УДК 551.511

### ВЛИЯНИЕ УЧЕТА РАДИАЦИОННОГО ЭФФЕКТА ИЗМЕНЕНИЯ АЛЬБЕДО ПОВЕРХНОСТИ СУШИ ПРИ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИИ НА ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ КЛИМАТА XVI–XXI ВЕКОВ

© 2011 г. А. В. Елисеев, И. И. Мохов

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, 119017 Москва, Пыжевский пер., 3 E-mail: eliseev@ifaran.ru

Поступила в редакцию 03.02.2010 г., после доработки 16.03.2010 г.

Изменение типов экосистем, в том числе при замене естественной растительности сельскохозяйственными угодьями, приводит к изменению альбедо поверхности и развитию соответствующего коротковолнового радиационного возмушающего воздействия (РВВ). В данной работе проведены численные эксперименты с климатической моделью (КМ) ИФА РАН для XVI-XXI веков, в которых моделировался отклик на изменение содержания парниковых газов, сульфатных аэрозолей (тропосферных и стратосферных), солнечной постоянной, а также альбедо поверхности суши при замене естественной растительности сельскохозяйственными угодьями. Эти воздействия соответствовали фактическим данным вплоть до конца XX века. В XXI веке площадь сельскохозяйственных угодий задавалась по сценариям проекта Land Use Harmonization, а другие антропогенные воздействия – по сценариям SRES. Изменение альбедо поверхности при замене естественной растительности сельскохозяйственными угодьями приводит к развитию охлаждающего РВВ в большинстве регионов, кроме регионов естественной полупустынной растительности. Глобально осредненное среднегодовое значение этого воздействия в конце XX века в КМ ИФА РАН составляет -0.11 Вт м<sup>-2</sup>. Учет радиационного эффекта землепользования в КМ ИФА РАН привел к заметному улучшению согласия модельных расчетов в исторический период с данными наблюдений. Так, наряду с общим потеплением климата и ростом осадков в ХХ веке он позволил воспроизвести среднегодовое похолодание и уменьшение осадков в субтропиках Евразии и Северной Америки, в Амазонии и в центральной Африке, а также привел к локальному максимуму среднегодового и летнего потепления на востоке Китая. Радиационный эффект землепользования меняет знак зависимости амплитуды годового хода температуры атмосферы у поверхности от среднегодовой температуры. Возможной причиной уменьшения осадков при изменении альбедо при землепользовании является подавление конвективной активности в атмосфере в теплый период (в тропиках – в течение всего года) и соответствующее уменьшение конвективных осадков. В XXI веке влияние радиационного эффекта землепользования на климатический отклик при использованных сценариях антропогенного воздействия в целом невелико.

Ключевые слова: землепользование, радиационное возмущающее воздействие, сценарии будущих изменений, КМ ИФА РАН.

#### 1. ВВЕДЕНИЕ

Землепользование приводит к изменению альбедо поверхности суши и интенсивности турбулентного переноса тепла и влаги между атмосферой и деятельным слоем почвы [1–7]. В частности, замена лесов умеренного пояса и бореальных лесов на травяную и кустарниковую растительность, характерную для сельскохозяйственных угодий этих широт, приводит к общему росту альбедо поверхности, прежде всего из-за эффекта "маскировки" снега древесной растительностью зимой [2, 3, 6]. Это способствует охлаждению климата. Кроме того, при этом изменяются интенсивность переноса влаги из почвы в атмосферу растительностью и высота шероховатости, что, в свою очередь, влияет на турбулентный перенос тепла и влаги между поверхностью суши и атмосферой [2, 6]. Воздействие возмущений различного типа при землепользовании на климат может быть взаимно компенсирующим [4].

Уже к началу XVIII века (в доиндустриальный период) 3–6% суши, не покрытой ледовыми щитами, были заняты постоянными сельскохозяйственными угодьями [8, 9]. К концу XX века эта доля возросла до примерно трети площади суши без ледовых щитов [9, 10].

Согласно оценкам, приведенным в [11], современное радиационное возмущающее воздействие на верхней границе атмосферы из-за изменения альбедо при замене естественной растительности на сельскохозяйственные угодья составляет от 0.0 до (-0.4) Вт м<sup>-2</sup> с центральным значением (-0.2) Вт м<sup>-2</sup> с характерным пространственным масштабом климатического отклика от локального до континентального (см. также [12]). Эта величина, вообще говоря, не является пренебрежимо малой величиной относительно общего антропогенного радиационного возмущающего воздействия (PBB) за индустриальный период от 0.6 до 2.4 Вт м<sup>-2</sup> с центральной оценкой 1.6 Вт м<sup>-2</sup>.

Заметный отклик климата на радиационный эффект землепользования отмечается в численных экспериментах с климатическими моделями. Например, в расчетах с климатическими моделями промежуточной сложности [13, 14] среднеглобальное похолодание климата из-за общего увеличения альбедо поверхности суши при землепользовании за последние несколько столетий составило от 0.13 К до 0.25 К [5]. В настоящее время в рамках проекта LUCID (Land-Use and Climate, Identification of Robust Impacts) проводится сравнение отклика климатических моделей общей циркуляции на возмущающее воздействие при землепользовании [7].

Целью настоящей работы является оценка влияния изменения альбедо поверхности суши при землепользовании на климатический отклик для последних нескольких столетий и XXI века при антропогенных и естественных воздействиях различной природы. Для получения этой оценки используется климатическая модель промежуточной сложности, разработанная в Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (КМ ИФА РАН) [15–17].

# 2. МОДЕЛЬ И ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

В работе использовалась версия КМ ИФА РАН [18, 19], в которой дополнительно было учтено изменение альбедо земной поверхности за счет землепользования. В теплый (бесснежный) период года в части модельной ячейки, покрытой сельскохозяйственным угодьями, альбедо поверхности задавалось в соответствии с классом "сельскохозяйственные угодья" модели BATS (Biosphere—Atmosphere Transfer Scheme) [20]. Среднее альбедо поверхности модельной ячейки вычислялось взвешиванием альбедо сельскохозяйственных угодий  $\alpha_{s, agro}$  и альбедо естественных экосистем  $\alpha_{s, nat}$  в соответствии с долей ячейки  $f_{agro}$  занятой сельскохозяйственными угодьями

$$\alpha_s = f_{agro} \alpha_{s, agro} + (1 - f_{agro}) \alpha_{s, nat}.$$
 (1)

Годовой ход листового покрытия (также влияющий на альбедо экосистемы) естественной и сельскохозяйственной растительности считался одинаковым для обоих типов растительности и рассчитывался в соответствии с моделью BATS. Дополнительно в модель для древесной растительности умеренных и высоких широт была включена параметризация "маскировки" снега растительностью: даже в случае наличия снега для указанных типов растительности  $\alpha_{s, nat}$  считалась равным альбедо растительности, а не снега. Для остальных типов растительности при наличии снега альбедо поверхности задавалась равным альбедо снега.

В случае, если современным типом растительности по классификации ВАТЅ для данной модельной ячейки являлись сельскохозяйственные угодья, тип естественной растительности в этой ячейке предписывался согласно упрощенной классификации Холдриджа [21] с использованием данных [22].

Зимой в средних и высоких широтах наиболее значимым является эффект исчезновения "маскировки" снега естественной древесной растительностью при замене такой растительности на сельскохозяйственные угодья: при этом альбедо поверхности зимой меняется от  $\alpha_{s, nat} = 0.13 - 0.22$  до альбедо снега 0.6. Летом, с учетом того, что альбедо сельскохозяйственных угодий  $\alpha_{s, agro} = 0.22$  в КМ ИФА РАН в целом больше значения альбедо естественной растительности а<sub>s, nat</sub>, распространение сельскохозяйственных угодий должно приводить к охлаждающему РВВ. Однако в регионах, где в качестве естественной растительности задаются полупустыни, изменение годового хода индекса листового покрытия при распространении сельскохозяйственных угодий может приводить и к общему уменьшению альбедо поверхности. Следует отметить, что согласно использованным данным типов естественных и сельскохозяйственных экосистем в центре Евразии в регионах полупустынной растительности к настоящему времени развиты как пастбища для скота, так и орошаемые сельскохозяйственные угодья, в Австралии – пастбища для скота.

В данной работе не учитывались прямое влияние землепользования на состояние атмосферы за счет изменения интенсивности транспирации влаги растениями и изменения турбулентных потоков тепла между поверхностью суши и атмосферой за счет изменения высоты шероховатости. В дальнейшем в версии КМ ИФА РАН с более детальной схемой гидрологии почвы [23] планируется учет и такого воздействия землепользования на климат.

С КМ ИФА РАН были проведены транзитивные ансамблевые численные эксперименты для 1500– 2100 гг. с заданием площади распространения сельскохозяйственных угодий (как посевных площадей, так и лугов) по среднегодовым данным проекта Land Use Harmonization (LUH, http://luh.unh.edu/ data.shtml) [24]. Для XVI–XX веков этот массив основан на данных HYDE 3.1 [9]. Оценки будущих изменений распространения экосистем были получены по расчетам с моделями AIM, IMAGE, MES-SAGE и MiniCAM, выполненным в рамках того же проекта. Следует отметить, что, несмотря на одинаковые входные данные для всех четырех моделей в

рамках проекта LUH, результаты расчетов с ними различаются между собой. Так, для моделей IMAGE и MESSAGE площадь сельскохозяйственных угодий в XXI веке увеличивается, тогда как для модели MiniCAM она уменьшается. Для модели AIM также наблюдается общее расширение сельскохозяйственных угодий, за исключением тропических регионов, где они сокращаются. В связи с тем, что анализ различий результатов будущих изменений между указанными моделями не входит в цели предлагаемой работы, далее разброс результатов расчетов рассматривается как интервал неопределенности будущих изменений площади сельскохозяйственных угодий. Для первой, третьей и четвертой моделей использовалась версия 1 данных проекта, тогда как для модели IMAGE использовались данные версии 1.1\_rc1 (более подробно см. http:// luh.unh.edu/data.shtml). Для XVI-XX веков задавались также годовые эмиссии углекислого газа за счет сжигания ископаемого топлива [25] и за счет землепользования [26], продолженные назад по времени подобно [27], среднегодовые значения концентрации метана [28], закиси азота [28], фреонов CFC-11 и CFC-12 [29] (все эти газы считались хорошо перемешанными в атмосфере), полей тропосферных сульфатов [30] и вариаций солнечной постоянной [31], а также среднезональная оптическая толщина стратосферных аэрозолей (среднегодовые значения [32] вплоть до 1889 г. и среднемесячные значения [33] для 1890-2000 гг.). Для XXI века указанные антропогенные воздействия (за исключением сценариев землепользования) задавались по сценариям SRES B1, A1B и A2 [34], в том числе концентрации CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, CFC-11 и CFC-12 – по расчетам с моделью BernCC [34], а поля тропосферных сульфатов — по расчетам с моделью MOZART-2.0 [30]. Возможные вариации солнечной постоянной и толщины стратосферных аэрозолей не учитывались. В дальнейшем эти численные эксперименты обозначаются SRESxxx-LUyyy, где xxx указывает на сценарий SRES, а ууу – на модель, использованную при подготовке сценариев землепользования для XXI века. Для значений площадей сельскохозяйственных угодий, полученных с использованием каждой из таких моделей, было проведено три интегрирования КМ ИФА РАН, различающихся между собой начальными условиями. Метод выбора этих начальных условий был подобен использованному в [35].

Наряду с численными экспериментами SRESxxx—LUyyy, были также проведены соответствующие расчеты SRESxxx, в которых не учитывалось изменение альбедо поверхности суши при землепользовании, и расчеты LUyyy, в которых, наоборот, учитывалось только такое воздействие.

Следует отметить, что численные эксперименты SRESxxx не идентичны проведенным ранее в [18, 19, 36] ввиду дополнительного учета радиационного воздействия фреонов в расчетах SRESxxx предлагаемой работы.

Следует также иметь в виду, что эмиссии СО<sub>2</sub> в атмосферу из-за землепользования в сценариях SRES в общем случае не согласуются с изменением площади сельскохозяйственных угодий в сценариях LUH. Строгий учет влияния сценариев LUH на такие эмиссии в использованной версии КМ ИФА РАН невозможен из-за того, что модель содержит лишь глобально осредненный блок наземного углеродного цикла. Однако это не приводит к существенным ошибкам оценки изменения климата в XXI веке из-за доминирования эмиссий CO<sub>2</sub> за счет сжигания ископаемого топлива и промышленной деятельности в общих антропогенных эмиссиях углекислого газа в сценариях SRES [34]. В настоящее время завершается внедрение в КМ ИФА РАН пространственно распределенного блока наземного углеродного цикла, который позволит более адекватно учитывать влияние сценариев землепользования на эмиссии СО2 в атмосферу. Результаты расчетов с этой версией модели планируется опубликовать в отдельной работе.

Численные эксперименты типа LU были подробно проанализированы в [37] и в данной работе обсуждаются лишь частично.

#### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

#### 3.1. Радиационное возмущающее воздействие, связанное с изменением альбедо земной поверхности при землепользовании

Мгновенное радиационное возмущающее воздействие на верхней границе атмосферы, возникающее за счет изменения альбедо поверхности при распространении сельскохозяйственных угодий *F<sub>TOA, alb</sub>* в КМ ИФА РАН, подробно рассматривалось в [37]. При глобальном и среднегодовом осреднении оно не превышает по абсолютной величине 0.02 Вт м $^{-2}$ вплоть до начала XVIII века. Затем  $F_{TOA, alb}$ увеличивается по абсолютной величине, достигая (-0.05) Вт м<sup>-2</sup> к началу XX века и (-0.11) Вт м<sup>-2</sup> – к его концу. Последняя величина находится внутри интервала неопределенности [11], хотя и ниже его центральной оценки. Она также хорошо согласуется с оценкой (-0.1) Вт м<sup>-2</sup> [12], полученной с использованием наиболее современных данных о состоянии растительного покрова и детальной модели переноса радиации в атмосфере.

В XXI веке глобально осредненное среднегодовое значение  $F_{TOA, alb}$  при сценариях, полученных с моделями AIM, IMAGE и MESSAGE, монотонно увеличивается по модулю, достигая (-0.13) Вт м<sup>-2</sup>, хотя для первой из этих моделей проявляется небольшое уменьшение абсолютной величины PBB в последние десятилетия XXI века. В то же время при сценарии, полученном с моделью MiniCAM, абсолютное значение  $F_{TOA, alb}$  в XXI веке монотонно уменьшается по модулю, составляя (-0.08) Вт м<sup>-2</sup> в конце столетия.

Охлаждающее РВВ на верхней границе атмосферы F<sub>TOA, alb</sub> для конца XX века наиболее велико в летнем полушарии (в тропиках – в течение всего года) в регионах наибольшего распространения сельскохозяйственных угодий. Здесь оно превышает по абсолютной величине 6 Вт м<sup>-2</sup> на юге Сибири, в юговосточной Азии, на севере Индостана, в ряде регионов Северной Америки, в Европе, в Амазонии, в центральной Африке, в Индокитае и в Индонезии. Заметное охлаждающее радиационное возмущающее воздействие (до нескольких Вт м<sup>-2</sup>) развивается в Амазонии и в центральной Африке. Однако летом в регионах естественной полупустынной растительности, в настоящее время занятой сельскохозяйственными угодьями (ряд южных регионов России, север Казахстана, Сахель, Австралия, юг Африки), развивается относительно небольшое положитель-Hoe  $F_{TOA, alb}$ .

В XXI веке при сценариях изменения сельскохозяйственных угодий, полученных с моделями IMAGE и MESSAGE, на юге Сибири, в Амазонии, в центральной Африке и в регионах Северной Америки дальнейшее увеличение площади сельскохозяйственных угодий приводит к дальнейшему росту модуля  $F_{TOA, alb}$  на несколько десятых Вт м<sup>-2</sup>. При этом уменьшение охлаждающего радиационного воздействия наблюдается на севере Индостана и в ряде регионов Европы. Основное отличие изменения РВВ при сценарии, полученном с моделью AIM, от сценариев, полученных с моделями IMAGE и MESSAGE, в XXI веке состоит в уменьшении (а не увеличении) абсолютного значения F<sub>TOA, alb</sub> в Амазонии и в меньшей степени – на юге Сибири и на западе средних широт Северной Америки. При сценарии, полученном с моделью MiniCAM, радиационное возмущающее воздействие ослабевает во всех основных регионах распространения сельскохозяйственных угодий.

#### 3.2. Глобально осредненный климатический отклик

Отклик глобально осредненной среднегодовой температуры  $T_{a,s,g}$  на внешнее воздействие не превышает 0.15 К до начала XX века (рис. 1). В XX веке линейный тренд  $T_{a,s,g}$  в численных экспериментах типа SRES составляет 0.67 ± 0.11 К/столетие (здесь и далее указаны выборочное среднее для коэффициента тренда и соответствующее стандартное отклонение), что близко к верхней границе эмпирической оценки 0.6 ± 0.2 К/столетие [11]. В численных экспериментах типа LU, в свою очередь, соответствующий линейный тренд равен  $-0.07 \pm 0.02$  К/столетие. При комбинированном воздействии SRES-LU



Рис. 1. Изменение температуры атмосферы у поверхности при глобальном и десятилетнем осреднении в численных экспериментах типа SRES (пунктир), SRES-LU (сплошные линии с кружками, плюсами и направленными вверх треугольниками) и LU (линии с направленными вниз треугольниками) с КМ ИФА РАН. Для экспериментов типа SRES и SRES-LU кружки, плюсы и направленные вверх треугольники обозначают сценарии антропогенного воздействия (за исключением землепользования) SRES B1, A1B и А2 соответственно. Для экспериментов SRES-LU и LU представленные кривые – результат осреднения результатов численных экспериментов для сценариев LUH AIM, IMAGE, MESSAGE и MiniCAM. Сплошной серой линией показаны эмпирические данные HadCRUT2v [50].

линейный тренд  $T_{a,s,g}$  составляет 0.56 ± ± 0.08 К/столетие, что хорошо согласуется с эмпирической оценкой [11].

В численных экспериментах типа LU изменение T<sub>a, s, g</sub> относительно состояния модели с наличием лишь естественной растительности равно -0.11 К к концу ХХ столетия. Эта величина близка к полученной в [38] с моделью MOBIDIC и в [39] с версией модели UVic ESCM без учета сукцессии экосистем (следует иметь в виду, что в настоящее время в КМ ИФА РАН эта сукцессия также не учитывается). С другой стороны, отклик КМ ИФА РАН чуть меньше нижней (по абсолютной величине) границы соответствующего интервала от (-0.13) до (-0.25) K, полученного в [5] для ансамбля климатических моделей. Последнее объясняется, в частности, относительно низкой климатической чувствительностью использованной здесь версии КМ ИФА РАН по сравнению с климатическими моделями, использованными в [5]. Например, равновесный отклик глобально осредненной среднегодовой температуры приповерхностной атмосферы при удвоении содержания углекислого газа в атмосфере для КМ ИФА



**Рис. 2.** Изменение осадков при глобальном и десятилетнем осреднении в численных экспериментах с КМ ИФА РАН. Обозначения кривых соответствуют рис. 1.

РАН составляет 2.2 что находится в нижней части диапазона от 2 до 4.5 К, характерного для современных климатических моделей [11]. Другой возможной причиной расхождения является использование межмодельных различий в задании альбедо различных типов экосистем и использовании различных данных реконструкций для прошлых изменений распространения сельскохозяйственных угодий. В частности, в [39] изменение данных распространения сельскохозяйственных угодий, альбедо различных типов растительности и учет/неучет интерактивного отклика естественных экосистем на изменения климата привело к изменению  $T_{a,s,g}$  к концу XX века в интервале от -(0.06) до (-0.22) К. Заметные межмодельные различия температурного отклика на изменения альбедо из-за землепользования были отмечены также при анализе расчетов, проведенных в рамках проекта LUCID [7].

Глобальные годовые суммы осадков в экспериментах типа LU уменьшаются на от 0.7 до 0.8 см год<sup>-1</sup> (около 0.7%) к концу XX столетия по сравнению с состоянием модели при учете только естественной растительности (рис. 2). В XX веке линейный тренд осадков в численных экспериментах типа SRES-LU (SRES, LU) составляет  $3.2 \pm 0.5$  см год<sup>-1</sup> ( $4.1 \pm 0.6$  см год<sup>-1</sup>,  $-0.4 \pm 0.2$  см год<sup>-1</sup>).

В XXI веке  $T_{a,s,g}$  в зависимости от сценария землепользования возрастает на от 1.40 до 1.45 К (от 2.01 до 2.05 К от 2.48 до 2.53 К) при сценарии антропогенного воздействия SRES В1 (А1В, А2). Эти величины находятся в нижних частях диапазонов глобального потепления (от 1.1 до 2.9 К, от 1.7 до 1.4 К, от 2.0 до 5.4 К соответственно), характерного для ансамбля других современных климатических моделей при тех же сценариях антропогенного воздействия [11]. Рост глобальной температуры атмосферы у поверхности в использованных здесь сценариях также несущественно отличается от значений, приведенных в [19, 36], что указывает на малое влияние прямого радиационного эффекта фреонов на изменения климата в XXI веке. Глобальные суммы осадков в XXI веке в зависимости от сценария землепользования возрастают на 7-8 см год<sup>-1</sup> (11-12 см год<sup>-1</sup>, 14-15 см год<sup>-1</sup>) при сценарии антропогенного воздействия SRES B1 (A1B, A2). Как для температуры, так и для осадков наибольший рост отмечается для сценария землепользования, полученного с моделью МіпіСАМ, предполагающего сокращение площади сельскохозяйственных угодий в XXI веке на 18%, а наименьший – для сценариев, полученных с моделями MESSAGE и IMAGE, для которых общая площадь сельскохозяйственных угодий возрастает на 11 и 13% соответственно.

#### 3.3. Пространственное распределение влияния землепользования на климатический отклик в период до конца XX века

Учет изменения альбедо поверхности суши при землепользовании приводит к общему уменьшению среднегодового и сезонного потепления атмосферы у поверхности. Так, в численных экспериментах типа SRES характерные значения роста температуры атмосферы у поверхности  $T_{a,s}$  в XX веке составляют 0.2–0.5 К в тропиках и 0.5–1.2 К в более высоких широтах (рис. 3а). В экспериментах типа SRES-LU потепление уменьшается и сменяется похолоданием (до  $\approx 1$  K) в средних широтах Евразии и субтропиках Северной Америки, а также в Амазонии и в центральной Африке (рис. 3б). Именно в этих регионах отмечается наибольшее расширение сельскохозяйственных площадей в XX веке. При этом потепление усиливается в субтропических широтах Евразии, особенно на востоке Китая, где оно достигает 2 К, тогда как в численных экспериментах SRES оно близко к 1 К. Усиление потепления в этом регионе отмечается как в теплый, так и в холодный период года и связано с развивающимся в этом регионе нагревающим радиационным возмущающим воздействием из-за замены полупустынной естественной растительности на сельскохозяйственные угодья [37]. Подобное, но менее значимое усиление потепления отмечается также в субтропиках Южной Америки. Следует отметить, что линейный тренд уменьшения  $T_{a,s}$  в XX веке в субтропиках Северной Америки, в центральной Африке и в Амазонии, а также один из максимумов потепления в субтропиках Евразии выявляется также по данным наблюдений [11] (приведенный там рис. 3.9а). Од-



Рис. 3. Изменение приповерхностной температуры атмосферы [K] между 1890–1900 гг. и 1990–2000 гг. в численных экспериментах типа SRES (а) и SRES-LU (б).

нако отрицательный тренд температуры атмосферы у поверхности в средних широтах Евразии, проявляющийся в КМ ИФА РАН, по данным наблюдений [11] не выявляется. По-видимому, его возникновение в модели связано с грубостью динамической схемы модели и недостаточным переносом

тепла в восточную часть Европы циркуляцией атмосферы.

Сезонные особенности потепления в использованных в данной работе численных экспериментах были проанализированы с помощью амплитуды *Т*<sub>*a*, *s*, 1</sub> годовой гармоники *T*<sub>*a*, *s*</sub> [40, 41]. Выявленное ранее по данным наблюдений и реанализа общее уменьшение T<sub>a, s, 1</sub> над сушей средних и субполярных широт [1, 11, 41-47] воспроизводится как в численных экспериментах типа SRES, так и в численных экспериментах типа SRES-LU (рис. 4a, 4б). Важным отличием экспериментов последнего типа от экспериментов первого типа, однако, является появление области положительной корреляции  $T_{a, s, 1}$  и среднегодового значения  $T_{a, s}$  в субтропиках Евразии и Северной Америки (рис. 4б). Это согласуется с преобладающей ролью отклика в теплый период года для отмеченной выше области усиления среднегодового потепления в субтропиках Евразии. Следует отметить, что по данным наблюдений в субтропических широтах континентов Северного полушария отрицательная временная корреляция становится статистически незначимой, а в ряде регионов этого пояса проявляется статистически значимая положительная корреляция  $T_{a, s, 1}$  с локальной среднегодовой температурой [47]. Преобладающая роль летнего потепления в среднегодовой тенденции в этом регионе отмечалась также по эмпирическим данным (см. рис. 3.10 из [11]).

Численные эксперименты типа SRES характеризуются ростом количества годовых осадков во всех регионах Земли (рис. 5а). Это характерно и для расчетов с различными версиями КМ ИФА РАН без учета изменения альбедо суши при землепользовании [17, 36, 48, 49]. В численных экспериментах типа SRES-LU, однако, проявляется уменьшение осадков в субтропиках Евразии и Северной Америки, Амазонии и центральной Африки (рис. 56). Общее уменьшение осадков в этих регионах было выявлено также по данным наблюдений (рис. 3.13 и 3.14 из [11]). Уменьшение осадков в субтропиках Евразии особенно заметно в летний период (рис. 6). В субтропиках Северной Америки, в Амазонии и центральной Африке уменьшение осадков проявляется в течение всего года. В отмеченном выше регионе при учете радиационного эффекта землепользования, наоборот, в летний период осадки увеличиваются (рис. 6б).

Возможной причиной такого отклика осадков является изменение атмосферной конвекции вследствие альбедо поверхности. Так, общий рост альбедо при замене естественной растительности сельскохозяйственными угодьями приводит к охлаждению нижней тропосферы. Это приводит к уменьшению статической энергии атмосферы (как за счет уменьшения вертикального градиента температуры при похолодании, так и за счет общего уменьшения влагосодержания атмосферы). Такое уменьшение, в свою очередь, должно приводить к подавлению конвективной активности в атмосфере в соответствующих регионах и, следовательно, к уменьшению количества конвективных осадков. Роль последних над континентами тропиков существенна в течение всего года, а над сушей внетропических широт — в теплый период.

Сравнение результатов данной работы с результатами проекта LUCID (где был получен широкий диапазон отклика моделей на распространение сельскохозяйственных угодий, отличающийся между различными моделями как по абсолютной величине, так и по знаку) показывает, что летний отклик температуры и осадков в КМ ИФА РАН в численных экспериментах типа LU на антропогенное изменение альбедо поверхности суши в XX веке наиболее близок к отклику моделей CCAM-CABLE и SPEEDY-LPJmL (см. [7]).

#### 3.4. Пространственное распределение влияния землепользования на климатический отклик в XXI веке

В XXI веке влияние изменения альбедо поверхности суши при землепользовании на изменение температуры и осадков относительно невелико. Так, при использованных сценариях антропогенного воздействия наибольшие изменения  $T_{a, s, g}$  отмечаются над сушей средних и высоких широт. Максимальное потепление отмечается во внутренних регионах Евразии, где оно достигает 4 К (6К, 7 К) в экспериментах типа численных SRES B1 (SRES A1B, SRES A2) (рис. 7). Пространственное распределение в целом близко к полученному в [36] при использовании близкой версии КМ ИФА РАН, но без учета влияния прямого радиационного эффекта фреонов.

Учет прямого радиационного эффекта землепользования изменяет эти значения, как правило, не более чем на несколько десятых долей Кельвина (рис. 8). Исключением является численный эксперимент с КМ ИФА РАН. в котором плошаль сельскохозяйственных угодий задана по расчетам с моделью MiniCAM. Для этого численного эксперимента усиление потепления в средних широтах Евразии достигает 1.5 К. В среднем за год при всех сценариях землепользования потепление усиливается в ряде регионов средних широт Евразии и Северной Америки (особенно для сценария, полученного с моделью MiniCAM). При сценариях землепользования, полученных с моделями IMAGE и MESSAGE, дальнейшее увеличение площади сельскохозяйственных угодий в тропиках и субтропиках приводит к ослаблению потепления на севере Индостана и Индокитая, субтропиках Северной и Южной Америки и в экваториальных регионах Африки и Южной Америки (рис. 8а, 8б). Подобное из-



**Рис. 4.** Отношение изменения амплитуды годовой гармоники приповерхностной температуры атмосферы между 1890–1900 гг. и 1990–2000 гг. к соответствующему изменению среднегодовой температуры в численных экспериментах типа SRES (а) и SRES-LU (б). В обоих случаях области, где изменение среднегодовой температуры по абсолютному значению меньше 0.1 К, не учитываются.



**Рис. 5.** Изменение годовых сумм осадков [см] между 1890–1900 гг. и 1990–2000 гг. в численных экспериментах типа SRES (а) и SRES-LU (б).



**Рис. 6.** Изменение сумм осадков [мм] между 1890–1900 гг. и 1990–2000 гг. в январе (а) и июле (б) в численных экспериментах типа SRES-LU.



**Рис. 7.** Изменение среднегодовой температуры атмосферы у поверхности [K] между 1990–2000 гг. и 2090–2100 гг. в численных экспериментах с КМ ИФА РАН при сценариях антропогенного воздействия SRES B1 (а) и A2 (б) с учетом радиационного эффекта землепользования. Во все трех случаях представлены результаты, осредненные по расчетам SRES*xxx*–IMAGE, SRES*xxx*–MESSAGE, SRES*xxx*–AIM и SRES*xxx*–MiniCAM, *xxx* = B1, A2.

2

3

1

5



**Рис. 8.** Влияния изменения альбедо поверхности суши при землепользовании на отклик среднегодовой температуры атмосферы у поверхности [K] между 1990–2000 гг. и 2090–2100 гг. при сценариях изменения площади сельскохозяйственных угодий MESSAGE (a), IMAGE (б), AIM (в) и MiniCAM (г). В обоих случаях представлены результаты, осредненные по расчетам SRES B1-LU*yyy*, SRES A1B-LU*yyy* и SRES A2-LU*yyy*, *yyy* = MESSAGE, IMAGE, AIM, MiniCAM.



Рис. 8. Окончание.

менение отклика  $T_{a,s}$  отмечается и в численных экспериментах SRESxxx-LUAIM (xxx = B1, A1B, A2), но область ослабления потепления в этих расчетах не проявляется (рис. 8в). При сценарии землепользования, полученного с моделью MiniCAM, сокращение площади сельскохозяйственных угодий во всех современных регионах распространения сельского хозяйства приводит к усилению локального потепления (рис. 8г).

Пространственная структура изменения отклика осадков на антропогенное воздействие из-за радиационного эффекта землепользования в КМ ИФА РАН в целом подобна соответствующей структуре для температуры. При этом такое изменение отклика осадков в КМ ИФА РАН не превышает нескольких миллиметров в месяц.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе проведены численные эксперименты с климатической моделью промежуточной сложности ИФА РАН для XVI-XXI веков при задании антропогенного воздействия за счет изменения содержания парниковых газов, сульфатных аэрозолей (тропосферных и стратосферных), солнечной постоянной, а также из-за радиационного эффекта, возникающего при замене естественной растительности сельскохозяйственными угодьями. Площадь распространения сельскохозяйственных угодий задавалась по данным HYDE 3.1 для XVI-XX веков и по сценариям проекта Land Use Harmonization – для XXI столетия. Другие естественные и антропогенные воздействия задавались по данным реконструкций вплоть до конца XX века; в 2000–2100 гг. антропогенные воздействия (включая эмиссии парниковых газов за счет землепользования) были заданы по сценариям SRES; возможные внешние естественные воздействия на климатическую систему не учитывались.

Изменение альбедо земной поверхности при замене естественной растительности сельскохозяйственными угодьями приводит к развитию охлаждающего радиационного возмущающего воздействия (РВВ) в большинстве регионов. Однако летом в регионах естественной полупустынной растительности, в настоящее время занятой сельскохозяйственными угодьями (ряд южных регионов России, север Казахстана, Сахель, Австралия, юг Африки), развивается относительно небольшое нагревающее РВВ. Глобально осредненное среднегодовое значение этого воздействия, а также его пространственное и сезонное распределение в целом согласуются с соответствующими оценками, выполненными в других работах. В частности, в конце XX века глобально осредненное значение такого воздействия в КМ ИФА РАН составляет -0.11 Вт м<sup>-2</sup>.

Учет прямого радиационного эффекта землепользования в КМ ИФА РАН привел к заметному

улучшению согласия модельных расчетов в исторический период с данными наблюдений. В XX веке вклад этого эффекта в линейный тренд глобальной температуры атмосферы у поверхности  $T_{a, s, g}$  на порядок меньше вклада других внешних воздействий на климат. Однако в численных экспериментах с КМ ИФА РАН при учете этого эффекта тренд Та, s, g приближается к центру диапазона неопределенности соответствующих данных наблюдений, тогда как в численных экспериментах, где изменение альбедо поверхности при замене естественной растительности сельскохозяйственными угодьями не учитывалось, тренд глобальной температуры в КМ ИФА РАН близок к верхней границе указанного интервала неопределенности. Существенно улучшается и воспроизведение региональных особенностей изменения климата. Так, в XX веке при учете радиационного эффекта землепользования частично воспроизводятся регионы среднегодового похолодания (в субтропиках Северной Америки, в Амазонии и в центральной Африке) и локальный максимум среднегодового и летнего потепления на востоке Китая; соответствующее изменение отклика температуры атмосферы у поверхности T<sub>a.s</sub> составляет 0.2-0.5 К в тропиках и 0.5-1.2 К в более высоких широтах. При этом радиационный эффект землепользования меняет также знак связи характеристик годового хода  $T_{a,s}$  с локальной среднегодовой температурой.

Учет изменения альбедо поверхности суши при замене естественной растительности сельскохозяйственными угодьями в КМ ИФА РАН привел к тому, что в ряде регионов (субтропики Евразии и Северной Америки, Амазония, центральная Африка) в XX веке годовое количество осадков уменьшилось, что согласуется с данными наблюдений. Для субтропиков Евразии такое уменьшение годовых осадков обусловлено уменьшением количества осадков летом, что также согласуется с данными наблюдений. Возможной причиной такого отклика осадков на землепользование является ослабление конвективной активности в атмосфере в теплый период (в тропиках — в течение всего года) и соответствующее уменьшение конвективных осадков.

В XXI веке влияние радиационного эффекта землепользования на климатический отклик при использованных сценариях антропогенного воздействия относительно невелико. Так, к концу этого столетия различие изменения  $T_{a,s,g}$  между различными сценариями землепользования составляет 0.05 К при заданном сценарии антропогенного воздействия SRES, т.е. < 4% от значения, осредненного по численным экспериментам SRES B1-LUMESSAGE, SRES B1-LUIMAGE, SRES B1-LUAIM и SRES B1-LUMIniCAM и < 2% для соответствующих средних значений для сценариев SRES A1B и A2. Соответствующее изменение отклика глобального годового

количества осадков на антропогенное воздействие не превышает 0.5 см  $rog^{-1}$ , т.е. 6% от величины роста осадков в XXI веке при сценарии SRES B1 и < 4% при сценариях SRES A1B и A2. Прямой радиационный эффект землепользования изменяет климатический отклик температуры, как правило, не более чем на несколько десятых долей Кельвина, а осадков не более чем на несколько миллиметров в месяц. Исключением является сценарий, полученный с моделью MiniCAM, при котором усиление потепления в средних широтах Евразии достигает 1.5 К. В целом потепление и рост осадков усиливаются при сокращении площади распространения сельскохозяйственных угодий в данном регионе и уменьшается — при их сокращении.

Авторы выражают благодарность Л.Л. Голубятникову за полезные обсуждения, анонимному рецензенту — за комментарии к предыдущей версии работы, позволившие улучшить представление полученных результатов, и сотрудникам проекта Land Use Harmonization — за предоставленные реконструкции и сценарии будущих изменений площади распространения сельскохозяйственных угодий. Работа была поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, программами Президиума и Отделения наук о Земле Российской академии наук, Министерства образования и науки РФ, а также грантом Президента РФ НШ-3301.2010.5.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Антропогенные изменения климата / Под ред. Будыко М.И., Израэля Ю.А. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 406 с.
- Bonan G.B., Pollard D., Thompson S.L. Effects of boreal forest vegetation on global climate // Nature. 1992. V. 359. № 6397. P. 716–718.
- 3. *Betts R.A.* Offset of the potential carbon sink from boreal forestation by decreases in surface albedo // Nature. 2000. V. 408. № 6809. P. 187–190.
- Sitch S., Brovkin V., von Bloh W. et al. Impacts of future land cover changes on atmospheric CO<sub>2</sub> and climate // Glob. Biogeochem. Cycles. 2005. V. 19. № 2. P. GB2013.
- 5. Brovkin V., Claussen M., Driesschaert E. et al. Biogeophysical effects of historical land cover changes simulated by six Earth system models of intermediate complexity // Clim. Dyn. 2006. V. 26. № 6. P. 587–600.
- Bonan G.B. Forests and climate change: Forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests // Science. 2008. V. 320. № 5882. P. 1444–1449.
- Pitman A.J., de Noblet-Ducoudré N., Cruz F.T. et al. Uncertainties in climate responses to past land cover change: First results from the LUCID intercomparison study // Geophys. Res. Lett. 2009. V. 36. № 14. P. L14814.
- Ramankutty N., Foley J.A. Estimating historical changes in global land cover: Croplands from 1700 to 1992 // Glob. Biogeochem. Cycles. 1999. V. 13. № 4. P. 997– 1027.

- 9. *Klein Goldewijk K.* Estimating global land use change over the past 300 years: the HYDE database // Glob. Biogeochem. Cycles. 2001. V. 15. № 2. P. 417–434.
- 10. *Ramankutty N., Evan A.T., Monfreda C. et al.* Farming the planet: 1. geographic distribution of global agricultural lands in the year 2000 // Glob. Biogeochem. Cycles. 2008. V. 22. № 1. P. GB1003.
- Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Solomon S., Qin D., Manning M. et al. (eds.). Cambridge/New York: Cambridge University Press. 2007. 996 p.
- Myhre G., Kvalevåg M.M., Schaaf C.B. Radiative forcing due to anthropogenic vegetation change based on MODIS surface albedo data // Geophys. Res. Lett. 2005. V. 32. № 21. P. L21410.
- 13. Claussen M., Mysak L., Weaver A. et al. Earth system models of intermediate complexity: closing the gap in the spectrum of climate system models // Clim. Dyn. 2002. V. 18. № 7. P. 579–586.
- Petoukhov V., Claussen M., Berger A. et al. EMIC intercomparison project (EMIP-CO<sub>2</sub>): Comparative analysis of EMIC simulations of current climate and equilibrium and transient reponses to atmospheric CO<sub>2</sub> doubling // Clim. Dyn. 2005. V. 25. № 4. P. 363–385.
- Petoukhov V.K., Mokhov I.I., Eliseev A.V. et al. The IAP RAS Global Climate Model. Moscow: Dialogue– MSU, 1998. 110 p.
- 16. *Handorf D., Petoukhov V.K., Dethloff K. et al.* Decadal climate variability in a coupled atmosphere-ocean climate model of moderate complexity // J. Geophys. Res. 1999. V. 104. № D22. P. 27253–27275.
- Мохов И.И., Елисеев А.В., Демченко П.Ф. и др. Климатические изменения и их оценки с использованием глобальной модели ИФА РАН // Доклады РАН. 2005. Т. 402. № 2. С. 243–247.
- 18. Елисеев А.В., Мохов И.И., Аржанов М.М. и др. Взаимодействие метанового цикла и процессов в болотных экосистемах в климатической модели промежуточной сложности // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44. № 2. С. 147–162.
- Мохов И.И., Безверхний В.А., Елисеев А.В. и др. Модельные оценки возможных климатических изменений в XXI веке при различных сценариях солнечной и вулканической активности и антропогенных воздействий // Космические исследования. 2008. Т. 46. № 4. С. 363–367.
- Dickinson R.E., Henderson-Sellers A., Kennedy P.J. et al. Biosphere-atmosphere transfer scheme (BATS). NCAR TN-275-STR. Boulder, Colo: Naval Weather Service, 1986. 69 p.
- Monserud R.A., Leemans R. Comparing global vegetation maps with the Kappa statistic // Ecol. Mod. 1992. V. 62. № 4. P. 275–293.
- 22. *Leemans R.* Global data sets collected and compiled by the Biosphere Project. Laxenburg: International Institute for Applied System Analysis, 1990.
- 23. *Аржанов М.М., Демченко П.Ф., Елисеев А.В. и др.* Воспроизведение характеристик почвы в равновесных численных экспериментах с моделью климата промежуточной сложности // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44. № 5. С. 591–610.

- Hurtt G.C., Chini L.P., Frolking S. et al. Harmonization of global land-use scenarios for the period 1500-2100 for IPCC-AR5 // Integrated Land Ecosystem-Atmosphere Processes Study (iLEAPS) Newsletter. 2009. № 7. P. 6-8.
- Marland G., Boden T.A., Andres R.J. Global, regional, and national CO<sub>2</sub> emissions // Trends: A Compendium of Data on Global Change Oak Ridge, Tenn.: Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, 2005.
- 26. *Houghton R.A.* Revised estimates of the annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use and land management 1850–2000 // Tellus. 2003. V. 55B. № 2. P. 378–390.
- 27. Мохов И.И., Безверхний В.А., Елисеев А.В. и др. Модельные оценки глобальных климатических изменений в XXI веке с учетом различных сценариев вариаций солнечной активности // ДАН. 2006. Т. 411. № 2. С. 250–253.
- MacFarling Meure C., Etheridge D., Trudinger C. et al. Law Dome CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and N<sub>2</sub>O ice core records extended to 2000 years BP // Geophys. Res. Lett. 2006. V. 33. № 14. P. L14810.
- 29. Walker S.J., Weiss R.F., Salameh P.K. Reconstructed histories of the annual mean atmospheric mole fractions for the halocarbons CFC-11, CFC-12, CFC-113, and carbon tetrachloride // J. Geophys. Res. 2000. V. 105. № C6. P. 14285–14296.
- Horowitz L.W. Past, present, and future concentrations of tropospheric ozone and aerosols: Methodology, ozone evaluation, and sensitivity to aerosol wet deposition // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. № D22. P. D22211.
- Wang Y.-M., Lean J., Sheeley N.R. Modeling the Sun's magnetic field and irradiance since 1713 // Astrophys. J. 2005. V. 625. № 1. P. 522–538.
- Robertson A., Overpeck J., Rind D. et al. Hypothesized climate forcing time series for the last 500 years // J. Geophys. Res. 2001. V. 106. № D14. P. 14783– 14804.
- 33. Ammann C.M., Meehl G.A., Washington W.M. et al. A monthly and latitudinally varying volcanic forcing dataset in simulations of 20th century climate // Geo-phys. Res. Lett. 2003. V. 30. № 12. P. 1657.
- 34. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds: Houghton J.T., Ding Y., Griggs D.J. et al. Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2001. 881 p.
- 35. Демченко П.Ф., Елисеев А.В., Аржанов М.М. и др. Влияние скорости глобального потепления на таяние вечной мерзлоты // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2006. Т. 42. № 1. С. 35–43.
- 36. Елисеев А.В., Мохов И.И., Карпенко А.А. Влияние учета прямого радиационного воздействия сульфатных аэрозолей на результаты численных экспериментов с климатической моделью промежуточной сложности // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2007. Т. 43. № 5. С. 591–601.
- 37. Елисеев А.В., Мохов И.И. Влияние изменения альбедо поверхности суши при землепользовании на

климат XVI—XXI веков: оценки с использованием КМ ИФА РАН // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем / Под ред. Израэля Ю.А., Семенова С.М., Абакумова В.Н. и др. СПб.: Гидрометеоиздат, 2010. С. 39–66.

- Bertrand C., Loutre M.-F., Crucifix M. et al. Climate of the last millenium: a sensitivity study // Tellus. 2002. V. 54A. № 3. P. 221–244.
- 39. *Matthews H.D., Weaver A.J., Meissner K.J. et al.* Natural and anthropogenic climate change: incorporating historical land cover change, vegetation dynamics and the global carbon cycle // Clim. Dyn. 2004. V. 22. № 5. P. 461–479.
- 40. *Мохов И.И.* Анализ годового хода характеристик климата // Метеорология и гидрология. 1985. № 9. С. 38–45.
- 41. Елисеев А.В., Мохов И.И., Вакалюк Н.Ю. Тенденции изменения фазовых характеристик годового хода приповерхностной температуры суши северного полушария // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2000. Т. 36. № 1. С. 16–26.
- 42. *Мохов И.И., Елисеев А.В.* Тенденции изменения характеристик годового хода температуры тропосферы и стратосферы // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1997. Т. 33. № 4. С. 452–463.
- 43. Jones P.D., New M., Parker D.E. et al. Surface air temperature and its changes over the past 150 years // Rev. Geophys. 1999. V. 37. № 2. P. 173–199.
- 44. *Hansen J., Ruedy R., Glascoe J. et al.* GISS analysis of surface temperature change // J. Geophys. Res. 1999. V. 104. № D24. P. 30997–31022.
- 45. *Wallace C.J., Osborn T.J.* Recent and future modulation of the annual cycle // Clim. Res. 2002. V. 22. № 1. P. 1–11.
- 46. *Eliseev A.V., Mokhov I.I.* Amplitude–phase characteristics of the annual cycle of surface air temperature in the Northern Hemisphere // Adv. Atmos. Sci. 2003. V. 20. № 1. P. 1–16.
- 47. Елисеев А.В., Мохов И.И., Гусева М.С. Чувствительность амплитудно-фазовых характеристик годового хода приповерхностной температуры к изменению среднегодовой температуры: сравнение данных реанализа и результатов расчетов с климатическими моделями // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2006. Т. 42. № 3. С. 326–340.
- 48. Мурышев К.Е., Елисеев А.В., Мохов И.И. и др. Климатическая модель ИФА РАН с использованием модели общей циркуляции океана в качестве океанического блока // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45. № 4. С. 448–466.
- 49. Елисеев А.В., Мохов И.И., Мурышев К.Е. Оценки изменений климата XX—XXI веков с использованием версии климатической модели ИФА РАН, включающей в себя модель общей циркуляции океана // Метеорология и гидрология. В печати. 2011.
- 50. Brohan P., Kennedy J.J., Harris I. et al. Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: A new data set from 1850 // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. № D12. P. D12106.

## Effect of Including Land-Use Driven Radiative Forcing of the Surface Albedo of Land on Climate Response in the 16th–21st Centuries

#### A. V. Eliseev and I. I. Mokhov

Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, per. Pyzhevskii 3, Moscow, 199017 e-mail: eliseev@ifaran.ru

Received February 3, 2010; in final form, March 16, 2010

Abstract—A change in ecosystem types, such as through natural-vegetation–agriculture conversion, alters the surface albedo and triggers attendant shortwave radiative forcing (RF). This paper describes numerical experiments performed using the climate model (CM) of the Institute of Atmospheric Physics (IAP), Russian Academy of Sciences, for the 16th–21st centuries; these models simulated the response to a change in the contents of greenhouse gases (tropospheric and stratospheric), sulfate aerosols, solar constant, as well as the surface albedo of land during natural-vegetation-agriculture conversion. These forcing estimates relied on actual data until the late 20th century. In the 21st century, the agricultural area was specified according to scenarios of the Land Use Harmonization project and other anthropogenic impacts were specified using SRES scenarios. The change in the surface vegetation during conversion from natural vegetation to agriculture triggers a cooling RF in most regions except for those of natural semiarid vegetation. The global and annual average RF derived from the CM IAP in late 20th century is -0.11 W m<sup>-2</sup>. Including the land-use driven RF in CM IAP appreciably reconciled the model calculations to observations in this historical period. For instance, in addition to the net climate warming, CM IAP predicted an annually average cooling and reduction in precipitation in the subtropics of Eurasia and North America and in Amazonia and central Africa, as well as a local maximum in annually average and summertime warming in East China. The land-use driven RF alters the sign in the dependence that the amplitude of the annual behavior of the near-surface atmospheric temperature has on the annually averaged temperature. One reason for the decrease in precipitation as a result of a change in albedo due to land use practices may be the suppression of the convective activity in the atmosphere in the warm period (throughout the year in the tropics) and the corresponding decrease in convective precipitation. In the 21st century, the effect that the land-use driven RF has on the climate response for scenarios of anthropogenic impact is generally small.

Keywords: land use practices, radiative forcing, future climate change scenarios, CM IAP