

Научная статья  
УДК 502/504:627.5:004.94  
DOI: 10.36508/journal.2024.10.29.002

## ОЦЕНКА ДИНАМИКИ ГУМУСА ЧЕРНОЗЕМА ВЫЩЕЛОЧЕННОГО В НАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ И ЭМПИРИЧЕСКИМИ РАСЧЕТАМИ

Садовая Ирина Игоревна<sup>1</sup>, Карпенко Нина Петровна<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное общеобразовательное учреждение высшего образования «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева», г. Рязань, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова»; г. Москва, Россия

<sup>2</sup>[nrkarpenko@yandex.ru](mailto:nrkarpenko@yandex.ru)

**Аннотация.** Одним из важных показателей является содержание гумуса и органического вещества. Оценить динамику гумуса можно в натуральных условиях путем отбора проб почвы и лабораторных исследований, с помощью математической детерминированной модели, термодинамического расчета с использованием интегральных показателей.

**Проблема и цель.** С целью оценки содержания гумуса в почве нами были использованы вышеперечисленные методы и сделан сравнительный анализ их результатов. В этом заключалась цель авторской работы.

**Методология.** Работа выполнена в ООО «ЛАГ Сервис-Агро» в Захаровском районе Рязанской области. Почва чернозем выщелоченный низкого уровня плодородия. Органическое удобрение вносилось однократно под овес и озимую рожь в севооборотах дозами были 10 т/га и 15 т/га соответственно. Оценка динамики гумуса оценивалась с помощью определения лабораторным методом фактического содержания, автоматизированной системы, работающей в режиме онлайн, и эмпирическим методом термодинамического баланса.

**Результаты.** Результаты натуральных исследований показали повышение фактического содержания гумуса в почве через три года после внесения органического удобрения на основе отходов животноводства в севообороте с овсом на  $0,1...0,2 \pm 0,01\%$ , под озимой рожью –  $0,2...0,4 \pm 0,01\%$ . По степени гумусированности почва перешла из класса меньше минимального содержания в следующий класс слабогумусированные. Проведенный статистический анализ не установил достоверной связи в опыте с овсом (при  $p > 0,05$ ), в опыте с озимой рожью обнаружено существенное влияние внесения органического удобрения на основе отходов животноводства на содержание гумуса при  $p < 0,05$ .

**Заключение.** Проведенные исследования позволили дать оценку динамики гумуса в черноземе выщелоченном в натуральных исследованиях и при эмпирических расчетах при обнаружении ошибки в пределах допустимых значений.

**Ключевые слова:** гумус, органическое удобрение, натурные исследования, математическая детерминированная модель, термодинамический подход.

*Original article*

## **ASSESSMENT OF THE DYNAMICS OF LEACHED CHERNOZEM HUMUS IN NATURAL AND EMPIRICAL CALCULATIONS**

**Sadovaya Irina Igorevna<sup>1</sup>, Karpenko Nina Petrovna<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Ryazan State Agrotechnological University Named after P.A. Kostychev", Ryazan, Russia*

<sup>2</sup>*Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Scientific Center for Hydraulic Engineering and Land Reclamation Named after A.N. Kostyakov"; Moscow, Russia*

<sup>1</sup>*npkarpenko@yandex.ru*

**Abstract.** *One of the important indicators is the content of humus and organic matter. The dynamics of humus can be assessed under natural conditions by soil sampling and laboratory research, using a mathematical deterministic model, thermodynamic calculation using integral indicators.*

**Problem and purpose.** *In order to assess the humus content in the soil, we used the above methods and made a comparative analysis of their results. This was the purpose of the author's work.*

**Methodology.** *The work was carried out at LAG Service-Agro LLC in Zakharovsky district of Ryazan region on leached chernozem of low fertility. An organic fertilizer based on animal waste was applied once for oats and winter rye in crop rotations. From an agronomic point of view, the optimal doses were 10 t/ha and 15 t/ha, respectively. Humus dynamics were assessed using a laboratory method to determine the actual content, an online automated system, and an empirical thermodynamic balance method.*

**Results.** *The humus content in the soil three years after the application of the organic fertilizer based on animal waste in crop rotation with oats increased by 0.1...0.2±0.01% and with winter rye by 0.2-0.4±0.01%. In terms of the degree of humus content, the soil moved from the class of less than the minimum content to low humus content. The use of a mathematical deterministic model in assessing the dynamics of humus showed online a positive balance of organic matter in the variants with oats and winter rye for a layer of 0-25 cm. The accumulation of organic*

*matter was affected by the presence of soil erosion, the assessment of which was slightly higher than the indicators of the 1st degree of erosion.*

**Conclusion.** *Calculations in field studies, using empirical dependencies in the form of a mathematical deterministic model and a thermodynamic balance equation in the 0-25 cm layer, showed little variability, which indicated a high degree of reliability.*

**Key words:** *humus, organic fertilizer based on animal waste, field studies, mathematical deterministic model, thermodynamic approach.*

### **Введение**

Проблема восстановления утраченного плодородия почв остро стоит на территории всей страны [2, 3]. Понятие «плодородие» включает количество гумуса [9, 10]. Традиционный метод его определения по Тюрину, но при использовании автоматизированных программ его наличие в почве можно отследить в режиме реального времени, что очень удобно из-за возможности сразу на месте проследить динамику процесса. Сейчас используется для оценки динамики гумуса термодинамический подход с использованием интегральных показателей [1]. Известно, сельскохозяйственное использование земель влечет снижение запасов органического вещества посредством выноса из почвы урожая, поэтому для его восстановления и сохранения экологических функций необходимо регулярное внесение именно органических удобрений [1, 4, 7]. На наш взгляд, тема актуальна и своевременна, учитывая необходимость решения проблемы сохранения и восстановления плодородия почв. Целью исследований являлась сравнительная оценка динамики гумуса и продукционного потенциала чернозема выщелоченного в южной части Нечерноземья при обработке фактических и эмпирических данных.

### **Материалы и методы исследований**

Исследования проводились в ООО «ЛАГ Сервис-АГРО» Захаровского района Рязанской области при однократном внесении органического удобрения на основе отходов животноводства (рисунок 1в, рисунок 2). Состав разработанного удобрения и варианты мелкоделяночного полевого опыта были опубликованы в работах ранее. Были проведены мелкоделяночные полевые, лабораторные опыты и производственная проверка. Почва – чернозем выщелоченный слабогумусный сверхмощный легкоглинистый на лессовидных тяжелых суглинках (агрочернозем глинисто-иллювиальный согласно Классификации почв России), уровень плодородия невысокий. По градации в слое 0-25 см исходное количество гумуса составляло меньше минимального содержания 3,5%. Агротехника традиционная. Климат умеренно-континентальный [6] с достаточным, но неравномерным распределением осадков. Территория хозяйства входит во второй агроклиматический район (II), для которого ежегодно характерны почвенные и атмосферные засухи, суховеи. По шкалам классификации климата по условиям тепло- и влагообеспеченности по В.Г. Сычеву и др. [8], регион относится к умеренному по теплу и недостаточному по увлажнению поясам. Чернозем выщелоченный в Захаровском районе подвержен слабой степени эрозии [5]. На основе ранее полученных результатов исследований были установлены научно-

обоснованные и агрономически оправданные дозы органического удобрения, рассчитанные балансовыми уравнениями. В статье рассмотрена динамика гумуса с использованием фактических и эмпирических данных, полученных авторами при проведении натурных опытов, использовании математической детерминированной модели и термодинамического подхода с использованием интегральных показателей.

Математическая детерминированная модель дала возможность провести математическое и компьютерное моделирование конкретного процесса – динамики гумуса. Авторами осуществлена формализация исходной информации по этому показателю с помощью алгоритмических представлений на основе программно реализуемых вычислительных экспериментов, уравнений, описывающих динамику гумуса (овес в севообороте (поле №5 рисунок 1а); озимая рожь в севообороте (поле №5, рисунок 1б)). Результаты обработаны в компьютерной программе Statistika10.

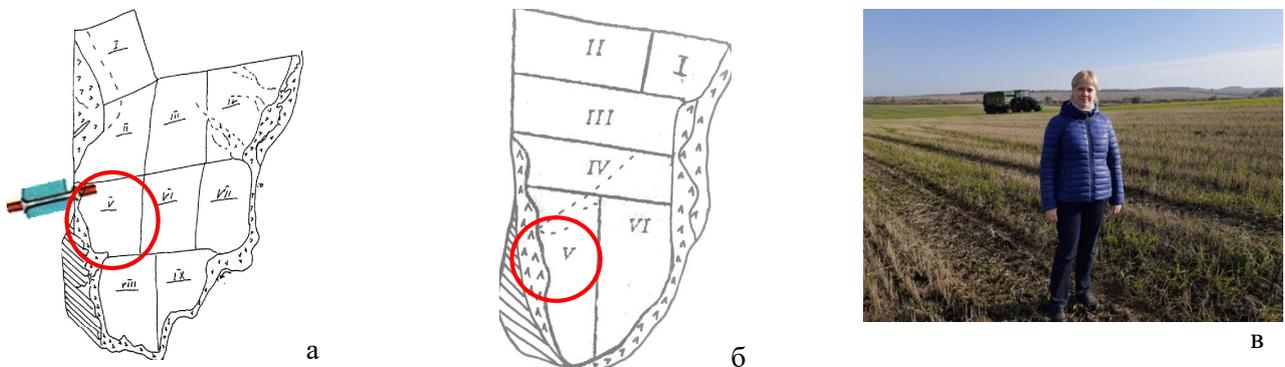


Рисунок 1 – Севооборотные участки: а – с овсом и б – с озимой рожью, в - внесение органического удобрения на основе отходов животноводства осенью 2021 года разбрасывателем Бергман, агрегируемом на тракторе John Deere

Figure 1 – Crop rotation areas: a – with oats and b – with winter rye, c - application of organic fertilizer based on livestock waste in autumn 2021 with a Bergman spreader, aggregated on a John Deere tractor



Рисунок 2 – Патенты на способ обогащения почвы. Диплом и бронзовая медаль на Всероссийском конкурсе изобретателей «Архимед-2023»  
 Figure 2 – Patents for a method of soil enrichment. Diploma and bronze medal at the All-Russian competition of inventors "Archimedes-2023"

При термодинамических вычислениях использовалась математическая модель Голованова А.И., в которой образующийся плодородный слой почвы рассчитывался по количеству углерода [4].

### Результаты исследований и их обсуждение

Фактически содержание гумуса в почве через три года после внесения органического удобрения в севообороте с овсом выросло на  $0,1...0,2\pm 0,01\%$ , под озимой рожью –  $0,2-0,4\pm 0,01\%$ . По степени гумусированности почва перешла из класса меньше минимального содержания в следующий класс слабогумусированные. Разложению в результате биохимических и физико-химических окислительно-восстановительных процессов органических остатков и гумусовых веществ идет более медленно, поэтому минеральный азотный и фосфорный баланс и, соответственно, питание микроорганизмов, можно охарактеризовать как стабильные. Статистическая обработка данных, полученных при проведении исследований, достоверных различий при  $p > 0,05$  на вариантах опыта не показала. А на варианте 8 - внесение органического удобрения дозой 15 т/га под озимую рожь в севообороте обнаружено достоверное различие, что показано в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 - Коэффициенты Стьюдента t(05)

Пара вариантов	Гумус, овес	Гумус, озимая рожь
Var1 vs. Var3	существенного влияния не обнаружено	-2,13201
Var1 vs. Var4		-2,35339
Var1 vs. Var5		0,45883
Var1 vs. Var6		-2,65165
Var1 vs. Var7		-2,50217
Var1 vs. Var8		-2,13201
Var2 vs. Var3		-3,67423
Var2 vs. Var4		-3,47851
Var2 vs. Var5		0,49588
Var2 vs. Var6		-3,50000
Var2 vs. Var7		-4,15761
Var2 vs. Var8		-3,67423

Таблица 2 - Проверка различий между вариантами по гумусу

Пара вариантов	Среднее значение 1	Среднее значение 2	t(05) Коэфф Стьюдента	p	Ст. отклонение 1	Ст. отклонение 2
Var1 vs. Var3	3,47	3,80	2,13201	0,100	0,251661	0,100000
Var1 vs. Var4	3,47	3,87	2,35339	0,078	0,251661	0,152753
Var1 vs. Var5	3,47	3,00	0,45883	0,670	0,251661	1,743560
Var1 vs. Var6	3,47	3,97	2,65165	0,057	0,251661	0,208167
Var1 vs. Var7	3,47	3,87	2,50217	0,067	0,251661	0,115470
Var1 vs. Var8	3,47	3,80	2,13201	0,100	0,251661	0,100000

Var2 vs. Var3	3,50	3,80	3,67423	0,021	0,100000	0,100000
Var2 vs. Var4	3,50	3,87	3,47851	0,025	0,100000	0,152753
Var2 vs. Var5	3,50	3,00	0,49588	0,646	0,100000	1,743560
Var2 vs. Var6	3,50	3,97	3,50000	0,025	0,100000	0,208167
Var2 vs. Var7	3,50	3,87	4,15761	0,014	0,100000	0,115470
Var2 vs. Var8	3,50	3,80	3,67423	0,021	0,100000	0,100000

Использование математической детерминированной модели в оценке динамики гумуса (рисунок 3) показало в режиме онлайн для слоя 0-25 см имеющийся баланс органического вещества на вариантах с овсом и озимой рожью.

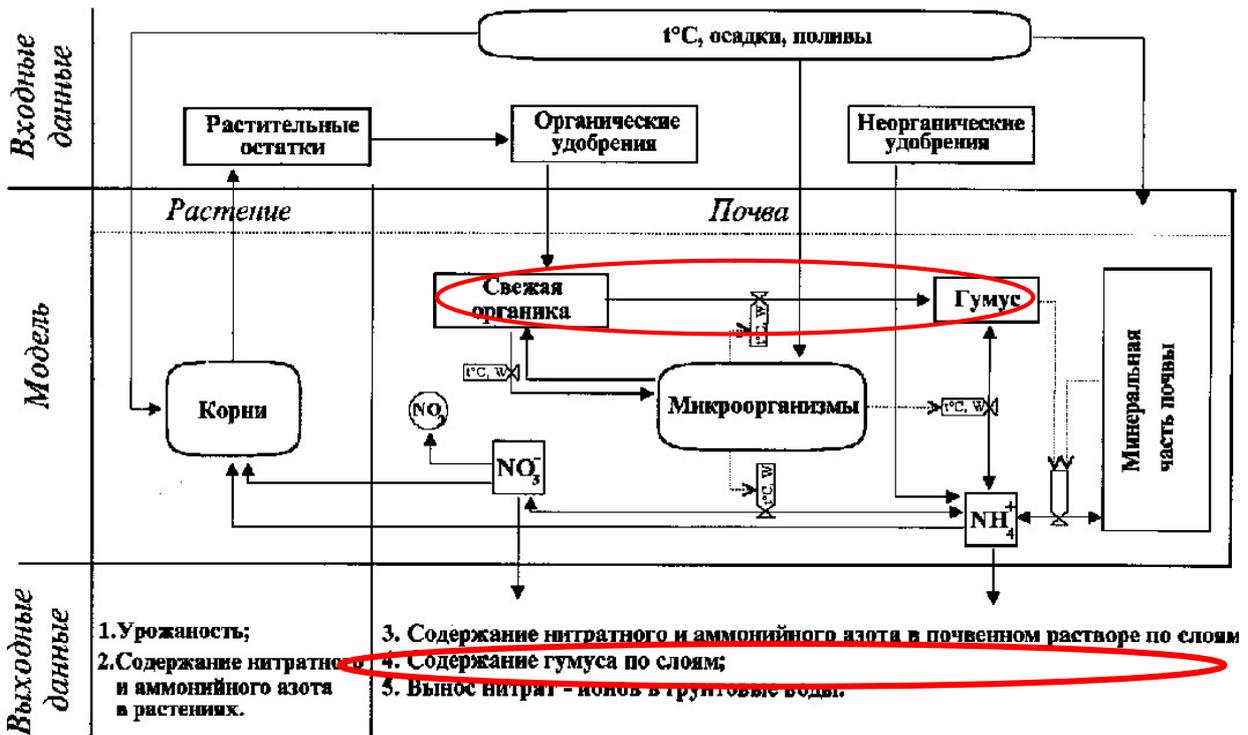


Рисунок 3 – Схема использованной в исследованиях модели

Figure 3 – Diagram of the model used in the research

$$M_p(i+1) = M_p(i) + M_{pp} \Big|_{i=0} + M_{pt} \Big|_{i=0} - J_p(i) \cdot \Delta\tau, \quad (1)$$

где  $M_p(i+1)$ ,  $M_p(i)$  - исходное и фактическое количество органики в почве;

$M_{pp}$  - величина поступления растительных остатков в почву;

$M_{pt}$  - используемые органические удобрения;

$J_p(i)$  - количество органического вещества, минерализованного бактериями и ферментами почвы за сутки, кг/сут·га.

$M_p(i+1)$  до опыта = в среднем 3,5 %

$M_p(i+1)$  в конце вегетационного периода 3-го года исследований под овсом = 3,6%

$M_p(i+1)$  в конце вегетационного периода 3-го года исследований под озимой рожью = 3,9%

Таким образом, эмпирические расчеты подтвердили полученные фактические данные о содержании гумуса в почве.

Термодинамический подход с использованием интегральных показателей оценил содержание гумуса следующим образом. Изменение концентрации гумуса рассчитывалось по зависимости А.И. Голованова (при начальном условии  $t = 0; G = G_0$ ):

$$G = A/B + (G_0 - A/B)\exp(-Bt). \quad (2)$$

С помощью уравнений рассчитана динамика запасов гумуса в черноземе выщелоченном при внесении органического удобрения на основе отходов животноводства и, кроме этого, рассчитана оценка величины сработки гумуса до опыта и в первый год (таблица 3).

Таблица 3 – Сработка запасов гумуса в почвенном слое 0-25 см

Внесение органического удобрения на основе отходов животноводства	Запасы гумуса $G_0$ т/га	Опад $F$ , т/га в год	Урожайность зерна $Y$ , т/га	$G_{НОВ}$	Промываемость почвы, мм	$G_{выл}$ т/га в год	$A$ , т/га в год	$B = A/G_0$ , год <sup>-1</sup>	$G = A - B/G$ т/га
до опыта	140	8,0	0,4	0,851	115	0,40	0,55	0,004	-0,6
овес	144	6,3	0,9	1,009	110	0,42	0,58	0,004	-0,5
озимая рожь	145	7,7	1,4	1,017	107	0,43	0,62	0,004	-0,4

Из данных таблицы 3 прослеживается снижение содержания гумуса, так как значения коэффициентов скорости его минерализации  $B_{мин}$  для Нечерноземья составляют до 0,007...0,009, что есть следствие, во-первых, выпадающих атмосферных осадков и, возможно, при неглубоком стоянии уровня грунтовых вод и наличии ливневых осадках, промывного режима почвы; во-вторых, наличия эрозии почвы, в-третьих, месторасположения севооборотного участка рядом с прудом, за счет чего может наблюдаться подпитка (рисунок 4). Так, до опыта и спустя три года после однократного внесения органического удобрения под овес на основе отходов животноводства содержание гумуса изменилось незначительно, а под озимую рожь – прослеживалась иная картина, в которой сработка запасов гумуса была ниже на 0,2 т/га по сравнению с предыдущими данными.

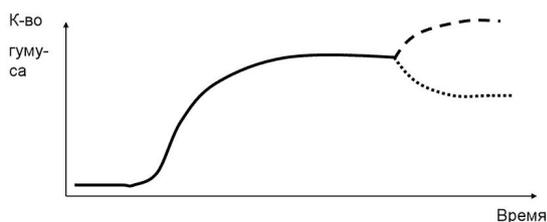


Рисунок 4 – Динамика гумуса в черноземе выщелоченном

- почва естественных экосистем
- ..... почва при распашке
- почва при внесении

Как видно из графиков на рисунке 4, распашка способствует потере гумуса (сплошная линия)  $\Delta G = 0,4...0,5$  т/га. На наш взгляд, эмпирические данные дают информацию и о природно-ресурсном потенциале агроэкосистемы, в котором вовлечение возобновляемых ресурсов будет способствовать

органического удобрения  
Figure 4 - Dynamics of humus in ordinary  
chernozems under anthropogenic loads

сохранению плодородия  
(пунктирная линия). Земледелие на  
основе ландшафтного подхода с  
научно-обоснованными системами  
удобрений, севооборотами,  
обработкой почвы и, конечно,  
регуливании водного режима  
позволит нарастить продуктивность  
используемых земель.

Действенным фактором в нашем случае явилось поступление в почву микроорганизмов, которые составили определенное сообщество с синергическими связями: собственно почвенная микробиота, микроорганизмы перепревшего конского навоза, микрофлоры препарата Байкал ЭМ-1 и торфа. В то же время факторы внешней среды отягощены присутствием естественной эрозии почвы вследствие расчлененности рельефа (что видно на представленных схемах севооборотных участков на рисунке 1), которая усугубляется сельскохозяйственной деятельностью. Степень эродированности чернозема выщелоченного была определена по градации, предложенной в работе Рожкова, при введении в расчеты коэффициента среднесуточного выпадения осадков, а также температурные условия территории и показатели зимних месяцев, средневзвешенной крутизны склона и другие факторы эрозионной опасности. Причины эрозии почвы были нами учтены и введены в расчеты, после чего получена оценка, чуть превышающая показатели I-й степени эродированности почвы.

### **Заключение**

Полученные данные о содержании гумуса в черноземе выщелоченном при внесении органического удобрения в виде отходов животноводства как при расчетах в натурных исследованиях, так и с применением эмпирических зависимостей в виде математической детерминированной модели и термодинамического балансового уравнения в слое 0-25 см показали малую вариабельность, что свидетельствует о высокой достоверности. Разница между экспериментальными данными и результатами на модели составили 0,1...0,4%, между экспериментальными данными и результатами термодинамического анализа – 0,4...0,6%, между расчетами модели и термодинамического анализа – 0,2...0,6% соответственно культурам – овсу и озимой ржи, что находится в пределах допустимой ошибки. В качестве основного метода изучения гумусового состояния почвы как открытой системы все три метода позволили полно учесть процессы трансформации вещественно-энергетических потоков в севооборотах.

### **Библиографический список**

1. Айдаров, И.П. Методология и количественная оценка экологической безопасности функционирования природно-антропогенных систем / И.П. Айдаров, Н.П. Карпенко, Д.А. Манукьян // Доклады РАСХН, 2003. – № 2. – С. 32-36. URL: <https://yandex.ru/search/?text=3.%09Айдаров+И.П.%2C+Карпенко>

+Н.П.%2C+Манукьян+Д.А.++Методология+и+количественная+оценка+экологической+безопасности+функционирования+природно-антропогенных+сис&lr=11&clid=2073074

2. Дергачева, М.И. Традиции и новаторство в учении о гумусе почв / М.И. Дергачева // Почвы и окружающая среда, 2021. - Том 4. - № 4. – С. 1-34. DOI: <https://doi.org/10.31251/pos.v4i4.172>

3. Мусаев, Ф.А. Органическое вещество серой лесной почвы в условиях длительного орошения сточными водами и его последствие / Ф.А. Мусаев, О.А. Захарова // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований, 2014. – №9-1. – С. 155-157. URL: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=5807>

4. Рожков, В.А. Новые информационные технологии в почвоведении; прогресс и заблуждения /В.А. Рожков // Вестник сельскохозяйственной науки, 1991. - №12.- С.31-38.

5. Рожков, В.А. Оценка эрозийной опасности почв /В.А. Рожков // Бюллетень почвенного института имени ВВ. Докучаева, 2007. - №59. – С.77-92.

6. Смольский, Е.В. Агрометеорология / Е. В. Смольский. – Брянск: Брянский государственный аграрный университет, 2022. – 122 с. URL:<https://www.bgsha.com/ru/book/989226/>

7. Бажина Н.Л., Дергачева М.И. Флуоресцентные свойства гуминовых кислот почв разных условий формирования // Почвы и окружающая среда. 2021. Том 4. № 4. e167. DOI: 10.31251/pos.v4i4.167

8. Сычев, В.Г. Радиационный мониторинг почв, продукции растениеводства в агроценозах юга России / В.Г. Сычёв, О.В. Колендо, О.А. Подколзин, М.С. Мельник// Плодородие, 2023. - № 6 (135). - С. 80-83. DOI: 10.25680/S19948603.2023.135.20

9. Уткин А. А. Химия минеральных удобрений / А.А. Уткин // Верхневолжский государственный агробиотехнологический университет. – 2021. – 91 с. URL: <https://e.lanbook.com/book/304709>

10. Шабанов, В.В. Введение в рациональное природопользование/ В.В. Шабанов. – М.:МГУП, 2007. – 300 с. URL: <http://elib.timacad.ru/dl/full/f47.pdf/download/f47.pdf>

### **References**

1. *Ajdarov, I.P. Metodologiya i kolichestvennaya ocenka ekologicheskoy bezopasnosti funkcionirovaniya prirodno-antropogennyh sistem / I.P. Ajdarov, N.P. Karpenko, D.A. Manuk'yan //Doklady RASHN, 2003. – № 2. – S. 32-36. URL: <https://yandex.ru/search/?text=3.%09Ajdarov> +I.P.%2C+Karpenko+N.P.%2C+Manuk'yan+D.A.++Metodologiya+i+kolichestvennaya+ocenka+ekologicheskoy+bezopasnosti+funkcionirovaniya+prirodno-antropogennyh+sis&lr=11&clid=2073074*

2. *Dergacheva, M.I. Tradicii i novatorstvo v uchenii o gumuse pochv / M.I. Dergacheva // Pochvy i okruzhayushchaya sreda, 2021. - Tom 4. - № 4. – S. 1-34. DOI: <https://doi.org/10.31251/pos.v4i4.172>*

3. Musaev, F.A. *Organicheskoe veshchestvo seroj lesnoj pochvy v usloviyah dlitel'nogo orosheniya stochnymi vodami i ego posledejstvie* / F.A. Musaev, O.A. Zaharova // *Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovanij*, 2014. – №9-1. – S. 155-157. URL: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=5807>
4. Rozhkov, V.A. *Novye informacionnye tekhnologii v pochvovedenii; progress i zabluzhdeniya* /V.A. Rozhkov // *Vestnik sel'skohozyajstvennoj nauki*, 1991. - №12.- S.31-38.
5. Rozhkov, V.A. *Ocenka erozionnoj opasnosti pochv* /V.A. Rozhkov // *Byulleten' pochvennogo instituta imeni VV. Dokuchaeva*, 2007. - №59. – S.77-92.
6. Smol'skij, E.V. *Agrometeorologiya* / E. V. Smol'skij. – Bryansk: Bryanskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet, 2022. – 122 s. URL:<https://www.bgsha.com/ru/book/989226/>
7. Bazhina N.L., Dergacheva M.I. *Fluorescentnye svojstva guminovyh kislot pochv raznyh uslovij formirovaniya* // *Pochvy i okruzhayushchaya sreda*. 2021. Tom 4. № 4. e167. DOI: 10.31251/pos.v4i4.167
8. Sychev, V.G. *Radiacionnyj monitoring pochv, produkcii rastenievodstva v agrocenozah yuga Rossii* / V.G. Sychyov, O.V. Kolendo, O.A. Podkolzin, M.S. Mel'nik// *Plodorodie*, 2023. - № 6 (135). - S. 80-83. DOI: 10.25680/S19948603.2023.135.20
9. Utkin A. A. *Himiya mineral'nyh udobrenij* / A.A. Utkin // *Verhnevolzhskij gosudarstvennyj agrobiotekhnologicheskij universitet*. – 2021. – 91 s.URL: <https://e.lanbook.com/book/304709>
10. Shabanov, V.V. *Vvedenie v racional'noe prirodopol'zovanie*/ V.V. Shabanov. – M.:MGUP, 2007. – 300 s. URL: <http://elib.timacad.ru/dl/full/f47.pdf/download/f47.pdf>