

**А.М. Соловьев, доктор сельскохозяйственных наук**

**В.А. Шевченко, член-корреспондент РАН**

*Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова  
РФ, 127550, г. Москва, ул. Большая Академическая, 44 корп. 2*

**Н.С. Матюк, доктор сельскохозяйственных наук**

**В.Д. Полин, кандидат сельскохозяйственных наук**

*Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева*

*РФ, 127550, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49*

E-mail: shevchenko.v.a@yandex.ru

УДК 631.81.036

DOI: 10.30850/vrsn/2020/1/30-33

## СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭНЕРГОЕМКОСТИ АГРОЭКОСИСТЕМ РАЗНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ

*Изучена энергоёмкость агроэкосистем разной интенсивности при длительном использовании (>100 лет) дерново-подзолистой почвы. Установлено, что минимальное содержание энергии гумуса и биофильных элементов характерно для деградированных агроэкосистем (1094 тыс. МДж/га), а максимальное – для сверхинтенсивных (1849 тыс. МДж/га). В интенсивных и сверхинтенсивных агроэкосистемах существенный вклад в энергетический потенциал почвы вносят органические и минеральные удобрения (24,17 тыс. МДж/га), в компромиссных – пожнивно-корневые остатки (98,8 тыс. МДж/га). Доказано, что ежегодные потери энергии за счет минерализации органического вещества возрастают по мере усиления антропогенного воздействия на почву и составляют: в компромиссных агроэкосистемах – 9,7 тыс. МДж/га; в сверхинтенсивных и интенсивных – 26,0...31,3, а в деградированных – 33,9 тыс. МДж/га. Максимальное суммарное снижение энергетического потенциала почвы за 102-летний период наблюдений характерно для деградированной – -42% и экстенсивной – -10% агроэкосистем. Дополнительное поступление энергии с органическими и минеральными удобрениями повышает энергоёмкость интенсивно используемого агроландшафта до уровня компромиссного, а сверхинтенсивного – увеличивает ее еще на 23%.*

**Ключевые слова:** деградированные, компромиссные, экстенсивные, интенсивные и сверхинтенсивные агроэкосистемы; энергетический потенциал; гумус, фосфор, калий, пожнивно-корневые остатки; баланс энергопотоков.

**A.M. Soloviev, Grand PhD in Agricultural sciences**

**V.A. Shevchenko, Corresponding member of RAS**

*A.N. Kostyakov All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering and Reclamation*

*RF, 127550, g. Moskva, ul. Bol'shaya Akademicheskaya, 44 korp. 2*

**N.S. Matyuk, Grand PhD in Agricultural sciences**

**V.D. Polin, PhD in Agricultural sciences**

*K.A. Timiryazev Russian State Agrarian University-MTAA*

*RF, 127550, g. Moskva, ul. Timiryazevskaya, 49*

E-mail: shevchenko.v.a@yandex.ru

## COMPARATIVE ASSESSMENT OF VARIOUS INTENSITY AGROECOSYSTEM ENERGY CONSUMPTION DURING SODDY PODZOLIC SOIL USAGE

*The energy consumption of different intensities agroecosystems with prolonged usage (> 100 years) of soddy podzolic soil was studied. It was found that the minimum content of humus energy and biophile elements is characteristic for degraded agroecosystems (1094 thousand of MJ/ha), and the maximum – for super-intense (1849 thousand of MJ/ha). In intensive and super intensive agroecosystem manure and mineral fertilizers (24.17 thousand of MJ/ha) make a significant contribution to the energy potential of the soil, and crop and root residues (98.8 thousand of MJ/ha) make a compromise. It is proved that the annual energy loss due to the mineralization of organic*

*matter increases with increasing anthropogenic impact on the soil and amounts to: in compromise agroecosystems – 9.7 thousand of MJ/ha; in super-intensive and intensive – 26.0 ... 31.3, and in degraded – 33.9 thousand of MJ/ha. The maximum total decrease in the energy potential of the soil over a 102-year observation period is characterized for degraded –42% and extensive –10% agroecosystems. The additional revenues of energy with organic and mineral fertilizers increases the energy intensity of the intensively used argolandscape to the level of a compromise, and super-intensive increases it by another 23%.*

**Key words:** *degraded, compromise, extensive, intensive and super-intensive agroecosystems; energy potential; humus, phosphorus, potassium, crop and root residues; balance of energy flows.*

Агробиоценозы на всех этапах производства продукции растениеводства, наряду с использованием солнечной энергии, для поддержания своих функций и снижения последствий ограничивающего воздействия неблагоприятных экологических факторов, потребляют большое количество дополнительной антропогенной энергии в виде органических и минеральных удобрений, химических средств защиты, мелиоративных мероприятий, топлива, электроэнергии и других энергоносителей. Анализируя и оценивая эффективность агроэкосистем на биоэнергетической основе управлять этими процессами возможно. [1] Особое место в оценке отводится энергетическим функциям органического вещества почвы [2], определяющим в конечном итоге ее плодородие и экологическую устойчивость. Для выявления потенциала почвенных ресурсов, изучения экологической емкости и биоэнергетического потенциала агроландшафта необходимо определить энергопотенциал органического вещества почвы. В этой связи, значительный научный и практический интерес представляет изучение несбалансированных по его содержанию агроэкосистем с интенсивным применением минеральных удобрений. [4, 5, 7]

Цель исследований – изучение энергоемкости агроэкосистем разной интенсивности при длительном использовании дерново-подзолистой почвы.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Работу проводили в длительном полевом опыте РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, заложенном профессором А.Г. Дояренко в 1912 году.

Рассчитывали энергетический эквивалент органического вещества и запасы биофильных элементов почвы; определяли энергетические затраты на минеральные и органические удобрения, массу и энергетический эквивалент растительных остатков; анализировали энергию, отчуждаемую из агроэкосистем в процессе их функционирования; рассчитывали баланс потоков энергии в различных агроэкосистемах.

Объекты исследований – агроэкосистемы, различающиеся по продуктивности, соотношению вложенных и отчужденных антропогенных субсидий:

– *деградированные* – поле 105-летнего чистого пара без удобрений и известки с содержанием органического углерода на уровне квазиравновесного состояния, обеспеченного гранулометрическим составом (0,5...0,6%  $C_{орг.}$ ) и очень низкими запасами гумуса (36,6 т/га) с соотношением энергии, накопленной сорной растительностью к потерям таковой при минерализации гумуса 1:9. Продуктивность 3,2 тыс. МДж/га;

– *компромиссные* (приближенные к естественным) – 78-летняя травянистая залежь с содержанием  $C_{орг.}$  1,4...1,5%, запасами гумуса 59,6 т/га и соотношением накопленной энергии биоценозом многолетних трав к энергии минерализации гумуса 10:1. Продуктивность 92,8 тыс. МДж/га;

– *экстенсивные* – монокультуры зерновых, технических (лен) и пропашных культур (картофель) на фоне без удобрений и известки с содержанием  $C_{орг.}$  0,8...0,9%, запасами гумуса 56,2 т/га и соотношением поступившей энергии с растительными остатками к отчужденной с минерализацией гумуса, основной и побочной продукцией 1:2. Продуктивность 55,9 тыс. МДж/га;

– *интенсивные* – севооборотные участки с биоразнообразием сельскохозяйственных растений с 1950 года после 38-летнего чистого пара на фоне внесения  $N_{100}P_{150}K_{120}$  и 20 т/га навоза ежегодно: соотношение поступившей энергии с растительными остатками, минеральными и органическими удобрениями к ее потерям, за счет минерализации гумуса, и отчуждению с основной и побочной продукцией 1:17, содержание  $C_{орг.}$  1,2...1,3% и запасы гумуса в пахотном слое – 66,7 т/га. Продуктивность 101,3 тыс. МДж/га;

*сверхинтенсивные* – участки зернопропашного севооборота (чистый пар – озимая рожь – картофель – ячмень с подсевом клевера – клевер – лен) на идентичном фоне питания с 1912 года  $C_{орг.}$  1,1...1,2%, запасы гумуса – 79,8 т/га с соотношением между вышеотмеченными компонентами 1:1,5. Продуктивность 125,6 тыс. МДж/га.

Количество гумуса определяли по методу Тюрина в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26213), фракционный его состав исследовали ускоренным пирофосфатным методом М.М. Кононовой и Н.П. Бельчиковой в изложении В.Г. Минеева с сотрудниками. [6] Содержание углерода в почве изучали по методу Тюрина в модификации ЦИНАО. Баланс энергетических потоков рассчитывали по методике В.П. Сулягина и др. [7]

## РЕЗУЛЬТАТЫ

На основании расчетов энергетического эквивалента органического вещества и запасов биофильных элементов почвы установлено, что наибольшее количество энергии накапливается в запасах гумуса. Оно колеблется от 855,5 тыс. МДж/га в деградированных до 1835 тыс. МДж/га в сверхинтенсивных агроэкосистемах. Такая же закономерность наблюдается и в накоплении энергии в запасах биофильных элементов в пахотном слое почвы.

Потери энергии органического вещества и биофильных элементов как в естественных экосистемах, так и в агроэкосистемах имеют горизонтальное и вертикальное направления.

В южно-таежной зоне при промышленном типе водного режима вектор энергетического потока направлен в большей степени вертикально вниз. Эти потери происходят из-за разложения органического вещества и миграции элементов питания вследствие биологических, физико-химических и химических процессов, которые могут использоваться почвенной биотой для построения своего тела, а в дальнейшем и корневой системой растений. Небольшая часть (5...10%) в зависимости от гранулометрического состава почвы вымывается в грунтовые воды (табл. 1).

Таблица 1.

**Энергия почвы, накопленная за предшествующие годы в запасах гумуса и биофильных элементов**

Агроэкосистема	Гумус		Подвижный фосфор		Обменный калий		Сумма, тыс. МДж/га
	запасы, т/га	энерг. сод., тыс. МДж/га	запасы, т/га	энерг. сод., тыс. МДж/га	запасы, т/га	энерг. сод., тыс. МДж/га	
Компромиссная (контроль)	59,6	1308	0,57	7,19	0,26	1,91	1398
Деградированная	37,1	855	0,13	1,58	0,27	2,26	1094
Экстенсивная	56,2	1293	0,20	2,53	0,10	0,89	1296
Интенсивная	59,2	1362	0,89	11,2	0,49	4,12	1377
Сверхинтенсивная	79,8	1835	0,88	11,1	0,35	2,89	1849

Таблица 2.

**Поступление энергии с удобрениями и пожнивно-корневыми остатками**

Удобрения	Масса израсходованных материалов, кг		Энергетический эквивалент, МДж/кг		Суммарное поступление энергии, тыс. МДж/га
	физическая	д.в.	физический	д.в.	
Азотные	345	100	27,6	86,8	8,680
Фосфорные	326	150	6,4	12,6	1,890
Калийные	200	120	20,8	8,3	0,996
Навоз	20	6,2	630	20,3	12,60
Всего с удобрениями в агроэкосистему					24,17
	деградированную	0,22	-	-	3,2
	компромиссную	6,27	-	-	92,8
Пожнивно-корневые	экстенсивную	1,23	-	14,8	18,2
остатки	интенсивную	2,23	-	-	33,0
	сверхинтенсивную	3,22	-	-	47,7

Среди изученных агроэкосистем минимальным содержанием энергии гумуса и биофильных элементов (1094 тыс. МДж/га) характеризуются деградированные агроэкосистемы, а наиболее высоким (1849 тыс. МДж/га) – сверхинтенсивные.

Норма внесения минеральных удобрений –  $N_{100}P_{150}K_{120}$  д.в., навоза – 20 т/га. Следовательно, в интенсивные и сверхинтенсивные агроэкосистемы ежегодно поступает 8,68 тыс. МДж/га с азотными; 1,89 – фосфорными, 0,996 – калийными удобрениями и 12,6 тыс. МДж/га – с навозом. Суммарное поступление энергии – 24,17 тыс. МДж/га (табл. 2).

Пожнивно-корневые остатки также значительно влияют на энергетический потенциал по-

чвы. Согласно исследованиям максимальное поступление энергии от остатков (92,8 тыс. МДж/га) отмечено в компромиссных агроэкосистемах с замкнутым циклом круговорота органических веществ, а минимальное (3,2 тыс. МДж/га) – в деградированных.

При функционировании различных агроэкосистем потери энергии происходят как из-за минерализации органического вещества, так и вследствие отчуждения с основной и побочной продукцией агрофитоценозов. В наших исследованиях потери энергии за счет минерализации определялись интенсивностью антропогенного воздействия на почву, были наименьшими в компромиссных агроэкосистемах с замкнутым круговоротом биофильных элементов (9,7 тыс. МДж/га). По мере усиления внешнего воздействия на агроэкосистемы они возрастали до 26...31,3 тыс. МДж/га в интенсивных и сверхинтенсивных, а в деградированных – до 33,9 тыс. МДж/га (табл. 3).

Важнейший фактор снижения энергоёмкости агроэкосистем – отчуждение энергии с основной и побочной продукцией, рассчитанной по энергетическим эквивалентам. Максимальное накопление и отчуждение энергии с продукцией отмечается в сверхинтенсивных агроэкосистемах и составляет 77,9 тыс. МДж/га, в интенсивных оно снижается на 12,3%, экстенсивных – на 51,6%.

Установлено, что естественные травянистые биоценозы, которым присущ замкнутый круговорот органических веществ и замедленная скорость их разложения по совокупной энергоёмкости превосходят агрофитоценозы различной интенсивности (табл. 4).

Наибольшие потери энергии за 105-летний период (42%) отмечаются в деградированной и экстенсивной (10%) агроэкосистемах. Дополнительное поступление энергии с минеральными и органическими удобрениями повышает энергоёмкость почвы интенсивно используемого агроландшафта до уровня компромиссного, а сверхинтенсивного – увеличивает ее еще на 23%. В общей структуре энергоёмкости различных агробиоценозов приходится на накопленную в предшествующие годы энергию органического вещества 90...95%, на энергию подвижных форм фосфора – 2,6...9,1%, обменного калия – 0,6...2,6, ежегодно вносимых удобрений – 0,8...1,0, на растительные остатки – 1,1...3,0 и накопленную агрофитоценозом биомассу растений – 2,8...4,1%.

Также отмечено, что с усилением уровня антропогенного воздействия снижается энергетический эквивалент участия органического вещества с 91,7% деградированных до 84,8% интенсивных агробиоценозов, при этом доля участия энергии биофильных элементов вырастает в 3,2...3,6 раза.

Таблица 3.

**Ежегодное отчуждение энергии из различных агроэкосистем (2012–2015)**

Агроэкосистема	Минерализация гумуса				Энергия продукции		Всего отчуждено, тыс. МДж/га
	Исходные запасы т/га	Коэфф. минерализации	Потери		основной	побочной	
			т/га	МДж/га			
Компромиссная	59,6	0,8	0,48	9,7	-	-	9,7
Деградированная	37,1	4,5	1,67	33,9	-	-	33,9
Экстенсивная	56,2	2,2	1,24	25,2	33,0	4,7	62,9
Интенсивная	59,2	2,6	1,54	31,3	54,9	13,4	99,6
Сверхинтенсивная	79,8	1,6	1,28	26,0	62,8	15,1	103,9

**Таблица 4.**  
**Баланс энергопотоков в различных агроэкосистемах**

Компоненты агроэкосистемы	Агроэкосистема				
	компромиссная	деградированная	экстенсивная	интенсивная	сверхинтенсивная
<i>I. Накопленное за 102 года в запасах</i>					
Гумус	1307,8	854,5	1292,6	1361,6	1835,4
Подвижный фосфор	7,2	1,6	2,5	11,2	11,1
Обменный калий	2,3	1,9	0,9	4,1	2,9
<i>Всего</i>	1317,3	858,0	1296,0	1376,9	1849,4
<i>II. Ежегодное</i>					
Поступление с					
удобрениями	-	-	12,6	24,2	24,2
растительными остатками	92,8	3,2	18,2	33,0	47,7
<i>Всего</i>	1410,1	861,2	1326,8	1434,1	1921,3
<i>III. Ежегодное</i>					
Отчуждение с					
минерализацией гумуса	9,7	33,9	25,2	31,3	26,0
основной продукцией	-	-	33,0	54,9	62,8
побочной продукцией	-	-	4,7	13,4	15,1
<i>Всего</i>	9,7	33,9	62,9	99,6	103,9
Энергетический баланс	<u>1400,4</u>	<u>827,3</u>	<u>1263,9</u>	<u>1334,5</u>	<u>1817,4</u>
	100	58	90	95	123

## ВЫВОДЫ

Минимальным содержанием энергии гумуса и биофильных элементов характеризуются деградированные агроэкосистемы (1094 тыс. МДж/га), а максимальным (1849 тыс. МДж/га) – сверхинтенсивные.

В интенсивных и сверхинтенсивных агроэкосистемах существенный вклад в энергетический потенциал почвы (24,17 тыс. МДж/га) вносят органические и минеральные удобрения, в компромиссных значительную роль играют пожнивно-корневые остатки (92,8 тыс. МДж/га).

Ежегодные наименьшие потери энергии вследствие минерализации органического вещества в компромиссных агроэкосистемах с замкнутым круговоротом биофильных элементов (9,7 тыс. МДж/га). По мере усиления внешнего воздействия на агроэкосистемы они возрастают до 26,0...31,3 тыс. МДж/га в сверхинтенсивных и интенсивных, в деградированных – до 33,9 тыс. МДж/га.

Максимальное суммарное снижение энергетического потенциала почвы за 105-летний период наблюдений с учетом минерализации гумуса, отчуждения энергии с основной и побочной продукцией характерно для деградированной (-42%) и экстенсивной (-10%) агроэкосистем. Дополнительное поступление энергии с органическими и минеральными удобрениями повышает энергоёмкость почвы интенсивно используемого агроландшафта до уровня компромиссного, а сверхинтенсивного – увеличивает ее еще на 23%.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Володин, В.М. Экологические основы оценки и использования плодородия почв [Оценка потенциального и реального плодородия и систем земледелия на биоэнергетической основе] // В.М. Володин – М.: ЦИНАО, 2000. – 334 с.
2. Масютенко, Н.П. Структура чернозема типичного и содержание органического углерода и лабильных гумусовых веществ в почвенных агрегатах./ Н.П. Масютенко, Т.И. Панкова, Б.М. Когут. – Курск: ВНИИЗиЗ-ПЭ РАСХН, 2008. – 34 с.
3. Минеев, В.Г. Практикум по агрохимии Учебное пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. под ред. В.Г. Минеева. / В.Г. Минеев, В.Г. Сычев, О.А. Амелянчик и др. – М.: Изд-во МГУ, 2001. С. 230–231.
4. Коваленко, Е.В. Агрохимические и агроэкологические проблемы повышения плодородия почвы при использовании удобрений / Е.В. Коваленко//Материалы международной научно-практической конференции, посвященной 150-летию со дня рождения академика Д.Н. Прянишникова. – Львов, 2015. – С. 103–112.
5. Сычев, В.Г. Современное состояние плодородия почв и основные аспекты его регулирования / В.Г. Сычев – М.: РАН, 2019. – С. 19–34.
6. Сутягин, В.П. Системный анализ энергетических потоков в земледелии / В.П. Сутягин, А.М. Туликов, Т.И. Сутягина // Учебное пособие. – Тверь. Изд-во «Агросфера» Тверской ГСХА. – 2008. – 140 с.
7. Ramakumar, R. Renewable energy sources and rural development in developing countries / R. Ramakumar, W.L. Hughes // LEEE Trans Educ. – 2001. – V. 2, 4. № 3. – P. 242–251.

## LIST OF SOURCES

1. Volodin, V.M. E`kologicheskie osnovy` ocenki i ispol'zovaniya plodorodiya pochv [Ocenka potencial'nogo i real'nogo plodorodiya i sistem zemledeliya na bioe`nergeticheskoy osnove] // V.M. Volodin – M.: CINAO, 2000. – 334 s.
2. Masyutenko, N.P. Struktura chernozema tipichnogo i sodержanie organicheskogo ugleroda i labil'ny'x gumusovy'x veshhestv v pochvenny'x agregatax./ N.P. Masyutenko, T.I. Pankova, B.M. Kogut. – Kursk: VNIIZiZ-PE` RASXN, 2008. – 34 s.
3. Mineev, V.G. Praktikum po agroximii Uchebnoe posobie. – 2-e izd., pererab. i dop. pod red. V.G. Mineeva. / V.G. Mineev, V.G. Sy`chev, O.A. Amel'yanchik i dr. – M.: Izd-vo MGU, 2001. S. 230–231.
4. Kovalenko, E.V. Agroximicheskie i agroekologicheskie problemy` povыsheniya plodorodiya pochvy` pri ispol'zovanii udobrenij / E.V. Kovalenko//Materialy` mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, posvyashhennoj 150-letiyu so dnya rozhdeniya akademika D.N. Pryanishnikova. – L`vov, 2015. – S. 103–112.
5. Sy`chev, V.G. Sovremennoe sostoyanie plodorodiya pochv i osnovny'e aspekty` ego regulirovaniya / V.G. Sy`chev – M.: RAN, 2019. – S. 19–34.
6. Sutyagin, V.P. Sistemny`j analiz e`nergeticheskix potokov v zemledelii / V.P. Sutyagin, A.M. Tulikov, T.I. Sutyagina // Uchebnoe posobie. – Tver`. Izd-vo «Agrosfera» Tverskoj GSXA. – 2008. – 140 s.
7. Ramakumar, R. Renewable energy sources and rural development in developing countries / R. Ramakumar, W.L. Hughes // LEEE Trans Educ. – 2001. – V. 2, 4. № 3. – P. 242–251.