

УДК: 631.417.2:631.82.1

Математическое моделирование процесса дегумификации почв

©2012 Семенова Н.Н.^{1,2*}, Орлова Н.Е.^{1*}

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034, Россия

²Государственное научное учреждение Всероссийский институт защиты растений Российской академии сельскохозяйственных наук, Санкт-Петербург, Пушкин, ш. Подбельского, 3, 196608, Россия

Аннотация. Предлагаются следующие теоретические подходы к моделированию дегумификации окультуренных почв: с использованием простых линейных балансовых соотношений и с учетом эффекта обратных связей в предположении нелинейного характера показателей процессов, определяющих динамику органического вещества почвы. На примере анализа динамики органического вещества дерново-подзолистых почв, различающихся по своему гранулометрическому составу, в условиях низкого уровня агротехники, показаны сильные и слабые стороны этих подходов.

Ключевые слова: органическое вещество почвы (ОВП), математическое моделирование, обратная связь, нелинейность, дегумификация.

ВВЕДЕНИЕ

В математическом описании динамики органического вещества почвы (ОВП) в последней четверти XX века преобладал аппарат современной теории динамических систем (по существу, то же наблюдается и в настоящий момент). В основном это линейные модели разного уровня сложности: от моделей, в которых ОВП рассматривается недифференцировано, до поликомпонентных моделей, описывающих поведение во времени нескольких фракций ОВП, связанных друг с другом балансовыми соотношениями. Эти модели, построенные на предположении о линейности связей между запасами фракций ОВП и скоростями их трансформации, имеют как теоретическую, так и прикладную направленность. Примеры таких моделей можно найти в работах [1–5] и ряда других исследователей. Наибольшую известность приобрели модели, реализованные в виде компьютерных программ: модель ROMUL [6], CENTURY [7], ROTHAMSTED [8]. Все эти модели получили свое развитие и в последнее десятилетие [9,10].

Линейные структурные связи определяют однообразие качественных режимов поведения ОВ в почве. Поэтому особый интерес вызывают нелинейные модели, позволяющие изучать потенциальные режимы функционирования биокосных систем в зависимости от вида связей между их компонентами и окружающей средой, а также на теоретическом уровне исследовать соответствие между математическим и предметным понятием «устойчивости» [11–13]. Нелинейные модели могут применяться и для решения вполне конкретных задач, например, при оценке длительной перспективы использования почв [14].

*agro@bio.pu.ru

Таким образом, вышеописанные подходы приводят к созданию моделей, параметры которых характеризуют структуру и динамические свойства ОВП. При исследовании моделей возможно проведение качественного анализа зависимости решений от параметров уравнений, что позволяет связать характер динамики ОВП с различными свойствами почв [15,16]. Целью предлагаемой работы является определение наиболее адекватного математического описания динамики ОВП с точки зрения интерпретации связей между параметрами модели и реальными процессами дегумификации конкретных почв.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалы

Материалом для проведения исследования послужили многолетние наблюдения за гумусовым состоянием высоко окультуренных дерново-подзолистых почв разного гранулометрического состава Ленинградской области [17–20]. Наблюдения проводили на 2 участках, представленных следующими почвами (общая характеристика почв дана на основании их базовой оценки в начальный период исследований):

1 – дерново-слабоподзолистая супесчаная почва 200-летнего освоения в АСХОЗТ им. Тельмана (бывший с-з им. Тельмана). Длительное и интенсивное окультуривание почвы, постоянное внесение высоких доз удобрений и извести привели к формированию мощного гумусового горизонта глубиной 60 см с хорошей мелкокомковатой структурой и высоким содержанием гумуса. Детальные исследования содержания, состава и свойств гумуса этой дерново-подзолистой почвы были начаты В. В. Пономаревой и ее сотрудниками в 1973 году. Постоянные наблюдения на этом объекте проводили в течение последующих 25 лет и далее до 2005 года включительно. Сущность процессов гумусообразования и характерные особенности ее органического вещества изучены весьма подробно и обстоятельно [21]. В период наблюдений почва использовалась в овощекормовых севооборотах, ежегодные дозы органических удобрений до 1991 года составляли 12–15 т/га, с 1991 по 1995 год количество вносимых в почву органических удобрений было снижено вдвое, а с 1996 года они вообще не вносились.

Мощность гумусового горизонта 60 см; содержание физической глины – 13%; гумуса – 5.5%; $pH_{\text{водн.}}$ – 6.6; $pH_{\text{сол.}}$ – 6.0; гидролитическая кислотность (H_2) – 3.2 мг-экв/100 г почвы; сумма обменных оснований (S) – 11.2 мг-экв/100 г почвы; степень насыщенности почвы основаниями (V) – 80%.

2 – дерново-слабоподзолистая среднесуглинистая глееватая почва расположена на участке, принадлежащем Ломоносовской птицефабрике (бывшие опытные поля СевНИИГиМ). Наблюдения проводили с 1987 по 2009 год. Почва находится в сельскохозяйственном производстве более 100 лет, в течение длительного срока (20 лет) используется в качестве улучшенного сенокоса (выращиваемая культура – многолетние травы). Органические удобрения вносили в почву при подсевах семян трав в дозах 7–10 т/га. С 1994 года в почву не вносили ни минеральных, ни органических удобрений.

Мощность гумусового горизонта 37 см; содержание физической глины – 36%; гумуса – 4.8%, $pH_{\text{водн.}}$ – 6.9, $pH_{\text{сол.}}$ – 6.3; H_2 – 2.4 мг-экв/100 г почвы; S – 14.9 мг-экв/100 г почвы; V – 86%.

Таким образом, экспериментальный материал, на котором были апробированы модели, составляют наблюдения за гумусовым состоянием дерново-подзолистых суглинистой и супесчаной агрогенных почв Ленинградской области, проводившиеся в течение 22 и 32 лет с периодичностью обследования от 1 года до 5 лет.

Используемые модели

Анализ различий в изменениях гумусового состояния дерново-подзолистых суглинистой и супесчаной агрогенных почв Ленинградской области, выявленный в результате обследований (табл. 1), производился на основе разработанных моделей, относящихся соответственно использованному математическому аппарату к линейным (ЛМ) и нелинейным (НЛМ) моделям. Как уже было отмечено выше, линейные модели построены на предположении о линейности связей между запасами групп и фракций ОВ и скоростями их трансформации. В нашей модели такие линейные связи аппроксимируются константами в период стабильного внесения удобрений и функциями времени при прекращении их внесения, а их параметризация осуществляется на основе экспериментального материала за периоды: 1970-ые годы – 1990 (стабильное внесение); 1990–2009 (снижение и прекращение внесения удобрений).

Таблица 1. Потери гумуса групп гумусовых веществ (ГВ) в процессе дегумификации дерново-подзолистых почв

Дерново-подзолистая суглинистая почва	Показатель гумусового состояния	Периоды наблюдений		
		1991–2000 гг.	2000–2009гг	1991–2009гг
	Гумус	0.94/20	0.40/11	1.34/28
	Гуминовые кислоты (НА)	0.15/25	0.06/8	0.21/24
	Фульвокислоты (ФА)	0.04/5	0.06/8	0.10/13
	Нерастворимый остаток (ИР)	0.34/29	–	0.32/28
Дерново-подзолистая супесчаная почва	Показатель гумусового состояния	Периоды наблюдений		
		1991–2000гг	2000–2005гг	1991–2005гг
	Гумус	1.34/26	0.19/5	1.53/29
	НА	0.35/31	0.04/5	0.39/34
	ФА	0.02/3	0.02/3	0.04/5
	ИР	0.43/37	0.04/5	0.47/40

* – над чертой – % к почве, относительно начала периода;

** – под чертой – % к исходному содержанию общего углерода в почве, относительно начала периода.

В качестве базовой модели рассмотрим простую двухкомпонентную модель (блок-схема модели, рис. 1), в которой органическое вещество подразделяется на две составляющие – свежее органическое вещество (C) и специфическое органическое вещество (гумусовые вещества) – (H):

$$\begin{cases} \frac{dC}{dt} = L(t) - (k_1 + k_2)C, & C(0) = C_0, \\ \frac{dH}{dt} = k_1C - k_3H, & H(0) = H_0, \end{cases}$$

$$L(t) = L_0(t) + L_p(t), \quad (1)$$

$$L_0(t) = 0; \quad t \geq T,$$

здесь k_i – кинетические константы минерализации и дегумификации (1/год); $L(t)$ – функция, описывающая поступление в почву ОВ антропогенного (удобрения, $L_0(t)$) и природного происхождения ($L_p(t)$, т/(га год)); C_0, H_0 – начальные данные; T – момент времени, начиная с которого органические удобрения перестают вносить.

О.Г. Чертовым [3] при дальнейшей детализации описания процессов минерализации и гумификации лесного опада и подстилки была предложена подобная динамическая модель, явившаяся одной из первых в моделировании динамики органического вещества в лесных почвах. В зарубежных публикациях аналогичная схема была использована в модели ICBM (Introductory: Carbon Balance Model). Несмотря на то, что в модели дано крайне упрощенное представление процессов, происходящих в почве, на ее основе был получен достаточно адекватный прогноз динамики органического углерода различных почв, включая пахотные, в связи с климатическими изменениями, обработкой почв и применением удобрений [22].

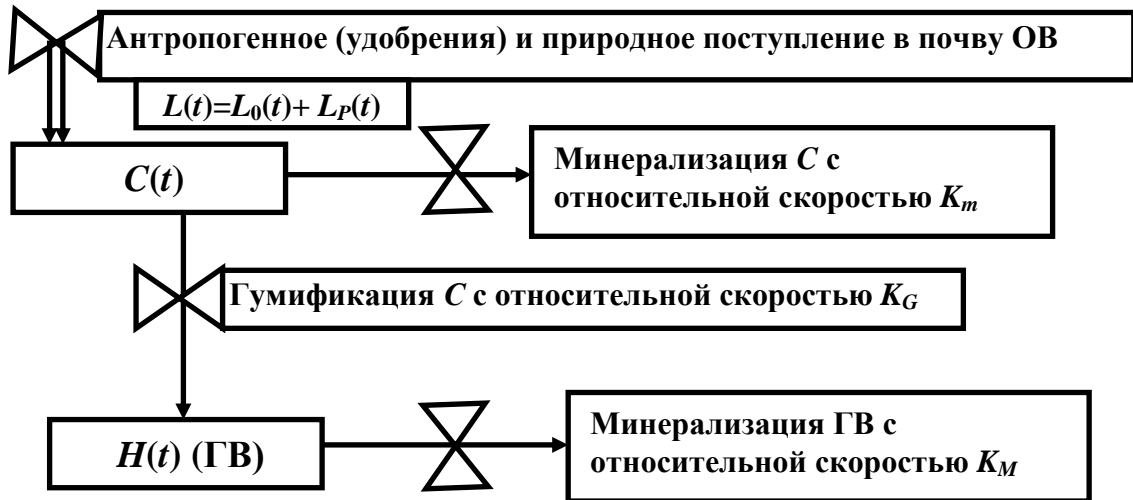


Рис.1. Схема, используемая для построения линейной модели (ЛМ).

Модификация модели (1) была нами произведена на основании результатов, полученных при изучении функционирования системы гумусовых веществ высоко окультуренных дерново-подзолистых почв разного гранулометрического состава при снижении уровня агрогенного воздействия [19,20].

Модель описывает поведение во времени групп и фракций гумусовых веществ, связанных друг с другом балансовыми соотношениями:

$$\begin{cases}
 \frac{dC}{dt} = L_0(t) + L_p(t) - (k_1 + k_2)C, & C(0) = C_0, \\
 \frac{dHA_1}{dt} = k_{GHA1}C + k_{21}HA_2 - (k_{12} + k_{MHA1})HA_1, & HA_1(0) = HA_{10}, \\
 \frac{dHA_2}{dt} = k_{12}HA_1 - (k_{21} + k_{MHA2})HA_2, & HA_2(0) = HA_{20}, \\
 \frac{dHA_3}{dt} = k_{GHA3}C - k_{MHA3}HA_3, & HA_3(0) = HA_{30}, \\
 \frac{dFA}{dt} = k_{GFA}C - k_{MFA}FA, & FA(0) = FA_0, \\
 \frac{dIR}{dt} = k_{GIR}C - k_{MIR}IR, & IR(0) = IR_{20}, \\
 k_1 = k_{GHA1} + k_{GHA3} + k_{GFA} + k_{GIR},
 \end{cases} \quad (2)$$

где обозначение первой переменной, то же, что и в уравнении (1); HA_i , $i = 1, 2, 3$ – гуминовые кислоты, соответственно фракций 1–3; FA – фульвокислоты; IR – нерастворимый остаток; HA_{i0} , $i = 1, 2, 3$, FA_0 , IR_0 – начальные данные для компонентов ГВ; k_{Mi} , k_{Gi} , $i = HA_1, HA_2, HA_3, FA, IR$ – кинетические параметры, задающие

относительные скорости процессов минерализации и гумификации различных компонентов гумусовых веществ; k_1 и k_2 – то же для свежего органического вещества.

Кинетические параметры k_{ij} , $i, j = 1, 2$ отражают сезонное перераспределение ОВ между первой и второй фракциями гуминовых кислот, которое наблюдалось в эксперименте [18]. Функция $L_0(t)$ описывает сезонное внесение органических удобрений в апреле – мае месяце, а функция $L_P(t)$ – поступление органического вещества природного происхождения, пик которого приходится на сентябрь и октябрь. Идентификация многочисленных скоростей трансформации и деструкции различных компонентов ГВ достаточно затруднительна и в стабильный период существования агроэкосистемы, а в период дестабилизации задача становится практически невыполнимой. Однако, в силу предположения о линейности связей в рассматриваемой модели динамики ОВП, система уравнений (2) может быть приведена к виду (1) при суммировании последних пяти уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dC}{dt} = L(t) - (K_m + K_G)C, \\ \frac{dH}{dt} = K_G C - (k_{MHA_1} HA_1 + k_{MHA_2} HA_2 + k_{MHA_3} HA_3 + k_{MFA} FA + k_{MIR} IR) = K_G C - K_M H, \\ \sum_1^3 HA_i + FA + IR = H; \quad K_M = \delta_1 k_{MHA_1} + \delta_2 k_{MHA_2} + \delta_3 k_{MHA_3} + \delta_4 k_{MFA} + \delta_5 k_{MIR}, \\ C(0) = C_0; \quad \sum_1^3 HA_{i0} + FA_0 + IR_0 = H_0; \\ HA_i = \delta_i C; \quad i = 1, 2, 3; \quad FA = \delta_4 C; \quad IR = \delta_5 C, \end{cases} \quad (3)$$

где параметры δ_i , $i = 1, \dots, 5$ с соответствующими индексами определяют вклад разных групп гумусовых веществ в общее их содержание. При этом очевидно, что общая скорость деструкции комплекса гумусовых веществ K_M будет меняться при изменении δ_i (что соответствует изменению в соотношении различных форм гумуса) даже при неизменных скоростях разложения отдельных групп, а перераспределение ОВП между фракциями гуминовых кислот в рамках этой модели рассматриваться уже не может. Изменение вклада групп гумусовых веществ, обнаруженное в период ослабления агрогенного воздействия ($L_0(t) = 0$) на дерново-подзолистые высококультурные почвы разного гранулометрического состава, нарушает стабильность функционирования всей системы [23]. Изменение параметров δ_i во времени определялось согласно данным табл. 2, причем вклад гуминовых кислот оценивался по их сумме не дифференцировано [18].

В отличие от периодов относительной стабильности, когда кинетические параметры в моделях, описываемых системами (2) и (3), принимаются равными константам, параметры K_m , K_G (аналог параметров k_1 , k_2 системы (1)), K_M представляются в виде функций, зависящих от времени, и, следовательно, в модели может быть учтен механизм трансформации состава органического вещества. В период стабильного внесения удобрений, т. е. в предположении равенства нулю в среднем за год скоростей трансформации C и H , стационарное состояние природной системы определится как:

$$C^* = \frac{L_0 + L_P}{K_m + K_G}; \quad H^* = C^* \frac{K_G}{K_M}.$$

Таблица 2. Изменения группового состава гумусовых веществ при уменьшении агрогенного воздействия (указаны средние значения за соответствующие периоды наблюдений)

Дерново-подзолистая суглинистая почва	Группы гумусовых веществ	Периоды наблюдений		
		Период высокого уровня агротехники (до 1991г)	Переходной период	
			1991–2000гг	2000–2009гг
<i>HA</i>		0.88/32	0.70/31	0.62/30
<i>FA</i>		0.74/26	0.77/29	0.73/33
<i>IR</i>		1.17/42	0.91/40	0.80/37

Дерново-подзолистая супесчаная почва	Группы гумусовых веществ	Период высокого уровня агротехники (до 1991г)	Переходной период	
			1991–2000гг	2000–2005гг
		<i>HA</i>		1.28/39
<i>FA</i>		0.85/27	0.75/24	0.77/35
<i>IR</i>		1.10/34	0.85/39	0.69/31

* – над чертой % к почве;

** – под чертой % к общему углероду ($C_{общ.э}$)

В нелинейной модели, используя те же обозначения, что и для линейной модели, будем предполагать, что $L_p(t) = qH$, т.е. поступление органических остатков природного происхождения, после прекращения внесения удобрений, обуславливается содержанием гумуса в почве, а q – коэффициент, который зависит от урожайности и биологических особенностей сельскохозяйственных культур, выращиваемых на данной почве (блок-схема модели, рис. 2).

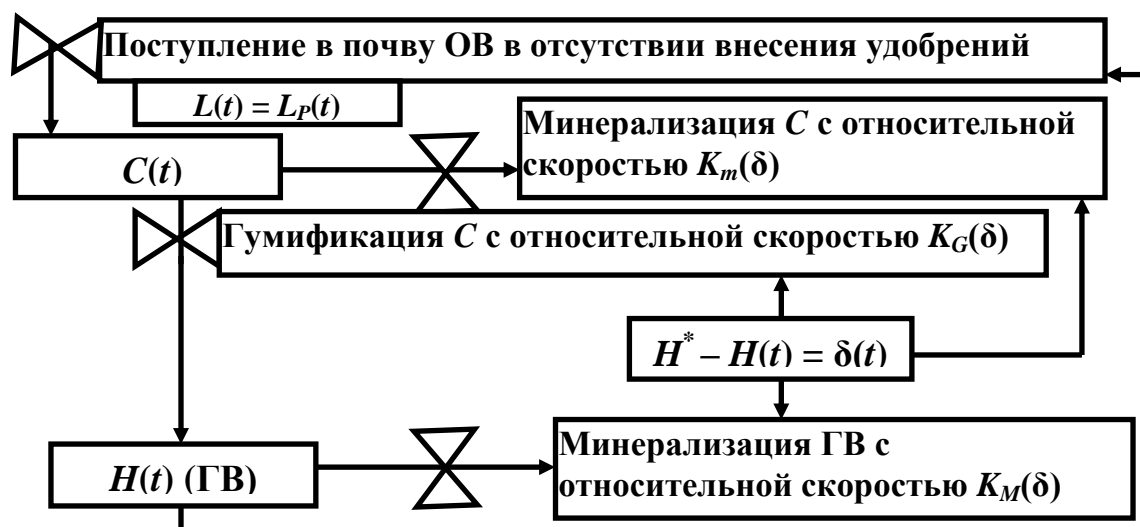
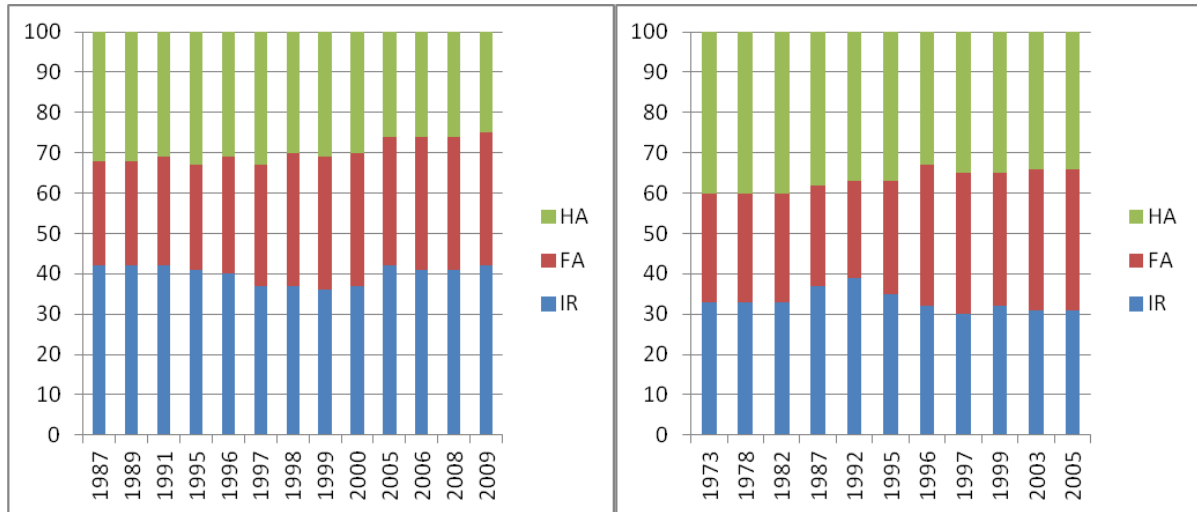


Рис. 2. Схема, используемая для построения нелинейной модели (НЛМ).

На рис. 2 $\delta(t)$ обозначает изменение содержания гумусовых веществ относительно равновесного уровня.

Известно, что при уменьшении запаса органического углерода в почве в результате минерализации будет уменьшаться и доля лабильных органических соединений в составе гумуса, и, следовательно, снизятся относительные потери ОВП. В модели этот механизм, способствующий замедлению процесса дегумификации, отражен как уменьшение относительных скоростей минерализации для периода высокой агротехники на величину, пропорциональную разности между стабильным уровнем содержания гумусовых веществ в почве H^* и текущим его значением H . Будем предполагать, что трансформация свежего органического вещества в специфические

гумусовые вещества также происходит по нелинейному закону, но, в отличие от процессов минерализации, здесь наблюдается эффект насыщения, в результате которого в окрестности равновесного уровня гумусовых веществ скорость преобразования свежего органического материала в гумусовые вещества минимальна [24]. В работе [18] при изучении дегумификации дерново-подзолистых почв Ленинградской области также отмечена тенденция к первоначально более значительным потерям гумуса в почвах и последующему более плавному изменению в его содержании (рис. 3).



Суглинистая почва. Период 1987–2009

Супесчаная почва. Период 1973–2005

Рис. 3. Изменения в групповом составе общего углерода. Динамика *IR*, *FA*, *HA* в составе гумуса хорошо окультуренных дерново-подзолистых почв (состояние на конец вегетационного периода): *IR*, *FA*, *HA* – процент от $C_{общ\ g}$ ($C_{общ\ g} = IR+FA+HA$).

Тогда система уравнений (1) примет вид:

$$\begin{cases} \frac{dC}{dt} = qH - (K_G(1 + g\delta^{s_G}) + K_m(1 - m\delta^{s_m}))C, \\ \frac{dH}{dt} = K_G(1 + g\delta^{s_G})C - K_M(1 - M\delta^{s_M})H, \end{cases} \quad (4)$$

$$C(T) = C^* - \varepsilon_C;$$

$$H(T) = H^* - \varepsilon_H; \quad \delta(t) = |H^* - H(t)|;$$

$$L_p(t) = qH; \quad t \geq T,$$

где обозначения те же, что и для предыдущих систем уравнений, а параметры g , m , M , s_m, s_M, s_G – положительные эмпирические константы, отражающие специфику конкретных почв в процессе перестройки структуры ОВП. При значениях параметров $s_m, s_M, s_G < 1$ процесс дегумификации будет проходить более плавно, чем при их значениях > 1 , т.е. эти параметры характеризуют буферные свойства почвы. Интегрирование производится от момента времени T , когда в почву перестали вносить удобрения, т.е. начальное состояние задается в окрестности стабильного уровня содержания C^* и H^* , а ε_C и ε_H являются малыми отклонениями от равновесного состояния и определяются исходя из эмпирических данных.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ экспериментального материала показал, что в результате уменьшения дозы внесения органических и минеральных удобрений, а затем и полного прекращения их внесения в период экономической перестройки 90-х годов, во всех исследуемых почвах начался процесс дегумификации [17,19]. Супесчаные почвы характеризовались максимальной скоростью этого процесса. При этом наблюдалось изменение состава гумуса и, прежде всего, перераспределение гумусовых веществ между фракциями в сторону снижения устойчивых форм гумуса, как для супесчаной, так и для суглинистой почв.

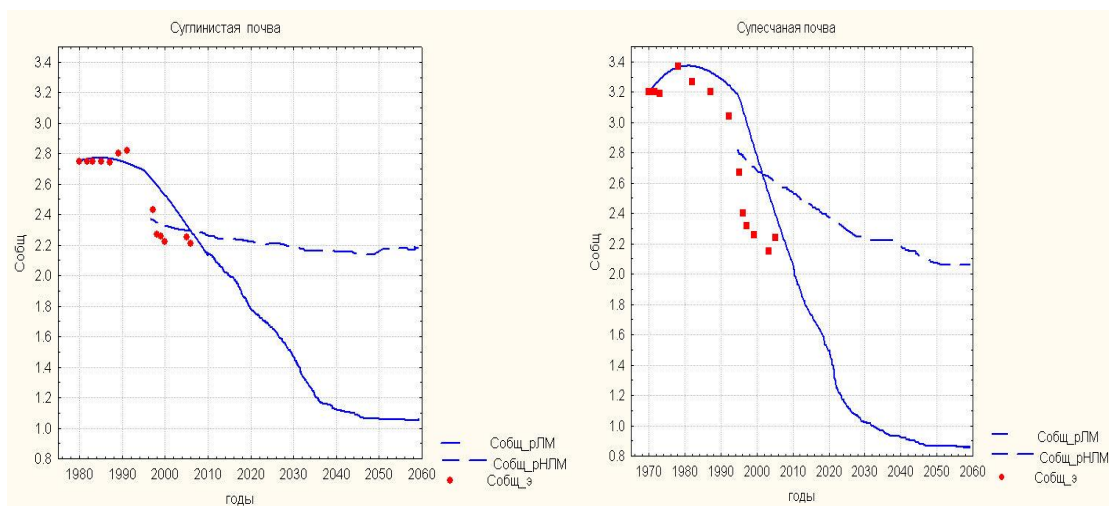


Рис. 4. Соответствие расчетных по моделям и экспериментальных данных для супесчаной и суглинистой дерново-подзолистых почв Ленинградской области.

На рис. 4 показано соответствие результатов вычислений по предложенным моделям ($C_{\text{общ}_p}$ ЛМ и НЛМ соответствуют переменной H в системах уравнений (3) и (4)) и экспериментальным данным ($C_{\text{общ}_э}$). Линейная модель, в отличие от нелинейной, до некоторой степени воспроизводит динамику гумусовых веществ, как для стабильного периода, так и для переходного. Выход на устойчивое состояние равновесия целиком определяется количеством поступающих органических остатков природного происхождения, и никак не связан с уровнем содержания гумуса, достигнутого за период высокой агротехники. Более низкое значение равновесного содержания гумуса для супесчаной почвы, по сравнению с суглинистой, отражает следующий из анализа экспериментальных данных факт поступления в почву органических остатков, в меньшей степени обогащающих почву органическим веществом.

Исследование нелинейной модели, описываемой системой уравнений (4), показывает, что, в отличие от линейной, в зависимости от выполнения некоторых условий на параметры модели, возможно существование двух устойчивых состояний равновесия, т.е. потенциально допустим выход как на тривиальное, так и нетривиальное положительное стационарное состояние. Это означает, что без внесения в течение некоторого времени удобрений процесс дегумификации может иметь крайне негативные последствия. Однако, возможен выход на стационарное состояние, при котором новый уровень содержания гумусовых веществ $H^{**} < H^*$, будет меньше, чем прежний уровень, но сможет обеспечить минимальные потребности роста сельскохозяйственных культур. Причем этот уровень выше, чем предсказанный по линейной модели.

Получены следующие условия (5) существования стабильного ненулевого уровня содержания органического углерода при прекращении внесения удобрений и в

предположении единообразного изменения относительных скоростей гумификации и минерализации (т.е. при $s_m = s_M = s_G$):

$$\alpha = K_m / K_G < 1; \quad (5.1)$$

$$q < (1 + \alpha)K_M; \quad (5.2)$$

$$L_p(t) + L_0(t) > F(\alpha, m, G, M, s_m, s_G, s_M); \quad (5.3)$$

т.е. $\frac{\partial F}{\partial \alpha}(\alpha, m, G, M, s_m, s_G, s_M) > 0$ при $(\alpha \in (0, 1))$;

$$s_m, s_G, s_M - \text{мало отличаются от } 1; \quad (*)$$

$$m < 1, G < 1, M < 1$$

Условие (5.1) означает, что в стабильный период функционирования системы, относительная скорость гумификации должна быть больше относительной скорости минерализации для свежего органического вещества *C*. Из неравенства (5.2) следует, что параметр, характеризующий поступление органических остатков, q , должен быть согласован со всеми тремя скоростями (с относительными скоростями минерализации свежего ОБ и ГВ, а также с относительной скоростью гумификации). Если неравенство не выполняется, то это означает истощение запасов гумуса при выращивании конкретной культуры. Поскольку введена обратная связь, которая актуальна именно в период прекращения внесения удобрений, то, выращиваемая культура должна быть неприхотлива в плане использования запасов гумуса. Эта обратная связь в линейной модели отсутствует, так как в стабильный период решающее значение имеет внесение органических удобрений.

В отличие от первых двух условий, в которые входят ясно интерпретируемые параметры модели, имеющие достаточно прозрачный смысл, проверка условия (5.3) осложняется наличием эмпирических параметров, смысл которых не слишком ясен, а определение основано на данных, соответствующих переходному периоду и, вследствие этого, может содержать значительные погрешности. Можно показать, что выполнение этого условия эквивалентно условию (*): функция F является возрастающей функцией по переменной α при фиксированных остальных переменных, и тогда условие (5.3) означает, что чем меньше преобладание относительной скорости гумификации над относительной скоростью минерализации, тем выше должен быть уровень окультуренности почвы, чтобы избежать негативных последствий при отсутствии поступления в почву удобрений. Таким образом, все три условия связывают существование положительного, нетривиального состояния равновесия в период низкого уровня агротехники с уровнем агротехники в стабильный период.

Для суглинистой и супесчаной дерново-подзолистых почв, описанных выше, произведена проверка условий (5) и получены оценки для функции $L(t)$, при которых не произойдет полного истощения почвы.

Так для суглинистой почвы значение отношения $K_m / K_G \cong 0.11 < 1$, а для супесчаной – $K_m / K_G \cong 0.17 < 1$.

Результаты вычислений по моделям и экспериментальные данные за расчетный период показывают, что для нелинейной модели получено качественное соответствие экспериментальным данным, как для супесчаной, так и для суглинистой почв (рис. 4). Следовательно теоретическое положение об уменьшении относительной скорости процессов минерализации и увеличении скоростей гумификации, лежащее в основе модели соответствует действительности, несмотря на уменьшение доли устойчивых компонент в составе гумуса [17].

Проверка условия (5.1) дает однозначный ответ. Если параметры, входящие в неравенства для условия (5.2), определяются на основании данных по стабильному периоду, то $q \cong 0.007 < 0.0176$ для суглинистой и $q \cong 0.0062 < 0.0190$ для супесчаной почв. Однако q – характеристика, в том числе и культуры, выращиваемой в переходной период, и определение этого параметра может быть особенно затруднительно, если предполагается севооборот.

Проверка условия (5.3), как уже отмечалось, осложняется наличием эмпирических параметров, но, тем не менее, высокий уровень окультуренности и то, что наблюдается меньшее значение относительной скорости процессов минерализации по сравнению с относительной скоростью гумификации, позволяет считать и его выполненным. Следовательно, согласно нелинейной модели, ни одной из почв не грозит полное истощение запасов гумуса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Общим недостатком, но в то же время и достоинством, представленных теоретических моделей динамики органического вещества почвы является предельная упрощенность описания связей внутри системы гумусовых веществ, препятствующая, с одной стороны, определению специфических различий для почв, различающихся по своему гранулометрическому составу, но с другой стороны, позволяющая выявить характерные черты поведения системы в целом.

В рамках линейной модели различия для почв разного гранулометрического состава определяются разницей в уровнях стационарного содержания ГВ, соответствующего периоду с низким уровнем агротехники, причем эти расчетные данные не соответствуют возможным значениям этих величин.

В отличие от линейной модели, расчеты по нелинейной модели больше отвечают теоретическим представлениям о характере выхода на стационарный режим, однако четких различий в параметрах, характеризующих сам переходной процесс из одного устойчивого состояния в другое, не выявлено.

К достоинству разработанной нелинейной модели следует отнести возможность получения четких условий существования нетривиальных стационарных состояний в экстремальной ситуации переходного периода, которые на качественном уровне в предельно упрощенном виде можно сформулировать следующим образом: чем выше был уровень агротехники в благополучный период, тем большим запасом прочности обладает система в неблагоприятных обстоятельствах, а на количественном – с использованием параметров, характеризующих процессы гумификации и минерализации разработан алгоритм определения границ, в которых может существовать система.

И линейная, и нелинейная модели получены с использованием ряда допущений полуэмпирического характера, однако по существу являются качественными теоретическими моделями. В тоже время эти модели могут служить основой для создания моделей имитационных, в которых содержательные представления о процессах трансформации и транслокации ОВП получают свое развитие, а использование вероятностных характеристик параметров этих процессов позволит придать моделям прикладную направленность.

Таким образом, полученные модели являются небольшим шагом в направлении лучшего понимания закономерностей динамики ОВП под действием неблагоприятных факторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гильманов Т.Г. Математическая модель процесса накопления гумуса в степных почвах. *Бюлл. Почв. ин-та ВАСХНИЛ*. 1975. Вып. 10. С.78–84.
2. Hunt N.W. A simulation model for decompositions in grasslands. *Ecology*. 1977. V. 58. P. 469–484.
3. Чертов О.Г. Имитационная модель минерализации и гумификации лесного опада и подстилки. *Журн. общей биологии*. 1985. Т. 46. С.794–804.
4. Мамихин С.В., Тихомиров Ф.А. Модель многолетней динамики стабильного углерода и C_{14} в целинных черноземах степного биогеоценоза. *Вестн. МГУ, сер. 17*. 1984. № 4. С. 13–18.
5. Керженцев А.С., Кузнецов М.Я., Кузнецова Е.В. О моделировании процесса трансформации органического вещества в почве. В: *Информационные проблемы изучения биосферы*. Пушино, 1988. С. 76–84.
6. Чертов О.Г., Комаров А.С. Имитационная модель динамики органического вещества почв. *Вестник СПбГУ. Сер. 3. Биологи*. 1996. Вып. 1. С.104–109.
7. Parton W.J., Stewart J.W.B., Cole C.V. Dynamics of C, N, P и S in grasslands soils: a model. *Biogeochemistry*. 1988. V. 5. P.109–113.
8. Jenkinson D.S., Hart P.B.S., Rajner J.H., Parry L.C. Modelling the turnover of organic matter. *INTECOL BULL*. 1987. № 15. P. 1–8.
9. Chertov O.G., Komarov A.S., Nadporozhskaya M.A., Bykhovets S.S., Zudin S.L. ROMUL – a model of forest soil organic matter dynamics as a substantial tool for forest ecosystem modeling. *Ecological modelling*. 2001. V. 138. P. 289–308.
10. Leitea L.F.C., de Sa' Mendonca E., de Almeida Machado P.L.O., Filho E.I.F., Neves J.C.L. Simulating trends in soil organic carbon of an Acrisol under no-tillage and disc-pow systems using the Century model. *Geoderma*. 2004. V. 120. P. 283–295.
11. Смагин А.В. К теории устойчивости почв. *Почвоведение*. 1994. № 12. С. 26–33.
12. Ризниченко Г.Ю. *Математические модели в биофизике и экологии*. М.: ИКИ, 2003. 184 с.
13. Manzoni S., Porporato A. A theoretical analysis of nonlinearities and feedbacks in soil carbon and nitrogen cycles. *Soil Biology and Biochemistry*. 2007. V. 39. P. 1542–1556.
14. Рыжова И.М., Шамшин А.А. Сравнительный анализ устойчивости почв природных и агроэкосистем в рамках нелинейной математической модели круговорота углерода. *Почвоведение*. 1997. № 10. С. 1265–1273.
15. Семенова Н.Н., Орлова Н.Е. Анализ процесса дегумификации дерново-подзолистых почв с использованием динамических математических моделей. В: *Математические модели и информационные технологии в сельскохозяйственной биологии: материалы всероссийской конференции*. С.-Петербург: АФИ, ИНЭНКО РАН, 2010. С. 154–155.
16. Орлова Н.Е., Семенова Н.Н. Динамические математические модели в исследовании процесса дегумификации дерново-подзолистых почв. В: *Ресурсный потенциал почв – основа продовольственной и экологической безопасности России: материалы международной конференции, посвященной 165-летию Докучаева В.В.* С.-Петербург, 2011. С. 294–295.
17. Орлова Н.Е., Бакина Л.Г. Количественная оценка амплитуды сезонных колебаний содержания гумуса в почвах Северо-Запада России. В: *Гумус и почвообразование*. СПб.: Изд. СПбГАУ, 2001. С. 14–23.
18. Орлова Н.Е., Бакина Л.Г., Дмитричева Л.Е. Особенности сезонной трансформации органического вещества дерново-подзолистой суглинистой почвы. В: *Гумус и почвообразование*. СПб.: Изд. СПбГАУ, 2002. С. 13–21.
19. Орлова Н.Е., Бакина Л.Г., Орлова Н.Е. Механизмы сезонной трансформации гумуса почв Северо-Запада России. *Вестник СПбГУ. Сер. 3. Биология*. 2006. Вып. 1. С. 210–215.

20. Орлова Н.Е., Бакина Л.Г., Орлова Е.Е., Гавриков Е.В. Особенности трансформации органического веществ окультуренных дерново-подзолистых почв в современных условиях. В: *Почвенные ресурсы Северо-Запада России: их состояние, охрана и рациональное использование: материалы межрегион. научно-практ. конф.* (13 мая 2008 г.). СПб, 2008. С. 159–163.
21. Пономарева В.В., Плотникова Т.А. *Гумус и почвообразование (методы и результаты изучения)*. Л.: Наука, 1980. 222 с.
22. Andren O., Katterer T. ICBM: The introductory carbon balance model for exploration of soil carbon balances. *Ecological Appl.* 1997. V. 7. P. 1226–1236.
23. Орлова Н.Е., Орлова Е.Е., Бакина Л.Г., Гавриков Е.В. Устойчивость различных компонентов гумуса дерново-подзолистых и дерново-карбонатных почв к деградационным процессам. В: *Антропогенная трансформация природной среды: материалы международной конф.* (18–21 октября 2010 г.). Пермь, 2010. С. 83–88.
24. Six J., Conant R.T., Paul E.A., Paustian K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C – saturation soils. *Plant and Soil.* 2002. V. 241. P. 155–176.

Материал поступил в редакцию 13.11.2011, опубликован 12.07.2012.