

В.И. Петров, к. геогр. н.

*Специальная Служба по Активным Воздействиям на
Гидрометеорологические Процессы Республики Молдова*

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ГРАДООПАСНЫХ КУЧЕВО-ДОЖДЕВЫХ ОБЛАКОВ, РАЗВИВАЮЩИХСЯ НА БРИЗОВЫХ ФРОНТАХ В СЕВЕРО-ЗАПАДНОМ ПРИЧЕРНОМОРЬЕ

Исследована пространственно-временная структура градоопасных кучево-дождевых облаков, развивающихся на бризовых фронтах в северо-западном Причерноморье за период 1996-1999 г.г. с помощью МРЛ-5. Получена карта числа дней с радиоэхом кучево-дождевых облаков с радиолокационной отражаемостью более 65 dBZ в дни с развитием бризовых фронтов. Представлены статистические характеристики бризовых фронтов.

Ключевые слова: бризовый фронт, мезомасштабная структура, радиолокационная отражаемость кучево-дождевых облаков.

Введение. Известно, что соседство двух разнородных подстилающих поверхностей, например, суша-море, всегда приводит к возникновению различных мезометеорологических процессов, в том числе и к развитию кучево-дождевых облаков (Cb), с которыми связаны такие опасные явления погоды как ливни, грозы, град, шквал [3,8].

Знание условий образования и динамики развития таких Cb представляет прямой интерес для решения задач активных воздействий как с целью уменьшения потерь от градобитий, так и с целью искусственного увеличения осадков.

Северо-западное Причерноморье, территория юго-западной части Одесской области Украины и юг Молдовы, в теплый период года характеризуется большой повторяемостью бризов [3]. Бризы – это локальный мезометеорологический процесс, развивающийся в прибрежных районах океанов, морей, крупных водоемов и рек. Над сушей, на некотором удалении от береговой черты образуется бризовый фронт (БФ). Это расположенная параллельно береговой линии зона конвергенции, образовавшаяся в результате взаимодействия дневного (морского) бриза с ослабленным и увлажненным крупномасштабным фоновым потоком с суши, где при наличии неустойчивой стратификации, развиваются кучевые и кучево-дождевые облака. Бризовый фронт выделяется по пространственно-временной картине телевизионных (ТВ) и инфракрасных (ИК) изображений, получаемых с метеорологических спутников Земли или по структуре поля радиоэха кучево-дождевых облаков, обнаруживаемые радиолокационной станцией (РЛС).

Материалы и методы исследования. Цель данной работы заключалась в том, чтобы на основе радиолокационных, аэросиноптических и наземных данных исследовать пространственно-временную структуру градоопасных кучево-дождевых облаков, развивающихся на мезомасштабных бризовых фронтах в северо-западном Причерноморье.

За период (апрель-сентябрь) 1996-1999 г.г. было отобрано 139 дней с развитием бризовых фронтов, из которых в 32 днях наблюдалось радиоэхо от кучево-дождевых облаков (РКО) с радиолокационной отражаемостью более 65 dBZ ($\eta > 65\text{dBZ}$), причем, за один день наблюдалось несколько случаев РКО с $\eta > 65\text{dBZ}$. Наблюдения велись с помощью МРЛ-5 в Кагульской Специальной Части Специальной Службы по Активному Воздействию на Гидрометеорологические Процессы Республики Молдова. Фоторе-

гистрация всей радиолокационной информации велась в радиусе 300 км и в радиусе 100 км. Известно [2], что эффективный радиус $R_{эф}$, определяемый как расстояние, на котором радиоэхо от кучево-дождевых облаков обнаруживается с вероятностью не менее 95%, в режиме штормоповещения для МРЛ-5 составляет 150-250 км. Поэтому, при построении качественных интегральных (суммарных) картин полей радиоэха кучево-дождевых облаков использовались радиолокационные изображения РКО с индикатора кругового обзора (ИКО) МРЛ-5 в радиусе 300 км, а количественные значения радиолокационных параметров кучево-дождевых облаков измерялись в радиусе 100 км. Для анализа привлекались данные радиозондирования станций Одесса и Кишинев, карты барической топографии. При определении вида выпавших осадков из кучево-дождевых облаков с радиолокационной отражаемостью $\eta > 65\text{dBZ}$ использовались данные наземных наблюдений пунктов ракетного воздействия и данные наземной сети постов и метеостанций Гидрометеорологической Службы Республики Молдова. Только по югу Республики Молдовы осадки из кучево-дождевых облаков с $\eta > 65\text{dBZ}$ подтверждаются наземными наблюдениями о выпадении твердых осадков на поверхность земли. Подобные наземные данные по востоку Республики Румыния и юго-западной части Одесской области Республики Украина отсутствуют. Однако с большой степенью вероятности можно предположить, что и на этих территориях из кучево-дождевых облаков с $\eta > 65\text{dBZ}$ отмечалось выпадение твердых осадков на земле.

Результаты исследования и анализ. В работах [4,6] показано, что бризовые фронты развиваются в ослабленном поле общей циркуляции атмосферы, в неустойчиво стратифицированной и увлажненной воздушной массе, и в 56% случаев приходится на малоградиентные барические поля повышенного и пониженного давления. Крупномасштабный фоновый поток характеризуется ослабленными западными, северо-западными и северными ветрами с модальной скоростью в слое 850-500 гПа 4-7 м/с, т.е. ветрами, дующими с берега, что обеспечивает сходимость воздушных течений и усиление конвекции в зоне фронта морского бриза. В работе [4] оценена величина горизонтальной дивергенции скорости ветра при развитии бризовых фронтов для северо-западного Причерноморья на основе радиолокационных измерений площади РКО в узлах регулярной сетки 30x30 км с ИКО МРЛ-5. Ее порядок оказался равным 10^{-4} с^{-1} , и соизмерим с величиной дивергенции при прохождении макромасштабных атмосферных фронтов. В областях конвергенции (отрицательной дивергенции) отмечены максимальные значения радиолокационных параметров кучево-дождевых облаков.

Для северо-западного побережья Черного моря глубина проникновения бризов составляет в среднем 20-25 км [3,4]. Среднее число дней с бризами составляет 58, но может колебаться от 50 до 78 [3]. В таблице 1 дана повторяемость времени появления РКО на бризовых фронтах (А), и повторяемость времени появления РКО с радиолокационной отражаемостью $\eta > 65 \text{ dBZ}$ на бризовых фронтах (Б). Из таблицы 1 видно, что бризовые фронты наиболее часто развиваются в период с 12 до 14 часов (50.4%), т.е. в период максимального развития дневного (морского) бриза. Градоопасные кучево-дождевые облака наиболее часто развиваются с 16 до 18 часов (40.5%).

Таблица 1-Повторяемость (%) времени появления РКО (А) и РКО с радиолокационной отражаемостью $\eta > 65$ dBZ (Б) на бризовых фронтах за период 1996-1999 г.г.

	Наименование	Градации, час						Сумма
		10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	
А	Число случаев	31	70	30	7	1	-	139
	Повтор., %	22.3	50.4	21.6	5.0	0.7	-	100
Б	Число случаев	-	18	44	79	49	5	195
	Повтор., %	-	9.2	22.6	40.5	25.2	2.5	100

Примечание. Несоответствие числа случаев РКО с $\eta > 65$ dBZ с числом дней с бризовыми фронтами объясняется наличием в один и тот же день нескольких случаев РКО с $\eta > 65$ dBZ.

В таблице 2 приведены результаты радиолокационных наблюдений за бризовыми фронтами за указанный период. Данные таблицы 2 показывают, что в бризовый период для северо-западного Причерноморья в среднем в 59.9% случаев наблюдается развитие РКО на бризовых фронтах, из которых в 23.5% случаев отмечается развитие РКО с радиолокационной отражаемостью $\eta > 65$ dBZ.

Таблица 2 – Результаты радиолокационных наблюдений за бризовыми фронтами в северо-западном Причерноморье за период 1996-1999 г.г.

Годы	1996	1997	1998	1999	Сумма	Среднее
Наименование						
Число дней с БФ	36	38	35	30	139	34.7
Число дней с РКО на БФ с $\eta > 65$ dBZ	5	6	12	9	32	8.0
Повторяемость (%) отношения числа дней с РКО на БФ с $\eta > 65$ dBZ к числу дней с БФ	13.9	15.8	34.3	30.0	94.0	23.5
Повторяемость (%) отношения числа дней с БФ к среднему числу дней с бризами	62.1	65.5	60.3	51.7	239.6	59.9

Из данных таблиц 1 и 2 следует, что не все бризовые циркуляции сопровождаются образованием облачной полосы РКО. В этом случае, очевидно, что одно из перечисленных условий: восходящая ветвь в бризовой ячейке, неустойчивость атмосферы и сходимости воздушных потоков в зоне бризового фронта отсутствует.

В работе [6] получена карта числа дней с РКО в радиусе 300 км в дни с развитием бризовых фронтов со значением радиолокационной отражаемости РКО более 12 dBZ с разрешением 30x30 км. Однако для практики градозащиты представляет интерес построение карты числа дней с радиолокационной отражаемостью более 65dBZ, но с более высоким пространственным разрешением с тем, чтобы выявить общие закономерности распределения градоопасных кучево-дождевых облаков, развивающихся на бризовых фронтах. Учитывая, что радиолокационные параметры кучево-дождевых облаков для МРЛ-5 наиболее репрезентативно измеряются до 100 км, такая карта была построена в радиусе 100 км от месторасположения РЛС. Вся исследуемая территория северо-западного Причерноморья была разбита на квадраты 10x10 км. В координатах «азимут-дальность» наносились все случаи с радиоэхо от кучево-дождевых облаков с радиолокационной отражаемостью $\eta > 65$ dBZ и по каждому квадрату суммировались

за четырехлетний период. Затем проводились изолинии равных значений числа дней РКО с $\eta > 65$ dBZ, рис. 1.

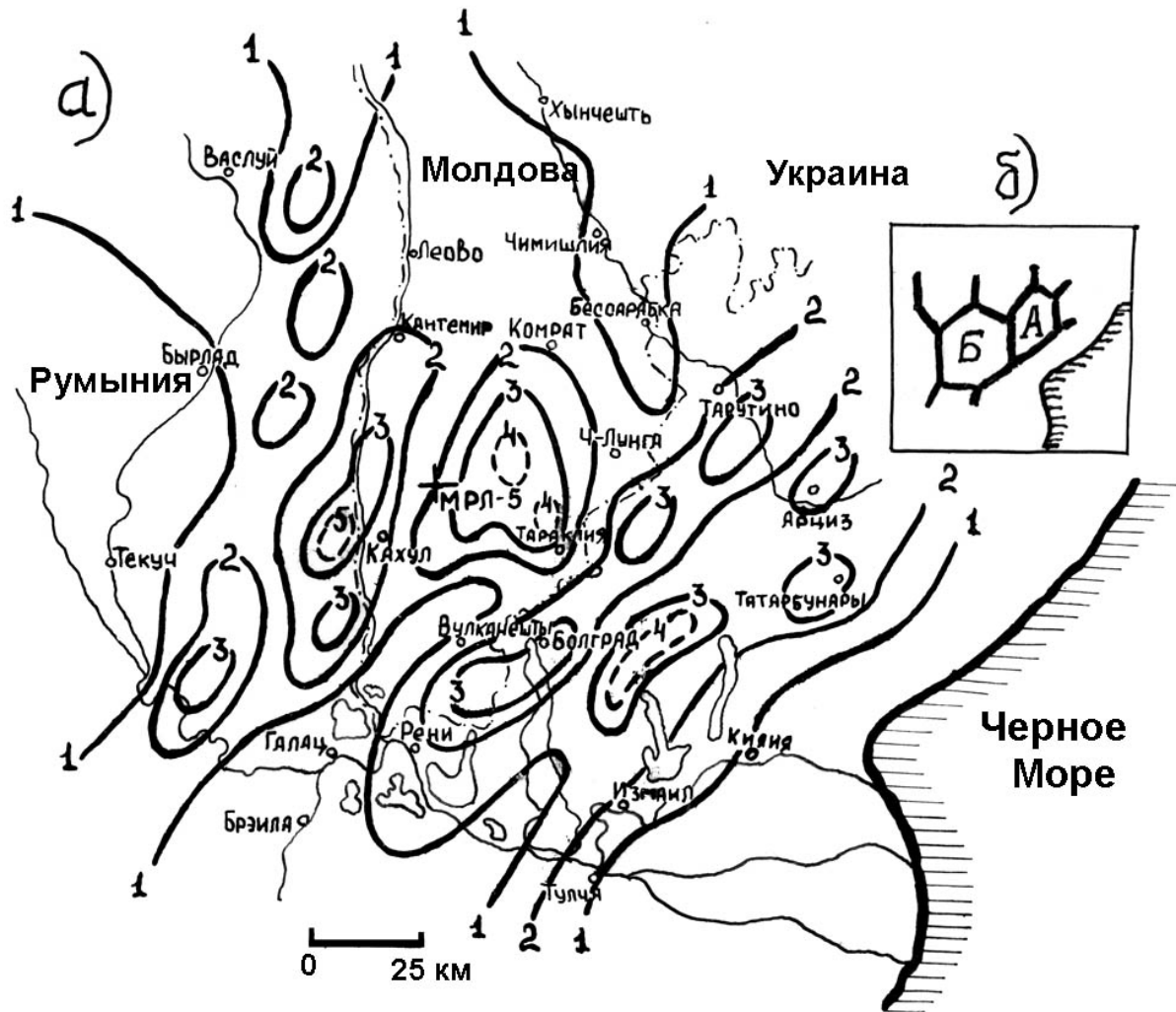


Рис. 1. Карта числа дней РКО с радиолокационной отражаемостью $\eta > 65$ dBZ в дни с развитием бризовых фронтов за период 1996-1999 годы в радиусе 100 км (а) и схема мезомасштабной сетчатой структуры максимумов числа дней РКО с $\eta > 65$ dBZ (б). Средний диаметр мезомасштабной ячейки А составляет 40 км, а мезомасштабной ячейки Б – 60 км. Местоположение радиолокатора МРЛ-5 показано крестиком.

Анализ карты показывает, что распределение числа дней РКО с радиолокационной отражаемостью $\eta > 65$ dBZ характеризуется большой пятнистостью как в направлении перпендикулярном, так и в направлении параллельном береговой линии. Из рисунка 1 видно, что глубина проникновения морского бриза составляет в среднем 20-25 км, а расстояние между центрами максимумов кратно 25 км, т.е. глубине проникновения бриза. Если соединить центры максимумов, то полученная картина напоминает мезомасштабную сетчатую структуру грозоградовых процессов, в узлах которой отмечается максимумы числа дней РКО с $\eta > 65$ dBZ, рис. 1-б. Грозоградовый процесс (ГГП) – это процесс развития кучево-дождевых облаков (масштаб несколько сотен километров) фронтального или внутримассового характера в атмосфере, приводящий к образованию гроз, ливней, града, шквала. Методика получения и анализ грозоградовых процессов изложена в [5,6].

В работах [4,6] показано, что образовавшаяся в результате взаимодействия фонового потока с суши с бризовой циркуляцией зона конвергенции, изменяется со временем и охватывает прибрежную полосу (100-150 км), где при наличии неустойчивой стратификации развиваются Сб. Ширина зоны конвергенции и ее величина зависят как от характеристик крупномасштабного фонового потока, так и от характеристик бриза [8]. В этой зоне формируются мезомасштабные циркуляционные системы движений типа открытых ячеек Бенара-Релея (масштаб мезо-β), которые существуют в течение нескольких часов. Появление новых кучево-дождевых облаков и эволюция уже существующих Сб на бризовых фронтах происходит в зонах восходящих движений регулярных структур с характерным размером мезоячеек в поле РКО 30-40 км по горизонтали [6]. В работе [5] сделан вывод о детерминированности атмосферных процессов масштаба мезо-γ, т.е. масштаба облака, циркуляциями масштаба мезо-β. Существование таких циркуляций на фоне процессов большего масштаба определяет пределы предсказуемости процессов масштаба мезо-γ [5]. Классификации мезомасштабных движений приводится в соответствии с [9].

Мезомасштабная сетчатая структура эволюции кучево-дождевых облаков наиболее ярко выражена при слабозмущенном фоновом потоке, характеризующимся малыми значениями скорости ведущего потока и вертикального сдвига ветра с высотой (не более 1 м/с на километр по всей тропосфере) [7], что и характерно для аэрологической структуры бризовых фронтов [3,4,6].

В данном случае средний диаметр мезоячейки А составляет 40 км, а мезоячейки Б – 60 км, рис. 1-б. В центральных частях мезоячеек число дней РКО с $\eta > 65$ dBZ меньше, чем вдоль граней и в узлах мезомасштабной сетки, т.е. для мезомасштабных процессов такого типа районы максимума числа дней РКО с $\eta > 65$ dBZ географически детерминированы большей повторяемостью градоопасных Сб, чем в соседних районах. Эту особенность необходимо учитывать при планировании системы градозащиты и оценки эффективности активных воздействий.

Следует сказать еще об одной экологической особенности связанной с бризовыми фронтами. Загрязняющее вещества, переносимые ночным (береговым) бризом на акваторию моря, днем, с развитием дневного (морского) бриза могут вновь переноситься обратно в прибрежную зону, где, вовлекаясь в процесс облако- и осадкообразования и могут оседать на поверхность земли. В зонах максимума числа дней РКО с $\eta > 65$ dBZ следует ожидать наибольший уровень загрязнения, по сравнению с соседними территориями.

Таблица 3 – Повторяемость (%) времени существования РКО с радиолокационной отражаемостью $\eta > 65$ dBZ на бризовых фронтах за период 1996-1999 г.г.

Наименование	Градации, мин.					Сумма
	1.0-3.0	3.5-5.0	5.5-7.0	7.5-9.0	> 9	
Число случаев	94	37	27	20	17	195
Повтор., %	48.2	19.0	13.8	10.3	8.7	100

Примечание. Несоответствие числа случаев РКО с $\eta > 65$ dBZ с числом дней с бризовыми фронтами объясняется наличием в один и тот же день нескольких случаев РКО с $\eta > 65$ dBZ.

В таблице 3 дана повторяемость времени существования РКО с радиолокационной отражаемостью $\eta > 65$ dBZ на бризовых фронтах. Из таблицы 3 видно, что наибольшая повторяемость существования РКО с $\eta > 65$ dBZ приходится на градацию 1.0-3.0 минуты (48.2%). На градацию > 9 минут приходится всего 8.7% случаев.

Площадь РКО с радиолокационной отражаемостью $\eta > 65$ dBZ у земли изменяется в пределах от $1 \div 10$ км² (100 – 1000 га), причем, чем продолжительнее время существования РКО с $\eta > 65$ dBZ, тем больше эта площадь.

Представляет большой практический интерес выявление направления развития градоопасных кучево-дождевых облаков по отношению к ведущему потоку, т.е. то направление, в котором появляются новые градоопасные конвективные ячейки. Для этого были исследованы 20 градоопасных кучево-дождевых облаков с $\eta > 65$ dBZ. Под ведущим потоком принималась скорость и направление ветра на 600 гПа [7]. Результаты приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Повторяемость (%) направлений развития градоопасных кучево-дождевых облаков по отношению к ведущему потоку

Наименование	Влево от потока	Вправо от потока	На поток	По потоку	Сумма
Число случаев	3	5	10	2	20
Повтор., %	15	25	50	10	100

Из таблицы 4 видно, что направление развития градоопасных кучево-дождевых облаков может происходить в любых направления по отношению к ведущему потоку, однако преобладающее развитие (50%) отмечается при развитии на поток.

Анализ 139 исследованных бризовых фронтов показал, что во всех случаях на них развиваются одноячейковые (8%) и многоячейковые неупорядоченные (92%) ГПП. Суперячейковые и упорядоченные многоячейковые ГПП не были отмечены ни в одном из исследованных случаев. Это связано с определенной термобарической структурой атмосферы в дни с развитием бризовых фронтов, при котором отсутствуют вертикальные сдвиги ветра с высотой, как по направлению, так и по скорости, характерные для суперячейковых и многоячейковых упорядоченных грозоградовых процессов. Классификация грозоградовых процессов дана по [1].

Выводы. Результаты проведенного исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Бризовые фронты наиболее часто проявляются в период с 12 до 14 часов (50.4%), а градоопасные кучево-дождевые облака, развивающиеся на них - с 16 до 18 часов (40.5%).

2. В бризовый период для северо-западного Причерноморья в среднем в 59.9% случаев наблюдается развитие РКО на бризовых фронтах, из которых в 23.5% случаев отмечается развитие РКО с радиолокационной отражаемостью $\eta > 65$ dBZ.

3. Получена карта числа дней РКО с радиолокационной отражаемостью $\eta > 65$ dBZ в дни с развитием бризовых фронтов за период 1996-1999 годы в радиусе 100 км, имеющая мезомасштабную сетчатую структуру с характерным линейным размером мезоячеек по горизонтали 40 и 60 км, в узлах которой отмечается максимумы числа дней РКО с $\eta > 65$ dBZ.

4. Наибольшая повторяемость существования РКО с $\eta > 65$ dBZ приходится на градацию 1.0-3.0 минуты (48.2%). На градацию > 9 минут приходится всего 8.7% случаев.

5. Направление развития градоопасных кучево-дождевых облаков может происходить в любых направления по отношению к ведущему потоку, однако преобладающее развитие (50%) отмечается при развитии на поток.

6. На бризовых фронтах в северо-западном Причерноморье развиваются одноячейковые (8%) и многоячейковые неупорядоченные (92%) ГПП. Суперячейковые и

упорядоченные многоячейковые ГПП не отмечены ни в одном из 139 исследованных случаев.

Список литературы

1. Абшаев М.Т. Структура и динамика грозоградовых процессов Северного Кавказа // Труды ВГИ. 1984. – вып. 53. – С. 6-22.
2. Брылев Г.Б., Гашина С.Б., Низдойминога Г.Л. Радиолокационные характеристики облаков и осадков. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 332 с.
3. Бурман Э.А. Местные ветры. Л.: Гидрометеиздат, 1969. – 342 с.
4. Волошин В.Г., Петров В.И. Оценка величины горизонтальной дивергенции ветра на бризовых фронтах в северо-западном Причерноморье // Активное воздействие на градовые процессы в Молдове. 2004. - вып. 4. – С. 217-224.
5. Желнин А.А., Старостин А.Н. Сверхкраткосрочный прогноз и проблемы предсказуемости мезомасштабных атмосферных процессов // Метеорология и гидрология. 1987. - № 10. – С. 5-13.
6. Петров В.И. Мезомасштабная структура полей радиоэха конвективных облаков на бризовых фронтах в северо-западном Причерноморье // Метеорология, климатология та гідрологія. 2004. – вип.48. – С. 69-73.
7. Рязанцев Н.А., Швецов В.С. Сравнение результатов радиозондирования атмосферы с характеристиками радиоэхо кучево-дождевых облаков // Проблемные вопросы активного воздействия на атмосферные процессы в Молдавии. Кишинев, 1986. – вып. 1. – С. 51-58.
8. Atkinson B.W. Mesoscale atmospheric circulation. Academic Press. – London, 1981. – 495 p.
9. Orlanski I. A rational subdivision of scales for atmospheric processes // Bull. Am. Meteorol. Soc. – 1975. – vol. 56. – P. 527-530.

Деякі результати радіолокаційних досліджень градонебезпечних купчасто-дощових хмар, які розвиваються на бризових фронтах в північно-західному Причорномор'ї. Петров В.І.

Досліджена просторова-часова структура градонебезпечних купчасто-дощових хмар, які розвиваються на бризових фронтах у північно-західній частині Чорного моря, за період 1996-1999 р.р. за допомогою метеорологічного радіолокатора МРЛ-5. Побудована карта кількості днів з радіолуною купчасто-дощових хмар з радіолокаційною відбиваністю більше 65 dBZ в дні з розвитком бризових фронтів. Представлені статистичні характеристики бризових фронтів.

Ключові слова: бризовий фронт, мезомасштабна структура, радіолокаційна відбиваність купчасто-дощових хмар.

Some results of radar investigations of the hail hazardous cumulonimbus clouds developing on the sea breeze fronts at the northwestern Black Sea coast. Petrov V.

The time-space structure of the hail hazardous cumulonimbus clouds which developing on the sea breeze fronts at the northwestern Black Sea coast for the period 1996-1999 years with the MRL-5 is investigated. The map of the amount days with the radar reflectivity more than 65 dBZ on the sea breeze fronts is presented. The statistic characteristics of the sea breeze fronts are given.

Keywords: sea breeze front, mesoscale structure, radar reflectivity of cumulonimbus clouds.