

УДК 551.557

Н.И. Толмачева, Л.Н. Ермакова

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОБЛАЧНОСТИ И ЯВЛЕНИЙ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОГО И РАДИОЛОКАЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ<sup>1</sup>**

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

Разработана методика определения метеорологических параметров с использованием дистанционных систем зондирования атмосферы. По спутниковой информации восстановлены параметры облачности (границы, площади, объемы), интенсивность осадков, водность, водозапас облаков, опасные явления и исследованы их изменения во времени и пространстве. Проанализированы методы комплексного анализа исследуемых параметров.

Ключевые слова: зондирование; восстановление; опасные явления; характеристики облаков; моделирование; радиолокатор.

**Введение**

Данные метеорологических спутников (МСЗ) важны в анализе и прогнозе метеорологических полей, с их помощью восстанавливаются как фактические, так и прогностические параметры, такие как вид облачности, высота верхней границы, количество и интенсивность осадков, водность, водозапас облаков и метеорологические явления. Но для спутниковых данных необходима идентификация (валидация), так как измерения являются косвенными и объекты исследования (облачность и метеорологические явления) являются неустойчивыми образованиями в пространстве и времени. Для повышения достоверности спутниковых измерений применяются дополнительные средства контроля (информация МРЛ, станционные и аэрологические данные), обеспечивающие получение идентичных характеристик и их комплексный анализ.

Для восстановления высоты верхней границы облачности (ВГО) по текстуре космического изображения и яркости исследовалась структура облачного покрова. Анализировалась информация о вертикальной протяженности облаков, опасных метеорологических явлениях (гроза, шквал, град, сильные ливневые осадки). Восстановление высоты ВГО основано на ее зависимости от значений радиояростной температуры. В эмпирических алгоритмах распознавания (по сезонам) используются данные аэрологического зондирования, их статистика проведена для Пермского края. Точность восстановления составляет: 0,5 км – при наличии плотной перистой облачности, мощных облаков вертикального развития, 1 км – когда наблюдаются тонкие перистые облака и облачность среднего яруса [5; 6].

Диагноз и прогноз количества и интенсивности осадков зависит от вида и количества облачности, показателей водности и водозапаса и основывается на оценке воды, содержащейся в облаке. Информативными параметрами являются также форма и ширина облачной системы, определяющие количество осадков. В предыдущих исследованиях [13] усовершенствована методика диагноза и прогноза среднего количества осадков по полю облачности. Среднее количество осадков рассчитывалось по полям радиояростной температуры, температуры на верхней границе облачности, анализировались атмосферные фронты с различными облачными системами, использовалась методика диагноза и прогноза количества осадков на 12 и 36 ч по данным метеорологических спутников [4; 5]. По облачным системам оценивались интенсивность осадков, опасные явления в зоне циклона для выявления сильных ливней, связанных с мезомасштабными возмущениями (фронты, ячейки), что сложно обнаружить с использованием станционных наблюдений.

Для определения форм облачности и зон опасных явлений погоды использовались яркостные характеристики спутникового изображения. По проведенной статистике [1; 2] температура в облаках изменяется от +25 до –75 °С, а величина яркости — от 0 до 250 градаций, с использованием данной эмпирической зависимости (градации) идентифицировались ячейки (пиксели) с сильными осадками, грозами и градом, облака нижнего, среднего и верхнего ярусов, определялся уровень кристаллизации

© Толмачева Н.И., Ермакова Л.Н., 2011

<sup>1</sup> Статья выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ 10-05-96067-р\_Урал\_а.

(область с минимальной температурой). Радиолокационная отражаемость выражается соотношением

$$Z = \int_0^{\infty} N(d)d^6 dd$$

и связана с интенсивностью осадков  $I$ , водностью облаков  $w$ , данные параметры зависят от диаметра частицы  $d$  и скорости падения  $V$ . Распределение частиц по размерам  $N$  носит региональный характер, поэтому связь  $Z$ ,  $I$  и  $w$  определяется различными зависимостями  $Z = AI^\gamma$ ,  $w = BI^{\beta\alpha}$ , где  $A, B, \gamma, \alpha$  — параметры, меняющиеся в зависимости от региона. На основе алгоритма восстановления водности по радиолокационным данным [3; 6; 10; 11] исследовано ее распределение в облаках различных форм, уточнены по территории алгоритмы определения прогностических параметров, вычисление водности облаков. Применение методов восстановления метеорологических параметров по спутниковой информации и их валидации с использованием МРЛ сократит время принятия решения о штормовом предупреждении.

### Исходный материал

В качестве исходных данных использовались информация метеорологического радиолокатора (МРЛ) в радиусе обзора 200 км, а также данные метеорологического спутника NOAA (рис. 1). Район исследования представляет площадь  $400 \times 400$  км на территории Пермского края, для анализа дополнительно использовались данные метеорологических станций: Бисер, Б. Соснова, Верещагино, Губаха, Кудымкар, Кунгур, Лысьва, Ножовка, Оса, Оханск, Пермь, Чермоз, Шамары. Обработка по всем данным велась за сроки 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21 ч с максимальным отклонением – 20 мин.

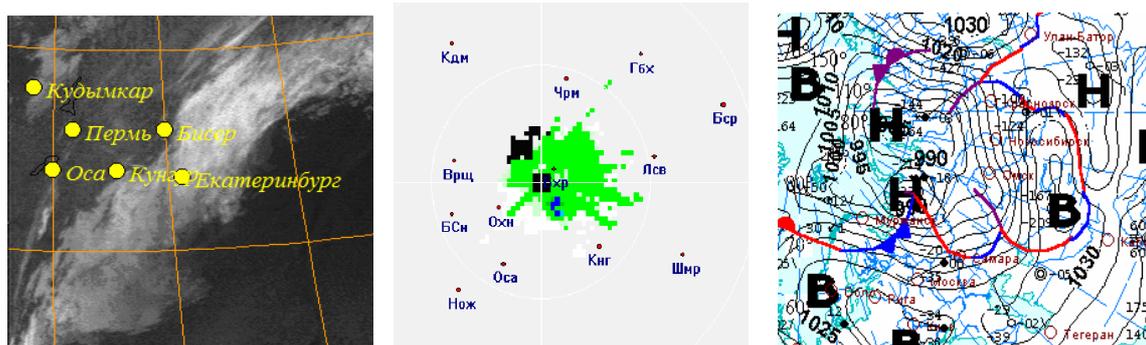


Рис. 1. Космический снимок, карта отражаемости МРЛ и синоптической ситуации за 17 января 2001 г., срок 3 ч 16 мин

### Методика идентификации

В облачной системе МРЛ ячейка выделяется как поле радиоэха, ограниченное замкнутыми изолиниями радиолокационной отражаемости ( $Z$ , dBZ), они изменяются во времени, меняется число изолиний  $Z$ , высота, поперечные размеры, площади горизонтальных сечений, объем, конфигурация, водосодержание и вид осадков. Метод восстановления включает: выделение в поле радиоэха облачности пикселей внутри изолиний с различной радиолокационной отражаемостью  $Z$ ; выделение максимальных высот радиоэха; идентификацию конвективных ячеек; расчет комплекса параметров в ней; построение графиков временного хода параметров; расчет направления и скорости перемещения; оценка степени грозо- и градоопасности. Программное обеспечение МРЛ позволяет получить обзор с шагом 4 км, а МСЗ — 1 км, для сопоставления результатов спутниковые пиксели объединяются по 4. Процедура осуществляется для каждой точки пространства, также используется набор данных, соответствующих 5 горизонтальным сечениям. Определение направления и скорости перемещения ячейки осуществляется по перемещению координат центра масс, рассчитываемых с учетом пространственного распределения их полей по известным формулам [11; 13]. Далее осуществляется измерение параметров конвективной ячейки и построение графиков временного хода. Комплексный анализ полей радиоэха позволяет своевременно обнаружить зарождение новых ячеек. Распознавание вида осадков, явлений погоды, оценка степени грозо- и градоопасности, проводятся по критериальным значениям параметров, таких как радиолокационная отражаемость на высоте 1 км, нулевой изотермы, превышение тропопазузы и комплексный критерий грозоопасности [12]. Предлагаемый метод и алгоритмы позволяют в реальном масштабе времени реализовать комплексную оценку восстановленных параметров по спутниковым данным. На основе применения созданной методики проведены исследования характеристик конвективных облаков Пермского края с 2000 по 2009 г. Проводилась обработка огромного массива спутниковых и радиолокационных

данных, включающего 43 252 обзора, рассчитаны параметры в 572 153 ячейках. В исследовании проведен анализ опасных явлений Пермского края, выявлены наиболее опасные периоды года и суток, получены статистические характеристики различных метеорологических параметров по данным спутниковых измерений.

### Исследование форм облачности по МСЗ и МРЛ

Суточный ход различных форм облачности за 2000–2009 гг. по информации МСЗ и МРЛ представлен на рис. 2. Слоистая облачность (S) является распространенной формой, их повторяемость значительно выше повторяемости облаков верхнего и среднего яруса (C–A). В зимний период преобладает низкая облачность слоистых форм (табл. 1). Под повторяемостью понимается отношение числа дней, когда отмечалась данная облачность, к общему числу дней наблюдений. По данным МСЗ максимальная повторяемость отмечается на ст. Верещагино, Кудымкар – 52 % случаев, минимальная – на ст. Б. Соснова (45 %). По данным МРЛ также преобладающей оказывается слоистообразная облачность, однако станции с максимальными и минимальными значениями повторяемости облачности несколько отличаются от МСЗ. Максимальная повторяемость наблюдается на ст. Лысьва – 70 %, а минимальная на ст. Шамары и Б. Соснова – 17 и 12% случаев соответственно.

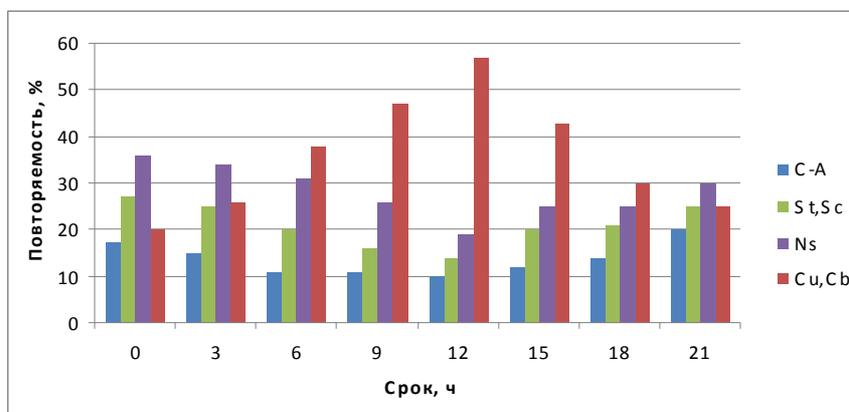


Рис. 2. Повторяемость (%) форм облачности по данным МСЗ и МРЛ

Таблица 1

### Повторяемость (%) облачных систем по данным МСЗ(МРЛ) за зимний период

Станция	C-A	St, Sc	Ns	Cu, Cb
Бисер	18 (33)	21 (11)	49 (33)	12 (23)
Б. Соснова	19 (50)	16 (12)	45 (12)	20 (26)
Верещагино	17 (23)	15 (16)	52 (55)	16 (6)
Губаха	15 (25)	19 (25)	49 (33)	17 (17)
Кудымкар	17 (18)	20 (27)	52 (41)	11 (14)
Кунгур	18 (33)	20 (25)	48 (25)	14 (17)
Лысьва	14 (14)	20 (11)	48 (70)	18 (5)
Ножовка	16 (22)	22 (22)	48 (34)	14 (22)
Оса	15 (30)	21 (30)	49 (20)	15 (20)
Оханск	17 (24)	19 (20)	49 (52)	15 (4)
Пермь	17 (13)	18 (30)	49 (49)	16 (8)
Чермоз	16 (15)	18 (17)	50 (65)	16 (3)
Шамары	16 (33)	20 (33)	48 (17)	16 (17)

В летний период (табл. 2) значительно увеличивается повторяемость конвективной облачности. При анализе спутниковой и радиолокационной информации в течение всего года отметим, что максимальная повторяемость принадлежит облачности нижнего яруса, максимум у которой зафиксирован в зимние и осенние месяцы, что связано с большой интенсивностью циклонической деятельности на территории Пермского края [13]. Конвективная облачность в основном отмечается в

весенний и летний периоды, максимум в августе – 96 %. Облачность формы С–А замечена на протяжении всего года, она сохраняется даже после заполнения циклонического вихря.

#### Анализ структуры облачного поля и радиолокационной отражаемости

Значения отражаемости разделили на 4 группы: низкие (0–5 dBz), средние (6–15 dBz), высокие (16–30 dBz) и очень высокие (более 31 dBz), тип рисунка облачного поля выбрали в соответствии с классификацией мезоструктуры облачности по данным МСЗ.

Таблица 2

#### Повторяемость (%) облачных систем по данным МСЗ(МРЛ) за летний период

Станция	<i>C-A</i>	<i>St, Sc</i>	<i>Ns</i>	<i>Cu, Cb</i>
Бисер	11 (13)	22 (13)	31 (13)	61 (30)
Б. Соснова	13 (7)	20 (3)	37 (14)	76 (29)
Верещагино	12 (6)	24 (6)	36 (6)	72 (82)
Губаха	14 (3)	20 (5)	28 (10)	38 (82)
Кудымкар	12 (8)	23 (10)	26 (14)	39 (68)
Кунгур	12 (6)	22 (8)	28 (6)	38 (80)
Лысьва	12 (3)	21 (11)	28 (4)	39 (82)
Ножовка	13 (24)	20 (11)	27 (22)	38 (45)
Оса	12 (20)	18 (20)	30 (20)	40 (40)
Оханск	11 (7)	26 (4)	28 (7)	35 (82)
Пермь	12 (2)	24 (10)	26 (13)	38 (75)
Чермоз	10 (3)	15 (14)	24 (8)	47 (75)
Шамары	9 (14)	25 (14)	24 (14)	42 (58)

В зимний период (табл. 3) для всех типов облачных структур наблюдаются средние значения отражаемости (6–15 dBz). Такое распределение объясняется малой мощностью облаков в холодный период года по сравнению с теплым, невелики и размеры облачных частиц. При всех видах мезоструктуры преобладают средние значения отражаемости: облачные линии – 53 %, облачные гряды – 27 %, облачные ячейки – 67 %, геометрически неправильная мезоструктура – 53 %.

Таблица 3

#### Распределение радиолокационной отражаемости в зависимости от характера рисунка облачного поля в зимний период (число случаев)

Отражаемость	Мезоструктура			
	Облачные линии	Облачные гряды	Облачные ячейки	Геометрически неправильная мезоструктура
0–5	74	7	8	40
6–15	89	3	18	55
16–30	6	1	1	8
Более 31	–	–	–	–
Всего	169	11	27	103

Наиболее часто встречаются облачные линии, в зимний период им соответствуют средние и низкие значения отражаемости, так как данная мезоструктура состоит из слоистообразной и перистообразной облачности. Основной вклад в общую отражаемость облачных линий вносит слоистообразная облачность, которая зимой имеет небольшую протяженность и неплотную структуру, в результате чего значения отражаемости невелики. Теоретически облачные гряды должны обладать средними и высокими значениями отражаемости, так как состоят из отдельных и слившихся кучевообразных облаков, имеющих большую плотность и крупные размеры облачных частиц, но в зимние месяцы конвективная неустойчивость слабая, кучевообразные облака имеют небольшую вертикальную протяженность, малые размеры облачных частиц. Такое строение облачности и определило, что ее отражаемость входит в пределы 0–5 dBz. Для ячеек характерны средние и низкие значения отражаемости. Как и облачные гряды, ячейки представляют собой

кучевообразную облачность, но вследствие незначительной конвекции зимой в группах с отражаемостью 0–5 dBz и 6–15 dBz отмечено 30 % и 67 % случаев соответственно. Геометрически неправильная мезоструктура в основном дает небольшую отражаемость, так как состоит в большей части из слоистых и слоисто-кучевых облаков без осадков. Значения отражаемости 6–15 dBz – 53 %, а в 8 % случаев – 16–30 dBz, благодаря наличию перистообразных и кучевообразных облаков.

Весной прослеживаются некоторые изменения в картине распределения радиолокационной отражаемости. Преобладающим типом мезоструктуры, как и зимой, являются облачные линии (табл. 4), что связано с образованием облачности нижнего яруса. Максимальные значения отражаемости в облачных линиях отмечаются в интервале 6–15 dBz – 39 % случаев и 16–30 dBz – 38 %, что объясняется интенсивным прогревом, усилением неустойчивости атмосферы, увеличением мощности облаков, размеров облачных частиц и их концентрации в облаке.

Таблица 4

**Распределение радиолокационной отражаемости в зависимости от характера рисунка облачного поля в весенний период (число случаев)**

Отражаемость	Мезоструктура			Геометрически неправильная мезоструктура
	Облачные линии	Облачные гряды	Облачные ячейки	
0–5	29	6	7	16
6–15	59	6	9	45
16–30	58	49	45	51
Более 31	5	13	14	10
Всего	151	74	75	122

Рассмотрим отдельно каждый тип структуры облачного поля. Облачные линии состоят из слоистообразной облачности разных форм. Таким образом, радиолокационная отражаемость рассматриваемого рисунка облачного поля включает в себя отражаемость каждого из этих типов облачности. Среди слоистообразной облачности часто встречаются такие формы облачности, как С–А, S и Ns. Для С–А характерна низкая отражаемость, поэтому 19 % случаев облачных линий попадают в интервал значений 0–5 dBz. Однако весной мощность облаков больше, чем зимой, поэтому значения отражаемости значительно выше. Максимальные значения 38–39 % соответствуют интервалам 6–15 dBz и 16–30 dBz, так как прохождение слоисто-дождевой облачности сопровождается выпадением умеренных по интенсивности осадков, имеющих высокую отражаемость. Облачные гряды в весенний период наблюдаются реже, всего 74 случая. К данной мезоструктуре относится кучевообразная облачность, для которой характерны высокие значения отражаемости. Максимальная повторяемость (66% случаев) соответствует значениям радиолокационной отражаемости от 16 до 30 dBz. Свыше 31 dBz замечено 18 % случаев. Облачности в виде ячеек в весенний период соответствует отражаемость 16–30 dBz (максимальная повторяемость), в основном облачные ячейки состоят из слоисто-кучевых облаков. 19 % случаев имеет отражаемость свыше 31 dBz. Это говорит о том, что некоторые облачные ячейки имеют большую мощность и крупные размеры. Геометрически неправильная мезоструктура часто наблюдается при отражаемости в интервалах 16–30 dBz – 42 % случаев. Данная мезоструктура может включать в себя три типа облачности: перисто-, слоисто- и кучевообразную.

В летнее время атмосфера крайне неустойчива, развиваются интенсивные конвективные движения, приводящие к образованию мощной облачности. Нередко и слоисто-дождевая облачность в этот период имеет большую вертикальную протяженность, высокую концентрацию и большие размеры облачных капель, где отражаемость достигает максимальных значений [7–9; 13]. В табл. 5 представлена связь мезоструктуры облачности с радиолокационной отражаемостью в летний период. Преобладает геометрически неправильная мезоструктура и отмечаются самые высокие значения радиолокационной отражаемости (более 31 dBz), что говорит о большой вертикальной протяженности облачности, состоящей из нескольких ярусов, или присутствии грозных облаков.

Таблица 5

**Распределение радиолокационной отражаемости в зависимости от характера рисунка облачного поля в летний период (число случаев)**

Отражаемость	Мезоструктура
--------------	---------------

	<i>Облачные линии</i>	<i>Облачные гряды</i>	<i>Облачные ячейки</i>	<i>Геометрически неправильная мезоструктура</i>
0–5	–	–	–	3
6–15	6	3	6	8
16–30	93	57	78	118
Более 31	22	–	52	25
Всего	121	60	136	154

Линиям в основном соответствуют высокие и очень высокие значения отражаемости: 77 % случаев в интервале 16–30 dBz, 18 % случаев – более 31 dBz. В летний период слоистообразная облачность образуется в виде тонкой пелены или плотного слоя. Облачные гряды летом встречаются довольно часто, для этого сезона характерно развитие конвективной неустойчивости в дневное время. Кучевые и кучево-дождевые облака, из которых состоят гряды, имеют высокие значения отражаемости, 95 % случаев в интервале 16–30 dBz. В них отмечаются грозы и ливни. 5 % случаев облачных гряд зафиксировано в интервале значений 6–15 dBz, данная отражаемость наблюдается в кучевых облаках, слабо развитых по вертикали (Cu hum., Cu med.). Облачным ячейкам, также как и грядам, соответствуют высокие значения отражаемости, 57 % случаев относится к интервалу 16–30 dBz, так как составляющими данного типа мезоструктуры являются кучевообразные облака. Летом облачные ячейки состоят не только из слоисто-кучевых, но и облаков типа Cu, Cb. Поэтому когда отмечается слоисто-кучевая облачность, наблюдаются 4 % случаев в интервале 6–15 dBz. Низкие значения отражаемости не фиксируются, так как в основном летом образуются облака плотной структуры с крупными облачными каплями. Очень высокие значения отражаемости (более 31 и до 40 dBz) характеризуют наличие грозовых облаков. Кучево-дождевые облака в виде ячеек отмечаются при низких скоростях ветра и обширной площади интенсивных восходящих движений. Геометрически неправильная мезоструктура летом обычно состоит из сочетаний кучевообразной и слоистообразной облачности. Максимальная повторяемость – 77 % относится к интервалу отражаемости 16–30 dBz (табл. 5). Такая картина распределения отражаемости объясняется тем, что в летний период при геометрически неправильной мезоструктуре наблюдаются чаще всего плотные облака как кучевообразных, так и слоистообразных форм, иногда с осадками. Реже наблюдается перистообразная облачность.

Таблица 6

**Распределение радиолокационной отражаемости в зависимости от характера рисунка облачного поля в осенний период (число случаев)**

<i>Отражаемость</i>	<i>Мезоструктура</i>			
	<i>Облачные линии</i>	<i>Облачные гряды</i>	<i>Облачные ячейки</i>	<i>Геометрически неправильная мезоструктура</i>
0–5	47	1	-	12
6–15	118	2	1	61
16–30	67	11	8	59
Более 31	7	-	1	4
Всего	239	14	10	136

В табл. 6 представлено распределение отражаемости по видам мезоструктуры в осенний период. Проанализировав распределение радиолокационной отражаемости по видам мезоструктуры, можно отметить, что преобладающим рисунком в течение года являются облачные линии, менее распространенной является геометрически неправильная мезоструктура, редко встречались облачные гряды. В весенний, осенний и зимний сезоны наиболее распространенной мезоструктурой являются облачные линии, а в летний сезон – геометрически неправильная мезоструктура. Летом и весной доминируют значения отражаемости 16–30 dBz, осенью и зимой – 6–15 dBz.

Исследуя вертикальную структуру облачности, выделили 5 уровней отражаемости (по высоте) и значения отражаемости для каждой мезоструктуры (рис. 3). Облачные линии в основном состоят из слоистообразной и перистообразной облачности, которая может присутствовать одновременно на разных высотах. На первых двух уровнях отражаемость составляет 13 dBz, далее происходит ее

понижение. Это говорит о том, что основная масса облачности находится на уровне 1–2 км, т.е. представлена облачность нижнего яруса.

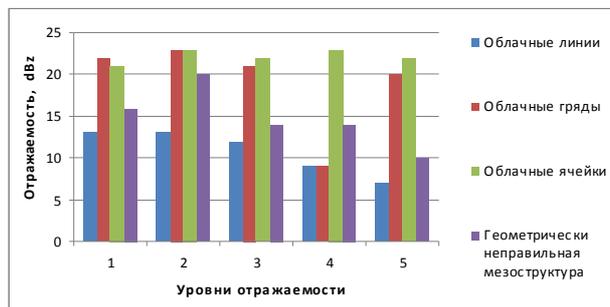


Рис. 3. Распределение радиолокационной отражаемости по уровням

Облачные гряды имеют максимальную отражаемость – 23 dBz на уровне 2 км, ниже и выше этого значения отражаемость уменьшается. Заметно, что в каждом слое значения отражаемости значительно выше, чем отражаемость облачных линий, так как в облачных грядах в основном представлена кучевообразная форма облачности, которая сильно развита по вертикали и обладает большой мощностью. Значения отражаемости облачных ячеек близки к значениям отражаемости облачных гряд, однако отличаются уровни образования максимумов. В ячейках наблюдаются два максимума – 23 dBz на уровнях 2 и 4 км. Такое распределение говорит о том, что облачность расположена слоями на разных высотах и толщина безоблачных слоев между ними может составлять значительные расстояния, в результате чего отражаемость здесь уменьшается. Облачность геометрически неправильной мезоструктуры имеет максимальную отражаемость 20 dBz на уровне 2 км, минимальную – на уровне 5 км (10 dBz).

#### Связь радиолокационной отражаемости и тона спутникового изображения.

На рис. 4 представлен суточный ход отражаемости и яркости по сезонам с явно наблюдаемым сходством характеристик.

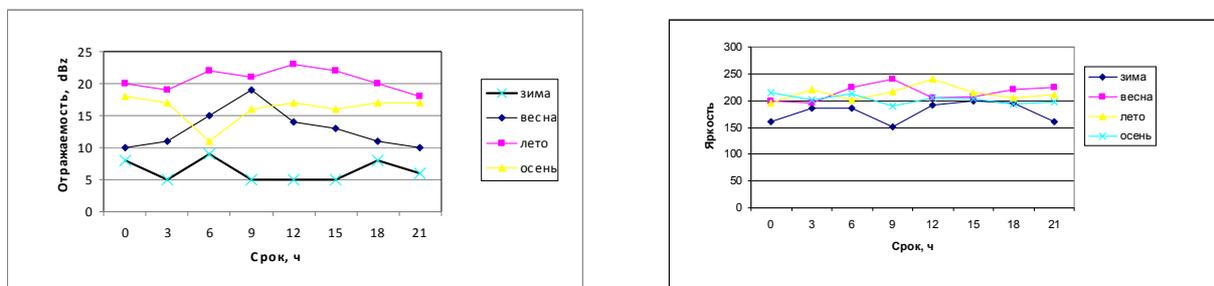


Рис. 4. Суточный ход отражаемости и яркости по сезонам

#### Анализ конвективных явлений

Представим результаты исследования пространственно-временного распределения характеристик осадков из облаков различных типов, их эволюцию во времени в зависимости от размера облачных частиц, интенсивность осадков, особенности полей с осадками и градом различной интенсивности и статистику времени и высоты образования грозовых и градовых процессов. Выделялись конвективные ячейки по данным МСЗ и МРЛ за летний сезон 2000–2009 гг. и проводилась статистическая оценка времени градообразования. Были проанализированы карты опасных явлений погоды, просматривалась анимация эволюции облачной системы, были выбраны отдельные конвективные ячейки, строились вертикальные сечения через градовый очаг в заданном направлении, проводился анализ высоты появления первого радиоэха, времени градообразования, высоты зарождения града, пространственно-временное распределение перечисленных параметров. Анализ пространственно-временного распределения градовых и грозоопасных облаков показал, что местоположение очагов в облаках зависит от типа и структуры процессов. В процессе зарождения и роста града очаги располагаются в центральной части облака, выше изотермы  $-45^{\circ}\text{C}$ , в стадии выпадения града, приобретают вид вертикальных столбов. В многоячейковых градовых процессах очаги чаще (65% случаев) расположены с наветренной стороны конвективной ячейки, в 24% – в центре нее и в 11% – с подветренной. Отмечается также наклон градового очага вперед и вправо

таким образом, что часть градового очага нависает над зоной восходящих потоков, образуя изгиб радиоэха. Зарождение первого радиоэха градовых ячеек отмечается на высоте от 2 до 7,5 км. В результате анализа выявлены следующие закономерности, характеризующие градовые процессы: для одноячейковых процессов характерно выпадение града локальными пятнами; многоячейковым процессам соответствуют полосы града; количество пикселей с градом – от 1 до 8; длина очага изменяется от 4 до 48 км (в среднем 4–16 км), ширина – от 4 до 24 км при среднем значении 4–12 км.

Исследовали информативность параметров облаков по распознаванию опасных явлений погоды, эволюции во времени и пространстве водности и интегрального водосодержания градовых и ливневых облаков на разных стадиях развития. На основе анализа более 10 тыс. файлов спутниковой информации и данных радиолокационного обзора получены статистические характеристики объемов облаков ( $V$ ), интегральной водности ( $w$ ) мощных и  $C_b$  облаков, с ливневыми осадками и градом. Проведена оценка повторяемости интегрального водосодержания, объемов облачности с отражаемостью ( $Z$ ) более 15, 25 и 35 dBz, водности по всей высоте ( $H$ ) радиоэха и площади выпадения осадков ( $s$ ). Анализ показал, что повторяемость значений  $V$  и  $s$  имеют экспоненциальное, а значение  $w$  – нормальное распределение. Среднее интегральное водосодержание облачности одного срока составляет до  $10^3$  т, внутри отражаемости более 25 dBz достигает  $10^2$  т. Объемы всего облака и облачности внутри отражаемости более 25 dBz достигают значений  $2 \cdot 10^2$  и  $3 \cdot 10^2$  км<sup>3</sup>,  $s$  составляет от 16 до  $2 \cdot 10^3$  км<sup>2</sup>, водность изменяется в пределах от 0,01 до 0,27 кг/м<sup>2</sup>, чаще 0,03 – 0,1 кг/м<sup>2</sup>.

Исследовалась временная изменчивость высоты верхней границы облачности, значение максимальной отражаемости, превышение максимальной отражаемостью высоты нулевой изотермы, объемы облачности с отражаемостью более 10, 15, 25, 35, 40 dBz, интегральные значения водности внутри изолиний 10, 15, 25, 35, 40 dBz. По временному ходу приведенных параметров проводился анализ эволюции облачности, ее возникновения, перемещение, разрушение, длительность существования конвективной ячейки с ливнем, грозой, градом. Анализ мощного градового облака показал, что значения  $Z_{\max}$  и  $H_{\max}$  указывают на наличие града несколько позже других характеристик. Верхняя граница зоны локализации града за 60 мин опускается до уровня нулевой изотермы, далее идет процесс диссипации града, зона роста града отсутствует, а значения  $Z_{\max}$ ,  $w_{\max}$ ,  $H_{\max}$  остаются характерными для града еще 30 мин. Резкое уменьшение указанных параметров свидетельствует об ослаблении градового процесса и прекращении выпадения града по информации МРЛ.

В рассматриваемых конвективных ячейках большая часть зоны с градом и сильным градом расположена в зоне роста отражаемости. Таким образом, усиление и ослабление градовой ячейки лучше характеризуется параметрами области радиоэха с отражаемостью более 35 dBz. Наиболее информативными являются объемы с максимальными отражаемостью и водосодержанием, как зоны зарождения и роста града. Дифференцируя во времени интегральное водосодержание облака, можно оценить скорость осадкообразования. Например, интегральное водосодержание процесса, изображенного на рис. 1, увеличивалось по мере развития облака и достигло  $2,3 \cdot 10^4$  т, а за период последующих 30 мин уменьшалось до  $1,1 \cdot 10^3$  т. Таким образом, в период развития конвективной ячейки водосодержание увеличивается примерно в 10 раз, а затем аналогично уменьшается, скорость осадкообразования достигает  $10^4$  т/мин. В среднем максимальная скорость осадкообразования достигала  $10^3$ – $2 \cdot 10^4$  т/мин. Исследование суммарной водности конвективных облаков показывает, что более высокую информативность имеет водность всего облачного слоя, чем высота или максимальная отражаемость. Если водность конвективных ячеек максимальна в осадках (область положительных температур), а в слое роста града мала, то это говорит о том, что ячейки находятся в стадии диссипации и не представляют опасных явлений, но когда суммарная водность в слое роста града достигает значения 10 кг/м<sup>2</sup>, то конвективная ячейка становится градоопасной. Значения суммарной водности конвективных облаков зависят и от стадии их развития. Среднеквадратическая ошибка восстановления параметров по спутниковым данным составила 31%, радиолокационным – 24% при сравнении результатов с данными наземных наблюдений. Коэффициент корреляции между данными радиолокационных и наземных измерений 0,92, а спутниковых – 0,87.

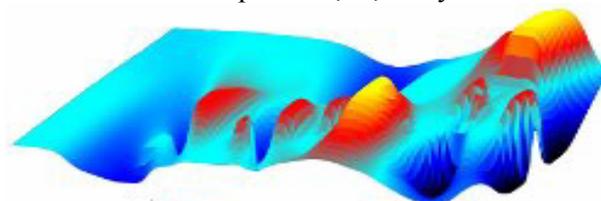


Рис. 5. Восстановление числа случаев опасных явлений погоды на территории Пермского края по космической информации за 2000-2009 гг. (желтый – град, красный – гроза, синий – ливневые осадки, голубой – облачность)

На основе анализа параметров ливневых, грозовых и градовых облаков, восстановленных с помощью спутниковых измерений и их валидации по радиолокационным данным, показана возможность применения результатов и полученных закономерностей для уточнения критериев распознавания опасных явлений погоды (рис. 5) для целей штормооповещения.

### Выводы

1. Разработан новый метод спутниковой идентификации конвективных ячеек (грозовые, ливневые, градовые) с использованием данных МРЛ.

2. На основе восстановленных по спутниковым данным параметров проведена статистическая обработка и анализ многолетнего массива данных облаков и осадков за период 2000–2009 гг., впервые получены: статистические данные о повторяемости ОЯ (ливневых осадков, гроз и града) различной интенсивности; изучены многолетний, годовой и суточный ход конвективных явлений в регионе; установлены наиболее опасные периоды года и суток; выявлены региональные особенности повторяемости процессов разной интенсивности.

3. Получены статистические данные о зависимости параметров с градовой, грозовой и ливневой активностью.

4. Разработана методика оценки явлений и методика краткосрочного прогноза их местоположения, основанная на анализе радиолокационной информации.

6. Разработаны рекомендации по применению разработанного метода идентификации облачных ячеек и временного хода параметров.

Предложенные методы и алгоритмы восстановления метеорологических величин по спутниковой информации можно использовать в практике штормооповещения и метеообеспечения авиации. Их применение повысит эффективность метеорологических прогнозов и оперативность распознавания опасных явлений погоды.

### Библиографический список

1. Абшаев М.Т., Абшаев А.М., Малкарова А.М., Жарашуев М.В. Автоматизированная радиолокационная идентификация, измерение параметров и классификация конвективных ячеек для целей защиты от града и штормооповещения // Метеорология и гидрология. М.: Гидрометеиздат, 2010. № 3. С. 36-45.

2. Абшаев М.Т., Абшаев А.М., Малкарова А.М., Мизиева Ж.Ю. Радиолокационные исследования водосодержания кучево-дождевых облаков // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45, № 6. С. 731–736.

3. Бухаров М.В., Алексеева А.А. Диагноз гроз по синхронной информации спутниковых радиометров микроволнового и инфракрасного диапазонов // Метеорология и гидрология. 2005. № 6. С. 29–37.

4. Бухаров М.В., Соловьев В.И. Мониторинг осадков осеннего периода по измерениям уходящего теплового излучения Земли со спутника NOAA // Исследование земли из космоса. 2004. № 4. С. 51–57.

5. Волкова Е.В., Успенский А.Б. Детектирование облачности и выделение зон осадков регионального масштаба по данным полярно-орбитальных метеорологических ИСЗ // Метеорология и гидрология. 2002. № 4. С. 28–38.

6. Волкова Е.В., Успенский А.Б. Детектирование облачности и определение её параметров по спутниковым данным в светлое время суток // Метеорология и гидрология. 2007. № 12. С. 5–19.

7. Калинин Н.А., Смирнова А.А. Совместное использование данных радиолокационных и станционных наблюдений для анализа облачных полей // Метеорология и гидрология. 2002. № 8. С. 53–60.

8. Калинин Н.А., Смирнова А.А. Численный анализ данных радиолокационных и станционных измерений облачности // Метеорология и гидрология. 2003. № 7. С. 31–39.

9. Калинин Н.А., Смирнова А.А. Исследование радиолокационных характеристик для распознавания опасных явлений погоды, связанных с кучево-дождевой облачностью // Метеорология и гидрология. 2005. № 1. С. 84–95.

10. Калинин Н.А., Смирнова А.А. Определение водности и водозапаса кучево-дождевой облачности по информации метеорологического радиолокатора // Метеорология и гидрология. 2011. № 2. С. 30–43.

11. Руководство по производству и применению информации с неавтоматизированных радиолокаторов МРЛ-1, МРЛ-2, МРЛ-5. СПб.: Гидрометеиздат, 1993. 358 с.

12. Руководство к прогнозу опасных осадков, града и шквалов по данным метеорологических радиолокаторов и искусственных спутников Земли. СПб.: Гидрометеиздат, 1996.

13. *Толмачева Н.И. Булгакова О.Ю.* Метеорологические радиолокаторы и радионавигационные системы управления воздушным движением / Перм. гос. ун-т. Пермь, 2007. 154 с.

**N.I. Tolmarchyova, L.N. Ermakova**

#### **RESEARCH OF PARAMETERS OF OVERCAST AND THE PHENOMENA ACCORDING TO SATELLITE AND RADAR-TRACKING SOUNDING**

The technique of definition of meteorological parameters with use of remote systems of sounding of atmosphere is developed. Under the satellite information overcast parameters (borders, the areas, volumes), intensity of deposits, liquid water content, a water stock of the clouds, the dangerous phenomena are restored and their changes in time and space are investigated. Methods of the complex analysis of investigated parameters are analysed.

**Key words:** sounding; restoration; the dangerous phenomena; characteristics of clouds; modeling; a radar.

