

УДК 57.082.14:574.4:630.18 (476)

## МОДЕЛЬНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ БИОГЕННОГО КРУГОВОРОТА В ЛЕСНОЙ ГЕОЭКОСИСТЕМЕ БЕЛАРУСИ

канд. техн. наук Г.А. КАМЫШЕНКО

(Институт проблем использования природных ресурсов и экологии НАН Беларуси)

Представлено краткое описание решения задачи модельного представления биогенного круговорота в лесной геоэкосистеме, применяемого в информационно-моделирующей системе «Биогеоэкологическое разнообразие Беларуси». Модель тестирована на основе реальных данных. Приведены примеры визуализации результатов модельных расчетов.

Введение. Леса являются основным типом естественного растительного покрова Беларуси. Выбор лесной геоэкосистемы в качестве объекта модельных исследований вытекает из огромной роли лесов в структуре ландшафтов Беларуси, их влияния на условия жизнедеятельности человека. При этом особая роль принадлежит лесу как источнику утилизации парниковых газов, в том числе атмосферного углерода. Вопросы оценки пулов растительного вещества и связанных с ним химических элементов, прогностическое моделирование продукционно-деструкционных процессов, происходящих в лесных геоэкосистемах в условиях наблюдаемого изменения климата, так называемого парникового эффекта, стали приоритетными направлениями геоэкологии и приобрели большую практическую значимость.

В последнее время отмечается существенное увеличение общей площади лесных и лесопокрытых земель. Площадь земель лесного фонда Беларуси в совокупности на 01.01.2002 г. равна 9302,6 тыс. га, что составляет примерно 41,3 % всей территории страны [1]. Белорусские леса разнообразны по своему составу и занимаемым площадям. Основные лесобразующие породы - сосна, ель, дуб обыкновенный, березы бородавчатая и пушистая, осина, ольха черная и серая и др. Нами выделяются три типа древесных пород: хвойные, твердолиственные, мягколиственные (рис. 1, а); по возрастной структуре - 6 групп, из которых преобладает средневозрастная, занимающая примерно 45 % лесопокрытой площади (рис. 1, б).

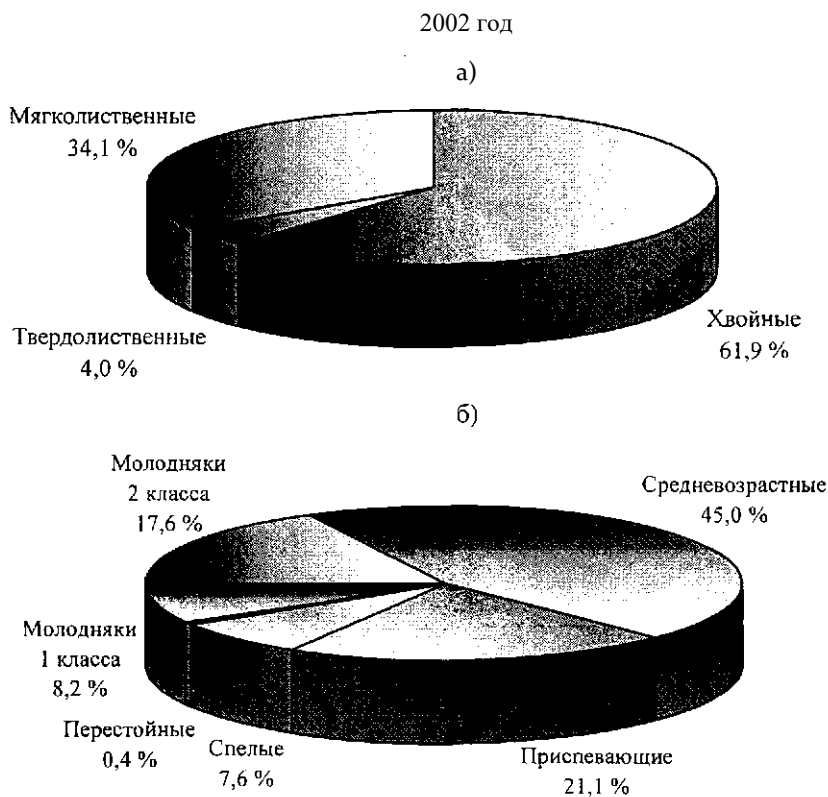


Рис. 1. Структура лесных площадей:  
а - по породному составу; б - по возрастам

Постановка задачи. При решении вопросов, связанных с моделированием лесных геозкосистем, возникает необходимость обобщения большого количества разнородной и разносторонней информации об объекте. Формализация предметной области включает решение следующих задач:

- двухчленное представление лесной геозкосистемы как образования «фитоценоз - эдафотоп»;
- классифицирование и конструирование структурного разнообразия фитоценозов и эдафотопов разных иерархических уровней, создание информационного обеспечения иерархической системы классификаторов.

Лесной фитоценоз в модели имеет сложное представление, нами выделяются следующие ярусы: древесный, подросто-подлесочный и живой напочвенный покров.

Объекты и методы исследования. Круговорот растительного вещества и связанных с ним химических элементов является ключевым моментом в моделировании динамики субстанций в геозкосистемах. В модели принята блоково-поточковая концепция представления биогенного круговорота вещества [2, 3, 4]. Блоки - это компоненты геозкосистемы; потоки - обменные процессы между ними. Рассматриваются внутренние потоки (обменные процессы), связывающие компоненты данной экосистемы между собой, и внешние, связывающие данную экосистему с другими. Структура круговорота определена, если указаны все его блоки, внутренние и внешние потоки (входы и выходы). Функционирование круговорота задается изменением состояния во времени, зависимостями запасов и интенсивностей потоков от времени. Формой отражения состояния круговорота служит баланс субстанции в блоках и звеньях, который определяет его режим функционирования.

Нами выделяются следующие основные блоки:

- фитомасса надземная (зеленые листья, надземные живые части травы, мхов и др., стволы деревьев с корой, ветви деревьев и кустарников);
- фитомасса подземная - корни растений, корневища, клубни, луковицы;
- мортмасса надземная - сухостой, валежник у древостоя, ветошь и лесная подстилка (метровый напочвенный покров);
- мортмасса подземная, а также гумус и элементы питания.

Структура растительного вещества изучается по ярусам, а затем результаты обобщаются на экосистему в целом. В разработанной модели лесной геозкосистемы структура растительного вещества представлена более чем двадцатью фракциями.

Модель круговорота описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений баланса вещества, составленных для запасов субстанций по всем выделенным блокам, представляет собой задачу Коши. В математических моделях фактически решаются не сами дифференциальные уравнения, а системы линейных алгебраических уравнений, так называемых уравнений в конечных разностях. Их решение является приближением к решению исходных дифференциальных уравнений. В конечно-разностном представлении пул субстанции в блоке в последующий момент времени изменяется на величину, равную разности между суммарными потоками в блок и потоками из блока, и в общем виде может быть представлен следующим образом:

$$Z_i^{(1)} = Z_i^{(0)} + (\sum_j P_{ij} - \sum_k Q_{ik}) \cdot \Delta t,$$

где  $i$  - индекс блока;  $Z_i^{(0)}$ ;  $Z_i^{(1)}$  - запасы соответственно в начале и конце интервала  $\Delta t$ ;  $P_{ij}$  - суммарный поток в  $i$ -тый блок;  $Q_{ik}$  - суммарный поток из  $i$ -того блока.

Системы обыкновенных дифференциальных уравнений составляются для 11 субстанций - растительного вещества (в пересчете на абсолютно сухое вещество) и эквивалентного количества 10 химических элементов (Si, Al, Fe, Mn, Ca, Mg, K, P, S, N). При этом балансы биогенов рассчитываются на основе баланса растительного вещества по их среднему содержанию в разных фракциях фито- и мортмассы.

Результаты и их обсуждение. В модели исследуются два фундаментальных параметра, описывающих биологический круговорот: запас вещества в компонентах геозкосистемы, определяемый в т/га, и интенсивность обменных процессов (т/га в год). Имитация круговорота растительного вещества и связанных с ним химических элементов производится в 2 этапа. На первом осуществляется начальная оценка состояния объекта. Она рассчитывается на основе статистических, полученных экспериментальным путем, данных. Задача оценки начального состояния фитоценоза и эдафотоба решается независимо для каждого яруса фитоценоза, причем разными методами. Важным моментом в модели является оценка запаса древостоя (стволов в коре), а также значений его прироста и отпада. Для ее решения в модели используются таблицы хода роста (ТХР), представляющие собой основанные на крупнейшем статистическом материале регрессионные модели расчета средних значений ряда параметров древостоя как функции таксационных показателей (возраста древостоя, бонитета, полноты древесной породы, типа леса/напочвенного покрова). В работе используются в основном данные по региональным ТХР (табл. 1), опубликованным В.Ф. Багинским [5].

Таблица 1

Файл исходных данных ТХР.dat (фрагмент - сосна, бонитет Ia)

Возрастная группа	Запас, т/га	Прирост, т/га в год	Отпад, т/га в год
1	69	4,9	2,2
2	118	4,8	2,7
3	165	4,5	2,8
4	211	4,1	2,8
5	252	3,7	2,7
6	289	3,3	2,5
7	321	2,8	2,5
8	349	2,3	2,4
9	372	1,9	2,4
10	391	1,5	2,3
11	406	1,2	2,0
12	418	1,1	1,5
13	430	1,0	1,5

Таблицы составлены для 7 формаций: сосновых, еловых, дубовых, березовых, осиновых, черно-ольховых, серо-ольховых, которые охватывают около 95 % площади лесов. Бонитеты лесов даны по породам: сосна - Ia - V, ель - Ia - V, дуб - I - III, береза - Ia - IV, осина - Iv - IV, ольха черная - Ia - III, ольха серая - I - III. Определены соответствия бонитетов типам леса. Возрастные градации следующие: для сосны и ели - 20 - 140 лет, с шагом 10 лет; дуба - 20 - 180 лет, с шагом 10 лет; березы - 10 - 100 лет, с шагом 10 лет; осины и ольхи черной - 10 - 90 лет, с шагом 5 лет; ольхи серой - 5 - 50 лет, с шагом также 5 лет. Промежуточные значения в модели, в том числе начальные, получают линейной интерполяцией [2].

Количественное оценивание фракционной структуры древостоя в модели основывается на исследовании системы алло метрических и подобных им регрессионных зависимостей, связывающих между собой выделенные фракции/части как функции возраста древостоя. Недостаточность, отрывочность, а в некоторых случаях и просто отсутствие требуемой информации представили собой серьезное препятствие при детализации расчетов фракционной структуры фитомассы древостоя и распределения фракций мортмассы фитоценоза. Пробел в этой области был восполнен Г.И. Сачком [2, 6], разработавшим и систематизировавшим систему аллометрических соотношений для 10 древесных пород-доминантов на основе статистической обработки обширных материалов публикаций и фондов.

Алло метрические соотношения позволяют подключить оценку запаса древесины стволов в коре к динамике продукционного и деструкционного процессов и фракционной структуры конкретного древостоя. Основным моментом при этом является получение оценки запаса надземной фитомассы по запасу древесины. Запас других фракций рассчитывается по одной из этих величин или из них полученных.

Раздельно рассматриваются запасы по надземной и подземной частям, а также суммарные - по категориям фитомассы и мортмассы растительного вещества. Химический состав растительного вещества определяется умножением значения концентрации элемента на массу фракции. Тем самым осуществляется оценка структуры запасов и интенсивности потоков в блоки и из блоков растительного вещества, азота и зольных элементов на начальный момент моделирования, определенный таксационными параметрами однопорядного древостоя.

Для начальной оценки запаса растительного вещества подросто-подлесочного яруса определяется список присутствующих на исследуемой территории ботанических видов. По специально составленной таблице модельного хода роста растений подросто-подлесочного яруса (табл. 2) для каждого вида по его средней высоте определяется возраст в годах, корректируемый на бонитет, а также запас надземной фитомассы (м<sup>3</sup>/га). Затем по фракционной структуре фитомассы определяется фракционный запас химических элементов. Процедура повторяется для всех ботанических видов яруса, полученные результаты суммируются со взвешиванием.

Для растений напочвенного яруса для каждого ботанического вида по соответствующей таблице [2] определяются максимальные запасы растительного вещества, годовые приросты, а также минимальные (зимние) запасы. По полученным значениям и химическому составу фракций оцениваются запасы и потоки химических элементов. Таким образом, формируется матрица начальных значений запасов и потоков растительного вещества и связанных с ним химических элементов для напочвенного покрова.

Следует отметить, что в модельном аспекте оценка начального состояния лесной подстилки представляет собой отдельную задачу. В этом блоке идет накопление и деструкция надземной мортмассы в виде опада листьев, хвои, ветвей, коры, древесины, генеративных органов. Благодаря их минерализации

и гумификации, движению по трофической цепи происходит пополнение запасов гумуса и элементов питания в почвенном поглощающем комплексе.

Таблица 2

Модельный ход роста растений подросто-подлесочного яруса (фрагмент) [2]

а – V, м<sup>3</sup>/га, б – А, лет

№	Вид	Градация высот (Нср), м											
		0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
1	а	1,0	3,5	6,0	11,0	15,0	20,0	30,0	35,0	42,0	50,0	60,0	75,0
	б	3,0	5,0	6,5	8,0	9,0	10,0	11,0	12,0	13,0	14,0	14,5	15,0
2	а	0,5	7,0	10,8	13,0	16,0	20,0	24,0	30,0	34,0	37,0	50,0	70,0
	б	5,0	6,0	7,0	8,5	10,0	11,0	12,0	13,5	15,0	17,0	18,0	20,0
3	а	0,1	0,3	1,0	5,0	10,0	15,0	20,0	26,0	31,0	37,0	47,0	60,0
	б	2,0	3,5	5,0	7,5	10,0	11,0	12,0	13,5	15,0	17,0	18,5	20,0
4	а	0,2	1,0	5,0	8,0	12,0	16,0	21,0	25,0	28,0	33,0	44,0	53,0
	б	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	9,0	10,0
5	а	0,5	2,0	5,0	9,0	13,0	17,0	21,0	26,0	30,0	35,0	47,0	56,0
	б	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0

Примечание. Первый столбец отражает список видов растений подросто-подлесочного яруса (1 - сосна обыкновенная; 2 - ель обыкновенная; 3 - дуб черешчатый; 4 - береза бородавчатая и пушистая; 5 - осина и т.д.).

Начальная оценка эдафотопа рассчитывается по заданному вектору конструируемой почвы в классификаторе почв. Оценка получается раздельно для почв минерального и органогенного рядов, как средневзвешенная по подтипам и подклассам, со взвешиванием по обоим шкалам классификации. В результате рассчитывается запас гумуса (или разложившегося торфа), подземной мортмассы (или неразложившегося торфа), запасы 10 химических элементов в каждом из указанных двух блоков, а также в блоке «подвижных элементов».

На втором этапе имитируется годичный цикл продукционно-деструкционных процессов, фактически завершающийся разложением подстилки. Продуктивность характеризуется приростом надземной и подземной фитомассы, а также их суммой. Прирост надземной фитомассы оценивается по ее запасу и распределяется между фракциями по аллометрическим соотношениям для прироста. Деструктивная ветвь круговорота растительного вещества включает отмирание фитомассы и ее разложение (минерализацию). Рамки статьи не позволяют детально остановиться на каждом из этих процессов. Следует отметить, что исследование структуры, трансформации, баланса растительного вещества является одним из основных направлений современного лесоведения и лесной экологии.

В модели используются эталонные средние составы древостоев для всех формаций по типам леса, позволяющие исследовать смешанные леса. Результаты оценки запасов и показателей продукционно-деструкционных процессов суммируются с учетом весов древесных пород и корректируются на полноту древостоя.

Состояние системы оценивается на начало вегетации (весенний минимум), момент максимального развития фитомассы и на конец вегетации. На выходе получаем трехмерную матрицу, отражающую оценки запасов, входных и выходных потоков растительного вещества и связанных с ним 10 химических элементов, распределенных по 7 функциональным блокам в максимуме вегетации.

Модель круговорота не является замкнутой и включает ряд потоков, учитывающих привнос субстанций в геозкосистему извне и вынос из нее в окружающую среду. Балансовые расчеты ведутся для всех ярусов геозкосистемы за текущий год, затем формируется оценка состояния на конец года. Полученные расчетные результаты становятся начальной оценкой для следующего года, определяются потоки в блоки и из блоков и цикл повторяется.

В результате работы с моделью были получены для лесной геозкосистемы страны на уровне административных районов территориально распределенные (по отношению к территориальной неоднородности региона) и типологически распределенные (по отношению к биогеоценотическому разнообразию Беларуси) удельные и валовые оценки запасов и потоков растительного вещества и связанных с ним химических элементов.

На завершающем этапе средствами ГИС-технологий решался вопрос представления полученных результатов в доступной для пользователя форме. Картограммы территориально распределенных удельных и валовых запасов фитомассы в лесной геозкосистеме Беларуси по данным 2000 г. приводятся на рис. 2.

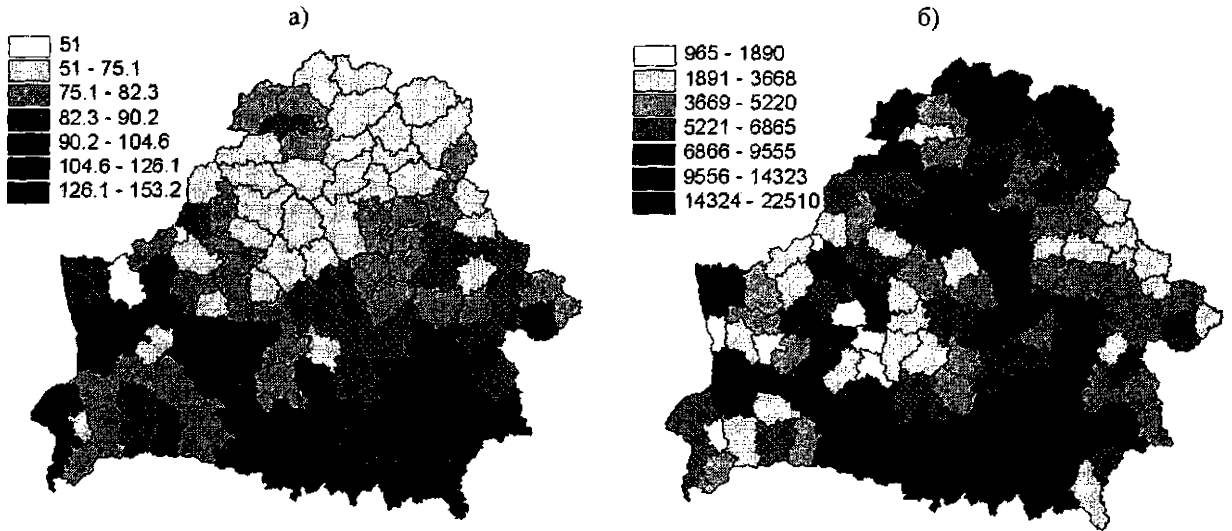


Рис. 2. Запасы фитомассы в лесной геоэкосистеме Беларуси: а - удельные, т/га; б - валовые, тыс. т

На всех этапах создания модели проводилась ее проверка на достоверность и адекватность. Нами применялась пассивная ретроспективная форма проверки путем сопоставления рассчитанных показателей со статистическими, эмпирически полученными аналогичными результатами. Была подтверждена высокая степень достоверности и репрезентативности модельных расчетов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Состояние природной среды Беларуси: Экологический бюллетень 2002 г. / Под ред. В.Ф. Логинова. - Мн.: Минсктипроект, 2003. - 248 с.
2. Биогеоценотическое разнообразие Беларуси: Информационно-моделирующая система / Г.И. Сачок, Д.В. Татьянок, В.В. Коляда, Г.А. Камышенко. - Мн.: ИПП Мин-ва экономики Республ. Беларусь, 1996. - 240 с.
3. Сачок Г.И., Камышенко Г.А. Биогенный круговорот в геоэкосистемах Беларуси (модельный аспект). - Мн.: Донарит, 2004. - 178 с.
4. Титлянова А., Тесаржова М. Режимы биологического круговорота. - Новосибирск: Наука, 1991. - 147 с.
5. Багинский В.Ф. Повышение продуктивности лесов. - Мн.: Урожай, 1984. - 135 с.
6. Сачок Г.И., Татьянок Д.В. Имитационное моделирование лесных экосистем Беларуси. - Мн., 1994. - 48 с.