

В. Бровкин, Т. Кляйнен, А. Даллмейер, Т. Риддик, В. Гайлер,  
У. Николаевич, Т. Ильина, М. Клауссен

*Институт метеорологии Общества Макса Планка, Гамбург, ФРГ*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ КЛИМАТА И УГЛЕРОДНОГО ЦИКЛА ЗА ПОСЛЕДНИЕ 20000 ЛЕТ**

В четвертичный период (последние 2,5 миллиона лет) Земля пережила около 50 ледниковых периодов. Амплитуда изменений климата и окружающей среды была огромной. На пике ледниковых стадий глобальная температура упала на 3-5 градусов по Цельсию, уровень моря снизился на 130 метров, а концентрация CO<sub>2</sub> в атмосфере была ниже примерно на 100 частей на миллион. Самые холодные ледниковые фазы внезапно заканчивались, и система Земли возвращалась к межледниковым условиям. Есть много фундаментальных свойств динамики климатической системы во время ледниковых периодов, которые важны для будущего климата.

Проект PalMod (Paleo Modeling), финансируемый Министерством образования и исследований Германии (BMBWF), направлен на устранение давних научных пробелов в нашем понимании динамики и изменчивости климатической системы и углеродного цикла в течение последних ледниковых циклов. Почему последние ледниковые циклы имеют одинаковую периодичность, почему ледяные щиты медленно растут, а быстро исчезают? Почему концентрации CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> в атмосфере меняются синхронно с изменением климата? Что движет климатической изменчивостью в масштабе тысячелетия в холодных фазах? Целью проекта является моделирование климата и биогеохимии Земли в течение последнего ледникового цикла с всеобъемлющей моделью системы Земли (MPI-ESM, AWI-ESM и CESM).

В Институте метеорологии Общества Макса Планка мы используем нашу флагманскую модель системы Земли MPI-ESM1.2. Модель атмосферы ECHAM6.3 напрямую связана с моделью суши JSBACH3.2 посредством поверхностного обмена водой, энергией, импульсом и парниковыми газами. JSBACH включает модель динамической растительности, а распределение и плотность лесов и трав изменяются в ответ на изменения климата и CO<sub>2</sub>. Модель водно-болотных угодий имитирует выбросы CH<sub>4</sub> в северных и тропических районах. Атмосфера соединена через OASIS3 с динамической моделью океана и морского льда MPIOM1.6, которая включает модель биогеохимии океана HAMOCC6. Для моделирования ледяных щитов в Северном полушарии мы используем модель PISM, а модель твердой Земли VILMA имитирует ледниково-изостатическое регулирование. Интерактивная модель гидрологического стока имитирует изменения речного стока в ответ на изменения орографии, в том числе водотоки на открытых арктических и тропических шельфах. На суперкомпьютере Mistral Немецкого климатического вычислительного центра (DKRZ) модель в разрешении T31 моделирует несколько сотен лет в день.

В текущей, 2-й фазе PalMod, мы в первую очередь сосредотачиваемся на моделировании последней дегляциации. Интерактивная динамика поверхности суши, океана и атмосферной циркуляции определяется реконструированными ледяными щитами и парниковыми газами за последние 23,000 лет. Сброс пресной воды в результате таяния и разрушения ледяных щитов приводит к остановке АМОС и значительному похолоданию северного полушария на несколько тысяч лет. В свою очередь, восстановление АМОС приводит к резкому потеплению и широкому распространению растительности на территориях, освобожденных от ледяных щитов.

Модель имитирует смещение северных бореальных лесов и более влажную и зеленую Северную Африку в раннем голоцене (примерно 8000–6000 лет назад) в соответствии с имеющимися данными. Мы также выполнили расчеты по сценариям CMIP6, продленными на несколько тысяч лет в будущем, с фокусом на интерактивный цикл СН4. Следующий этап проекта будет включать в себя интерактивные ледяные щиты во время дегляциации, а также моделирование образования ледников около 110-120 тысяч лет назад.

Сайт PalMod: [www.palmod.de](http://www.palmod.de)

V. Brovkin, T. Kleinen, A. Dallmeyer, T. Riddick, V. Gayler,  
U. Mikolajewicz, T. Ilyina, and M. Claussen  
*Max Planck Institute for Meteorology, Hamburg, Germany*

## **MODELLING CLIMATE AND CARBON CYCLE DURING THE LAST 20,000 YEARS**

In the Quaternary period (the last 2.5 million years), the Earth went through about 50 glacial-interglacial cycles. The amplitude of changes in climate and environment was enormous. At the peak of glacial stadials, global temperature dropped by 3 to 5 degrees centigrade, sea level decreased by 130 meters, and atmospheric CO<sub>2</sub> concentration declined by about 100 ppm. The coldest glacial phases ended abruptly with the Earth system returning back to interglacial conditions. There are many fundamental properties of climate system dynamics during glacial cycles which are relevant for future climate.

The PalMod (Paleo Modeling) project funded by the German Ministry for Education and Research (BMBF) aims at closing the long-standing scientific gaps in our understanding of the dynamics and variability of the climate system and carbon cycle during the last glacial cycles. Why did the last glacial cycles have similar periodicity, why did ice sheets grow slowly while vanishing quickly? Why do atmospheric CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> concentrations vary in concert with climate change? What drives the strong millennial-scale variability in cold phases? The project aims to simulate the Earth's climate and biogeochemistry over the last glacial cycle with comprehensive Earth system models (MPI-ESM, AWI-ESM, and CESM).

At Max Planck Institute for Meteorology, we use our flagship Earth System model MPIESM1.2. The atmospheric model, ECHAM6.3, is directly coupled to the land model, JSBACH3.2, through surface exchange of water, energy, and momentum, and greenhouse gases. JSBACH includes a dynamical model of vegetation, the distribution and density of forests and grasses is changing in response to climate and CO<sub>2</sub> changes. A wetland model simulates boreal and tropical CH<sub>4</sub> emissions. The atmosphere is coupled via the OASIS3 coupler to the dynamic ocean and sea ice model MPIOM1.6 which includes the ocean biogeochemistry model HAMOCC6. For simulating ice sheets in the Northern hemisphere, we use the PISM model, while the solid Earth model VILMA simulates glacial-isostatic adjustment. The interactive hydrological discharge model simulates changes in river flows in response to changes in orography, including glacial-time water streams on exposed Arctic and tropical shelves. On the Mistral supercomputer of the German Climate Computing Centre (DKRZ), the model simulates several hundred years a day in a coarse T31 resolution.

In the current, 2nd phase of PalMod, we firstly focus on a transient deglaciation simulation. Interactive dynamics of land surface, ocean and atmospheric circulation is driven by reconstructed ice sheets and greenhouse gases over the last 23,000 years. Freshwater discharge from melting and collapsing ice sheets leads to an AMOC shutdown and substantial cooling of Northern hemisphere for several thousand years. In turn, the AMOC rebound leads to abrupt warming and wide spreading of vegetation over areas free of ice sheets. The model simulates the northward shift of boreal forest and a much wetter and greener Northern Africa in the early Holocene (ca. 8,000-6,000 years ago), in line with available pollen data. We also performed pioneering runs under CMIP6 scenarios extended for several thousand years into the future with a focus on the interactive CH<sub>4</sub> cycle. The next project simulations will include interactive ice sheets during the deglaciation, as well as modelling of the glacial inception about 110-120 thousand years ago.

PalMod website: [www.palmod.de](http://www.palmod.de)