

2. Влияние удобрений и пестицидов на качество зерна озимой ржи (в среднем за 2005-2008 гг.)

Вариант	Содержание белка, %	Сбор белка, ц/га	Нитраты, мг/кг	¹³⁷ Cs, Бк/кг
1. Без удобрений и пестицидов (контроль)	13,3	0,85	52	57
2. Последствие навоза, 80 т/га	14,1	1,37	56	28
3. Последствие навоза, 40 т/га	13,7	2,19	62	23
+ N ₇₀ P ₃₀ K ₆₀				
4. N ₇₀ P ₃₀ K ₆₀	13,9	1,97	57	24
5. N ₁₄₀ P ₆₀ K ₁₂₀	14,1	2,66	63	21
6. N ₂₁₀ P ₉₀ K ₁₈₀	13,5	2,17	71	21
7. Последствие навоза, 40 т/га	14,0	2,91	61	22
+ N ₇₀ P ₃₀ K ₆₀ + пестициды				
8. N ₇₀ P ₃₀ K ₆₀ + пестициды	14,0	2,02	57	24
9. N ₁₄₀ P ₆₀ K ₁₂₀ + пестициды	14,0	3,01	63	18
10. N ₂₁₀ P ₉₀ K ₁₈₀ + пестициды	13,9	3,27	69	18

антах с комплексным применением средств химизации.

Содержание нитратов в зерне озимой ржи изменялось по вариантам опыта от 52 до 71 мг/кг, но не превышало ПДК для продовольственного зерна (93 мг/кг). Отмечена тенденция повышения содержания нитратов под влиянием систем удобрения, а максимальные значения (69-71 мг/кг) были получены в вариантах с применением повышенных доз туков. Применение пестицидов на фоне изучаемых систем удобрения не оказывало заметного влияния на изменение содержания нитратов в зерне.

Концентрация радиоактивного цезия в зерне озимой ржи в среднем за ротацию севооборота на контроле составила 57 Бк/кг при нормативе 70 Бк/кг. Применение различных систем удобрения, а также их сочетание с пестицидами снижало концентрацию ¹³⁷Cs в зерне в 2,0-3,2 раза по сравнению с контролем. Органические удобрения в последствии снижали концентрацию ¹³⁷Cs по сравнению с контролем в 2,0 раза, а в сочетании с минеральными – в 2,5 раза. Применение последовательно возрастающих доз минеральных удобрений позволяет получать зерно озимой ржи с содержанием ¹³⁷Cs в 2,4-2,7 раза ниже, чем на контроле. Химические средства защиты растений оказали сравнительно слабое влияние на изменение концентрации ¹³⁷Cs в урожае озимой ржи. Наименьшее содержание ¹³⁷Cs – 18 Бк/кг – отмечено при внесении оптимальной и повышенной дозы NPK в комплексе с пестицидами.

Таким образом, при возделывании озимой ржи в плодосменном сево-

обороте на дерново-подзолистой песчаной почве в условиях радиоактивного загрязнения оптимальным фоном является N₁₄₀P₆₀K₁₂₀ + пестициды (вариант 9), где получена высокая и стабильная урожайность. Применение средств химизации способствует повышению белковости зерна озимой ржи и снижению концентрации ¹³⁷Cs по сравнению с контролем в 2,0-3,2 раза. Под влиянием возрастающих доз удобрений отмечена тенденция повышения содержания нитратов в зерне озимой ржи от 52 до 71 %, но это значение не превышает норматив для продовольственного зерна, и оно пригодно для использования как на кормовые, так и на пищевые цели.

Статья поступила в редакцию
23.04.2009

Influence of the 'chemicalization' remedies on the productivity and quality of winter grain rye

G.P. Malyavko, N.M. Belous,
V.F. Shapovalov

There is showed the influence of fertilizing systems and pesticides on the productivity, content of protein, nitrates and radioactive caesium in winter grain rye in the definite agroecological conditions.

Keywords: winter rye, fertilizing system, pesticides, productivity, protein content, nitrates, radioactive caesium.

УДК 631.417.2

Долгосрочное прогнозирование изменения запасов гумуса в почве

Ю.П. СУХАНОВСКИЙ,
Н.П. МАСЮТЕНКО, доктора
сельскохозяйственных наук
С.И. САНЖАРОВА, кандидат
биологических наук
А.В. ПРУЩИК

Всероссийский НИИ земледелия
и защиты почв от эрозии
E-mail: soil-er@kursknet.ru

Разработана модель динамики запасов гумуса в почве. Сделан прогноз динамики запасов гумуса в слое 0-20 см.

Ключевые слова: гумус, почва, прогнозирование.

Качественный и количественный состав гумуса определяет агрохимические, агрофизические и биологические свойства почв. Этим обусловлена его важнейшая роль в формировании урожайности сельскохозяйственных культур. За последние 200 лет со времени интенсивного освоения целинных земель в Центрально-Черноземном регионе содержание гумуса в верхнем слое незероированных черноземных почв уменьшилось примерно в два раза и составляет 5-6 % [1, 2]. При таком темпе деградации содержание гумуса в пахотном слое в следующие 200 лет снизится до 2,5-3,0 %. Для компенсации утраченного плодородия требуются дополнительные затраты, что приведет к росту стоимости растениеводческой продукции. Падение почвенного плодородия может привести к кризису, когда возможности производства продукции не будут соответствовать растущим потребностям в ней. Все это обуславливает необходимость разработки моделей для долгосрочного прогнозирования динамики почвенных ресурсов.

Данная работа посвящена разработке модели динамики запасов гумуса и ее применению для прогнозирования. Описание динамики трансформации органического вещества в почве является весьма сложной задачей [3]. Однако при проектировании систем земледелия оценка тенденции запасов гумуса

необходима. Существуют упрощенные модели динамики запасов гумуса [4-6, 7, 8]. Ряд зарубежных и отечественных моделей описан также в работе [9]. В данной работе используется модель для общего гумуса [7], которую запишем в виде:

$$\frac{dA(t)}{dt} + \lambda_{veg} A(t) = a(t); \quad (1)$$

$$\frac{d\Gamma(t)}{dt} + \lambda_{hum} \Gamma(t) = k_{vh} \lambda_{veg} A(t), \quad (2)$$

где t – время, год; $A(t)$, $\Gamma(t)$ – запасы в почве растительных остатков и общего гумуса в произвольный момент времени t , т/га; λ_{veg} , λ_{hum} – постоянные распада растительных остатков и общего гумуса, год⁻¹; k_{vh} – доля растительных остатков, которая со временем трансформируется в гумус, безразмерная; $a(t)$ – интенсивность поступления в почву растительных остатков, т/(га год).

Начальные условия для уравнений (1) и (2)

$$A(t=0) = A_0, \quad \Gamma(t=0) = \Gamma_0. \quad (3)$$

Применим эту модель для долгосрочного прогнозирования (десятилетия и сотни лет) изменения запасов гумуса. Для упрощения величину $a(t)$ примем постоянной:

$$a = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N a_j \quad (4)$$

где N – период ротации севооборота, лет; a_j – количество органического вещества, которое поступает в почву за j -й год севооборота, т/га. Тогда из системы уравнений (1) и (2) следует, что

$$A(t) = A_0 \exp(-\lambda_{veg} t) + \frac{a}{\lambda_{veg}} [1 - \exp(-\lambda_{veg} t)], \quad (5)$$

$$\Gamma(t) = \left[\Gamma_0 + k_{vh} \frac{\lambda_{veg} A_0 - a}{\lambda_{veg} - \lambda_{hum}} - \frac{k_{vh} a}{\lambda_{hum}} \right] \exp(-\lambda_{hum} t) - k_{vh} \frac{\lambda_{veg} A_0 - a}{\lambda_{veg} - \lambda_{hum}} \exp(-\lambda_{veg} t) + \frac{k_{vh} a}{\lambda_{hum}}. \quad (6)$$

При $t \rightarrow \infty$ запасы гумуса стремятся к предельному (равновесному) значению

$$\Gamma_{\infty} = \frac{k_{vh} a}{\lambda_{hum}}. \quad (7)$$

Если в (7) вместо Γ_{∞} подставить исходные (имеющиеся) запасы гумуса Γ_0 , то получим бездефицитный

баланс гумуса, позволяющий оценить необходимое поступление органического вещества в почву a . Величины k_{vh} (безразмерная) и λ_{hum} (год⁻¹) принято называть соответственно коэффициентами гумификации и минерализации.

Когда в почве не содержатся растительные остатки, и они не поступают в почву ($A_0 = a = 0$), то из уравнения (6) следует, что уменьшение запасов гумуса описывается экспоненциальной зависимостью:

$$\Gamma(t) = \Gamma_0 \exp(-\lambda_{hum} t). \quad (8)$$

Время, за которое в данном случае запасы гумуса уменьшаются в два раза, принято называть периодом полураспада $T_{1/2}$. Параметры λ_{veg} , k_{vh} и λ_{hum} , строго говоря, являются неизвестными, поэтому они рассматриваются как калибровочные. Их значения оцениваются из условия минимума среднеквадратического относительного отклонения между фактическими и рассчитанными значениями запасов гумуса, которое определяет погрешность модели ϵ_{mod} .

Калибровка модели проведена по фактическим данным запасов гумуса в слое 0-20 см чернозема типичного мощного Центрально-Черноземного заповедника (Курская обл.) после распахивания целины, когда почва находилась в состоянии чистого пара. По фактическим данным [10] было определено, что сразу после распахивания запасы растительных остатков в почве ($A_{0,почв}$) равны 34,4 т/га, а запасы общего гумуса в момент распахивания (Γ_0) – 164,2 т/га. В результате процедуры оптимизации получены следующие значения параметров: $\lambda_{veg} = 0,62$ год⁻¹ ($T_{1/2,veg} = 1,12$ года), $k_{vh} = 0,25$ и $\lambda_{hum} = 0,011$ год⁻¹ ($T_{1/2,hum} = 63,0$ года). Средняя погрешность модели $\epsilon_{mod} = 10$ %. Сопоставление результатов расчета с фактическими данными показало, что использование модели для долгосрочного прогнозирования приведет к большой ошибке.

Анализ фактических данных (рис. 1) позволяет предположить, что об-

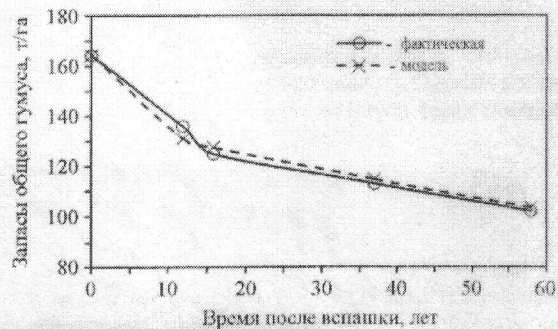


Рис. 1. Динамика изменения запасов общего гумуса после распахивания целины (двухкомпонентная модель гумуса)

щий гумус состоит из двух компонент. Первая компонента распадается быстро (до 16 лет после распахивания). Назовем ее условно неустойчивым гумусом. Вторая компонента распадается значительно медленнее. Назовем ее устойчивым гумусом. Также предположим, что обе компоненты описываются уравнениями (6) – (8), но с разными значениями величин Γ_0 , Γ_{∞} , λ_{hum} , k_{vh} . Чтобы их различать, для неустойчивого гумуса добавим нижний индекс "неуст", а для устойчивого – нижний индекс "уст". Если эти индексы отсутствуют, то эти параметры относятся к общему гумусу. Для дальнейших расчетов примем, что $\lambda_{veg} = 0,62$ год⁻¹, а $k_{vh} = k_{vh,уст} + k_{vh,неуст} = 0,25$, значения которых соответствуют данным [11].

Выдвинутые предположения проверим следующим образом. Согласно гипотезе, при $t > 16$ лет в почве остался только устойчивый гумус, запасы которого описываются уравнением (8). За начало отсчета ($t = 0$) примем время через 16 лет после распахивания. В уравнении (8) вместо Γ_0 будет Γ_{16} – запасы гумуса через 16 лет. С учетом этого уравнение (8) для устойчивого гумуса запишем в виде

$$\ln \left[\frac{\Gamma_{16}}{\Gamma(t)} \right] = \lambda_{hum,уст} t. \quad (9)$$

На рисунке 2 показано уравнение регрессии $\ln[\Gamma_{16}/\Gamma(t)] = 0,00471t$ с коэффициентом детерминации $R^2 = 1$, полученное по фактическим данным. Это означает, что распад устойчивого гумуса описывается экспоненциальной зависимостью (8), а значение $\lambda_{hum,уст} = 0,00471$ год⁻¹ ($T_{1/2,уст} = 147,2$ года).

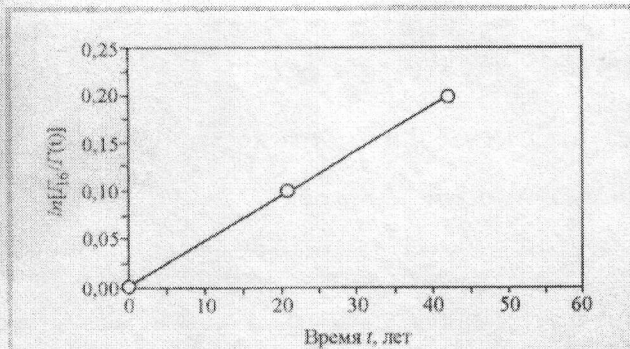


Рис. 2. Зависимость $\ln[\Gamma_{16} / \Gamma(t)]$ от времени t (фактические данные; сплошная линия – уравнение линейной регрессии)

Из уравнения (9) при $t = 16$ лет следует, что перед распахкой (вернемся к $t = 0$ для момента распахки) запасы устойчивого гумуса $\Gamma_{уст} = 134,6$ т/га. Следовательно, перед распахкой запасы неустойчивого гумуса $\Gamma_{нуст} = \Gamma - \Gamma_{уст} = 164,2 - 134,6 = 29,6$ т/га.

Теперь оценим значения коэффициентов гумификации для устойчивого $k_{нуст}$ и для неустойчивого $k_{уст}$ гумуса. Рассмотрим равновесное состояние почвы перед распахкой, которому соответствует поступление растительных остатков $a = 12,3$ т/(га год) [10]. Для устойчивого гумуса из уравнения (7) при $\Gamma_{уст} = 134,6$ т/га, $\lambda_{нуст} = 0,00471$ год⁻¹ следует, что $k_{нуст} = 0,052$. Тогда для неустойчивого гумуса $k_{уст} = k_{нуст} - k_{нуст} = 0,25 - 0,052 = 0,198$.

Для неустойчивого гумуса оценка значения $\lambda_{нуст}$ связана с большой неопределенностью. Через 16 лет фактические запасы общего гумуса равнялись 124,8 т/га. Приближенно примем, что в это время запасы неустойчивого гумуса равнялись 1/4 от погрешности определения общего гумуса (2 %), т.е. за 16 лет они снизились с 29,6 до 0,624 т/га. Тогда из уравнения (8) следует, что $\lambda_{нуст} = 0,241$ год⁻¹ ($T_{1/2,нуст} = 2,87$ года). На рисунке 1 показано сопоставление рассчитанных запасов общего гумуса с фактическими данными. Погрешность расчета по модели $\epsilon_{мод} = 2,2$ %, т.е. погрешность двухкомпонентной модели уменьшилась в 4,5 раза.

Учитывая полученные значения параметров модели, из уравнения (7) следует, что для предельного (равновесного) состояния отношение со-

$$\frac{\Gamma_{нуст}}{\Gamma_{уст}} = \frac{k_{нуст} \lambda_{нуст}}{\lambda_{нуст} k_{уст}} = 0,0752 \quad (10)$$

Отсюда следует, что в равновесном состоянии доля неустойчивого гумуса 7 %, а доля устойчивого 93 %.

Используя полученные значения параметров, проверим модель по независимым фактическим данным, полученным в многофакторном полевом опыте ВНИИ земледелия и защиты почв от эрозии в

сложно показать, что относительная погрешность оценки запасов устойчивого гумуса будет определяться зависимостью

$$\epsilon_{уст} = \epsilon_{нуст} \frac{P_{нуст}}{P_{уст}} \quad (11)$$

где $P_{нуст}$ и $P_{уст}$ – доли в общем гумусе соответственно для неустойчивой и устойчивой компонент. Подставим полученные значения в (11) и получим, что погрешность оценки запасов устойчивого гумуса равняется $\epsilon_{уст} = 3,8$ %. Следовательно, большая погрешность в оценке запасов неустойчивого гумуса при-

водит к относительно не большой погрешности оценки запасов устойчивого гумуса. Поэтому в дальнейших расчетах примем $P_{нуст} = 7$ % и $P_{уст} = 93$ %.

В варианте с бессменным паром содержание общего гумуса в пахотном горизонте за 24 года уменьшилось $5,3 \pm 0,3$ %.

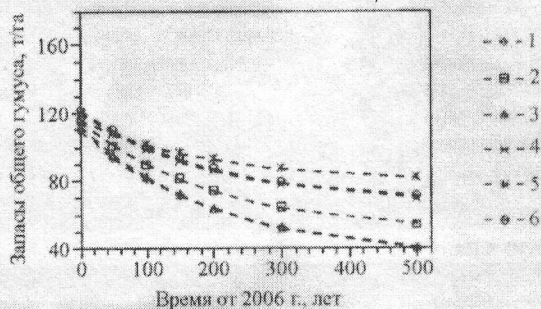


Рис. 3. Прогноз динамики запасов общего гумуса в слое 0-20 см для шести вариантов многофакторного полевого опыта ВНИИЗиЗПЭ

черноземе типичном. Опыт размещен в нескольких километрах от заповедника. Имеются фактические данные по запасам общего гумуса, но отсутствуют данные по долевого вкладу каждой компоненты. Заметим, что неустойчивый гумус очень динамичен: быстро распадается и большая часть поступающего органического вещества трансформируется в эту компоненту. Примем, что запасы неустойчивого гумуса определяются с большой погрешностью (50 %). Не-

содержание гумуса равняется $4,40$ т/га, т.е. погрешность расчета $\epsilon_{нуст} = 2,4$ %. Теперь рассмотрим другие шесть вариантов опыта с двумя севооборотами: зернопаропропашной (чистый пар – озимая пшеница – сахарная свекла – ячмень) и зернотравяной (клевер 1-го г. п. – клевер 2-го г. – озимая пшеница – ячмень + клевер). Описание вариантов приводится в таблице 1. В таблице 2 приводятся фактические и рассчитанные

1. Варианты опыта

	Описание
1	Зернопаропропашной севооборот, без удобрений, вспашка
2	Зернопаропропашной севооборот, 48 т/га органических удобрений, вспашка
3	Зернопаропропашной севооборот, без удобрений, безотвальная обработка
4	Зернотравяной севооборот, без удобрений, вспашка
5	Зернотравяной севооборот, 48 т/га органических удобрений, вспашка
6	Зернотравяной севооборот, без удобрений, безотвальная обработка

*Органические удобрения вносили один раз в ротацию четырехпольных севооборотов (только в первые две ротации).

2. Фактические данные и результаты расчета запасов гумуса в слое почвы 0-20 см

Вариант	Фактические запасы общего гумуса*, т/га		Модель			
	1986 г.	2006 г.	Запасы общего гумуса в 2006 г., т/га	Погрешность, %	Предельные запасы общего гумуса**, т/га	Предельное содержание общего гумуса**, %
1	123,7	115,3	110,0	-4,6	34,1	1,65
2	128,1	114,9	115,8	0,8	48,2	2,27
3	127,5	119,4	113,0	-5,3	32,9	1,54
4	130,5	119,1	120,2	0,9	64,7	3,05
5	123,2	113,9	116,1	1,9	78,8	3,81
6	132,5	123,7	122,1	-1,3	65,9	2,97

*Данные Масютенко Н.П. [12].
 **При равновесном состоянии, к которому стремятся запасы гумуса.

данные по запасам гумуса. Средняя погрешность расчетов $\varepsilon_{\text{мод}} = 2,5\%$.

Продолжительность наблюдений 20 лет является малой по сравнению с периодом полураспада устойчивого гумуса (147,2 года). Используя модель, оценим изменение запасов гумуса за 200 лет, когда началась интенсивная распашка целины [13, 14]. Поскольку отсутствуют данные по поступлению в почву органического вещества, расчет проведен для варианта № 1, который является наихудшим. Результаты расчета показали, что через 200 лет после распашки целины запасы гумуса в почве должны сократиться в 2,2 раза. Следовательно, модель дает разумный результат, и она может использоваться для долгосрочного прогнозирования.

Для шести вариантов многофакторного опыта был сделан прогноз динамики запасов гумуса в слое 0-20 см (начальное содержание гумуса примерно 6%). Полученные результаты представлены на рисунке 3, из чего следует, что для всех вариантов запасы гумуса уменьшаются и стремятся к предельным значениям (табл. 2).

Таким образом, ни один из вариантов опыта не способен стабилизировать имеющиеся запасы гумуса в почве, даже зернотравяной севооборот, который называется почвозащитным. Для сохранения имеющихся запасов гумуса требуется вносить в почву значительно больше органического вещества, чем это делается в настоящее время.

Литература

1. Адрихин П.Г. Изменение черноземных почв ЦЧО при их использовании в сельском хозяйстве/Черноземы ЦЧО и их плодородие. – М.: Наука, 1964. – С.61-69.

2. Афанасьева Е.А. Черноземы Средне-Русской возвышенности. – М.: Наука, 1966. – 224 с.

3. Гончар-Зайкин П.П., Журавлев О.С. Объектно-ориентированное моделирование трансформации органического вещества в почве/Современная агрофизика – высоким технологиям. Матер. междунар. конф. (Санкт-Петербург, 25-27 сентября 2007 г.). – СПб., 2007. – С. 94-98.

4. Гильманов Т.Г. Математическая модель процесса накопления гумуса в степных почвах. – Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева, 1975. – В.10. – С.78-84.

5. Алиев С.А. Экология и энергетика биосистем. – Баку: Элм, 1978. – 254 с.

6. Довнар В.С. Математическая модель динамики запасов гумуса в почве. – Научн. тр. БелНИИ земледелия, 1985. – В. 25 – С.105-114.

7. Володин В.М., Сухановский Ю.П., Чередниченко А.В. Математическая модель динамики гумуса. – Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева, 1985. – в. XXXVI. – С. 43-44.

8. Рыжова И.М. Анализ устойчивости почв на основе нелинейных моделей круговорота углерода/Дисс... докт. биол. наук. – М., 2006. – 173 с.

9. Лисецкий Ф.Н. Пространственно-временная организация агроландшафтов. – Белгород: Изд-во Белгор. гос. ун-та., 2000. – 304 с.

10. Утехин В.Д., Хоанг Тьонг. Структура и продуктивность фитомассы луговой степи/Биота основных геосистем центральной лесостепи. – М., 1976. – С.7-24.

11. Лыков А.М. К методике расчетного определения гумусового баланса почвы в интенсивном земледелии//Известия ТСХА, 1979. – Вып. 6. – С. 14-20.

12. Прущик А.В., Сухановский Ю.П. Изменение содержания гумуса в черноземных почвах в длительном стационарном многофакторном полевом опыте/Инновации, землеустройство и ресурсосберегающие технологии в земледелии. Сб. докл. конф., 11-13 сентября 2007 г.,

Курск. – Курск: ВНИИЗиЗПЭ, 2007. – С. 430-433.

13. Бахирев Г.И. Закономерности проявления и интенсивность среднемноголетней эрозии почв на пашне в Курской области/Закономерности проявления эрозионных и русловых процессов в различных природных условиях. – М.: Изд-во МГУ, 1981. – С. 22-23.

14. Литвин Л.Ф. География эрозии почв сельскохозяйственных земель России. – М.: ИКЦ "Академкнига", 2002. – 255 с.

Статья поступила в редакцию
16.07.2008

Long-term prognostication of changes of humus' stores in soil

Y.P. Sukhanovsky, N.P. Masyutenko, S.I. Sanzharova, A.V. Prushchik

There has been worked out the model of dynamics of humus' stores in soil and made a forecast of dynamics of humus' stores in soil' layer of 0-20 cm.

Keywords: humus, soil, prognostication.