

СВЯЗЬ СКОРОСТИ РОСТА РАЗМЕРОВ И МАССЫ ГРАДИН С ТЕМПЕРАТУРОЙ И ВОДНОСТЬЮ МОДЕЛИРУЕМОЙ ОБЛАЧНОЙ СРЕДЫ

Блиадзе Т.Г.

Институт геофизики им. Михаила Нодиа Тбилисского государственного университета им. Иванэ Джавахишвили, 0171, Тбилиси, ул. М. Алексидзе, 1

Методика исследования процессов роста искусственных градин в моделируемой облачной среде, некоторые результаты исследования скорости роста свободно взвешенных градин при различной температуре и влажности этой среды, а также данные о типичных для различных условий экспериментов поверхностных характеристиках градин, изменениях их диаметра и массы во времени и др. в [1-3].

В данной работе рассмотрены вопросы связи средней скорости роста размеров и массы градин с температурой и влажностью облачной среды при сухом и мокром режиме их роста. Ниже использованы следующие обозначения: D' – скорость роста диаметра градины, мм/мин; M' – скорость роста массы градины или нароста льда на закрепленной модели градины, г/мин; D'' – скорость роста относительного диаметра градины, мин^{-1} (по отношению к начальному диаметру градины); M'' – скорость роста относительной массы градины, мин^{-1} (по отношению к начальной массе); w – влажность искусственной облачной среды, г/куб м; T – температура облачной среды, град С; E – интегральный коэффициент захвата облачных капель градинами; Mean – среднее; Min – минимум; Max – максимум; St Dev – стандартное отклонение; Count – число случаев; R – линейный коэффициент корреляции; Mult. R – коэффициент множественной линейной корреляции; α – уровень значимости.

В табл. 1 даны статистические характеристики параметров облачной среды и средней скорости роста диаметра градин для условий сухого и мокрого роста, а также значения коэффициентов двумерных уравнений линейной регрессии, связывающих скорость роста размера градины D' с температурой T и влажностью w . На рис. 1 представлена двумерная линейная регрессионная зависимость D' от w и T .

Как следует из рис. 1 средняя скорость роста размеров градин существенно зависит от влажности облачной среды. Коэффициенты линейной корреляции между D' и w , а также между скоростью роста относительного диаметра грады D'' и w при мокром и сухом режиме положительны и соответственно равны 0,67 и 0,72 (уровень значимости α не хуже 0,001). Линейная корреляционная связь скорости роста размеров градины от температуры облачной среды отрицательная (рис.1). Эта связь высокая при мокром режиме (значение R между D' и T равно -0,68, а между D'' и T равно -0,65; α не хуже 0,001) и низкая при сухом режиме (значение R между D' и T равно -0,27 при α не хуже 0,1, и между D'' и T равно -0,21 при α не хуже 0,2).

На рис. 2 представлена двумерная линейная регрессионная зависимость скорости роста массы грады M' от w и T . В табл. 2 даны статистические характеристики параметров облачной среды и средней скорости роста массы градин для условий сухого и мокрого роста, а также значения коэффициентов двумерных уравнений линейной регрессии, связывающих скорость роста массы градины (абсолютной и относительной) с температурой и влажностью.

Как и для скорости роста размеров градин средняя скорость роста массы градин также существенно зависит от влажности облачной среды. Коэффициенты линейной корреляции между M' и w положительны и равны 0,80 и 0,71, а между скоростью роста относительной массы грады, M'' и w равны 0,74 и 0,73 (рис. 2) при мокром и сухом режиме соответственно (α не хуже 0,001). Линейная корреляционная связь скорости роста размеров градины от температуры

облачной среды отрицательна. Она высокая при мокром режиме (значение **R** между **M'** и **T** равно -0,76 , а между **M''** и **T** равно -0,70; α не хуже 0,001) и низкая при сухом режиме (значение **R** между **M'** и **T** равно -0,29 при α не хуже 0,1 , и между **M''** и **T** равно -0,17 при α не хуже 0,25) .

Таблица 1

Статистические характеристики параметров облачной среды и средней скорости роста диаметра градин для условий сухого и мокрого роста града

Режим	Сухой рост			Мокрый рост		
Параметр	Водн. г/м ³ (w)	Темпер. град. С (T)	Скорость роста диаметра града, мм/мин (D')	Водн. г/м ³ (w)	Темпер. град. С (T)	Скорость роста диаметра града, мм/мин (D')
Mean	2,6	-14,0	0,74	3,4	-5,4	0,82
Min	1,2	-19,3	0,35	0,9	-9,7	0,13
Max	4,3	-6,8	1,14	4,8	-1,2	1,4
St Dev	0,77	3,77	0,24	1,18	2,64	0,36
Count	35			17		
Mult. R	0,76 (α не хуже 0,01)			0,77 (α не хуже 0,01)		
Ур. регр.	$D' = a + b*w + c*T$			$D' = a + b*w + c*T$		
	Значение	68% (+/-)	95% (+/-)	Значение	68% (+/-)	95% (+/-)
a	0,059997	0,12901	0,260126	0,032511	0,195466	0,406591
b	0,223707	0,036879	0,07436	0,146195	0,069598	0,144771
c	-0,00718	0,007484	0,015091	-0,05235	0,031067	0,064622
	Вклад коэффициентов b и c в изменчивость D' в пределах вар. размаха					
	Относит. вар. размах D' – 107 %			Относит. вар. размах D' – 155 %		
	b – 94 %, c – 12 %			b – 70 %, c – 32 %		
Параметр	Водн. г/м ³ (w)	Темпер. град. С (T)	Скорость роста относит. диаметра града, мин ⁻¹ (D'')	Водн. г/м ³ (w)	Темпер. град. С (T)	Скорость роста относит. диаметра града, мин ⁻¹ (D'')
Mean	2,6	-14,0	0,046	3,4	-5,4	0,053
Min	1,2	-19,3	0,023	0,9	-9,7	0,008
Max	4,8	-1,2	0,097	4,8	-1,2	0,1
St Dev	0,77	3,77	0,015	1,18	2,64	0,026
Count	35			17		
Mult. R	0,73 (α не хуже 0,01)			0,74 (α не хуже 0,01)		
Ур. регр.	$D'' = a + b*w + c*T$			$D'' = a + b*w + c*T$		
	Значение	68% (+/-)	95% (+/-)	Значение	68% (+/-)	95% (+/-)

	e		e			
a	0,005806	0,008654	0,017449	0,000912	0,014671	0,030517
b	0,014174	0,002474	0,004988	0,009539	0,005224	0,010866
c	-0,00023	0,000502	0,001012	-0,00362	0,002332	0,00485
Вклад коэффициентов b и c в изменчивость D'' в пределах вар. размаха						
Относит. вар. размах D'' - 161 %			Относит. вар. размах D'' - 174 %			
b - 110 %, c - 11 %			b - 61 %, c - 37 %			

Оценим роль изменчивости водности и температуры искусственной облачной среды в изменчивости скорости роста размеров и массы градин при сухом и мокром режимах. Для этого воспользуемся линейными двумерными уравнениями регрессии, связывающими **D'**, **D''**, **M'** и **M''** с **w** и **T** (табл.1 и 2). Как следует из этих таблиц коэффициенты множественной линейной корреляции между исследуемыми параметрами высоки (не менее 0,73 с α не хуже 0,01). При сухом режиме изменчивость водности в пределах вариационного размаха при неизменных значениях температуры приводит к изменчивости **D'** на 94%, **D''** на 110%, **M'** на 199% и **M''** на 140%. При этом же режиме изменчивость температуры облачной среды в пределах вариационного размаха при неизменных значениях водности приводит к изменчивости **D'** всего на 12%, **D''** на 11%, **M'** на 24% и **M''** на 3 %.

Иная картина наблюдается при мокром режиме роста градин. В этом случае изменчивость водности в пределах вариационного размаха при неизменных значениях температуры приводит к изменчивости **D'** на 70%, **D''** на 61%, **M'** на 94% и **M''** на 96%. Изменчивость же температуры облачной среды в пределах вариационного размаха при неизменных значениях водности приводит к изменчивости **D'** на 32%, **D''** на 37%, **M'** на 74% и **M''** на 72 %, что вполне соизмеримо с ролью водности в изменчивости скорости роста размеров и массы градин. Указанное наглядно демонстрируется рис.1, 2.

Таблица 2

Статистические характеристики параметров облачной среды и средней скорости роста массы градин для условий сухого и мокрого роста града

Режим Параметр	Сухой рост			Мокрый рост		
	Водн. г/м ³ (w)	Темпер. град. С (T)	Скорость роста массы града, г/мин (M')	Водн. г/м ³ (w)	Темпер. град. С (T)	Скорость роста массы града, г/мин (M')
Mean	2,6	-14,0	0,48	3,4	-5,4	0,51
Min	1,2	-19,3	0,16	0,9	-9,7	0,07
Max	4,3	-6,8	1,05	4,8	-1,2	1,13
St Dev	0,77	3,77	0,24	1,18	2,64	0,28
Count	35			17		
Mult. R	0,73 (α не хуже 0,01)			0,86 (α не хуже 0,01)		
Ур. регр.	$M' = a + b*w + c*T$			$M' = a + b*w + c*T$		
	Значение	68% (+/-)	95% (+/-)	Значение	68% (+/-)	95% (+/-)
a	-0,20329	0,136427	0,275083	-0,15349	0,120054	0,249726
b	0,214822	0,038999	0,078636	0,122456	0,042747	0,088918
c	-0,00903	0,007915	0,015958	-0,04468	0,019081	0,039691
Вклад коэффициентов b и c в изменчивость M' в пределах вар. Размаха						
Относит. вар. размах M' - 185 %			Относит. вар. размах M' - 208 %			

	b – 139 %, c – 24 %			b – 94 %, c – 74 %		
Параметр	Водн. г/м³ (w)	Темпер. град. С (Т)	Скорость роста относит. массы града, мин⁻¹ (M'')	Водн. г/м³ (w)	Темпер. град. С (Т)	Скорость роста относит. массы града, мин⁻¹ (M'')
Mean	2,6	-14,0	0,251	3,4	-5,4	0,286
Min	1,2	-19,3	0,085	0,9	-9,7	0,043
Max	4,3	-6,8	0,521	4,8	-1,2	0,698
St Dev	0,77	3,77	0,120	1,18	2,64	0,168
Count	35			17		
Mult. R	0,73 (α не хуже 0,01)			0,79 (α не хуже 0,01)		
Ур. регр.	M'' = a + b*w + c*T			M'' = a + b*w + c*T		
	Значение	68% (+/-)	95% (+/-)	Значение	68% (+/-)	95% (+/-)
a	-0,05472	0,068612	0,138345	-0,08683	0,086423	0,17977
b	0,113708	0,019614	0,039548	0,07016	0,030772	0,064009
c	-0,00067	0,00398	0,008026	-0,02431	0,013736	0,028572
	Вклад коэффициентов b и c в изменчивость M'' в пределах вар. Размаха					
	Относит. вар. размах M'' - 174 %			Относит. вар. Размах M'' - 229 %		
	b – 140 %, c – 3 %			b – 96 %, c – 72 %		

Наконец проведем сравнение полученных нами результатов с известными в литературе. Так, теоретические расчеты, приведенные в работах Женева[4], показывают, что скорость роста диаметра градин от 15 мм до 35 мм при сухом режиме составляет около 3 мм/мин, а при мокром – 1,2 мм/мин (при водностях 2 г/м³). Или, соответственно, время роста 6,65 и 17 мин.

Коэффициент захвата считался равным 1. По нашим данным (табл.1) эти значения ниже, в среднем 0,36 мм/мин и 0,31 мм/мин соответственно, что, видимо, связано с завышенными значениями **E**, используемыми в [4].

Бартишвили Г. С.[5-7] в частности получено, что при водности 10 г/м³ и температуре среды около –10 °С средняя скорость роста градины от диаметра 15 мм до 35 мм составляла 0,8 мм/мин. То же для сухо растущей градины составляло 2,25 мм/мин. При температуре среды около –20 °С, диаметре капель 20 мкм, плотности градины 0,9 г/см³ скорость роста градин от диаметра 15 мм до 40 мм составила около 3,25 мм/мин. По нашим расчетам (аппроксимация уравнений табл. 3.3.4) скорость роста диаметра градин в мокром режиме при температуре –10 °С и водности 10 г/м³ в среднем составляет 2 мм/мин с 95% доверительным интервалом от 0,81 до 3,23 мм/мин. Для сухорастущей градины **D'** в нашем случае в среднем составляет 2,44 мм/мин с 95% доверительным интервалом от 1,74 до 3,14 мм/мин. Таким образом указанные данные наших экспериментов неплохо согласуются с аналогичными данными работ [5-7].

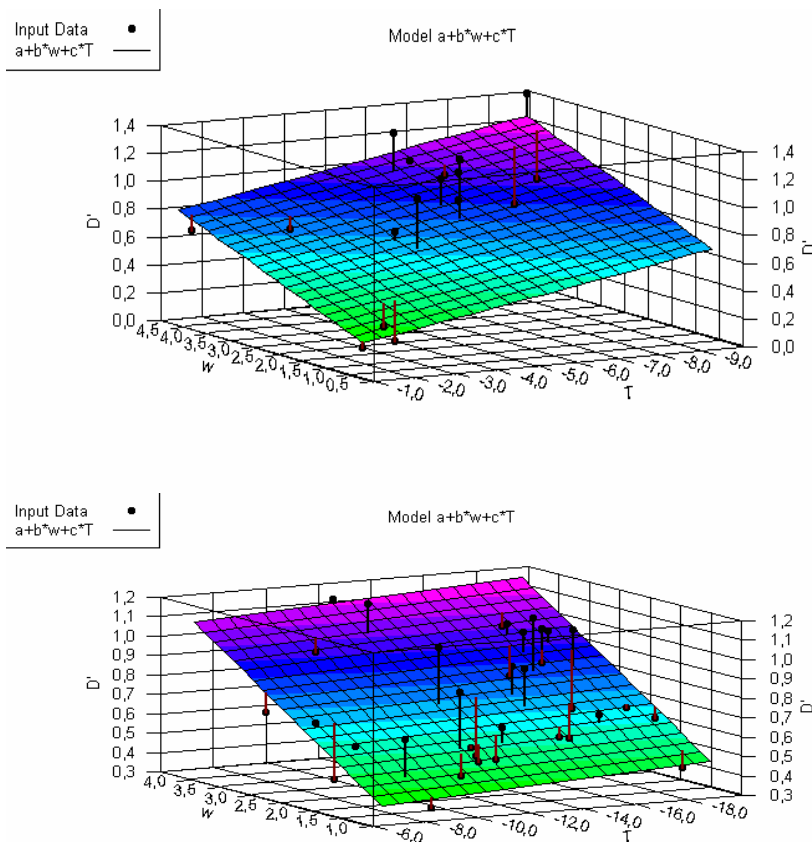


Рис. 1 Зависимость средней скорости роста диаметра градин в моделируемой облачной среде от водности и температуры. Верхний график - режим мокрого роста. Нижний график - режим сухого роста.

В работах Жекамухова М.К.[8,9] для D' получены более высокие значения, чем в наших экспериментах. Однако следует учесть, что расчеты М.К.Жекамухова были проведены для уровня 400 мб и крупных капель.

По расчетам Надибаидзе Г.И.[10] при водности 3 г/м^3 в среде мелких капель (средний диаметр 20 мкм) рост градины проходил со средней скоростью 1,7 мм/мин, а в среде крупных капель (средний диаметр 1000 мкм) - со средней скоростью 2,8 мм/мин. Данные для мелких капель близки к нашим данным для мокрого роста при водности $3,5 \text{ г/м}^3$ и температуре облачной среды $-10 \text{ }^\circ\text{C}$: D' в среднем равно 1,1 мм/мин с 95% доверительным интервалом от 0,8 до 1,33 мм/мин.

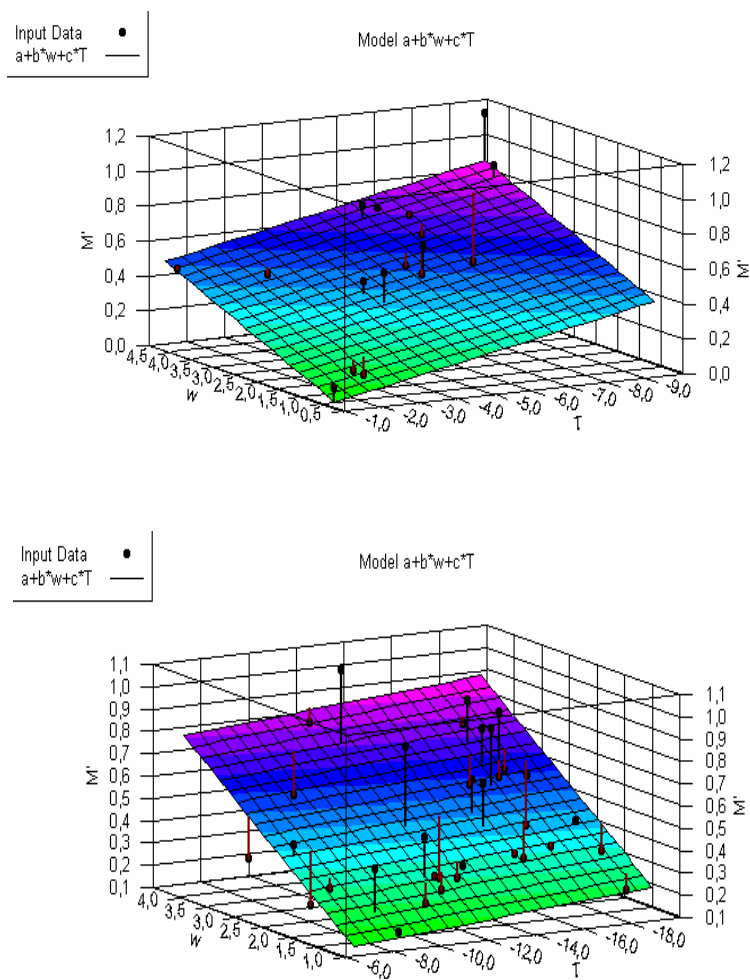


Рис. 2 Зависимость средней скорости роста массы градин в моделируемой облачной среде от влажности и температуры. Верхний график - режим мокрого роста. Нижний график - режим сухого роста.

По экспериментальным данным [11,12] скорость роста закрепленной градины диаметром от 15 до 20 мм при влажности $4,5 \text{ г/м}^3$ и температуре $-6,5 \text{ }^\circ\text{C}$ (мокрый рост) в среднем составляет $1,7 \text{ мм/мин}$. Скорость роста града диаметром от 10 до 15 мм при влажности $2,7 \text{ г/м}^3$ и температуре $-14 \text{ }^\circ\text{C}$ (сухой рост) в среднем равна $1,1 \text{ мм/мин}$. Скорость роста града диаметром от 15 до 30 мм при влажности $5,13 \text{ г/м}^3$ и температуре облачной среды $-15 \text{ }^\circ\text{C}$ (сухой рост) в среднем составляла $1,76 \text{ мм/мин}$. По нашим данным для тех же условий для мокрого роста D' в среднем равно 1 мм/мин с 95% доверительным интервалом от $0,4$ до $1,67 \text{ мм/мин}$, а для сухого роста D' в среднем равно $0,76 \text{ мм/мин}$ с 95% доверительным интервалом от $0,51$ до $1,01 \text{ мм/мин}$ и $1,29 \text{ мм/мин}$ с 95% доверительным интервалом от $0,90$ до $1,7 \text{ мм/мин}$. Как видно имеется неплохое совпадение данных для закрепленных с свободно взвешенных градин, по крайней мере для верхней границы полученных в наших экспериментах доверительных интервалов D' .

Наконец, в обзорной работе Листа [13] указывается, что при критической влажности, скорость роста градины диаметром 20 мм при давлении 800 мб и температуре воздуха $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ - около 1 г/мин . По нашим данным среднее значение M' составляет $1,5 \text{ г/мин}$ с 95%

დოვერითელ ინტერვალმ 1,0 დო 2,0 გ/მინ . ვ დანომ სლუაე იმეეტა სოვპადენი ნაშიხ დანნიხ ს დანნიხ [13] ო M' ნა ნიჟნემ ურუნე 95% დოვერითელი ინტერვალა.

ლიტერატურა

1. Amiranashvili A., Bliadze T., Chiabrishvili N., Chikhladze V., Gzirishvili T., Kirkitadze D., Nodia A., Odisharia M., Okujava A. - Complex for laboratory modelling of microphysical and electrical properties of aerodisperse formations, Proc.Int.Conf. Dedicated to Memory of Prof.A.Sutugin, Moscow, Russia, June 26-30, 2000. 54-55.
2. ბლიადზე ტ.გ. – სკოროტა როტა გრადინ რი რაღლიჩნოი ვოდნოტი ი ტემპერატურე ისკუსტვენნოი ობლაცნოი სრედე. ტრ. ინსტიტუტა გეოფიზიკი იმ. მ.ზ. ნოდია. 2008.ტ. 60. ს. 219 - 222.
3. ბლიადზე ტ.გ. – ფიზიკესიე ხარაქტერიტიკი გრადინ რი რაღლიჩნოი რეჟიმახ იხ როტა, ტრ. ინსტიტუტა გეოფიზიკი იმ. მ. ზ.ნოდია. 2008. ტ. 60..ს 223 - 229.
4. Geneve R., La grele, Paris, 1961, 82 p.
5. ბარტიშვილი გ.ს. – ტერმოდინამიკა გუბცატიხ გრადინ. ტრ. ვგი, ვუპ. 24, მ., გიდრომეტეოიზდატ. 1973. .ს16-24.
6. ბარტიშვილი გ.ს. – სუხოი ი ვლაჟნოი როტა გრადინ რი ობრაზოვანიე პლოტნოი ლდა. ტრ. ვგი, ვუპ. 24. მ., გიდრომეტეოიზდატ. 1973..ს 25-36.
7. ბარტიშვილი გ.ს. – ო ნეკოტორიხ ოსობენნოტიხ ობრაზოვანიე გრადინ ვ სუხოი რეჟიმიე ი ვ სმეშანნოი ფრაქციი. ტრ. ვგი, ვუპ. 29. ლ. გიდრომეტეოიზდატ. 1975. 140-150.
8. ჯეკამუხოვ მ.კ. – კ ტეორიე როტა გრადა ვ ობლაცე. ტრ. ვგი, ვუპ. 19, ლ., გიდრომეტეოიზდატ, 1971, 3-18.
9. ჯეკამუხოვ მ.კ. – ნეკოტორე პრობლემი ფორმიროვანიე სტრუქტურე გრადინ. მ., 1982.
10. ნადიბაიძე გ.ა. – ჩისლენოე მოდელიროვანიე კინეტიკი როტა გრადოვიხ ჩატიცი ვ სრედე პერეოჟლაცენნოი რუპნოიხ კაპელე. ტრ. ზაკნიგმი, ვუპ. 67(73), ლ., გიდრომეტეოიზდატ. 1978. 43-48.
11. ჰორგუანი ვ.გ. – მიკროფიზიკა ზაროჟდენიე ი როტა გრადა. მ., გიდრომეტეოიზდატ. 1984. 1-188.
12. ეკბა ი.ა., ჰორგუანი ვ.გ., ტლისოვ მ.ი. – ო ვლიანიე კრისტალიკესოი ფაზე ნა როტა გრადინ. ტრ. ვგი, ვუპ. 29, ლ. გიდრომეტეოიზდატ. 1975. 151-162.
13. List R – A critical overview of aerodynamics and heat and mass transfer of ice particles, graupel and hailstones, Proc. 14th International Conference on Clouds and Precipitation, Bologna, Italy, 18-23 July 2004.

**სეტყვის მარცვლები ზომის და მასის ზრდის სიჩქარის კავშირი
მოდელირებად საღრუბლო გარემოს ტემპერატურასა და წყლიანობასთან**

ბლიაძე თ.

რეზიუმე

დადგენილია საღრუბლო გარემოს ტემპერატურისა და წყლიანობის ცვლადობის როლი სეტყვის მარცვლების ზომის და მასის ზრდის სიჩქარის ცვლილებაზე. ზრდის მშრალი რეჟიმის დროს ვარიაციული განშლადობის ფარგლებში წყლიანობის ცვლილება უცვლელი ტემპერატურის დროს იწვევს ზომის ზრდის სიჩქარის ცვლილებას 94%-ით, ხოლო მასის ზრდის სიჩქარისა 199%-ით. ზრდის სველი რეჟიმის დროს ვარიაციული განშლადობის ფარგლებში წყლიანობის

ცვლილება უცვლელი ტემპერატურის დროს იწვევს ზომის ზრდის სიჩქარის ცვლილებას 70%-ით, ხოლო მასის ზრდის სიჩქარისა 94%-ით.

Connection of the rate of growth in sizes and mass of hailstones with temperature and water content of the modeling cloud medium

Bliadze T.

Abstract

The role of the changeability of water content and temperature of cloud medium in a change in the rate of growth in sizes and mass of hailstones is established. During the dry regime of growth the changeability of water content in the limits of variation scope with the constant values of temperature leads to a change in the rate of growth in the sizes to 94%, and the rate of growth in the mass to 199%. During the wet regime of growth the changeability of water content in the limits of variation scope with the constant values of temperature leads to a change in the rate of growth in the sizes to 70%, and the rate of growth in the mass to 94%.