

УДК 574.4+004.942

## ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПОЧАСОВОЙ ДИНАМИКИ УГЛЕРОДА ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В СООБЩЕСТВАХ ТРАВЯНИСТОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ECOGRASS

С. В. Мамихин\*, В. М. Бадави, Д. Н. Липатов, Д. В. Манахов,  
Т. А. Парамонова, В. В. Столбова, А. И. Щеглов

МГУ имени М.В. Ломоносова, факультет почвоведения, 119991, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 12

\*E-mail: svmamikhin@mail.ru

Разработан алгоритм имитационной модели поведения углерода в травянистых сообществах различного типа, как автономных, так и входящих в состав комплексных фитоценозов. Учитывается влияние внешних факторов: поступления солнечной радиации, выпадения атмосферных осадков, температуры воздуха, облачности, скорости ветра и т.д. Воспроизводится динамика влажности и температуры почвы. В зависимости от дискретности рассмотрения моделируемых процессов алгоритм может модифицироваться. Алгоритм был апробирован при моделировании динамики фитомассы сообщества сныти обыкновенной (*Aegopodium podagraria* L.), доминирующего вида травянистого покрова в снытевой дубраве на темно-серой лесной почве. С использованием модели ECOGRASS проведены численные эксперименты по изучению потенциального влияния глобального изменения климата и поедания фитомассы животными на продуктивность данного сообщества. Определены пороговые значения факторов влияния, по достижении которых нарушается нормальное функционирование сообщества.

**Ключевые слова:** углеродный баланс, травянистые сообщества, математическое моделирование, глобальное изменение климата.

### Введение

Исследования по оценке запасов углерода органического вещества в различных экосистемах, в том числе и с травянистыми сообществами в их составе, и интенсивности его потоков между компонентами сообществ с использованием информационно-вычислительных технологий ведутся уже на протяжении достаточно долгого времени. Создаются информационные ресурсы по данной тематике в виде специализированных баз данных и систем оценки и прогноза запасов углерода [4, 16]. На первых этапах этих исследований предлагались концептуально-балансовые и математические модели многолетней динамики углерода с шагом по времени в 1 год, которые в компактной форме описывают его поведение в экосистемах [1, 15, 17]. Однако травянистые сообщества являются очень динамичным типом наземных систем, процессы, протекающие в них, подвержены воздействию факторов с выраженной сезонной ритмикой. Это обуславливает специфику математических моделей поведения химических элементов в таких экосистемах. Модели многолетней динамики экосистем, которые оперируют с усредненными для года характеристиками (запасами и потоками), зачастую не могут обеспечить адекватное воспроизведение функционирования объекта моделирования в случае каких-либо экстремальных климатических или антропогенных воздействий.

Как мы уже отмечали ранее [9], методология создания имитационных моделей сезонной (внутригодовой) динамики органического вещества в растительном и почвенном покрове экосистем имеет значительные отличия от методологии создания моделей многолетней динамики. В первую очередь, в этом случае приходится учитывать сезонную специфику изменчивости состояния моделируемой системы, что обуславливает неоднозначность ее ответа на воздействие каких-либо факторов в зависимости от времени данного воздействия. Например, выпадение дополнительного количества осадков летом будет иметь совсем другой эффект для экосистемы, чем такое же событие зимой. При построении моделей внутригодовой динамики определение и формализацию потоков между компонентами необходимо осуществлять с учетом сезонной специфики протекания внутрисистемных процессов. Отметим также, что важно выделить факторы, оказывающие влияние именно на те процессы, интенсивность, а зачастую и направленность которых существенно меняется в течение года. Известно, что существуют естественные регуляторы, контролируемые прохождением растениями их ежегодного цикла. В первую очередь, к ним можно отнести длину дня. Это ярко иллюстрируется явлением фотопериодизма как реакции растений на изменение длины дня. В регионах со сменой времен года ритмика вегетации растений синхронизирована с ходом метеорологических условий, в основном

с температурой воздуха. Для засушливых территорий еще одним важным регулятором жизнедеятельности растительного покрова являются выпадение атмосферных осадков и связанная с этим влажность почвы. Без учета этих факторов невозможно адекватное отражение функционирования фитоценозов с помощью модели.

На первых этапах применения имитационного моделирования для исследования поведения углерода в наземных экосистемах использовались модели многолетней динамики, поскольку они имели более простые алгоритмы и их было проще реализовать на базе имевшейся тогда вычислительной техники. Затем объектами моделирования уже сезонной (внутригодовой) динамики стали травяные экосистемы, как более простые по своей структуре и функционированию [12, 21, 27]. Примером наиболее совершенной для того времени модели такого типа, на наш взгляд, можно назвать разработку Т.Г. Гильманова [3]. Следующим этапом стало создание моделей экосистем не только с травянистым, но и с древесным ярусом, более сложных по структуре и функционированию [8, 13, 18, 22, 24, 26]. В настоящее время модели динамики органического вещества в наземных экосистемах, включающих травянистый ярус, используются в различных экологических исследованиях, например для изучения взаимодействия различных сообществ растений в организации структуры растительного покрова, а также влияния выпаса, пожаров и изменения глобального климата [19, 20, 23, 25, 28].

Интерес к моделированию динамики углерода в травянистых сообществах сейчас повысился как в плане продолжения исследования и оценки скорости биологического круговорота углерода, влияния на него глобального потепления и роли растений в депонировании углерода, так и в связи с тем, что органическое вещество в экосистемах выступает в качестве физического носителя различных загрязнителей, например радионуклидов. Следует также учесть, что травяные фитоценозы, в отличие от фитоценозов с древесным ярусом, более быстро реагируют на изменение климата, наблюдающееся в настоящее время. Это делает актуальным модернизацию имеющихся и разработку новых, универсальных алгоритмов отображения динамики фитомассы в травянистых сообществах в различных условиях и их реализацию в современных средах программирования. Нами предлагается следующий алгоритм описания поведения посуточной динамики углерода органического вещества в травянистых сообществах различных типов, как доминирующих в экосистемах, так и формирующих подчиненный ярус. Алгоритм был апробирован при построении локализованной версии модели EcoGrass, воспроизводящей динамику углерода в почве и растительном покрове травянистого сообщества, типичного

для экосистем Центральной Черноземной области Российской Федерации.

## Материалы и методы

**Общее описание модели.** Модель EcoGrass является детерминированной с элементами стохастичности и точечной, т.е. изменение переменных состояния зависит только от времени. Размерность переменных —  $гС \cdot м^{-2}$ , шаг по времени  $t$  в данной версии модели — 1 час.

Базовая версия модели состоит из шести блоков: «Климат», «Метео», «Гидрологический», «Температурный», «Фитомасса», «Углерод почвы». Исходная схема взаимодействия блоков приведена в монографии С.В. Мамихина [9]. После модернизации алгоритма появилась возможность подключения дополнительных блоков, в частности модуля «Выедание», в котором воспроизводится потребление фитомассы травоядными животными или насекомыми.

**Переменные модели.** Выбор переменных состояния продиктован как спецификой объекта моделирования, так и уровнем наших знаний о функционировании объекта. В модели задействованы следующие переменные состояния динамики углерода (все в  $гС \cdot м^{-2}$ ):  $Y_1$  — распределительный пул ассимилятов;  $Y_2$  — надземная (зеленая) фитомасса;  $Y_3$  — корневища;  $Y_4$  — корни. Из-за отсутствия прямых данных по сезонной динамике ассимилятов в органах растений пришлось ограничиться введением пула ассимилятов, играющего роль распределителя, а не резервуара углерода.

Входные переменные модели содержат необходимую для работы исходную информацию. Это среднемесячные:  $V_1$  — температура воздуха ( $^{\circ}C$ );  $V_2$  — относительная влажность воздуха (%);  $V_3$  — облачность (баллы);  $V_4$  — скорость ветра ( $м \cdot сек^{-1}$ );  $V_6$  — температура почвы на глубине 2 м ( $^{\circ}C$ ); и  $V_5$  — месячная сумма осадков ( $см \cdot мес^{-1}$ ).

Также в модели используются вспомогательные переменные, значения которых рассчитываются в соответствующих блоках на основании значений входных переменных:  $tf$  — фенологическое время (сутки);  $w_i$  — объемная влажность горизонтов почвы ( $см^3 H_2O / см^3$  почвы);  $w_0$  — влагозапас в корнеобитаемом слое почвы (см);  $tp_i$  — температура горизонтов почвы ( $^{\circ}C$ );  $Q'$  — среднесуточная температура воздуха ( $^{\circ}C$ );  $h$  — среднесуточная относительная влажность воздуха (%);  $c$  — среднесуточная облачность (баллы);  $u$  — среднесуточная скорость ветра ( $м \cdot сек^{-1}$ );  $p'$  — суточная сумма осадков ( $см \cdot сут^{-1}$ );  $Q$  — температура воздуха для данного часа ( $^{\circ}C$ );  $q$  — интенсивность солнечной радиации ( $кал \cdot см^{-2} \cdot ч^{-1}$ );  $p$  — сумма осадков за час ( $см \cdot ч^{-1}$ ).

Дополнительно для учета влияния факторов температуры и влажности в уравнениях функций переноса в модель введены вспомогательные переменные  $BELL(a, b, c, d, e)$  и  $SIG(a, b, c)$  соответствен-

но. Первая переменная, заданная кривой Пирсона I рода:

$$BELL = ((a - b)(c - b)^{-1})^e ((a - d)(c - d)^{-1})^{e((d - c)(c - b))},$$

описывает асимметричную колоколообразную зависимость процесса от величины аргумента  $a$  и равна 0 при  $a \leq b$ ,  $a \geq d$ , принимая максимальное значение 1 при  $a = c$ . Аргумент  $e$  отвечает за ширину колокола, чем меньше его величина, тем шире колокол. Вторая переменная, заданная формулой:

$$SIG = (a - b)^2((c - b)2^{-1} - b)^2 + (a - b)^2)^{-1},$$

возрастает от 0 при  $a \leq b$  до 1 при  $a \geq c$  и имеет S-образную форму.

*Воспроизведение метеорологических и климатических показателей.* Входные данные, задаваемые переменными  $V_1, \dots, V_6$ , используются в блоке «Климат» для генерирования необходимых суточных показателей с помощью стохастического генератора, а также вероятностных закономерностей, выявленных нами по данным метеостанций для выпадения осадков в ЦЧО РФ. Считая выпадение осадков марковской цепью испытаний с двумя исходами, мы получили переходную матрицу для каждого месяца. С использованием этой матрицы в начале каждого года определяются дни с осадками и без них, для каждого месяца осадки распределяются случайным образом по дням с осадками.

В блоке «Метео» для каждого часа вычисляются значения солнечной радиации и температуры воздуха. Здесь же рассчитывается «фенологическое» время. Переменная «фенологического» времени  $tf$  показывает, на какой стадии годового фенологического цикла, характеризуемой количеством феносуток с начала года, находится дубрава, что необходимо для учета влияния фенологических стадий состояния растений на перераспределение ассимилятов и другие процессы жизнедеятельности. Для всех стадий принято, что в первое полугодие повышенная по сравнению со среднемесячной многолетней температура воздуха ускоряет прохождение растением фенологического цикла, а во второе — замедляет (с коэффициентом 0,05).

В блоках «Гидрологический» и «Температурный» рассчитываются для каждого часа влажность и температура горизонтов почвы соответственно.

Также по горизонтам почвы рассчитывается динамика запасов мортмассы и гумуса. Мы рассматриваем динамику двух частей гумуса, названных условно лабильная и стабильная. В первую часть включены неспецифические соединения и новообразованные гумусовые кислоты, а во вторую — зрелые гумусовые кислоты, гумин.

Аналитическая структура блока модели «Фитомасса», воспроизводящего сезонную динамику углерода органического вещества в компонентах фитоценоза, выражена системой конечно-разностных уравнений, написанных для каждой переменной состояния:

$$\Delta Y_1 = p_{01} + p_{31} - p_{12} - p_{13} - p_{14}$$

$$\Delta Y_2 = p_{12} - p_{20} - d_{16}$$

$$\Delta Y_3 = p_{13} - p_{30} - p_{31} - d_{17}$$

$$\Delta Y_4 = p_{14} - p_{40} - d_{18}$$

Наблюдаемый фотосинтез рассчитывается в модели с учетом самозатенения листьев растений, влияния температуры воздуха и влажности корнеобитаемого горизонта почвы:

$$p_{01} = (a_2(SR - a_3))(2a_2(a_5 - a_2) + (SR - a_3))^{-1} \times \\ \times CL \text{ bell}(HT, a_8, a_9, a_{10}) \text{ sig}((w_0, a_{12}, a_{14}) Y_2,$$

где  $CL = e^{-Li}$ , а  $Li = a_7 Y_2$ .

Расшифровка параметров уравнения приведена ниже в табл. 2.

Для учета влияния температуры окружающей среды на ночное дыхание зеленой фитомассы и дыхания корней, корневищ и генеративных органов используется функция вида:  $ET(a, b, c) = e^{(a(b - c))}$ .

Распределение ассимилятов из распределительного пула (переменная  $Y_i$ ) происходит сразу после их поступления в пул согласно коэффициентам распределения, ранжированным по фенологическим фазам (табл. 1) в соответствии с «фенологическим» временем  $tf$ , поэтому пул всегда пуст.

Подробное описание алгоритма до его модернизации приведено в монографии С.В. Мамихина [9]. Внесенные позже изменения коснулись в первую очередь практической реализации алгоритма в виде имитационной модели травянистого сообщества при его универсализации и адаптации к современному программному обеспечению и новым задачам исследований. В частности, модель в настоящее время позволяет получить реальные величины потоков углерода в различных сообществах за год путем суммирования их почасовых значений, рассчитывать продукционные характеристики, проводить численные эксперименты по изучению биологического круговорота углерода в различных условиях, в том числе при климатических изменениях, антропогенном воздействии, интродукции других видов растительности в существующее сообщество.

**Практическое применение алгоритма.** Алгоритм был апробирован при моделировании динамики фитомассы сообщества сныти обыкновенной (*Aegopodium podagraria* L.), доминирующего вида травянистого покрова в снытевой дубраве на темно-серой лесной почве. Растение характеризуется широким ареалом распространения, большой продолжительностью жизненного цикла, поверхностным расположением корневой системы, наличием многолетних подземных органов — корневищ, несколькими генерациями листьев [14]. Отсюда и специфика формализованного описания функционирования данного растительного сообщества.

При расчете величины наблюдаемого фотосинтеза для сныти учитывается влияние на интенсивность фотосинтеза влажности только верхнего

Таблица 1  
Фенологические фазы и коэффициенты функций переноса для сныти обыкновенной

Фенологические фазы:	Номер суток	Коэффициенты функций переноса			
		V12	V13	V14	V31
Начало года	0	0	1	0	0
Начало вегетации	110	0,57	0,17	0,25	0,0008
Максимум зеленой фитомассы	181	0,35	0,1	0,55	0
Конец вегетации	280	0	1	0	0

Таблица 2  
Параметры блока «Фитомасса»

	Численное значение	Размерность	Смысловое значение	Источник
$a_2$	0,041	$г г^{-1} ч^{-1}$	максимальная наблюдаемая интенсивность фотосинтеза	[10]
$a_3$	0,01	$кал см^{-2} ч^{-1}$	солнечная радиация, инициирующая фотосинтез	расчет
$a_5$	0,5	$кал см^{-2} ч^{-1}$	солнечная радиация, при которой достигается 50% максимальной интенсивности фотосинтеза	[6]
$a_7$	0,015	безразмерный	коэффициент ослабления интенсивности солнечной радиации надземной фитомассой	расчет
температура воздуха				
$a_8$	0	$^{\circ}C$	минимальная для фотосинтеза	[6]
$a_9$	20	$^{\circ}C$	оптимальная	[6]
$a_{10}$	40	$^{\circ}C$	максимальная	[6]
$a_{11}$	30	См	влажность завядания (для 2 м)	[2, 5]
$a_{12}$	0,09	$см^3 см^{-3}$	—»— (для A'1)	[2, 5]
$a_{13}$	70	См	наименьшая полевая влагоемкость (для 2 м)	[2, 5]
$a_{14}$	0,44	$см^3 см^{-3}$	—»— (для A'1)	[2, 5]
$a_{17}$	0,0027	$г г^{-1} ч^{-1}$	расход листьев на дыхание при $20^{\circ}C$	[6]
коэффициенты дыхания				
$a_{18}$	0,07	безразмерный	температурный	[6]
$a_{23}$	0,00007	$г г^{-1} ч^{-1}$	корневищ	расчет
$a_{24}$	0,0004	$г г^{-1} ч^{-1}$	корней	расчет
коэффициенты отмирания				
$a_{27}$	0,005	$г г^{-1} ч^{-1}$	зеленой фитомассы	расчет
$a_{32}$	0,000047	$г г^{-1} ч^{-1}$	корневищ	расчет
$a_{33}$	0,001	$г г^{-1} ч^{-1}$	корней	расчет

горизонта почвы, в котором располагаются корни растений.

Дыхание структурных частей растений записывается следующим образом (в качестве примера рассмотрим дыхание корней):

$$f_{60} = a_{24} ET(0,007, t_{s1}, 10) Y_d$$

где  $t_{s1}$  — средняя температура корнеобитаемого слоя почвы.

Отмирание зеленой фитомассы после окончания вегетации описывается уравнением:

$$d_{16} = 0,005 (tf - 260) Y_2.$$

Принято, что отток ассимилятов из корневищ в распределительный пул происходит при  $Y_2 < 5 гС \cdot м^{-2}$ .

Параметры, входящие в функции переноса, представлены в табл. 2. Часть параметров рассчитывалась с помощью самой модели методом итераций (последовательных приближений) по имеющимся полевым и экспериментальным данным, приведенным в литературных источниках.

### Почвенный горизонт.

Проверка работы модели проводилась по данным Ле Чонг Кука 1979 г. [7] о продуктивности снытевого сообщества экосистемы лесостепной дубравы Курской области в 1978 г. (рис. 1). Учитывая различия в расположении сравниваемых сообществ, а также то, что результаты моделирования получены при введении среднесезонных климатических показателей, соответствие их полевым данным можно, по нашему мнению, считать удовлетворительным.

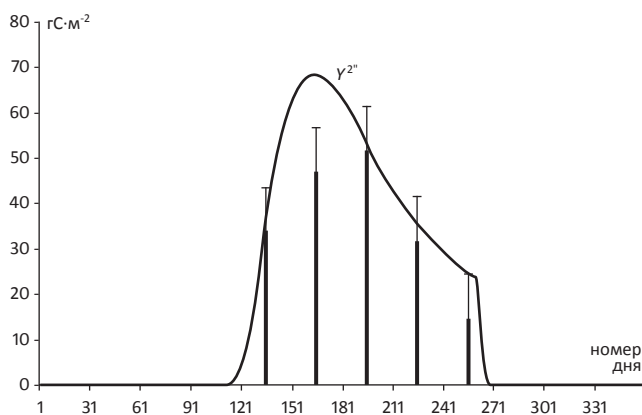


Рис. 1. Проверка работы модели по полевым данным о запасах надземной фитомассы травянистого покрова.

Сплошная кривая — результаты моделирования, столбцы — полевые данные Ле Чонг Кука [7]

**Программная реализация модели.** Модель ECOGRASS реализована в свободно распространяемой кросс-платформенной среде программирования Qb64 (<https://www.qb64.org/portal/>), это позволяет эксплуатировать ее в любой версии операционной системы Microsoft Windows, используемой в настоящее время, начиная с Microsoft

Windows XP, а также в системах Linux и macOS. Результаты моделирования выдаются на экран в текстово-цифровом и графическом виде, также формируется отдельный текстовый файл data\_gr.dat, содержащий данные расчетов в формате csv, удобном для дальнейшей обработки в других программах, например в электронных таблицах или пакетах статистического анализа.

**Результаты исследования**

Результаты расчетов динамики запасов компонентов травянистого сообщества снытевой дубравы, проведенных с использованием модели, представлены на рис. 2.

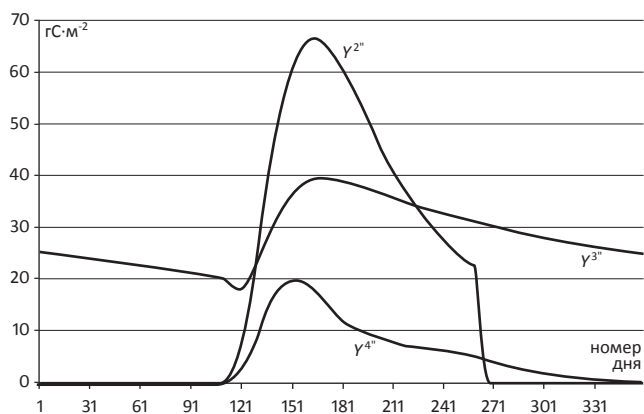


Рис. 2. Воспроизведение моделью ECOGRASS сезонной динамики запасов фитомассы компонентов травостоя.

$Y_2$  — надземная (зеленая) фитомасса,  
 $Y_3$  — корневища,  $Y_4$  — корни

Модель EcoGrass позволяет проводить численные эксперименты по изучению поведения травянистого сообщества *A. podagraria* в различных условиях его функционирования. Нами было исследовано влияние глобального изменения климата и поедания фитомассы животными на продуктивность данного сообщества в экосистеме снытевой дубравы (табл. 3) и определены пороговые значения факторов влияния, по достижении которых нарушается нормальное функционирование сообщества.

Согласно результатам расчетов, у сныти обыкновенной в данном случае снижение фотосинтетической активности растения компенсируется при понижении температуры более быстрым снижением интенсивности дыхания, в то время как при повышении температуры наблюдается противоположная ситуация. Полученные результаты, по нашему мнению, позволяют судить о значительном продукционном потенциале травянистого сообщества сныти обыкновенной в составе экосистемы снытевой дубравы в условиях глобального похолодания. Также они свидетельствуют о том, что данная экосистема располагается достаточно близко к южной границе распространения сныти обыкновенной, что не противоречит данным об ареале произрас-

тания сныти обыкновенной на территории Евразийского материка.

Следует отметить, что в использованном в модели варианте алгоритма температура воздуха помимо прямого воздействия на фотосинтетическую активность растений влияет и на влажность почвы, еще один важный фактор фотосинтетической активности, который также зависит от почасовых значений солнечной радиации, относительной влажности воздуха, количества атмосферных осадков, запаса подстилки, биомассы ассимилирующих органов и сосущих корней.

Также с помощью модели изучалась адаптационная способность травянистого сообщества к поеданию надземной части растений травоядными животными (табл. 3). Результаты показали стимулирующее до определенного уровня воздействие

Таблица 3

**Результаты численных экспериментов по изучению влияния глобального изменения температуры воздуха и поедания фитомассы животными на продукционные возможности экосистемы (г С·м<sup>-2</sup>)**

Изменение средней температуры относительно современного значения (°C)	Фотосинтез	Дыхание	Чистая первичная продукция
-6	168	89	79
-5	176	97	78
-4	178	103	74
-3	185	112	73
-2	188	117	71
-1	199	129	70
0	201	134	67
1	202	139	65
2	213	150	64
3	208	149	60
4	203	149	56
5	207	155	54
Коэффициент выедания (ч <sup>-1</sup> )	Фотосинтез	Дыхание	Чистая первичная продукция
0	201	134	67
0,0005	195	125	70
0,0001	197	124	73
0,0002	190	112	78
0,0004	184	99	85
0,0006	175	87	88
0,0008	164	76	88
0,001	148	65	83
0,002	110	42	65
0,003	79	30	49
0,004	57	22	35

выедания на продуктивность данного травянистого сообщества.

Исследования по изучению адаптационной способности к ослаблению интенсивности солнечной радиации с использованием модели показали, что только при падении этого показателя на 60% начинается снижение продуктивности данного сообщества. Это количественно еще раз характеризует высокую теневыносливость снуги обыкновенной.

Модель использовалась в составе более крупного программного комплекса, модернизированной модели Ecorad\_Oak.

### Обсуждение

Ключевым моментом для обеспечения адекватности алгоритма модели является правило учета воздействия важнейших факторов на рассматриваемые процессы. Это зависит от специфики объекта моделирования. Так, например, в пустынной экосистеме, характеризующейся резкими внутрисуточными колебаниями температуры и практически постоянным дефицитом почвы, адекватным будет алгоритм, реализованный согласно «закону минимума» Либиха. Значения вспомогательной функции отклика, входящей в функции переноса, должны рассчитываться по значению того фактора, который будет меньше по отношению к своему оптимуму, а значения других факторов игнорироваться. Для экосистем умеренной полосы с более мягким по сравнению с пустыней климатом адекватным будет подход по Митчерлиху, основанный на учете сочетанного воздействия факторов на рассматриваемые процессы.

Расширение функциональности модели предлагается осуществлять подключением дополнительных модулей. Так, для оценки влияния выпаса сельскохозяйственных животных на продуктивность травянистого сообщества пастбищной экосистемы в модели может быть задействован дополнительный блок «Выедание», входными переменными для которого являются запасы зеленой фитомассы и показатель, характеризующий интенсивность ее потребления, например количество голов выпасаемых животных на единицу площади, регулируемое человеком CG (cattle grazing). В блоке рассчитываются функции выедания фитомассы, а также количество ежедневно выделяемых животными экскрементов, для учета поступления органического вещества в почву. Логично предполагать, что в отсутствие естественного корма, например зимой, скот обеспечивается комбикормами. При практическом применении модели необходима конкретизация параметров блока. Это может осуществляться следующим образом. Для примера предположим, что рассматриваемое травянистое сообщество используется для выпаса овец. Принимаем, что потребность одной овцы среднего веса в корме равна 2,5; 2,0; 1,8;

1,7 кг сухого вещества в день весной, летом, осенью и зимой соответственно [11]. Пусть критическое количество зеленой фитомассы, недоступное для овец, составляет 1 г сухого вещества на м<sup>2</sup>. Затем, используя метод итераций, можно определить с помощью модели количество выпасаемых животных, которое не будет вызывать деградации пастбища, сформированного рассматриваемым травянистым сообществом, при различных режимах выпаса.

Также функциональность модели можно расширить введением учета влияния дополнительных факторов, играющих важную роль в определенных ситуациях. Для травянистых сообществ, в первую очередь агроценозов, такими факторами могут быть истощение почв, снижение в них содержания минеральных элементов, необходимых растениям, или изменение физических свойств почв при избыточной рекреации.

Отметим, что при расчете баланса углерода в экосистемах используют, как правило, некие фиксированные показатели. Например, продукцию травянистых сообществ определяют обычно по максимальной биомассе, что не учитывает дополнительные генерации органов растений в течение вегетационного сезона. Построенная по предлагаемому алгоритму модель EcoGrass позволяет рассчитывать фактическую продукцию.

### Заключение

Модель построена по блочному принципу. Алгоритм позволяет встраивать дополнительные модули, что расширяет функциональность моделей. Так, в представленной версии модуль «Фитомасса» отображает динамику запасов фитомассы травостоя в целом или одного конкретного вида. При необходимости этот модуль может клонироваться в зависимости от количества (N) рассматриваемых видов травянистых растений — «Фитомасса1», ..., «ФитомассаN», что позволяет учитывать и конкурентные отношения между видами растений, входящих в состав фитоценоза.

Необходимым условием, обеспечивающим возможность использования модели в представленном варианте, является наличие информации по параметрам функционирования растений, таким как максимальная наблюдаемая интенсивность фотосинтеза, солнечная радиация, при которой достигается 50% максимальной интенсивности фотосинтеза, влажность завядания и т.д.

В зависимости от дискретности рассмотрения моделируемых процессов алгоритм может модифицироваться. Например, при недостатке информации по динамике водного режима соответствующих почв можно использовать регрессионные уравнения или даже табличные данные.

Модель предназначена для работы в автономном режиме или в составе более крупных программных комплексов.

Модели, построенные на предлагаемом алгоритме, применимы для изучения и прогнозирования поведения углерода органического вещества в травянистых сообществах в различных ситуациях, в том числе при глобальном изменении климата или негативном антропогенном воздействии (например, при нерациональном ведении сельского хозяйства, техногенном загрязнении или избыточной рекреации).

### Информация о финансировании работы

Исследование проводилось в рамках НИОКТР № АААА-А21-121012290189-8, выполняемой по государственному заданию, при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды».

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Базилевич Н.И., Гребенников О.С., Тишков А.А.* Географические закономерности структуры и функционирования экосистем. М., 1986.
2. *Васильева И.Н.* Материалы к характеристике физических свойств почв Теллермановского опытного лесничества // Труды Ин-та леса АН СССР. 1954. Т. 15.
3. *Гильманов Т.Г.* Математическое моделирование биогеохимических циклов в травяных экосистемах. М., 1978.
4. *Замолодчиков Д.Г.* Системы оценки и прогноза запасов углерода в лесных экосистемах // Устойчивое лесопользование. 2011. № 4 (29).
5. *Зонн С.В.* Почвенная влага и лесные насаждения. М., 1959.
6. *Лахер В.* Экология растений. М., 1978.
7. *Ле Чонг Кук.* Структура и продуктивность травяного покрова в снытевой дубраве // Бюл. МОИП. 1979. № 3.
8. *Мамихин С.В.* Математическое моделирование сезонной и многолетней динамики углерода органического вещества в системе атмосфера — растение — почва: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 1987.
9. *Мамихин С.В.* Динамика углерода органического вещества и радионуклидов в наземных экосистемах (имитационное моделирование и применение информационных технологий). М., 2003.
10. *Митина М.Б.* Об ассимиляционной деятельности доминантов сезонных синузий в снытевой дубраве лесостепной зоны // Механизмы взаимодействия растений в биогеоценозах тайги. Л., 1969.
11. *Николаев В.В.* Природные кормовые ресурсы Туркменистана. Ашхаба, 1972.
12. *Новочихин Е.П.* Управление биогеохимическими циклами // Вопросы кибернетики. М., 1981.
13. *Сидорович Е.А., Гильманов Т.Г., Честных О.В.* Опыт построения математической модели продукционного процесса экосистемы ельника-кисличника // Доклады АН БССР. 1986. Т. 30, № 11.
14. *Смирнова О.В.* Снять обыкновенная // Биологическая флора Московской области / Под ред. Т.А. Работнова. М., 1974.
15. *Тарко А.М.* Математическое моделирование глобального биогеохимического цикла углерода // Математические модели в экологии и генетике. М., 1981.
16. *Титлянова А.А., Кудряшова С.Я., Косых Н.П. и др.* Базы данных «Органический углерод» и «Запасы растительного вещества в экосистемах Сибири» как средство оценки углеродного баланса, его моделирования и прогнозирования на геоинформационной основе // Вычислительные технологии. 2007. Т. 12, спец. вып. 2.
17. *Тихомиров Ф.А., Мамихин С.В.* Математическая модель миграции C-14 в лиственных лесах на дерново-подзолистых почвах // Экология. 1983. № 3.
18. *Четвериков А.Н.* Моделирование лесных биогеоценозов // Математическое моделирование биогеоценологических процессов. М., 1985.
19. *Gilada E., von Hardenberg J., Provenzale A. et al.* Mathematical model of plants as ecosystem engineers // Journal of Theoretical Biology. 2007. Vol. 244.
20. *Hoyer-Leitzel A., Iams S.* Impulsive fire disturbance in a Savanna Model: tree-grass coexistence states, multiple stable system states, and resilience // Bulletin of Mathematical Biology. 2021. Vol. 83, № 1.
21. *Innis G.S. (ed.).* Grassland simulation model. N.Y., 1978. (Ecol. Stud.; Vol. 26).
22. *Komarov A.S., Chertov O.G., Zudin S.L. et al.* EFIMOD 2 — A model of growth and elements cycling of boreal forest ecosystems // Ecol. Modelling. 2003. Vol. 170.
23. *Lazzarotto P., Calanca P., Fuhrer J.* Dynamics of grass-clover mixtures — An analysis of the response to management with the PROductive GRASSland Simulator (PROGRASS) // Ecol. Modelling. 2009. Vol. 220.
24. *Levine E.R., Ranson K.J., Smith J.A. et al.* Forest ecosystem dynamics: linking forest succession, soil process and radiation models // Ecol. Modelling. 1993. Vol. 65.
25. *Moulina T., Perasso A., Gillet F.* Modelling vegetation dynamics in managed grasslands: responses to drivers depend on species richness // Ecol. Modelling. 2018. Vol. 374.
26. *Satchell J.E.* Biomass model of mixed oak forest, United Kingdom // Modeling forest ecosystems. Oak Ridge, TN, 1973.
27. *Shiyomi M.* Grassland Management Models // Japan Agricultural Research Quarterly. 1988. Vol. 22, № 3.
28. *Yatat V., Dumont Y., Tewa J. et al.* Mathematical analysis of a size structured tree-grass competition model for Savanna ecosystems // Biomath. 2014. Vol. 3, № 1.

Поступила в редакцию 15.03.2022

После доработки 28.04.2022

Принята к публикации 23.05.2022

## SIMULATION MODEL OF HOURLY DYNAMICS OF ORGANIC MATTER CARBON IN HERBACEOUS VEGETATION COMMUNITIES ECOGRASS

**S. V. Mamikhin, W. M. Badawy, D. N. Lipatov, D. V. Manakhov,  
T. A. Paramonova, V. V. Stolbova, A. I. Shcheglov**

An algorithm has been developed for the simulation model of carbon behavior in herbaceous communities of various types, both autonomous and being a part of complex phytocenoses. The influence of external factors is taken into account such as solar radiation, precipitation, air temperature, clouds, wind speed, etc. The dynamics of soil humidity and temperature are reproduced. Depending on the discreteness of consideration of the simulated processes, the algorithm can be modified. The algorithm was tested in modeling the dynamics of the phytomass of the community of ground elder (*Aegopodium podagraria* L.), the dominant species of herbaceous cover in the elder oak grove on dark gray forest soil. Using the ECOGRASS model, numerical experiments were carried out to study the impact of the potential global climate change and the consumption of phytomass by animals on the productivity of this community. Threshold values of influence factors have been determined, upon reaching which the normal functioning of the community is disrupted.

*Key words:* carbon balance, herbaceous communities, mathematical modeling, global climate change.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Мамихин Сергей Витальевич**, докт. биол. наук, вед. науч. сотр. каф. радиоэкологии и экотоксикологии ф-та почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова,  
e-mail: svmamikhin@mail.ru

**Бадави Ваель Махмуд**, канд. биол. наук, докторант ф-та почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова,  
e-mail: Wael@jinr.ru

**Липатов Денис Николаевич**, канд. биол. наук, ст. преп. каф. радиоэкологии и экотоксикологии ф-та почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова,  
e-mail: dlip@soil.msu.ru

**Манахов Дмитрий Валентинович**, канд. биол. наук, ст. препод. каф. радиоэкологии и экотоксикологии ф-та почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова,  
e-mail: demian2@yandex.ru

**Парамонова Татьяна Александровна**, канд. биол. наук, ст. преп. каф. радиоэкологии и экотоксикологии ф-та почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова,  
e-mail: tparamonova@soil.msu.ru

**Столбова Валерия Владимировна**, канд. биол. наук, ст. преп. каф. радиоэкологии и экотоксикологии ф-та почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова,  
e-mail: vstol@bk.ru

**Щеглов Алексей Иванович**, докт. биол. наук, проф., зав. каф. радиоэкологии и экотоксикологии ф-та почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова,  
e-mail: shchegl@mail.ru