

УДК 631.417.2:631.524.84:631.445.152

ПРОДУКТИВНОСТЬ РАСТЕНИЙ БИОЦЕНОЗОВ И ПРОЦЕССЫ ГУМУСОНАКОПЛЕНИЯ В ЭРОДИРОВАННЫХ ЛУГОВО-ЧЕРНОЗЕМНЫХ ПОЧВАХ

© 2024 г. В. М. Назарюк¹, Ф. Р. Калимуллина^{1,*}

¹Институт почвоведения и агрохимии СО РАН
630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 8/2, Россия
*E-mail: kalimullina@issa-siberia.ru

В многолетних опытах содержание гумуса в природных и агроэкосистемах на лугово-черноземных почвах зависело от видового разнообразия растений, состояния растительного покрова, обработки пахотного горизонта и его эродированности. За 10-летний период наблюдений содержание гумуса в пахотной почве относительно исходной снизилось на 4.5%, под луговыми травами, напротив, возросло на 22%. В дальнейшем за 20-летнее учетное время процессы гумусонакопления в обрабатываемой почве изменялись мало. Среди природных экосистем наиболее активно процессы аккумуляции гумуса происходили в гумусово-аккумулятивном (А) и переходном горизонтах (АВ) под осиновым лесом. В эродированных почвах резко снижались запасы гумуса и питательных элементов, вызывавших уменьшение продуктивности луговых трав. Установлено, что для существенного накопления гумуса (до 8%) в неэродированной почве 100-летнего периода функционирования экосистемы необходимо сочетать поступающий углерод в виде лесной подстилки и корней с биомассой многолетних луговых трав.

Ключевые слова: экосистема, гумусообразование, почвенный профиль, протеиногенные элементы, продуктивность растений.

DOI: 10.31857/S0002188124090015, **EDN:** CDCLEX

ВВЕДЕНИЕ

Гумусовое состояние эродированных почв как одного из важных критериев пригодности территории к интенсивному земледелию во многом зависит от устойчивости пахотного фонда к водной эрозии [1, 2]. Проблема сохранения гумуса в почве в интенсивном земледелии является актуальной во всех регионах России [3–6]. Особое внимание уделяется сохранению почвенного плодородия в растениеводстве при выращивании сельскохозяйственных культур на разнообразных типах черноземов [7] и серых лесных почвах [8]. Среди функционирующих экосистем в почвенном покрове наиболее изученными оказались неэродированные лугово-черноземные почвы. Обычно в таких почвах горизонт А чаще всего находится на глубине 0–30 см, а В – 50–75 см, и в них отмечено относительно высокое содержание гумуса. Обращает на себя внимание особенность гумусовых кислот, связанных с кальцием; обнаружено широкое соотношение $C_{ГК} : C_{ФК}$ [9]. Среди этих почв практически не исследованными оказались эродированные лугово-черноземные почвы, хотя они наиболее подвержены процессам водной эрозии и требуют проведения перманентного мониторинга почвенного

плодородия. В таких почвах до сих пор непонятна роль лесной подстилки, многолетних трав и минерального питания в процессе гумусообразования. Эродированные почвы с недостаточным содержанием гумуса больше всего распространены в районах интенсивной и длительной распашки земель на склоновых и орошаемых участках [10, 11].

Учитывая сложность формирования этих почв и важность их использования в земледелии, возникает необходимость в разработке системы минерального питания, обеспечивающей высокую продуктивность растений, повышение плодородия почв и сохранение окружающей среды. Установлено, что использование удобрений в экономически обоснованных дозах позволяет существенно повысить урожайность сельскохозяйственных культур, не вызывая серьезных экологических последствий [12, 13]. Однако есть работы, которые показали, что применение минеральных удобрений в агроценозах без достаточного экологического обоснования не обеспечивает требуемую устойчивость производства растительной продукции и их окупаемость [14, 15], наносит ощутимый вред окружающей среде [16, 17], что требует выяснения

причин слабого отклика растений на усиленное минеральное питание и разработки путей улучшения экологической ситуации в агроэкосистемах. Пока явно недостаточно проведено исследований на эродированных почвах, показывающих специфику регулирования их плодородия, выяснение последствий многолетнего антропогенного воздействия, трансформации минеральных удобрений и возможности усвоения питательных элементов растениями в агроценозах.

Цель работы – изучение гумусового состояния эродированных лугово-черноземных почв в условиях длительной антропогенной нагрузки и выяснение возможности интенсификации продукционного процесса путем оптимизации минерального питания растений.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Многолетнее исследование проводили в течение 20 лет на территории Присалаирья (юго-восток Западно-Сибирской равнины) после вывода земельного участка из сельскохозяйственного севооборота. Объекты исследования, связанные с изучением минерального питания мелколистных деревьев в период зарастания участка, находились в пределах не более 1 га.

Микрополевые опыты с луговыми травами проводили на делянках, обернутых полиэтиленовой пленкой на глубину пахотного слоя, общей площадью 1 м² и учетной – 0.25 м². Минеральные удобрения вносили в виде N_м, P_{ст} и K_х. Биомассу травянистых растений измеряли во время укосной спелости с помощью специальной рамки 50 × 50 см, учет проводили во всех вариантах опыта в четырехкратной повторности. Возраст деревьев 10 и 20 лет включительно определяли непосредственно в природных экосистемах

на основе визуального наблюдения при проведении агрохимических исследований. Столетний возраст березовых деревьев выясняли при помощи измерений длины окружности наблюдаемых экземпляров на высоте 1 м и расчетных, связанных между собой определенной (линейной) математической зависимостью. Все фенологические измерения в отношении березовых деревьев проводили с точностью до 1 мм. Полагаем, что в результате соответствия параметров известных лесных экосистем рассчитанным с помощью определенной математической зависимости данным можно в одних и тех же почвенно-экологических условиях с приемлемой долей точности оценить возраст березовых деревьев.

Аналитическую работу выполняли следующими методами: содержание углерода, азота почвы и растений определяли на элементном CHN-анализаторе фирмы “PerkinElmer, Inc.”, США. Зольные питательные элементы в почве определяли на основе следующих методов: легкоподвижный фосфор – по Карпинскому–Замятиной, органический фосфор – по разности между его валовым и минеральным содержанием по Хейфиц, валовой фосфор – по Гинзбург и др., легкообменный калий – в 0.005 н. CaCl₂, обменный – в 1 н. CH₃COONH₄ (по Масловой), необменный – в 2 н. HCl (по Пчелкину), нитратный азот – потенциометрическим методом с использованием ион-селективного электрода, запасы питательных элементов в почве определяли с учетом ее плотности сложения [18]. В лесных экосистемах доминантным видом были береза повислая и пушистая (*Beta verrucosa*, *B. pubescens* L.), осина (*Populus tremula* L.), сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.), ива ломкая (*Salix fragilis* L.).

Таблица 1. Изменение содержания гумуса в эродированных лугово-черноземных почвах, сформированных в природных и агроэкосистемах, в течение 10 лет

| Вариант | Почва | | | |
|--------------------------|-----------------|------|---------------|------|
| | неэродированная | | эродированная | |
| | 1 | 2 | 1 | 2 |
| Исходное содержание | 7.54 | 166 | 4.01 | 83.4 |
| Пашня | 5.32 | 111 | 3.87 | 80.5 |
| Многолетние травы | 6.81 | 113 | 4.19 | 87.1 |
| березовый | 5.43 | 142 | 3.25 | 67.6 |
| Лес осиновый | 7.09 | 148 | 4.41 | 91.7 |
| сосновый | 4.27 | 88.8 | 3.92 | 81.5 |
| Кустарник | 5.52 | 109 | 4.76 | 99.0 |
| <i>НСР</i> ₀₅ | 0.18 | 3 | 0.15 | 2.6 |

Примечание. В графе 1 – содержание гумуса, %; 2 – запасы гумуса, т/га.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование, проведенное в условиях лесостепной зоны, показало, что содержание гумуса в лугово-черноземной почве зависело от растительного покрова, агротехнической обработки пахотного горизонта и эродированности почвы (табл. 1).

Значительное количество гумусовых веществ, аккумулярованное в неэродированной почве за 10-летний период, отмечали в пахотном слое при возделывании многолетних трав, которое достигало 6.8%. Самое высокое содержание гумуса выявлено в почве под осиновым лесом. Вероятно, это связано с тем, что листовой аппарат осинового леса в условиях лесостепной зоны Западной Сибири разворачивался позднее на 5–10 сут, почва в это время была более холодной, что сказывалось на процессах минерализации органических веществ и в конечном итоге отражалось на гумусообразовании. Самое низкое содержание гумуса в почве отмечали в экосистеме соснового леса. Сформированная органическая масса, возникшая в виде подстилки из опавшей хвои, была обеднена азотом, но обогащена углеродом, что сказывалось на значительных и асимметрично завышенных потерях углерода в процессе гумусонакопления.

Невысокое содержание гумуса отмечали также в экосистемах кустарника и березового леса. Образующаяся подстилка от опада этих деревьев минерализовалась довольно быстро и в конце вегетационного периода распадалась практически полностью. В целом снижение содержания гумуса за 10-летний период отчетливо наблюдали как в неэродированной, так и в эродированной пахотных почвах, а также в биоценозах под березовым и особенно сосновым

лесом. Отсюда видно, что для этих почв, при относительно ускоренном их зарастании лесной растительностью, добиться значительного повышения плодородия, обусловленного увеличением содержания гумуса, наиболее сложно. Исследованный период зарастания неиспользованной территории березовым лесом не дает желаемого эффекта, необходим иной источник поступления питательных веществ в почву. Разнообразие экосистем при зарастании эродированных почв травянистыми и лесными растениями отражается на запасах валового гумуса. Они были минимальными среди неэродированных почв под сосновым и березовым лесом и максимальными под осиновым и кустарником ивы ломкой.

При изучении распределения гумуса в почвенном профиле выявлено самое высокое его содержание, которое наблюдали в гумусово-аккумулятивном горизонте (рис. 1).

Затем с глубиной в почвенном профиле, начиная от горизонта А, регистрировали постепенное снижение содержания гумусовых веществ, отмечавшееся вплоть до переходного горизонта АВ. Резкое снижение содержания гумуса в почве выявлено в иллювиальном горизонте В₁, хотя его в небольшом количестве наблюдали даже на глубине 90–100 см (гор. В₂). В эродированной почве распределение гумуса очень сильно зависело от процессов водной эрозии, величина его содержания по сравнению с неэродированной почвой была значительно меньше по всему почвенному профилю. К тому же в пахотном горизонте А + АВ и переходном АВ (слой 0–40 см) различия были менее значительными. Заметим, что на автоморфных почвах резкое снижение содержания гумуса в условиях Приобья отмечали обычно на глубине

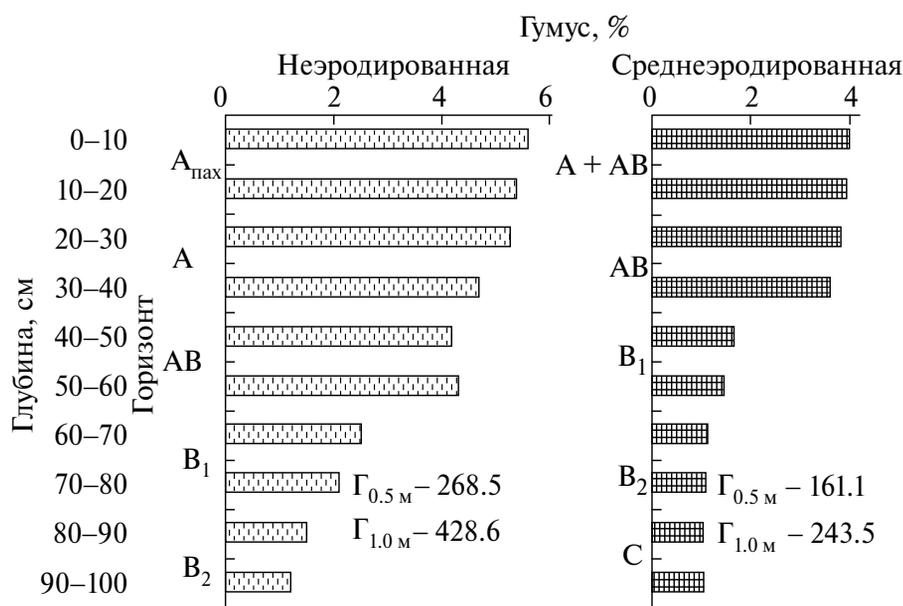


Рис. 1. Влияние водной эрозии на содержание, распределение и запасы гумуса в лугово-черноземных почвах. $\Gamma_{0.5\text{ м}}$ и $\Gamma_{1.0\text{ м}}$ – запасы гумуса в слоях 0.5 и 1.0 м, т/га.

30–40 см, реже – в пределах пахотного слоя [19]. Различия в распределении гумусовых веществ обусловлены прежде всего температурным и водным режимами, спецификой развития корневой системы по профилю почвы [20]. В изученной нами полугидроморфной эродированной почве закономерность распределения гумуса в почвенном профиле имела свои отличия. Они были обусловлены прежде всего неодинаковой плотностью сложения, созданием порового пространства и более низким содержанием органического вещества по всем почвенным горизонтам.

Различное распределение гумусовых веществ по профилю почв сказалось и на валовых запасах гумуса в полуметровом и метровом слоях почв, которые достигли >200 и 400 т/га. Снижение этих запасов в неэродированной лугово-черноземной почве происходило довольно равномерно, тогда как в эродированной значительно меньше запасалось гумуса, особенно в иллювиальном горизонте В₁. В частности, запасы гумуса в эродированной почве уступали неэродированной в полуметровом слое в 1.7 раза и в метровом – примерно на такую же величину.

В результате 20-летнего зарастания пашни луговыми травами в неэродированной почве заметно повысилось содержание гумуса в слое 0–20 см до 5.48% (табл. 2).

В более глубоких слоях обнаружено уже практически одинаковое содержание гумусовых веществ, которое свидетельствовало о мало различающемся влиянии органоминеральной основы пахотного и подпахотного слоев. Процессы водной эрозии вызвали в среднеэродированной почве снижение содержания гумуса во всех изученных горизонтах, хотя более четкая дифференциация в отношении органического вещества произошла в слое 20–40 см. Самое значительное накопление гумуса в неэродированной почве выявилось в результате 100-летнего зарастания почвенного покрова березовым лесом при

совместном воздействии с луговыми травами. Содержание гумуса на этом участке составило в среднем 7.8%, в отдельных случаях оно достигало более 8%. Достаточно высокая обогащенность почвы органическим веществом отмечена в среднеэродированной почве при самом длительном (100-летнем) функционировании экосистемы березового леса. Таким образом, в целях существенного накопления гумуса в лугово-черноземных почвах при их зарастании необходимо создать условия, при которых поступление углерода с подстилкой березового леса сочеталось бы с биомассой луговой травянистой растительности.

Исследование специфики полугидроморфных почв выявило не только относительно высокое содержание гумуса, но и соответствующую обогащенность пахотного слоя протеиногенными элементами [21]. В проведенных экспериментах с лугово-черноземными почвами показано, что при распределении макроэлементов по изученным почвенным горизонтам в отсутствие водной эрозии отмечалась также заметная аккумуляция валовых количеств азота, фосфора и калия. При этом процессы водной эрозии заметно снижали интенсивность обогащения почвы макроэлементами, что отражалось на обеспеченности растений питательными элементами за счет почвенных запасов. На плодородие почвы значительное влияние оказывала ее зольность. Она снижалась в более глубоких почвенных горизонтах, что, вероятно, было связано со снижением содержания гумуса в почве. По мере уменьшения содержания летучих элементов (углерода, азота, кислорода, водорода), входящих в состав органического вещества, уменьшалась и зольность почвы. Однако при повышении температуры в случае прокаливании почвенных образцов до 900°C наблюдали некоторое увеличение величины этого показателя. Такое явление, очевидно, было связано с различным присутствием устойчивых к высокой температуре фенольных соединений, входящих в состав гумуса.

Таблица 2. Влияние водной эрозии на элементный состав почвы, % на сухую массу

| Глубина, см | Содержание гумуса в почве | | N | P | K | Зольность при t, °C | |
|--------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|------|------|------------|---------------------|------|
| | под луговыми травами через 20 лет | березового леса спустя 100 лет | | | | 450 | 900 |
| Неэродированная | | | | | | | |
| 0–20 | 5.48 | 7.76 | 0.22 | 0.16 | 2.19 | 10.8 | 12.4 |
| 20–40 | 5.43 | 6.55 | 0.21 | 0.10 | 1.87 | 9.5 | 10.5 |
| <i>HCP</i> ₀₅ | 0.31 | 0.46 | 0.02 | 0.01 | –//– | 0.2 | 0.3 |
| Среднеэродированная | | | | | | | |
| 0–20 | 2.45 | 6.59 | 0.15 | 0.11 | Нет данных | 7.6 | 8.3 |
| 20–40 | 2.25 | 6.40 | 0.05 | 0.10 | –//– | 5.2 | 6.4 |
| <i>HCP</i> ₀₅ | 0.12 | 0.09 | 0.03 | 0.02 | –//– | 0.3 | 0.4 |

В процессах гумусообразования и выявлении на этом фоне связи минерального питания растений с органическим веществом в почвенном профиле важно знать величину запасов углерода и их соотношение с запасами макроэлементов. Показано, что накопление макроэлементов в неэродированной почве было максимальным в верхних слоях, затем оно постепенно снижалось и было минимальным на глубине 90–100 см (табл. 3).

Уменьшение содержания гумуса между верхним и нижним слоями достигало до 2.5 раза. Примерно такое же различие отмечали в эродированной почве, хотя абсолютные их величины были существенно меньше. Очень важное значение в азотном питании растений имеет соотношение между углеродом и азотом [22], что связано с процессами минерализации↔иммобилизации азота в почве. Выявлено, что минимальное соотношение между С : N было в верхних почвенных слоях, затем оно постепенно повышалось и достигало максимума на полуметровой глубине. После этого величина отношения между изученными макроэлементами вновь снижалась,

что наблюдали как в неэродированной, так и в эродированной почвах.

При оценке минерального питания используют также отношение между другими макроэлементами [23]. В проведенном нами исследовании отношение между углеродом и фосфором в неэродированной почве постепенно повышалось и было максимальным примерно на глубине 50 см. Минимума этот показатель достигал в результате постепенного снижения величины С : Р вплоть до 1-метровой глубины. Менее четкую закономерность в соотношении между углеродом и калием, а также между азотом и фосфором отмечали в неэродированной почве. В эродированной почве закономерность в отношениях между изученными макроэлементами во многом соответствовала ранее обсуждаемому их поведению в экосистеме. Значительные изменения в отношениях между макроэлементами обычно усиливались в иллювиальных горизонтах и постепенно менялись на максимальной почвенной глубине.

Основной источник поступления углерода в почву связан с образованием подстилки, формирование

Таблица 3. Запасы углерода (т/га) и их соотношение с содержанием макроэлементов в пахотных лугово-черноземных почвах

| Глубина, см | Запасы углерода, т/га | С : N | С : Р | С : К | N : Р |
|--------------------------|-----------------------|-------|-------|---------------|-------|
| Неэродированная почва | | | | | |
| 0–10 | 37 | 13 | 18 | 1.7 | 1.4 |
| 10–20 | 35 | 13 | 21 | 1.6 | 1.6 |
| 20–30 | 38 | 15 | 24 | 1.9 | 1.6 |
| 30–40 | 34 | 23 | 30 | 1.6 | 1.3 |
| 40–50 | 34 | 27 | 27 | 1.3 | 1.1 |
| 50–60 | 35 | 50 | 28 | 1.4 | 0.5 |
| 60–70 | 25 | 48 | 16 | 0.8 | 0.3 |
| 70–80 | 19 | 32 | 14 | 0.7 | 0.4 |
| 80–90 | 15 | 43 | 10 | – | 0.3 |
| 90–100 | 15 | 23 | 9 | – | 0.2 |
| Эродированная почва | | | | | |
| 0–10 | 24 | 13 | 21 | Не определяли | 1.3 |
| 10–20 | 24 | 14 | 25 | –/–/– | 1.2 |
| 20–30 | 25 | 14 | 24 | –/–/– | 0.9 |
| 30–40 | 24 | 36 | 23 | –/–/– | 0.5 |
| 40–50 | 11 | 52 | 9 | –/–/– | 0.4 |
| 50–60 | 10 | 31 | 9 | –/–/– | 0.3 |
| 60–70 | 10 | 30 | 7 | –/–/– | 0.3 |
| 70–80 | 9 | 23 | 9 | –/–/– | 0.4 |
| 80–90 | 8 | 22 | 8 | –/–/– | 0.3 |
| 90–100 | 9 | 20 | 8 | –/–/– | 0.3 |
| <i>HCP</i> ₀₅ | 1 | | | | |

которой во многом обусловлено процессами водной эрозии. Как показало проведенное исследование, максимальная величина надземной биомассы отмечена на неэродированной почве (табл. 4).

На слабо- и среднеэродированных почвах наблюдали постепенное снижение запасов подстилки, которые зависели прежде всего от интенсивности процессов водной эрозии. Что касается сильноэродированных почв, то среди лугово-черноземных почв Новосибирского Приобья нами их не было зарегистрировано вообще.

В природных условиях довольно часто встречаются как смытые, так и намытые почвы, которые различаются значительно видовым составом произрастающих растений, формированием подстилочного материала и режимом увлажнения почвенного профиля. В проведенных опытах биомасса подстилки была максимальной на средненамытой почве, несколько меньше ее было на слабонамытой, которая затем уменьшалась еще значительно на сильно намытом почвенном образовании. Независимо от степени миграции почвенных гранул, отложения твердых частиц, образования недостаточно регулируемых потоков жидкой массы в пониженных формах рельефа, изменялся почвенный профиль, трансформировался пищевой режим, и на таком фоне развивался соответствующий микробсообщество. Полагаем, что в слабонамытую почву поступало недостаточно питательных элементов, а на сильнонамытой растения страдали большей частью от дефицита кислорода, нежели минерального питания. Аналогичная закономерность просматривалась и в отношении запасов углерода и азота, образованных из подстилки и частично экзогенного питания. Обратила на себя внимание более стабильная величина отношения углерода к азоту в надземной биомассе, которая отмечена как на смытых, так и намытых почвах. Полагаем, что это обусловлено генотипической реакцией растений сохранять элементный химический состав в процессе их вегетации и, прежде всего,

обеспечивать стабильность метаболизма клеток при функционирования протеинового комплекса.

Процессы гумусообразования и накопления в органическом веществе питательных элементов во многом зависят от видового состава растений, количества и качества подстилочного материала и времени его разложения (табл. 5).

Минимальное содержание нитратного азота отмечали в варианте с многолетними луговыми травами, его значительное увеличение обнаруживали в почве под лесной растительностью, особенно под подстилкой осинового леса. Это, вероятно, связано с активизацией процессов минерализации органического вещества подстилки при повышенной влажности гумусово-аккумулятивного горизонта во время задержки развития осинового леса. В дальнейшем содержание нитратного азота в подстилке многолетних растений отличалось в меньшей степени, что было связано с особенностями гидрологии лугово-черноземных почв [24]. Содержание подвижного фосфора в контрольном варианте заметно изменялось в динамике при отборе проб подстилочного материала. Подобные изменения отмечали и для других видов растительной подстилки, которые заметно варьировали также во временном интервале. Наибольшие изменения регистрировали при изучении содержания обменного калия в почве под лесной растительностью. Это связано с тем, что калий в подстилке растений мог довольно легко вымываться и затем накапливаться в почве гумусово-аккумулятивного горизонта [25].

Видовой состав растений, сформированный на неэродированной почве, оказал значительное влияние на содержание протеиногенных элементов в подстилках с различной спецификой их образования (табл. 6).

В ней меньше всего обнаружено углерода под осиновым лесом и особенно кустарником, что должно было сказаться на химическом составе гумусовых кислот. Темп накопления азота в подстилке по сравнению с углеродом изменялся в меньшей степени,

Таблица 4. Изменение физико-химического состояния подстилки, сформированной из многолетних трав на лугово-черноземных почвах

| Вариант | Биомасса подстилки | Содержание | | C : N |
|--------------------------|--------------------|------------|------|-------|
| | | C | N | |
| | г/м ² | | | |
| Неэродированная | 70.7 | 36.8 | 12.0 | 3.1 |
| Слабоэродированная | 35.8 | 18.6 | 6.1 | 3.0 |
| Среднеэродированная | 19.0 | 9.9 | 23.2 | 3.1 |
| Слабонамытая | 46.7 | 24.3 | 7.9 | 3.1 |
| Средненамытая | 64.0 | 33.3 | 10.9 | 3.1 |
| Сильнонамытая | 30.3 | 15.6 | 5.2 | 3.0 |
| <i>HCP</i> ₀₅ | 2.4 | 1.2 | 0.6 | |

Таблица 5. Влияние подстилки растений на динамику содержания питательных элементов в неэродированной лугово-черноземной почве, мг/100 г

| Вариант | Время отбора почвенных проб | | | |
|-----------------------------------|-----------------------------|-------|-------|-------|
| | 2013 г. | | | |
| | 12.06 | 16.07 | 20.08 | 28.09 |
| N-NO₃ | | | | |
| Пашня (контроль) | 6.4 | 4.5 | 4.5 | 7.1 |
| Многолетние луговые травы | 3.6 | 4.3 | 4.2 | 3.1 |
| березовый | 6.1 | 3.7 | 5.4 | 3.7 |
| Лес | | | | |
| осиновый | 18.9 | 3.1 | 3.7 | 5.7 |
| сосновый | 7.2 | 4.0 | 5.6 | 5.9 |
| Кустарник | 7.6 | 5.5 | 5.6 | 5.2 |
| <i>НСР</i> ₀₅ | 1.4 | 0.6 | 0.8 | 0.9 |
| P₂O₅ | | | | |
| Пашня (контроль) | 16.9 | 17.7 | 18.1 | 13.3 |
| Многолетние луговые травы | 13.3 | 16.0 | 15.2 | 12.5 |
| березовый | 13.7 | 16.9 | 17.1 | 15.5 |
| Лес | | | | |
| осиновый | 11.7 | 12.7 | 15.6 | 15.2 |
| сосновый | 19.0 | 20.6 | 16.9 | 18.0 |
| Кустарник | 15.4 | 16.5 | 14.5 | 15.2 |
| <i>НСР</i> ₀₅ | 1.3 | 1.2 | 2.3 | 1.79 |
| K₂O | | | | |
| Пашня (контроль) | 22.4 | 24.5 | 24.7 | 20.0 |
| Многолетние луговые травы | 12.1 | 14.7 | 19.2 | 12.8 |
| березовый | 24.3 | 31.3 | 24.9 | 25.0 |
| Лес | | | | |
| осиновый | 45.1 | 23.7 | 22.4 | 22.5 |
| сосновый | 22.2 | 29.6 | 22.8 | 28.1 |
| Кустарник | 18.7 | 16.5 | 17.0 | 14.0 |
| <i>НСР</i> ₀₅ | 3.3 | 2.2 | 3.2 | 3.6 |

что, вероятно, было обусловлено выравниванием процессов минерализации органической массы при разложении подстилочного материала. Реализация процессов разложения углеродсодержащей биомассы происходила несколько иначе, чем азота, что сказывалось на обусловленном взаимодействии этих макроэлементов. Не меньшую интенсивность отмечали также в накоплении фосфора в биомассе подстилки, связанном с термодинамическим эффектом экосистем при минерализации подстилки травянистых и древесных растений. Минимальное количество фосфора отмечали в подстилке кустарника и многолетних трав, что создавало условия для бесперебойного снабжения растений фосфатным питанием за счет почвенных ресурсов в первую половину вегетационного периода. Значительно слабее происходили процессы аккумуляции протеиногенных элементов в слабоэродированной почве по сравнению с неэродированной. Содержание макроэлементов в подстилке, сформированной на лугово-черноземной почве, снизилось примерно в 2 раза. Среди видового

состава растений выделяется кустарник, у которого наблюдали существенное (примерно в 1.5–2.0 раза) снижение содержания углерода, фосфора и калия.

При всесторонней оценке обеспеченности растений питательными элементами не менее важно дать оценку их содержания в пахотном горизонте в течение вегетационного периода [26]. Экспериментальные данные показали, что наличие доступных элементов питания в почвах под луговыми травами изменялось с разной интенсивностью в 1-й и во 2-й год проведения исследования (табл. 7).

Содержание нитратного азота в большинстве случаев снижалось от фазы трубкования растений до укосной спелости, что было связано с активным потреблением нитратов в период максимальных приростов биомассы. Отметим, что на неэродированной почве отмечено более высокое содержание нитратного азота, и оно было существенно меньше в постоянно меняющемся почвенном профиле при процессах водной эрозии. Имеются отдельные

Таблица 6. Содержание протеиногенных элементов в подстилках различного происхождения на эродированной лугово-черноземной почве, г/м²

| Вариант | С | N | P | K |
|--------------------------|------|------|------|------|
| Неэродированная почва | | | | |
| Луговые травы | 18.8 | 0.51 | 0.14 | 0.32 |
| Березовый лес | 19.8 | 0.44 | 0.33 | 0.28 |
| Осиновый лес | 16.9 | 0.57 | 0.44 | 0.36 |
| Сосновый лес | 19.6 | 0.68 | 0.22 | 0.22 |
| Кустарник | 14.1 | 0.54 | 0.12 | 0.24 |
| <i>HCP</i> ₀₅ | 0.04 | 0.07 | 0.02 | 0.02 |
| Слабоэродированная почва | | | | |
| Многолетние травы | 9.9 | 0.23 | 0.17 | 0.18 |
| Березовый лес | 10.4 | 0.18 | 0.19 | 0.17 |
| Осиновый лес | 8.5 | 0.31 | 0.22 | 0.20 |
| Сосновый лес | 8.8 | 0.29 | 0.18 | 0.16 |
| Кустарник | 6.7 | 0.27 | 0.08 | 0.14 |
| <i>HCP</i> ₀₅ | 0.03 | 0.09 | 0.01 | 0.08 |

Таблица 7. Влияние минеральных удобрений и гидротермических условий на содержание питательных элементов в эродированных почвах под луговыми травами

| Вариант | Ресурс гидротермический | Физическое состояние почвы | | | | | | <i>HCP</i> ₀₅ |
|-------------------------------|-------------------------|----------------------------|----------|------------------|---------------|----------|------------------|--------------------------|
| | | неэродированная | | | эродированная | | | |
| | | фаза развития растений | | | | | | |
| | | трубкование | цветение | укосная спелость | трубкование | цветение | укосная спелость | |
| N-NO ₃ | | | | | | | | |
| Контроль | a-1 | 4.9 | 3.6 | 3.2 | 4.2 | 4.4 | 3.7 | 0.2 |
| | б-1 | 5.3 | 4.3 | 5.2 | 3.1 | 3.0 | 2.5 | 0.2 |
| N60P60K60 | a-2 | 7.6 | 6.3 | 2.3 | 5.3 | 5.1 | 2.3 | 0.2 |
| | б-2 | 7.4 | 4.5 | 3.3 | 3.9 | 4.0 | 3.8 | 0.2 |
| P ₂ O ₅ | | | | | | | | |
| Контроль | a-1 | 13.3 | 18.9 | 20.6 | 12.5 | 19.4 | 12.9 | 0.7 |
| | б-1 | 16.4 | 17.3 | 18.8 | 11.4 | 25.0 | 11.3 | 0.6 |
| N60P60K60 | a-2 | 14.4 | 16.2 | 20.6 | 16.3 | 26.3 | 14.4 | 0.7 |
| | б-2 | 12.5 | 18.7 | 18.9 | 15.9 | 22.5 | 16.3 | 0.7 |
| K ₂ O | | | | | | | | |
| Контроль | a-1 | 15.3 | 17.9 | 16.5 | 17.8 | 20.5 | 18.9 | 0.9 |
| | б-1 | 14.7 | 18.9 | 16.9 | 18.7 | 12.1 | 17.3 | 0.7 |
| N60P60K60 | a-2 | 20.6 | 17.3 | 17.2 | 20.6 | 25.0 | 16.2 | 0.9 |
| | б-2 | 16.7 | 17.8 | 16.7 | 18.8 | 19.4 | 17.8 | 0.7 |

Примечание. Сумма активных температур: a-1 – 1587°C (в 1-й год опыта) и a-2 – 1610°C (во 2-й год), количество осадков: б-1 – 136 мм (в 1-й год) и б-2 – 158 мм (во 2-й год).

варианты неэродированной и эродированной почв, в которых термические условия неоднозначно влияли на содержание нитратного азота: было как увеличение, так и снижение содержания этих соединений. Применение минеральных удобрений заметно повышало содержание нитратного азота в почве

в основном в начальные фазы развития растений, к концу вегетационного периода разница между удобренными и неудобренными вариантами практически отсутствовала. Следовательно, луговые травы были в состоянии усвоить весь имеющийся запас нитратного азота в почве, созданного как за счет

процессов минерализации органического вещества, так и внесенных азотных удобрений.

Изменения в содержании подвижного фосфора в почве происходили на разных этапах роста и развития растений с неодинаковой интенсивностью, причем их динамика иногда была разнонаправленной. Например, в неэродированной почве в период от фазы трубкования растений до фазы их цветения содержание подвижного фосфора в контрольном варианте вначале было невысоким, затем к середине сезона оно начало возрастать, к концу вегетационного периода сохранялась тенденция к повышению содержания подвижного фосфора, либо она оставалась без изменений. В эродированной почве в начальный период вегетации от фазы трубкования к фазе цветения регистрировали повышение содержания этого элемента, но затем к укосной спелости оно существенно снизилось. Внесение минеральных удобрений нередко приводило к вполне четкому увеличению содержания подвижного фосфора в эродированной почве при различной теплообеспеченности (например, варианты а-1 и а-2) от фазы трубкования до цветения, но затем отмечали существенное снижение содержания этих соединений. В фазе трубкования растений относительно фазы цветения содержание подвижных фосфатов значительно снизилось, хотя и в такой ситуации почва в удобренных вариантах заметно отличалась повышенной способностью удовлетворять потребность растений в этом элементе.

Динамика содержания обменного калия в почве во многом напоминала обнаруженную ранее закономерность относительно доступного фосфора. В неэродированной почве в контрольном варианте отмечали повышение содержания обменного калия от фазы трубкования растений до фазы цветения, в дальнейшем во время укосной спелости различия содержания подвижного калия были практически незаметными. В эродированной почве в контроле за аналогичный промежуток времени произошло как некоторое снижение содержания обменного калия, так и повышение. Применение минеральных удобрений нередко сопровождалось как возрастанием содержания калия в обменной форме, так и отсутствием подобной реакции независимо от интенсивности антропогенного воздействия на почву.

Отзывчивость луговых трав на внесение минеральных удобрений наиболее изучена на эродированном черноземе выщелоченном [27] и крайне недостаточно — на эродированной лугово-черноземной почве. Проведенные нами исследования на таких почвах показали высокую эффективность применения азотных удобрений под луговые травы (рис. 2).

В среднем за 2012, 2014, 2015 гг. прибавка урожая луговых трав на неэродированной почве сос-

тавила в среднем 46% при урожайности на фоне Р60К60 378 г/м². По годам продуктивность растений в варианте с фосфорно-калийным питанием менялась в больших пределах — 312–501 г/м². На эродированной лугово-черноземной почве прибавка урожая луговых трав от внесения азотных удобрений составила в среднем 90% при урожае на фосфорно-калийном фоне 153 г/м². По годам урожайность луговых трав на эродированной почве изменялась в пределах 94–232 г сухой биомассы/м².

Эффективность внесения фосфорных удобрений под луговые травы на неэродированной лугово-черноземной почве существенно уступала азотным; в среднем за 2009–2011 гг. прибавка составила 30% при урожае на фоне N60K60 338 г/м². Больших отличий в продуктивности растений по годам не отмечали, она менялась в варианте с азотно-калийным удобрением в пределах 310–385 г/м². На эродированной лугово-черноземной почве по сравнению с неэродированной растения лучше отзывались на внесение фосфорных удобрений: в среднем за 3 года урожай луговых трав в азотно-калийном варианте достигал 320 г/м². Прибавка от внесения фосфора оказалась небольшой, всего 17%.

Отзывчивость луговых трав на применение калийных удобрений отличалась от азотных и фосфорных. В среднем за 2006–2007 гг. прибавка урожая луговых трав на неэродированной лугово-черноземной почве составила 15% при урожае в азотно-фосфорном варианте 782 г/м². Различия продуктивности в эти годы оказались значительными: 611 и 952 г/м². Погодные условия для формирования биомассы растений были благоприятными. Однако на эродированной почве прибавка от внесения калийных удобрений оказалась незначительной. Это было связано с тем, что запасы калия в различных доступных для растений формах оказались недостаточными для формирования урожая на уровне 240–250 г/м².

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, плодородие лугово-черноземной почвы во многом зависело от ее эродированности, содержания гумуса и содержания форм азота, фосфора и калия в корнеобитаемом слое. Процессы накопления и трансформации гумуса в почве за 10-летний срок наблюдения были обусловлены в основном ее эродированностью, темпами поступления углерода и азота в гумусовый горизонт, активностью микробного и азотного цикла, плотностью корнеобитаемого слоя почвы. Выявлено, что при 20-летнем застарении пашни луговыми травами даже в неэродированной почве содержание гумуса изменялось мало. Однако в случае 100-летнего формирования гумусово-аккумулятивного горизонта лесной экосистемы, не подверженного антропогенным воздействиям, совместное действие

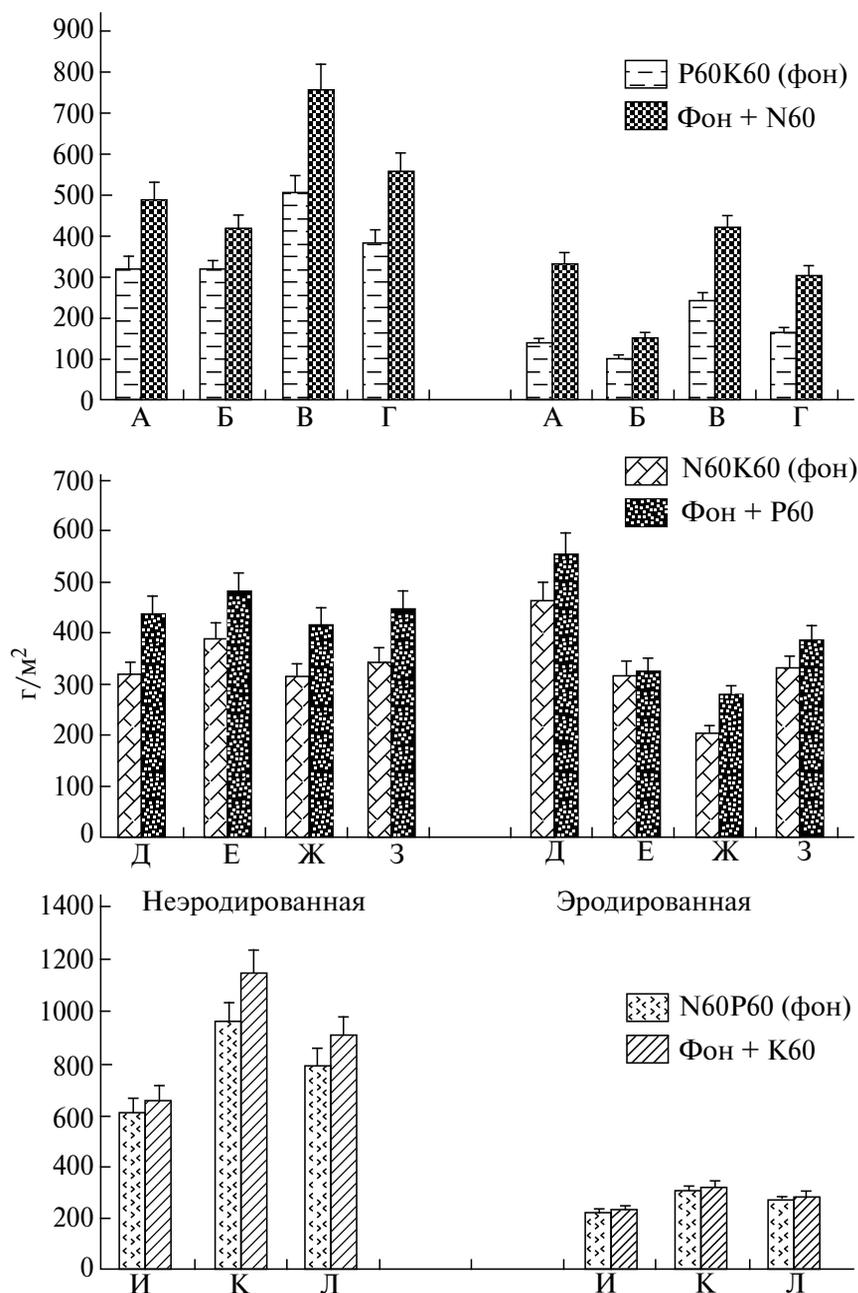


Рис. 2. Влияние минеральных удобрений на урожайность луговых трав на лугово-черноземных почвах. А – 2012 г., Б – 2014 г., В – 2015 г., Д – 2009 г., Е – 2010 г., Ж – 2011 г., И – 2006 г., К – 2007 г., Г, З – в среднем за 3 года, Л – за 2 года.

подстилки березового леса, корней и биомассы травянистой растительности обеспечило повышение содержания гумуса в почве до 8% и более.

Продуктивность растений во многом зависела от гидротермических условий, эродированности почвы и содержания в ней доступных питательных веществ. Растения нередко страдали от дефицита тепла и влаги, что сдерживало возможность реализации физиолого-агрохимического потенциала экосистемы. Эродированность почвы как правило снижала продуктивность растений, и это приводило

к существенному уменьшению эффективности минеральных удобрений. На эродированных лугово-черноземных почвах растения больше всего нуждались во внесении азота, затем фосфора и меньше всего – калия. В целом можно утверждать, что мониторинг при проведении работ, связанных с регулированием почвенного минерального питания, создает основу экологически и экономически обоснованного сохранения запасов гумуса в почве, применения удобрений и повышения продуктивности растений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Каптанов А.Н., Явтушенко Е.В.* Агроэкология почв склонов. М.: Колос, 1997. 239 с.
2. *Toy T.J., Foster G.R., Renard K.G.* Soil erosion processes: Prediction, measurement, and control. N.Y.: John Wiley and Sons, Inc., 2002. 338 p.
3. *Лыков А.М., Еськов А.И., Новиков М.Н.* Органическое вещество пахотных почв Нечерноземья. М.: РАСХН, ВНИИПТИОУ, 2004. 630 с.
4. *Кленов Б.М., Корсунова Т.М.* Гумус некоторых типов почв Западной Сибири. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1976. 157 с.
5. *Козут А.С., Фрид А.С., Мусютенко Н.П., Куваева Ю.В.* Динамика содержания органического углерода в типичном черноземе в условиях длительного полевого опыта // Агрохимия. 2011. № 12. С. 37–44.
6. *Сухановский Ю.П., Санжарова С.И., Прущик А.Н.* Модель динамики содержания гумуса в эродированном черноземе Центрального Черноземья // Агрохимия. 2011. № 12. С. 45–52.
7. *Гасвая Э.А., Безуглова О.С., Нежинская Е.Н.* Агрофизические свойства чернозема обыкновенного слабоэродированного в длительном опыте в Ростовской области // Почвоведение. 2022. № 11. С. 1399–1414.
8. *Якименко В.Н.* Калий в агроценозах Западной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2003. 231 с.
9. *Каретин Л.Н.* Черноземные и луговые почвы Тобол-Ишимского междуречья. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1982. 294 с.
10. *Орлов А.Д.* Водная эрозия Новосибирского Приобья. Новосибирск, 1971. 176 с.
11. *Панфилов В.П., Слесарев И.В., Сеньков А.А.* Черноземы: свойства и особенности орошения. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1998. 256 с.
12. *Гамзиков Г.П., Ильин В.Б., Назарюк В.М.* Агрохимические свойства почв и эффективность удобрений. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1989. 252 с.
13. *Никитишен В.И.* Эколого-агрохимические основы сбалансированного применения удобрений в адаптивном земледелии. М.: Наука, 2003. 183 с.
14. *Минеев В.Г.* Экологические проблемы агрохимии. М.: Изд-во МГУ, 1988. 256 с.
15. *Крюшин В.И.* Экологизация земледелия и технологическая политика. М.: МСХА, 2000. 473 с.
16. *Beck T.* Untersuchungen über die toxische Wirkung der Siedlungsabfällen heutigen Schwermetalle auf die Bodenmicroflora // Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde. 1981. Bd. 144. № 6. S. 613–627.
17. *Помазкина Л.В., Котова Л.Г., Лубнина Е.В.* Биогеохимический мониторинг и оценка режимов функционирования агроэкосистем на техногенно загрязняемых почвах. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. 208 с.
18. *Красницкий В.М.* Содержание тяжелых металлов и прогноз их накопления в почвах // Анализ почв, растений и применение удобрений в Западной Сибири. Омск: ОмГАУ, 2002. С. 296–309.
19. *Панфилов В.П., Ландина М.М., Каретин Л.Н.* Агрофизическая характеристика почв Западной Сибири. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1976. 544 с.
20. *Ковалев Р.В., Ильин В.Б., Трофимов С.С.* Почвы Новосибирской области. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1966. 422 с.
21. *Назарюк В.М., Калимуллина Ф.Р.* Роль природных экосистем в восстановлении плодородия выпашанных почв // Пробл. агрохим. и экол. 2017. № 1. С. 43–50.
22. *Церлинг В.В.* Диагностика питания сельскохозяйственных культур: Справ-к. М.: Агропромиздат, 1990. 235 с.
23. *Кудеяров В.Н.* Цикл азота в почве и эффективность удобрений. М.: Наука, 1989. 216 с.
24. *Панфилов В.П.* Агрофизические свойства основных типов почв Новосибирской области // Генезис почв Западной Сибири. Новосибирск, 1964. С. 151–217.
25. *Никитишен В.И.* Плодородие почвы и устойчивость функционирования агроэкосистемы. М.: Наука, 2002. 258 с.
26. *Якутина О.П., Назарюк В.М.* Оценка плодородия эродированных почв юга Западной Сибири // Агрохимия. 2007. № 9. С. 10–20.
27. *Смирнова Н.В.* Азот в агроценозах на эродированном черноземе лесостепной зоны Западной Сибири: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Новосибирск, 2005. 18 с.

Productivity of Biocenosis Plants and Humus Accumulation Processes in Eroded Meadow-Chernozem Soils

V. M. Nazariuk^a, F. R. Kalimullina^{a,#}

^a*Institute of Soil Science and Agrochemistry, SB RAS,
prosp. Acad. Lavrentieva 8/2, Novosibirsk 630090, Russia*

[#]*E-mail: kalimullina@issa-siberia.ru*

In long-term experiments, the content of humus in natural and agroecosystems on meadow-chernozem soils depended on the species diversity of plants, the state of the vegetation cover, the cultivation of the arable horizon and its erosion. During the 10-year observation period, the humus content in arable soil decreased by 4.5% relative to the initial state, while under meadow grasses, on the contrary, it increased by 22%. Then, during the 20-year accounting period, the processes of humus accumulation in the cultivated soil changed little. Among natural ecosystems, humus accumulation processes were most active in the humus-accumulative (A) and transitional horizons (AB) under the aspen forest. The reserves of humus and nutrients in eroded soils decreased dramatically, causing a decrease in the productivity of meadow grasses. It has been established that for a significant accumulation of humus (up to 8%) in the non-eroded soil of the 100-year period of ecosystem functioning, it is necessary to combine incoming carbon in the form of forest litter and roots with the biomass of perennial meadow grasses.

Keywords: ecosystem, humus formation, soil profile, proteinogenic elements, plant productivity.