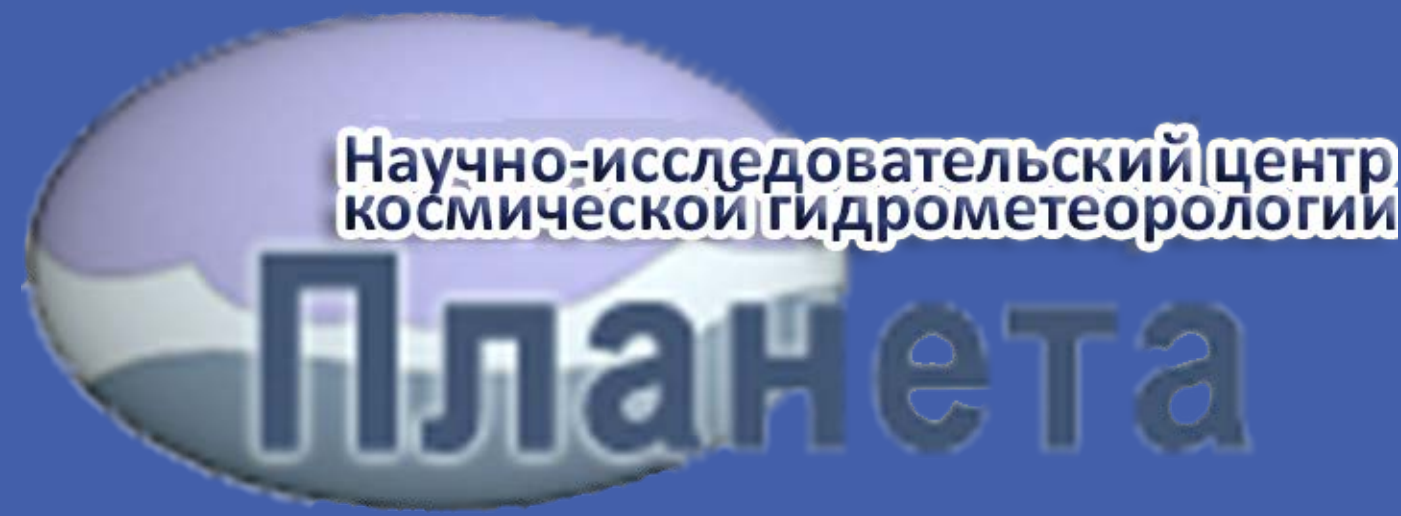


Численное моделирование высокоточного гиперспектрального мониторинга климатической системы Земли с помощью космической группировки CLARREO

Головко В.А.^{1,2)}, Сайто И.В.²⁾



- 1) Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета»
- 2) Московский физико-технический институт (государственный университет)

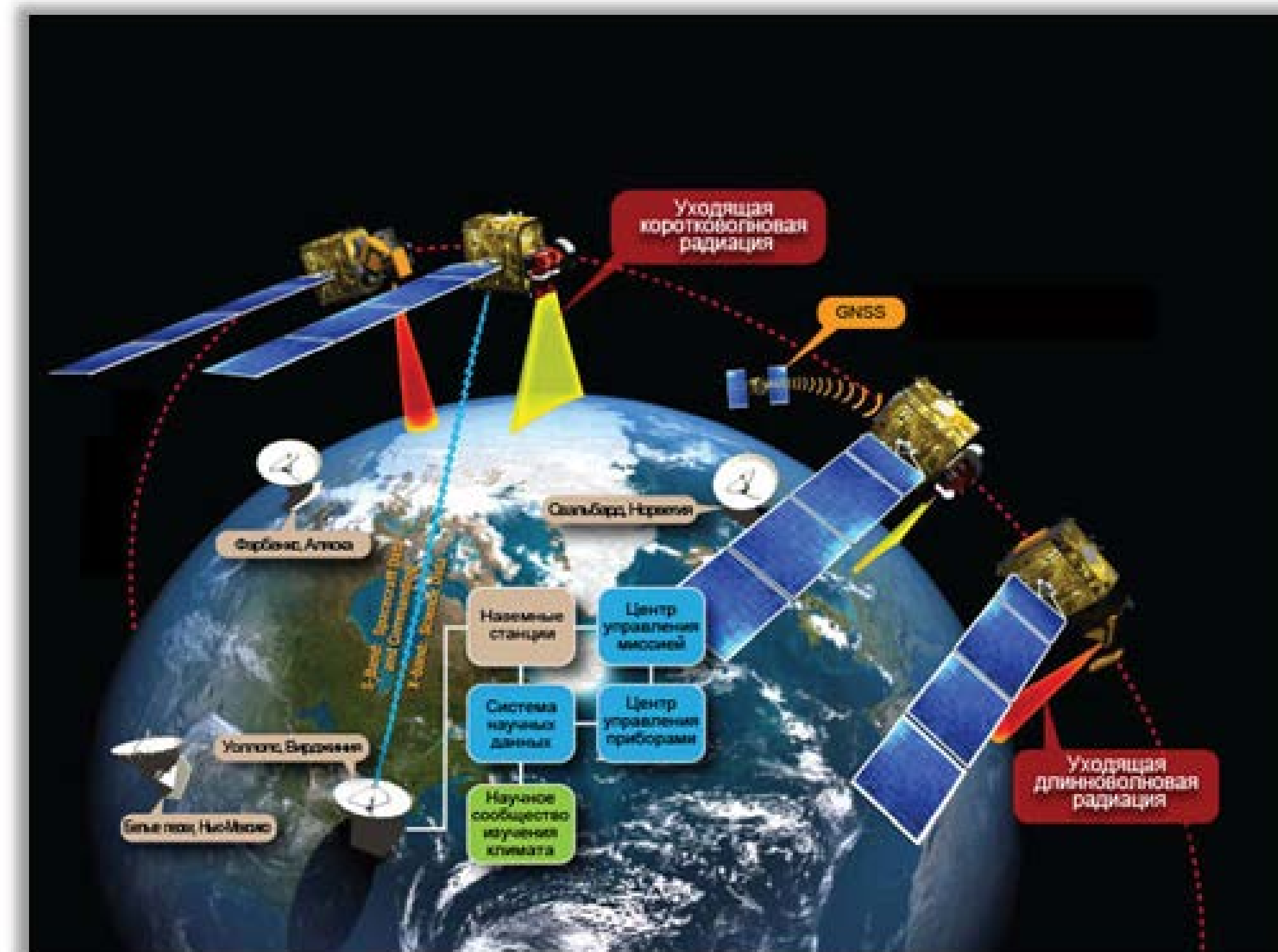
Введение

Глобальный климат Земли определяется радиационным балансом нашей планеты, т.е. балансом полученной Землей солнечной энергии и излученной ею в космическое пространство. Теоретически мониторинг радиационного баланса Земли (РБЗ) должен осуществляться во всём диапазоне длин волн спектра электромагнитного излучения: от нуля до бесконечности, что практически реализовать невозможно, но уже сейчас реальна эксплуатация систем, осуществляющих мониторинг не менее 95% радиационных потоков климатической системы Земли с высоким спектральным разрешением и приемлемой точностью [1].

Основными недостатками действующих космических систем наблюдений за долговременными климатическими изменениями РБЗ, в частности системы CERES, являются их недостаточные аппаратные характеристики: точность, спектральная представительность и стабильность измерений. Кардинально изменить ситуацию должна перспективная космическая система CLARREO (Climate Absolute Radiance and Refractivity Observatory). В преддверие активной фазы миссии CLARREO наиболее актуальной исследовательской задачей является выяснение потенциальных возможностей новейшей системы детектировать малые за длительный промежуток времени изменения основных геофизических параметров, характеризующих климатическую систему Земли.

Главная особенность новейшей системы состоит в переходе от использования радиометров к гиперспектрометрам в качестве основных измерительных приборов. Космическая группировка CLARREO будет формироваться с июля 2018 г. (запуском двух CLARREO-1) по май 2020г. (запуском ещё двух CLARREO-2). Важной отличительной особенностью обсерватории CLARREO, включающей четыре спутника, движущихся друг за другом по одной и той же орбите является возможность взаимной калибровки с широкополосной аппаратурой CERES, а также с уже работающими оперативными зондирующими системами.

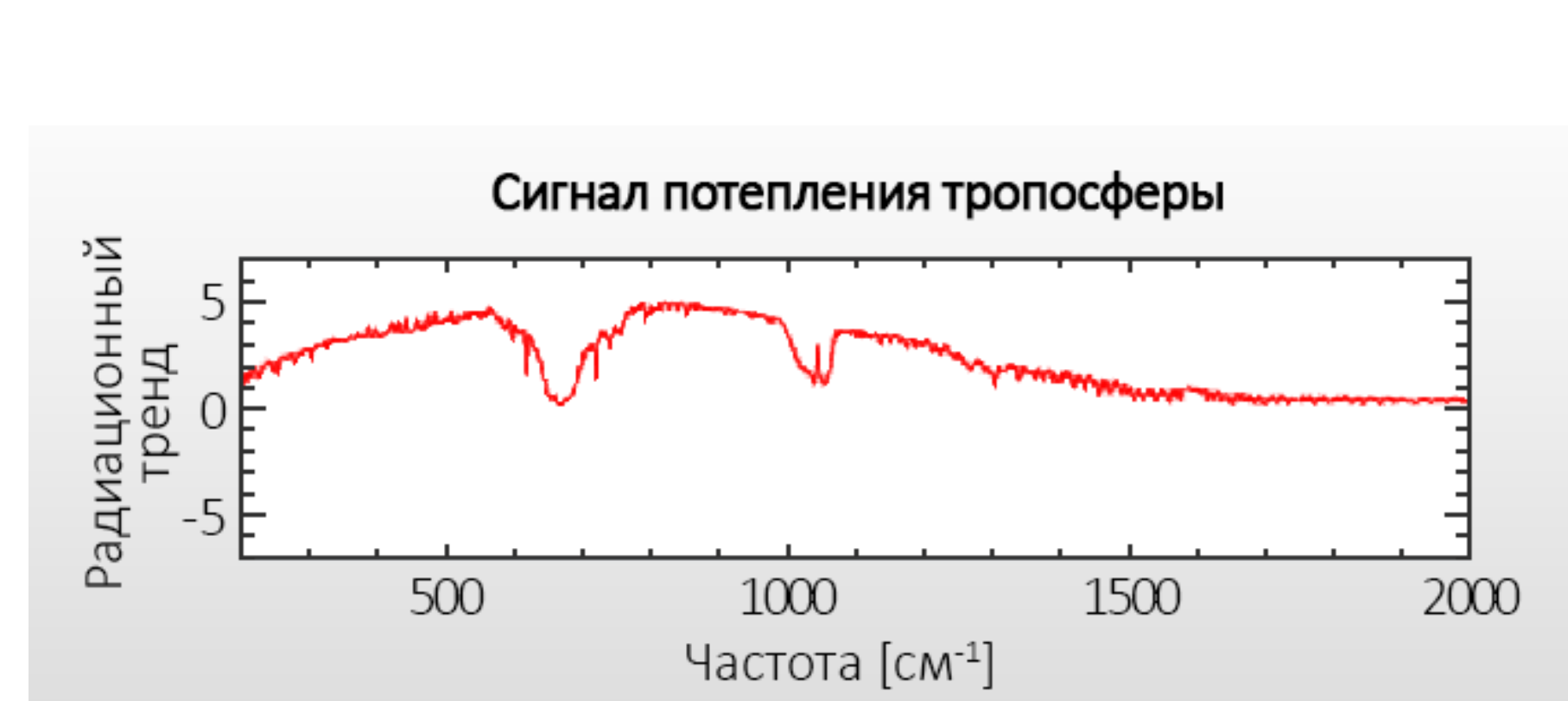
Особенности космической группировки CLARREO



При детектировании долговременных климатических изменений наряду с абсолютной точностью измерений ключевую роль играет информационное содержание спектрометрической информации. Подобно тому как «отпечатки пальцев» человека идентифицируют его личность, так и высоко-разрешенные спектры излучения характеризуют текущее (мгновенное) состояние климатической системы.

В преддверии получения реальных гиперспектральных измерений CLARREO важные экспертные результаты можно получить с помощью ансамбля модельных рядов гиперспектров, вычисленных на основе данных наиболее совершенных климатических моделей, реализующих различные сценарии климатических изменений [2]. В этом случае в рамках каждой климатической модели мы обладаем исчерпывающей информацией: точно знаем модель, вносимые естественные и антропогенные изменения, выходные данные модели (в виде основных геофизических параметров) для разных временных интервалов прогноза от месяцев до десятилетий.

Оценка обнаружительной способности измерений

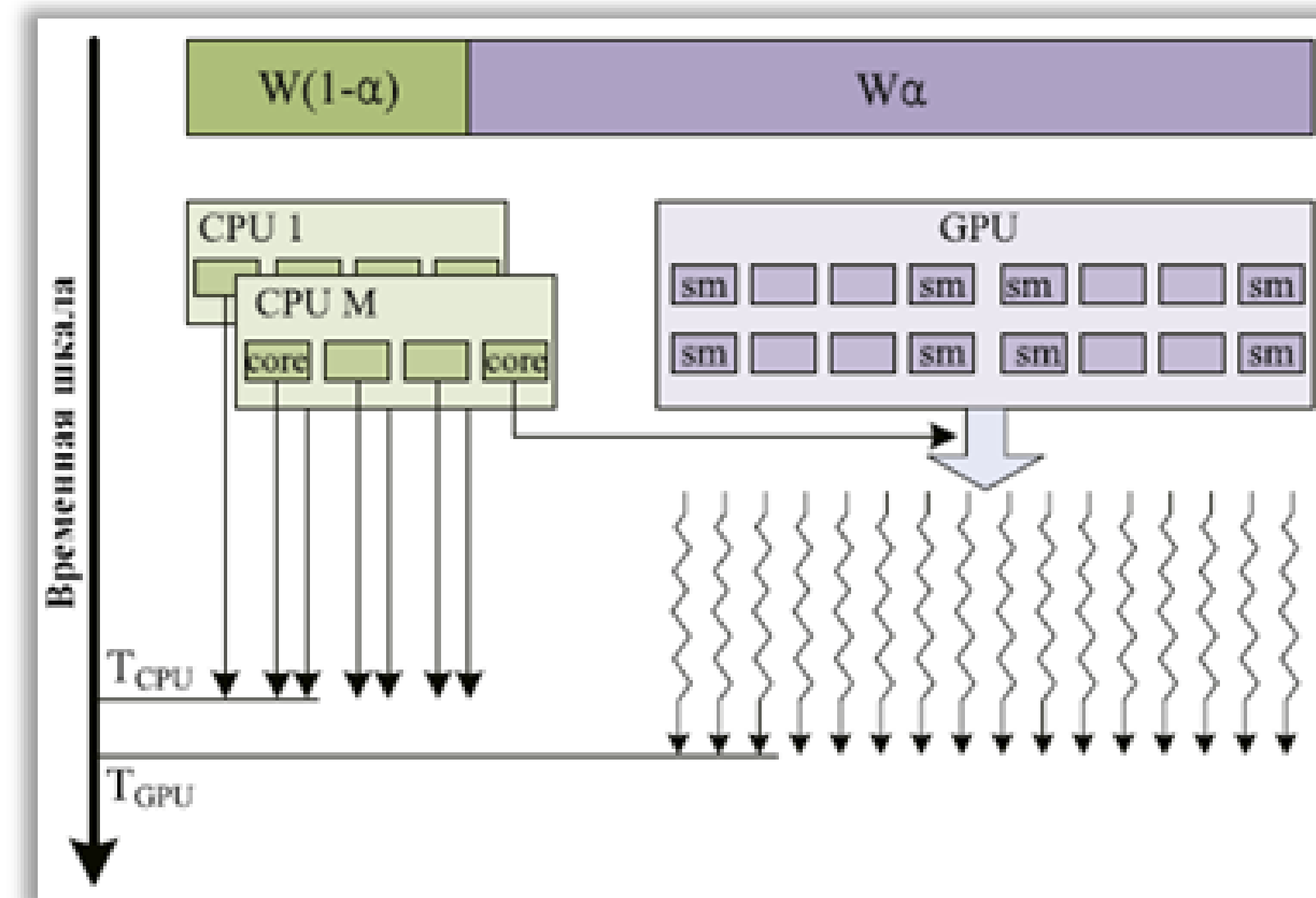


В рамках экспериментальной технологии, используя современные модели переноса излучения, можно рассчитать временные ряды гиперспектров, согласованные с характеристиками измерительной аппаратуры, с целью анализа их обнаружительной способности по отношению к климатическим изменениям.

Разработанная экспериментальная технология позволила получить результаты численных экспериментов по моделированию возможностей наблюдений малых изменений климатической системы на основе аппаратных характеристик перспективной космической системы CLARREO. Нами анализировался практически весь спектр возможных радиационных наблюдений из космоса: УДР - уходящая длинноволновая радиация (в диапазоне 200-2000 см⁻¹ или 5-50 мкм, что составляет 95% собственного излучения Земли) и УКР - уходящая коротковолновая радиация (в диапазоне 320-2300 нм, что составляет 96% отраженного солнечного излучения Земли). Максимальное спектральное разрешение для УДР принималось равным 0.5 см⁻¹, для УКР - 4-нм. При этом учитывалась возможность достижения беспрецедентно высокой точности измерений: для УДР - 0.065 К, для УКР - 0.3%.

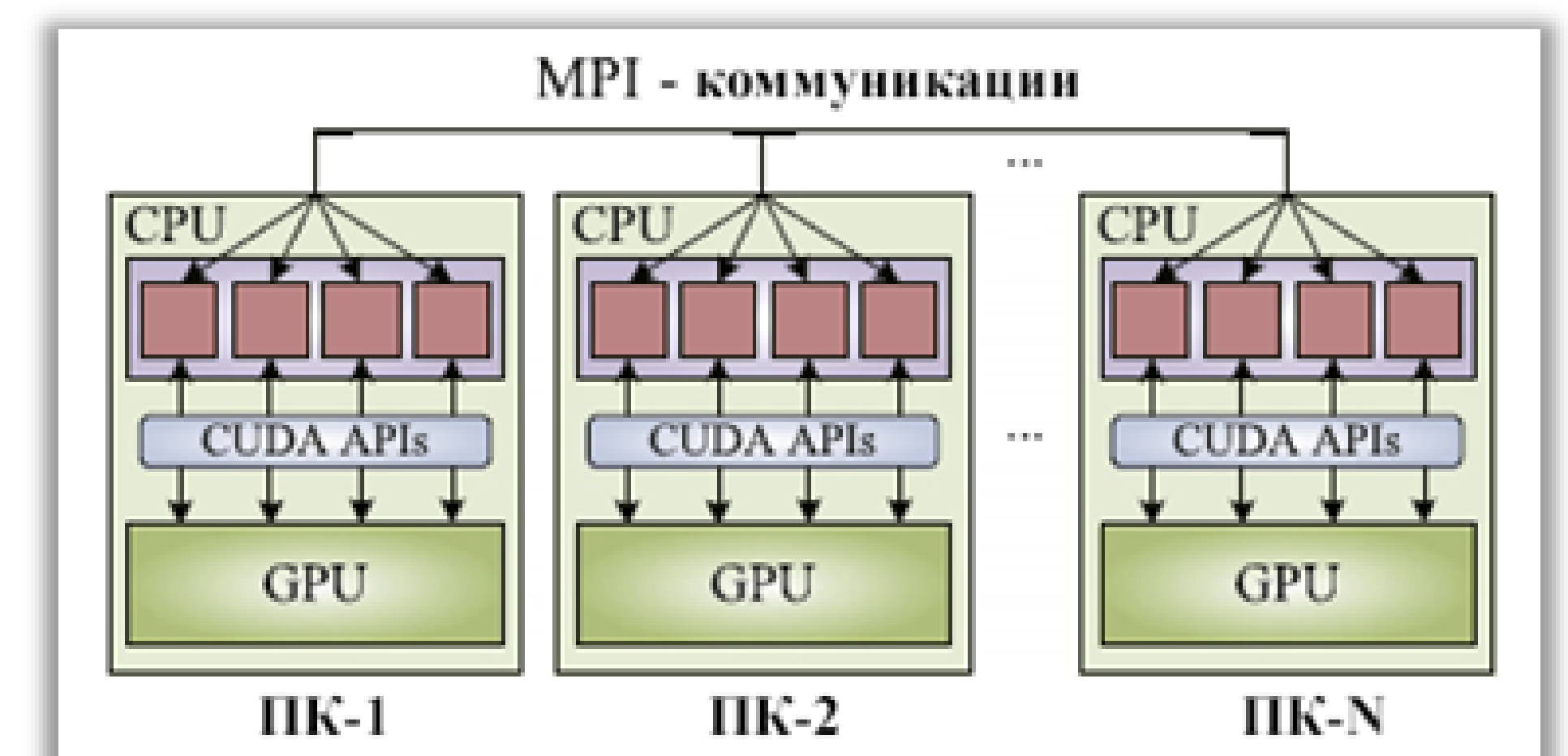
Экспериментальный аппаратно-программный комплекс

Процесс переноса излучения - один из наиболее важных и сложных процессов в климатической системе. Адекватный расчет переноса излучения даже в относительно широких спектральных интервалах является достаточно трудоемким. Гиперспектральное же моделирование требует ещё больших вычислительных мощностей и поэтому, как правило, производится на высокопроизводительных системах. К настоящему времени современные гетерогенные (CPU+GPU) компьютерные системы реализуются в основном в виде больших специализированных кластеров (суперкомпьютеров).



Мы для гиперспектрального имитационного моделирования использовали аппаратно-программный комплекс (АПК) на основе всего четырёх оптимизированных ПК в одном из компьютерных классов МФТИ. Каждый ПК нашего АПК включает 4-х ядерный центральный процессор (CPU) Intel Core i5-3330 и графический ускоритель (GPU) Nvidia Geforce GT 640 (с 384-мя ядрами).

Радиационное моделирование осуществляется с одновременным использованием вычислительных мощностей и центрального процессора (CPU) и графического ускорителя (GPU). Процесс параллельности вычислений обеспечивается технологиями CUDA/OpenCL.



При проведении расчетов был использован полинейный алгоритм (LBL) для наиболее высокоточного моделирования с максимальным спектральным разрешением (LBLRTM).

Анализ усредненных высокоразрешенных спектральных откликов на климатические изменения позволяет оценить величины радиационного форсинга при изменении различных геофизических параметров. При индивидуальном изменении различных климатических переменных (оставшая при этом остальные зафиксированными) можно оценить радиационную чувствительность каждой из них: например, эффект увеличения содержания метана и углекислого газа, влияние изменения температуры тропосферы и стратосферы, изменения содержания водяного пара в тропосфере и т.д.

За последние 35 лет (1980-2015 гг.) потепление наблюдалось во всех широтных зонах, однако наиболее значительный рост температуры был зафиксирован в высоких широтах северного полушария. Так если глобальная аномалия приземной температуры в 2016 году достигла 1°C, то в зоне 64°-90°с.ш. она составила уже около 3°C. Одним из важных механизмов, объясняющим это экстремальное потепление, было выявление массивных выбросов метана в атмосферу вследствие деградации подводной мерзлоты в восточносибирском арктическом регионе, где наблюдается наиболее выраженная динамика климатических изменений. Таяние вечной мерзлоты в этом регионе также вносит существенный вклад в возникновение планетарного максимума основных парниковых газов — углекислого газа и метана — над Арктикой.

Заключение

В настоящее время проводятся расчеты применительно к выявлению детектирующей способности системы CLARREO по отношению к наиболее опасным аномалиям динамики геофизических параметров в восточносибирском регионе. И хотя получены только первые предварительные результаты, нет сомнений, что данный подход, основанный на моделировании гиперспектральных измерений по данным длительных наблюдений, позволит оценить потенциальные возможности космической системы CLARREO применительно к идентификации катастрофических климатических изменений в наиболее проблемных регионах РФ.

Литература

1. Golovko V.A., Kondranin T.V., Kozoderov V.V. Towards High Precision Hyperspectral Exploration of the Earth's Climate System from Space // The 40th COSPAR Scientific Assembly; Space Studies of the Earth's Surface, Meteorology and Climate (A); Towards Scientific Exploitation of Operational EO Missions for Land Processes and Natural Hazards (A3.1), 2-10 August 2014, Moscow, Russia, Abstract Golovko_oral_12978.pdf, <http://cospar2014moscow.com/>.
2. Leroy, S. S., et al. Testing climate models using thermal infrared spectra // J. Climate, 21. 2008. P. 1863-1875.