

В.Н. Никулин, В.В. Чукин, А.Ф. Садыкова

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ЛЬДА В АТМОСФЕРЕ

V.N. Nikulin, V.V. Chukin, A.F. Sadykova

EXPERIMENTAL SETUPS FOR STUDYING OF THE ICE FORMATION IN THE ATMOSPHERE

Приводится краткий обзор развития экспериментальных установок для исследования процесса образования кристаллов льда в атмосфере. Рассматриваются принципы работы некоторых установок для исследования депозиционного, конденсационного и иммерсионного режимов кристаллизации. Представлено описание разработанной авторами экспериментальной установки для исследования иммерсионной кристаллизации.

Ключевые слова: образование ледяных ядер, иммерсионный механизм, ядра кристаллизации, диффузионная камера непрерывного потока.

Provides a brief overview of the development of experimental setups for the study of the ice crystals formation in the atmosphere. Discusses the principles of operation of certain setups for research deposition, condensation and immersion modes of crystallization. The description of the authors' experimental setup for investigating immersion crystallization is presented.

Key words: ice nucleation, immersion mode, ice nuclei, continuous flow diffusion chamber.

Введение

В конце XIX в. П.Ж. Кулье и Дж. Айткен признали, что для образования тумана и облаков необходимо наличие аэрозольных частиц [32], которые они назвали облачными ядрами конденсации. Позже было обнаружено, что то же самое применимо и к образованию кристаллов льда в смешанных и ледяных облаках, эти льдообразующие аэрозольные частицы были названы ядрами кристаллизации (ЯКр), или ядрами нуклеации. Хотя в настоящее время ядра конденсации изучены хорошо, по-прежнему не существует понимания, какие свойства аэрозольных частиц определяют их как ЯКр [35, 10]. В то время как ядрообразование льда интенсивно изучали в 1970-х гг. в рамках программ воздействия на погоду [7], современный интерес сосредотачивается больше на влиянии на климат природных и антропогенных аэрозолей, через так называемый косвенный аэрозольный эффект. Традиционно считалось, что косвенный эффект вызван увеличением облачных капель из-за антропогенных аэрозолей [5]. В последнее время также обнаружено, что аэрозольные частицы оказывают влияние на смешанные и перистые облака [21].

Наличие ЯКр в атмосфере влияет на радиационный баланс, посредством изменения отражательных свойств облаков [12]. Без ЯКр капли в облаках могут находиться

в жидком состоянии при температурах выше 235 К. Образование льда в природе наблюдается, как правило, при более высоких температурах в результате гетерогенного механизма за счет наличия ЯКр. В настоящее время выделяют четыре основных механизма гетерогенного образования льда [38]:

- 1) *депозиционный* — водяной пар сублимируется на поверхности частицы;
- 2) *конденсационный* — водяной пар конденсируется на поверхности частицы, после чего капля замерзает;
- 3) *иммерсионный* — частица расположена в жидкой капле до ее переохлаждения, при понижении температуры капля замерзает;
- 4) *контактный* — процесс кристаллизации начинается при соприкосновении частицы с переохлажденной каплей.

Хотя кристаллизация капель в облаках представляет особый интерес для предсказания погоды и изменений климата, в настоящее время нельзя подробно объяснить этот процесс [14]. Одной из причин этого является нехватка надежных экспериментальных данных и потребность в более обширных непрерывных измерениях ЯКр, что позволит более точно параметризовать этот процесс [12].

Методы измерения атмосферных ЯКр впервые были разработаны в 1940-х гг. В некоторых из первых экспериментов с ЯКр, содержащимися в атмосферном воздухе, использовалась облачная камера. Облака в ней создавались либо охлаждением воздуха за счет расширения (облачная камера расширения), либо подачей более теплого влажного воздуха в холодную камеру (облачная камера смешения [1]), создавая капельное облако, и в последствии проводились наблюдения замерзания капель [23]. Результаты экспериментов показывают большие вариации, источники которых могут быть связаны с отбираемыми пробами аэрозолей, используемыми методами или ошибками в ходе экспериментов. Некоторые камеры расширения могут быть портативными для проведения натуральных измерений в атмосфере [6, 41]. Облачная камера непрерывного потока, или облачная камера осаждения появилась позже [19] как портативный вариант диффузионной камеры для отбора проб в режиме реального времени с самолета и для возможности длительного отбора проб на удаленных объектах. Начиная только с 1960-х гг. были разработаны методики для измерения концентрации атмосферных ЯКр, которые собирались при помощи фильтров или подложек. Это позволило проводить исследования образования кристаллов льда на отобранных аэрозолях, путем контроля температуры и пересыщения водяного пара одним из следующих способов:

- 1) изменением температуры более теплой поверхности льда, которая является источником пара, и более холодной подложкой, как, например, в термоградиентной диффузионной камере TGDC (Thermal Gradient Diffusion Chamber) [34];
- 2) охлаждением подложки с аэрозолями, с источником пара в виде переохлажденных капель, расположенных рядом с аэрозолями [2];
- 3) путем пропускания воздуха, отдельно контролируя давление водяного пара над холодной поверхностью подложки при нормальном давлении [20];
- 4) кратковременным обменом кондиционированного воздуха над холодной подложкой при низком давлении, как в изотермической статической диффузионной камере ISDC (Isothermal Static Diffusion Chamber) [8].

С появлением и развитием приборов для измерения ядер кристаллизации, появилась необходимость сравнения этих приборов в одинаковых лабораторных условиях. Первым мероприятием, на котором было проведено такое сравнение, стал международный семинар по измерениям ядер конденсации и кристаллизации, который проходил в 1967 г. в Ланмзан (Франция). Второй международный семинар по измерениям ядер конденсации и кристаллизации был проведен в 1970 г. в Форт-Коллинз (США) [15]. Третий семинар проходил в Ларами (США), на котором проводили измерения уже только ЯКр [37]. В ходе этих семинаров были выявлены различные закономерности. Например, главным фактором в расхождении результатов измерений, проведенных на втором семинаре, была зависимость активации ЯКр от пересыщения воздуха водяным паром [19].

Четвертый международный семинар по измерениям ЯКр был проведен относительно недавно, в 2007 г. (ICIS-2007) [25]. Этот семинар, на котором провели сравнение девяти различных измерительных систем ЯКр, проходил в уникальном экспериментальном комплексе, который был построен в Исследовательском центре Карлсруе для изучения оптических свойств аэрозольных частиц и исследования формирования облаков. Этот комплекс, сочетающий в себе аэрозольную и облачную камеру, получил название AIDA (Aerosol Interactions and Dynamics in the Atmosphere) [39]. Основная камера AIDA (рис. 1) выполнена в виде алюминиевого цилиндра с выпуклыми основаниями, которая располагается внутри специального термоизолированного помещения. Толщина стенок цилиндра составляет 2 см, его высота 7 м, диаметр 4 м, а объем $84,3 \text{ м}^3$. Давление внутри цилиндра может быть понижено до $0,01 \text{ гПа}$ путем откачки воздуха из него двумя насосами. Скорость откачки воздуха можно регулировать до максимальной $400 \text{ м}^3 \text{ ч}^{-1}$. Температуру внутри помещения, в котором расположена основная камера, можно регулировать от 183 К до 333 К . Воздух в помещении охлаждается за счет его циркуляции в теплообменниках, расположенных под цилиндром. Охлаждение воздуха в теплообменниках осуществляется либо жидким хладагентом R404A до 233 К ; либо испарением жидкого азота до 183 К . Также воздух внутри камеры можно охлаждать за счет его расширения, посредством его откачки насосами. Температура внутри камеры измеряется пятью датчиками температуры, расположенными на разных уровнях. Однородность температуры обеспечивается вентилятором в нижней части [24].

Система обнаружения аэрозолей и облачных частиц, расположенная в AIDA, включает в себя различное оборудование, которое позволяет определять размер, концентрацию, фазовое состояние частиц и т.д. [40].

Диффузионные камеры непрерывного потока (счетчики ядер кристаллизации)

Выводы, сделанные в ходе семинаров, дали толчок развитию диффузионных камер непрерывного потока CFDC (Continuous Flow Diffusion Chamber), что позволило создать портативные приборы, способные проводить непрерывные самолетные измерения ЯКр. В этих камерах аэрозольные частицы находятся некоторое время в условиях с различными значениями влажности и постоянной температуре. В CFDC вдоль каждой стенки пропускается ламинарный экранный поток, а между этими экранными потоками направляют отобранный из воздуха поток, содержащий аэрозоли, часть из которых могут быть ЯКр. Стенки внутри камеры покрыты ледяной коркой. Из-за

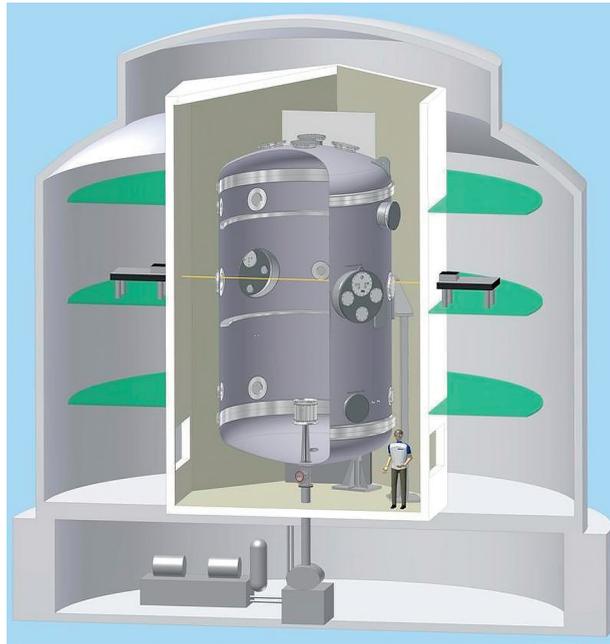


Рис. 1. Аэрозольная и облачная камера AIDA [42]

разности температур между стенками возникает диффузия молекул воды, направленная от теплой стенки к холодной. За счет разницы температур между стенками можно регулировать поток диффузии и тем самым регулировать влажность в зазоре между стенками. Первые CFDC были двух типов, отличных по геометрии рабочей камеры и ориентации: горизонтальные с параллельными пластинами [16, 36] и затем вертикальные с цилиндрическими стенками, для уменьшения потерь аэрозолей [30].

Блок-схема первой CFDC с вертикальной ориентацией потока, сконструированного Д. Роджерсом в 1988 г. изображена на рис. 2. Обнаружение ЯКр, т.е. аэрозолей на которых образовался лед, происходит следующим образом. Импактор пропускает в камеру аэрозоли только меньше заданного размера, а оптический счетчик частиц (ОСЧ) на выходе измеряет размер и количество частиц. Если частицы на выходе больше установленного максимального размера на импакторе, значит на них образовался лед и они являются ЯКр. Таким образом определяется доля ЯКр. Но кроме кристаллов льда на аэрозолях могут образоваться капли воды, которые могут давать погрешность при определении количества ЯКр. Поэтому в нижней части камеры расположен отдел испарения. Его стенки покрыты льдом и их температура одинакова. За счет этого давление водяного пара в отделе испарения ниже насыщения по отношению к поверхности воды, но выше насыщения по отношению ко льду. Когда капли попадают в этот отдел, то они испаряются в отличие от кристаллов льда. В некоторых камерах отдела испарения нет, а подсчет кристаллов льда ведется на основе различия рассеивающих и поляризационных свойств кристаллов льда и капель воды [26].



Рис. 2. Блок-схема диффузионной камеры непрерывного потока с вертикальной ориентацией потока [30]

За более чем 25 лет использования CFDC широкое применение получил только цилиндрический тип и была разработана система отбора проб для самолетных и наземных измерений [31]. Этот тип CFDC получил дальнейшее развитие, улучшился контроль охлаждения, произошел переход от пассивной к активной системе испарения, улучшились характеристики прибора. Сравнительно недавно были сконструированы CFDC с рабочей камерой в виде параллельных пластин с горизонтальной [18] и вертикальной [33] ориентацией потока.

В некоторых CFDC имеется возможность отбора ЯКр для физико-химических анализов с помощью электронной микроскопии [28] или для масс-спектрометрии [11].

В таблице приведены для сравнения основные технические характеристики CFDC, изготовленной Д. Рождерсом в 1988 г. [30], и современные MINC (Manchester Ice Nucleus Counter), с рабочей камерой в виде двух концентрических цилиндров [17], и ZINC (Zurich Ice Nucleation Chamber), с рабочей камерой в виде двух параллельных пластин [33].

Диффузионные камеры непрерывного потока позволяют определять концентрацию ЯКр непосредственно в атмосфере (на борту самолета) при регулируемых температурно-влажностных условиях. Однако экспериментальные установки данного типа не позволяют определять тип аэрозолей, выступающих в роли ЯКр, а также важный их параметр — площадь их поверхности. Все это позволяет осуществлять сопоставление данных измерений с данными математических моделей только на качественном уровне, но не на количественном.

Параметры диффузионных камер непрерывного потока

Параметр	Установка CFDC		
	Роджерса	MINC	ZINC
Отбираемый поток, л/мин.	1	1	1
Экранные потоки, л/мин.	4,5	4,5	4,5
Общий поток, л/мин.	10	10	10
Ориентация потока	Вертикальная	Вертикальная	Вертикальная
Геометрия камеры	Цилиндрическая	Цилиндрическая	Плоско-параллельная
Диапазон температур, К	от 253 до 267	–	от 236
Максимальная влажность, %	130	–	130
Общая длина камеры, мм	460	750	1000
Система обнаружения	Импактор с ОСЧ	Импактор с ОСЧ	Оптический детектор льда с ОСЧ

Установки для исследования иммерсионного механизма кристаллизации

При необходимости измерять количественные характеристики аэрозолей, выступающих в качестве ЯКр, появляется необходимость в лабораторных исследованиях иммерсионной кристаллизации, когда охлаждаются капли, содержащие в себе исследуемые частицы. При этом используются устройства более простые в плане конструкции. При исследованиях иммерсионной кристаллизации применяются как специально изготовленные для этих целей установки [29, 9], так и приборы, позволяющие охлаждать капли до нужных значений температуры и фиксировать момент замерзания, например, дифференциальный сканирующий калориметр [27, 22].

В большинстве установок исследуемые образцы располагаются на подложке. Чтобы избежать перегонки водяного пара с капель воды на кристаллы льда, исследуемые капли погружают в масло, а основание подложки обрабатывают специальными веществами для увеличения угла смачивания. Использование различных веществ, контактирующих с каплей, вносит некоторую долю неопределенности в интерпретацию результатов измерений.

Для преодоления этих трудностей даже была разработана установка, в которой капля подвешивается в воздухе с помощью акустического левитатора [13]. Эта установка состоит из морозильной камеры, в которой находится изолированная камера с левитатором. Две CCD-камеры записывают на диск изображение подвешенной в левитаторе переохлажденной капли. Одна камера расположена сверху, на морозильной камере, где она записывает процесс введения капли в стоячие волны, образующиеся за счет интерференции излучаемых и отраженных волн. Вторая CCD-камера находится внутри морозильной камеры, в термически изолированной коробке с подогревом окна. Момент замерзания капли фиксируется по изменению прозрачности капли. Установка позволяет проводить исследования замерзания капель от температуры 188 К.

Экспериментальная установка LINC

В период с 2010 по 2014 г. авторами этой статьи была сконструирована экспериментальная установка LINC (Laboratory Ice Nucleation Chamber), которая позволяет исследовать иммерсионное образование кристаллов льда в переохлажденных каплях водных растворов.

Блок-схема установки представлена на рис. 3, а внешний вид на рис. 4. Измерение размеров образцов субстратов осуществляется с помощью оптического стереоскопического микроскопа МСП-1 (7), позволяющего получать изображение объектов при плавном увеличении от 5х до 80х, а также с помощью цифровой системы регистрации Praktica LM 10-XS. Подготовленные образцы (капли с частицами) размещаются на подставку (8), охлаждаемую холодной стороной термоэлектрического модуля Пельтье (1), напряжение питания которого задается с помощью программируемого блока питания VELLEMAN PS3005D (2), подключенного к персональной ЭВМ. Также при помощи ЭВМ производится управление охлаждением капель. Отвод тепла от теплой стороны термоэлектрического модуля осуществляется с помощью воздушной системы охлаждения и морозильной камеры FROSTOR F200C (3). Эта измерительная система позволяет проводить исследования в диапазоне температур от 233 до 273 К.

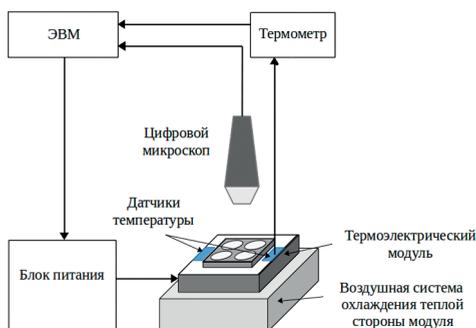


Рис. 3. Блок-схема экспериментальной установки LINC для исследования иммерсионной кристаллизации переохлажденных капель

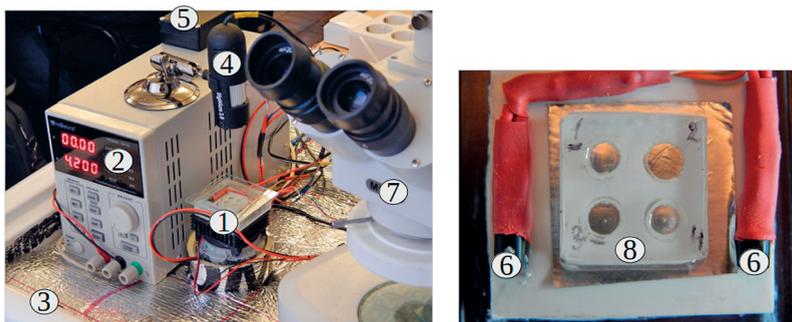


Рис. 4. Внешний вид экспериментальной установки LINC

Температура капле регистрируется с помощью цифрового термометра MP707 (5) с двумя датчиками температуры DS18B20 (6). Изображения капле в ходе проведения эксперимента регистрируются цифровым микроскопом DigiMicro2.0 (4) и записываются в память ЭВМ для определения момента замерзания капле по изменению интенсивности рассеянного света от осветителя.

Методика проведения экспериментов состоит в следующем. С помощью цифрового оптического микроскопа МСП-1 измеряются наибольший и наименьший линейный размер исследуемых частиц, выступающих в роли ЯКр. Площадь поверхности ЯКр рассчитывается по формуле для вытянутого эллипсоида вращения:

$$S_s = 2\pi a \left(a + \frac{b^2}{\sqrt{b^2 - a^2}} \arcsin \left(\frac{\sqrt{b^2 - a^2}}{b} \right) \right), \quad (1)$$

где a — малая полуось эллипсоида; b — большая полуось эллипсоида.

Затем ЯКр помещаются с помощью специальной иглы внутрь капле и располагаются в четыре небольшие ячейки на подставке (8), которые заполняются маслом. Основание подставки охлаждается от комнатной температуры вплоть до 233 К с заданной скоростью и при этом фиксируются значения времени и температуры капле. Эксперимент продолжается до замерзания каждой из четырех капле. Дополнительно фиксируется момент времени, отсчитываемый от момента понижения температуры до 273 К, при котором происходит замерзание капли (τ_c).

После проведения значительного количества экспериментов проводится обработка данных: на основе информации о временном ходе температуры капле (T_τ), времени замерзания (τ_c) и площади ЯКр внутри капли (S_s) рассчитывается значение универсальной характеристики данного типа ЯКр — удельной линейной энергии образования плоского кристалла льда на поверхности частицы.

Основой методики обработки является зависимость вероятности замерзания капли (P) от времени:

$$P = 1 - \exp \left[S_s \int_{\tau_0}^{\tau} J^{het}(T, \alpha) d\tau \right]. \quad (2)$$

Здесь используется классическая теория кристаллизации для определения скорости гетерогенного образования ледяных ядер (J^{het}) [3, 4]:

$$J^{het}(T, \alpha) = J_0^{het} \exp \left(\frac{-\Delta G_{max}}{kT} \right) \exp \left(\frac{-\Delta G_{act}}{kT} \right),$$

$$J_0^{het} = \frac{kT}{h} \left(\frac{\rho_w}{m_w} \right)^{2/3},$$

$$\Delta G_{\max} = \frac{\alpha^2 \pi m_w^{2/3}}{\rho_w^{2/3} L_{wi} \ln\left(\frac{T_0}{T}\right)},$$

$$\Delta G_{act} = 3,6 \times 10^{-20} - 7,3 \times 10^{-22} (T - T_0),$$

где ΔG_{\max} — работа образования ядра кристалла льда на поверхности субстрата, Дж; ΔG_{act} — энергия активации, Дж; k — постоянная Больцмана, равная $1,3806488 \times 10^{-23}$ Дж/К; T — температура, К; h — постоянная Планка, равная $6,62606957 \times 10^{-34}$ Дж/с; ρ_w — плотность воды, кг/м³; m_w — масса молекулы воды, равная $2,99152 \times 10^{-26}$ кг; α — удельная линейная энергия, Дж/м; L_{wi} — теплота фазового перехода из воды в лед, Дж; T_0 — температура плавления льда, равная 273,16 К.

Все эксперименты нумеруются в порядке возрастания времени кристаллизации капель и для каждого эксперимента определяется значение вероятности замерзания капель:

$$P_i = \frac{i}{N-1}, \tag{3}$$

где i — порядковый номер эксперимента; N — число экспериментов с данным типом ЯКр. Плотность активных центров кристаллизации вычисляется по формуле:

$$n_i = \frac{\ln(1-P_i)}{S_{s(i)}}. \tag{4}$$

Значение удельной линейной энергии получается путем минимизации функции:

$$\sum_{i=0}^{N-1} \left[n_i - \int_{\tau_0}^{\tau_{c(i)}} J^{het}(T_i(\tau_i), \alpha) d\tau \right]^2 = \min. \tag{5}$$

Заключение

Представленный обзор экспериментальных установок для исследования процесса образования льда в атмосфере отражает часть большого многообразия технических решений, направленных на изучение этого интересного и важного атмосферного процесса.

Разработанная нами экспериментальная установка отличается сравнительной простотой изготовления и эксплуатации, но при этом позволяет получать количественные значения параметров математических моделей кристаллизации и осуществлять исследования на высоком научном уровне.

Литература

1. Аксенов М.Я., Вычужанина М.В., Мирошниченко В.И., Соловьев А.Д. Исследование кинетики проявления природных и искусственных ледяных ядер в камере «САЛЯ». // Труды ЦАО, 1992, вып. 177, с. 159–167.
2. Богданова С.Л. Новая диффузионная камера для проявления льдообразующих ядер на мембранных фильтрах или подложках. // Труды ЦАО, 1988, вып. 171, с. 95–104.
3. Чукин В.В., Платонова А.С. Скорость гомогенного льдообразования в водных растворах. // Ученые записки РГГМУ, 2009, № 9, с. 70–79.
4. Чукин В.В., Платонова А.С. Результаты численного моделирования гетерогенной кристаллизации переохлажденных капель водных растворов. // Перспективы науки, 2010, № 5(07), с. 12–18.
5. Baker M. Cloud Microphysics and Climate. // Science, 1997, vol. 276, pp. 1072–1078.
6. Bigg E.K. A new technique for counting ice forming nuclei in aerosols. // Tellus, 2010, vol. 9(3), pp. 394–400.
7. Bruinjtjes R.T. A Review of Cloud Seeding Experiments to Enhance Precipitation and Some New Prospects. // Bull. Amer. Meteorol. Soc., 1999, vol. 80, pp. 805–820.
8. Bundke U., Nillius B., Jaenicke R., Wetter T., Klein H., Bingemer H. The Fast Ice Nucleus Chamber FINCH. // Atmos. Res., 2008, vol. 90, pp. 180–186.
9. Budke C., Koop T. BINARY: an optical freezing array for assessing temperature and time dependence of heterogeneous ice nucleation. // Atmos. Meas. Tech. Discuss., 2014, vol. 7, pp. 9137–9172.
10. Cantrell W., Heymsfield A. Production of Ice in Tropospheric Clouds: A Review. // Bulletin of the American Meteorological Society, 2005, vol. 86, iss. 6, pp. 795–807.
11. Cziczo D.J., et al. A method for single particle mass spectroscopy of ice nuclei. // Aerosol Sci. Technol., 2003, vol. 37, pp. 460–470.
12. DeMott P.J., Prenni A.J., Liu X., Kreidenweis S.M., Petters M.D., Twohy C.H., Richardson M.S., Eidhammer T., Rogers D.C. Predicting global atmospheric ice nuclei distributions and their impacts on climate. // Proceedings of the National Academy of Sciences, 2010, vol. 107, no. 25, pp. 11217–11222.
13. Ettner M., Mitra S.K., Borrmann S. Heterogeneous freezing of single sulphuric acid solution droplets: laboratory experiments utilizing an acoustic levitator. // Atmos. Chem. Phys., 2004, vol. 4, pp. 1925–1932.
14. Forster P., Ramaswamy V., Artaxo P., Bernsten T., Betts R., Fahey D.W., Haywood J., Lean J., Lowe D.C., Myhre G., Nganga J., Prinn R., Raga G., Schulz M., Van Dorland R. Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing, Climate Change, 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Eds.: S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, H.L. Miller. — Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York City, NY, USA, 2007.
15. Grant L.O., Ed. The Second International Workshop on Condensation and Ice Nuclei: Report on Workshop Goals, Program, Instruments, Observations, and Preliminary Analyses; Colorado State University, 149 pp, 1971.
16. Hussain K., Saunders C.P.R. Ice nucleus measurement with a continuous flow chamber. // Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 1984, vol. 110, pp. 75–84.
17. Jones H., Flynn M., DeMott P., Möhler O. Manchester Ice Nucleus Counter (MINC) measurements from the 2007 International Workshop on Comparing Ice Nucleation Measuring Systems (ICIS- 2007). // Atmos. Chem. Phys., 2011, vol. 11, pp. 53–65.
18. Kanji Z.A., Abbott J.P.D. The University of Toronto Continuous Flow Diffusion Chamber (UT-CFDC): A simple design for ice nucleation studies. // Aerosol Sci. Technol., 2009, vol. 43, pp. 730–738.
19. Langer G. Analysis of results from the Second International Ice Nucleus Workshop with emphasis on expansion chambers, NCAR counters, and membrane filters. // J. Appl. Meteor., 1973, vol. 12, pp. 991–999.
20. Langer G., Rodgers J. An experimental study of the detection of ice nuclei on membrane filters and other substrata. // J. Appl. Meteor., 1975, vol. 14, pp. 560–570.
21. Lohmann U. A Glaciation Indirect Aerosol Effect Caused by Soot Aerosols. // Geophysical Research Letters, 2002, vol. 29, iss. 4.
22. Marcolli C., Gedamke S., Peter T., Zobrist B. Efficiency of immersion mode ice nucleation on surrogates of mineral dust. // Atmos. Chem. Phys., 2007, vol. 7, pp. 5081–5091.
23. Mason B.J. The cloud chamber as a tool in cloud physics. // Contemp. Phys., 1962, vol. 4, pp. 27–48.
24. Möhler O., Stetzer O., Schaefers S., Linke C., Schnaiter M., Tiede R., Saathoff H., Krmer M., Mangold A., Budz P., Zink P., Schreiner J., Mauersberger K., Haag W., Krcher B., Schurath U. Experimental investigation

- of homogeneous freezing of sulphuric acid particles in the aerosol chamber AIDA. // *Atmos. Chem. Phys.*, 2003, vol. 3, pp. 211–223.
25. *Möhler O., DeMott P.J., Stetzer O., the ICIS-2007 team.* The Fourth International Ice Nucleation Workshop ICIS-2007. // *Proceedings to the 15 th International Conference on Clouds and Precipitation, Cancun, Mexico, 7–11 July, 2008.*
 26. *Nicolet M., Stetzer O., Lüönd F., Möhler O., Lohmann U.* Single ice crystal measurements during nucleation experiments with the depolarization detector IODE. // *Atmos. Chem. Phys.*, 2010, vol. 10, pp. 313–325.
 27. *Pinti V., Marcolli C., Zobrist B., Hoyle C.R., Peter T.* Ice nucleation efficiency of clay minerals in the immersion mode. // *Atmos. Chem. Phys.*, 2012, vol. 4, pp. 5859–5878.
 28. *Prenni A.J., DeMott P.J., Rogers D.C., Kreidenweis S.M., McFarquhar G.M., Zhang G., Poellot M.R.* Ice nuclei characteristics from M-PACE and their relation to ice formation in clouds. // *Tellus*, 2009, vol. 61B, pp. 436–448.
 29. *Pummer B.G., Bauer H., Bernardi J., Bleicher S., Grothe H.* Suspendable macromolecules are responsible for ice nucleation activity of birch and conifer pollen. // *Atmos. Chem. Phys.*, 2012, vol. 12, pp. 2541–2550.
 30. *Rogers D.C.* Development of a continuous flow thermal gradient diffusion chamber for ice nucleation studies. // *Atmos. Res.*, 1988, vol. 22, pp. 149–181.
 31. *Rogers D.C., DeMott P.J., Kreidenweis S.M., Chen Y.* A continuous flow diffusion chamber for airborne measurements of ice nuclei. // *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 2001, vol. 18, pp. 725–741.
 32. *Spurny K.* Atmospheric Condensation Nuclei. P.J. Coulier 1875 and J. Aitken 1880 (historical review). // *Aerosol Sci. Technol.*, 2000, vol. 32, pp. 243–248.
 33. *Stetzer O., Baschek B., Lüönd F., Lohmann U.* The Zurich Ice Nucleation Chamber (ZINC). A new instrument to investigate atmospheric ice formation. // *Aerosol Sci. Technol.*, 2008, vol. 42, pp. 64–74.
 34. *Stevenson C.M.* An improved millipore filter technique for measuring the concentrations of freezing nuclei in the atmosphere. // *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1968, vol. 94, pp. 35–43.
 35. *Szyrmer W., Zawadzki I.* Biogenic and Anthropogenic Sources of Ice-Forming Nuclei: A Review. // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 1997, vol. 78(2), pp. 209–228.
 36. *Tomlinson E.M., Fukuta N.* A new horizontal gradient, continuous flow, ice thermal diffusion chamber. // *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 1985, vol. 2, pp. 448–467.
 37. *Vali G.* The Third International Workshop on Ice Nucleus Measurements. — University of Wyoming, 1976. — 187 p.
 38. *Vali G.* Nucleation Terminology. // *B. Am. Meteor. Soc.*, 1985, vol. 66, pp. 1426–1427.
 39. *Wagner R., Bunz H., Linke C., Möhler O., Naumann K.H., Saathoff H. et al.* Chamber simulations of cloud chemistry: the AIDA chamber. Eds. I. Barnes, K.J. Rudzinski. // *Proceedings of the NATO advanced research workshop on environmental simulation chambers: application to atmospheric chemical processes.* — Berlin: Springer, 2006.
 40. *Wagner R., Linke C., Naumann K.H., Schnaiter M., Vragel M., Gangl M., Horvath H.* A review of optical measurements at the aerosol and cloud chamber AIDA. // *J. Quant. Spectrosc. Ra.*, 2009, vol. 110, iss. 11, pp. 930–949.
 41. *Warner J.* An instrument for measurement of freezing nucleus concentrations. // *Bull. Obs. Puy de Dome*, 1957, no. 2, pp. 33–46.
 42. Institute for Meteorology and Climate Research: Aerosol Interaction and Dynamics in the Atmosphere (AIDA). — Электронный ресурс: [<http://www.imk-aaf.kit.edu/73.php>].