределение на холодном фронте и фронте окклюзии. Так, холодному фронту принадлежат 14 случаев с облачными линиями и 5 с геометрически неправильной мезоструктурой, а фронту окклюзии – 12 случаев с облачными линиями и 11 с геометрически неправильной мезоструктурой. Облачные гряды и ячейки отмечаются крайне редко на всех трех фронтах, так как они не характерны для зимних условий.

Весной количество теплых фронтов заметно увеличивается (47%). Количество холодных фронтов практически не меняется от зимы к весне (28%), зато уменьшается количество фронтов окклюзии. Их повторяемость составляет 25%. (рис. 6).

В табл. 2 показано распределение мезоструктуры на атмосферных фронтах в весенние месяцы. Весной очень часто встречаются облачные линии: 32 случая, половина из которых (50%) приходится на теплый фронт. Нередко отмечается облачность в виде геометрически неправильной мезоструктуры: 26 случаев, большая их часть приходится на теплый фронт. Возрастает количество облачных гряд и облачных ячеек (5 и 8 случаев соответственно). Это говорит о том, что конвективные процессы начинают активно развиваться в рассматриваемый сезон.

При анализе отдельно взятого фронта выявляется следующая закономерность. На теплом фронте обычно отмечается мезоструктура в виде линий (16 случаев) и геометрически неправильная (12 случаев). Облачные гряды весной на теплом фронте не наблюдаются. Ячеистая структура

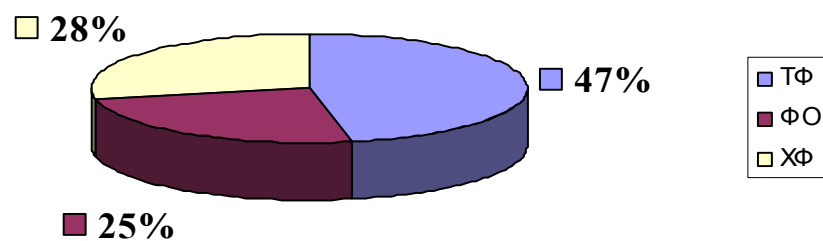


Рис. 6. Повторяемость атмосферных фронтов на территории Пермского края в весенний период

Таблица 2

Распределение основных форм мезоструктуры на основных атмосферных фронтах весной (число случаев, в скобках – %)

Тип фронта	Облачные линии	Облачные гряды	Облачные ячейки	Геометрически неправильная мезоструктура
Теплый фронт	16 (50)	–	2 (25)	12 (46)
Холодный фронт	7 (22)	2 (40)	3 (37,5)	8 (31)
Фронт окклюзии	9 (28)	3 (60)	3 (37,5)	6 (23)
Всего	32	5	8	26

регистрировалась 2 раза. На фронте окклюзии так же, как и на теплом фронте, большинство случаев (9) приходится на облачные линии, немного меньше – на геометрически неправильную мезоструктуру (6). Повторяемость рисунка облачного поля в виде гряд и ячеек одинакова и составляет по 3 случая на каждый из этих двух типов мезоструктуры. Распределение структуры облачности на холодном фронте отличается от распределения на теплом фронте и фронте окклюзии. Большинство случаев (8) приходится на геометрически неправильную мезоструктуру, 7 случаев – на облачные линии, 3 – на облачные ячейки и 2 – на гряды.

В течение летнего периода количество теплых фронтов резко сокращается до 19%. Растет

число случаев с прохождением холодного фронта до 31%. Фронт окклюзии занимает лидирующее положение – 50% (рис. 7).

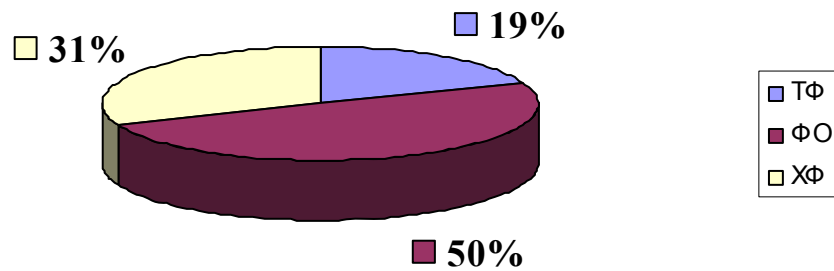


Рис. 7. Повторяемость атмосферных фронтов на территории Пермского края в летний период

Проведем анализ мезоструктурных особенностей каждого из атмосферных фронтов в летние месяцы (табл. 3).

Геометрически неправильная мезоструктура по числу случаев опережает все рассматриваемые типы рисунка облачного поля (29 случаев), 55% из них приходится на фронт окклюзии, 16 случаев соответствует облачным линиям, 15 – ячейкам и 12 – грядам. Большинство облачных линий (56%) также наблюдаются на фронте окклюзии. Облачные гряды характерны для холодных фронтов (75% случаев). Облачные ячейки в летнее время состоят из Sc и наблюдаются на фронтах окклюзии вблизи центра циклона. Поэтому 67% случаев облачности в виде ячеек отмечается именно на фронте окклюзии. На теплом фронте летом чаще всего наблюдается геометрически неправильная мезоструктура (6 случаев). Облачные гряды не прослеживаются, а облачные линии и ячейки отмечаются соответственно в 4 и 2 случаях. Холодный фронт в летние месяцы выглядит в виде гряд (9 случаев). Геометрически неправильная мезоструктура наблюдается реже – 7 случаев. На облачные линии и ячейки приходится по 3 случая. На фронте окклюзии преобладает геометрически неправильная мезоструктура (16 случаев). Ей уступают облачные ячейки (10 случаев), линии (9) и гряды (3).

Таблица 3

Распределение основных форм мезоструктуры на основных атмосферных фронтах летом (число случаев, в скобках – %)

Тип фронта	Облачные линии	Облачные гряды	Облачные ячейки	Геометрически неправильная мезоструктура
Теплый фронт	4 (25)	–	2 (13)	6 (21)
Холодный фронт	3 (19)	9 (75)	3 (20)	7 (24)
Фронт окклюзии	9 (56)	3 (25)	10 (67)	16 (55)
Всего	16	12	15	29

Осенью картина повторяемости атмосферных фронтов резко меняется (рис. 8). Повторяемость теплых фронтов и фронтов окклюзии за рассматриваемый период равны и составляют 41%. Число случаев с холодным фронтом достигает всего 18%.

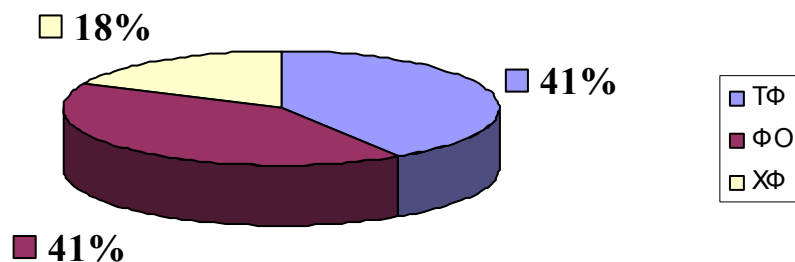


Рис. 8. Повторяемость атмосферных фронтов на территории Пермского края в осенний период

Для выявления закономерностей распределения форм мезоструктуры на атмосферных фронтах, обратимся к табл. 4. Основным рисунком облачного поля осенью являются облачные линии (50 случаев), 30 случаев приходится на геометрически неправильную мезоструктуру, 2 – на облачные ячейки и 1 – на облачные гряды.

Таблица 4

Распределение основных форм мезоструктуры на основных атмосферных фронтах осенью (число случаев, в скобках – %)

Тип фронта	Облачные линии	Облачные гряды	Облачные ячейки	Геометрически неправильная мезоструктура
Теплый фронт	21 (42)	1 (100)	–	12 (40)
Холодный фронт	9 (18)	–	–	8 (27)
Фронт окклюзии	20 (40)	–	2 (100)	10 (33)
Всего	50	1	2	30

Рисунок облачного поля в виде ячеек в осенний период наблюдается только на фронте окклюзии, а в виде гряд – только на теплом фронте. Такое распределение объясняется тем, что облачные гряды и ячейки не характерны для холодного периода. Большинство облачных линий (42%) и геометрически неправильной мезоструктуры (40%) приходится на теплый фронт. Таким образом, можно сделать вывод о том, что осенью для всех атмосферных фронтов характерным рисунком облачного поля являются облачные линии.

Облачность является чувствительным и наглядным индикатором погодообразующих процессов. Для получения полного представления о погодных условиях в конкретном районе информацию МСЗ необходимо дополнять наблюдениями метеорологических радиолокаторов.

На основе исследований облачных структур по информации МРЛ и МСЗ на территории Пермского края сделаны следующие выводы:

1. Повторяемость перистообразной облачности (С-А) максимальна в течение всего года: 41–77% по данным МСЗ и 41–78% по информации МРЛ. Это объясняется тем, что данная облачность сохраняется даже после заполнения циклона. Низкая повторяемость слоисто-дождевой облачности регистрируется на протяжении всего года (4–27% по МСЗ и 4–31% по МРЛ).

2. По информации МРЛ и МСЗ в суточном ходе у форм облачности С-А, S и Сu-Сb минимум повторяемости (4–6%) наблюдается в ночные сроки (0–3 ч), а у Ns – в вечерние (21 ч – 3%). Максимальные значения повторяемости (18–20%) у всех форм облачности отмечаются в дневные часы (12–15 ч).

3. В зимний и весенний периоды чаще наблюдается прохождение теплого фронта (39 и 47% соответственно), в летний период – фронта окклюзии (50%), а в осенний период одинаково отмечаются как теплые фронты, так и фронты окклюзии (по 41%). Характерным рисунком облачного поля зимой (46 случаев из 77), весной (32 – из 71) и осенью (50 – из 83) являются облачные линии. Летом преобладает геометрически неправильная мезоструктура (29 случаев из 72). Теплому фронту и фронту окклюзии зимой (19 случаев из 30 и 12 – из 26 соответственно), весной (16 – из 40 и 9 – из 24) и осенью (21 – из 34 и 20 – из 32) соответствует облачность в виде линий, а летом (6 – из 12 и 16 – из 38) в виде геометрически неправильной мезоструктуры. Холодный фронт зимой (14 случаев из 21) и осенью (9 – из 17) представлен облачными линиями, весной (8 случаев из 20) – геометрически неправильной мезоструктурой, а летом (9 – из 22) – облачными грядами.

Данное исследование по территории Пермского края выполнено впервые. Использование комплексного подхода к исследованию мезомасштабных процессов по данным дистанционных наблюдений оказалось очень плодотворным, а главное он дал возможность выявить детерминированные мезо- β масштабные процессы и закономерность их существования внутри крупномасштабных процессов. Методологически это означает, что при изучении (прогнозировании) процессов мезо- γ в качестве фона для него следует рассматривать процесс мезо- β , а не процесс большего масштаба. Развитие исследования в этом направлении окажет большое влияние на совершенствование методов сверхкраткосрочного прогноза, например прогноза эволюции конвективных систем по космической информации.

Библиографический список

1. *Зенкин А.А., Зенкин А.М.* Задача построения оптимальных классификаций // Сб. работ по математической кибернетике. М.: ВЦ АН СССР, 1981.
2. *Катковник В.Я., Кульчицкий Ю.Ю., Хейсин В.Е.* Аппроксимация решений существенно нестационарных стохастических экстремальных задач в непрерывном времени // Автоматика и телемеханика. 1983. №1. С. 101–112.
3. *Руководство по использованию спутниковых данных при анализе и прогнозе погоды* / под ред И.П. Ветлова, Н.Ф. Вельтищева. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 342 с.
4. *Толмачева Н.И., Булгакова О.Ю.* Метеорологические радиолокаторы и радионавигационные системы управления воздушным движением / Перм. ун-т. Пермь, 2007. 154 с.
5. *Толмачева Н.И.* Космическая метеорология с основами астрономии. Ч.II. Дешифрирование космических снимков (текстура, мезоструктура изображения). Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 2002. 13 с.
6. *Толмачева Н.И.* Космическая метеорология с основами астрономии. Ч.III. Дешифрирование космических снимков (макроструктура изображения) / Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 2002. 16 с.
7. *Li H., Liu Z., Sun W.* A new approach to pattern recognition of remote sensing image using artificial neural networks // IGARSS'93. Vol.2. Tokyo, 1993. P. 713–715.

SUMMARY

Results are presented of numerical analysis of cloudiness fields during the year on a fine grid based on objectively matching of radar and sputnik measurements. A classification of mesoscale cloud fields of radar and sputnik measurement for days, months and seasons is presented. The investigation with the use of the composite (complex) approach leads to the conclusion that mesoscale γ atmospheric processes are deterministic by mesoscale β circulations. Regular existence of such circulations against processes of larger scales determines the predictability of mesoscale γ processes. Here from, it is possible to combine existing classifications of the convective cloud evolution and to use deterministic methods in the very short-range weather forecasting.