

ОРИГИНАЛЬНЫЕ  
СТАТЬИ

УДК 630.221.01:630.187

**ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ВЛИЯНИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ  
НА ПУЛЫ УГЛЕРОДА В ХВОЙНЫХ ЛЕСАХ  
ЕВРОПЕЙСКОЙ РОССИИ И ЦЕНТРАЛЬНОЙ КАНАДЫ\***

© 2012 г. О. Г. Чертов<sup>1,3</sup>, А. С. Комаров<sup>2</sup>, А. В. Грязькин<sup>3</sup>,  
А. П. Смирнов<sup>3</sup>, Д. С. Бхатти<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Политехнический университет Бинген, Берлиништрассе. 109, 55411 Бинген, ФРГ  
E-mail: chertov@fh-bingen.de

<sup>2</sup>Пуцинский государственный университет, Институтская 2, 142290 Пуцино, Московская обл. Россия  
E-mail: as\_komarov@rambler.ru

<sup>3</sup>Санкт-Петербургский государственный Лесотехнический университет,  
Институтский пер. 5, 194021, Санкт-Петербург  
E-mail: lesovod@bk.ru

<sup>4</sup>Северный лесоводственный центр Канадской Лесной Службы, 122-я улица 5320,  
Эдмонтон, Альберта, Т6Н3S2, Канада  
Поступила в редакцию 14.03.2011 г.

Приводятся результаты имитации долговременной динамики лесных экосистем хвойных лесов европейской части России и центральной Канады с различными режимами лесных пожаров с использованием динамической модели лесных экосистем EFIMOD. Показано, что все виды пожаров приводят к снижению высоты, диаметра, густоты и запасов древесины в моделируемых древостоях как в России, так и в Канаде при сильном снижении пулов органического вещества почвы (ОрВП) после пожаров по сравнению со сплошнолесосечным хозяйством в таежных лесах обеих стран. Также происходит долговременное снижение нетто биологической продуктивности. Потери углерода при выгорании фитомассы и подстилки достигают максимума при верховых пожарах, при низовых пожарах – после сплошной рубки пирогенных древостоев.

*Имитационное моделирование, модели лесных экосистем, модель EFIMOD, лесные пожары, пулы углерода, таежные экосистемы, хвойные леса, европейская часть России, центральная часть Канады*

Изучение характера и последствий катастрофических нарушений функционирования лесных экосистем необходимо для выявления их биогеоценотических характеристик в экстремальных условиях, оценки последствий этих нарушений с лесохозяйственной и природоохранной точек зрения и разработки мер по восстановлению нарушенных лесов. Лесные пожары занимают не по-

следнюю роль среди нарушений лесных экосистем, что особенно ярко проявилось в европейской части России в экстремально сухое и жаркое лето 2010 г.

В таежных лесах европейской части России верховые пожары случаются относительно редко. Часто происходят низовые подстилочные пожары на сухих песчаных местообитаниях, а также в хвойных древостоях, расположенных на пологих склонах и вершинах всхолмлений [1, 8, 10]. Однако частота экстремально теплых лет в Европейской России возрастает. Так, лето 2010 г. с чрезвычайной сухостью и жарой наступило всего через 7 лет после жаркого летнего сезона в 2003 г.

В таежных (бореальных) лесах Центральной Канады частота нарушений, прежде всего верхо-

\* Работа поддержана целевой программой Мин-тва образования и науки РФ, контракты № 02.740.11.5197 от 12.03.2010 г. и № 14.740.11.1276 от 17.06.2011; РФФИ (№ 09-04-01209); проектами EU INTAS Silvics и Podzol; EU Project OMRISK и eLUP, частично поддержана Federal Panel on Energy Research and Development (PERD) Canada, Canadian Forest Service.

вых пожаров, заметно возростала в течение трех последних десятилетий, что привело к заметным изменениям баланса углерода в лесных экосистемах [4, 22]. Этот факт в Канаде связывают прежде всего с изменением климата [15]. Однако это явление может быть также результатом усиления негативного влияния деятельности человека в связи с возрастанием численности населения Канады и освоением новых лесных массивов.

Основными резервуарами углерода в таежных лесах являются: живая биомасса деревьев; органическое вещество почв (ОрВП), как сумма в различной степени разложившихся растительных остатков и гумусовых веществ, ветровал, валеж и сухостой. Изменения в этих экосистемных “пулах” углерода зависят в основном от динамики биомассы. Накопление ОрВП в лесной подстилке и почве изменяется по стадиям восстановительной динамики древостоев после рубок, штормовых вывалов, пожаров и повреждений вредителями и болезнями. Первичная экогенетическая сукцессия (от пионерных древесно-кустарниковых видов до абсолютно разновозрастных коренных лесов) и вторичная демутационная сукцессия (восстановление лесов после рубок и других нарушений) приводят к закономерному возрастанию углерода ОрВП [2, 3, 13].

Нарушения лесных экосистем после пожаров сильно изменяют характер динамических процессов формирования лесов. Лесные пожары приводят к выгоранию углерода биомассы и органических горизонтов почв, возрастанию отпада деревьев и изменению всей растительности. Выгорание хвои при верховых кроновых пожарах – это не только потеря углерода, но и значительного количества азота. При горении напочвенного покрова и части подстилки при верховых и низовых пожарах масштабы потерь углерода и азота могут превышать таковые при выгорании кроны. Это в результате сказывается на продуктивности древостоев и депонировании углерода в лесных экосистемах. Необходимо отметить, что с позиций круговорота углерода влияние лесных пожаров на лесные почвы изучено недостаточно. Основная часть работ, посвященная пожарам, акцентирует внимание на причинах их возникновения, интенсивности, степени повреждения частей дерева [3, 6, 11], т.е. на характеристиках самих пожаров и древостоев. При этом неясным остается соотношение сгоревших и частично обгоревших долей листвы, ветвей, стволов, которые опадают и подвергаются дальнейшей минерализации в зависимости от интенсивности пожара. Неизвестны условия гибели деревьев при обгорании и т.д. Количественная оценка долговременных последствий лесных пожаров является трудоемкой и сложной задачей [3, 8, 9, 12]. В этом отношении могут оказаться полезными

различные имитационные модели лесных насаждений и экосистем в целом [3, 5, 18, 26], которые позволяют оценить долговременные качественные и количественные аспекты функционирования и продуктивности лесов с акцентом на недостаточно изученные аспекты. Результаты моделирования позволяют качественно и количественно сравнить влияние характера пожара и частоты пожаров в различных местообитаниях и при различных главенствующих породах.

В данном сообщении приводятся материалы использования динамической модели системы “древостой-почва” EFIMOD [5, 18, 21] для предварительной оценки долговременного экологического воздействия лесных пожаров на производительность древостоев и круговорот углерода в таежных экосистемах. Эти материалы представляют собою дальнейшее развитие работ по изучению взаимовлияния изменения климата и нарушений в канадских таежных лесах в сопоставлении с европейскими [15, 19], а также по оценке изменений природной среды России [7].

Модель роста леса и круговорота элементов в лесных экосистемах EFIMOD (EFIMOD) подробно описана в литературе [5, 18]. Она представляет собою индивидуально-имитирующий, пространственно распределенный имитатор, рассчитывающий рост каждого дерева и его пространственные координаты, высоту, диаметр и густоту древостоя, запасы древесины, пулы (запасы) ОрВП и азота почвы, параметры баланса углерода и некоторые другие характеристики. EFIMOD включает в себя почвенную модель ROMUL [16], в которой трансформация опада, подстилки и ОрВП “управляется” почвенной температурой и влажностью, а также свойствами опада и ОрВП. В EFIMOD предусмотрена возможность моделирования различных рубок, пожаров и инвазий насекомых (блоки “имитатор рубок” и “имитатор пожаров”).

Обе модели – динамики ОрВП ROMUL и лесной экосистемы EFIMOD – были обстоятельно калиброваны, верифицированы и валидированы в России [5], Европейском институте леса в Финляндии [20] и в Канаде [15, 19, 27]. Модели были использованы для различных целей в России, Западной Европе и Северной Америке на основе местных лесных баз данных и данных научных публикаций [5, 14, 16, 17, 20, 25, 30].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для моделирования использовались материалы по хвойным насаждениям типичных для России и Канады древесных пород в сходных лесорастительных условиях и на близких по параметрам

ОрВП почвах при сходных режимах рубок и видах пожаров. Такими породами в России были сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) и ель европейская (*Picea abies* L.[Karst]), в Канаде сосна Банкса (*Pinus banksiana* Lamb.) и ель черная (*Picea mariana* Mill.).

В России для моделирования было выбрано лесничество “Русский Лес” в 100 км к югу от Москвы, где модель EFIMOD ранее была использована для определения экологических последствий различных режимов рубок на их соответствие принципам устойчивого лесоводства [5]. Климат района расположения лесничества умеренно континентальный, с заметным влиянием атлантических воздушных масс, со среднемноголетней годовой температурой воздуха +5.4 °С при 491 мм осадков, большая часть которых выпадает в вегетационный период. Сосняки занимают здесь сухие, свежие и влажные песчаные местообитания с бедными почвами. Смешанные леса с елью, мелколиственными и широколиственными породами преобладают на более продуктивных суглинистых почвах, а также встречаются и на слабодренированных местоположениях. Все леса подвергались интенсивной эксплуатации в течение XX в.

В Канаде были использованы данные бореальной лесной трансекты BFTCS (Boreal Forest Transect Case Study). Трансекта, представленная сетью постоянных пробных площадей от тундры до прерий, расположена в центральной Канаде. BFTCS является полигоном для исследования баланса углерода в бореальных лесных экосистемах при изменении климата [15, 27]. Были использованы данные для средней части трансекты (Кэндл Лэйк) с континентальным климатом: средняя многолетняя годовая температура воздуха +0.6 °С, осадки 433 мм при выпадении 60% в вегетационный период. Климат существенно более суровый по сравнению с мягким климатом средневропейской России. Низкопроизводительные древостои сосны Банкса занимают бедные сухие местообитания, ель черная доминирует на свежих и влажных выположенных местоположениях, на глеевых почвах с мощной подстилкой при низкой продуктивности древостоев. Происхождение как сосняков, так и ельников в центральной Канаде связывается с верховыми пожарами и инвазиями насекомых-вредителей.

Исходными параметрами для прогнозов модели EFIMOD были взяты климатические и почвенные данные по “Русскому Лесу” и стационарных исследований в Candle Lake (BFTCS). Для сопоставимости результатов как в России, так и в Канаде для сосняков были выбраны бедные органическим веществом и азотом сухие песчаные почвы,

для ельников – влажные глеевые почвы с мощной подстилкой, хотя в “Русском Лесе” влажные ельники (ВЗ по П.С. Погребняку) не являются широко распространенными насаждениями. Следует подчеркнуть, что русские и канадские почвы оказались количественно близкими по пулам ОрВП и азота.

Исходные параметры древостоев при моделировании были следующими: густота трехлетнего самосева естественного возобновления при случайном размещении на площади: 10 тыс. для елей и 2.5 тыс. для сосен на 1 га, при средней высоте самосева 0.3 м, стандартном отклонении по высоте 0.1 м.

Для сопоставимости результатов был выбран канадский сценарий рубок, близкий к реальному сплошнолесосечному хозяйству в европейской части России. Он представляет собою одно прореживание в 40 лет и сплошную рубку в 70 лет с последующим возобновлением тех же пород через 5 лет после рубки. Моделировалось две ротации за 150 лет.

Верховые пожары имитировались в 70-летнем возрасте с выгоранием 100% хвои, 60% ветвей, 5% стволов и 30% тонких корней. При анализе результатов принималось во внимание два варианта: с оставлением погибших деревьев в лесу и с их вырубкой. В подстилке сосняков и ельников выгорало 100% опада (O1); 80% разложившейся подстилки (O2 и O3) в сосняках и 25% в ельниках.

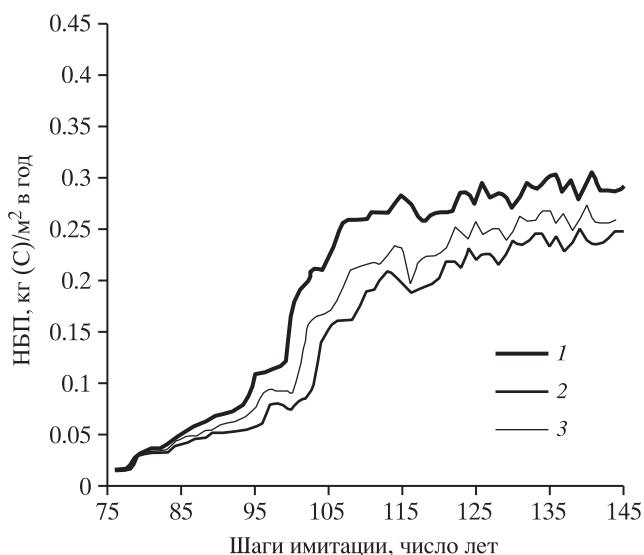
Низовые подстилочные пожары имитировались на следующий год после прореживания или сплошной рубки, с теми же параметрами выгорания тонких корней и подстилки, но без ущерба наземной биомассе деревьев.

При анализе результатов рассматривались параметры древостоев после двух ротаций и рассчитывался общий баланс углерода (нетто экосистемный обмен углерода) как разница между нетто биологической продуктивностью и суммой потерь углерода при гетеротрофном почвенном дыхании, рубках и пожарах.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Генерализованные результаты прогонов модели EFIMOD по выявлению влияния различных лесных пожаров на древостои и почвы в сопоставлении со сплошнолесосечным хозяйством без пожаров представлены в табл. 1–3 и на рисунок.

Все виды пожаров приводят к снижению высоты, диаметра, густоты и запасов древесины в моделируемых древостоях как в России, так и в Канаде (табл. 1). Самое слабое негативное влияние на показатели производительности древостоев оказывают подстилочные пожары, самое



**Рис. 1.** Долговременный эффект воздействия лесных пожаров: нетто биологическая продуктивность (НБП) в канадских сосняках (сосна Банкса) во второй 70-летней ротации после сплошной рубки без пожара, с низовым пожаром после сплошной рубки и верховым пожаром без рубки горельника. Снижение НБП в течение 115 лет отражает эффект рубки ухода: 1 – рубки, 2 – верховой пожар, 3 – низовой пожар.

сильное – верховые. Низовые пожары после сплошной рубки и верховые пожары приводят к близким последствиям в отношении производительности леса в следующем обороте рубки. Хорошо прослеживается и снижение пулов ОрВП за счет выгорания лесной подстилки. Низовые пожары после прореживания в средневозрастных древостоях оказывают в ряде случаев наименьшее влияние на накопленные запасы древесины, но сильное – на пулы углерода ОрВП.

Эти особенности наиболее рельефно проявляются при вычислении относительных изменений указанных параметров (табл. 2). При этом выявляется, что в России негативное влияние лесных пожаров на производительность оказывается не таким сильным, как в Канаде. Безусловно, это может отражать влияние более мягкого климата в Центральной России и достаточно высокого атмосферного поступления азота (12 кг азота на га в год против 2 в Канаде), выполняющего удобрительную роль, как было выяснено на примере западноевропейских лесов [20]. Необходимо отметить, что в модели EFIMOD возможен учет

**Таблица 1.** Пулы органического вещества почв (ОрВП) и параметры древостоев в конце второй ротации при 150-летней имитации до сплошной рубки или пожара

Древостой	Режим нарушений	Углерод ОрВП, кг м <sup>-2*</sup>	Средняя высота, м	Средний диаметр, см	Абсолютная полнота, м <sup>2</sup> га <sup>-1</sup>	Запас древесины, м <sup>3</sup> га <sup>-1</sup>
Россия						
Сосна обыкновенная	1	6.32	19.9	18.8	32.4	354
	2	4.31	19.6	18.5	31.8	343
	3	5.61	19.1	18.0	29.3	305
	4	3.78	18.4	17.2	31.0	319
Ель европейская	1	7.13	16.5	13.9	24.5	165
	2	5.47	16.0	13.3	23.7	155
	3	6.61	16.1	13.4	23.1	151
	4	5.87	16.0	13.4	23.6	154
Канада						
Сосна Банкса	1	2.41	14.0	12.7	15.2	77
	2	1.56	13.2	11.3	12.2	57
	3	1.94	13.5	11.7	12.7	59
	4	1.72	13.5	11.8	13.3	64
Ель черная	1	8.17	6.5	10.3	51.3	164
	2	4.63	6.1	7.1	43.8	132
	3	6.16	6.2	9.5	43.2	129
	4	5.26	6.3	9.8	45.9	140

Примечания: 1 – две ротации с прореживанием и сплошной рубкой без пожаров, 2 – два верховых пожара в конце каждой ротации, 3 – два низовых пожара после прореживания, 4 – два низовых пожара после главной рубки.

\* Включая сухостой и валеж.

различных уровней выпадений азота. Эта роль поступления техногенного азота в экосистемы в настоящее время интенсивно исследуется в Европе в рамках различных проектов [23, 24, 28, 29].

По влиянию пожаров на почвы различий между Россией и Канадой не прослеживается несмотря на различия этих лесов по географическим условиям: данные имитации показывают сильное снижение пулов ОрВП после пожаров по сравнению со сплошнолесосечным хозяйством в таежных лесах обеих стран, достигающее в ряде случаев 40%. Относительное снижение пулов углерода ОрВП после пожаров в долгосрочной перспективе в среднем соответствуют таковому при выгорании подстилки. Известно, что после пожаров идет восстановление лесной подстилки в процессе роста древостоя, однако этот процесс замедлен по сравнению с ненарушенными древостоями в связи со снижением нетто биологической продуктивности и поступления опада после пожаров.

Данные по имитации баланса углерода в лесных экосистемах (табл. 3) подтверждают достаточно выраженную деструктивную направленность влияния пожаров на лесные экосистемы. Это прежде всего – долгосрочное снижение нетто биологической продуктивности (НБП), достигающее в среднем за два оборота рубки 10% в России и 15% в Канаде. Эмиссия углерода углекислого газа при полной минерализации ОрВП в России несколько возрастает после верховых пожаров, но существенно снижается после низовых. В канадских таежных сосняках и ельниках почвенная эмиссия углерода снижается после всех пожаров. Вынос углерода со срубленной древесины после пожаров снижается в связи с уменьшением НБП. Потери углерода при выгорании биомассы и подстилки достигают максимума при верховых пожарах и при низовых пожарах после сплошной рубки. При пожарах после прореживания в средневозрастных древостоях наблюдаются наименьшие потери углерода при выгорании, по-видимому, за счет меньшей биомассы выгоревших порубочных остатков.

При рассмотрении данных по общему балансу углерода обращает на себя внимание заметное различие реакции европейских и североамериканских таежных лесов. В России потеря углерода из лесных экосистем в долгосрочной перспективе наблюдается только при верховых пожарах с вырубкой горельника. Во всех остальных случаях при пожарах имитация показывает небольшое секвестирование углерода. Напротив, в центральной Канаде все пожары приводят к отрицательному балансу углерода с максимальными потерями

**Таблица 2.** Изменение пулов ОрВП и запасов древесины в конце второго оборота рубки при пожарах по сравнению со сплошнолесосечным хозяйством

Древостой	Режим нарушения*	Изменение пулов ОрВП, %	Изменение запасов древесины, %
Россия			
Сосна обыкновенная	2	-31.80	-3.1
	3	-11.20	-13.8
	4	-40.20	-9.9
Ель европейская	2	-23.30	-6.1
	3	-7.30	-8.5
	4	-17.70	-6.7
Канада			
Сосна Банкса	2	-34.40	-25.9
	3	-18.70	-23.4
	4	-27.80	-16.9
Ель черная	2	-43.30	-19.5
	3	-24.60	-21.3
	4	-35.60	-14.6

\* См. примечание к табл. 1

ми углерода при верховых пожарах с вырубкой горельника. Эти различия опять-таки отражают влияние более мягкого климата Европейской России и более всего – воздействие достаточно высокого поступления азота из атмосферы.

Восстановление продуктивности лесной растительности и лесных почв после пожаров хорошо известно в лесной экологии [3, 4, 10, 13]. Проблема заключается в оценке скорости этих процессов. Приведенные данные моделирования показывают, что в разных природных условиях эта скорость очень существенно различается. Судя по балансу углерода, восстановление растительности и почв в Европейской России происходит заметно быстрее, чем в таежных лесах Центральной Канады.

**Заключение.** Приведенные материалы применения динамической модели системы древостой-почва EFIMOD позволяют получить ряд сравнительных и количественных оценок долгосрочного воздействия лесных пожаров на лесные экосистемы в хвойных лесах северного полушария.

При оценке влияния лесных пожаров на леса чаще всего рассматриваются изменения видового

**Таблица 3.** Компоненты баланса углерода в лесных экосистемах, средние значения за 150-летнюю имитацию (два оборота рубки), кг С м<sup>-2</sup> год<sup>-1</sup>

Древостой	Режим нарушений	Нетто биологическая продуктивность (НБП)	Эмиссия углерода CO <sub>2</sub> из почвы	Вывод углерода при рубках	Потери углерода при пожарах	Баланс углерода*
Россия						
Сосна обыкновенная	1	0.338	0.205	0.080	0	0.053
	2	0.328	0.222	0.011	0.042	0.054
	3	0.328	0.222	0.072	0.042	-0.008
	4	0.306	0.177	0.072	0.022	0.035
	5	0.318	0.172	0.075	0.045	0.026
Ель европейская	1	0.195	0.121	0.050	0	0.024
	2	0.188	0.131	0.006	0.029	0.022
	3	0.188	0.131	0.046	0.029	-0.018
	4	0.186	0.110	0.048	0.013	0.015
	5	0.189	0.107	0.051	0.024	0.009
Канада						
Сосна Банкса	1	0.103	0.078	0.024	0	0
	2	0.091	0.076	0.001	0.011	-0.034
	3	0.091	0.076	0.023	0.011	-0.053
	4	0.087	0.064	0.020	0.006	-0.004
	5	0.094	0.069	0.022	0.011	-0.009
Ель черная	1	0.338	0.291	0.043	0	0.003
	2	0.307	0.264	0.005	0.041	-0.002
	3	0.307	0.264	0.036	0.041	-0.034
	4	0.289	0.243	0.036	0.021	-0.011
	5	0.311	0.256	0.040	0.033	-0.018

Примечания: 1 – 3 см. табл. 1, 4 – два низовых пожара после прореживания, 5 – два низовых пожара после главной рубки.

\* Нетто – продуктивность экосистемы как разница между углеродом НБП и суммой потерь углерода из экосистемы при почвенной эмиссии, рубках и пожарах; положительные величины – секвестрация углерода, отрицательные – потери углерода в атмосферу.

состава растительности, естественного возобновления и продуктивности древостоев [4, 10].

Приведенные результаты также демонстрируют заметное и длительное снижение хозяйственной продуктивности древостоев после пожаров, наблюдаемое в течение десятилетий, фактически весь последующий оборот рубки. При этом нередко не обращается внимания на почву, поскольку выгорание подстилки кажется гораздо менее значимым фактором, чем прямой ущерб лесной растительности. Однако данные моделирования обнаруживают существенное и долговременное снижение пулов органического вещества почв за счет прямого выгорания подстилки, а также в ре-

зультате снижения нетто биологической продуктивности и поступления в почву опада.

Баланс углерода в моделируемых лесных экосистемах подчеркивает эти особенности. В этом отношении оказывается существенным воздействием климата на баланс углерода и азота. В более мягком климате Европейской России со значительным поступлением техногенного азота из атмосферы сравнительный ущерб от лесных пожаров заметно ниже, чем в экстроконтинентальном климате с малым поступлением азота из атмосферы.

Сопоставление масштабов воздействия ожидаемого изменения климата и пожаров на таеж-

ные экосистемы [3, 15, 19] выявило, что пожары вызывают более сильные негативные воздействия на баланс углерода и продуктивность лесов, чем потепление климата. Увеличение НБП в таежных лесах при изменении климата не компенсирует ущерба от пожаров.

В данной работе отражены только некоторые аспекты рассматриваемой проблемы. Количественная оценка влияния лесных пожаров на лесные экосистемы в краткосрочной и долгосрочной перспективе требует обстоятельных экспериментальных исследований и использования динамических моделей лесных экосистем в различных сочетаниях природных условий, почв, состава лесов и видов пожаров с учетом их динамических характеристик.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Арцыбашев Е.С.* Лесные пожары и борьба с ними. М.: Лесн. пром-сть, 1974. 287 с.
2. *Бобровский М.В.* Лесные почвы: биотические и антропогенные факторы их формирования // Восточно-Европейские леса / Под ред. О.В. Смирновой. Кн. 1. М.: Наука, 2004. С. 381–427.
3. *Грязькин А.В., Гаритаселайа Х.М.* Динамическая модель круговорота калия в лесных экосистемах. СПб.: СПбГЛТА, 1999. 68 с.
4. *Грязькин А.В.* Возобновительный потенциал таежных лесов. СПб.: СПбГЛТА, 2001. 188 с.
5. *Комаров А.С., Чертов О.Г., Михайлов А.В., Зудин С.Л., Быховец С.С., Грабарник П.Я., Надпорожская М.А., Андриенко Г.Л., Андриенко Н.В., Припутина И.В., Лукьянов А.В., Морен Г., Бхатти Дж.* Моделирование динамики органического вещества в лесных экосистемах. Под ред. В.Н. Кудеярова. М.: Наука, 2007. 380 с.
6. *Корчагин А.А.* Влияние пожаров на лесную растительность и ее послепожарное восстановление в Северной Европе // Тр. Ботанического ин-та АН СССР. Сер. Геоботаника. 1954. № 9. С. 75–149.
7. *Кудеяров В.Н., Заварзин Г.А., Благодатский С.А., Борисов А.В., Воронин П.Ю., Демкин В.А., Демкина Т.С., Евдокимов И.В., Замолотчиков Д.Г., Карелин Д.В., Комаров А.С., Курганова И.Н., Ларионова А.А., Лопес де Гереню В.О., Уткин А.И., Чертов О.Г.* Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России. М.: Наука, 2007. 315 с.
8. *Мелехов И.С., Душа-Гудым С.И., Сергеева Е.П.* Лесная пирология: Учеб. пособие. М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2007. 296 с.
9. *Софронов М.А., Волокитина А.В.* Методика оценки баланса углерода по динамике биомассы в пирогенных сукцессиях // Лесоведение. 1998. № 3. С. 36–42.
10. *Софронов М.А., Гольдаммер И.Г., Волокитина А.В., Софронова Т.М.* Пожарная опасность в природных условиях. Красноярск: Ин-т леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, 2005. 330 с.
11. *Фуряев В.В.* Роль пожаров в процессе лесообразования. Новосибирск: Наука, 1996. 235 с.
12. *Фуряев В.В., Киреев Д.М.* Изучение послепожарной динамики лесов на ландшафтной основе. Новосибирск: Наука, 1979. 296 с.
13. *Чертов О.Г., Комаров А.С., Надпорожская М.А., Михайлов А.В., Быховец С.С., Зудин С.Л., Зубкова Е.В.* Динамическое моделирование трансформации органического вещества почв. Модель ROMUL. СПб.: СПбГУ, 2007. 97 с.
14. *Чертов О.Г., Разумовский С.М.* Об экологической направленности процессов почвообразования // Журн. общ. биол. 1980. Т. 41. № 3. С. 386–396.
15. *Bhatti J., Chertov O., Komarov A.* Influence of climate change, fire, insect and harvest on C dynamics for jack pine in central Canada: simulation approach with the EFIMOD model // In: J. Climate Change. Impacts and Responses. 2009. V. 1. № 3. P. 43–61.
16. *Chertov O., Bhatti J., Komarov A., Mikhailov A., Bykhovets S.* Influence of climate change, fire and harvest on the carbon dynamics of black spruce in Central Canada // Forest Ecol. Manag. 2009. V. 257. P. 941–950.
17. *Chertov O.G., Komarov A.S., Bykhovets S.S., Kobak K.I.* Simulated soil organic matter dynamics in forests of the Leningrad administrative area, northwestern Russia // Forest Ecol. Manag. 2002. V. 169. No 1–2. P. 29–44.
18. *Chertov O.G., Komarov A.S., Karev G.P.* Modern Approaches in Forest Ecosystem Modelling (European Forest Inst. Res. Rep. No 8) Brill.Publ.: Leiden, Boston, Koln. 1999. 130 p.
19. *Chertov O., Komarov A., Mikhailov A., Andrienko G., Andrienko N., Gatalsky P.* Geovisualisation of forest simulation modelling results: a case study of carbon sequestration and biodiversity // Computers and Electronics in Agriculture. 2005. V. 49. P. 175–191.
20. *Kahle H.-P., Karjalainen T., Schuck A., Ågren G., Kellomäki S., Mellert K., Prietzel J., Rehfuss K.E., Spiecker H.* (Eds.) Causes and Consequences of Forest Growth Trends in Europe – Results of the RECOGNITION Project. (EFI Res. Rep. 21). 2008. Brill Publ.: Leiden, Boston. 262 p.
21. *Komarov A., Chertov O., Zudin S., Nadporozhskaya M., Mikhailov A., Bykhovets S., Zudina E., Zoubkova.* EFIMOD 2 – A model of growth and elements cycling in boreal forest ecosystems // Ecol. Model. 2003. V. 170. P. 373–392.
22. *Kurz W.A., Apps M.J.* A 70-year retrospective analysis of carbon fluxes in the Canadian forest sector // Ecological Applications 1999. V. 9. P. 526–547.

23. Magill A.H., Aber J.D., Hendricks J.J., Bowden R.D., Melillo J.M., Steudler P.A. Biogeochemical response of forest ecosystems to simulated chronic nitrogen deposition // *Ecol. Appl.* 1997. V. 7. No 2. P. 402–415.
24. Mellert K.H., Prietzel J., Straussberger R., Rehfuss K.E. Long-term nutritional trends of conifer stands in Europe: Results from the RECOGNITION project // *Eur. J. Forest Res.* 2004. V. 123. No 4. P. 305–319.
25. Nadporozhskaya M.A., Mohren G.M.J., Chertov O.G., Komarov A.S., Mikhailov A.V. Soil organic matter dynamics at primary and secondary forest succession on sandy soils in The Netherlands: an application of soil organic matter model ROMUL // *Ecol. Model.* 2006. V. 190. P. 399–418.
26. Pórté A., Bartelink H.H. Modelling mixed forest growth: a review of models for forest management // *Ecological Modelling* 2002. V. 150. P. 141–188.
27. Shaw C., Chertov O., Komarov A., Bhatti J., Nadporozhskaya M., Apps M., Bykhovets S., Mikhailov A. Application of the forest ecosystem model EFIMOD 2 to jack pine along the Boreal Forest Transect Case Study // *Canadian J. Soil Sci.* 2006. V. 86. P. 171–185.
28. Solberg S., Dobbertin Reinds M., Lange G.J., Andreassen H., Fernandez K., Hildingsson P.G., de Vries W.A. Analyses of the impact of changes in atmospheric deposition and climate on forest growth in European monitoring plots: A stand growth approach // *Forest Ecol. Manag.* 2009. V. 258. P. 1735–1750.
29. Wamelink G.W.W., Wieggers H.J.J., Reinds G.J., Kros J., Mol-Dijkstra J.P., van Oijen M., de Vries W. Modelling impacts of changes in carbon dioxide concentration, climate and nitrogen deposition on carbon sequestration by European forests and forest soils // *Forest Ecol. Manag.* 2009. V. 258. № 8. P. 1794–1805.
30. Yurova A.Yu., Volodin E.M., Ågren G.I., Chertov O.G., Komarov A.S. Effects of variations in simulated changes in soil carbon contents and dynamics on future climate projections // *Global Change Biol.* 2010. V. 16. P. 823–835.

## Simulation Modelling of Forest Fire Impact on the Carbon Pool in Coniferous Forests of European Russia and Central Canada

O. G. Chertov, A. S. Komarov, A. V. Gryazkin, A. P. Smirnov, D. S. Bhatti

The data on the long-term simulation of the dynamics of coniferous forest ecosystems (European Russia and Central Canada) with different forest fire scenarios using the EFIMOD model are presented. All the kinds of fires are shown to decrease the stand height and density, DBH, growing stock, and soil organic matter pool in the simulated forests of Russia and Canada as compared to clear cuttings without fires. The long-term reduction of net biological productivity was also found. The maximal carbon losses were after crown fires and ground fires after clear cutting. In Russia, a negative carbon balance with a carbon loss from forest ecosystems was simulated only for a case of crown fires with cutting the burned wood. In other cases, there is a slight carbon sequestration. In Canada, all fires lead to a negative carbon balance with maximum carbon losses at crown fires with cutting the burned wood. These differences reflect the influence of the milder climate of European Russia as compared to the effect of the extratropical climate of Central Canada. In addition, the high atmospheric nitrogen deposition in European Russia also plays a positive part.