## Диагностика ледяных ядер в облаках по данным прибора SEVIRI

В.В. Чукин, И.Н. Мельникова, Т.Т. Нгуен, В.Н. Никулин, А.Ф. Садыкова, А.М. Чукина

Российский государственный гидрометеорологический университет Санкт-Петербург, 195196, Россия E-mail: chukin@meteolab.ru

Информация о концентрации и типе ледяных ядер в облаках является необходимой для повышения точности прогнозирования возникновения, развития облаков и выпадения осадков. В работе рассматриваются разработанные алгоритмы определения оптической толщины облаков, оценки их фазового состояния и параметров ледяных ядер в облаках по данным прибора SEVIRI. Процесс обработки изображений состоит из нескольких этапов. Первый этап заключается в распознавании облачных пикселей и последующем анализе данных только для выделенных пикселей. Оправдываемость алгоритма распознавания составляет 77%. На втором этапе производится определение оптической толщины облаков, оценка водо- и льдозапаса облаков, а также фазового состояния облака. Заключительных третий этап обработки заключается в оценке кристаллизующих свойств ледяных ядер в облаках по значениям температуры на верхней границе облаков и фазового состояния облака. Представлены результаты апробации алгоритмов. Для интерпретации полученных результатов осуществлена серия лабораторных экспериментов по измерению кристаллизующих свойств естественных ледяных ядер. Для этих целей использовалась установка LINC, позволяющая определять температуры кристаллизации различных нерастворимых частиц в иммерсионном режиме кристаллизации. Получены оценки средних значений линейной удельной энергии перехода вода – лед для ледяных ядер – частиц каолинита (18 пДж/м) и кварца (20 пДж/м). Представленные алгоритмы позволяют осуществлять дистанционную диагностику ледяных ядер в облаках и тем самым получать информацию о потенциальной возможности развития процессов осадкообразования. Получаемая также информация о фазовом состоянии облаков может найти применение при оперативном мониторинге зон обледенения летательных аппаратов.

Ключевые слова: оптическая толщина облаков, водозапас облаков, льдозапас облаков, фазовое состояние облаков, кристаллизация переохлажденных капель воды, ледяные ядра, спектрометр SEVIRI

#### Введение

Как известно, тропосферные облака состоят из капель воды и кристаллов льда. Исследования условий образования ледяной фазы в облаках являются актуальными, поскольку кристаллы льда играют важную роль, влияя как на гидрологический цикл путем стимулирования выпадения осадков, так и на радиационный баланс посредством изменения отражательных свойств облаков. Содержание ледяных ядер, вызывающих замерзание переохлажденных капель воды, зависит от географических, метеорологических факторов, а также от содержания аэрозолей в воздухе.

Отсутствие оперативной информации о концентрации и типе ледяных ядер является ограничивающим фактором для точного прогнозирования возникновения, развития облаков и выпадения осадков. Получение подобной информации повысит точность прогнозов погоды и оценок региональных изменений климата.

Прибор SEVIRI устанавливается на геостационарных спутниках серии MSG и имеет 12 спектральных каналов в диапазоне длин волн от 0,56 до 14,4 мкм. Первые три канала прибора регистрируют преимущественно отраженное солнечное электромагнитное излучение, которое несет информацию об оптических свойствах подстилающей поверхности и атмосферы.

Предлагаемый в данной работе алгоритм определения оптических свойств облачной атмосферы основан на их зависимости от высоты Солнца, которая меняется с течением времени.

### Распознавание облаков по данным прибора SEVIRI

Предварительным этапом в алгоритме определения параметров облаков по спутниковым данным является выделение пикселей изображения, занятых облаками. Для этих целей, проведя обзор литературы (Bley, Deneke, 2013; Hocking et al., 2011; Wilt et al., 2006), мы выделили шесть критериев, позволяющих распознавать облака на фоне различных типов подстилающей поверхности:

1) альбедо поверхности на длине волны 0,6 мкм (А006);

2) отношение альбедо на длине волны 0,8 мкм к альбедо на длине волны 0,6 мкм (R0806);

3) альбедо поверхности на длине волны 1,6 мкм (А016);

4) разность яркостных температур на длинах волн 3,9 и 10,8 мкм с учетом зенитного угла Солнца (D0410);

5) яркостная температура на длине волны 10,8 мкм (Т108);

6) разность яркостных температур на длинах волн 10,8 и 12,0 мкм (D1012).

На *рис.* 1 представлены гистограммы распределения повторяемости значений каждого критерия для нескольких типов подстилающей поверхности: облака над водной поверхностью, облака над сушей, растительность, пустыня, снег, лед, вода.



Рис. 1. Распределение повторяемости значений параметров для различных типов подстилающей поверхности: 1 - облака над водной поверхностью; 2 - облака над сушей; 3 - растительность; 4 - пустыня; 5 - снег; 6 - лед; 7 - вода

Для каждого из пяти правил нами установлен весовой коэффициент, пропорциональный частоте повторения событий распознавания по данному критерию (см. *табл. 1*).

Правило	Диапазон значений	Повторяемость, %	Весовой коэффициент	
A006	0,4 0,6	9,3	0.610	
A016	0,25 0,55	16,7	0,010	
R0806	1,02 1,10	13,8	0,123	
D0410	2 7	10,9	0,129	
T108	<287	32,7	0,049	
D1012	-0,5 0,7	16,6	0,090	

Таблица 1. Параметры решающих правил распознавания облаков

В процессе обработки изображения, для каждого пикселя определяется вероятность того, что он занят облаками, путем суммирования весовых коэффициентов всех выполняющихся правил. Решение о том, считать ли пиксель «облачным» или нет, принимается на основе сопоставления суммы весов с пороговым значением, принятым равным 0,17. Выбор этого значения был осуществлен исходя из требования минимизации вероятности ложных срабатываний, которая при данном пороге составляет 77%. Пример распознавания облачных пикселей представлен на *рис. 2*.



Рис. 2. Пример распознавания облачных пикселей: альбедо поверхности в 1 канале (а) и облачная маска (б)

### Алгоритм определения фазового состояния облаков

Для решения прямой задачи дистанционного зондирования используется модель облачной атмосферы, характеризуемая следующими параметрами: оптическая толщина, альбедо однократного рассеяния, альбедо подстилающей поверхности, зенитный угол Солнца, параметр асимметрии индикатрисы рассеяния.

Проведенное сравнение оптических моделей облачной атмосферы на основе асимптотических формул теории переноса радиации и приближения Эддингтона показало, что в случае слабого поглощения радиации в облаке аэрозолями и кристаллами льда (при альбедо однократного рассеяния более 0,99), обе модели дают сопоставимые результаты. Однако на длине волны 1,6 мкм (3 канал SEVIRI) значительно поглощение кристаллами льда, и альбедо однократного рассеяния может уменьшаться до 0,93, где асимптотическая модель неприменима. На основании этого мы остановили свой выбор на оптической модели Эддингтона.

Алгоритм обработки спутниковых данных SEVIRI с целью определения оптической толщины облачной атмосферы основан на зависимости данного параметра от регистрируемого альбедо системы облако-подстилающая поверхность (A) и зенитного угла Солнца (z):

$$\tau = f(A, z).$$

По результатам обработки данных описанным выше способом получаются значения оптической толщины атмосферы для первого  $(\tau_1)$  и третьего  $(\tau_3)$  каналов прибора SEVIRI.

Поскольку для длины волны 0,6 мкм (1 канал SEVIRI) поглощение радиации каплями воды и кристаллами льда очень мало, а на длине волны 1,6 мкм (3 канал SEVIRI) кристаллы льда уже существенно поглощают электромагнитное излучение, то оптическая толщина облаков по данным третьего канала определяется в основном кристаллами льда, в то время как оптическая толщина в первом канале зависит от содержания как капель воды, так и кристаллов льда в облаках. На основе этого оптические толщины облачных кристаллов льда ( $\tau_i$ ) и капель воды ( $\tau_w$ ) определяются как:

$$\tau_i = \tau_3, \ \tau_w = \tau_1 - \tau_3$$

Водозапас (*LWP*) и льдозапас (*IWP*) облака определяется из уравнений:

$$\tau_{w} = \frac{LWP}{2,7 \cdot 10^{-3} + 3,5 \cdot 10^{-3} LWP^{0,53}},$$
$$\tau_{z} = 95,2IWP.$$

Фазовое состояние облака (интегральная доля кристаллов льда в облаке) определяется как F = IWP / TWP, где F – интегральная доля кристаллов льда в облаке; TWP – суммарный водо/льдозапас облака, равный LWP+IWP.

Результаты проведенной оценки среднего многолетнего фазового состояния облаков на основе спутниковых климатических данных проекта ISCCP (Rossow, Schiffer, 1999) пред-

ставлены на *рис. 3*. Из представленных данных видно, что наибольшее содержание кристаллов в облаках наблюдается над материками и в южной части Тихого, Атлантического и Индийского океанов.



Рис. 3. Распределение фазового состояния облаков (F) по земному шару

### Алгоритм определения параметров ледяных ядер по спутниковым данным

Фазовое состояние облака (F) может быть оценено не только по его оптическим свойствам, но и с помощью модели гетерогенной кристаллизации капель, учитывающей температуру на верхней границе облака ( $T_{\tau}$ ) и суммарный водозапас облака (*TWP*):

$$F(T_T, TWP, \alpha_s) = \frac{\int_{T_0}^{T_T} f(T, \alpha_s) dT}{T_T - T_B},$$

где  $T_T$  – температура на верхней границе облака;  $T_B$  – температура на нижней границе облака;  $T_0$  – температура плавления льда; f(T) – массовая доля кристаллов льда. В наших расчетах мы предполагаем, что сумма водности и ледности постоянна на всех уровнях облака. Зависимость доли кристаллов льда от температуры:

$$f(T,\alpha_s) = \frac{1}{N_w} \int_{r_c}^{\infty} P(T,r_a,\alpha_s) n(r_a) dr_a$$

где  $P(T, r_a)$  – вероятность кристаллизации капли;  $n(r_a)$  – функция распределения аэрозолей по размерам. В этом уравнении мы предположили, что все аэрозоли являются частицами одного типа и все их поверхностные свойства, описывающие способность образовывать кристаллы льда, описываются одним значением удельной линейной энергии  $\alpha_s$ . Распределение аэрозолей по размерам аппроксимируется KL-распределением на основе значений модального радиуса аэрозолей ( $r_m$ ) и эмпирических параметров распределения (K, L). Зависимость вероятности замерзания капли от температуры и размера субстрата в капле определяется формулой:

$$P(T, r_a, \alpha_s) = 1 - \exp\left(\frac{-4\pi\tau_a^2}{\frac{dT}{d\tau}}\int_T^{T_0} J_{het} dT\right),$$

где  $r_a$  – радиус частички;  $J_{het}$  – скорость образования ледяных ядер. Уравнение для скорости гетерогенного ядрообразования ( $J_{het}$ ) согласно классической теории кристаллизации определяется выражением:

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

где  $J_0$  – предэкспоненциальный множитель; k – постоянная Больцмана;  $\Delta G_{act}$  – энергия активации;  $\Delta G_{max}$  – энергия образования ледяного ядра критического размера (Чукин, Платонова, 2010):

$$\Delta G_{max} = \frac{\pi \alpha_s^2 m_w^{2/3}}{\rho_w^{2/3} L_{wi} \ln \frac{T_0}{T}}.$$

Таким образом, значения  $\alpha_s$  могут определяются по спутниковым данным на основе представленной математической модели кристаллизации как функция трех параметров  $\alpha_s = f(T_T, F, TWP)$ .

Анализ чувствительности значений  $\alpha_s$  к вариациям водозапаса облаков показал малое влияние этого параметра. Для целей уменьшения вычислительных затрат при обработке изображений водозапас можно считать постоянным, и  $\alpha_s$  имеет числовые значения, представленные в *табл. 2*.

Таблица 2. Зависимость	удельной линейной	энергии (пДж/м)	от температуры воздуха
на верхней границе	облаков и фазового	состояния облаков	при TWP=0,1 кг/м <sup>2</sup>

$T_{p} C$	F					
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	
0	1	1	1	1	1	
-10	12	11	11	10	9	
-20	16	16	15	15	13	
-30	19	18	17	17	16	

# Результаты апробации алгоритмов определения фазового состояния облаков и параметров ледяных ядер в облаках

Апробация разработанных алгоритмов осуществлялась по данным из области широт от -5° до 25° и долгот от -50° до 20° размером 1059×2240 пикселей (всего 2372160 пикселей). Результаты расчета повторяемости рассчитанных значений фазового состояния облаков представлены на *рис. 4a*. Из представленных данных видно, что алгоритм дает распределение с модальным значением около 0,87, что соответствует облакам среднего и верхнего ярусов. На *рис. 4б* представлены оценки значений удельной линейной энергии образования кристаллов льда в облаках, показывающие широкий разброс значений, свидетельствующий о различном типе ледяных ядер в исследуемой области.



Рис. 4. Повторяемость значений фазового состояния облаков (a) и удельной линейной энергии образования кристаллов льда в облаке (б)

### Результаты лабораторных исследований ледяных ядер

На кафедре экспериментальной физики атмосферы РГГМУ была сконструирована экспериментальная установка LINC, которая позволяет исследовать гетерогенную иммерсионную кристаллизацию переохлажденных капель воды и водных растворов (Никулин и др., 2015). Внешний вид установки представлен на *рис. 5*. Она состоит из термоэлектрического элемента Пельтье (1), программируемого блока питания (2), системы охлаждения теплой стороны термоэлектрического модуля (3), цифрового микроскопа (4) и цифрового USB термометра (5) с датчиками температуры (6). Эта измерительная система позволяет проводить исследования ядрообразования льда в диапазоне температур от 0 до -30 °С. Для определения температуры и момента замерзания капель в ходе проведения эксперимента изображения капель и температура регистрируются в памяти ЭВМ. Также при помощи ЭВМ производится управление охлаждением капель. Подготовка образцов осуществляется с помощью оптического микроскопа (7). Подготовленные образцы размещаются на подставку (8), каждая в отдельную ячейку.





Рис. 5. Экспериментальная установка LINC для исследования ледяных ядер

Методика проведения экспериментов состоит в следующем. При помощи оптического микроскопа подготавливаются исследуемые частицы, выступающие в роли ледяных ядер. Изображения подготовленных частиц фиксируются на камеру для определения их площади поверхности. После этого каждая из частиц размещается на кончик иглы шприца, из которого выдавливается капля воды, а затем эти капли погружаются в небольшие ячейки, заполненные минеральным маслом. Основание подставки охлаждается вплоть до -30 °C с заданной скоростью, и фиксируются значения температуры, при которой произошло замерзание каждой капли.

На основе данных о температуре замерзания капли и площади ледяных ядер внутри капли рассчитывается значение универсальной характеристики ледяных ядер – удельной линейной энергии образования кристалла льда на поверхности ядра ( $\alpha_s$ ). В результате обработки серии из 265 экспериментов получены оценки этого параметра для частиц каолинита и кварца (см. *рис.* 6), которые являются широко распространенными естественными аэрозолями. Из представленных данных видно, что среднее значение линейной удельной энергии



Рис. 6. Гистограммы распределения значений удельной линейной энергии образования кристаллов льда на поверхности частиц каолинита (а) и кварца (б)

для каолинита равно 18 пДж/м, а для кварца – 20 пДж/м. Это позволяет сделать вывод о более высоких кристаллизующих свойствах частиц каолинита по сравнению с частицами кварца. Таким образом, представленные на рис. 46 данные в диапазоне 18–20 пДж/м с высокими значениями повторяемости можно интерпретировать как частицы каолинита и кварца.

#### Заключение

Представленные в работе алгоритмы позволяют осуществлять дистанционную диагностику параметров ледяных ядер в облаках по данным прибора SEVIRI, что позволяет заблаговременно получать информацию о возможности развития процессов осадкообразования в облаках. Получаемая информация о фазовом состоянии облаков может быть использована для мониторинга зон обледенения летательных аппаратов.

Работа выполнена при поддержке стипендии Института космических исследований РАН

### Литература

- 1. Никулин В.Н., Чукин В.В., Садыкова А.Ф. Экспериментальные установки для исследования образования льда в атмосфере // Ученые записки РГГМУ. 2015. №38. С. 102–112.
- Чукин В.В., Платонова А.С. Результаты численного моделирования гетерогенной кристаллизации переох-2. лажденных капель водных растворов // Перспективы науки. 2010. №.7(5). С. 12–18.
- Bley S., Deneke H. A threshold-based cloud mask for the high-resolution visible channel of Meteosat Second Generation SEVIRI // Atmos. Meas. Tech. 2013. Vol. 6. P. 2713–2723.
  Hocking J., Francis P.N., Saunders R. Cloud detection in Meteosat Second Generation imagery at the Met Office (Notice 1) 100 10
- // Meteorol. Appl. 2011. Vol. 18. P. 307-323.
- 5. Rossow W.B., Schiffer R.A. Advances in Understanding Clouds from ISCCP // Bull. Amer. Meteor. Soc. 1999. Vol. 80. P. 2261–2288.
- 6. Wildt M.R., Seiz G., Grün A. Snow mapping using multi-temporal METEOSAT-8 data // EARSeL eProceedings. 2006. Vol. 5. P. 18-30.

# Diagnosis of ice nuclei in the clouds by SEVIRI data

### V.V. Chukin, I.N. Melnikova, T.T. Nguyen, V.N. Nikulin, A.F. Sadykova, A.M. Chukina

### Russian State Hydrometeorological University Saint-Petersburg, 195196, Russia E-mail: chukin@meteolab.ru

Information on the type and concentration of ice nuclei in clouds is required to improve the accuracy of clouds evolution and precipitation prediction. The paper considers the developed algorithms for determining the optical thickness and phase state of the clouds, parameters of ice nuclei in the clouds by SEVIRI data. Image processing consists of several stages. The first stage is recognition of cloud pixels and analyzing the data only for the selected pixels. Recognition algorithm accuracy is 77%. At the second stage, cloud optical thickness, liquid and ice water path, as well as phase state of the clouds are determined. Final third stage of the processing is estimating the properties of crystallizing ice nuclei from the temperature at the upper boundary of the clouds and the phase state of the clouds. The results of testing of the algorithms are presented. A series of laboratory experiments to measure the properties of natural ice nuclei were carried out for the interpretation of the satellite data. For this purpose, we used the settings LINC which allows determining the temperature of crystallization of various insoluble particles in the immersion mode of crystallization. Average values of the specific linear energy of water-ice transition of ice nuclei - kaolinite particles (18 pJ/m) and quartz particles (20 pJ/m) were estimated. The algorithms enable remote diagnostics of ice nuclei in the clouds and thereby obtaining information on the potential for the development of precipitation processes. Additional information on the phase state of the clouds can be useful in operational monitoring of aircraft icing zones.

Keywords: cloud optical depth, liquid water path, ice water path, cloud phase state, supercooled water droplets, freezing, ice nuclei, SEVIRI

### References

- Nikulin V.N., Chukin V.V., Sadykova A.F. Eksperimental'nyye ustanovki dlya issledovaniya obrazovaniya l'da v atmosfere (The experimental setups for studying the formation of ice in the atmosphere), *Scientific Notes of RSHU*, 2015, Vol. 38, pp. 95–105.
  Chukin V.V., Platonova A.S. Rezul'taty chislennogo modelirovaniya geterogennoy kristallizatsii pereokhlazhden-
- Chukin V.V., Platonova A.S. Rezul'taty chislennogo modelirovaniya geterogennoy kristallizatsii pereokhlazhdennykh kapel' vodnykh rastvorov (The results of numerical modelling of heterogeneous crystallization of supercooled droplets of water solutions), *Science Prospects*, 2010, No 7(5), pp. 12–18.
- 3. Bley S., Deneke H. A threshold-based cloud mask for the high-resolution visible channel of Meteosat Second Generation SEVIRI, *Atmos. Meas. Tech*, 2013, Vol. 6, pp. 2713–2723.
- 4. Hocking J., Francis P.N., Saunders R. Cloud detection in Meteosat Second Generation imagery at the Met Office, *Meteorol. Appl.*, 2011, Vol. 18, pp. 307–323.
- 5. Rossow W.B., Schiffer R.A. Advances in Understanding Clouds from ISCCP, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1999, Vol. 80, pp. 2261–2288.
- 6. Wildt M.R., Seiz G., Grün A. Snow mapping using multi-temporal METEOSAT-8 data, *EARSeL eProceedings*, 2006, Vol. 5, pp. 18–30.