

Технологии метеорологического обеспечения проведения экспериментов и обработки результатов астрофизической обсерватории TAIGA

Ревякин А. И., Мордвин Е. Ю., Лагутин А. А.

Лаборатория космического мониторинга и вычислительных технологий,
АлтГУ, Барнаул



X конференция SDM-2025, посвященная памяти академика Ю.И. Шокина,
г. Белокуриха, 28 августа 2025 г.

Гамма-обсерватория TAIGA



Гамма-обсерватория **TAIGA** (**T**unka **A**dvanced Instrument for cosmic ray physics and **G**amma **A**stronomy) расположена в 50 км к западу от Байкала в Тункинской долине Республики Бурятия. Детекторы различного типа расположены под открытым небом на площади $\sim 1 \text{ км}^2$.

Актуальность исследования

- В настоящий момент в инфраструктуре TAIGA отсутствуют инструменты для оперативного мониторинга характеристик атмосферы. В обсерватории в ночное время измеряется черенковское излучение ШАЛ. Информация о состоянии атмосферы необходима как в реальном времени при планировании и проведении сеансов измерений, так и в виде баз данных на этапе обработки и интерпретации результатов астрофизических наблюдений.
- В ближайшие годы на территории РФ будет развернута полномасштабная обсерватория TAIGA-100 на площади 100 км². В данных условиях важными являются измерения спутниковых инструментов, а также результаты численных моделей.

Цель работы:

состоит в создании системы мониторинга атмосферных параметров в районе расположения обсерватории TAIGA, включающей вычислительный комплекс для восстановления геометрических характеристик облачных слоев в ночное время по данным гиперспектральных ИК-сенсоров AIRS, CrIS и IASI, технологию их краткосрочного прогнозирования по результатам моделей GFS и WRF, а также блок моделирования аэрозольной оптической толщи (AOT) в ночное время с применением GEOS-CHEM.

Информационная база исследования

- Станции приема спутниковой информации АлтГУ:
УниСкан-24 и **ЕОСкан**.
- Прием и обработка в оперативном режиме:
спутники **Terra**, **Aqua**, **SNPP**, **NOAA-20**, **NOAA-21**.
Приборы: **MODIS**, **VIIRS**, **AIRS**, **CrIS**, **ATMS**.
- Обработка «почти» в оперативном режиме:
спутники **MetOp-B**, **MetOp-C**. Прибор **IASI**.



Спутниковые приборы и продукты

- Ключевой инструмент технологии — 2378-канальный гиперспектральный ИК-зондировщик AIRS спутника Aqua. Необходимые в исследовании данные о вертикальных профилях относительной влажности $RH(z)$ и температуры $T(z)$ взяты из исследовательского продукта **AIRS-Only v7**. 100 вертикальных уровней; разрешение ~ 40 км в надире.
- Дополнительная информация — маска облачного покрова по данным 36-канального радиометра MODIS, также установленного на Aqua. Продукт **MYD06** с разрешением ~ 5 км в надире.
- Верификация результатов по данным совместной съемки радара CPR/CloudSat и лидара CALIOP/CALIPSO (продукт **CLDCLASS-lidar**).

Описание методики

Методика нахождения геометрических характеристик облачных слоев базируется на анализе градиентов вертикальных профилей относительной влажности $RH(z)$ и температуры $T(z)$, а также на фильтрации значений $RH(z)$ на высоте z согласно эмпирически найденным пороговым значениям. Метод является развитием подхода, предложенного для радиозондовых измерений.*

Условия для поиска ВНГО:

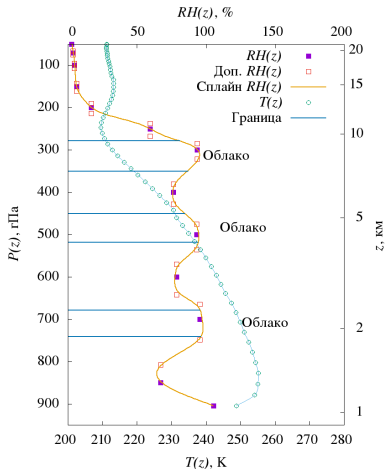
$$\begin{cases} RH'(z) > 0 \ \& \ RH''(z) < 0, \\ T'(z) > 0 \ \& \ T''(z) > 0. \end{cases}$$

Условия для поиска ВВГО:

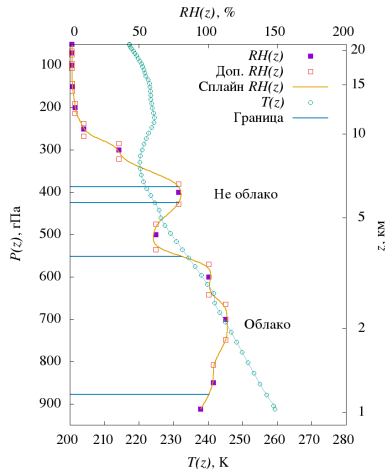
$$\begin{cases} RH'(z) < 0 \ \& \ RH''(z) < 0, \\ T'(z) < 0 \ \& \ T''(z) > 0. \end{cases}$$

*Xu H., Guo J., Tong B. et al. Characterizing the near-global cloud vertical structures over land using high-resolution radiosonde measurements // Atmos. Chem. Phys. 2023. V. 23.

Результаты вычислительного комплекса AIRS/Aqua



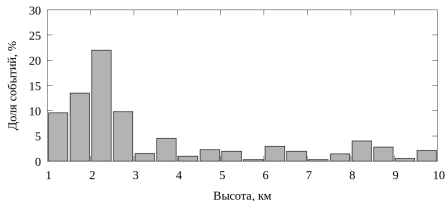
а



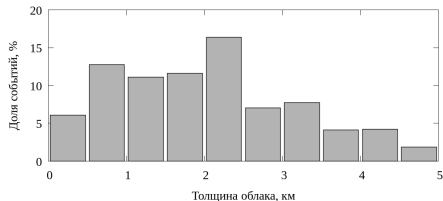
б

Примеры восстановленных границ облачных слоев по данным профилей $T(z)$ и $RH(z)$ гиперспектрометра AIRS/Aqua в ночное время в районе расположения TAIGA: а — 22.01.2011 г.; б — 07.11.2023 г.

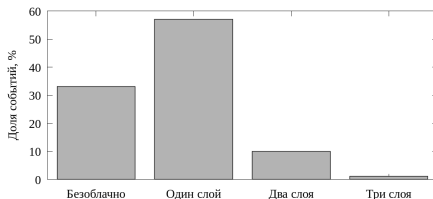
Анализ характеристик облачности



а



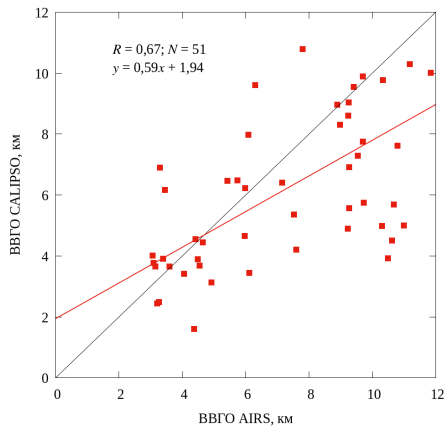
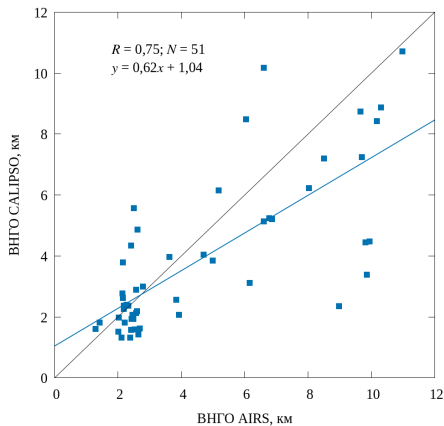
б



в

Распределение ВНГО (а) и толщины (б) ближайшего к поверхности слоя облачности, а также распределение всех событий (в) в ночное время в районе расположения TAIGA по данным AIRS/Aqua в 2002-2024 гг.

Верификация результатов комплекса AIRS/Aqua



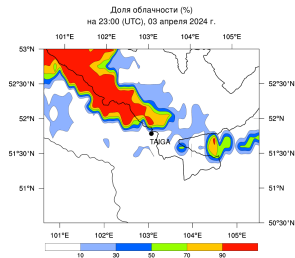
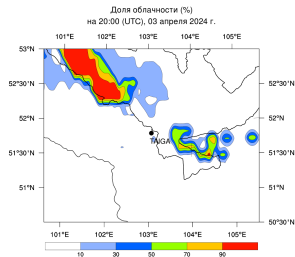
а
б

Диаграммы рассеяния нижней (а) и верхней (б) границ ближайшего к поверхности облачного слоя в районе обсерватории TAIGA по данным AIRS и комплекса CPR/CALIPOP в 2006–2011 гг.

Краткосрочное прогнозирование характеристик облачности

Основные прогнозируемые параметры:
Наличие облачного покрова, высота нижней, верхней границ, толщина облачности.
Технология прогнозирования

- Модель **GFS**:
Версия прогноза T1534 (разрешение 12,5 км).
Шаг по времени — 1 час.
Старт прогноза в 00 UTC.
- Региональное прогнозирование по данным **WRF**:
Два варианта домена:
предварительный с разрешением 27×27 км и итоговый 9×9 км.
Шаг по времени — 1 час.
Граничные условия задаются данными **IFS** (Integrated Forecast System).



Моделирование аэрозольной оптической толщи атмосферы

- Химическая транспортная модель **GEOS-CHEM** v.14.4.3.
- 47 уровней атмосферы.
- Схема хим. взаимодействий — full-chemistry.
- Описание поведения аэрозоля с помощью модуля SOA (Secondary Organic Aerosol).
- Моделирование выполнено в 2 этапа:
в глобальном варианте на сетке $4^\circ \times 5^\circ$;
во вложенной области $40^\circ - 65^\circ$ с.ш., $75^\circ - 120^\circ$ в.д на сетке $0.5^\circ \times 0.625^\circ$. Буферная зона — 3 пиксела.
- Период моделирования 2018–2022 гг. Первый год — прогрев модели.
- Выходной параметр — АОТ($\lambda = 550$ нм).
- Верификация результатов по данным реанализа **CAMS** и станции **AERONET** ИСЗФ СО РАН.

Результаты моделирования и верификация

Период	Минимум	Максимум	Медиана	Среднее
GEOS-CHEM				
Январь — декабрь	0,012	3,474	0,069	0,114
Сентябрь — апрель	0,012	0,582	0,058	0,078
CAMS				
Январь — декабрь	0,002	3,100	0,059	0,098
Сентябрь — апрель	0,002	0,553	0,034	0,051

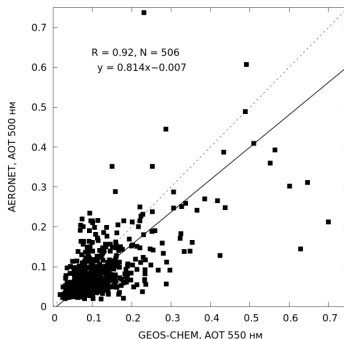


Диаграмма рассеяния значений AOT по данным GEOS-CHEM и AERONET (днем).

- Разработан вычислительный комплекс для восстановления в оперативном режиме геометрических характеристик облачного покрова по данным гиперспектрометров спутниковго базирования AIRS/Aqua, CrIS/JPSS и IASI/MetOp в ночное время в районе расположения гамма-обсерватории TAIGA.
- Предложена система краткосрочного прогнозирования характеристик облачного покрова для периодов черенковских наблюдений. Система объединяет результаты глобальной модели GFS и регионального блока WRF.
- Создана технология для расчета в оперативном режиме AOT для ночного периода времени для района обсерватории TAIGA, которая базируется на численном моделировании с использованием кода GEOS-CHEM.

Благодарю за внимание!



Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант №23-72-00057)