

LES модели полей конвективной облачности в решении задачи восстановления оптико-микрофизических характеристик облаков по данным дистанционного зондирования Земли из космоса

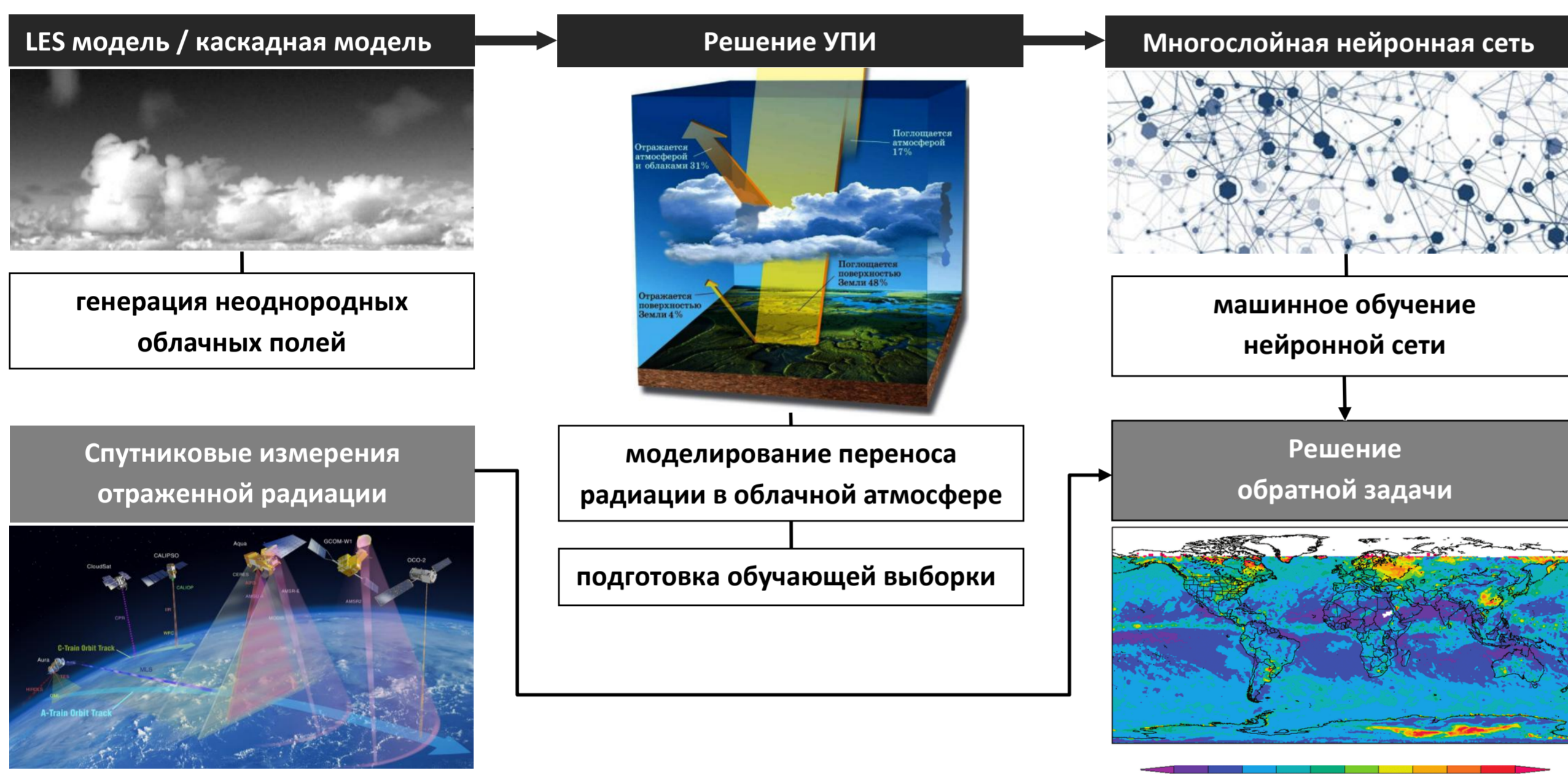
Т.В. Русскова /ИОА СО РАН, г. Томск, Россия, e-mail: btv@iao.ru

Конвективные облака играют существенную роль как в формировании климата Земли, так и в возникновении различных региональных погодных явлений. Степень их воздействия зависит от множества факторов, в том числе от количества, микроструктуры, вертикальной протяженности. Современные прогностические математические модели, например, WRF (Weather Research And Forecasting Model), не позволяют достоверно определить роль облаков в будущих изменениях климата и их обратные связи. Одной из основных причин является упрощенная параметризация облаков в используемых моделях. В частности, практически не учитывается пространственная неоднородность различных разновидностей облаков, а используются IPA-приближения. Их применение существенно снижает точность восстановления таких параметров облачности, как высота верхней и нижней границ, оптическая толщина и эффективный радиус частиц, что негативно сказывается на точности моделирования радиационного переноса согласно данным проекта CERES. При этом действующие космические системы предоставляют большой объем информации о глобальном поле облачности, и вопрос ее всеобъемлющего использования имеет высокую научную и практическую значимость. В работе R. Okamura (2017) отмечается, что 3D эффекты, обусловленные взаимодействием солнечного излучения с облачностью, являются одним из главных факторов, влияющих на величину ошибок восстановления оптических

характеристик облаков по данным спутникового зондирования. Дело в том, что 3D эффекты проявляются в нескольких спутниковых пикселях, что не учитывают традиционные 'однопиксельные' подходы. В настоящее время активно развиваются методы изучения внутренней структуры облаков, в том числе, и неравномерность распределения влагосодержания в них (A. Marshak, 1998; R. Cahalan, 2001). Два десятилетия назад была предпринята попытка восстановить параметры горизонтально неоднородных облаков с использованием искусственных нейронных сетей. В работе T. Faure (2001) показано, что в отличие от классических методов нейросетевой подход позволяет учитывать яркости соседних пикселей, используя их как дополнительные входные признаки. Это обеспечивает возможность восстановления рассматриваемых параметров облачности даже если размер наблюдаемого пикселя настолько большой, что можно пренебречь влиянием горизонтального переноса излучения между ним и окружающими его пикселями. Данный подход получает все большее развитие, поскольку средства искусственного интеллекта позволяют решать сложные задачи в тех случаях, когда классические методы малоэффективны. Для реализации нового подхода необходимы реалистичные оптические модели облаков, наиболее приближенными к которым являются LES модели.

Общая схема алгоритма восстановления

Предлагаемый подход к восстановлению оптических характеристик облаков (оптическая толщина, эффективный радиус частиц) основывается на трех 'китах': (1) модели неоднородного облачного поля, (2) модели радиационного переноса (решение уравнения переноса излучения - УПИ) и (3) нейросетевой модели.



Проблема

- когда неоднородные облака рассматриваются как однородные, изменчивость микрофизических параметров в масштабе меньшем, чем масштаб усреднения, приводит к смещению в расчетах яркости и потоков излучения («plane-parallel bias») (R. Cahalan, 1994b)
- когда оптическая толщина и эффективный радиус неоднородного облака восстанавливаются в предположении о плоском однородном облаке, полученные значения представляют собой соответствующие им «эффективные» значения, которые зависят от неоднородности субпиксельного облака и различаются значительно от их средних значений по пикселю наблюдения (F. Szczap, 2000a)

Модели неоднородных облачных полей

- 2D каскадная модель /фрактальная модель пространственного распределения жидкой воды в облаках, позволяющая сохранять ее баланс в пределах облачного поля; варьируя значениями сравнительно легко измеряемых входных параметров, можно получать различные структуры распределения жидкой воды, пространственные корреляции которых соответствуют наблюдаемым/ (A. Marshak, 1994; R. Cahalan, 1994a)
- UCLA-LES / University of California, Los Angeles / (B. Stevens и др.)
- UCLA-LES SALSA /Finnish Meteorological Institute/ (J. Tontilla, J. Ahola и др.)
- DALES /Dutch Atmospheric LES/ (T. Heus и др.)
- SCALE-LES модель /RIKEN Advanced Inst. for Comput. Science/ (Y. Sato и др.)
- PALM /IMUK of Leibniz Universität Hannover/ (S. Raasch и др., 2001)
- LES модель /"АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ"/ (А. Игнатьев и др.)
- и др.

Почему LES модели?

- наиболее приближены к реальным облакам
- ориентированы на меньшее – по сравнению с CRM (Cloud-Resolving Model) – пространственное разрешение: 50-100 м в LES моделях против 1-4 км в CRM
- вместе с 3D распределением водности LWC, исследователь получает также другие параметры – характеристики размеров капель, распределение температуры, влажности и т.д.
- имеется возможность изучения трансформации облаков во времени, что крайне сложно сделать на основе данных наблюдений

Почему UCLA-LES модель?

- доступность кода (web сервис GitHub)
- гибкий и сравнительно простой инструмент для понимания, а также пользовательского программирования с целью получения необходимых выходных данных
- менее сложные процессы интерпретации, компиляции и запуска в отличие от больших программных модулей (WRF, ECHAM и др.)
- оптимизирована под время пользователя
- широко и в течение длительного времени используется в мировой научной практике

LES модель: UCLA-LES

- область моделирования: 1 – 100 км
- граничные условия по горизонтали: периодические
- общее число точек: 400 x 400 x 100
- продолжительность моделирования: часы / дни



Рис. 1. Визуализация полей кучевых облаков, построенных с помощью UCLA-LES модели; изображение получено в результате 20 ч моделирования

Физическая модель UCLA-LES

- прогностические переменные: 3 компоненты ветра, потенциальная температура жидкой воды, полное влагосодержание
- двухмоментная схема параметризации микрофизических процессов в облаках (A. Seifert и др., 2006)
- модель позволяет решить систему уравнений Навье-Стокса с учетом операций фильтрации для больших масштабов движения и использовать параметризации для малых подсеточных масштабов и диссипации энергии с помощью замыканий на базе модели Смагоринского (данный подход обеспечивает удачный компромисс между точностью моделирования и вычислительной стоимостью)
- параметризация граничных условий на подстилающей поверхности выполнена на базе теории Монина-Обухова

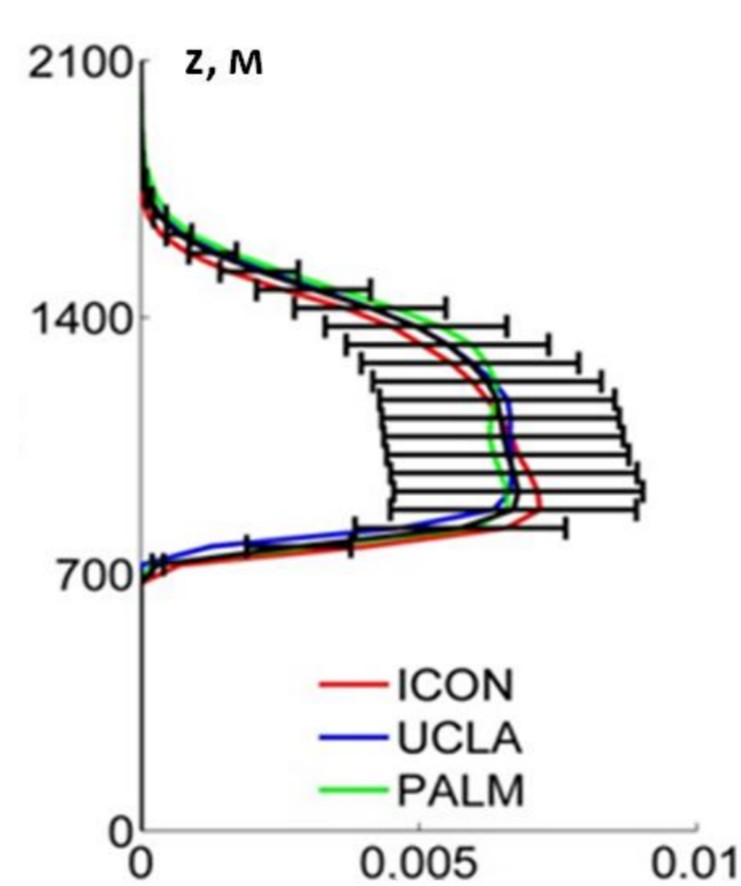
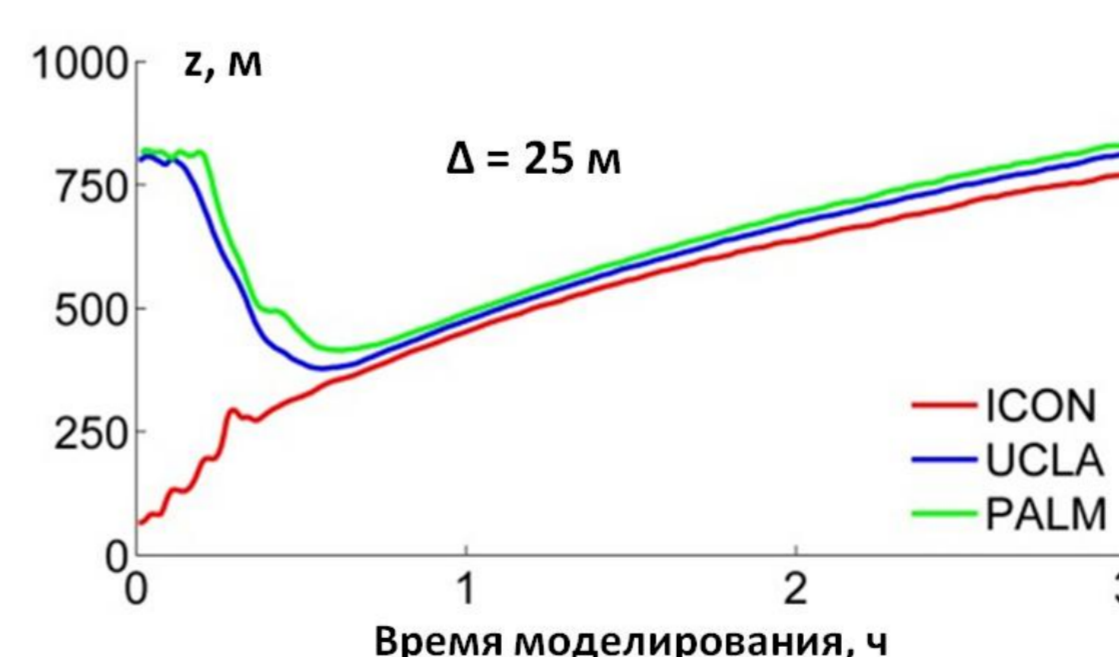


Рис. 2. Средний вертикальный профиль массовой концентрации облачных капель для трех моделей – ICON, PALM и UCLA-LES; вертикальные профили получены при пространственном усреднении по горизонтали и временном усреднении за последние 30 мин



ICON – (ICO)ahedral Nonhydrostatic) модель, используемая для создания глобальных прогнозов погоды и проведения климатических исследований /DWD, Max-Planck-Institut für Meteorologie/

Рис. 3. Эволюция во времени высоты нижней границы облачного поля для моделей ICON, PALM и UCLA-LES

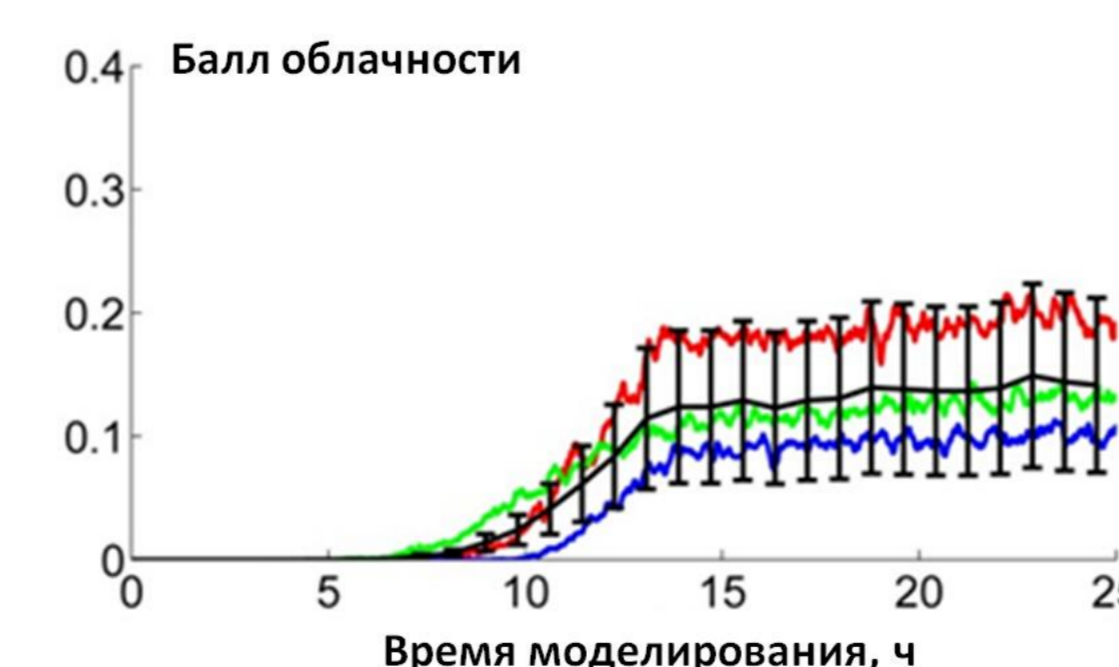


Рис. 4. Эволюция во времени балла облачности для моделей ICON, PALM и UCLA-LES

Литература

- Okamura, R., Iwabuchi, H., and Schmidt, K. S. (2017), Feasibility study of multi-pixel retrieval of optical thickness and droplet effective radius of inhomogeneous clouds using deep learning, *Atmos. Meas. Tech.*, 10, 4747–4759.
- Faure, T., H. Isaka, and B. Guillemet (2001a), Neural network retrieval of cloud parameters of inhomogeneous and fractional clouds: Feasibility study, *Remote Sens. Environ.*, 77, 123–138.
- Marshak, A., A. Davis, R. Cahalan, and W. Wiscombe (1998), Non local independent pixel approximation: Direct and inverse problems, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 36, 192–205.
- Cahalan, R. F., L. Oreopoulos, G. Wen, A. Marshak, T. C. Tsay, and T. DeFolice (2001), Cloud characterization and clear sky correction from Landsat 7, *Remote Sens. Environ.*, 78, 83–98.
- Cahalan, R. F., W. Ridgway, W. J. Wiscombe, S. Golmer, and H. Harshvardhan (1994b), Independent pixel and Monte-Carlo estimates of stratospheric albedo, *J. Atmos. Sci.*, 51, 3776–3790.
- Szczap, F., H. Isaka, M. Sauter, B. Guillemet, and A. Iltukhovski (2000a), Effective radiative properties of bounded cascade non-absorbing clouds: Definition of the equivalent homogeneous cloud approximation, *J. Geophys. Res.*, 105, 20,617–20,634.
- Игнатьев А.А. (2011) LES модель полей конвективных облаков: Труды Главной Геофизической Обсерватории им. А.И. Воейкова, 564, 104–125.
- Dipankar, A., B. Stevens, R. Heinze, C. Moseley, G. Zeng, M. Giorgetta, and S. Brdar (2015), Large eddy simulation using the general circulation model ICON, *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 7, 963–986.