

УДК 551.506.7

Микрофизические механизмы возникновения глории по данным самолетных измерений

Г.Э. Колокутин, В.В. Волков*

Центральная аэрологическая обсерватория
141700, г. Долгопрудный, ул. Первомайская, 3

Поступила в редакцию 3.02.2017 г.

Рассматриваются механизмы образования глории (оптического явления, наблюдаемого на облаках) в ключе новых экспериментальных результатов исследований микрофизики облаков, полученных в ходе научных полетов самолета-лаборатории Як-42Д «Росгидромет» в условиях умеренных и арктических широт. Приводятся данные о распределении размеров частиц облаков, на которых наблюдалась глория, и рассматриваются закономерности ее образования.

Ключевые слова: микрофизика облаков, глория, спектры облачных частиц, самолетные наблюдения; cloud microphysics, glory, particles size spectrum, aircraft observation.

Введение

Глория — оптическое явление, которое часто наблюдается с борта самолета в облачной атмосфере. Она возникает как эффект обратного рассеяния солнечного света на верхней границе облаков в виде одного или нескольких радужных колец вокруг тени самолета, внешний край кольца имеет красный цвет (рис. 1, а). Природа образования глории схожа с формированием радуги: в том и в другом случае возникает цветная картина отражения света в результате преломления лучей на каплях воды. Однако это явление нельзя объяснить только постулатами геометрической оптики.

Наиболее полное его обоснование дается в волновой теории рассеяния Ми. Х. ван де Хюлст предложил рассматривать образование глории как результат однократного преломления света в капле воды. Согласно его расчетам, обратный луч возникает только в каплях жидкости с коэффициентами преломления $2 > n > 1,4$ [1]. Известно, что коэффициент преломления воды для видимого света лежит в диапазоне от 1,3326 до 1,3405, где преломления обратного луча не существует. Хюлст объяснил существование обратного луча действием поверхностной волны. А.Н. Невзоров для описания глории предложил считать коэффициент преломления переохлажденных капель воды равным 1,81 [2]. Это помогло бы объяснить образование глории не только в облаках, содержащих монодисперсные капли воды радиусом < 30 мкм, но и на каплях большего размера.

Наиболее общее решение задачи рассеяния света сферическими частицами дает теория Ми, основанная на полном решении уравнений Максвелла [3].

Теория Ми и метод расчета с использованием серии Дебая (решение задач геометрической оптики с однократным или многократным отражением внутри капли) хорошо согласуются между собой [4]. Отличие серии Дебая от решения Ми видно только при углах преломления, равных 180° : в центре глории серия Дебая дает затенение.

Большое количество теоретических работ окончательно не отвечает на вопрос о механизме возникновения глории. Остаются неопределенности, связанные с некоторыми приближениями в используемых расчетных методах: распределением частиц по размерам и их фазовым состояниям.

Спектры распределения облачных частиц по размерам представлены в монографии И.П. Мазина и С.М. Шметера [5], значительная часть результатов которой была получена А.М. Боровиковым с использованием импакторных методов измерения. Установлено, что в континентальных облаках умеренных широт модальный радиус частиц колеблется от 3 до 10 мкм, в облаках полярных районов размеры капель обычно на 20–40% меньше.

Самолет-лаборатория Як-42Д «Росгидромет» в период с 2014 по 2015 г. осуществлял исследовательские полеты в умеренных и арктических широтах, в которых бортаэрологами неоднократно наблюдалась глория. Цель настоящей работы — анализ микрофизических параметров облаков, на которых фиксировалось это оптическое явление, с помощью современного измерительного комплекса.

Приборы и особенности измерений в облаках

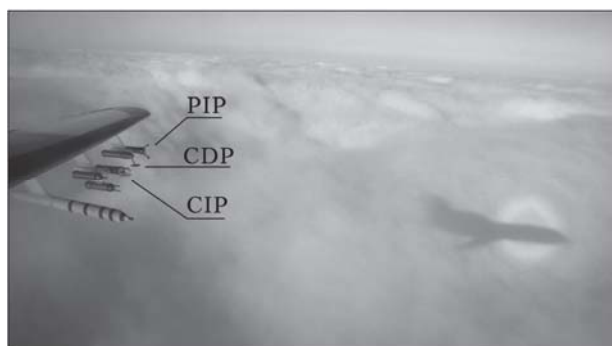
Самолет-лаборатория Як-42Д «Росгидромет» оснащен приборными комплексами для решения широкого спектра задач, в том числе для измерения

* Григорий Эдуардович Колокутин (gregorylost@yandex.ru); Василий Витальевич Волков (volkov-vv@mail.ru).

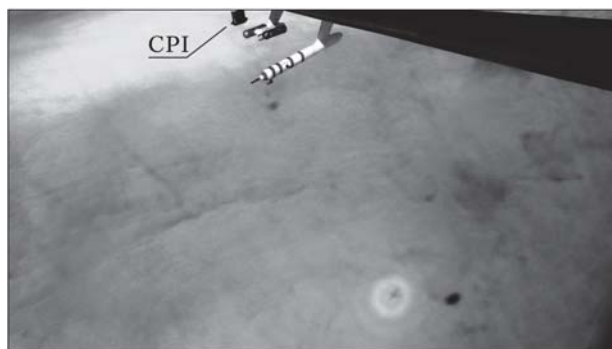
термодинамических характеристик атмосферы и микрофизических параметров облаков [6]. Измерение облачных частиц осуществляется приборами производства фирмы Droplet Measuring Technologies: спектрометром Cloud Droplet Probe (CDP) для капель размерами от 2 до 50 мкм [7] на основе регистрации рассеяния света частицами под углами от 4 до 12°; датчиками облачных изображений Cloud Imaging Probe (CIP) для измерений в диапазоне от 25 до 1550 мкм [8], Precipitation Imaging Probe (PIP) для крупных облачных, а также частиц осадков в интервале размеров от 100 до 6200 мкм [9]. Работа CIP и PIP основана на принципе затенения частицами фотодиодной матрицы. Эти датчики вместе с CDP расположены на подкрыльевых штангах слева по борту (рис. 1, б). Под правым крылом самолета (рис. 1, в)



а



б



в

Рис. 1. Вид на глаорию с борта Як-42Д «Росгидромет» 19.06.2014 г. (а); 3.10.2014 г. и датчики под левым крылом самолета (б); 10.06.2014 г. и CPI под правым крылом (в)

располагается прибор Cloud Particles Imager (CPI), разработанный фирмой SPEC. Это высокоскоростной фотоаппарат для регистрации облачных частиц, позволяющий делать снимки с высоким разрешением 2,3 мкм и частотой 72 кадра в секунду и размером кадра 1024 × 1024 пикселя [10].

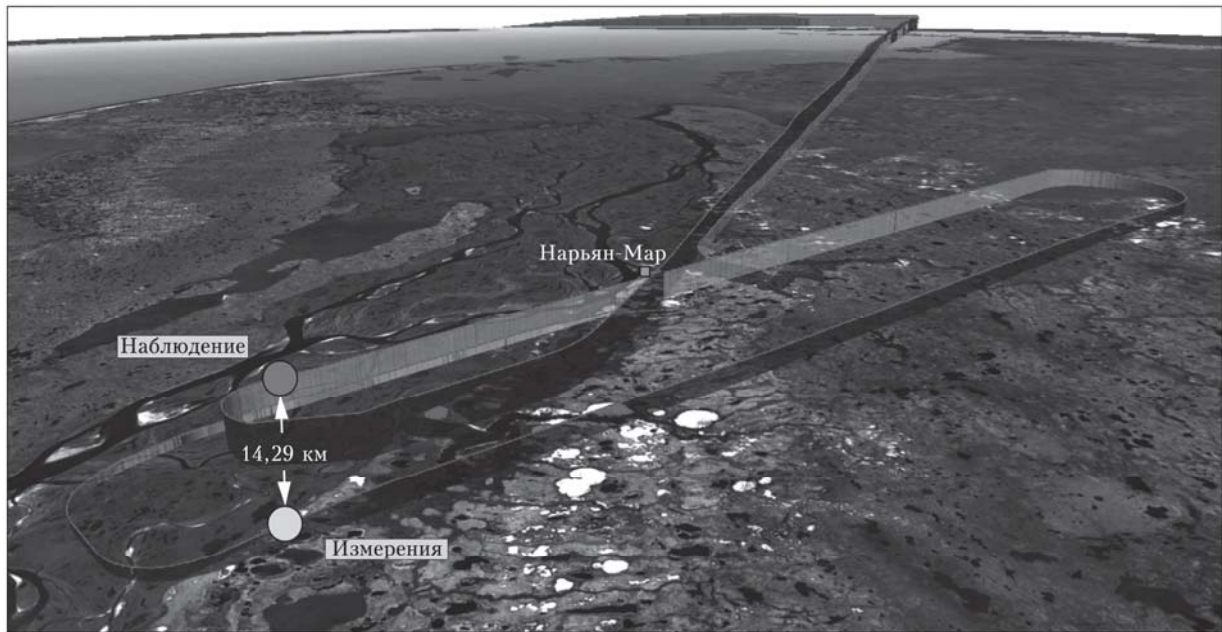
Сложность в организации летного эксперимента по изучению глаории заключается в том, что невозможно одновременно наблюдать ее и проводить измерения в одном облачном слое. Поэтому исследование природы возникновения этого явления основывается на предположении, что процессы, ответственные за его образование, протекают в протяженной воздушной массе с одинаковыми физическими параметрами. Обычно это предположение подтверждается наличием многокилометровых полей облачности одного типа и длительным (несколько минут) наблюдением глаории. Хотя наблюдения глаории и измерения в облаках разнесены во времени и пространстве, мы предполагаем, что микрофизические параметры измеряются в той же системе облаков на основании записей в журналах бортаэрологов. Более правильным способом изучения глаории было бы одновременное проведение измерений и наблюдений с использованием двух самолетов. К сожалению, подобный эксперимент лежит за гранью наших технических и организационных возможностей.

С 2014 по 2015 г. было отмечено несколько десятков случаев наблюдения глаории. Мы анализировали только те ситуации, при которых наблюдение глаории и измерения в облаках имели минимальную разницу во времени и пространстве, а измерения были надежными. В качестве примера на рис. 2 приводятся схема и высотный профиль полета 3.10.2014 г. в полярной зоне с наблюдением глаории и измерением в слоисто-кучевых облаках. Несколько таких случаев представлены в таблице. Высота верхней границы облачности (ВГО) в момент измерения и высота полета во время наблюдения берутся с бортового GPS-приемника. Значения температуры ВГО получены с высокочастотного температурного датчика, погрешность измерения которого составляет не более 0,15 °С [11].

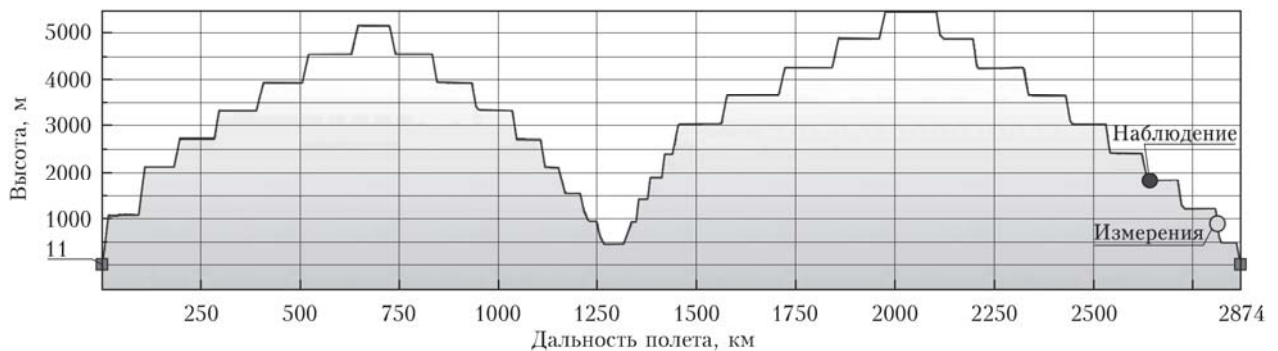
Случаи наблюдения глаории и характеристика облачности

Дата (2014 г.)	Высота наблюдения, м	Тип облачности	Высота ВГО, м	Температура ВГО, °С
10.06	2700	Sc	300	0,8–1,0
12.06	6400	Cu	6400	–27,0
18.06	2000	Cu hum.	2000	–7,0
19.06	6250	As	5400	–21,0
6.09	3100	Sc	1650	4,5
3.10	1800	Sc	935	–8,5

Рассмотрим подробнее каждый из представленных случаев.



a



б

Рис. 2. Схема с указанием места наблюдения и измерения (а) и высотный профиль (б) полета 3.10.2014 г.

Полет 10.06.2014 г.

Район наблюдения – Ненецкий автономный округ. Глория наблюдалась с уровня 2700 м. Во время набора высоты самолет пересек слоисто-кучевую облачность (*Sc*) с верхней границей примерно 300 м и температурой ВГО 0,8–1,0 °С. Глория наблюдалась более 10 мин (см. рис. 1, в). CDP регистрировал мелкие капли с модальным радиусом 6,5 мкм и максимальным размером 15 мкм (рис. 3, а).

Полет 12.06.2014 г.

Район наблюдения – граница Московской и Владимирской областей. В 16:46, 16:57, 17:11 бортаэролог визуально фиксировал глаорию на облаках. Самолет в этот период неоднократно пересекал шапки кучевых облаков (*Cu*) на высоте \approx 6400 м. Температура ВГО была приблизительно –27 °С. По данным CDP (рис. 3, б), модальный радиус капель составлял 5 мкм, а их концентрация достигала $2,5 \cdot 10^6/\text{м}^3$.

В спектре размеров частиц есть и второй максимум радиусом 14 мкм и с концентрацией частиц $1,65 \cdot 10^6/\text{м}^3$. На снимках СРІ присутствуют изображения капель и кристаллов (рис. 4, в и 4, з), крупные частицы (> 100 мкм) в основном были кристаллическими.

Полет 18.06.2014 г.

Район наблюдения – Московская область. На высоте 2000 м самолет пересек несколько вершин поля плоских кучевых облаков (*Cu hum.*) при температуре ВГО –7 °С; на отдельных вершинах, оказавшихся под самолетом, наблюдалась глаория. За период измерения микрофизических параметров *Cu hum.* бортаэролог отмечал обледенение на блистере, что свидетельствует о наличии водяной фракции в облаках [12]. По данным CDP, в основном в слое облаков наблюдались частицы с модальным радиусом 5 мкм и максимальным размером 12,5 мкм (рис. 3, в). В этих облаках, по результатам измерений СРІ, отсутствовали частицы крупнее 50 мкм; были зарегистрированы исключительно мелкие капли (рис. 4, б).

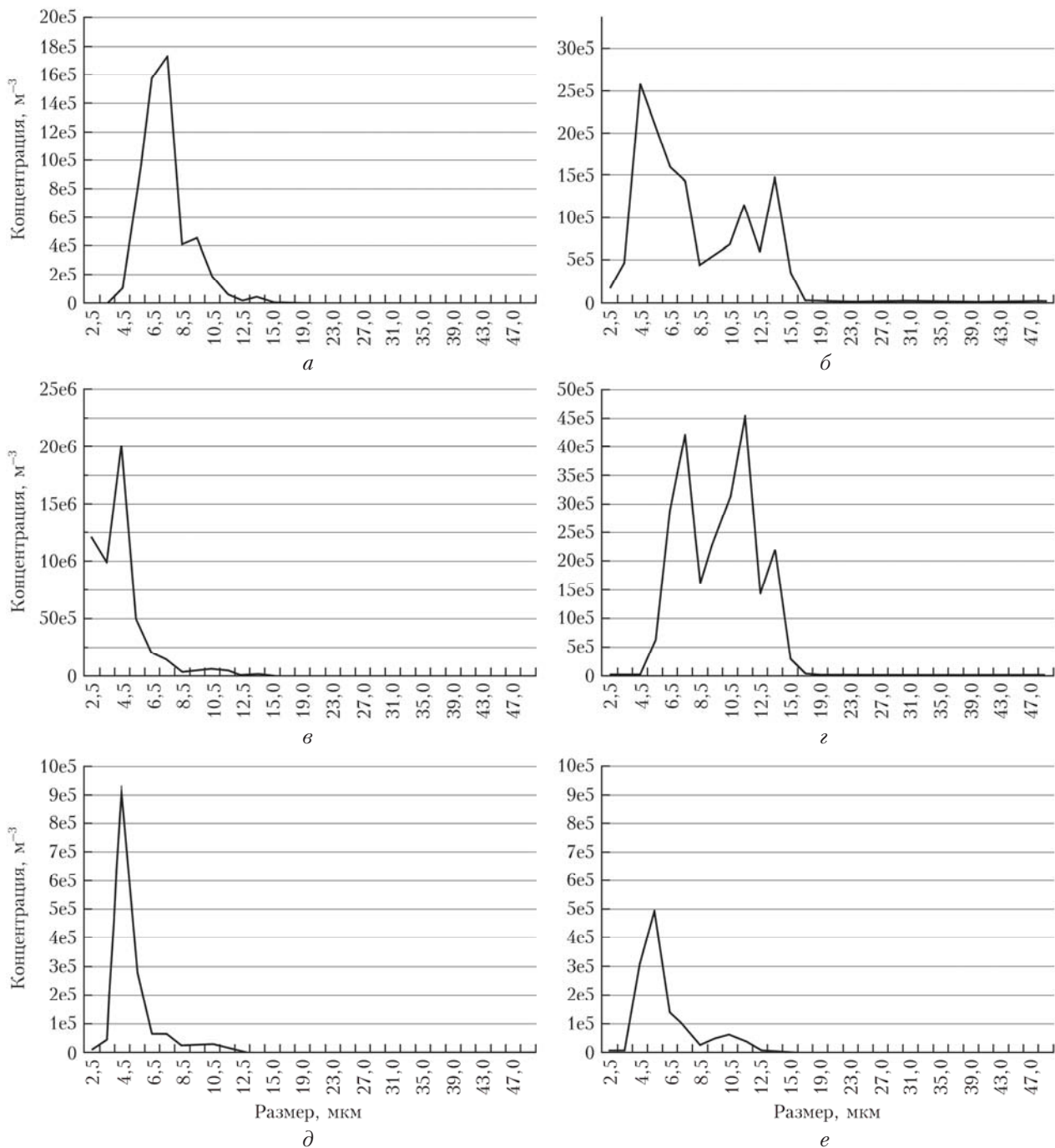


Рис. 3. Спектры распределения размеров облачных частиц по данным CDP за полеты: 10.06.2014 г. (а); 12.06.2014 г. (б); 18.06.2014 г. (в); 19.06.2014 г. (г); 6.09.2014 г. (д); 3.10.2014 г. (е)

Полет 19.06.2014 г.

Район наблюдения – Ямало-Ненецкий автономный округ (п-ов Ямал). Во время полета самолет пересек слой высокослоистых облаков (As) с верхней границей 5400 м и температурой ВГО –21 °С. Когда была набрана высота 6250 м, бортаэролог наблюдал глаорию. По данным СРР и РРР, в верхнем слое облаков не было крупных капель (> 100 мкм). CDP (см. рис. 3, г) определил присутствие капель с двумя максимумами – 7,5 и 11,5 мкм. На снимках

СРР (рис. 4, а) не зарегистрированы кристаллы и присутствуют преимущественно мелкие капли того же диапазона, что и в данных CDP. В этот день наблюдалась яркая глаория с двумя кольцами (см. рис. 1, а).

Полет 6.09.2014 г.

Район наблюдения – Тверская область. Глаория была замечена на слоисто-кучевых облаках. ВГО была зафиксирована на высоте 1650 м с температурой 4,5 °С. Прибор РРР не зарегистрировал крупных

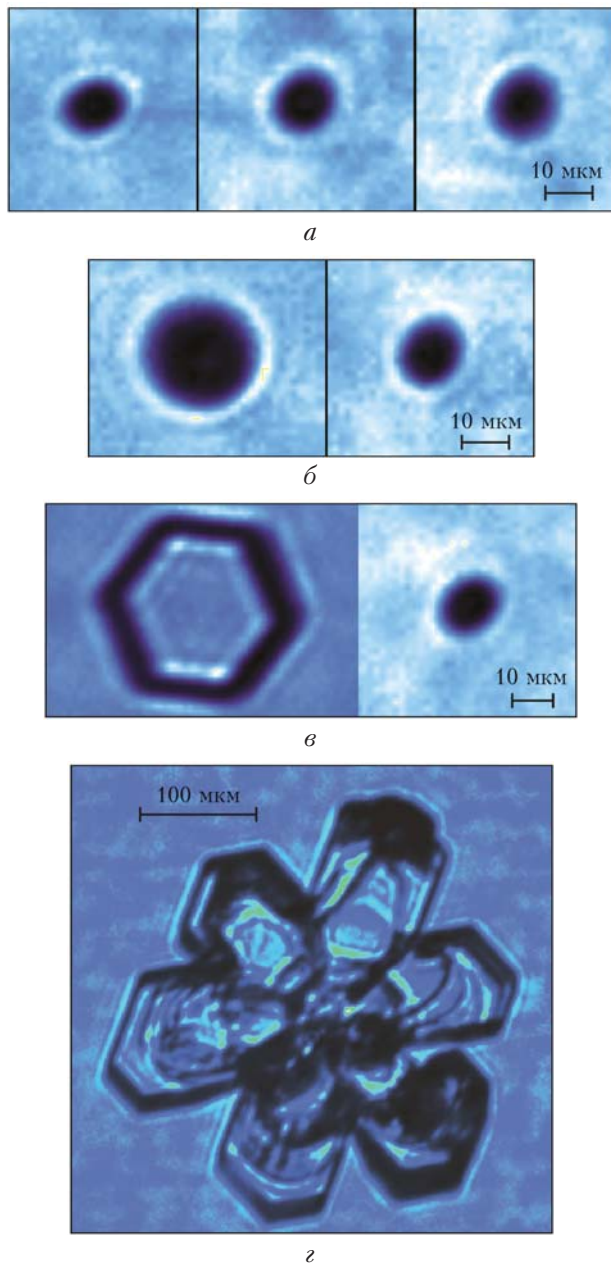


Рис. 4. Изображение облачных частиц СРІ за полеты: 19.06.2014 г. (а); 18.06.2014 г. (б); 12.06.2014 г. (в, з)

капель; СІР определил наличие только мелких частиц, с максимальным радиусом < 50 мкм. По данным СDP, в облаке присутствовали мелкие частицы максимальным радиусом 12,5 мкм, модальным радиусом 4,5 мкм и концентрацией порядка $9 \cdot 10^5 / \text{м}^3$ (см. рис. 3, д).

Полет 3.10.2014 г.

Район наблюдения — Ненецкий автономный округ, недалеко от г. Нарьян-Мар (см. рис. 2, а). Глория была отмечена бортаэрологом во время полета самолета на высоте 1800 м (см. рис. 2, б). ВГО на момент измерения имела высоту 935 м и температуру $-8,5^\circ\text{C}$. По данным СDP (см. рис. 3, е),

в облачном слое в основном были частицы размером 5,5 мкм.

Обсуждение результатов

По данным, полученным во время полетов самолета-лаборатории, глория чаще наблюдалась на верхней границе слоистых и слоисто-кучевых облаков, за исключением двух случаев, когда это явление было зафиксировано на кучевых облаках (*Cu*, *Cu hum*). Во всех примерах максимальное количество облачных частиц приходилось на диапазон 4–12 мкм. Глория наблюдалась как в теплых, так и в холодных облаках, с температурой ВГО от $0,8$ до -27°C . По-видимому, для возникновения этого явления определяющим фактором является наличие мелкодисперсной жидкокапельной фазы с положительными либо отрицательными температурами, а не переохлажденной жидкой фракции (полеты 10.06 и 6.09.2014 г.) или кристаллов (полет 19.06.2014 г.).

При измерениях СDP (полет 19.06.2014 г.) в спектре размеров частиц присутствовало два максимума. Такие случаи бимодальных распределений размеров капель обсуждались в [13]. На рис. 1, а глория имеет два ярких кольца. Высота ВГО для этой фотографии составляет 5400 м. С учетом высоты солнца над горизонтом (44°) рассчитано расстояние до точки проекции глории на фотоснимке, которое составило 1200 м. Длина самолета равна 36 м. По этим данным можно оценить угловые размеры колец глории: $1,8$ и $3,4^\circ$. Расчет осуществлялся калькулятором MiePlot, основанном на методе Ми [14]. В качестве входных данных были взяты параметры атмосферы (температура воздуха ВГО, равная -21°C , и давление на высоте 5400 м, равное $5,12259 \cdot 10^4$ Па) и размеры частиц на высоте проведения измерений. Этот оценочный результат можно считать удовлетворительным. Он оказался в хорошем соответствии с оценкой этих размеров по теории Ми ($2,4$ и $3,8^\circ$ соответственно).

Заключение

Измерение микрофизической структуры облаков выявило следующее:

- температура ВГО в двух случаях была выше 0°C , что свидетельствует об отсутствии переохлажденной фракции воды и кристаллов;
- во всех случаях наблюдения глории модальный радиус частиц в облаках находился в интервале от 4 до 14 мкм. Скорее всего, наличие мелких облачных частиц этого диапазона является определяющим фактором возникновения глории;
- в случае бимодального спектра распределения частиц по размерам наблюдалась глория с двумя ярко выраженными кольцами. Оценка угловых размеров этих колец находится в хорошем соответствии с расчетами по теории Ми.

Более подробный анализ случаев многомодального распределения спектра облачных частиц может оказаться полезным для проверки гипотезы о возникновении вторичных колец глории.

1. Ван де Хюлст Г. Рассеяние света малыми частицами. М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1961. 537 с.
2. Невзоров А.Н. Явление глории и природа жидкокапельной фракции в холодных атмосферных облаках // Оптика атмосфер. и океана. 2007. Т. 20, № 8. С. 674–681.
3. Дейрменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами. М.: Мир, 1971. 167 с.
4. Laven P. How are the glories formed? // Appl. Opt. 2005. V. 44, N 27. P. 5675–5683.
5. Мазин И.П., Шметер С.М. Облака, строение и физика образования. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 280 с.
6. Азаров А.С., Борисов Ю.А., Вакуловский С.М., Данилян Б.Г., Петров В.В., Синькевич А.А., Струнин М.А., Фомин Б.А., Хаттатов В.У. Новые возможности в проведении исследований атмосферных процессов и мониторинга окружающей среды с использованием самолета-лаборатории Як-42Д «Росгидромет» // Тез. докл. Всерос. открытой конф. по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы, посвященная 80-летию Эльбрусской высокогорной комплексной экспедиции АН СССР, 9 октября 2014. Нальчик: ВГИ, 2014. С. 62–70.
7. Cloud Droplet Probe (CDP-2) Manual [Electronic resource]. URL: <http://www.dropletmeasurement.com/sites/default/files/ManualsGuides/Hardware%20Manuals/CDP-2%20Manual.pdf> (last access: 19.01.2017).
8. Cloud Imaging Probe Grayscale (CIP-GS) Manual [Electronic resource]. URL: <http://www.dropletmeasurement.com/sites/default/files/ManualsGuides/Hardware%20Manuals/DOC-0202%20CIP-GS%20Manual.pdf> (last access: 19.01.2017).
9. Precipitation Imaging Probe Operator Manual [Electronic resource]. URL: <http://www.dropletmeasurement.com/sites/default/files/ManualsGuides/Hardware%20Manuals/PIP.pdf> (last access: 18.01.2017).
10. Cloud Particle Imager CPI V2.5 User's Manual [Electronic resource]. URL: http://www.specinc.com/sites/default/files/software_and_manuals/CPI_Technical%20Manual_rev1.2_20130226.pdf (last access: 19.01.2017).
11. Живоуголов Д.Н. Оценка влияния влажности на измерения температуры воздуха в облаках по результатам исследований в аэродинамической установке // Метеорол. и гидрол. 2013. № 8. С. 29–38.
12. Шметер С.М. Метеорология для воздухоплавателей и пилотов. М.: Планета, 2009. 288 с.
13. Pruppacher H.R., Klett J.D. Microphysics of Clouds and Precipitation. Dordrecht, Holland: D. Reidel Company, 1978. 714 p.
14. MiePlot. A computer program for scattering of light from a sphere using Mie theory & the Debye series Imager [Electronic resource]. URL: <http://www.philiplaven.com/mieplot.htm> (last access: 20.02.2017).

G.E. Kolokutin, V.V. Volkov. Microphysical mechanisms of glory according to airplane measurements.
 Mechanisms of glory (optical phenomenon observed on clouds) in view of new experimental aircraft researches of the cloud microphysics are considering. New data were received in research flights of ROSHYDROMET YAK-42D aircraft in polar and central regions of Russia. Data on the cloud particle size distribution are presented, and conditions of occurrence of glory on these clouds are discussed.