

УДК 630*111:630*4

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭМИССИИ УГЛЕРОДА В ХОДЕ МАССОВОГО РАЗМНОЖЕНИЯ ЛЕСНЫХ НАСЕКОМЫХ*

© 2006 г. В. Г. Суховольский^{1, 2}, О. В. Тарасова¹, А. В. Ковалев³

¹ Сибирский государственный технологический университет
660049 Красноярск, просп. Мира, 82

² Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН
660036 Красноярск, Академгородок

³ Международный центр исследований экстремальных состояний
Красноярского НЦ СО РАН
660036 Красноярск, Академгородок

Поступила в редакцию 17.03.2006 г.

Рассмотрены модели, описывающие процессы трансформации углерода, депонированного в древесных растениях после вспышек массового размножения лесных насекомых. Даны оценки фитомассы фракций деревьев, критических объемов изъятия хвои насекомыми-филлофагами. Предложена модель, описывающая трансформацию хвои в процессе ее потребления насекомыми, и последующую трансформацию хвойного опада и зоопада. Предложена схема расчетов и даны оценки интенсивности эмиссии углерода в атмосферу после вспышек массового размножения филлофагов.

Лесные насаждения, насекомые, вспышки массового размножения, углерод, эмиссия, моделирование.

Систематически вспышки массового размножения лесных насекомых, таких, как непарный шелкопряд *Limantria dispar* L., сибирский шелкопряд *Dendrolimus sibiricus superans* Tchety., сосновая пяденица *Bupalus piniarius* L. и др., приводят к повреждениям бореальных лесов Сибири. В частности, за период с 1878 по 1998 г. на территории Средней Сибири реализовалось 9 крупномасштабных вспышек массового размножения сибирского шелкопряда [6]. Глобальные эффекты воздействия насекомых-филлофагов в ходе таких вспышек связаны с процессами трансформации углерода в насаждениях. Потребление насекомыми биомассы хвои сопровождается увеличением эмиссии углерода в атмосферу, а последующая гибель деревьев на больших площадях - долговременным сокращением стока углерода на участках поврежденного леса.

Интенсивность и общий объем эмиссии углерода в атмосферу зависит от объема фитомассы насаждения, подвергающегося воздействию насекомых, частоте вспышек массового размножения, численности популяции насекомых-вредителей, эффективности освоения корма насекомыми, возможности репарации повреждений.

Рассматривая временную динамику эмиссии углерода, можно выделить начальный этап, когда эмиссия идет за счет процессов дыхания насеко-

мых-филлофагов, разложения листового опада, экскрементов и трупов насекомых (рис. 1). Характерное время T_1 начальной эмиссии углерода обычно составляет 1-2 года. Далее может реализоваться один из трех сценариев - репарации по-

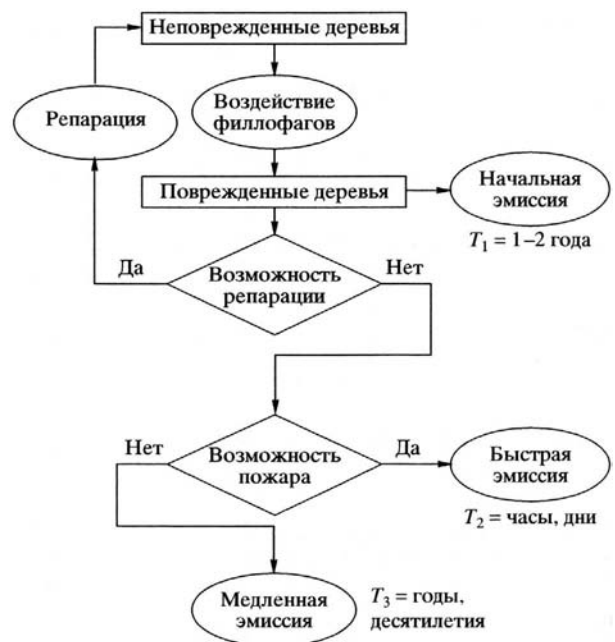


Рис. 1. Граф состояний и переходов из состояния в состояние деревьев, повреждаемых филлофагами. Стрелками показаны возможные переходы из состояния в состояние.

* Работа поддержана РФФИ (04-04-49279, 05-04-49360).

вреждений, минимизации эмиссии углерода в атмосферу и восстановления насаждения; лесного пожара и "быстрой" (в течение времени T_2 , составляющего часы и дни) эмиссии большей части депонированного углерода в атмосферу; "медленной" эмиссии с характерным временем T_3 , составляющим годы и десятилетия (в зависимости от природных условий), и связанной с выделением углерода в процессе освоения древесины ослабленных и погибших деревьев насекомыми-ксилофагами, бактериями и дереворазрушающими грибами.

Временная динамика эмиссии углерода может быть следствием как линейных, так и циклических процессов в насаждении. Приведем пример простейшего линейного процесса как последовательности следующих состояний и эффектов: "неповрежденное дерево - изъятие фитомассы хвой филофагами - гибель дерева - освоение фитомассы ксилофагами". Пример простейшего циклического процесса: "неповрежденное дерево - изъятие фитомассы хвой филофагами - репарация повреждений - восстановившееся дерево". Циклический процесс такого типа характерен, в частности, для деревьев лиственных пород. Достаточно часто встречается ситуация сочетания сценариев "быстрой" и "медленной" эмиссии, когда часть насаждения, поврежденного филофагами и ксилофагами, выгорает, а фитомасса оставшихся деревьев разлагается насекомыми, грибами, бактериями в течение длительного времени.

Оценка интенсивности эмиссии углерода в атмосферу в ходе процессов, инициируемых вспышкой массового размножения лесных насекомых-филофагов, является важной составной частью общей оценки баланса и потоков углерода в лесных экосистемах.

Настоящая работа посвящена методологии количественной оценки объема эмиссии углерода в бореальных лесах Сибири под воздействием насекомых и построению модели эмиссионных процессов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

В настоящей работе для оценки эмиссии углерода вычисляются следующие параметры: количество углерода, выделяющегося в процессе потребления корма насекомыми; запас углерода в древесной фитомассе.

Базовым уравнением для описания процессов эмиссии углерода в атмосферу под воздействием насекомых-филофагов является уравнение баланса углерода. Учитывая закон сохранения массы изъятых насекомых углерода, можно записать [12]:

$$M = (1 - q_1)M + q_2q_1M + bq_2q_1M + aq_1^2M, \quad (1)$$

где M - масса углерода, изъятая насекомыми; q_1 - коэффициент потребления изъятых фитомассы насекомыми; q_2 - коэффициент эффективности роста насекомых; a, b - некоторые константы.

Первый член в правой части (1) характеризует углерод в непереваренных остатках и экскрементах, второй - углерод в биомассе гусениц, третий и четвертый - углерод, ушедший в атмосферу соответственно в процессе синтеза биомассы гусениц и трансформации корма в доступную для питания форму.

После изъятия и потребления хвой филофагами часть углерода хвой в объеме $(aq_1^2 + bq_1q_2)M$ уходит в атмосферу в процессе дыхания насекомых, а остальной углерод в количестве $E = [(1 - q_1) + q_2q_1]M$, включая тот, что попал в тело насекомых, уходит в подстилку, и там происходит дальнейшая его трансформация. Для оценки эмиссионных потоков необходимо оценить коэффициенты уравнения (1), что позволит рассчитать интенсивности эмиссионных потоков.

Для оценки эмиссии углерода на начальном этапе возможно использовать уравнение (1), но наличие четырех неизвестных параметров - a, b, q_1, q_2 - затрудняют расчеты. Однако после простых преобразований из (1) можно получить следующие уравнения:

$$1 = (1 - q_1) + q_2q_1 + bq_2q_1 + aq_1^2, \quad (2)$$

$$1 = aq_1 + (1 + b)q_2. \quad (3)$$

Уравнение (3) является уравнением баланса распределения потребленного насекомыми корма. Параметр a можно трактовать как "цену" потребления корма, $(1 + b)$ - как "цену" усвоения корма. В рамках предложенного оптимизационного подхода уравнение (3) дополняется условием максимизации доли потребленного корма, пошедшей на синтез биомассы гусениц [12]:

$$q_1q_2 \Rightarrow \max. \quad (4)$$

Решение (4) при дополнительном условии (3) дает оптимальные значения q_{10} и q_{20} :

$$q_{10} = \frac{1}{2a}; \quad q_{20} = \frac{1}{2(1 + b)}. \quad (5)$$

Величины q_{10} и q_{20} можно оценить по балансовым экспериментам с выкармливанием гусениц. По этим экспериментальным данным можно оценить параметры a и b , и, следовательно, объем выброшенного углерода.

Обычно выделяют четыре основных фракции древесной фитомассы: ствольную древесину с корой, корни, ветви, листовую аппарат (хвоя, листья).

Таблица 1. Потребление и освоение корма насекомыми-филлофагами (по [7, 13])

Характеристика	Параметр модели	Вид насекомых и порода деревьев	
		сибирский шелкопряд на пихте	непарный шелкопряд на березе
Коэффициент			
потребления	q_1	0.93	0.80
усвоения	q_2	0.043	0.11
Доля усвоенного углерода (биомассы насекомых, включая экзувии)	$q_2 q_1$	0.04	0.09
Доля расходов на перевод корма в усвояемую форму	$a q_1^2$	0.675	0.11
Доля углерода, ушедшего на дыхание	$b q_2 q_1$	0.215	0.60
Цена			
потребления	a	0.78	0.17
усвоения	b	5.375	6.67
Доля углерода, ушедшего в подстилку после однократного объедания	$(1 - q_1) + q_2 q_1$	0.11	0.29
Доля углерода, ушедшего в атмосферу	$a q_1^2 + b q_2 q_1$	0.89	0.71
Масса листового аппарата, т га ⁻¹	M	6.9	1.4-2.0
Эмиссия углерода от дыхания насекомых, т га ⁻¹	Q_1	3.1	0.70
Эмиссия углерода от опада, т га ⁻¹	Q_2	0.25	0.20-0.25

Соотношения между фитомассами фракций выражается уравнением Ципфа-Парето [11, 13]:

$$x(i) = x(1)i^{-\gamma}, \quad (6)$$

где i - ранг фракции фитомассы (место в ранжированном ряде, где ранг 1 имеет фитомасса фракции, наибольшая по массе, и т.д.); $x(1)$ - фитомасса наибольшей по массе фракции дерева (для деревьев старше 10 лет - это обычно стволовая древесина); γ - коэффициент, характеризующий уменьшение фитомассы фракции с увеличением ее ранга.

Из (2) получим величину общего запаса фитомассы в насаждении, включая фитомассу корней:

$$X = \sum_{i=1}^4 x(i) = \sum_{i=1}^4 x(1)i^{-\gamma} = x(1) \sum_{i=1}^4 i^{-\gamma}. \quad (7)$$

Обозначим $\sum_{i=1}^4 i^{-\gamma} = G(\gamma)$. Тогда

$$X = x(1)G(\gamma) = x(4) \cdot 4^{-\gamma} G(\gamma). \quad (8)$$

Из (8) следует, что общую фитомассу конкретного насаждения можно оценить по данным о фитомассе $x(1)$ ствола или фитомассе $x(4)$ листового аппарата, зная коэффициент γ . Величина γ зависит от условий произрастания и возраста древостоя [2].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для оценки эмиссии углерода в атмосферу в ходе инициального этапа вспышки массового размножения филлофагов и расчета параметров уравнений (3) и (5) для сибирского и непарного шелкопрядов использованы данные лабораторных измерений, приведенные в табл. 1.

Фитомасса хвои в пихтовых насаждениях Средней Сибири, где в 1994-1998 гг. происходила вспышка массового размножения сибирского шелкопряда, составляла в зависимости от типа леса, класса бонитета и породного состава насаждения от 3.5 до 10 т га⁻¹, в среднем около 6.9 т га⁻¹ [7]. Для упрощения будем полагать, что в течение сезона насекомые изъели всю хвою и доля углерода в хвое составляла около 50%. Отсюда согласно (6), (8) и данным табл. 1 объем Q_1 эмиссии углерода в процессе дефолиации пихтового насаждения сибирским шелкопрядом вследствие выделения CO₂ при дыхании насекомых составил около 3.1 т га⁻¹.

Трупы и личинные шкурки насекомых, огрызки хвои также будут трансформироваться, и в ходе этого процесса будет происходить эмиссия углерода, определяемая массой углерода в этих фракциях и скоростью трансформации. Будем предполагать, что происходит последовательное освоение огрызков хвои с начальной массой E в течение n лет, когда каждый год доля λ от текущей массы углерода выделяется в атмосферу. То-

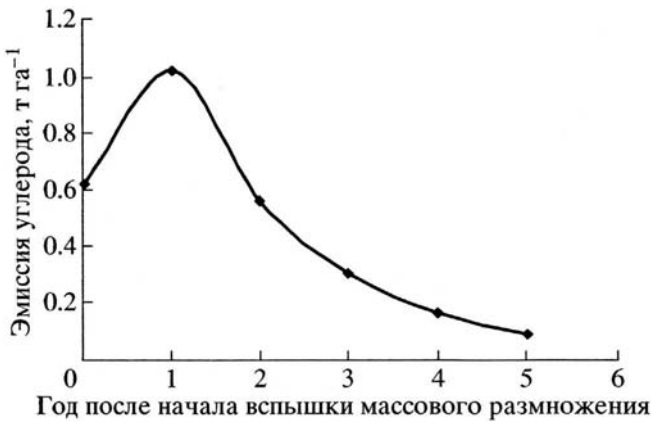


Рис. 2. Временная динамика эмиссии CO₂ при однократном 100%-м повреждении пихты сибирским шелкопрядом.

гда уравнение для величины Q₂ эмиссии CO₂ в атмосферу вследствие трансформации хвойного опада в подстилке можно выразить итеративной формулой:

$$\begin{aligned}
 Q_2 &= (1 - \lambda)E + (1 - \lambda)\lambda E + (1 - \lambda)\lambda^2 E + \\
 &+ (1 - \lambda)\lambda^3 E + \dots (1 - \lambda)\lambda^n E = \\
 &= (1 - \lambda)E(1 + \lambda + \lambda^2 + \lambda^3 + \dots + \lambda^n) = \lambda E.
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

Величина λ из теоретических соображений не определяется и зависит от конкретных экологических условий, в которых растет насаждение. В пихтовых насаждениях Средней Сибири в ходе массового размножения сибирского шелкопряда примерно 60-70% массы опада разлагается в течение двух сезонов [7], т.е. λ² = 0.3-0.4 и, следовательно, для хвойного опада λ ≈ 0.55-0.63. Для зооопада значение λ, к сожалению, неизвестно, однако можно предположить, что порядок его близок к значению λ для хвойного опада.

На рис. 2 приведена модельная кривая динамики суммарной эмиссии углерода после 100%-го повреждения пихт сибирским шелкопрядом. Как видно из рис. 2, интенсивность эмиссии углерода после изъятия хвои достигает максимума на следующий год после вспышки и существенно уменьшается к пятому году после вспышки. Эмиссия CO₂ из подстилки составила около 0.25 т га⁻¹, всего же в атмосферу в ходе инициального этапа вспышки массового размножения сибирского шелкопряда в южной тайге Красноярского края было выброшено примерно 3.35 т га⁻¹ углерода. Эта величина достаточно мала по сравнению с общим запасом углерода пихтовых насаждений южной тайги, составляющей 35-65 т га⁻¹ [14], однако важность инициального этапа заключается не в массе выброшенного углерода, а в том, что он может инициировать дальнейшую масштабную трансформацию и эмиссию углерода.

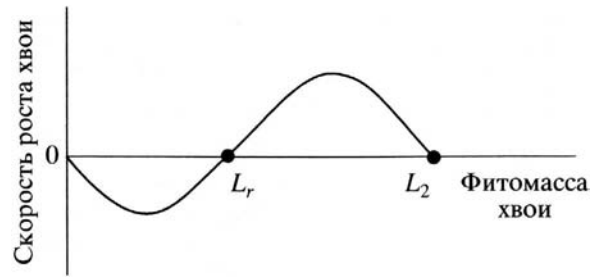


Рис. 3. Фазовый портрет процесса роста фитомассы хвои. L₂ и L_r - максимальная и критическая фитомассы хвои.

Для непарного шелкопряда, повреждающего березовые насаждения на юге Красноярского края, оценка по аналогичной схеме эмиссии CO₂ в процессе дыхания насекомых составляет около 0.70 т га⁻¹. Расчет эмиссии углерода в ходе трансформации опада составляет 0.20-0.25 т га⁻¹.

Если деревья восстановятся после повреждения насекомыми-филлофагами, то эмиссия ограничится тем объемом углерода, который был изъят насекомыми-филлофагами в процессе питания. Уравнение роста хвои может быть записано по аналогии с уравнением роста всей фитомассы насаждения [5]:

$$\frac{dL}{dt} = kL(L_2 - L)(L - L_r), \tag{10}$$

где k - удельная скорость роста хвои, L₂ и L_r - максимальная и критическая фитомассы хвои.

На рис. 3 приведен фазовый портрет роста фитомассы хвои. Как видно из рис. 2, фазовый портрет имеет два устойчивых состояния - в точках L = 0 (хвоя отсутствует) и L = L₂ (объем хвои в норме), и одно неустойчивое состояние L_r. Критическое значение L_r зависит от физиологического состояния деревьев в насаждении, степени их устойчивости к нападению насекомых-ксилофагов и других факторов. При изъятии объема фитомассы, большего, чем L₂ - L_r, восстановления листового аппарата не происходит, масса хвои стремится к нулю и дерево гибнет.

Величину массы хвои в (10) можно нормировать на величину L₂ и записать уравнение относительно доли p от общей величины фитомассы хвои:

$$\frac{dp}{dt} = kp(1 - p)(p - p_r). \tag{11}$$

Для большинства пород деревьев величина p_r - критическая относительная масса хвои, после изъятия которой хвоя не восстанавливается и дерево гибнет, известна из наблюдений. Так, для сосны обыкновенной *Pinus silvestris* L. к гибели дерева приводит однократная потеря более 70% хвои. Од-

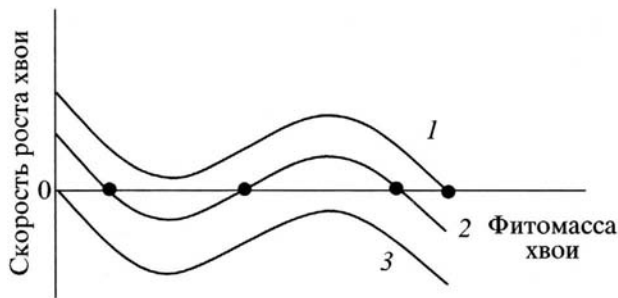


Рис. 4. Фазовые траектории уравнения роста хвой лиственницы с учетом ее репарации после повреждений: 1 - в отсутствии повреждений, 2 - одно-двукратное повреждение насекомыми, 3 - многократная дефолиация.

нако для некоторых хвойных пород (например, лиственницы сибирской *Larix sibirica* Ldb.) полная однократная дефолиация не приводит к гибели, и дерево способно репарировать повреждения даже при полной дефолиации в течение двух-трех лет. Для учета этого эффекта можно предложить модифицированное уравнение:

$$\frac{dL}{dt} = kL(L_2 - L)(L - L_r) + \alpha(n), \quad (12)$$

где n - кратность изъятия фитомассы; $\alpha(n) = \alpha_0 \exp(-\lambda n)$.

На рис. 4 представлены фазовые траектории уравнения роста хвой с учетом ее репарации после повреждений. Кривая 1 на рис. 4 представляет фазовую траекторию роста хвой лиственницы в отсутствии повреждений. Кривая 2 отражает ситуацию после одно-двукратного повреждения насекомыми. В связи с ослаблением дерева уменьшен объем хвой. Кривая 3 характеризует дерево после многократной дефолиации, когда репарации хвой не происходит. В этом случае фазовая траектория имеет только одно устойчивое состояние с $L = 0$, и дерево гибнет.

Для таких пород, как пихта и сосна, при достаточно сильном однократном изъятии хвой филофагами восстановления листового аппарата у деревьев не происходит, и на ослабленные деревья могут напасть насекомые-ксилофаги. Наиболее опасным видом для пихтовых насаждений Сибири является черный пихтовый усач *Monochamus urusovi* Fisch. [4], а для сосновых насаждений юга Средней Сибири - большой сосновый лубоед *Blastophagus piniperda* L. и усачи из рода *Monochamus* [10]. Нападение ксилофагов является началом "медленной" стадии эмиссии углерода, когда происходит последовательное освоение сначала луба, а затем и мертвой древесины различными видами насекомых-ксилофагов, а также грибами и бактериями. Последовательность освоения ксилофагами описывается с помощью шкалы скользящей устойчивости, которую в данном случае

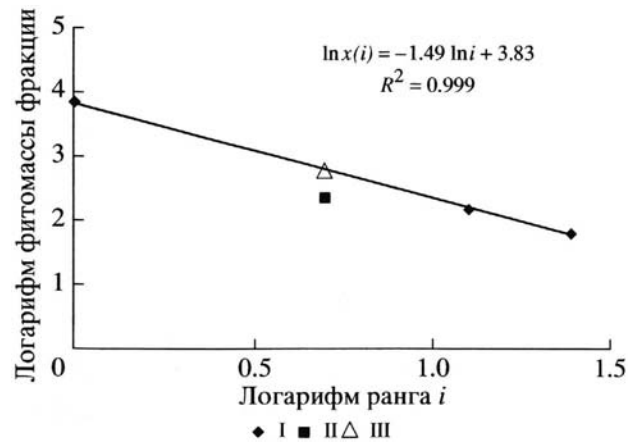


Рис. 5. Типичный вид кривой рангового распределения фитомассы фракций деревьев (пихтовое насаждение, Красноярский край, бассейн р. Большой Пит, состав насаждения 8П2Е, возраст 74 года; I - фракции рангов 1 (ствол с корой), 3 (ветви), 4 (хвоя); II - натурные данные по фитомассе корней; III - расчет фитомассы корней по уравнению (6) (по [14]).

можно было бы называть шкалой скользящего освоения древесины [3].

Величина суммарной за все время эмиссии углерода при этом сценарии будет определяться общей фитомассой насаждений. При этом интенсивность эмиссии углерода будет зависеть от географического положения и особенностей местообитания деревьев.

Схема расчетов размеров эмиссии углерода этими фракциями будет аналогична схеме расчетов эмиссии хвойного и зоопада (конечно, с другими коэффициентами). К сожалению, детальных данных о величинах коэффициентов, описывающих трансформацию фитомассы ствола, ветвей и корней, в имеющейся литературе крайне мало. К тому же значения этих коэффициентов сильно варьируют в зависимости от экологических условий произрастания. Так, в северных лесах процесс разложения древесины идет замедленными темпами вследствие низкой численности и слабой активности популяций насекомых-ксилофагов, бактериальной и грибной микрофлоры.

Для расчета фитомассы конкретного насаждения может быть использована процедура, описанная в методической части настоящей статьи. На рис. 5 в качестве примера приведены натурные и расчетные значения фитомассы древесных фракций для пихтового насаждения в южной тайге (район бассейна р. Большой Пит) [14]. Как видно из рис. 5, натурные данные по таким фракциям, как ствол, ветви, хвоя, хорошо аппроксимируются уравнением (6). Для фитомассы фракции корней приведенная в [14] оценка занижена и можно по уравнению (6) вычислить уточненную оценку фитомассы корней. В табл. 2 в качестве примера

Таблица 2. Фитомасса фракций в сосновых насаждениях на территории Красноярского края

Параметр	Территория			
	Приангарье	Южная Эвенкия	Ермаковский р-н	Минусинский р-н
Бонитет	3	3	3	3
Возраст, лет	94	160	70	70
Масса				
стволов	141.2	197	150	115.7
корней	28.2*	37	37.2	28.3*
ветвей	13.1	10	10.1	12.2
хвои	4.6	4	4.2	7.1
Всего	187.1	248	201.5	163.3
M_1	147.2	216.1	171.0	115.2
γ	2.39	2.81	2.58	2.02
R^2	0.989	0.994	0.986	0.999
Источник данных	[1]	[8]	[9]	[8]

* Значение вычислено по уравнению (6).

приведены натурные и расчетные данные по фитомассе фракций в сосновых насаждениях различных районов Красноярского края. Для насаждений, где при натурных исследованиях не оценивалась фитомасса корней, в табл. 2 приведены величины фитомассы корней, рассчитанные по (6). Из табл. 1 следует, что в сосняках Центральной Сибири в ходе "быстрого" или "медленного" сценариев гибели насаждения в атмосферу суммарно может быть выброшено 80-120 т га⁻¹ углерода.

Заключение. Предложенная модель рассматривается как первое приближение оценки процессов эмиссии углерода в насаждениях, подверженных разрушительному воздействию насекомых-филлофагов в период вспышки массового размножения. Дальнейшие усилия должны быть направлены как на развитие самой модели, так и на уточнение ее параметров.

В модели необходимо учесть эмиссию углерода, происходящую за счет хвойного опада и дыхания в норме, определить интенсивность потоков углерода при многократном изъятии хвои филлофагами, стимуляцию процессов почвенного дыхания экскрементами гусениц и другие аспекты энергетического обмена популяций насекомых в процессе прохождения вспышек массового размножения.

При оценке воздействия насекомых на лесные экосистемы следует учитывать тип вспышки. Очевидно, что характер эмиссии углерода в атмосферу в ходе "собственно вспышки" будет отличаться от динамики эмиссионных процессов при развитии "фиксированных вспышек" массового размножения. Необходимо также изучить зависи-

мость параметров модели от экологических условий произрастания кормовой породы и факторов погоды.

Все приведенные выше расчеты позволяют оценить интенсивность эмиссии углерода в атмосферу в зависимости от уровня повреждения деревьев насекомыми. Однако общий объем эмиссии будет определяться не только степенью повреждения деревьев, но и площадью очагов массового размножения насекомых. Для панзональных вспышек в бореальных лесах площади очагов могут составить сотни тысяч и даже миллионы гектаров. Поэтому для оценки общего объема выбросов диоксида углерода с лесных территорий в процессе вспышек массового размножения насекомых необходимо разработать интегральную модель, включающую наряду с популяционной динамикой насекомых пространственную динамику очагов массового размножения и реакцию деревьев на повреждение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бузыкин А.И., Пшеничникова Л.С. Фитомасса и особенности ее продуцирования деревьями разного ценотического положения // Продуктивность сосновых лесов. М.: Наука, 1978. С. 69-89.
2. Бузыкин А.И., Пшеничникова Л.С., Суховольский В.Г. Густота и продуктивность древесных ценотозов. Новосибирск: Наука, 2002. 152 с.
3. Исаев А.С., Гирс Г.И. Взаимодействие дерева и насекомых-ксилофагов. Новосибирск: Наука, 1975. 346 с.
4. Исаев А.С., Рожков А.С., Киселев В.В. Черный пихтовый усач. Новосибирск: Наука, 1988. 270 с.

5. *Исаев А.С., Суховольский В.Г., Хлебопрос Р.Г., Бузыкин А.И., Овчинникова Т.М.* Моделирование лесообразовательного процесса: феноменологический подход // *Лесоведение*. 2005. № 1. С. 1-9.
6. *Кондаков Ю.П.* Массовые размножения сибирского шелкопряда в лесах Красноярского края // *Энтомологические исследования в Сибири*. Вып. 2. Красноярск: Красноярский фил. Российского энтомолог. о-ва, 2002. С. 25-74.
7. *Плешиков Ф.И., Ваганов Е.А., Ведрова Э.Ф. и др.* Лесные экосистемы Енисейского меридиана. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. 356 с.
8. *Поздняков Л.К.* Продуктивность лесов Сибири // *Ресурсы биосферы: итоги советских исследований по Международной биологической программе*. Л.: Наука, 1975. Вып. 1. С. 43-55.
9. *Протопопов В.В.* Биологическая продуктивность горных лесов Западного Саяна // *Биологическая продуктивность и круговорот химических элементов в растительных сообществах*. Л.: Наука, 1971. С. 59-65.
10. *Сорокопуд Е.Н.* Экологические аспекты заселения очагов сосновой пяденицы стволовыми вредителями // *Насекомые лесостепных боров Сибири*. Новосибирск: Наука, 1982. С. 98-111.
11. *Суховольский В.Г.* Распределение фитомассы деревьев по фракциям и оценка биопродуктивности деревьев и насаждений // *Лесоведение*. 1996. № 1. С. 30-40.
12. *Суховольский В.Г.* Экономика живого. Новосибирск: Наука, 2004. 140 с.
13. *Суховольский В.Г., Бузыкин А.И., Хлебопрос Р.Г.* Модели распределения фитомассы деревьев и насаждений // *Лесоведение*. 1997. № 4. С. 3-13.
14. *Усольцев В.А.* Фитомасса лесов Северной Евразии: база данных и география. Екатеринбург: УрО РАН, 2001. 707 с.

Modeling of Carbon Emission in the Course of Forest Insect Outbreaks

V. G. Soukhovolsky, O. V. Tarasova, and A. V. Kovalev

Models describing the transformation of carbon deposited in woody plants after mass outbreaks of forest insects are considered. A model for the fractional distribution of stand phytomass is presented. Estimates for phytomass of tree fractions, including root phytomass, are given. An index for the critical volume of needle output by phyllophagous insects was elaborated. The consumption of needles above this critical level leads to the death of trees. A balance model characterizing carbon fluxes for the period of the insect activity, as well as a model describing the transformation of needle falloff and zoofalloff in the course of the outbreaks of phyllophagous insects are suggested. A scheme for calculating the carbon fluxes at the succeeding wood consumption by different species of xylophagous insects is considered. On the basis of the developed models, a methodology of calculating the intensity of carbon emission to the atmosphere after outbreaks of forest insects is proposed.