

# ОЦЕНКА МАКСИМАЛЬНОЙ СКОРОСТИ КОНВЕКТИВНОГО ПОТОКА, ХАРАКТЕРИСТИК ЛИВНЕВЫХ ОСАДКОВ И ГРАДА ПО РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ

*А.А. Алексеева, Б.Е. Песков*

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр  
Российской Федерации  
alekseeva@metcom.ru*

## **Введение**

Метеорологические радиолокаторы (МРЛ) являются уникальным средством наблюдений, позволяющим в режиме реального времени получать информацию о расположении и интенсивности зон активной конвекции и связанных с ними опасных конвективных явлений погоды. Создаваемая в России сеть доплеровских метеорологических радиолокаторов (ДМРЛ-С) предназначена для проведения непрерывных наблюдений в составе радиолокационной сети Росгидромета по единому регламенту с использованием одного программного обеспечения. В некогерентном режиме измерений («Отражаемость») принцип действия ДМРЛ-С и локаторов типа МРЛ-2 и МРЛ-5 совпадает: радиус обнаружения опасных явлений погоды близок к радиусу некогерентных МРЛ, одинаков также и перечень конечных радиолокационных продуктов.

На этапе активного освоения ДМРЛ-С метеорологические продукты, генерируемые ими, проходят валидацию, разрабатываются методические рекомендации по их использованию в синоптической практике [2]. Учитывая опыт диагноза и прогноза опасных конвективных явлений погоды по данным метеорологических радиолокаторов типа МРЛ-2 [12], можно оценить максимальную скорость конвективного потока, интенсивность и накопленное количество ливневых осадков за любой промежуток времени,

выпадение и размер града на подстилающую поверхность по информации ДМРЛ-С. Поэтому исследования по усовершенствованию методов диагноза конвективных явлений, адаптации зарекомендованных на практике расчетных методов, использующих информацию некогерентных локаторов, к информации ДМРЛ-С являются актуальными и значимыми для практики.

### **Используемые данные**

Для исследования использованы следующие виды данных:

1) радиолокационная информация:

– максимальная радиолокационная отражаемость радиолокатора МРЛ-2 ( $\lg Z_m$ );

– максимальная радиолокационная отражаемость ДМРЛ-С ( $dBZ_m$ ,  $dBZ$ ).

Для перевода радиолокационной отражаемости  $\lg Z_m$ , выраженной через радиус частиц, в  $dBZ_m$  используется соотношение [2]:

$$dBZ_m = 10 \lg Z_m + 18; \quad (1)$$

– высота верхней границы радиозаха кучево-дождевых облаков ( $H_m$ , км);

2) проконтролированные макеты данных фактического радиозондирования атмосферы в пунктах из базы данных Гидрометцентра России на Европейской территории России.

### ***Расчет максимальной скорости конвективного потока по радиолокационным данным***

Наличие положительной энергии неустойчивости [9, 14] является характеристикой состояния атмосферы, указывающей на возможность развития и интенсивность мощной («глубокой») конвекции, а также интенсивность восходящих конвективных потоков, вертикального переноса насыщенной массы воздуха, конденсации водяных паров, образования зон аккумуляции осадков. Использование радиолокационных данных позволяет обнаруживать без расчета модели конвекции кучево-дождевые облака, с которыми связано возникновение опасных конвективных явлений.

Из исследований по использованию данных МРЛ [1, 3–6, 12, 14] известно, что существует связь между количественными характеристиками конвективной неустойчивости и радиолокационными параметрами облака. Установлено, что наиболее тесно с характеристиками неустойчивости атмосферы связаны такие радиолокационные параметры, как  $Hm$  и  $\lg Zm$ .

Согласно [12], максимальная конвективная скорость  $Wm_{МРЛ}$  (м/с) может быть оценена по данным МРЛ, используя произведение  $Hm$  и  $\lg Zm$ :

$$Wm_{МРЛ} = 0,38 Hm \lg Zm + 3,52. \quad (2)$$

Максимальная конвективная скорость по данным ДМРЛ-С с учетом (1) и (2) рассчитывается по формуле:

$$Wm_{ДМРЛ-С} = 0,038 Hm (dBZm - 18) + 3,52. \quad (3)$$

В [2] показано, что кучево-дождевым облакам соответствует отражаемость ДМРЛ-С 10–15 dBZ и более.

В [1] получено уравнение регрессии между максимальной конвективной скоростью  $Wm$ , рассчитываемой по данным радиозондирования атмосферы по методу Н.И. Глушковой [11], и  $Wm_{МРЛ}$ , рассчитываемой по данным МРЛ:

$$Wm = 1,33 Wm_{МРЛ} + 4,0. \quad (4)$$

С учетом (4) выражение (3) для расчета максимальной конвективной скорости по данным ДМРЛ-С преобразуется:

$$Wm = 1,33 [0,038 Hm (dBZm - 18) + 3,52] + 4,0. \quad (5)$$

**Методы диагностики образования града в облаке  
и выпадения его на подстилающую поверхность  
по радиолокационным данным**

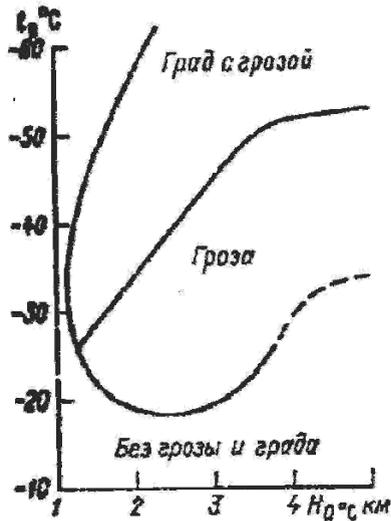
Согласно [7], вероятность определения погоды с градом по данным МРЛ составляет всего 54 % и совпадает с вероятностью определения ее по данным средней плотности сети с учетом всех метеорологических станций и постов. Столь низкую вероятность

определения погоды с градом по данным МРЛ можно объяснить двумя причинами: а) град плохо обнаруживается сетью станций наблюдений, в т. ч. со сравнительно высокой плотностью (как, например, в Москве и Московской области); б) радиолокационный метод позволяет определять град только в облаке. Результаты по валидации диагностики града ДМРЛ-С пока нет. Наши исследования направлены на улучшение методики распознавания погоды с градом по радиолокационным данным сети ДМРЛ-С.

Для образования града в облаке необходимо, чтобы его верхняя граница достигла уровня естественной кристаллизации. Кроме того, его образование определяется соотношением между переохлажденной частью облака и теплой, что обуславливает нужную концентрацию зародышей града в облаке [12].

В Руководстве [10] описан метод прогноза гроз и града Н.И. Глушковой и В.Ф. Лапчевой, основанный на зависимости условий возникновения гроз и града от температуры на верхней границе радиоэха от кучево-дождевого облака ( $t_g$ ) и высоты изотермы  $0^\circ\text{C}$  ( $H_0$ ) над подстилающей поверхностью. Прогнозирование гроз и града осуществляется графическим способом (рис. 1).

Демаркационные линии на рисунке разделяют области «без грозы и града», «гроза», «град с грозой». Представленные кривые трудно описать математически, что затрудняет автоматизацию метода. Отметим, что температура на верхней границе радиоэха от кучево-дождевого облака радиолокационным способом не определяется, а высота нулевой изотермы определяется только при наличии радиоэха обложных осадков. Одной из особенностей такого радиоэха является наличие на вертикальном профиле «яркой полосы» – зоны повышенной (на 5–10 dBZ) отражаемости толщиной порядка 300–500 м, располагающейся немного ниже уровня нулевой изотермы [2]. «Яркая полоса» возникает в районе нулевой изотермы при переходе частиц осадков из твердой фазы в жидкую, при этом сначала в присутствии капель воды происходит слипание отдельных снежинок в снежные хлопья, которые имеют существенно больший размер по сравнению со снежинками и дождевыми каплями.



**Рис. Связь условий возникновения гроз и града с температурой воздуха на верхней границе радиозаха и высотой изотермы 0 °C [10].**

В настоящее время рекомендуется использовать значения  $t_e$  и  $H_0$  из прогнозов современных мезомасштабных моделей атмосферы.

Нами ставилась цель разработать метод автоматизированной диагностики града, выпадающего на подстилающую поверхность.

Используя параметры атмосферы  $t_e$  и  $H_0$ , аналогично методу прогнозирования грозы и града [10], сделана попытка получения линейной разделяющей функции  $L$ . Использованы аэрологические и радиолокационные данные за теплые периоды (май-сентябрь) 1976 и 1979–1981 годов.

По данным радиолокационных наблюдений определялась верхняя граница радиозаха от кучево-дождевого облака  $H_m$ , а по данным радиозондирования атмосферы в ближайшем по времени и расстоянию пункте — температура на этой высоте и высота изотермы 0 °C над подстилающей поверхностью.

В результате исследования получена разделяющая функция

$$L = -0,064 t_g - 1,061 H_0 - 0,0064, \quad (6)$$

где  $t_g$  – температура на высоте  $Hm$ ;  $H_0$  – высота изотермы  $0^\circ\text{C}$ .

Рассчитанные по (6) величины  $L > 0$  указывают на возможность выпадения града на подстилающую поверхность. Показатели качества диагностики выпадения града на подстилающую поверхность на зависимой выборке представлены в табл. 1. Как видно, разделяющая функция (6) уже на зависимой выборке с недостаточной точностью разделяет случаи с градом и без града. Повидимому, случаи отсутствия града в зоне «диагностируется град» могут быть объяснены его таянием при падении через теплую часть облака. Сделан вывод, что для диагностики выпадения града на подстилающую поверхность недостаточно учитывать лишь указанные выше параметры.

Известно, что размер града связан с величиной максимальной конвективной скорости  $Wm$  [14], которую можно рассчитать по произведению радиолокационных параметров согласно (2) [12].

Для диагностики выпадения града на подстилающую поверхность, учитывая сказанное выше, получена зависимость с новыми характеристиками:

$$L_1 = -1,619 H_0 + 0,158 Hm \lg Zm + 0,6. \quad (7)$$

Как и  $L(6)$ , величины  $L_1 > 0$  используются для оценки возможности выпадения града на подстилающую поверхность. Показатели качества диагностики выпадения града на подстилающую поверхность по формуле (7) на зависимой выборке представлены в табл. 1.

Рассмотрен также вариант разделения случаев с градом и без града по трем параметрам. Разделяющая функция имеет вид:

$$L_2 = -0,039 t_g - 1,877 H_0 + 0,147 Hm \lg Zm - 0,139. \quad (8)$$

При  $L_2 > 0$  диагностируется выпадение града на поверхность Земли. Показатели качества диагностики выпадения града на подстилающую поверхность по формуле (8) на зависимой выборке представлены в табл. 1. Как можно судить по результатам

оценки, добавление третьего параметра к предыдущим двум несколько ухудшило все показатели оправдываемости диагностики выпадения града на подстилающую поверхность.

Таблица 1

**Показатели качества диагностики выпадения града на подстилающую поверхность по расчетным уравнениям (6) – (11)**

Показатели качества	Расчетное уравнение			
	$L$ (6)	$L_1$ (7)	$L_2$ (8)	$L_4$ (10) и $L_5$ (11)
<b>Зависимая выборка</b>				
$U$	65,9	82,5	79,4	–
$Uя$	62,1	76,8	74,6	–
$Uб/я$	70	89,5	84,7	–
$Ря$	69,5	89,8	84,7	–
$Рб/я$	62,7	73,9	74,6	–
<b>Независимая выборка</b>				
$U$	–	79,3	74,4	84,7
$Uя$	–	42	41	66,6
$Uб/я$	–	80	78	95,5
$Ря$	–	80,5	76,3	90
$Рб/я$	–	-	–	82,7
Критерий Багрова	–	0,586	0,488	0,54
Критерий Пирси-Обухова	–	0,585	0,49	–
Критерий Обухова	–	0,585	0,48	–

*Примечание:*  $U$  – общая оправдываемость, %;  $Uя$  – оправдываемость явления, %;  $Uб/я$  – оправдываемость без явления, %;  $Ря$  – предупрежденность явления, %;  $Рб/я$  – предупрежденность без явления, % [13].

Предложенные методы расчета разделяющих функций  $L_1$  (7) и  $L_2$  (8) проверены на независимом материале. Проанализировано 82 случая диагностики выпадения града на подстилающую поверхность (теплый период 1977, 1978 и 1984 гг.). Диагноз считался правильным, если диагностировался град, а выпадение града на поверхность Земли отмечалось в радиусе 100 км от пункта

диагностики. Из 82 случаев оправдалась диагностика выпадения града на подстилающую поверхность в 65 случаях по разделяющей функции (7) и в 61 случае – по (8). Показатели качества диагностики выпадения града на подстилающую поверхность на независимой выборке представлены в табл. 1. Видно, что все характеристики качества диагностики по  $L_1$  (7) лучше, чем по  $L_2$  (8).

Для данных ДМРЛ-С разделяющая функция  $L_3$  будет иметь вид:

$$L_3 = -1,619 H_0 + 0,0158 Hm(dBZm - 18) + 0,6. \quad (9)$$

На возможность выпадения града на подстилающую поверхность указывают величины  $L_3 > 0$ .

В [6] представлен метод прогноза выпадения града на подстилающую поверхность с использованием тех же характеристик атмосферы. Сначала по зависимости

$$L_4 = -24,3 H_0 - t_g + 36,5 \quad (10)$$

определяется возможность образования града в облаке ( $L_4 \geq 0$ ), а затем определяется возможность выпадения града на подстилающую поверхность по функции

$$L_5 = 0,04 Hm \lg Zm - H_0 + 1,7. \quad (11)$$

При условии  $L_5 > 0$  диагностируется выпадение града на подстилающую поверхность.

Результаты проверки метода по  $L_4 > 0$  и  $L_5 > 0$  на независимой выборке в Москве и Московской области см. в табл. 1.

Расчетные уравнения возможности выпадения града на подстилающую поверхность по информации ДМРЛ-С необходимо проверить на реальных данных измерений сети доплеровских локаторов после окончания их валидации с целью выбора наиболее точных разделяющих функций.

### **Расчет размера града**

Важной характеристикой выпадающего на подстилающую поверхность града является его размер, так как от него зависит

возможный ущерб. Радиус града (см) в облаке рассчитывается по формуле

$$r_0 = \frac{Wm^2 \cdot 10^4}{\gamma^2}, \quad (12)$$

где  $Wm$  – максимальная конвективная скорость, м/с;  $\gamma$  – коэффициент, зависящий от лобового сопротивления градины; при  $5 \leq Wm < 10$   $\gamma = 1,33 \cdot 10^3 \sqrt{\text{см/с}}$ , при  $Wm \geq 10$   $\gamma = 2,3 \cdot 10^3 \sqrt{\text{см/с}}$ .

Радиус града в облаке по данным ДМРЛ-С:

$$r_0 = \frac{[1,33(0,038 Hm (dBZd - 18) + 3,52) + 4]^2 \cdot 10^4}{\gamma^2}. \quad (13)$$

Экспериментально выяснено [5], что градины диаметром 3 см и более, пролетая через теплую часть атмосферы, тают незначительно, т. е. при максимальной скорости конвективного потока в облаке более 30 м/с размер града можно определять непосредственно из уравнений (12), (13). Если диаметр градин в облаке менее 3 см, то при падении через теплые слои атмосферы они заметно тают, поэтому радиус града, выпадающего на подстилающую поверхность, зависит от высоты изотермы  $0^\circ\text{C}$  ( $H_0$ ). Согласно [4, 9, 14], уменьшение радиуса образовавшегося в облаке града за счет таяния при падении определяется соотношением  $r_{\text{паст}} = 0,13H_0$  ( $H_0$ , км). Таким образом, радиус града, выпадающего на подстилающую поверхность, можно рассчитать:

$$R_{\text{земля}} = r_0 - r_{\text{паст}}. \quad (14)$$

### **Диагностика характеристик ливневых осадков по радиолокационной информации**

#### 1. Диагностика интенсивности осадков

По ДМРЛ-С интенсивность осадков определяется согласно известному соотношению Маршалла и Пальмера [2]:

$$Z = A \cdot R^b, \quad (15)$$

где  $Z$  – отражаемость,  $\text{мм}^6/\text{м}^3$ ;  $R$  – интенсивность,  $\text{мм/ч}$ .

Заметим, что значения параметров  $A$  и  $b$  могут сильно изменяться не только в зависимости от типа дождей и географических условий, но даже в пределах одного типа дождей. Результаты валидации данных сети доплеровских локаторов [2] также указывают на необходимость дальнейшего уточнения зависимости (15), особенно при выпадении сильных ливней. Ниже изложен один из вариантов такого уточнения.

Согласно [2], для определенного типа облачности характерны определенные значения отражаемости, измеренные ДМРЛ-С. Интенсивность ливневых осадков определяется, если значения отражаемости характеризуют кучево-дождевые облака, а не вершины  $Cs$ ,  $Cc$ ,  $As$ ,  $Ac$ ,  $Ns$ . Хорошо известна и физически понятна [8, 14] тесная связь максимальной интенсивности конвективных осадков с максимальной конвективной скоростью.

В [3] представлен метод расчета интенсивности ливневых осадков по данным МРЛ. По данным наблюдений об интенсивности и количестве осадков по плювиографу и мощности облаков по данным МРЛ установлена эмпирическая формула для средней интенсивности осадков, выпадающих из фронтальных облачных систем  $\bar{I}$  (мм/мин)

$$\bar{I} = 0,00043 Wm^2 . \quad (16)$$

Применительно к данным ДМРЛ-С эту зависимость можно представить в виде:

$$\bar{I} = 0,00043 [(0,05 Hm (dBZd - 18) + 3,52) + 4,0]^2 . \quad (17)$$

Нами предложен способ расчета интенсивности осадков  $I$  (мм/ч) с использованием  $Wm$ , м/с:

$$I = 2,4 Wm . \quad (18)$$

Проанализируем полученное уравнение (табл. 2).

Видно соответствие  $Wm$  и  $I$  во всем диапазоне максимальной конвективной скорости.

Уравнение для расчета интенсивности осадков  $I$  (мм/ч) применительно к информации ДМРЛ-С имеет вид:

$$I = 3,19 [0,038 Hm (dBZd - 18) + 3,52] \pm 9,6 . \quad (19)$$

Результаты анализа уравнения (18)

$Wm, \text{ м/с}$	$I, \text{ мм/ч}$
$\leq 6$	$< 15$
7–12	15–30
13–20	31–50
$\geq 21$	$> 50$

## 2. Диагностика накопленной суммы осадков

Сравнение данных об осадках ДМРЛ-С с фактическими проводится не по интенсивности осадков, а по накопленной сумме осадков за 1, 6 и 12 ч. В настоящее время осадки на сети метеорологических станций наблюдений измеряются на некоторых станциях за период 6 ч и на большинстве станций за 12 часов.

Самые значительные осадки – ливни из  $Cb$  продолжаются около часа. Реально накопленная сумма осадков в ливне тесно связана с интенсивностью и со скоростью перемещения кучево-дождевого облака  $Cb$  ( $V$ ) над пунктом измерения осадков. Скорость перемещения  $Cb$  достаточно точно вычисляется по ДМРЛ-С. Чем больше скорость перемещения  $Cb$ , тем быстрее облако пройдет над измерителем осадков, тем короче промежуток времени попадания осадков в «ведро» (тем меньше осадков попадет в измеритель при одной и той же интенсивности осадков). Чаще всего количество осадков составляет долю « $k$ » от интенсивности осадков, и тем меньшую, чем больше скорость перемещения облака и меньше диаметр облака.

При построении регрессионного уравнения для расчета количества накопленных осадков за определенный промежуток времени, учитывались только основные параметры. Полученная регрессионная зависимость имеет вид:

$$Q = I (1 - 0,005 \cdot V), \quad (20)$$

где  $Q$  – количество накопленных осадков за определенный промежуток времени, мм;  $I$  – интенсивность осадков, мм/ч;  $V$  – скорость перемещения облака, км/ч.

Оценим полученную нами зависимость (табл. 3).

Таблица 3

**Накопленные суммы осадков в зависимости от интенсивности осадков и скорости перемещения кучево-дождевых облаков**

<b>Интенсивность осадков, <math>I</math>, мм/ч</b>	<b>Скорость перемещения <math>Cb</math>, <math>V</math>, км/ч</b>	<b>Накопленная сумма осадков, <math>Q</math>, мм</b>
30	100	15
	50	22,5
	25	26,2
	10	28,5
	0	30
60	100	30
	50	45
	25	52,5
	10	57
	0	60

Из табл. 3 видно, что чем больше интенсивность осадков, тем в целом больше накопленные суммы осадков; чем больше скорость перемещения облака, тем меньше накопленные суммы осадков. Получаемые оценки соответствуют опыту работы синоптика [11]:

– сильный ливень с количеством осадков больше 50 мм бывает при  $I \geq 60$  мм/ч и небольшой скорости переноса облака  $V < 30$  км/ч;

– сильный ливень (в предгорьях и горах) с количеством осадков больше 30 мм/ч бывает при интенсивности осадков около 60 мм/ч и любой скорости переноса облака на фронте, а также при интенсивности осадков около 30 мм/ч, но только в малоподвижном  $Cb$  (в центральной части циклона).

Возможно, для уточнения параметров дождей по данным ДМРЛ-С с помощью полученных уравнений потребуются корректировка коэффициентов для разных географических районов и времени года.

В [15] было показано, что продолжительность существования крупномасштабной облачности довольно велика: не менее 12 ч в 15 % случаев, более 24 ч в 85 % случаев. В [3] показано, что продолжительность существования радиоэха с максимальными значениями параметров  $Hm$  и  $\lg Zm$  от облаков крупномасштабной облачной системы в 90 % случаев более двух суток. Поэтому все изложенные результаты данного исследования по диагностике ливней и града в дальнейшем можно применять для уточнения прогноза этих опасных явлений при прохождении атмосферных фронтов, связанных с активными циклонами.

### **Выводы**

Получены расчетные уравнения для определения: а) максимальной скорости конвективного потока, б) возможности образования в кучево-дождевом облаке и выпадения града на подстилающую поверхность, в) интенсивности и накопленных сумм осадков по данным ДМРЛ-С.

После валидации данных ДМРЛ-С все предложенные уравнения предполагается протестировать на расширенной выборке. Также предполагается создать новые информационные продукты по данным ДМРЛ-С: карты максимальной скорости конвективного потока, интенсивности и накопленных сумм ливневых осадков, града, выпадающего на подстилающую поверхность. Изложенные в данной статье результаты исследований могут использоваться синоптиками при краткосрочном и сверхкраткосрочном прогнозировании развития зон активной конвекции с опасными конвективными явлениями погоды.

### **Список использованных источников**

1. Алексеева А.А., Глушкова Н.И. Диагноз и прогноз интенсивной конвекции и связанных с нею опасных конвективных явлений // Труды Гидрометцентра России. – 1993. – Вып. 326. – С. 68–72.
2. Временные методические указания по использованию информации доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С в синоптической практике. – М.: Росгидромет, 2014. – 110 с.

3. Глушкова Н.И. Некоторые результаты исследования по усовершенствованию диагноза и прогноза осадков по данным МРЛ // Труды Гидрометцентра СССР. – 1980. – Вып. 220. – С. 77–83.
4. Глушкова Н.И. Условия выпадения сильных ливней и града // Труды Гидрометцентра СССР. – 1981. – Вып. 233. – С. 3–9.
5. Глушкова Н.И., Минакова Н.Е. Прогноз града. Дополнение № 1 к Руководству по краткосрочным прогнозам погоды. Часть II, издание второе. – М.: Гидрометеиздат, 1967. – 11 с.
6. Глушкова Н.И., Алексеева А.А. Прогноз града и размеров градин по радиолокационным данным // Труды Гидрометцентра СССР. – 1989. – Вып. 299. – С. 16–22.
7. Лапчева В.Ф. О методике оценки прогнозов конвективных явлений // Труды Гидрометцентра СССР. – 1980. – Вып. 220. – С. 99–110.
8. Хромов С.П., Мамонтова Л.И. Метеорологический словарь. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 569 с.
9. Мэйсон Б.Дж. Физика облаков. – Л.: Гидрометеиздат, 1961. – 542 с.
10. Руководство по прогнозированию метеорологических условий для авиации // под ред. К.Г. Абрамович, А.А. Васильева. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 308 с.
11. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. Ч. 1. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 702 с.
12. РД 52.27.339-93. Руководство по диагнозу и прогнозу опасных и особо опасных осадков, града и шквалов по данным метеорологических радиолокаторов и искусственных спутников Земли.
13. РД 52.27.284-91. Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов.
14. Сулаквелидзе Г.К., Глушкова Н.И., Федченко Л.М. Прогноз града, гроз и ливневых осадков. – Л.: Гидрометеиздат, 1970. – 183 с.
15. Шишкин Н.Н. О прогнозе количества осадков в горных районах // Труды ГГО. – 1966. – Вып. 186. – С. 38–44.

*Поступила в редакцию 19.04.2016 г.*