
**МИНИСТЕРСТВО ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ И ЭКОЛОГИИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды
(Росгидромет)

РУКОВОДЯЩИЙ ДОКУМЕНТ

**РД
52.04.884 —
2020**

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ
СО СПУТНИКА МЕТЕОСАТ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ
ВОЗДЕЙСТВИЙ НА КУЧЕВО-ДОЖДЕВЫЕ ОБЛАКА**

Санкт-Петербург

2021

Предисловие

1 РАЗРАБОТАН Федеральным государственным бюджетным учреждением «Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова» (ФГБУ «ГГО»)

2 РАЗРАБОТЧИКИ А. А. Синькевич д-р техн. наук, (руководитель разработки), Ю. П. Михайловский канд. техн. наук (ответственный исполнитель), Ю. А. Довгалюк канд. физ-мат. наук, Н. Е. Веремей канд. физ-мат. наук, Н. И. Баранова, Е. Я. Богомазова.

3 СОГЛАСОВАН:

- с Федеральным государственным бюджетным учреждением «Научно-производственное объединение “Тайфун”» (ФГБУ «НПО “Тайфун”») 24.11.2020;

- с Управлением геофизического мониторинга, активных воздействий и государственного надзора (УГМАВ) Росгидромета 24.11.2020

4 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЁН В ДЕЙСТВИЕ приказом Росгидромета от 25.11.2020 № 508

5 ЗАРЕГИСТРИРОВАН головной организацией по стандартизации Росгидромета ФГБУ «НПО «Тайфун» 25.11.2020.

ОБОЗНАЧЕНИЕ РУКОВОДЯЩЕГО ДОКУМЕНТА

РД 52.04.884–2020

6 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

7 СРОК ПЕРВОЙ ПРОВЕРКИ 2026 год.

ПЕРИОДИЧНОСТЬ ПРОВЕРКИ 5 лет

Содержание

1 Область применения.....	1
2 Термины, определения и сокращения.....	1
3 Классификация кучево-дождевых облаков.....	2
4 Активные воздействия на кучево-дождевые облака.....	5
5 Порядок оценки эффективности активных воздействий на кучево-дождевые облака.....	8
6 Метеорологические спутники Метеосат.....	11
7 Применение данных зондирования со спутника Метеосат для контроля за результатами активных воздействий на кучево- дождевые облака.....	15
8 Параллельные наблюдения за развитием кучево-дождевых облаков с помощью данных радиометрического зондирования со спутника и радиолокационных измерений.....	22
9 Анализ параллельных наблюдений за развитием кучево- дождевых облаков с помощью данных радиометрического зондирования со спутника и радиолокационных измерений.....	23
Библиография.....	25

РУКОВОДЯЩИЙ ДОКУМЕНТ**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ
СО СПУТНИКА МЕТЕОСАТ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ВОЗДЕЙСТВИЙ
НА КУЧЕВО-ДОЖДЕВЫЕ ОБЛАКА**

Дата введения – 2021–12–01

1 Область применения

Настоящий руководящий документ предназначен для оценки эффективности активных воздействий на кучево-дождевые облака и устанавливает общий порядок и последовательность операций по использованию информации, получаемой со спутников Метеосат второго поколения, для контроля за результатами активных воздействий на кучево-дождевые облака и за их развитием.

Настоящий руководящий документ используется в специализированных организациях по активным воздействиям на метеорологические и другие геофизические процессы и в научно-исследовательских учреждениях Росгидромета, выполняющих работы по воздействиям на кучево-дождевые облака для районов Российской Федерации, попадающих в поле зрения спутников Метеосат.

2 Термины, определения и сокращения

2.1 В настоящем руководящем документе применены термины по [1] с соответствующими определениями.

2.2 В настоящем руководящем документе введены и применены следующие сокращения:

- АВ – активные воздействия;
- ГСО – геостационарная орбита;
- ИУО – искусственное увеличение атмосферных осадков
- ИСЗ – искусственный спутник Земли;

- КА — космический аппарат;
- КЯ — конвективная ячейка;
- ОВ — объект воздействия;
- ПГЗ — противорадовая защита;
- ВТ — радиационная температура;
- ВТД — разница радиационных температур;
- DCS — Data Collection Service – аппаратура сбора данных;
- I — интенсивность осадков в пикселях;
- FCI — Flexible combined Imager – название радиометра;
- GEOS&R — Geostationary Search and Rescue – система сбора информации о бедствиях и определения их места положения;
- GERB — Geostationary Earth Radiation Budget – аппаратура для наблюдения за радиационным балансом Земли;
- LI — Lightning Imager – регистратор молний;
- MSG — Meteosat Second Generation – спутник Метеосат второго поколения;
- MVIRI — Meteosat Visible and Infrared Imager – название радиометра;
- SEVERI — Spinning Enhanced Visible Infra-Red Imager – название радиометра.

3 Классификация кучево-дождевых облаков

3.1 Кучево-дождевые облака развиваются из мощных конвективных облаков, отличаясь от них верхней частью, находящейся на уровне атмосферы с температурой воздуха ниже минус 10 °С и состоящей из ледяных кристаллов, и поэтому имеющей нечёткие границы при наблюдениях в оптическом диапазоне длин волн. Из них выпадают ливневые осадки.

По международной классификации облаков они называются Cumulonimbus (Cb). С этими облаками связаны в ряде случаев шквалистый ветер, грозы, град.

3.2 Кучево-дождевые облака делятся на следующие виды:

а) cumulonimbus calvus (Cb calv.) – «лысые». Вершина этих облаков похожа на округлые белые купола волокнистого строения. Облака более развиты по вертикали, чем мощные кучевые облака. Основания облаков шире, чем остальная их часть. Они не всегда сопровождаются грозой;

б) cumulonimbus calvus arcus (Cb calv. arc.) – «лысые с грозовым валом». Разновидность проявляется образованием в передней части надвигающегося облака тёмного дугообразного облачного вала со шквалом;

в) cumulonimbus capillatus (Cb cap.) – «волосатые». Облака имеют хорошо выраженное волокнистое перистовидное строение верхней части (подобие веера или наковальни при наблюдении сбоку). С этими облаками связаны гроза, град, шквалистый ветер, ливни;

г) cumulonimbus capillatus arcus (Cb cap. arc.) – «волосатые с грозовым валом». Разновидность «волосатых» облаков с грозовым валом, как у описанных выше Cb calv;

д) cumulonimbus incus (Cb inc.) – «с наковальней». Характеризуются растеканием верхней обледеневшей части облака в стороны с формированием огромной наковальни над верхней частью облака. Достигают высоты тропопаузы. Восходящие потоки воздуха не могут преодолеть блокирующий слой изотермии или инверсии, поэтому начинается растекание облака по направлению преобладающего горизонтального потока воздуха. Так формируется наковальня в верхней части облака. Если сильные вертикальные потоки воздуха пробивают слой изотермии, кучево-дождевое облако на своей вершине имеет быстро меняющуюся округлую ледяную вершину (лат. pileus) –

небольшое ледяное облако над кучево-дождевым облаком. Появление pileus – признак господства в атмосфере сильных восходящих потоков при высокой влажности воздуха, ведущих к грозовым явлениям;

е) cumulonimbus humilis (Cb hum) – «плоские». Имеют кучевообразную форму, волокнистую структуру, дают ливневые осадки, но мало развиты по вертикали. Характерны для низкого фона приземной температуры воздуха (от плюс 5 °С до плюс 10 °С и ниже), часто наблюдаются в Арктике и подобных регионах.

3.3 Существуют следующие классы кучево-дождевых облаков:

а) одноячейковые (Ordinary) – мощностью (вертикальной протяжённостью) от 1-2 км (зимой) до 3-4 км (летом), диаметром от 1 до 3 км. С ними связаны кратковременные ливневые осадки, иногда слабые грозы. Это единственный класс кучево-дождевых облаков, которые бывают зимой в умеренных широтах;

б) мультячейковые (Multicell) – состоят из множества ячеек (каждая из которых идентична одноячейковому облаку), слившихся в общее скопление (кластер), у которого формируется единая наковальня сверху. Диаметр такого скопления от 10 до 15 км, толщина от 7 до 10 км. С ними связаны интенсивные ливни, грозы, шквалы, иногда град. Это самый часто наблюдаемый класс кучево-дождевых облаков в средних широтах летом; также встречаются они (но реже) весной и осенью;

в) суперячейковые (Supercell) – представляют собой одну ячейку огромных размеров: диаметр около 50 км, толщина от 10 до 15 км (нередко проникают в стратосферу) с единой полукруглой наковальней. С суперячейкой связана целая система вертикальных и горизонтальных движений воздуха и небольшое барическое возмущение – мезоциклон. Суперячейки обуславливают сильнейшие грозы и ливни, шквалы, град, зачастую торнадо (смерчи). В средних широтах отмечаются крайне

редко, в Российской Федерации наиболее часты в Кавказском регионе. Для формирования суперячейкового облака необходимы:

- очень сильная конвективная неустойчивость воздуха. При этом обычно температура воздуха у земли (до грозы) составляет от плюс 27 °С до плюс 30 °С и выше;

- мощное струйное течение в верхней тропосфере, резкое усиление скорости ветра с высотой и некоторый поворот его. Большие вертикальные сдвиги ветра способствуют завихренности поднимающегося потока и образованию мезоциклона.

Таким образом, для формирования суперячейки благоприятен тёплый сектор циклона недалеко перед холодным фронтом, вблизи оси высотной фронтальной зоны и соответствующего ей струйного течения.

4 Активные воздействия на кучево-дождевые облака

4.1 В теплый сезон года кучево-дождевые облака С_b являются объектами для активных воздействий (АВ) с целью регулирования атмосферных осадков [2], [3]. С точки зрения мезомасштабной организации облачных систем наиболее перспективными для АВ с целью искусственного увеличения атмосферных осадков (ИУО) являются мезомасштабные скопления (кластеры) конвективных облаков, представляющие собой системы объединенных или расположенных близко друг к другу облачных ячеек, либо многовершинные облака, занимающие в плане площади до 600 км² [4], [5].

4.2 В целом, общая пригодность атмосферной ситуации для АВ на облака с целью ИУО определяется сочетанием следующих условий:

- наличие в облаках переохлажденных жидкокапельных зон;
- значения температуры воздуха в переохлажденных объемах облачности не превышают температурный порог активности применяемых для засева реагентов;

– направление и скорость воздушных потоков в облаках и подоблачном слое обеспечивают выпадение осадков из засеваемой облачности на опытную территорию.

4.3 Важнейшим условием пригодности для засева конвективных облаков С_в является их нахождение в стадии развития. В качестве значений параметров таких облаков, определяющих их пригодность для АВ с целью ИУО, принято считать следующие:

- вертикальная мощность облаков, м, не менее3000;
- вертикальная мощность переохлажденной части облаков, м, не менее1000;
- температура на уровне верхней границы облака, °Сот минус 5 до минус 30;
- горизонтальная протяженность облака, м, не менее2000;
- высота нижней границы облака над землей, м, не более..... 2000.

При прочих равных условиях эффект АВ с целью ИУО тем больше, чем больше влагозапас облаков (их водность и вертикальная мощность) и степень их переохлаждения и чем меньше высота нижней границы облачности.

4.4 При АВ на облака, дающие естественные осадки, высота их нижней границы обычно не учитывается как параметр в комплексе критерия пригодности для засева, так как подоблачный слой атмосферы увлажнен естественными осадками, и это исключает потери на испарение искусственно вызванных осадков.

Эффект АВ на облака с целью ИУО оказывается тем больше, чем дольше сохраняются над районом воздействий благоприятные для засева облаков условия.

4.5 Распознавание градовых и градоопасных облаков и оценка степени их градоопасности осуществляется одноволновым и двухволновым радиолокационными методами в соответствии с [6].

Используются показатели градоопасности, признаки наличия крупного града и методы оценки размера и кинетической энергии града.

АВ проводятся на градовые и градоопасные облака, имеющие тенденцию развития и перерастания в градовое состояние, именуемые в дальнейшем объект воздействия (ОВ).

ОВ делятся на 4 категории [6], [7].

ОВ I категории – новая потенциально градоопасная КЯ с максимумом радиоэха в слое от 0 до 5 км над уровнем изотермы 0 °С, имеющая тенденцию развития со скоростями прироста параметров: $dZ_m/dt > 1$ dBZ/мин, $dH_{25}/dt > 0,1$ км/мин, $d\Delta q_m/dt > 0,2$ кг/м²мин, $d\Delta M_{25} > 0$.

ОВ II категории – градоопасная КЯ, имеющая тенденцию развития со скоростями прироста параметров: $dZ_m/dt > 0,5$ dBZ мин, $dH_{35}/dt > 0,1$ км/мин, $d\Delta q_m/dt > 0,2$ кг/м²мин, $d\Delta M_{25} > 0$.

ОВ III категории – градовая КЯ, из которой по радиолокационным данным выпадает град, а ее параметры имеют тенденцию роста или сохранения во времени.

ОВ IV категории – сверхмощная градовая КЯ, из которой, по радиолокационным данным, выпадает град катастрофической интенсивности.

Под тенденцией развития ОВ следует понимать увеличение во времени значений отражаемости $dZ_m/dt > 0$, высоты повышенного радиоэха $dH_{35}/dt > 0$, приведенной $d\Delta q_m/dt > 0$ и интегральной водности ОВ $d\Delta M/dt > 0$, а под тенденцией диссипации – уменьшение этих значений.

Распознавание ОВ различных категорий осуществляется по критериям градоопасности одномерных, двумерных и трехмерных параметров (таблица 1), характеризующим повышенное водосодержание переохлажденной части КЯ и наличие условия для зарождения и роста града. Учет изменения во времени значений

параметров (скорости прироста или убывания параметров) характеризует тенденцию развития ОВ и возможность их перерастания в другие категории градоопасности.

Т а б л и ц а 1 – Критерии распознавания ОВ различных категорий [7]

Категория ОВ	Критерии градоопасности					
I	$0 < \Delta H_{Z_m} < 5$	$15 < Z_m < 45$	$\Delta q_m \geq 0,5$	$\Delta M_{25} > 10^3$	$d\Delta q_m/dt > 0,2$	$d\Delta M_{25} > 0$
II	$\Delta H_{35} > 3$	$Z_m \geq 45$	$\Delta q_m \geq 2$	$\Delta M_{35} > 2 \cdot 10^4$	$d\Delta q_m/dt > 0,2$	$d\Delta M_{35} > 0$
III	$\Delta H_{45} \geq 3$	$Z_m \geq 55$	$\Delta q_m > 8$	$\Delta M_{45} > 2 \cdot 10^4$	-	-
IV	$\Delta H_{45} > 4$	$Z_m > 65$	$\Delta q_m > 16$	$\Delta M_{55} > 2 \cdot 10^5$	-	-

П р и м е ч а н и е – Использованы следующие обозначения параметров и их размерности:

ΔH_{Z_m} , км – высота максимума радиоэха над уровнем изотермы 0 °С H_0 ;

Z_m , dBZ – максимальная отражаемость ОВ на длине волны $\lambda = 10$ см;

ΔH_{25} , ΔH_{35} и ΔH_{45} , км – превышение над уровнем H_0 - высот верхней границы объемов радиоэха с $Z_{10} = 25, 35$ и 45 dBZ, соответственно;

Δq_m , кг/м² – максимальное значение приведенной водности выше уровня H_0 ;

ΔM_{25} , ΔM_{35} , ΔM_{45} и ΔM_{55} , т – интегральная водность объемов радиоэха выше уровня H_0 с $Z_{10} = 25, 35, 45$ и 55 dBZ, соответственно;

$d\Delta q_m/dt$, кг/м²мин – скорость прироста приведенной водности КЯ выше уровня H_0 ;

dM_{25}/dt и dM_{35}/dt , т/мин – скорость прироста во времени интегральной водности объемов радиоэха выше уровня H_0 с $Z_{10} = 25$ и 35 dBZ, соответственно.

5 Порядок оценки эффективности активных воздействий на кучево-дождевые облака

5.1 При проведении работ по защите от града применяются методы оценки эффективности АВ, которые включают в себя:

а) радиолокационные методы оценки эффективности засева градовых и градоопасных облаков в ходе АВ на них с целью принятия решения о прекращении или продолжении АВ;

б) экспресс-оценку предотвращенного ущерба в период противогодовой защиты (ПГЗ) с целью определения величины ущерба, предотвращенного в результате АВ на отдельный градовый процесс;

в) методы оценки физической эффективности ПГЗ за сезон или многолетний период защиты с целью определения степени сокращения потерь от града (на сколько процентов или во сколько раз) в результате проведения ПГЗ;

г) методы оценки экономической эффективности ПГЗ за сезон или многолетний период защиты с целью определения экономической выгоды от проведения ПГЗ, окупаемости и рентабельности ПГЗ;

д) методы оценки статистической значимости достигнутой эффективности, распределения плотности вероятности эффективности и вероятности получения эффективности выше и ниже заданного доверительного уровня.

5.2 Радиолокационную оценку эффективности засева градовых и градоопасных облаков осуществляют по эволюции радиолокационных параметров этих облаков, трансформации структуры радиоэха (площади навеса радиоэха) и временному ходу значений следующих радиолокационных параметров [7]:

а) ΔH_{25} , ΔH_{35} , ΔH_{45} и ΔH_{55} и ΔH_{65} – превышение над уровнем изотермы 0 °С высоты верхней границы объемов радиоэха с радиолокационной отражаемостью Z_{10} равной 25, 35, 45, 55, 65 dBZ соответственно, км, где Z_{10} – отражаемость на длине волны 10 см;

б) Z_m – максимальная радиолокационная отражаемость ОБ, dBZ;

в) Δq – приведенная водность слоя облака выше уровня изотермы 0 °С, кг/м²;

г) ΔM_{35} , ΔM_{45} , ΔM_{55} , ΔM_{65} – интегральная водность объемов облака выше уровня изотермы 0°C с отражаемостью Z_{10} равной 35, 45, 55, 65 dBZ, соответственно, т.

5.3 Прекращение выпадения града, уменьшение объёма градового очага, размера и кинетической энергии града определяют по исчезновению изолиний радиолокационной отражаемости Z_{10} равному 55 dBZ и Z_{10} равному 65 dBZ, соответствующей зоне локализации града, а также временному ходу следующих параметров:

а) ΔV_{45} , ΔV_{55} , ΔV_{65} – объемы радиоэха облака выше уровня изотермы 0°C с отражаемостью Z_{10} равной 45, 55 и 65 dBZ, соответственно, км^3 ;

б) ΔM_{45} , ΔM_{55} , ΔM_{65} – интегральная водность объемов облака выше уровня изотермы 0°C с отражаемостью Z_{10} равной 45, 55 и 65 dBZ, соответственно, т;

в) d_m – максимальный размер града в облаке, см;

г) E – поток кинетической энергии града, $\text{Дж}/(\text{м}^2 \times \text{с})$.

Оценку эффективности засева ОБ разных категорий осуществляют дифференцировано по признакам, характерным для каждой категории засеянных ОБ [7]:

а) засев ОБ I категории считают успешным и прекращают, если через два цикла обзора после однократного засева отмечается тенденция диссипации, выражающаяся в размывании радиоэха ОБ, уменьшении площади и высоты повышенного радиоэха до $\Delta H_{35} < 2$ км, уменьшении приведенной водности до $\Delta q_m < 0,5$ $\text{кг}/\text{м}^2$ и максимальной отражаемости до $Z_m < 35$ dBZ;

б) засев ОБ II категории считают успешным и прекращают, если через два цикла обзора после двукратного засева отмечается тенденция диссипации, выражающаяся в уменьшении параметров ОБ

до следующих критериальных значений: $Z_m < 45$ dBZ; $\Delta H_{45} < 2$ км или $\Delta q_m < 2$ кг/м²; $\Delta M_{35} < 10^4$ т;

в) засев ОБ III и IV категорий считают успешным и прекращают при достижении через один цикл обзора после трех- и четырехкратного засева, соответственно, следующих эффектов:

1) исчезновение навеса радиоэха и характерной упорядоченной структуры радиоэха суперячейки или градообразующей ячейки многоячейкового градового процесса;

2) прекращение выпадения града, определяемое по исчезновению на двухуровневом сечении изолиний радиоэха $Z_{10} = 65$ и 55 dBZ, а также исчезновению града на картах размера d_m и потока кинетической энергии E града;

3) уменьшение параметров ОБ до критериальных значений: $\Delta H_{45} \leq 2$ км; $Z_m \leq 55$ dBZ или $\Delta q_m < 4$ кг/м²; $\Delta M_{55} = \Delta M_{65} = 0$, $\Delta M_{45} \leq 10^4$ т; $E \leq 0,1$ Дж/м² с.

АВ на ОБ III и IV категории можно считать положительным, если достигнуто уменьшение ширины полосы выпадения града, размера и кинетической энергии града, категории ОБ, разделение ОБ IV категории на два или несколько ОБ II и III категории.

6 Метеорологические спутники Метеосат

6.1 Европейские ИСЗ Метеосат используются для метеорологических наблюдений с 1977 года. Изначально использовались спутники Метеосат 1-7. Это спутники первого поколения, на которые был установлен радиометр MVIRI. Излучение измерялось в трех спектральных диапазонах: видимом, в канале водяного пара и окне прозрачности в ИК-диапазоне спектра. Работа спутников первого поколения была прекращена 31 марта 2017 года. Далее использовались спутники второго поколения.

6.2 Метеосат-8, 9, 10, 11 – европейские метеорологические спутники второго поколения MSG, которые применяются в настоящее время для метеорологических наблюдений [8]. Они располагаются на ГСО около 36000 км над экватором, спутники Метеосат-8, 9, 10 и 11 работают над Европой, Африкой и Азией.

Метеосат-8 MSG-1 – запущен в 2002 году. Он был установлен на позицию 41,5 градусов восточной долготы. Выполняет съемку всего диска планеты Земля каждые 15 минут.

Метеосат-9 MSG-2 – запущен в 2005 году. Работает на позиции 3,5 градуса восточной долготы, обеспечивает быстрое сканирование (каждые 5 минут) территории Европы, Африки и выполняет съемку всего диска планеты Земля.

Метеосат-10 MSG-3 – запущен в 2012 году. Работает в позиции 9,5 градуса восточной долготы, обеспечивает быстрое сканирование (каждые 5 минут) территории Европы, Африки и прилегающих морей.

Метеосат-11 MSG-4 – запущен в июне 2015. Работает на позиции 0 градусов. Выполняет съемку всего диска планеты Земля каждые 15 минут.

6.3 В качестве полезной нагрузки на борту КА установлены:

а) DCS – аппаратура сбора данных;

б) GEOS&R (Geostationary Search and Rescue) – система сбора информации о чрезвычайных ситуациях и определения их места положения;

в) GERB (Geostationary Earth Radiation Budget) аппаратура для наблюдения за радиационным балансом Земли. Аппаратура массой 25 кг способна каждые 5 минут делать снимок Земли с разрешением в 42 км. Скорость передачи данных 50,6 кбит;

г) SEVIRI (Spinning Enhanced Visible Infra-Red Imager) – оптический сканер, работающий в 12 спектральных каналах. Радиометр SEVIRI,

установленный на спутниках MSG, позволяет получать изображения поверхности Земли каждые 5 MSG-3 и 15 минут MSG-1,2,4. Канал высокого разрешения в видимом диапазоне имеет разрешающую способность (в подспутниковой точке над низкими широтами) 1 км, остальные каналы – 3 км. Характеристики каналов представлены в таблице 2. Спутники располагаются на долготе 0° MSG-4, 3,5° MSG-2, 9,5° MSG-3 и 41,5° MSG-1. Сканер весит около 260 кг. Скорость передачи данных 3,26 Мбит/с.

6.4 Для контроля за результатами воздействий на кучево-дождевые облака используются результаты измерений с помощью радиометра SEVERI, характеристики которого приведены ниже.

Т а б л и ц а 2 – Описание каналов радиометра SEVERI спутников MSG

Канал	Маркировка (цифры – длина волны), мкм	Разрешение в точке под спутником, км	Диапазон/ характеристика	Характерное применение
1	2	3	4	5
Ch 01	VIS 0,6	3	Видимый канал	Поверхность Земли, облачность, поле ветра
Ch 02	VIS 0,8	3	Видимый	Поверхность Земли, облачность, поле ветра
Ch 03	NIR 1,6	3	Ближний инфракрасный канал	Поверхность Земли, фазовое состояние облачных элементов
Ch 04	IR 3,9	3	Инфракрасный	Поверхность Земли, облачность, поле ветра, обнаружение туманов ночью, пожары

Окончание таблицы 2

1	2	3	4	5
Ch 05	WV 6,2	3	Канал водяного пара	Водяной пар, облачность верхнего яруса, неустойчивость атмосферы
Ch 06	WV 7,3	3	Канал водяного пара	Водяной пар, неустойчивость атмосферы
Ch 07	IR 8,7	3	Инфракрасный канал	Поверхность Земли, облачность, неустойчивость
Ch 08	IR 9,7	3	Инфракрасный	Озон
Ch 09	IR 10,8	3	Инфракрасный	Поверхность Земли, облачность, поле ветра, неустойчивость
Ch 10	IR 12,0	3	Инфракрасный	Поверхность Земли, облачность
Ch 11	IR 13,4	3	Инфракрасный	Высота облаков верхнего яруса, неустойчивость
Ch 12	HRV (0,4 – 1,1)	1	Видимый, высокого разрешения	Поверхность Земли, облачность

6.5 Следующее поколение спутников – это спутники третьего поколения. Планируется запуск 6 спутников, которые будут располагаться на геостационарной орбите. Начало запусков планируется на 2021 год.

Четыре из этих спутников будут оборудованы радиометрами Flexible combined Imager (FCI) и регистратором молний Lightning Imager (LI). Прибор FCI имеет 16 спектральных каналов. Период обзора – 10 мин. Кроме того, планируется применение этого прибора для быстрого сканирования четверти диска (Европы) с периодом – 2,5 мин. Регистратор молний LI должен обеспечивать измерение разрядов с периодом – 30 с.

На два спутника будут установлены спектрометры Ultraviolet Visible Near-infrared и интерферометры Infrared Sounder . Указанная аппаратура должна обеспечить измерения водяного пара и температуры в средней части атмосферы и уровня загрязнения.

7 Применение данных зондирования со спутника Метеосат для контроля за результатами активных воздействий на кучево-дождевые облака

7.1 В качестве исходных данных следует использовать результаты измерений, полученные радиометром SEVERI, установленным на геостационарном спутнике Метеосат MSG. Выбор спутника определяется местом проведения воздействий. Для европейской части страны возможно использовать данные зондирования со всех спутников Метеосат. Однако предпочтительными для ЕТР являются данные спутников: Метеосат-8, расположенного на долготе 41,5 градуса (т.е. практически под минимальными углами к большей части ЕТР), имеющего 15-минутный режим сканирования, а также спутника Метеосат-10 (9,5 градуса восточной долготы), который имеет режим быстрого сканирования RSS – 5 минут для территории Европы (а также и ЕТР), Африки и прилегающих морей. В последнем случае реализуется методика обзора, когда происходит сканирование не по всему диску Земли, а охватывается примерно его 1/3, т.е. измерения осуществляются в секторе: восточная долгота от 65 до 84 градусов и по широте от 16 до 70 градусов. Такое сканирование увеличило частоту обзора пространства, период обзора составляет для спутника Метеосат-10 – 5 мин. Это значение периода обзора обычно соответствует периоду поступления радиолокационной информации, что является несомненным достоинством.

В этой связи при контроле результатов воздействий предпочтительней использовать данные зондирования, получаемые со спутника, установленного в точку по долготе 9,5 градуса (Метеосат-10), в случае, если изучаемое облако попадает в сектор обзора данного спутника.

7.2 По известным координатам расположения облаков, на которые проводятся воздействия, определяется область пространства, где осуществляется анализ результатов зондирования со спутника Метеосат. Размеры этой области должны превосходить горизонтальные размеры анализируемого облака в 2-3 раза. Следует указать на то, что не при всех метеорологических ситуациях удастся выделить изучаемое облако из поля облаков. Обычно, надежное выделение облака возможно, если оно достаточно развито по вертикали, его верхняя граница превосходит высоту 6-8 км (для территории Российской Федерации). При этом должны отсутствовать оптически плотные облака верхнего яруса. В противном случае, получение характеристик кучево-дождевого облака возможно с момента, когда оно переходит в зрелую стадию развития, его верхняя граница достигает уровня тропопаузы, а радиационная температура в канале 10,8 ($BT_{10,8}$) становится меньше, чем температура окружающих облаков верхнего яруса [9], [10].

Входными данными для анализа развития кучево-дождевого облака является радиационная температура пикселей (BT), полученная в каналах 10,8 ($BT_{10,8}$) и 6,2 ($BT_{6,2}$) мкм. С использованием данных измерений $BT_{10,8}$ строится поле температуры для выбранной части пространства для каждого скана зондирования в период существования облака. Выделяется область пространства, где радиационная температура не более минус 40 °С, что соответствует верхней части облаков (наковальне). С использованием данных измерений $BT_{10,8}$ и $BT_{6,2}$ для выбранной области расположения вершины исследуемого

облака, применяя технологию расщепления (split-window technique), определяется положение вершины облака (номер пикселя). Положение данного пикселя определяют по разности радиационных температур пикселей, соответствующих исследуемому облаку, в каналах радиометра 6,2 и 10,8 мкм, и далее находится ее максимальное значение $\max dif$ равное разности $BT_{6,2}$ и $BT_{10,8}$.

Положение пикселя с максимумом этой разницы принимается за положение вершины облака. Радиационная температура данного пикселя, полученная в окне прозрачности с центром 10,8 мкм, используется для определения высоты верхней границы облака $H_{top(sat)}$. Учитывая, что слой облака, формирующий излучение черного тела, составляет в большинстве случаев от нескольких десятков до сотен метров для таких облаков [11], то можно полагать, что фактическая температура вершины облака несколько ниже. С использованием результатов измерений распределения температуры по данным радиозондирования по указанной температуре определяется высота верхней границы облака $H_{top(sat)}$. При этом используются результаты ближайшего по пространству и времени радиозондирования. Можно использовать также и модельные данные о распределении температуры с высотой, имеющие обычно небольшую погрешность по сравнению с фактическими данными, однако доступные для любой точки пространства.

Площадь облака измеряется по уровню выбранной изотермы. Для определения геометрических размеров наковальни и вершины хорошо развитого S_b в качестве изотермы рекомендуется температура минус 40 °С. Это соответствует уровню гомогенной кристаллизации. Для более детального изучения характеристик облака могут использоваться изотермы 0 °С и минус 10 °С. Большие значения температуры не рекомендуются, т.к. в этом случае к изучаемому облаку могут быть

отнесены облака, примыкающие к исследуемому, это могут быть и поля слоистообразных облаков. В каждом конкретном случае с учетом результатов радиационных измерений осуществляется выбор соответствующей изотермы. Величина этой изотермы должна приводиться в документе, описывающем развитие облака. Геометрический размер облака (наковальни) определяется путем расчета количества пикселей, имеющих температуру ниже температуры выбранной изотермы и относящихся к облаку, и умножением соответствующего количества на площадь пикселя. Учитывая, что размер пикселя зависит от географических координат расположения облака, эту величину в каждом конкретном случае следует выбирать для конкретного района [9], [12]. При этом следует иметь в виду, что данная величина является оценкой геометрических размеров облака и может существенно отличаться от данных радиолокационных измерений.

7.3 Использование нескольких диапазонов измерений радиометром SEVERI позволяет получать информацию о фазовом составе облака. В частности, при использовании параметрической схемы [10], можно выделять пиксели с преимущественно кристаллической фракцией, смешанной, капельной, а также с неопределенной фракцией. Микрофизические характеристики облака получают с использованием информации из следующих двух каналов: 8,7 мкм и 10,8 мкм. При этом для получения информации о фазовом составе облака используется параметрическая схема, приведенная в таблице 3.

Т а б л и ц а 3 – Параметрическая схема получения данных о фазовом составе облака

Фракция	Алгоритм определения фракции
Вода	$BT_{10,8} > 238 \text{ K}$ и $BTD < 0,5$ или $BT_{10,8} \geq 285 \text{ K}$ и $BTD \leq 0,0 \text{ K}$
Лед	$BT_{10,8} \leq 238 \text{ K}$ и $BTD > 1,5 \text{ K}$
Смешанная фракция	$238 \text{ K} < BT_{10,8} < 268 \text{ K}$ и $0,25 \text{ K} \leq BTD < 1,0 \text{ K}$
Фракция не определена	$238 \text{ K} < BT_{10,8} < 268 \text{ K}$ и $-0,5 \text{ K} < BTD < 0,25 \text{ K}$

П р и м е ч а н и е – BTD – разница радиационных температур в двух каналах 8,7 и 10,8 мкм, а $BT_{10,8}$ - радиационная температура в канале 10,8 мкм.

7.4 Для анализа размера ледяных частиц на верхней границе облака можно также использовать и технологию RGB Convective Storm, в которой используется шесть каналов (три разности) MSG (красный цвет равен разности $BT_{6,2}$ и $BT_{7,3}$, зеленый цвет равен разности $BT_{3,9}$ и $BT_{10,8}$, синий цвет равен разности NIR1.6 и VIS0.6), основная информация поступает из компонента зеленого цвета. Наличие мелких кристаллов на верхней границе облака может сигнализировать о сильных восходящих потоках, а значит и о возможности развития сильных ливней, крупного града, а также других опасных конвективных явлений (шквала, смерча и т.д.).

7.5 Интенсивность осадков из исследуемого облака оценивается по регрессионным соотношениям между температурой $T_{top(sat)}$, соответствующей пикселю вершины облака, и интенсивностью осадков. Эти регрессионные соотношения должны быть получены применительно к исследуемому району и сезону. Для оценок интенсивности осадков могут применяться соотношения, приведенные в [9].

Два корреляционных соотношения могут быть использованы для оценок интенсивности осадков. Первое применяется агентством "METEOSAT" для оценки осадков (I_M) в глобальном масштабе и дает

среднее значение интенсивности осадков по пикселю, второе (I_{MV}) было получено при исследовании облака с катастрофическими осадками [10] и соответствует максимальной интенсивности осадков в пикселе.

$$I_M = 3,524 \cdot 10^{13} \exp(-0,133 \cdot BT_{10,8}), \quad (1)$$

$$I_{MV} = 4,4065 \cdot 10^{11} \exp(-0,1019 \cdot BT_{10,8}). \quad (2)$$

Агентством “METEOSAT” распространяется информация об осадках, которая может непосредственно быть использована при оценке эффективности воздействий [10]. Она базируется на данных, получаемых со спутников Метеосат. Результаты этих измерений калибруются с использованием полярно-орбитальных спутников, оснащенных микроволновыми радиометрами, позволяющими измерять интенсивность осадков. Данные представляют собой интенсивность осадков в пикселях (I). Для Европейской территории России такая информация поставляется с периодом в 5 минут.

С использованием данных измерений I строится поле осадков для выбранной части пространства для каждого скана зондирования в период существования облака. Выделяется область пространства, соответствующая исследуемому облаку (осадкам из исследуемого облака). По полученным данным определяется пиксель с максимальной интенсивностью осадков и соответствующая интенсивность осадков I_{\max} . Определяется поток осадков F , ($\text{м}^3/\text{с}$), из облака по формуле

$$F = 0,28 \cdot \sum_i^N I_i \cdot S_i \quad (3)$$

где I_i мм/ч – интенсивность осадков в i пикселе, относящемся к облаку;

S_i – площадь соответствующего пикселя, км^2 .

Определяется общее количество осадков, выпавшее из облака по формуле

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} F(t)dt, \quad (4)$$

где Q – общее количество осадков из облака, м³;

t_2 минус t_1 – время жизни облака, с.

Для оценки интенсивности конвективных осадков разработан также алгоритм CRR (Convective Rainfall Rate) SAFNWC, основанный на использовании данных каналов MSG в комбинации с модельными данными и статистическими данными верификации над территорией Европы. Выходные данные алгоритма по данным тестирования хорошо согласуются с радиолокационными данными и могут быть использованы во время работ по активным воздействиям.

При анализе результатов воздействий необходимо учитывать, что получаемые данные об осадках, базирующиеся на радиометрических измерениях, носят оценочный характер.

7.6 Радиометр SEVERI в дневное время позволяет получать изображение облака, что важно при интерпретации результатов воздействий. При этом следует иметь в виду, что изображение искажено из-за деформации геометрических размеров пикселей и явления параллакса [13].

Для получения изображения облаков следует использовать канал визуального изображения или канал высокого разрешения, последний дает существенно лучшее качество изображения.

Для дальнейшего анализа используется высота верхней границы облака $H_{\text{top(sat)}}$ и геометрические размеры верхней части облака (наковальни). Строятся графики зависимостей полученных характеристик от времени для всего периода существования облака.

Аналогичным образом строятся зависимости фазового состава облака и характеристик осадков от времени. Выделяются сканы непосредственно перед проведением воздействий и сразу после воздействий, определяется влияние проведенных воздействий на характеристики облака по изменению характеристик, отмеченных выше.

8 Параллельные наблюдения за развитием кучево-дождевых облаков с помощью данных радиометрического зондирования со спутника и радиолокационных измерений

8.1 Радиолокационные данные традиционно являются одним из видов информации, которая применяется для оценки эффективности воздействий. Современные радиолокаторы обеспечивают обзор пространства с периодом 5-10 минут и чаще. Спутник Метеосат, расположенный в позиции 9,5 градуса восточной долготы, также обеспечивает обзор выбранных областей пространства (в основном Европа) с периодом 5 минут, поэтому имеется возможность сопоставления данных параллельных измерений. Сопоставление данных должно включать оценку высоты верхней границы облака, а также площади облака. Радиометрические измерения в отдельных случаях обеспечивают более раннее обнаружение облаков по сравнению со стандартными радиолокационными измерениями [10].

8.2 В период максимального развития конвективного облака при больших значениях отражаемости (обычно более 55 dBZ) оценки высоты вершины по данным радиометрических измерений являются более надежными, это связано с погрешностями определения высоты верхней границы облака радиолокатором за счет влияния боковых лепестков диаграммы направленности антенны (здесь погрешность

радиолокационных измерений может достигать нескольких километров) [10]. В период разрушения облака (наковальни кучево-дождевого облака) погрешности радиометрических оценок высоты вершины возрастают вследствие увеличения прозрачности облака. Оценку площади облака (наковальни) предпочтительней проводить на зрелой стадии развития и до разрушения по радиометрическим измерениям. Это связано с тем, что отражаемость верхней части облака (наковальни) обычно мала, и радиолокатор не позволяет с достаточной степенью точности определять геометрические размеры наковальни.

Оба вида измерений косвенно определяют интенсивность осадков. Надо полагать, что радиолокационные оценки в целом лучше, однако при наличии крупных облачных частиц погрешности резко возрастают, поэтому совместное использование обоих методов обеспечивает взаимный контроль.

9 Анализ параллельных наблюдений за развитием кучево-дождевых облаков с помощью данных радиометрического зондирования со спутника и радиолокационных измерений

Использование всего объема информации, который доступен из анализа радиолокационных измерений и радиометрических измерений, обеспечивает более полное получение характеристик облака в процессе его развития. В качестве основного метода анализа данных следует использовать метод, основанный на изучении временного тренда характеристик облака. В соответствии с принятыми гипотезами воздействий, они должны приводить к изменениям в характеристиках облаков, которые следует фиксировать с использованием радиометрических и радиолокационных измерений.

На выявление этих изменений должен быть направлен соответствующий анализ данных [9], [12].

Для анализа эффективности воздействий могут использоваться другие разработанные методы, основанные на статистическом анализе изменений характеристик облаков в результате воздействий. Результаты измерений характеристик облаков, полученные по данным радиометрических измерений радиометром SEVERI, установленным на спутнике, должны анализироваться параллельно с результатами радиолокационных измерений.

Библиография

- [1] Руководящий документ Термины и определения в области активных воздействий на гидрометеорологические процессы и явления РД 52.11.850–2016
- [2] Берюлев Г.П. и др. Оценка эффективности воздействий и количества дополнительных осадков из конвективных облаков // Метеорология и гидрология. – 1995. – № 4. – С. 66-86.
- [3] Корниенко Е.Е. Результаты эксперимента по воздействию на кучево-дождевые облака с целью искусственного регулирования осадков // Тр. УкрНИГМИ. – 1982. – Вып.187. – С.3-26.
- [4] Краус Т.В., Шоу В., Синькевич А.А., Макитов В.С. Воздействия на облака в Индии, физическая и статистическая оценка результатов // Метеорология и гидрология. – 2006. – № 7. – С. 24-33.
- [5] Методические указания проведения работ по искусственному регулированию осадков из конвективных облаков самолетными средствами воздействия – М.: ЦАО. – 1988. – 29 с.
- [6] Абшаев А.М., Абшаев М.Т., Барекова М.В., Малкарова А.М. Руководство по организации и проведению противогорадовых работ – Нальчик: Изд. Печатный двор. – 2014. – 508 с.
- [7] Абшаев М.Т., Малкарова А.М. Оценка эффективности предотвращения града. – Санкт-Петербург: Изд. Гидрометеоиздат. – 2006. – 279 с.
- [8] Волкова Е.В., Успенский А.Б. Оценки параметров облачного покрова по данным геостационарного МИСЗ Meteosat-9 круглосуточно в автоматическом режиме // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2010. – Т. 7. – № 3. – С. 16-22.
- [9] Синькевич А.А., Краус Т.В., Гхулам А.С., Куров А.Б. Исследование характеристик кучево-дождевых облаков большой мощности после

воздействий с целью увеличения осадков // Метеорология и гидрология. – 2013. – № 9. – С. 5-20.

- [10] Синькевич А.А., Михайловский Ю.П., Довгалюк Ю.А., Веремей Н.Е., Богданов Е.В., Аджиев А.Х., Малкарова А.М., Абшаев А.М. Исследования развития грозо-градового облака. Часть 1. Развитие облака и формирование электрических разрядов // Метеорология и гидрология. – 2016. – № 9. – С. 27-40.
- [11] Руднева Л.Б., Синькевич А.А. Оценка геометрической толщины слоя, формирующего излучение черного тела в облаках различных форм – Тр. ГГО. – 1981. Вып. 448. – С. 76-85.
- [12] Краус Т.В., Синькевич А.А., Бургер Р., Веремей Н.Е., Довгалюк Ю.А., Степаненко В.Д. Исследование влияния динамических факторов на развития кучево-дождевого облака в Саудовской Аравии // Метеорология и гидрология. – 2011. – № 10. – С. 5-19.
- [13] Краус Т.В., Синькевич А.А., Веремей Н.Е., Довгалюк Ю.А., Макитов В.С., Степаненко В.Д. Комплексное исследование характеристик кучево-дождевого облака, развивавшегося над Аравийским полуостровом в условиях большого дефицита точки росы в атмосфере. Часть 1. Натурные наблюдения и численное моделирование // Метеорология и гидрология. – 2011. – № 2. С. 44-59.

Ключевые слова: спутник, радиометр, пиксель, облако, воздействие

Лист регистрации изменений

Поряд- ковый номер из- менения	Номер страницы				Номер ре- гистрации изменения в ГОС, дата	Подпись	Дата	
	изме- нен- ной	заме- нен- ной	но- вой	аннули- рованной			вне- сения изм.	вве- дения изм.

Подписано в печать 24.02.2021.
Формат 60×84 1/16. Гарнитура Times New Roman. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 0,93. Тираж 140 экз. Заказ № 722-21/24021.

Отпечатано в соответствии с предоставленными материалами
в ООО «Амирит», 410004, г. Саратов, ул. Чернышевского, 88.

Тел.: 8-800-700-86-33 | (845-2) 24-86-33

E-mail: zakaz@amirit.ru

Сайт: amirit.ru