ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ЛЕСИСТОСТИ ЦЕНТРАЛЬНОГО РЕГИОНА ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ РАВНИНЫ НА ЛЕТНИЕ ПОГОДНЫЕ УСЛОВИЯ

А.В. Ольчев $^{1,2)}$, И.А. Розинкина $^{3)}$, Е.В. Кузьмина $^{3)}$, М.А. Никитин $^{3)}$, Г.С. Ривин $^{1,3)}$

¹⁾ Географический факультет МГУ, РФ, 119991, Москва, Ленинские горы, ГСП-1; aoltche@gmail.com

 $^{2)}$ Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, РФ, 119071, Москва, Ленинский пр., 33; aoltche@gmail.com

³⁾ Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, РФ, 123242, Москва, Большой Предтеченский переулок, д. 9-13; inna.rozinkina@mail.ru

Резюме. Оценка влияния процессов обезлесения и облесения на региональные метеорологические условия была выполнена на основе серии численных экспериментов с применением негидростатической мезомасштабной атмосферной модели COSMO с шагом сетки 13.2 км. В качестве начальных и граничных условий использовались результаты реанализа ERA-Interim. При расчетах использовались инфраструктурные элементы исследовательской технологии COSMO-CLM и оперативной системы COSMO-Ru прогноза погоды Гидрометцентра России. Модельные расчеты проводились для области, охватывающей большую часть Восточно-Европейской равнины. В центральной части этой области был дополнительно выбран "модельный регион", ограниченный координатами 55° и 59° с.ш., 28° и 37° в. д., внутри которого имитировалось изменение лесистости. В рамках исследования было проведено три эксперимента. Первый эксперимент имитировал полное сведение лесов (обезлесение) в пределах "модельного региона" и их замещение травянистой растительностью. Второй эксперимент был наоборот, полного облесения этой территории. Увеличение лесистости в рассматривае-мом сценарии происходило исключительно за счет увеличения доли пионер-ных мелколиственных пород деревьев. В третьем, контрольном эксперименте, расчеты метеорологических величин проводились современной структуры землепользования.

Результаты проведенного модельного исследования, выполненного на примере теплого периода 2010 года, показали, что процессы обезлесения и облесения в пределах крупного региона в природно-климатических условиях Восточно-Европейской равнины могут привести к существенным изменениям погодных условий. Было показано, что если изменения некоторых метеорологических характеристик (приземной температуры) характерны непосредственно для внутренней части региона, где имитировалось изменение лесистости, то изменение режима осадков может прослеживаться на всей территории Восточно-Европейской равнины, даже в районах, достаточно удаленных от внешних границ "модельного региона". Расчеты показали, что про-

цессы обезлесения в теплый период года могут привести к росту температуры и скорости ветра, уменьшению осадков, количества нижней облачности и влажности. Процессы облесения могут привести к обратным эффектам (снижению температуры, увеличению осадков, росту влажности и повторяемости туманов, снижению случаев со штормовыми усилениями ветра). Максимальные изменения в значениях метеорологических величин были установлены для летних месяцев (июль, август).

Ключевые слова. Мезомасштабное численное моделирование, модель COSMO, изменение лесистости, обезлесение, облесение, приземная температура воздуха, суммы осадков, повторяемость туманов, скорость ветра.

ASSESSING THE INFLUENCE OF FOREST COVER CHANGES ON SUMMER WEATHER CONDITIONS IN THE CENTRAL PART OF THE EAST-EUROPEAN PLAIN

A.V. Olchev ^{1,2)}, I.A. Rozinkina ³⁾, E.V. Kuzmina ³⁾, M.A. Nikitin ³⁾, G.S. Rivin ^{1,3)}

¹⁾ Faculty of Geography, Moscow State University, 1, Leniskie Gory, 119991, Moscow, Russia; *aoltche@gmail.com*

²⁾ A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution, Russian Academy of Sciences, 33, Leninsky Prospekt, 119071, Moscow, Russia; *aoltche@gmail.com*

³⁾ Hydrometeorological Centre of Russia, 9-13, Predtechenskiy Per., 123242, Moscow, Russia; *inna.rozinkina@mail.ru*

Summary. The influence of deforestation and afforestation processes on regional weather conditions was estimated from numerical experiments using the non-hydrostatic mesoscale atmospheric model COSMO with 13.2 km grid spacing. The model uses the ERA-Interim global atmospheric reanalysis as initial and boundary conditions with grid spacing of 80.2 km. For the numerical experiments the infrastructure elements of the COSMO-CLM and COSMO-Ru configurations were used. The "model region" selected for the study is bounded by geographical coordinates 55° and 59°N and 28° and 37°E and situated in the central part of large modeling domain covered almost the entire East European Plain. Within the "model region" the different scenarios of forest cover change were simulated. Three main numerical experiments were conducted in the modeling study. The first modeling experiment assumed the total deforestation of the "model region" and replacement of forest communities by grasslands. The second experiment was a scenario of total afforestation of the "model region". It assumed that an increase in the forest cover is due to an increase of the fraction of pioneer small-leaved tree species. In the third, control experiment the weather conditions were simulated under present land-use structure. The results of the modeling study conducted for the warm period of 2010 showed that deforestation and afforestation processes within the large region under natural and climatic conditions of the East European Plain can lead to significant changes in weather conditions. It was shown that while changes of some meteorological characteristics (e.g., air temperature) take place

just in the "model region" where forest cover changes are simulated, the changes in precipitation may occur over the entire modeling domain, even in the areas situated far away from the external boundaries of the "model region". The computations showed that in the warm season the deforestation processes can result in increased air temperature and wind speed as well as in reduction of precipitation, lower clouds, and humidity. Afforestation process can result in opposite effects (decrease in temperature; increase in precipitation, humidity and fog frequency; decrease in the number of events with storm strengthening of wind). Maximal changes of meteorological parameters are projected for the summer months (July and August).

Keywords. Mesoscale numerical modeling, COSMO model, forest cover change, deforestation, afforestation, surface air temperature, precipitation amount, fog frequency, wind speed.

Введение

Задача исследования процессов взаимодействия лесной растительности и атмосферы на разных пространственных и временных масштабах (от масштаба отдельной экосистемы до крупных регионов и всей поверхности суши в целом) является в настоящее время ключевой составляющей многочисленных метеорологических и экологических исследований. Для ее решения на протяжении последних нескольких десятилетий использовался широкий спектр экспериментальных и модельных подходов (Елисеев, Мохов, 2011; Мухартова и др., 2015; Молчанов и др., 2017; Bonan et al., 1992; Amiro, 2001; Brovkin et al., 2009; Bathiany et al., 2010; Port et al., 2012; Pitman et al., 2009; Olchev et al., 2009; de Noblet-Ducoudré et al., 2012; Lejeune et al., 2017; Mamkin et al., 2016; и др.). Основное внимание в этих исследованиях было направлено главным образом на оценку чувствительности и отклика лесных экосистем на изменение условий внешней среды. Кроме того, важным элементом подобных исследований являлось определение влияния различных типов проводимых лесохозяйственных мероприятий (рубки главного пользования и, в том числе, сплошные и выборочные рубки) на микроклиматические условия и потоки парниковых газов в лесных экосистемах (Radler et al., 2010; Mamkin et al., 2016). В ряде модельных исследований рассматривались также и возможные эффекты воздействия процессов обезлесения и изменения структуры землепользования на региональные метеорологические условия как при современном климате, так и при разных сценариях его будущего изменения (Елисеев, Мохов, 2011; Юрова, Володин, 2011; Brovkin et al., 2009; Pitman et al., 2009; Bathiany et al., 2010). К сожалению, полученные многочисленные результаты пока не позволяют в полной мере очертить весь комплекс причинно-следственных связей, возникающих между атмосферными процессами и подстилающей поверхностью. Особенно большая неопределенность сохраняется при описании процессов взаимодействия лесной растительности и атмосферы в региональном масштабе. В частности, в ходе реализации проекта LUCID (Land-Use and Climate, IDentification of robust impacts) по оценке влияния изменения структуры землепользования на региональные и глобальные климатические условия с применением консорциума климатических моделей, было выявлено наличие существенных различий в прогнозных оценках значений температуры и осадков, радиационных характеристик, величин эвапотранспирации, выполненных разными моделями (Pitman et al., 2009). Подобные различия авторы связывают с неточностями при описании фенологии растительных сообществ (прежде всего сельскохозяйственных посевов), альбедо поверхности, фактического испарения и других параметров. Некоторые модели совсем не воспроизводят обратного воздействия смены растительности на моделируемый климат (Юрова, Володин, 2011). Можно говорить, что подобные погрешности в используемых региональных и глобальных моделей связаны, прежде всего, со множеством упрощений, используемых в модельной интерпретации процессов взаимодействия земной поверхности покрытой растительностью и атмосферы, а также в дефиците необходимых для описания подобных процессов входных параметров. Кроме того, точность проводимых расчетов ограничена и значительной неоднородностью ландшафтной структуры земной поверхности. В этой связи представляется вполне закономерным повышенный интерес к использованию все более полных, физически обоснованных и детальных по пространственному представлению технологий численного атмосферного моделирования. Как следствие, в последнее время важнейшим инструментом региональных исследований становятся мезомасштабные модели, выполняющие расчеты с использованием результатов глобального моделирования и позволяющие с более высоким разрешением и более детально описать процессы взаимодействия земной поверхности и атмосферы (Li et al., 2013).

В рамках проведенного исследования для оценки возможного влияния изменения лесистости центральных районов Восточно-Европейской равнины на региональные метеорологические условия была выполнена серия численных экспериментов с применением негидростатической мезомасштабной атмосферной модели COSMO. Для численных экспериментов был выбран летний период (с мая по сентябрь) 2010 года. Основными задачами работы явилось получение ориентировочных количественных оценок влияния изменения лесистости в выбранном модельном регионе на изменения погодообразующих метеорологических параметров, а также на ряд таких характеристик, как продолжительность периодов с аномально-жаркой погодой, число дней с отрицательными температурами в теплую половину года, повторяемость туманов и штормовых ветров. При анализе изменений метеорологических параметров в регионе рассматривалось влияние различных факторов, среди которых особое внимание уделялось составляющим теплового баланса и, прежде всего, затратам тепла на турбулентный теплообмен и испарение. Для верификации выполненных модельных расчетов в исследовании проводилось сопоставление основных выявленных закономерностей с результатами натурных измерений, проведенных на исследуемой территории в последнее время.

Методы и материалы

Характеристика района исследований

Для проведения численных экспериментов была выбрана территория Восточно-Европейской равнины, простирающаяся с юга на север от 50° до 70° с.ш. и с запада на восток от 15° до 55° в.д. В центральной части данной территории был выбран "модельный регион", ограниченный координатами 55° и 59° с.ш., 28° и 37° в.д., в пределах которого проводилась имитация изменения степени облесенности территории (рис. 1). Выбор для модельных экспериментов данного региона обусловлен целым рядом факторов и, прежде всего, его значительной облесенностью, а также высокой биосферной и социальной значимостью лесных угодий в регионе. В частности, в пределах выбранного региона расположены несколько природных биосферных заповедников, а также находятся истоки важнейших водных артерий Европейской части России – Волги, Западной Двины и Днепра. "Модельный регион" расположен в пределах нескольких природных зон, включая подзону темнохвойных лесов южной тайги на севере, смешанных лесов в центральной части и широколиственных лесов на крайнем юге. Общая площадь покрытия лесов (лесистость) в выбранном регионе составляет около 50% (Ольчев и др., 2017).

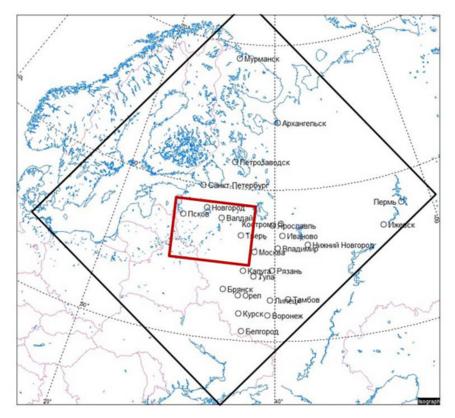


Рисунок 1. Географическое расположение моделируемой области (черный контур) и "модельного региона", в пределах которого имитировалось изменение лесистости (красный контур)

Мезомасштабная модель COSMO

Реализованная в 2009 г. в Гидрометцентре России система численного прогноза погоды COSMO-Ru на базе конфигурации COSMO-Ru (Ривин и др., 2015) негидростатической мезомасштабной модели COSMO (Baldauf et al., 2011) является в Росгидромете и в Гидрометцентре России базовым инструментарием оперативного численного мезомасштабного прогноза погоды для территории России. Модель COSMO основана на решении конечно-разностным методом негидростатической (т.е. включающей все адвективные члены, в том числе и в уравнении движения для вертикальной скорости) системы уравнений термогидродинамики, описывающих сжимаемый поток воздуха во влажной атмосфере, а именно, второй закон Ньютона, законы сохранения массы и энергии, уравнение состояния, уравнения для фазовых переходов воды (Ривин и др., 2012, 2015, 2017; Baldauf et al., 2011). Характерной особенностью модели COSMO является применение сферической системы координат со сдвинутыми полюсами. С этой целью систему координат сдвигают так, чтобы экватор проходил примерно через центр расчётной области. В результате значения шага сетки, измеряемые в метрах, и по меридиану и по параллели получаются фактически близкими, за счет чего и удается избежать как проблемы сгущения меридианов возле полюса, так и связанной с ней необходимостью уменьшать шаги по времени и, тем самым, увеличивать время вычислений. Отметим, что благодаря негидростатичности модели COSMO можно с конфигурацией COSMO-Ru проводить моделирование конвективных систем порядка 10 км при выборе шага сетки 1-2 км.

Для описания процессов взаимодействия атмосферы с подстилающей поверхностью в модели COSMO используется модель подстилающей поверхности суши TERRA (Doms et al., 2011), учитывающая процессы тепло- и влагопереноса в системе "почва – растительность – атмосфера" через описание: турбулентного режима приземного слоя атмосферы, механизмов устьичной регуляции растительного покрова, процессов поглощения почвенной влаги корнями растений из 9 почвенных слоев (до глубины 11.5 м) и ее переноса в атмосферу. Параметры, характеризующие орографию, физические свойства почвы и биофизические свойства растительности, включены во внешний массив, который формируется на основе данных глобальных архивов с шагом широтно-долготной сетки 30" (примерно 1 км). По растительному покрову используются архивы GLC2000 и GLCC, по свойствам почвы – DSMW, по орографии – *GLOBE*.

Для оценки точности воспроизведения конфигурацией COSMO-Ru полей температуры и осадков было проведено сравнение модельных расчетов метеорологических параметров с данными наблюдений на метеорологических станциях, доступными из баз данных Гидрометцентра России после их сбора и передачи в рамках Глобальной сети коммуникаций Всемирной метеорологической организации. Результаты мониторинга качества модели, проведенные приблизительно для 150 метеостанций, расположенных на Европейской части России (Ривин и др., 2012, 2017), говорят о высокой реа-

листичности моделирования элементов погоды с использованием системы прогноза погоды COSMO-Ru. По результатам оперативных испытаний системы негидростатического краткосрочного прогноза погоды COSMO-Ru Центральная методическая комиссия (ЦМКП) Росгидромета 11 апреля 2011 года рекомендовала Гидрометцентру России внедрить версию модели с шагом сетки 7 км в оперативную практику в качестве базовой для численного прогноза ряда метеорологических величин.

Наряду с версией модели с шагом сетки 7 км, и охватывающей Европейскую территорию России и прилегающие территории, в настоящее время в оперативной практике используется также и версия модели с шагом сетки 13.2 км. Она охватывает значительную часть территории Евразии (за исключением Южной и Юго-Восточной Азии), а также прилегающие акватории Тихого и Северного Ледовитого океанов. В рамках проведенного исследования расчеты полей метеорологических элементов проводились именно с использованием шага сетки 13.2 км. В качестве начальных данных и граничных условий на внешних границах всей моделируемой территории, охватывающей большую часть Восточно-Европейской равнины (рис. 1), использовался реанализ ERA Interim с 6-часовым разрешением по времени и 0.75°×0.75° – по пространству (Dee et al., 2011). Численное моделирование производилось в непрерывном цикле для всего выбранного интервала времени с "подпиткой" на боковых границах модельной области результатами реанализа аналогично методике, использованной А.В.Кисловым и др. (2018).

Сценарии модельных экспериментов

Для анализа влияния изменения лесистости "модельного региона" на региональные метеорологические условия было проведено 3 численных эксперимента. Первый эксперимент имитировал полное сведение лесов (обезлесение) на исследуемом "модельном регионе" и их замещение травянистой растительностью. В ходе второго эксперимента предусматривалось полное прекращение хозяйственной деятельности в пределах "модельного региона" и его полное облесение. В сценарии предполагалось, что увеличение лесистости происходило исключительно за счет увеличения доли пионерных мелколиственных пород деревьев (береза, осина). В третьем, контрольном эксперименте, расчеты погодных условий проводились для современной структуры землепользования и лесистости исследуемого "модельного региона" (около 50%) (Ольчев и др., 2017).

Погодные условия выбранного периода (май – сентябрь 2010 года) отличались значительной изменчивостью, с чередованием периодов с дождливой прохладной и сухой жаркой погодой. Отличительной особенностью выбранного периода явились экстремально жаркие и засушливые погодные условия середины лета (июль – начало августа). Выбор для модельного исследования периода с подобными условиями был особенно интересен с точки зрения оценки влияния контрастных условий почвенного увлажнения на испарение различных типов растительных сообществ и на региональные погодные условия. Также необходимо отметить, что выбор относительно непродолжитель-

ного с точки зрения оценки климатических изменений временного интервала позволил избежать необходимости учета в численных экспериментах сукцессионной динамики растительных сообществ, наблюдаемой при зарастании сплошных вырубок (вторичные сукцессии), а также возможных изменений структуры и видового состава приспевающих и спелых древостоев.

Результаты

В ходе проведенных численных экспериментов было выявлено существенное влияние изменения лесистости на метеорологические условия не только в пределах "модельного региона", но также и на всей территории Восточно-Европейской равнины. Представленные на рис. 2 результаты расчетов возможных изменений полей температуры и осадков при сценариях с обезлесением и облесением, осредненные за весь период исследования (с мая по сентябрь 2010 года), отмечают их значительную пространственную неоднородность. При этом, если для полей температуры максимальные изменения характерны исключительно для внутренних районов "модельного региона", то изменения в количестве осадков прослеживаются в пределах всей области выполнения численных экспериментов на территории Восточно-Европейской равнины (табл. 1, 2).

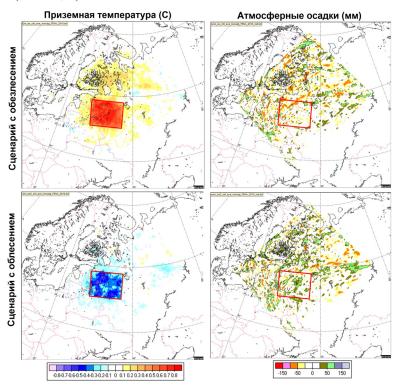


Рисунок 2. Рассчитанные изменения в полях приземной температуры воздуха (°C) и количества осадков (мм) между сценариями, имитирующими полное обезлесение и облесение "модельного региона", и контрольным экспериментом, и осредненными за весь моделируемый период с мая по сентябрь 2010 г.

Как показывают результаты расчетов, процессы обезлесения ведут к росту приземной температуры воздуха, а процессы облесения, наоборот, к ее уменьшению (рис. 2, табл. 1). Максимальные различия в значениях температуры воздуха между обоими сценариями, имитирующими полное обезлесение и облесение, и контрольным экспериментом в пределах "модельного региона" получены для летних месяцев (июль): $+0.6^{\circ}$ C – для сценария с обезлесением, и -0.1° C – с облесением, соответственно. Для всей территории Восточно-Европейской равнины влияние изменения лесистости на температуру прослеживается довольно слабо (табл. 1). При этом по мере удаления от внешних границ "модельного региона" различия в значениях температуры между сценарием с обезлесением и контрольным экспериментом устойчиво снижаются (рис. 2).

В ходе анализа результатов были рассмотрены дополнительные показатели температурного режима на ряде метеостанций в пределах "модельного региона". Так, на фоне роста приземной температуры при сценарии, имитирующем полное обезлесение, при синоптических ситуациях, сложившихся на протяжении выбранного для анализа летнего периода 2010 года, прогнозируется увеличение продолжительности периодов с аномально жаркой погодой (для периодов со среднесуточной температурой воздуха выше климатической нормы на 7°С и более) (табл. 2). В то же самое время, для сценария, имитирующего полное облесение "модельного региона", суммарная продолжительность периодов с аномально-жаркой погодой, напротив, несколько снижается.

Таблица 1. Рассчитанные среднемесячные значения температуры воздуха (°C) при современной структуре землепользования (контрольный эксперимент), а также сценариях, имитирующих полное обезлесение (эксперимент 1) и облесение (эксперимент 2) "модельного региона"

December of the control of the contr	Месяцы								
Эксперименты	5	6	7	8	9	Сред.			
"Моделі	"Модельный регион" с измененной лесистостью								
Контрольный эксперимент	9.6	11.9	19.0	15.5	9.2	13.0			
Эксперимент 1	9.7 (+0.1)	12.1 (+0.2)	19.6 (+0.6)	15.7 (+0.2)	9.2 (0.0)	13.3 (+0.3)			
Эксперимент 2	9.5 (-0.1)	11.8 (-0.1)	18.8 (-0.2)	15.4 (-0.1)	9.1 (-0.1)	12.9 (-0.1)			
	Вся мод	(елируема	я область						
Эксперименты 5 6 7 8 9 С									
Контрольный эксперимент	11.8	14.7	20.9	18.3	10.9	15.3			
Эксперимент 1	11.9 (+0.1)	14.7 (0.0)	21.1 (+0.2)	18.4 (+0.1)	10.9 (0.0)	15.4 (+0.1)			
Эксперимент 2	11.8 (0.0)	14.7 (0.0)	20.9 (0.0)	18.3 (0.0)	10.9 (0.0)	15.3 (0.0)			

Примечание. В скобках указаны разности между значениями в экспериментах 1-2 и контрольным экспериментом

Таблица 2. Количество дней с аномально-жаркой погодой, полученных для 4 населенных пунктов, расположенных в пределах "модельного региона", при современной структуре землепользования (контрольный эксперимент) и сценариев, имитирующих полное обезлесение (эксперимент 1) и облесение "модельного региона" (эксперимент 2) за период с мая по сентябрь 2010 г.

Станция	Количество дней с аномально-жаркой погодой					
	Контр. эксперимент	Эксперимент 1	Эксперимент 2			
Валдай	27	38 (+11)	27 (0)			
Новгород	37	45 (+8)	31 (-6)			
Псков	17	28 (+11)	16 (-1)			
Тверь	35	41 (+6)	35 (0)			

Примечание. В скобках указаны разности между значениями в экспериментах 1-2 и контрольным экспериментом.

В дневном ходе максимальные различия в значениях приземной температуры воздуха между сценарием с обезлесением и контрольным экспериментом были получены для дневного времени суток. Расчеты показывают, что в период аномально жаркой погоды лета 2010 г. дневные температуры воздуха при сценарии с полным обезлесением могли бы превышать значения температуры фактически наблюдаемые при современной структуре землепользования на 2-6°C (рис. 3). При сценарии, имитирующем полное облесение, дневные температуры оказались несколько ниже значений контрольного эксперимента (на 2-5°C).

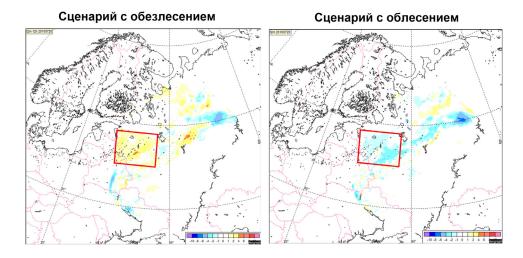


Рисунок 3. Разности в приземной температуре воздуха (°C) между экспериментами, имитирующими обезлесение (слева) и облесение (справа), и контрольным экспериментом 20 июля 2010 в 12:00

Кроме анализа различий в максимальной температуре воздуха и в продолжительности периодов с аномально-жаркой погодой при разных сценариях изменения лесистости в пределах "модельного региона" в исследовании были

проанализированы также и случаи, когда в течение суток температура опускалась ниже нуля (в весенние и осенние месяцы). При этом, как и в случае анализа продолжительности периодов с аномально-жаркой погодой, рассматривались отдельные точки моделируемой области, соответствующие метеостанциям крупных населенных пунктов (Валдай, Новгород, Псков, Тверь). Результаты показывают, что в пределах выбранной "модельной области", в период с мая про сентябрь 2010 года процессы облесения могут привести к незначительному увеличению числа дней с отрицательными температурами (табл. 3), в то время как при сценарии, имитирующем полное обезлесение, прогнозируемая вероятность перехода температур к отрицательным значениям несколько снижается лишь в нескольких районах. На остальной части "модельного региона" она остается неизменной.

Таблица 3. Рассчитанное количество суток с отрицательными температурами в период с апреля по сентябрь 2010 г. для 4 населенных пунктов, расположенных в пределах "модельного региона", при современной структуре землепользования (контрольный эксперимент) и сценариев, имитирующих полное обезлесение (эксперимент 1) и облесение (эксперимент 2)

Название станции	Контр. эксперимент	Эксперимент 1	Эксперимент 2	
Валдай	5	3 (-2)	7 (+2)	
Новгород	1	0 (-1)	2 (+1)	
Псков	0	0 (0)	1 (+1)	
Тверь	3	3 (0)	4 (+1)	

Примечание. В скобках указаны разности между значениями в экспериментах 1 - 2 и контрольным экспериментом

Влияние изменения лесистости "модельного региона" на выпадение осадков проявляется в увеличении их общего количества при облесении территории, и в их снижении при сценарии с обезлесением (рис. 2, табл. 4). Максимальное увеличение осадков (+4.8%) для "модельного региона" при сценарии с облесением отмечалось в июне-июле, а их максимальное снижение (до -8.8%) – при сценарии с обезлесением в июле и августе, т.е. в наиболее жаркие месяцы 2010 года. При этом, как уже отмечалось, влияние изменения лесистости "модельного региона" на режим осадков простиралось на обширные территории Восточно-Европейской равнины, в том числе на территории, значительно удаленные от внешних границ "модельного региона". В частности, для июля снижение общего количества осадков, выпавших на всей моделируемой территории Восточно-Европейской равнины, при сценарии, имитирующем процессы обезлесения, по отношению к количеству осадков при контрольном эксперименте составило около 4%. Таким образом, несмотря на относительно небольшие (по отношению к размерам все моделируемой области) размеры "модельного региона" с площадью составляющей всего около 10% от всей площади области моделирования, результаты отмечают ощутимое влияние изменения лесистости на режим осадков в пределах всей моделируемой области Восточно-Европейской равнины. Для сценария, имитирующего процессы облесения, суммарное количество осадков за июль превышало их количество при контрольном эксперименте на 5% для "модельного региона", в то время как для всей моделируемой области оно составило всего около 1%, что также говорит о существенном перераспределении осадков вне границ "модельного региона".

Таблица 4. Рассчитанные среднемесячные значения количества осадков (мм) при современной структуре землепользования (контрольный эксперимент) и сценариях, имитирующих полное обезлесение (эксперимент 1) и облесение (эксперимент 2)

Dragger	Месяцы						
Эксперименты	5	6	7	8	9	Сред.	
	"Модельн	ый регион"	с измененно	й лесистост	ью		
Контрольный эксперимент	75.2	79.4	47.4	52.1	68.4	322.5	
Эксперимент 1	74.9 (-0.4%)	77.5 (-2.4%)	43.6 (-8.0%)	47.5 (-8.8%)	67.9 (-0.7%)	311.4 (-3.4%)	
Эксперимент 2	75.6 (+0.5%)	83.1 (+4.8%)	49.5 (+4.8%)	53.4 (+2.7%)	69.7 (+1.9%)	331.3 (+2.8%)	
		Вся модели	руемая обла	сть			
Эксперименты	5	6	7	8	9	Сред.	
Контрольный эксперимент	50.5	57.8	37.4	49.0	57.6	252.3	
Эксперимент 1	51.0 (+1.0%)	56.1 (-2.9%)	35.9 (-4.0%)	47.3 (-3.5%)	57.5 (-0.2%)	247.8 (-1.8%)	
Эксперимент 2	50.6 (+0.2%)	58.3 (+0.9%)	37.8 (+1.1%)	48.9 (-0.2%)	57.8 (+0.3%)	253.4 (+0.4%)	

Примечание. В скобках указаны различия в их значениях между экспериментами 1-2 и контрольным экспериментом

Анализ полей осадков и их различий между сценариями с изменением лесистости и контрольным экспериментом отмечает их высокую пространственно-временную неоднородность. Для сценариев с обезлесением и облесением можно выделить как зоны с уменьшением, так и с увеличением количества осадков на заданный момент времени (рис. 4).

На фоне изменения температурного режима и увлажнения исследуемой территории в результатах модельных расчетов отмечается и изменение повторяемости туманов разной степени интенсивности. В алгоритмах модели туман рассматривается как облачность в нижнем 100-м слое, что с точки зрения составления прогноза погоды синоптиками можно интерпретировать как "угроза" возникновения туманов в той или иной области. При этом для характеристики площади покрытия туманом модельной ячейки используется шкала, выраженная в октантах. Балл тумана изменяется от нуля, что соответствует полному отсутствию тумана, и до 8 (туман наблюдается в пределах всей модельной ячейки).

Как показали результаты численных экспериментов для выбранного "модельного региона", при сценарии с обезлесением прогнозируется уменьшение вероятности возникновения туманов, а при облесении, наоборот, их существенное увеличение. Выявленные изменения касаются большей частью туманов с баллом от 1 до 4 (табл. 5).

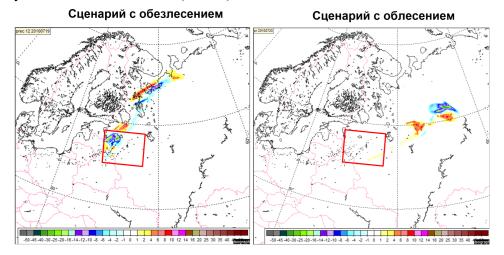


Рисунок 4. Разности в количестве осадков, между экспериментами, имитирующими обезлесение (слева) и облесение (справа), и контрольным экспериментом, выпавших за трехчасовой интервал (мм) 20 июля 2010 с 9:00 до 12:00

Таблица 5. Пример расчета количества случаев возможного возникновения туманов за период с мая по сентябрь 2010 г. для 4 метеостанций внутри "модельного региона" при современной структуре землепользования (контрольный эксперимент) и сценариев, имитирующих полное обезлесение (эксперимент 1) и облесение (эксперимент 2)

Станция	Общее	количество	гуманов	Количество случаев туманов с баллом 1-4			
Станция	Контр. экспер.	Экспер. 1	Экспер. 2	Контр. экспер.	Экспер. 1	Экспер. 2	
Валдай	39	30 (-9)	62 (+23)	22	19 (-3)	41 (+19)	
Новгород	38	18 (-20)	57 (+19)	23	11(-12)	36 (+13)	
Псков	33	25 (-8)	55 (+23)	21	15 (-7)	36 (+15)	
Тверь	32	28 (-4)	48 (+15)	19	20 (-1)	25 (+6)	

Примечание. В скобках указаны разности между значениями в экспериментах 1 - 2 и контрольным экспериментом

Изменение степени облесенности территории приводит и к изменению шероховатости поверхности, а также параметров динамического взаимодействия атмосферы с подстилающей поверхностью, что очевидно сказывается и на изменении ветрового режима. Как показали расчеты полей ветра (на высоте 10 м над земной поверхностью), для "модельного региона" прогнозируется некоторое усиление скоростей ветра при сценарии с обезлесением, и их уменьшение — при сценарии с облесением. На фоне изменения средней скорости ветра отмечается и изменение ее максимальных значений (табл. 6).

Представленные на рис. 6 различия в значениях наблюдаемых максимальных скоростей ветра в дневное время 20 июля 2010 года, рассчитанные моделью для сценариев с обезлесением и облесением и сопоставленные с контрольным экспериментом, отмечают существенное влияние изменения лесистости на поля максимальных фоновых скоростей ветра (рис. 5). При этом изменения прослеживаются не только в пределах "модельного региона" и вблизи ее внешних границ, но также и на значительном от него удалении.

Таблица 6. Рассчитанная максимальная фоновая скорость ветра на высоте 10 м за период с мая по сентябрь 2010 г., полученная для 4 населенных пунктов при современной структуре землепользования (контрольный эксперимент) и сценариев, имитирующих полное обезлесение (эксперимент 1) и облесение (эксперимент 2)

Станция	Скорость ветра, м/с				
	Контрольный эксперимент	Эксперимент 1	Эксперимент 2		
Валдай	7	9 (+2)	6 (-1)		
Новгород	8	10 (+2)	6 (-2)		
Псков	10	10 (0)	8 (-2)		
Тверь	8	10 (+2)	6 (-2)		

Примечание. В скобках указаны разности между значениями в экспериментах 1 - 2 и контрольным экспериментом

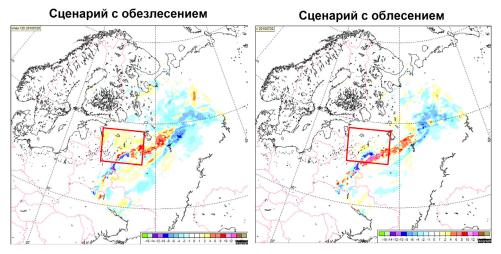


Рисунок 5. Различия в значениях максимальных скоростей ветра на высоте 10 м между экспериментами, имитирующими обезлесение (слева) и облесение (справа), и контрольным экспериментом 20 июля 2010 в 12:00

Для интерпретации эффектов изменения полей температуры и осадков, связанных с изменением лесистости в пределах "модельного региона" в исследовании были дополнительно проанализированы возможные изменения ключевых составляющих радиационного баланса земной поверхности: затрат тепла на турбулентный теплообмен и на испарение. Как показали результаты

расчетов для сценария, имитирующего обезлесение, наблюдается тенденция к росту затрат тепла на турбулентный теплообмен и снижение затрат тепла на испарение почти во все месяцы исследуемого периода (табл. 7, рис. 7). Особенно четко эти изменения прослеживаются в дневное время (рис. 6). Отношение Боуэна, характеризующее отношения потоков явного и скрытого тепла, существенно увеличивается в случае сценария с обезлесением, и уменьшается при облесении "модельного региона".

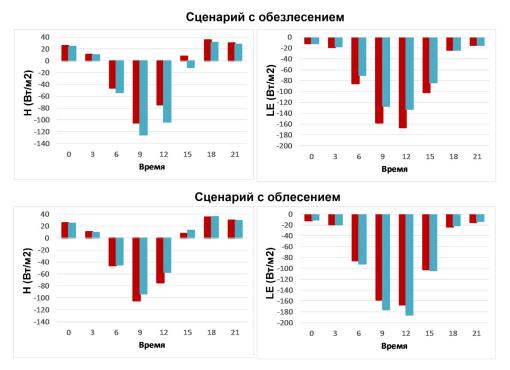


Рисунок 6. Средние за период с мая по сентябрь 2010 г. значения потоков явного (H) и скрытого (LE) тепла, полученные для "модельного региона" для сценария с обезлесением и облесением (синие столбики) и для контрольного эксперимента (красные столбики)

Дискуссия

Проведенные численные эксперименты отмечают существенное влияние процессов обезлесения и облесения выбранного "модельного региона" в центральной части Восточно-Европейской равнины на региональные погодные условия. В качестве основных механизмов влияния изменения лесистости на атмосферные условия, учитываемых в модели СОЅМО, можно выделить изменение: а) шероховатости поверхности, определяющей турбулентные потоки тепла, влаги и импульса в атмосферу; б) площади фотосинтезирующей поверхности растительности, испаряющей влагу, определяемой листовым индексом (LAI), и благодаря большим значениям которого для леса поступление влаги в атмосферу при определенных условиях может превосходить испарение с открытой водной поверхности; в) глубина, с которой растения могут извлекать влагу, и которая для древесных

растений, за счет более развитой корневой системы, существенно превосходит характерные значения для травянистых растительных сообществ, что позволяет древесным растениям обеспечивать устойчивое поступление влаги в атмосферу в процессе транспирации, даже в случае дефицита доступной почвенной влаги в верхних почвенных горизонтах; г) величины альбедо, которое в зависимости от структуры лесной и луговой растительности, а также типа почв при смене растительных сообществ после проведения лесохозяйственных мероприятий может изменяться в достаточно широких пределах (Mamkin et al., 2016).

Проведенные различными коллективами исследователей серии численных экспериментов с применением глобальных климатических моделей (Brovkin et al., 2009; Bathiany et al., 2010; Елисеев, Мохов, 2011) отмечают, что при полном обезлесении зоны бореальных лесов именно изменение поверхностного альбедо в зимне-весенний период играет ключевую роль в изменении температурного режима земной поверхности. Более высокий вклад снежного покрова в альбедо земной поверхности на обезлесенных территориях по сравнению с облесенными участками в зимний период и ранней весной может привести к снижению коротковолнового радиационного баланса земной поверхности и охолаживающему эффекту приземного слоя воздуха, и как следствие, - к уменьшению среднегодовых температур воздуха. Эффекты облесения, соответственно, могут привести к обратным эффектам. Рассматривая существенную роль альбедо в формировании температурного режима земной поверхности, нельзя, однако, не учитывать существующие значительные и пока не учитывающиеся в полной мере в математических моделях различия в биофизических свойствах различных видов древесной и травянистой растительности (прежде всего, в значениях устьичной проводимости и их зависимости от факторов внешней среды), а также в отклике древесных и травянистых видов растений на дефицит влаги в корнеобитаемом слое почвы. В частности, используемая в модели COSMO зависимость скорости транспирации от глубины корневой системы растений и влагосодержания корнеобитаемого слоя почвы, очевидно, позволяет более аккуратно описать структуру теплового баланса земной поверхности при разных погодных условиях и режиме почвенного увлажнения.

Выявленные в ходе численных экспериментов закономерности в изменении соотношения затрат тепла на турбулентный теплообмен и испарение хорошо согласуются с результатами экспериментальных исследований потоков тепла, проведенных и обобщенных Amiro (2001) и Amiro et al. (2006). В этих исследованиях в частности отмечается, что сплошная вырубка приводит к изменению соотношения потоков явного и скрытого тепла, а также к росту потоков тепла в почву по сравнению с ненарушенными лесными экосистемами. Сходные закономерности были получены Мамкиным и др. (Mamkin et al., 2016) в ходе измерений потоков явного и скрытого тепла методом турбулентных пульсаций (eddy covariance) на сплошной свежей вырубке и в двух типах ненарушенных древостоев на территории Центрально-лесного государственного природного биосферного заповедника, расположенного на южных

отрогах Валдайской возвышенности (Тверская область) в центральной части выбранного "модельного региона".

Таблица 7. Средние суточные суммы потоков явного и скрытого тепла, а также отношения Боуэна для "модельного региона", полученные для современной структуры землепользования (контрольный эксперимент), а также сценариев, имитирующих полное обезлесение (эксперимент 1) и облесение (эксперимент 2)

Эксперименты	Месяцы							
Потоки явного тепла, МДж/(м ² день)								
	5	6	7	8	9	Среднее		
Контрольный эксперимент	1.20	0.66	2.25	2.49	0.18	1.37		
Эксперимент 1	1.52 (+0.32)	1.69 (+1.03)	4.74 (+2.49)	3.31 (+0.82)	0.14 (-0.04)	2.30 (+0.93)		
Эксперимент 2	0.32 (-0.88)	0.11 (-0.55)	1.56 (-0.69)	2.61 (+0.12)	0.09 (-0.09)	0.95 (-0.42)		
	Потоки скрытого тепла, МДж/(м² день)							
Контрольный эксперимент	7.05	8.60	8.95	4.60	3.20	6.48		
Эксперимент 1	6.74 (-0.31)	7.51 (-1.09)	5.72 (-3.23)	3.47 (-1.13)	3.33 (+0.13)	5.36 (-1.12)		
Эксперимент 2	7.87 (+0.82)	9.04 (+0.44)	9.86 (+0.91)	4.56 (-0.04)	3.38 (+0.18)	6.95 (+0.47)		
	Отношение Боуэна							
Контрольный эксперимент	0.17	0.08	0.25	0.54	0.06	0.21		
Эксперимент 1	0.23 (+0.06)	0.23 (+0.15)	0.83 (+0.58)	0.95 (+0.41)	0.04 (-0.02)	0.43 (+0.22)		
Эксперимент 2	0.04 (-0.13)	0.01 (-0.07)	0.16 (-0.09)	0.57 (+0.03)	0.03 (-0.03)	0.14 (-0.07)		

Примечание. В скобках указаны различия в их значениях между экспериментами 1 - 2 и контрольным экспериментом

Потоки явного тепла от земной поверхности являются движущим механизмом изменения температуры приземного слоя воздуха, и их изменение достаточно хорошо объясняет прогнозируемый рост приземной температуры воздуха при рассмотрении сценария с полным обезлесением. В нашем исследовании мы рассмотрели период с мая по сентябрь, совпадающий в целом с периодом активной вегетации растений. Таким образом, можно предположить, что возможные радиационные эффекты (альбедо) не оказывали существенной роли на температурный режим земной поверхности. Возможное изменение альбедо, связанное с усыханием травяного покрова при высоких температурах и низкой влажности почвы, в наших модельных экспериментах не рассматривалось.

Вопросам экспериментального исследования влияния процессов обезлесения на температурный режим приземного слоя воздуха в последние несколько десятилетий уделялось достаточно много внимания (Carlson, Groot, 1997;

Radler et al., 2010). Большинство авторов отмечает превышение дневных и среднесуточных значений температуры воздуха на участках сплошных вырубок по сравнению со значениями температуры как внутри, так и над окружающим вырубку древостоем в среднем на 1.0-1.5°С (Radler et al., 2010). Проведенные модельные расчеты в целом достаточно хорошо согласуются с данными результатами.

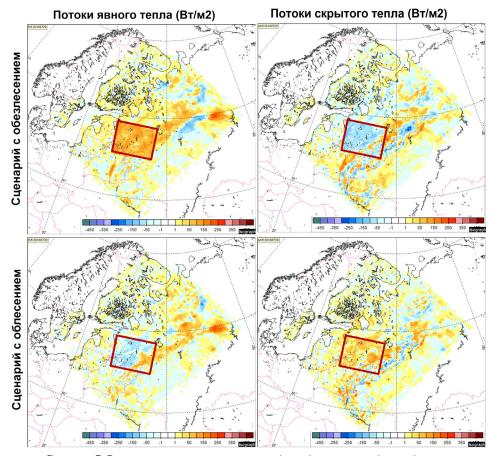


Рисунок 7. Разности в потоках явного тепла (слева) и скрытого (справа) тепла на моделируемой территории Восточно-Европейской равнины между экспериментами, имитирующими обезлесение (вверху) и облесение (внизу), и контрольным экспериментом 20 июля 2010 в 12:00

При анализе результатов численных экспериментов по оценке влияния процессов обезлесения на режим осадков территории Восточно-Европейской равнины в теплую половину года можно отметить два основных механизма возможного воздействия изменения лесистости на атмосферные процессы. Во-первых, на вырубленных территориях наблюдается снижение затрат тепла на испарение на фоне снижения транспирационного поступления влаги в атмосферу и дополнительный нагрев обезлесенных участков поверхности. Во-вторых, интенсивный перегрев участков поверхности без леса в случае достаточно протяженного по пространству региона гипотетических вырубок в дневное время может приводить к усилению локальной конвективной неу-

стойчивости в нижней тропосфере. Очевидно, что влияние обоих факторов при разных синоптических ситуациях и для разных типов подстилающих поверхностей может привести к разнонаправленным и обычно довольно сложно прогнозируемым результатам. Влияние процессов облесения проявляется, прежде всего, в общем увеличении поступления влаги с земной поверхности в атмосферу, главным образом, за счет более высоких значений транспирации лесной растительности по сравнению с испарением оголенного почвенного покрова или транспирации восстанавливающейся на вырубках травянистой и древесной растительности. Попавшая в атмосферу влага при определенных атмосферных условиях может или сконденсироваться и сразу вернуться на землю в виде осадков (что происходит довольно редко), или, как происходит наиболее часто, может выпасть с определенным запаздыванием после ее переноса на различные расстояния, определяемые текущими атмосферными условиями. Можно заметить, что в распределении по пространству разностей сумм выпавших осадков между сценариями с измененной лесистостью и контрольным экспериментом (рис. 2, 4) прослеживаются хорошо выраженные вытянутые с юго-запада и запада на северо-восток и восток полосы, соответствующие преобладающим на исследуемой территории в рассматриваемый период траекториям перемещения фронтов в циклонических образованиях.

Изменениями температурного режима и испарения при обезлесении и облесении в целом хорошо объясняются и выявленные изменения в повторяемости туманов (табл. 5). На фоне роста испарения, в частности при сценарии с облесением, прогнозируется общий рост влагосодержания приземного слоя воздуха, что на фоне общего снижения температурного фона создает условия для туманообразования при дополнительном ночном выхолаживании. При интерпретации полученных результатов по повторяемости туманов важно учитывать существенную роль в их образовании локальных особенностей местности и рельефа, которые при моделировании с помощью региональной модели не всегда могут быть учтены в полной мере. Таким образом, при интерпретации результатов о тенденциях в изменении повторяемости тума-нов правильнее говорить о региональных закономерностях, избегая оценок локального масштаба.

Суммируя результаты выполненных экспериментов учитывая выявленную высокую временную изменчивость отклика региональных погодных условий на изменение лесистости, можно ожидать, что при проведении подобных экспериментов для других временных интервалов с отличным от рассматриваемого характером погодных условий, могут быть выявлены несколько иные закономерности. В частности, изменение альбедо и радиационного баланса земной поверхности на вырубленных участках в зимне-весенний период может оказать существенное влияние на температурный режим земной поверхности. Также нельзя игнорировать динамику альбедо при зарастании вырубок травянистой и древесной растительностью и их высокую чувствительность к влажности верхних почвенных горизонтов. Анализ всех отмеченных факторов и оценка их влияния на региональные погодные условия, очевидно, требует дальнейших комплексных исследований с применением как экспериментальных, так и модельных подходов.

Анализ по оценке влияния процессов обезлесения на региональные погодные условия проводился с помощью модели СОЅМО, которая, несмотря на довольно подробное описание всего комплекса физических процессов, протекающих в свободной атмосфере и у земной поверхности, при описании процессов переноса в растительном покрове и почве пока использует целый ряд серьезных модельных упрощений и приближений (Doms et al., 2011). Это связано, прежде всего, с дефицитом необходимых входных данных, необходимых для параметризации биофизических свойств различных типов растительных сообществ и почвенного покрова на региональном масштабе. Поэтому проведенные численные эксперименты следует рассматривать в качестве лишь одного из этапов комплексных модельных исследований по изучению влияния лесов на региональные метеорологические условия.

Заключение

Результаты проведенного модельного исследования, выполненного с применением модели COSMO на примере теплого периода 2010 года показали, что процессы обезлесения и облесения в природно-климатических условиях Восточно-Европейской равнины могут привести к существенным изменениям погодных условий. При изменении структуры землепользования прогнозируются изменения приземной температуры, осадков и многих других метеорологических параметров. Результаты модельных экспериментов показывают, что эффект влияния процессов обезлесения и облесения на территории крупного региона в центре Восточно-Европейской равнины оказывает воздействие на изменение целого ряда метеорологических характеристик на обширных территориях, значительно удаленных от исследуемой "модельной области". Результаты отмечают общую тенденцию к росту приземных температур и уменьшению количества осадков при сценарии, имитирующем процессы обезлесения. Отмечается увеличение продолжительности периодов с аномально жаркими погодными условиями, снижается повторяемость туманов и заморозков в мае и сентябре. При сценарии, имитирующем процессы облесения, отмечаются обратные тенденции. В том числе, прогнозируется увеличение общего количества осадков при незначительном понижении температуры.

Обобщая результаты проведенного модельного исследования, важно отметить довольно сложную систему взаимосвязей, существующих между земной поверхностью, покрытой лесной растительностью, и атмосферой. Очевидно, что существующие численные модели позволяют спрогнозировать возможные отклики погодных условий на изменения свойств растительного покрова лишь в рамках, заложенных в эти модели параметризаций подстилающей поверхности и аппроксимаций реальных атмосферных процессов. Поэтому очевидно, что в перспективе к данным исследования целесообразно привлечение не только всего комплекса существующих мезомасштабных и локаль-

ных моделей разной степени сложности, но также и комплексных экспериментальных наблюдений.

Благодарности

Проведенное исследование было поддержано грантом Российского научного фонда № 14-14-00956-П.

Список литературы

Елисеев А.В., Мохов И.И. 2011. Влияние учёта радиационного эффекта изменения альбедо поверхности суши при землепользовании на воспроизведение климата XVI-XXI веков. – Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана, т. 47, № 1, с. 18-34.

Кислов А.В., Ривин Г.С., Платонов В.С., Варенцов М.И., Розинкина И.А., Никитин М.А., Чумаков М.М. 2018. Методология детализированного регионального моделирования атмосферных процессов на многолетних временных масштабах — Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана (в печати).

Молчанов А.Г., Курбатова Ю.А., Ольчев А.В. 2017. Влияние сплошной вырубки леса на эмиссию CO_2 с поверхности почвы. — Известия Российской академии наук. Серия биологическая, № 2, с. 190-196.

Мухартова Ю.В., Левашова Н.Т., Ольчев А.В., Шапкина Н.Е. 2015. Применение двумерной модели для описания турбулентного переноса CO_2 в пространственно-неоднородном растительном покрове. — Вестник Московского университета. Серия 3. Физика и Астрономия, No_2 1, с. 15-22.

Ольчев А.В., Авилов В.К., Байбар А.С., Белотелов Н.В., Болондинский В.К., Иванов Д.Г., Кузьмина Е.В., Курбатова Ю.А., Левашова Н.Т., Мамкин В.В., Мангура П.А., Молчанов А.Г., Мухартова Ю.В., Никитин М.А., Новенко Е.Ю., Придача В.Б., Ривин Г.С., Розинкина И.А., Сазонова Т.А., Сандлерский Р.Б., Суркова Г.В., Холопцева Е.С. 2017. Леса Европейской территории России в условиях меняющегося климата. – Москва, Товарищество научных изданий КМК, 276 с.

Ривин Г.С., Розинкина И.А., Багров А.Н., Блинов Д.В. 2012. Мезомасштабная модель COSMO-Ru7 и результаты ее оперативных испытаний. – Информационный сборник Гидрометцентра России, № 39, с. 15-48.

Ривин Г.С., Розинкина И.А., Багров Н.А., Блинов Д.В., Кирсанов А.А., Кузьмина Е.В., Шатунова М.В., Алферов Д.Ю., Бундель А.Ю., Зайченко М.В., Никитин М.А. 2017. Мезомасштабная модель COSMO-Ru2 и результаты ее оперативных испытаний. – Информационный сборник Гидрометцентра России, № 44, с. 25-55.

Ривин Г.С., Розинкина И.А., Вильфанд Р.М., Алферов Д.Ю., Астахова Е.Д., Блинов Д.В., Бундель А.Ю., Казакова Е.В., Кирсанов А.А., Никитин М.А., Перов В.Л., Суркова Г.В., Ревокатова А.П., Шатунова М.В., Чумаков М.М.

2015. Система COSMO-Ru негидростатического мезомасштабного краткосрочного прогноза погоды Гидрометцентра России: второй этап реализации и развития. – Метеорология и гидрология, № 6, с. 58-70.

Юрова А.Ю., Володин Е.М. 2011. Совместное моделирование климата с учетом динамики растительного покрова. — Известия РАН. Физика атмосферы и океана, т. 47, N 5, с. 579-588.

Amiro B.D. 2001. Paired-tower measurements of carbon and energy fluxes following disturbance in the boreal forest. – Global Change Biology, vol. 7, pp. 253-268.

Amiro B.D., Barr A.G., Black T.A., Iwashita H., Kljun N., McCaughey J.H., Morgenstern K., Murayama S., Nesic Z., Orchansky A.L., Saigusa N. 2006. Carbon, energy and water fluxes at mature and disturbed forest sites, Saskatchewan, Canada. – Agricultural and Forest Meteorology, vol. 136, pp. 237-251.

Baldauf M., Seifert A., Forstner J., Majewski D., Raschendorfer M., Reinhardt T. 2011. Operational convective-scale numerical weather prediction with the COSMO model: description and sensitivities. – Monthly Weather Review, vol. 139, pp. 3887-3905.

Bathiany S., Claussen M., Brovkin V., Raddatz, T., Gayler, V. 2010. Combined biogeophysical and biogeochemical effects of large-scale forest cover changes in the MPI earth system model. – Biogeosciences, vol. 7, pp. 1383-1399.

Bonan G.B., Pollard D., Thompson S.L. 1992. Effects of boreal forest vegetation on global climate, – Nature, vol. 359, pp. 716-718.

Brovkin V., Raddatz T., Reick C. H., Claussen M., Gayler V. 2009. Global biogeophysical interactions between forest and climate. – Geophysical Research Letters, vol. 36, L07405.

Carlson D.W., Groot A. 1997. Microclimate of clear-cut, forest interior, and small openings in trembling aspen forest. – Agricultural and Forest Meteorology, vol. 87, pp. 313-329.

Dee D.P., Uppala S., Simmons A., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda M. A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A.C.M., van de Berg L., Bidlot J.-R., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A., Haimberger L., Healy S., Hersbach H., Hólm E. V., Isaksen L., Kållberg P.W., Köhler M., Matricardi M., McNally A., Monge-Sanz B.M., Morcrette J.-J., Park B.-K., Peubey C., De Rosnay P., Tavolato C., Thepaut J.-J., Vitart F. 2011. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. — Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, vol. 553, pp. 553-597.

Doms G., Foerstner J., Heise E., Herzog H.-J., Mironov D., Raschendorfer M., Reinhardt T., Ritter B., Schrodin R., Schulz J.-P., Vogel G. 2011. A Description of the Nonhydrostatic Regional COSMO Model, part 2: Physical Parameterization. – Offenbach: Deutscher Wetterdienst, 154 p.

Lejeune Q., Seneviratne S.I., Davin E.L. 2017. Historical Land-Cover Change Impacts on Climate: Comparative Assessment of LUCID and CMIP5 Multimodel Experiments. – Journal of Climate, vol. 30, pp. 1439-1459.

Li Z.H., Deng X.Z., Shi Q.L., Ke X.L., Liu Y.C. 2013. Modeling the impacts of boreal deforestation on the near-surface temperature in European Russia. – Advances in Meteorology, ID 486962, doi:10.1155/2013/486962.

Mamkin V., Kurbatova J., Avilov V., Avilov V., Mukhartova Yu, Krupenko A., Ivanov D., Levashova N., Olchev A. 2016. Changes in net ecosystem exchange of CO2, latent and sensible heat fluxes in a recently clear-cut spruce forest in western Russia: results from an experimental and modeling analysis. – Environmental Research Letters, vol. 11(12), 125012.

de Noblet-Ducoudré N., Boisier J.-P., Pitman A., Bonan G.B., Brovkin V., Cruz F., Delire C., Gayler V., van den Hurk B.J.J.M., Lawrence P.J., van der Molen M.K., Müller C., Reick C.H., Strengers B.J., Voldoire A. 2012. Determining robust impacts of land-use induced land-cover changes on surface climate over North America and Eurasia; Results from the first set of LUCID experiments. – Journal of Climate, vol. 25, pp. 3261-3281.

Olchev A., Radler K., Sogachev A., Panferov O., Gravenhorst G. 2009. Application of a three-dimensional model for assessing effects of small clear-cuttings on radiation and soil temperature. – Ecological Modelling, vol. 220, pp. 3046-3056.

Pitman A. J., De Noblet-Ducoudre N., Cruz F. T., Davin E. L., Bonan G. B., Brovkin V., Claussen M., Delire C., Ganzeveld L., Gayler V., van den Hurk B.J.J.M., Lawrence P.J., van der Molen M.K., Mueller C., Reick C.H., Seneviratne S.I., Strengers B., Voldoire A. 2009. Uncertainties in climate responses to past land cover change: First results from the LUCID intercomparison study. – Geophysical Research Letters, 36 (L14814).

Port U., Brovkin V., Claussen M. 2012. The influence of vegetation dynamics on anthropogenic climate change. – Earth System Dynamics, vol. 3, pp. 233-243.

Radler K., Oltchev A., Panferov O., Klinck U., *Gravenhorst G.* 2010. Radiation and temperature responses to a small clear-cut in a spruce forest. – Open Geography Journal, vol. 3, pp. 103-114.

Статья поступила в редакцию: 10.08.2017 г. После переработки: 09.10.2017 г.