

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЛОБАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ТИПОВ РАСТИТЕЛЬНОСТИ С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ КЛИМАТА: СЦЕНАРИЙ А2*

В. Н. КРУПЧАТНИКОВ

*Институт вычислительной математики и
математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия*

e-mail: vkrup@ommfao1.sscs.ru

Climate model simulations can be diagnosed to assess contributing causes of particular phenomena. Climate is not controllable system. The models are only available tools for forecasting plausible climates in years and decades ahead. The biosphere plays pivotal role in the climate system. Land ecosystems are a dynamic component of the global carbon and water cycle. More than one third of CO₂ in the atmosphere is exchange annually with the land biosphere. Land ecosystem processes also control exchange of energy and momentum between atmosphere and surface. We must better understand the global evolution land ecosystem as main agent in Earth Climate System dynamics. The model will help to assess impact of climate changes on natural vegetation patterns, surface characteristics and land carbon storage. For these aims Lund-Potsdam-Jena dynamic global vegetation model coupled with INM (RAS)/ICMMG (SB RAS) climate model is described and resulting prediction, under scenario A2, of global vegetation patterns are discussed in this paper.

Введение

Биосфера, в состав которой входят приземный слой, слой растений (экосистемы, биомы), почва и гидросфера, оказывает заметное влияние на климат атмосферы через механизмы обмена энергией, влагой, моментом, парниковыми газами (например, двуокисью углерода, метаном) и аэрозолям. Изменения в составе и структуре биосферы поверхности приводят к изменениям потоков указанных выше субстанций, а следовательно, к изменению климата. Можно сказать, что климат и гидрология поверхности, которые формируются в значительной степени под влиянием экосистем, вносят значительный вклад в изменчивость глобального климата атмосферы благодаря механизмам обратной связи между растительностью и климатом атмосферы.

Важную роль растительных экосистем в формировании климата можно увидеть на примере климата Северной Африки, где наблюдаемые контрасты между пустыней и рас-

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 05-05-64989).

© Институт вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук, 2006.

тельными ландшафтами по альбедо, шероховатости поверхности, текстуре почвы оказывают влияние на осадки. Например, результаты моделирования палеоклимата показали, что усиление солнечной радиации 6000 лет назад привело к усилению Африканского летнего муссона [1–3]. Осадки, вызванные муссоном, создали благоприятные условия для распространения травы и кустарника по всей Северной Африке, в настоящее время занятой пустыней Сахара [4]. Моделирование климата показывает, что в случае, когда Сахара покрыта растительностью, происходит увеличение осадков в этом районе по сравнению с тем, когда Сахара представляет собой пустыню.

Другой известный пример — это конкуренция двух соседних биомов, например бореального леса и тундры. При моделировании климата, когда бореальный лес распространяется на север и замещает тундру, обнаруживается заметное изменение климата в данном регионе. В этом случае наблюдается потепление климата, вызванное уменьшением альбедо, в то же время распространение тундры за счет леса может спровоцировать переход к холодному климату. При потеплении климата линия лесов мигрирует на север, а уменьшение альбедо поверхности, вызванное распространением лесов, усиливает потепление.

1. Модели климата, динамики растительности и углеродного цикла

Изучение обратных связей между процессами в почве, биосфере, гидросфере и атмосфере, моделирование проекции климата и структуры биосферы в будущее в настоящее время возможны главным образом с помощью моделей климатической системы.

1.1. Модель поверхности

Одним из основных компонентов модели климатической системы является модель поверхности [5–7]. В последние десять лет модели поверхности существенно изменились в основном благодаря учету в подсеточной области различных типов поверхности. В большинстве моделей рассматриваются следующие основные типы поверхности: поверхность, покрытая озером; переувлажненная поверхность; поверхность, покрытая льдом; поверхность, покрытая растительностью; урбанизированная поверхность. Та часть ячейки сетки, которая покрыта растительностью, разбивается еще на несколько частей — “вставок”, каждая из которых имеет свой листовой индекс и высоту растительности. Эти параметры получают из данных зондирования высокого разрешения со спутника. Используется детальная текстура почвы.

Современные модели поверхности [6–9] имеют следующие особенности:

- высокое разрешение для описания вертикальных профилей температуры и влаги в почве;
- учет фазовых переходов воды;
- высокое разрешение слоя снега;
- вычисление потоков с поверхности, занятой растительностью, и с голой поверхности;
- детальное описание гидрологии поверхности и учет речного стока;
- учет биофизических и биохимических процессов в слое растительности, что позволяет описать обмен CO_2 и метана между поверхностью и атмосферой.

1.2. LJP-модель динамики растительности

Антропогенные возмущения углеродного цикла требуют оценки их потенциального влияния на глобальный климат и биосферу. Ряд моделей, основанных на принципе биогеографического равновесия, совместно с биохимическими моделями используется для получения оценки будущего распределения различных типов растительности на поверхности земли. В настоящее время модели динамики функциональных типов растительности независимо разработаны в нескольких центрах по исследованию климатической системы [10, 11]. Существующие модели отличаются по степени сложности и спектру приложений. Модель, используемая в данной работе (LJP-модель), разработана коллективом авторов из университета г. Лунда (Швеция), Института климата, г. Потсдам (Германия) и Института Макса-Планка по биохимии, г. Иена (Германия) [12]. Небольшая модификация позволяет использовать эту модель совместно с моделью климата. Сильной стороной LJP-модели является то, что в ней адаптирован ряд особенностей семейства моделей BIOME [13]. Например, LJP-модель использует биоклиматические ограничения модели BIOME3. В LJP-модели растительность в каждой ячейке сеточной области описывается в терминах долей площади ячейки, занимаемых определенными видами функциональных типов растительности (ФТР).

LJP-модель динамики растительности включает:

- функциональные типы растительности (10 ФТР);
- динамику растительности и углеродных пулов;
- фенологию растений;
- механизм роста растений (доступная влага, фотосинтез, дыхание, воспроизведение, распространение, отмирание);
- входные данные (среднемесячную температуру, осадки и облачность).

В таблице приведены основные типы растительности, включенные в LJP-модель динамики растительности.

1.3. Модель динамики климата

При моделировании климата 21 столетия рассматриваются различные сценарии динамики концентрации парниковых газов в атмосфере, обусловленной хозяйственной деятельностью. В данной работе приведены результаты моделирования климата с помощью мо-

Типы растительности по LJP-модели динамики растительности

Номер и обозначение типа растительности	Функциональный тип растительности
1. TrBE	Тропический широколиственный вечнозеленый лес
2. TrBR	Тропический дождевой лес
3. TeNE	Хвойный лес умеренных широт
4. TeBE	Широколиственный лес умеренных широт
5. TeBS	Широколиственный листопадный лес умеренных широт
6. BoNE	Бореальный хвойный вечнозеленый лес
7. BoNS	Бореальный хвойный листопадный лес
8. BoBS	Бореальный листопадный лес
9. ThE	Трава умеренных широт
10. TrH	Трава тропических широт

дели, созданной в ИВМ РАН [14] по сценарию А2 в соответствии с классификацией, предложенной Межправительственной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК, <http://www.ipcc.ch/>). Сценарий А2 предполагает сильную дифференциацию в экономическом развитии стран мирового сообщества. Мировое хозяйство разбито на экономические регионы, резко различающиеся уровнем технологического развития, между которыми уровень обмена товарами, технологиями, капиталом, идеями и людьми все еще остается низким. В регионах с высоким уровнем развития, но бедных природными ресурсами активно внедряются новые энергосберегающие технологии (ядерные, возобновляемые и др.), в то время как регионы с низким уровнем развития, но богатые природными ресурсами используют старые технологии. Если эта ситуация будет оставаться такой же в течение следующих 100 лет, то темпы роста концентрации парниковых газов останутся прежними, т. е. теми, которые мы наблюдаем сейчас. На рис. 1 приведен график роста концентрации CO_2 по сценарию А2.

На рис. 2 и 3 представлены результаты моделирования приземной температуры и осадков. Рассмотрим область высоких широт Северного полушария. Период моделирования условно разделим на две части: 2000–2040 и 2040–2080 гг. Можно обратить внимание на то, что темпы роста температуры во втором периоде выше, чем в первом. Небольшое увеличение темпа роста во втором периоде моделирования наблюдается и в поле осадков. Данные моделирования с помощью модели климата атмосферы используются в качестве входных данных в LJP-модели динамики растительности.

В последнее время появились работы, в которых модель биосферы выступает как динамический компонент климатической системы и углеродного цикла. В этих моделях растительность обычно рассматривается не в виде биомов, а в виде функциональных типов растительности (трава, деревья). В этом случае удастся сформулировать модель в тер-

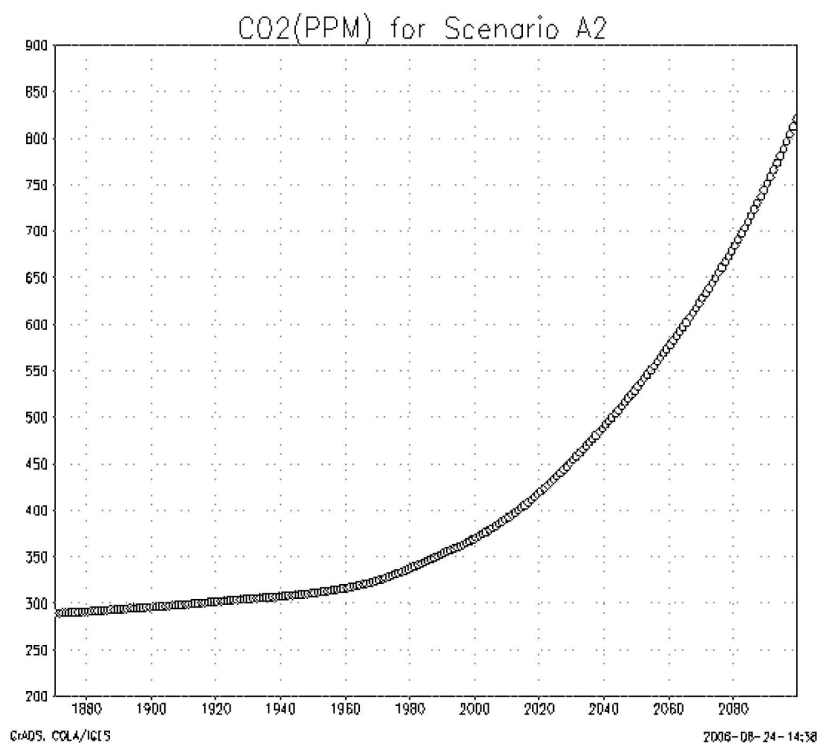


Рис. 1. Сценарий А2: график кривой роста концентрации CO_2 (ppm) до 2100 г.

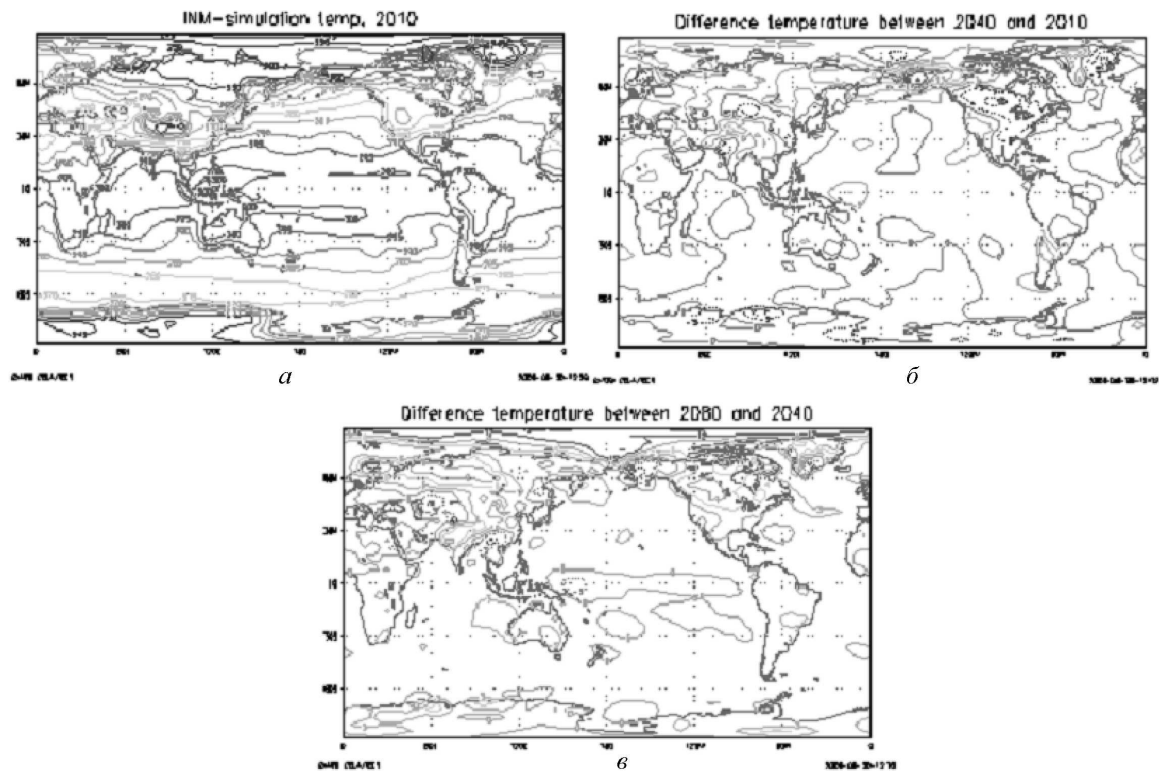


Рис. 2. Сценарий A2: *a* — глобальное распределение температуры поверхности при моделировании на 2010 г.; *б* — разность температуры между 2040 и 2010 гг.; *в* — разность температуры между 2080 и 2040 гг.

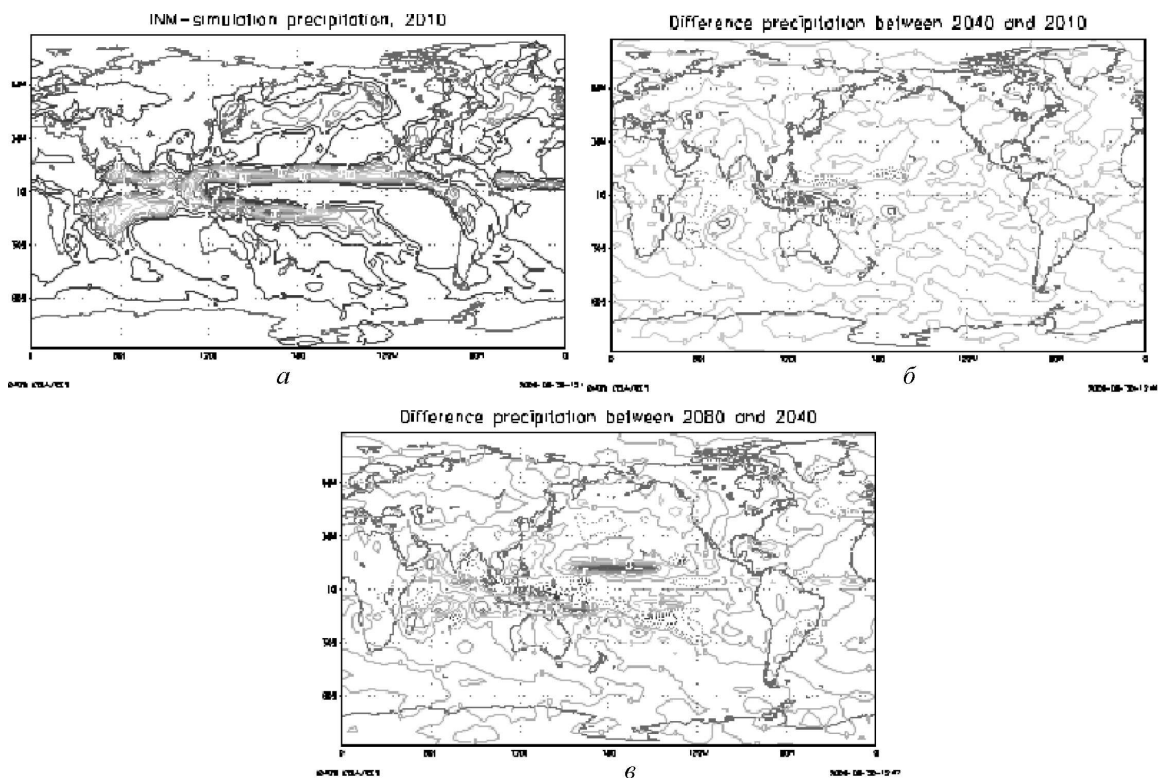


Рис. 3. Сценарий A2: *a* — глобальное распределение осадков при моделировании на 2010 г.; *б* — разность между 2040 и 2010 гг.; *в* — разность между 2080 и 2040 гг.

минах измеряемых параметров, таких как листовой индекс и параметр распределения индивидуального типа растений. Однако в модели LSM NCAR [8, 9] типы растительности в ячейке сетки, их количество, листовой индекс и высота растительности могут принадлежать одному из 28 типов биомов. Для того чтобы связать модель биосферы с моделью экологической системы и получить преимущество использования данных дистанционного зондирования высокого разрешения, модель LSM NCAR была модифицирована таким образом, что тип растительности, степень заполнения растительностью ячейки сетки, листовой индекс и высота растительности стали входными параметрами. В новой модели поверхности удалось описать биофизические процессы, углеродный цикл, гидрологический цикл и динамику растительности.

2. Результаты моделирования климата и функциональных типов растительности по сценарию А2

Генерация распределения и структуры функциональных типов растительности в ячейке сетки в LJP-модели начинается с состояния голой поверхности (полное отсутствие растений). В течение 1000 модельных лет в условиях современного климата происходит выход на режим равновесия по отношению к углеродным пулам и растительности. В дальнейшем сценарные эксперименты начинаются с этого равновесного состояния биосферы. Мы рассматриваем ячейки сетки, которые лежат в зоне умеренно-бореальных и бореальных лесов с координатами соответственно (60E, 60N) и (90E, 60N). Результаты моделирования распределения типов растительности показаны на рис. 4–6. В течение первого периода моделирования в этих ячейках практически отсутствует растительность в виде травы. В первой ячейке мы наблюдаем четыре типа растительности — TeBS, BoNE, BoBS и TeH,

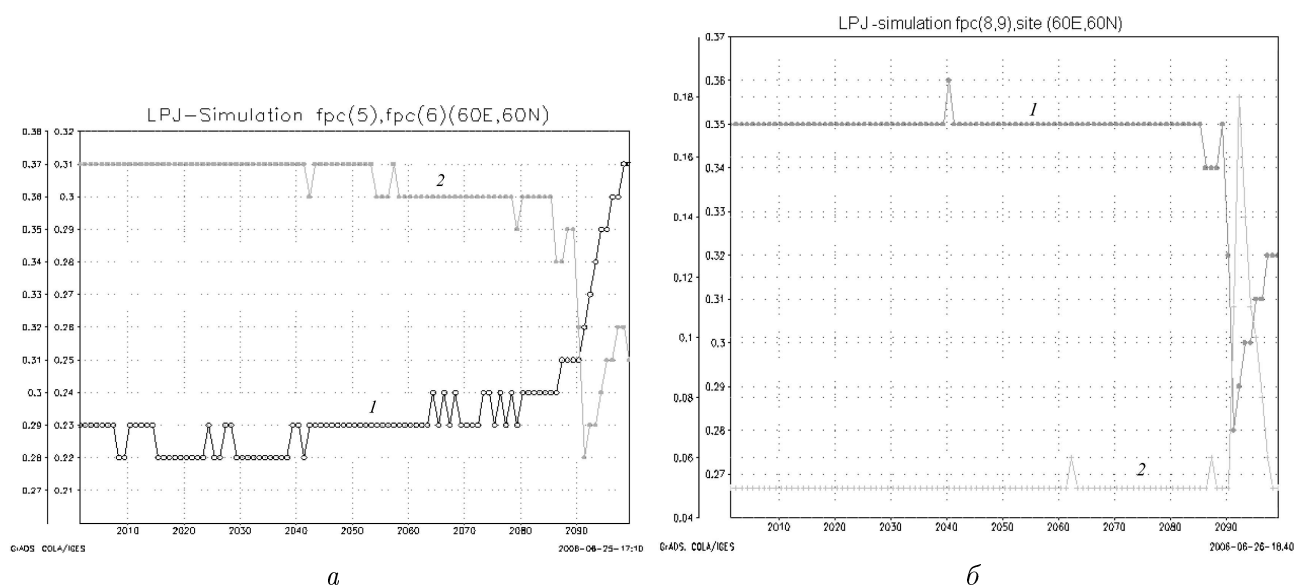


Рис. 4. Сценарий А2. Динамика распределения растительности в ячейке сетки (60E, 60N): а — лес умеренных широт (TeBS) (кривая 1), бореальный лес (BoNE) (кривая 2); б — бореальный лес (BoBS) (кривая 1) и трава умеренных широт (TeH) (кривая 2).

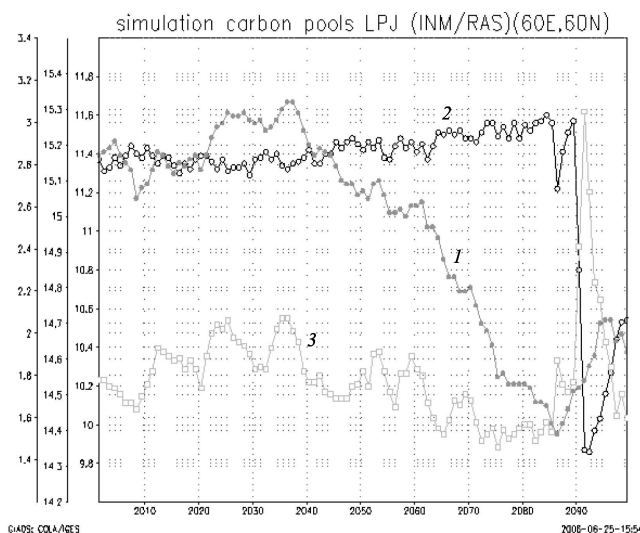


Рис. 5. Сценарий А2. Динамика углеродных пулов в ячейке сетки (60E, 60N) *vegsc* — кривая 1, *soilsc* — кривая 2, *littersc* — кривая 3.

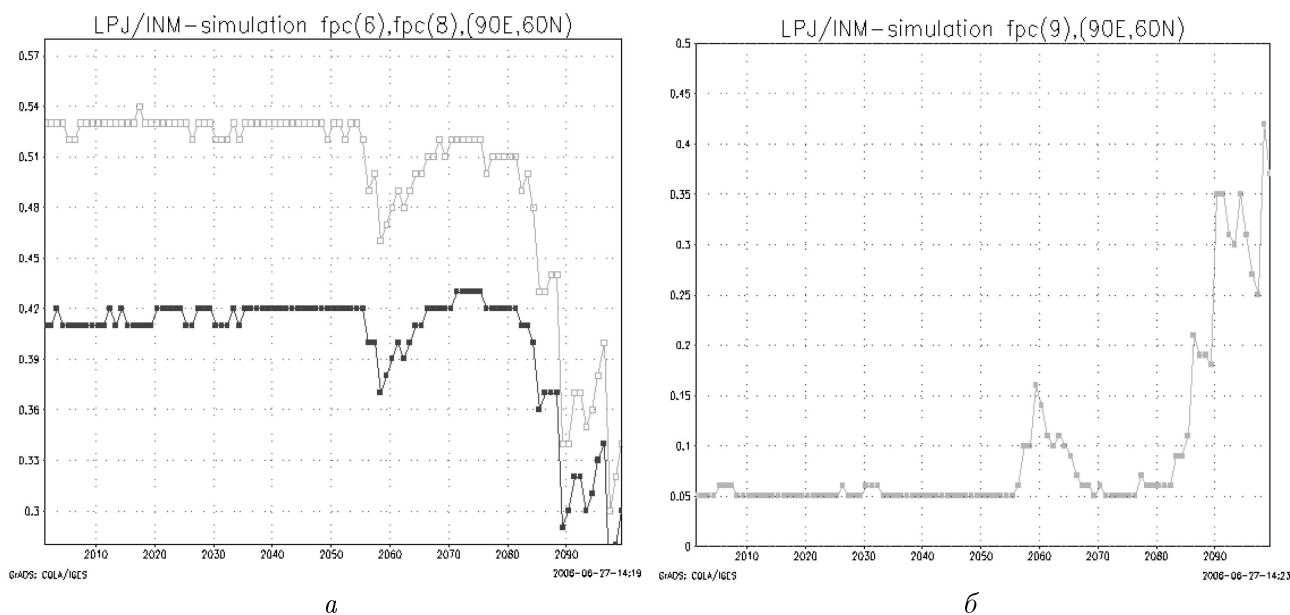


Рис. 6. Сценарий А2. Динамика распределения растительности в ячейке сетки (90E, 60N): *а* — бореальный лес (*BoNE*, *BoBS*); *б* — трава умеренных широт (*TeH*).

доля которых составляет соответственно 0.23, 0.35, 0.31 и 0.06, во второй ячейке — три типа растительности — *BoNE*, *BoBS* и *TeH*, доля которых составляет соответственно 0.53, 0.41 и 0.05. Со временем доля бореальных лесов начинает уменьшаться. В первой ячейке это происходит за счет увеличения доли леса умеренных широт. Во второй ячейке доля бореальных лесов уменьшается, уступая место траве умеренных широт. Динамика углеродных пулов в первом и во втором случае наглядно отражает изменения в биосфере. Динамика растительности в ячейках, лежащих в зоне умеренных широт, оказалась менее чувствительна по сравнению с высокими широтами, где, как показывают результаты моделирования, наблюдается высокая чувствительность, особенно в сибирском регионе.

Заключение

Анализ данных моделирования современной структуры биосферы и ее проекции в будущее с помощью модели климата показал, что модель способна воспроизводить:

— распределение углеродных пулов в почве, в слое растительности и NPP, поверхностный сток воды;

— глобальное распределение растительности, которое согласуется с данными дистанционного зондирования земли (фенология и листовой индекс).

Модель явно описывает структуру растительности и процесс конкуренции между различными функциональными типами растительности. При моделировании по сценарию A2 обнаруживается важная особенность динамики ФТР в бореальной зоне сибирского региона. После 2040 г. (при ~ 500 ppm CO₂) наблюдается переход к новому состоянию биоклиматического равновесия, когда в этом регионе доля бореальных лесов уменьшится и заместится растительностью, состоящей из леса, характерного для умеренных широт, трав и кустарников.

Автор благодарен д-ру S. Sitch за любезное разрешение использовать LPJ-модель динамики растительности для адаптации ее в модель климатической системы, а также профессору Е. Володину за предоставленные данные моделирования климата атмосферы 21 в.

Список литературы

- [1] KUTZBACH J., BLIESNER O. The sensitivity of the African-Asian monsoonal climate to orbital parameter changes for 9000 years B.P. in a low-resolution general circulation model // *J. of the Atmospheric Sci.* 1982. Vol. 29. P. 1177–1188.
- [2] BRACONNOT P., JOUSSAUME S., DE NOBLET N., RAMSTEIN G. Mid-holocene and last glacial maximum african monsoon changes as simulated within the paleoclimate modelling intercomparison project // *Global and Planetary Change.* 2000. Vol. 26. P. 51–66.
- [3] CLAUSSEN M. Modelling bio-geophysical feedback in the African and Indian monsoon region // *Climate Dynamics.* 1997. Vol. 13. P. 247–257.
- [4] PRENTICE I., JOLLY D. Mid-holocene and Glacial Maximum vegetation geography of the northern continents and Africa // *J. of Biogeography.* 2000. Vol. 27. P. 507–519.
- [5] DICKINSON R., HENDERSON-SELLERS A., KENNEDY P. Biosphere — atmosphere scheme (BATS) version 1e as coupled to the NCAR Community Climate Model // *NCAR Technical Note NCAR/TN-387+STR*, 1993.
- [6] BONAN G.B. A land surface model for ecological, hydrological and atmospheric studies // *NCAR Technical Note NCAR/TN-417-STR*, 1996.
- [7] KRUPCHATNIKOV V. Simulation of the CO₂ exchange in the atmosphere — surface biomes system by climate model ECSib // *Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling.* Vol. 13. P. 479–492.
- [8] BONAN G.B. The land surface climatology of the NCAR land surface model coupled to the NCAR-Community Climate Model // *J. Climate.* 1998. Vol. 11. P. 1307–1326.
- [9] BONAN G.B., OLESON K.W., VERTENSTEIN M. ET AL. The land surface climatology of the community land model coupled to the NCAR community climate model // *J. of Climate.* 2002. Vol. 15. P. 3123–3149.

- [10] FOLEY J., PRENTICE I., RAMANCUTTY E. An integrated biosphere model of land surface processes, terrestrial carbon balance and vegetation dynamics // *Global Biogeochemical Cycles*. 1996. Vol. 10(4). P. 603–628.
- [11] BROVKIN V., GANOPOLSKY A., SVIREGEV Y. A continuous climate-vegetation classification for use in climate-biosphere studies // *Ecological Modelling*. 1997. Vol. 101. P. 251–261.
- [12] SITCH S., SMITH B., PRENTICE I.C. ET AL. Lund-Potsdam-Jena dynamic global vegetation model // *Global Change Biology*. 2003. Vol. 9. P. 161–185.
- [13] HAXELTINE A., PRENTICE I. BIOME3: An equilibrium terrestrial biosphere model based on ecophysiological constraints, resource availability and competition among plant functional types // *Global Biogeochemical Cycles*. 1996. Vol. 10(4). P. 693–709.
- [14] АЛЕКСЕЕВ В.А., ВОЛОДИН Е.М., ГАЛИН В.Я. и ДР. Моделирование современного климата с помощью атмосферной модели ИВМ РАН. (Описание модели А5421 версии 1997 года и результаты экспериментов по программе АМIP II). М.: ИВМ РАН, 1998. 121 с.

Поступила в редакцию 9 ноября 2006 г.