

DOI 10.24411/2307-2873-2020-10033

УДК 631.4: 581.1

К ТЕОРИИ БИОЛОГИЧЕСКОГО ВЫНОСА ЭЛЕМЕНТОВ ПИТАНИЯ ИЗ ПОЧВЫ ПОСЕВАМИ МЯТЛИКОВЫХ ТРАВ ПРИ ВНЕСЕНИИ МИНЕРАЛЬНОГО УДОБРЕНИЯ

С. М. Пакшина, д-р биол. наук, профессор;

Н. М. Белоус, д-р с.-х. наук, профессор;

С. Ф. Чесалин, канд. с.-х. наук;

Е. В. Смольский, канд. с.-х. наук,

ФГБОУ ВО Брянский ГАУ,

Советская, 2а, Кокино, Выгоничский район, Брянская область,

Россия, 243365

E-mail: sev_84@mail.ru

Аннотация. В работе рассмотрен процесс биологического выноса элементов питания (N, P, K, Ca, Mg) из аллювиальной луговой почвы агроценозами мятликовых трав: ежа сборная, овсяница луговая, двукосточник тростниковидный. Для раскрытия механизмов, участвующих в биологическом выносе из почвы элементов питания и формирования качественных показателей кормовых трав, был использован параметр биологического выноса ионов из почвы, выведенный при решении электростатических моделей. Ежа сборная, овсяница луговая, двукосточник тростниковидный имеют следующие значения плотности зарядов на корневой поверхности (σк): 2,46; 2,63; 2,34 Кл/м². Показано, что с увеличением дозы полного минерального удобрения усиливается напряженность электростатического поля вокруг поверхности корневых систем растений и потоки почвенного раствора к корням, снижается число Pe и увеличивается биологический вынос элементов питания. Установлена особая роль магния, обладающего самой высокой, за исключением иона Н⁺, адсорбционной способностью в процессе биологического выноса ионов из почвы, заключающаяся в том, что корневая система растений поглощает магний в экстремальных условиях, вызванных недостатком калия для синтеза азотсодержащих органических веществ, которые восполняются безазотистыми экстрактивными веществами (БЭВ). Это явление обуславливает изменение показателей качества корма по сравнению с контролем на вариантах применения полного минерального удобрения. Расчеты по формуле биологического выноса приводят к сопоставимым численным значениям экспериментальных и рассчитанных данных содержания элементов питания в воздушно-сухой массе трав, а также качественных показателей корма. Эти результаты позволяют сделать вывод, что эксперимен-

тально подтверждена зависимость, выражающая существенную закономерность биологического выноса элементов питания из почвы мятликовыми травами. Эта закономерность справедлива для каждого в отдельности элемента питания.

Ключевые слова: аллювиальная почва, мятликовые травы, элементы питания, минеральное удобрение, закономерность, биовынос.

Введение. В последней четверти двадцатого века коллективными трудами почвоведов и агрохимиков нашей страны были выработаны и даны определения понятиям «вынос» и «биовынос» из почвы. Вынос – количество питательных веществ, поступающих в растение из почвы. Биологический вынос – максимальное количество питательных веществ, поступающих в растение из почвы в течение соответствующей фазы развития и за весь вегетативный период. Под биовыносом понимается общая потребность сельскохозяйственных культур в элементах минерального питания. Он включает в себя содержание питательных веществ в продукции растениеводства (хозяйственный вынос), а также в корневых, пожнивных остатках и листовом опаде [1]. В данной статье определяли хозяйственный вынос.

В настоящее время продукция растениеводства, предназначенная для животноводства, проходит контроль не только на уровень активности радионуклидов и содержания нитратов, но и на отношение содержания в корме элементов питания. Установлены зоотехнические нормы содержания элементов питания, оптимальные значения их соотношения [2].

Цель исследований – раскрытие механизма биологического выноса элементов питания и теоретическое обоснование эмпирических значений показателей качества кормов, сена мятликовых трав.

Методика. При раскрытии механизма биологического выноса элементов питания была использована модель передвижения

ионов в почвенных порах, включающая конвекцию, диффузию и миграцию ионов в электростатических полях вокруг поверхности корней и почвенных частиц.

Решение модели для случая выноса ионов из источника соли при нисходящем потоке раствора и аккумуляции ионов в почве при восходящем движении раствора от источника соли имеет следующий вид:

$$C_t = C_o \exp(-\lambda_n vt), \quad (1)$$

здесь $C_o \gg C_t$, C_t – содержание в почве внесенных солей,

$$C_t = C_o \exp(\lambda_n vt), \quad (2)$$

здесь $C_o \ll C_t$, C_t – содержание вносимых в слой почвы солей,

v – скорость потока раствора,

t – продолжительность процессов выноса и аккумуляции солей в почве,

λ_n – параметр массопереноса ионов.

Для случая биовыноса ионов из почвы корневой системой растения на контроле и вариантах с применением минерального удобрения с транспирирующей водой, из (1) и (2) следуют два уравнения:

$$C_i = C_k \exp(-\lambda_6 \sum_{\text{В}} E_T), \quad (3)$$

здесь $C_i < C_k$, C_k , C_i – соответственно, содержание иона в воздушно-сухой массе растения на контроле и на варианте i .

$$C_i = C_k \exp(\lambda_6 \sum_{\text{В}} E_T), \quad (4)$$

здесь $C_i > C_k$, λ_b – параметр биовыноса иона [3]. Для определения действия удобрений на биовынос элементов питания из почвы сравниваются варианты с контролем.

Расшифровка параметра массопереноса ионов в почве была выполнена в работе [4], а параметр биовыноса в работе [5].

Формула параметра массопереноса ионов в почве имеет следующий вид:

$$\lambda_n = 1,8 \times 10^3 \times \sigma_n \sqrt{(z_1 + z_2)/2} \times Pe/T, (5)$$

где σ_n – поверхностная плотность зарядов на поверхности почвенных капилляров,

z_1, z_2 – валентность аниона и катиона соли,

Pe – число Пекле,

T – абсолютная температура почвы [4].

Параметр биовыноса иона определяется следующей формулой:

$$\lambda_b = 1,8 \times 10^3 \times (\sigma_k - \sigma_n) \times \sqrt{(z_1 + z_2)/2} \times Pe/T, (6)$$

где σ_k – поверхностная плотность зарядов корневой системы растений [5].

В данной работе показана возможность использования формул (3) – (6) для определения биовыноса элементов питания мятликовыми травами.

Для проведения численных расчетов по формулам (3) – (6) были взяты данные элементного состава сена многолетних мятликовых трав первого и второго укосов [6].

В период с 2009 по 2011 года были проведены экспериментальные исследования на лугу центральной поймы р. Ипуть на юго-западе Брянской области. Почва – аллювиальная луговая песчаная, с обменной кислотностью 5,2-5,6 ед. рН, гидролитической кислотностью и суммой поглощенных оснований соответственно 2,6-2,8 и 11,3-13,1 мг-экв/100 г почвы, содержанием гумуса 3,08-3,33 % (по Тюрину), подвижных форм фосфора и калия соответственно 620-840 и 133-180 мг/кг (по Кирсанову).

В одновидовых посевах, при норме высева 15 кг/га, многолетних мятликовых трав (ежа сборная (*Dactylis glomerata* L., сорт ВИК 61), овсяница луговая (*Festuca pratensis* Huds., сорт Дединовска) и двукисточник

тростниковидный (*Phalaroides arundinacea* L., сорт Припятский) изучали биологический вынос N, P, K, Ca, Mg при следующих дозах минерального удобрения: 1. контроль – без удобрений; 2. N₉₀P₆₀K₉₀; 3. N₉₀P₆₀K₁₂₀; 4. N₉₀P₆₀K₁₅₀; 5. N₁₂₀P₆₀K₁₂₀; 6. N₁₂₀P₆₀K₁₅₀; 7. N₁₂₀P₆₀K₁₈₀. Аммиачную селитру и хлористый калий использовали дробно, половина расчетной дозы под 1-й укос, вторая половина – под 2-й укос, а простой гранулированный суперфосфат полной дозой в один прием под 1-й укос.

Площадь опытной делянки – 63 м², уборочной – 24 м², повторность опыта трехкратная. Урожайность трав 1-го и 2-го укосов определяли с 1 по 10 июня и с 23 августа по 1 сентября методом сплошной поделяночной уборки и отбора пробного снопа [6].

В центральной учебно-научной испытательной лаборатории Брянского ГАУ общепринятыми методами определяли элементный состав сена мятликовых трав. Содержание элементов питания в растительных пробах определяли после мокрого озоления по Гинзбург. Калий определяли на пламенном фотометре (ГОСТ 30504-97),

фосфор – на фотоэлектроколориметре (ГОСТ 26657-97), азот – по ГОСТ Р 51417-99.

Численные методы исследования включали следующие расчеты: транспирация рассчитывалась по формуле Пенмана [7]; испаряемость – по формуле Н.Н. Иванова [8]; удельная поверхность почвы по данным, приведенным в работе [9]; емкость катионного обмена корней трав взята из работ [10, 11, 12]; удельная поверхность корней рассчитана по формуле [6] при условии, что $\sum_v E_T / \sum_v E_0 = 0$; число Pe – как частное от деления значений λ_6 на каждом варианте опыта на λ_0 при условии $\sum_v E_T / \sum_v E_0 = 0$; поверхностная плотность зарядов корней и почвы – как частное от деления ЕКО (мэкв/100 г) на удельную поверхность (m^2/g), умноженную на коэффициент перевода в $Kл/m^2$, равный 0,963. Рассчитан-

ные значения содержания элементов питания в воздушно-сухой массе трав находили по формулам (3) и (4). Параметр биовыноса находили по графику зависимости $\ln(C_i/C_k) = f \sum_v E_T$, где C_i, C_k – экспериментальные данные содержания элементов питания в воздушно-сухой массе мятликовых трав на вариантах с применением минерального удобрения и на контроле.

Результаты. Вегетационный период 2010 г. отличался повышенным радиационным балансом в сравнении с 2009 и 2011 гг. В период от первого до второго укоса в 2011 году сложились оптимальные фитоклиматические условия для роста и развития мятликовых трав (повышенный радиационный баланс и большая испаряемость), чего не наблюдали в первую половину вегетации.

Таблица 1

Фитоклиматические условия весенне-летней вегетации посевов сеяных мятликовых трав по укосам и годам наблюдения

| Показатель | 2009 | | 2010 | | 2011 | |
|--|------|-------|------|-------|------|-------|
| | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| Сумма среднесуточных значений радиационного баланса в период вегетации, МДж/м ² | 394 | 569 | 439 | 688 | 432 | 485 |
| Сумма среднесуточных значений фотосинтетически активной радиации в течение вегетации, МДж/м ² | 266 | 460 | 268 | 426 | 256 | 336 |
| Температура воздуха, °С | 13,9 | 19,4 | 16,2 | 25,0 | 16,3 | 21,1 |
| Удельная теплота парообразования, МДж/кг | 2,47 | 2,46 | 2,47 | 2,45 | 2,47 | 2,45 |
| Испаряемость за период вегетации, мм | 160 | 231 | 178 | 281 | 175 | 198 |
| Сумма осадков за период вегетации, мм | 75,8 | 155,3 | 86,7 | 200,7 | 84,1 | 169,1 |
| Дефицит влаги в период вегетации, мм | -84 | -76 | -91 | -80 | -91 | -29 |
| Коэффициент увлажнения | 0,47 | 0,67 | 0,49 | 0,71 | 0,48 | 0,85 |

Примечание: 1 – период вегетации до 1-го укоса; 2 – период вегетации от 1-го до 2-го укоса.

В период от возобновления вегетации до 1-го укоса не наблюдали дефицита влаги в почве из-за близости грунтовых вод после периода затопления поймы. В период от 1-го

до 2-го укоса наибольший дефицит влаги наблюдали в 2010, наименьший – в 2011 году. Снижение уровня грунтовых вод и дефицит почвенной влаги сказались на

водном режиме посевов и, как оказалось, – на продуктивности мятликовых трав в период до 2-го укоса.

При повышении доз минерального удобрения закономерно увеличивается урожайность посевов многолетних мятли-

ковых трав, а также транспирация, доступность почвенной влаги корневой системе растения и число Pe , которое характеризует отношение между диффузионным и конвективным потоками раствора в общем потоке (табл. 2).

Таблица 2

Условия протекания процесса биовыноса элементов питания из почвы посевами мятликовых трав (среднее за 2009-2011 гг.)

| Вариант | Первый укос | | | | Второй укос | | | |
|---|-------------|-------------------|---------------------------------|------|-------------|-------------------|---------------------------------|------|
| | У, т/га | ΣE_t , мм | $\frac{\Sigma E_t}{\Sigma E_0}$ | Pe | У, т/га | ΣE_t , мм | $\frac{\Sigma E_t}{\Sigma E_0}$ | Pe |
| <i>Ежа сборная</i> | | | | | | | | |
| Контроль | 1,77 | 87 | 0,51 | 0,86 | 0,90 | 43 | 0,18 | 0,95 |
| N ₉₀ P ₆₀ K ₉₀ | 6,90 | 342 | 2,00 | 0,46 | 2,92 | 106 | 0,45 | 0,88 |
| N ₉₀ P ₆₀ K ₁₂₀ | 7,11 | 353 | 2,06 | 0,44 | 3,09 | 143 | 0,60 | 0,84 |
| N ₉₀ P ₆₀ K ₁₅₀ | 7,32 | 363 | 2,12 | 0,42 | 3,20 | 150 | 0,63 | 0,83 |
| N ₁₂₀ P ₆₀ K ₁₂₀ | 7,49 | 371 | 2,17 | 0,41 | 3,29 | 154 | 0,65 | 0,82 |
| N ₁₂₀ P ₆₀ K ₁₅₀ | 6,40 | 383 | 2,24 | 0,39 | 3,51 | 165 | 0,70 | 0,81 |
| N ₁₂₀ P ₆₀ K ₁₈₀ | 8,06 | 400 | 2,34 | 0,36 | 3,61 | 169 | 0,71 | 0,81 |
| HCP ₀₅ | 4,18 | – | – | – | 1,50 | – | – | – |
| <i>Овсяница луговая</i> | | | | | | | | |
| Контроль | 1,80 | 89 | 0,52 | 0,85 | 0,93 | 44 | 0,19 | 0,95 |
| N ₉₀ P ₆₀ K ₉₀ | 7,22 | 359 | 2,10 | 0,39 | 2,95 | 137 | 0,58 | 0,83 |
| N ₉₀ P ₆₀ K ₁₂₀ | 7,15 | 353 | 2,06 | 0,41 | 3,08 | 144 | 0,61 | 0,82 |
| N ₉₀ P ₆₀ K ₁₅₀ | 7,81 | 388 | 2,27 | 0,34 | 3,23 | 152 | 0,64 | 0,82 |
| N ₁₂₀ P ₆₀ K ₁₂₀ | 7,72 | 390 | 2,28 | 0,34 | 3,39 | 158 | 0,67 | 0,81 |
| N ₁₂₀ P ₆₀ K ₁₅₀ | 8,02 | 396 | 2,32 | 0,33 | 3,58 | 165 | 0,70 | 0,80 |
| N ₁₂₀ P ₆₀ K ₁₈₀ | 8,25 | 409 | 2,39 | 0,31 | 3,68 | 172 | 0,73 | 0,79 |
| HCP ₀₅ | 4,14 | – | – | – | 1,51 | – | – | – |
| <i>Двукосточник тростниковидный</i> | | | | | | | | |
| Контроль | 1,86 | 92 | 0,54 | 0,84 | 0,99 | 47 | 0,20 | 0,92 |
| N ₉₀ P ₆₀ K ₉₀ | 7,49 | 372 | 2,17 | 0,43 | 3,12 | 146 | 0,62 | 0,82 |
| N ₉₀ P ₆₀ K ₁₂₀ | 7,64 | 379 | 2,22 | 0,42 | 3,25 | 152 | 0,64 | 0,81 |
| N ₉₀ P ₆₀ K ₁₅₀ | 7,92 | 393 | 2,30 | 0,40 | 3,33 | 156 | 0,66 | 0,81 |
| N ₁₂₀ P ₆₀ K ₁₂₀ | 7,81 | 387 | 2,26 | 0,30 | 3,53 | 161 | 0,68 | 0,80 |
| N ₁₂₀ P ₆₀ K ₁₅₀ | 8,19 | 405 | 2,37 | 0,37 | 3,66 | 171 | 0,72 | 0,79 |
| N ₁₂₀ P ₆₀ K ₁₈₀ | 8,60 | 425 | 2,48 | 0,36 | 4,29 | 201 | 0,85 | 0,76 |
| HCP ₀₅ | 4,16 | – | – | – | 1,63 | – | – | – |

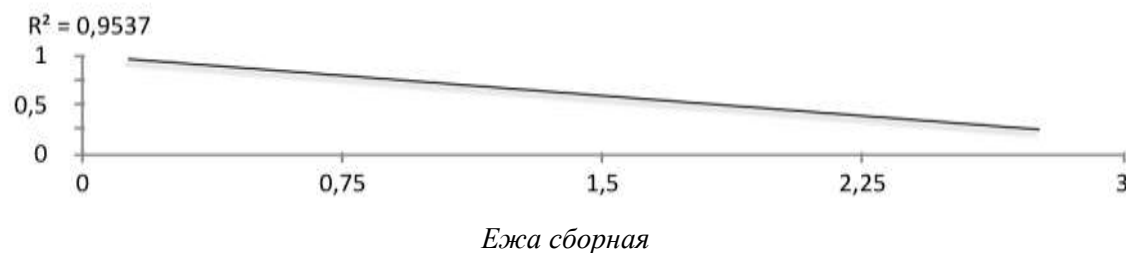
Примечание: У – урожайность сена, т/га; ΣE_t – транспирация за период вегетации, мм; $\Sigma E_t / \Sigma E_0$ – относительная транспирация; Pe – число Пекле.

На рисунке 1 представлена зависимость значений Pe от относительной транспирации посевов трав ($\sum_v E_T / \sum_v E_o$). Как было установлено в работах [13, 14], относительная транспирация в период вегетации служит количественным показателем доступ-

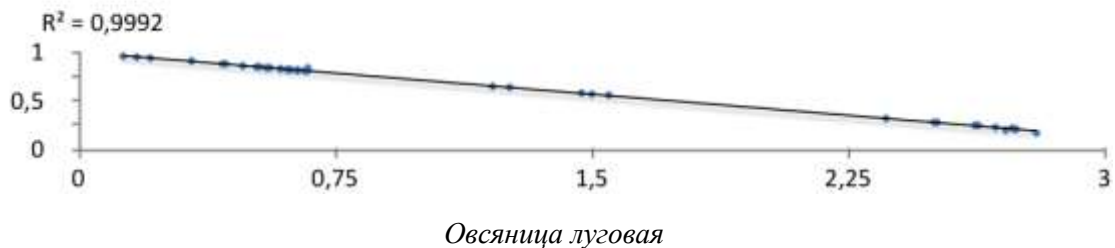
ности почвенной влаги корневой системе растений. Из рисунка 1 следует, что чем выше значение $\sum_v E_T / \sum_v E_o$, тем меньше число Pe или больше доля конвективного потока в общем потоке раствора и выше доступность влаги растениям.

Pe

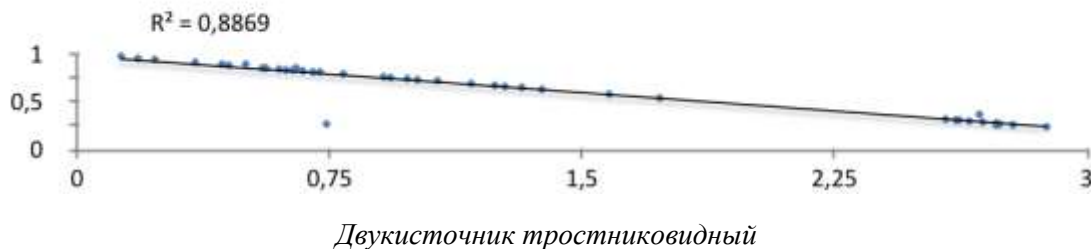
$$y = -0,272x + 1$$



$$y = -0,289x + 1,0019$$



$$y = -0,2542x + 0,9756$$



$$\sum_v E_T / \sum_v E_o$$

Рис. 1. Корреляционная связь между числом Pe потоков почвенной влаги и относительной транспирацией посевов мятликовых трав

От возобновления вегетации до первого укоса при применении разных доз минерального удобрения на всех вариантах разновидовых мятликовых трав, за исключением контрольного варианта, преобладали

конвективные потоки влаги. В посевах овсяницы луговой числа Pe были ниже, чем на других видах мятликовых трав при равном значении $\sum_v E_T / \sum_v E_o$. Линейная зависимость числа Pe от относительной транс-

пирации позволяет сделать вывод о зависимости биовыноса элементов питания разными культурами, в соответствии с формулой (6).

Для выяснения причин данного явления было рассчитано значение $(\sigma_k - \sigma_n)$. По данным работ [10-12], емкость катионного обмена ежи сборной, овсяницы луговой и двухкосточника тростниковидного составили соответственно 25,6; 30,4; 30,8 мэкв/100 г воздушно-сухих корней. Удельная поверхность корневых систем имела значения 7,47; 8,24; 10,8 м²/г.

Емкость поглощения и удельная поверхность аллювиальной луговой почвы – 14,90 мэкв/100 г и 14,96 м²/г. Отсюда, значение $(\sigma_k - \sigma_n)$ исследуемых видов мятликовых трав составило соответственно 1,41; 1,67; 1,38 Кл/м². Значит, вокруг корневой системы овсяницы луговой формируется более мощное электростатическое поле, вызывающее большую доступность почвенной влаги и пониженное число Ре в сравнении с другими видами.

Между поверхностной плотностью зарядов и напряженностью электростатического поля имеет место следующее равенство:

$$\kappa\phi_0 = (4\pi e z_0 / \epsilon k T) \sigma, \quad (7)$$

где κ , ϕ_0 , e , z_0 , ϵ , K , T – соответственно параметр Дебая, поверхностный потенциал, элементарный заряд, валентность потенциал-определяющего иона, диэлектрическая постоянная раствора, постоянная Больцмана, абсолютная температура [15].

Из формулы (7) следует, что напряженность электростатических полей вокруг поверхности корневых систем зависит от их поверхностной плотности заряда и концентрации почвенного раствора. Электростатическое поле вокруг корней растений впервые было обнаружено в работе [16].

Известно, что увеличение концентрации почвенного раствора приводит к сжатию диффузного слоя ДЭС, в котором преобладают одновалентные катионы, тогда как в адсорбционном слое – двухвалентные [17, 18].

Биовынос из почвы одновалентных ионов NH₄⁺ и K⁺, которые формируют диффузный слой ДЭС, с транспирирующей водой в первый укос, при значении Ре, равном 0,3-0,4, больше, чем во второй укос, при значении Ре, равном 0,8 (табл. 3).

Таблица 3

Биовынос элементов питания из почвы посевами трав с транспирирующей водой (среднее значения по вариантам с внесением NPK)

| Культура | Первый укос | | | | | Второй укос | | | | |
|---------------------------|-----------------------------|-----|------|------|-----|-----------------------------|-----|------|------|-----|
| | С _n , г/1 т воды | | | | | С _n , г/1 т воды | | | | |
| | N | P | K | Ca | Mg | N | P | K | Ca | Mg |
| Ежа сборная | 49,0 | 7,3 | 52,0 | 13,9 | 5,5 | 41,0 | 8,1 | 47,5 | 12,8 | 7,0 |
| Овсяница луговая | 48,9 | 7,6 | 53,1 | 12,5 | 4,9 | 44,9 | 7,5 | 48,3 | 14,7 | 5,3 |
| Двукосточник тростниковый | 49,2 | 8,0 | 53,7 | 12,5 | 5,3 | 46,4 | 7,6 | 48,2 | 13,2 | 5,6 |

Биовынос двухвалентных катионов Ca²⁺ и Mg²⁺ с транспирирующей посевами трав во-

дой, которые формируют адсорбционный слой ДЭС, больше во второй укос, чем в первый. По величине биовыноса при транспирации посевов трав в первый и второй укосы элементы питания расположились в следующей последовательности: $K > N > Ca > P > Mg$.

В таблице 4 представлены данные элементного состава многолетних мятликовых трав первого и второго укосов при разных дозах минерального удобрения и соотношения в нем калия к азоту при постоянной дозе фосфора [6].

Таблица 4

Влияние минеральных удобрений на элементный состав воздушно-сухой массы многолетних трав (среднее за 2009-2011 гг.)

| Вариант | Содержание, % | | | | | Вариант | Содержание, % | | | | |
|---|---------------|------|------|------|------|--|---------------|------|------|------|------|
| | N | P | K | Ca | Mg | | N | P | K | Ca | Mg |
| период вегетации до первого укоса | | | | | | период вегетации от первого до второго укоса | | | | | |
| <i>Ежа сборная</i> | | | | | | | | | | | |
| Контроль | 1,53 | 0,24 | 1,59 | 0,51 | 0,40 | Контроль | 1,46 | 0,34 | 1,65 | 0,54 | 0,40 |
| N ₄₅ P ₆₀ K ₄₅ | 2,33 | 0,34 | 2,44 | 0,59 | 0,28 | N ₄₅ K ₄₅ | 1,63 | 0,38 | 2,10 | 0,56 | 0,36 |
| N ₄₅ P ₆₀ K ₆₀ | 2,37 | 0,37 | 2,44 | 0,63 | 0,26 | N ₄₅ K ₆₀ | 1,72 | 0,37 | 2,16 | 0,58 | 0,34 |
| N ₄₅ P ₆₀ K ₇₅ | 2,41 | 0,37 | 2,48 | 0,64 | 0,25 | N ₄₅ K ₇₅ | 1,96 | 0,38 | 2,20 | 0,60 | 0,32 |
| N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀ | 2,36 | 0,34 | 2,45 | 0,62 | 0,29 | N ₆₀ K ₆₀ | 1,87 | 0,37 | 2,29 | 0,60 | 0,35 |
| N ₆₀ P ₆₀ K ₇₅ | 2,46 | 0,36 | 2,68 | 0,63 | 0,27 | N ₆₀ K ₇₅ | 2,12 | 0,38 | 2,30 | 0,62 | 0,32 |
| N ₆₀ P ₆₀ K ₉₀ | 2,48 | 0,37 | 2,82 | 0,65 | 0,25 | N ₆₀ K ₉₀ | 2,25 | 0,38 | 2,33 | 0,63 | 0,28 |
| HCP ₀₅ | 0,23 | 0,08 | 0,34 | 0,09 | 0,05 | HCP ₀₅ | 0,26 | 0,04 | 0,28 | 0,06 | 0,04 |
| <i>Овсяница луговая</i> | | | | | | | | | | | |
| Контроль | 1,67 | 0,26 | 1,60 | 0,51 | 0,40 | Контроль | 1,48 | 0,32 | 1,62 | 0,44 | 0,40 |
| N ₄₅ P ₆₀ K ₄₅ | 2,22 | 0,36 | 2,45 | 0,59 | 0,28 | N ₄₅ K ₄₅ | 1,68 | 0,34 | 2,10 | 0,52 | 0,26 |
| N ₄₅ P ₆₀ K ₆₀ | 2,38 | 0,37 | 2,51 | 0,60 | 0,24 | N ₄₅ K ₆₀ | 2,09 | 0,36 | 2,25 | 0,58 | 0,24 |
| N ₄₅ P ₆₀ K ₇₅ | 2,41 | 0,37 | 2,62 | 0,61 | 0,23 | N ₄₅ K ₇₅ | 2,15 | 0,36 | 2,28 | 0,60 | 0,23 |
| N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀ | 2,36 | 0,36 | 2,46 | 0,60 | 0,33 | N ₆₀ K ₆₀ | 2,20 | 0,34 | 2,25 | 0,60 | 0,28 |
| N ₆₀ P ₆₀ K ₇₅ | 2,44 | 0,38 | 2,71 | 0,61 | 0,25 | N ₆₀ K ₇₅ | 2,25 | 0,35 | 2,36 | 0,62 | 0,26 |
| N ₆₀ P ₆₀ K ₉₀ | 2,48 | 0,38 | 2,79 | 0,63 | 0,24 | N ₆₀ K ₉₀ | 2,28 | 0,36 | 2,38 | 0,63 | 0,24 |
| HCP ₀₅ | 0,33 | 0,09 | 0,44 | 0,08 | 0,07 | HCP ₀₅ | 0,24 | 0,02 | 0,38 | 0,10 | 0,08 |
| <i>Двукосточник тростниковидный</i> | | | | | | | | | | | |
| Контроль | 1,72 | 0,26 | 1,61 | 0,51 | 0,42 | Контроль | 1,52 | 0,30 | 1,70 | 0,50 | 0,42 |
| N ₄₅ P ₆₀ K ₄₅ | 2,29 | 0,32 | 2,45 | 0,58 | 0,31 | N ₄₅ K ₄₅ | 1,76 | 0,34 | 1,88 | 0,58 | 0,27 |
| N ₄₅ P ₆₀ K ₆₀ | 2,31 | 0,36 | 2,53 | 0,61 | 0,25 | N ₄₅ K ₆₀ | 2,08 | 0,36 | 2,18 | 0,60 | 0,26 |
| N ₄₅ P ₆₀ K ₇₅ | 2,48 | 0,38 | 2,64 | 0,62 | 0,24 | N ₄₅ K ₇₅ | 2,20 | 0,36 | 2,25 | 0,62 | 0,24 |
| N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀ | 2,39 | 0,32 | 2,53 | 0,59 | 0,29 | N ₆₀ K ₆₀ | 2,24 | 0,34 | 2,25 | 0,62 | 0,28 |
| N ₆₀ P ₆₀ K ₇₅ | 2,46 | 0,36 | 2,77 | 0,61 | 0,25 | N ₆₀ K ₇₅ | 2,26 | 0,35 | 2,36 | 0,63 | 0,26 |
| N ₆₀ P ₆₀ K ₉₀ | 2,50 | 0,38 | 2,83 | 0,63 | 0,24 | N ₆₀ K ₉₀ | 2,31 | 0,38 | 2,38 | 0,64 | 0,26 |
| HCP ₀₅ | 0,45 | 0,08 | 0,39 | 0,08 | 0,06 | HCP ₀₅ | 0,36 | 0,04 | 0,28 | 0,08 | 0,06 |

Содержание элементов питания N, P, K, Ca в воздушно-сухой массе трав увеличивается

ется по сравнению с контролем при повышении доз NPK в соответствии с уравнением (4). Содержание Mg в воздушно-сухой массе трав, наоборот, уменьшается по сравнению с контролем в соответствии с уравнением (3).

Минимальное поглощение Mg корневой системой трав в первый и второй укосы наблюдали при применении минерального удобрения с отношением в нём калия к азоту, равном 1,5 и 1,7, а максимальное – при

отношении калия к азоту, равном 1,0; 1,2; 1,3. Отсюда следует, что недостаток калия для синтеза азотсодержащих органических веществ корневая система пополняет ионами Mg, участвуя в синтезе безазотистых экстрактивных веществ (БЭВ).

На рисунке 2 представлена зависимость содержания БЭВ в воздушно-сухой массе трав в первый и второй укосы от биовыноса Mg корневой системой растения.

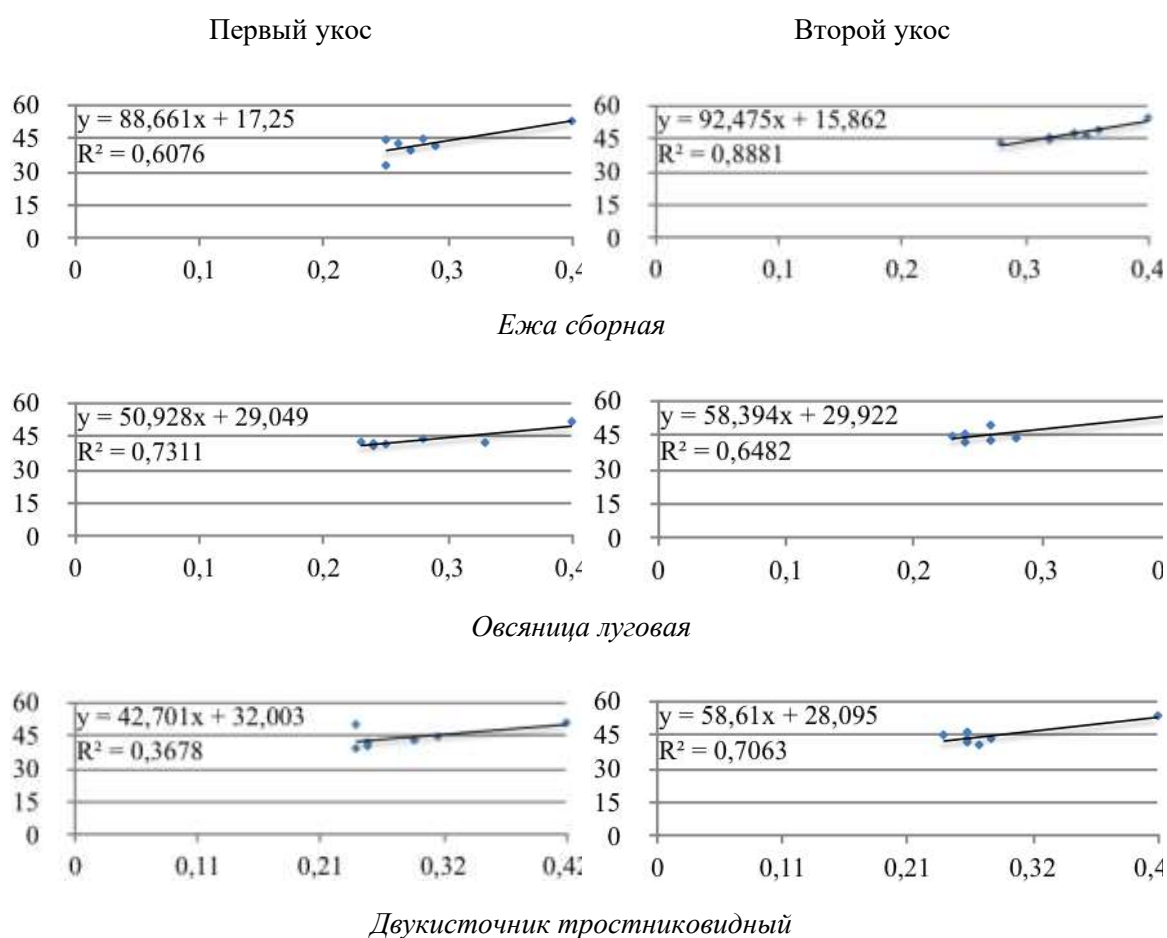


Рис. 2. Зависимость содержания безазотистых экстрактивных веществ (БЭВ) в воздушно-сухой массе от биовыноса Mg из почвы корневой системой мятликовых трав

Из рисунка 2 следует, что имеют место прямо пропорциональные зависимости между содержанием БЭВ и Mg в воздушно-сухой массе трав. Эти зависимости указывают на особую роль Mg в экстремальных условиях

роста и развития растения при невозможности осуществить синтез азотсодержащих веществ, заменяя его синтезом БЭВ. Корневая система растения функционирует не только как сорбент, но и как биологическая система.

Линейная зависимость между магнием и содержанием БЭВ даёт возможность предположить, что Mg участвует в синтезе БЭВ.

Для сравнения рассчитанных по формуле (4) значений содержания элементов питания в воздушно-сухой массе трав с экспериментальными, представленными в

таблице 4, были рассчитаны параметры биовыноса (λ_6). В таблице 5 представлены значения λ_6 пяти элементов разных видов мятликовых трав. Параметр биовыноса характеризует темп выноса из почвы элемента питания растением в определенных почвенно-климатических условиях.

Таблица 5

Рассчитанные значения параметров биовыноса элементов питания (N, P, K, Ca, Mg) из почвы в первый и второй укосы трав

| Культура | Первый укос | | | | | Второй укос | | | | |
|------------------------------|----------------|-----|-----|-----|--------|----------------|-----|-----|-----|--------|
| | $\lambda, 1/м$ | | | | | $\lambda, 1/м$ | | | | |
| | N | P | K | Ca | Mg | N | P | K | Ca | Mg |
| Ежа сборная | 1,0 | 1,3 | 2,5 | 1,5 | - 0,55 | 1,8 | 1,7 | 1,7 | 2,0 | - 0,23 |
| Овсяница луговая | 2,2 | 1,2 | 2,6 | 1,5 | - 0,33 | 2,3 | 1,7 | 1,7 | 3,0 | - 0,20 |
| Двукосточник тростниковидный | 1,8 | 1,0 | 2,8 | 1,6 | - 0,23 | 2,2 | 1,0 | 1,8 | 2,0 | - 0,5 |

Из таблицы 5 следует, что овсяница луговая отличается от других исследуемых видов мятликовых трав более высоким темпом выноса азота в первый и второй укосы, а также Ca во второй укос.

В таблице 6 представлены экспериментальные (числитель) и рассчитанные по формуле (4) (знаменатель) значения содержания элементов питания в воздушно-сухой массе трав.

Таблица 6

Экспериментальные (числитель) и рассчитанные по формуле (4) (знаменатель) значения содержания элементов питания в воздушно-сухой массе трав (средние на вариантах с внесением NPK)

| Культура | Первый укос | | | | | Второй укос | | | | |
|------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | Сi, % | | | | | Сi, % | | | | |
| | N | P | K | Ca | Mg | N | P | K | Ca | Mg |
| Ежа сборная | <u>2,40</u> | <u>0,36</u> | <u>2,55</u> | <u>0,68</u> | <u>0,27</u> | <u>1,92</u> | <u>0,38</u> | <u>2,23</u> | <u>0,60</u> | <u>0,33</u> |
| | 2,21 | 0,39 | 4,00 | 0,88 | 0,33 | 1,90 | 0,43 | 2,10 | 0,72 | 0,39 |
| Овсяница луговая | <u>2,38</u> | <u>0,36</u> | <u>2,59</u> | <u>0,61</u> | <u>0,24</u> | <u>2,11</u> | <u>0,35</u> | <u>1,94</u> | <u>0,69</u> | <u>0,25</u> |
| | 3,54 | 0,44 | 4,30 | 0,90 | 0,35 | 2,62 | 0,42 | 2,10 | 0,72 | 0,39 |
| Двукосточник тростниковидный | <u>2,40</u> | <u>0,39</u> | <u>2,62</u> | <u>0,61</u> | <u>0,26</u> | <u>2,14</u> | <u>0,35</u> | <u>2,22</u> | <u>0,61</u> | <u>0,26</u> |
| | 3,50 | 0,38 | 4,80 | 0,96 | 0,39 | 2,18 | 0,35 | 2,30 | 0,69 | 0,39 |

Как следует из таблицы 6, рассчитанные значения сопоставимы с эксперимен-

тальными значениями содержания элементов питания в воздушно-сухой массе трав. Относительная ошибка рассчитанных значений C_1 составляет 15-20%.

В таблице 7 представлены средние экспериментальные на вариантах с примени-

ем минерального удобрения и рассчитанные показатели качества корма: Ca/Mg, Ca/P, K/(Ca+Mg), которые имеют близкие значения.

Таблица 7

Экспериментальные (числитель) и рассчитанные значения показателей корма (знаменатель)

| Культура | Первый укос | | | Второй укос | | |
|------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | Ca/Mg | Ca/P | K/(Ca+Mg) | Ca/Mg | Ca/P | K/(Ca+Mg) |
| Ежа сборная | <u>2,77</u> | <u>1,72</u> | <u>2,85</u> | <u>1,83</u> | <u>1,60</u> | <u>2,33</u> |
| | 2,67 | 2,26 | 3,30 | 1,85 | 1,67 | 1,90 |
| Овсяница луговая | <u>2,33</u> | <u>1,63</u> | <u>2,85</u> | <u>2,35</u> | <u>2,68</u> | <u>1,30</u> |
| | 2,57 | 2,25 | 3,44 | 1,85 | 1,71 | 1,89 |
| Двукосточник тростниковидный | <u>2,32</u> | <u>1,72</u> | <u>3,00</u> | <u>2,35</u> | <u>1,73</u> | <u>2,50</u> |
| | 2,46 | 1,00 | 3,58 | 1,77 | 1,64 | 2,11 |

Повышенные значения показателей качества кормов Ca/Mg, K/(Ca+Mg) в сравнении с контролем объясняются низким темпом биовыноса Mg в сравнении с контролем.

Выводы. В настоящей статье выявлены следующие особенности процесса биовыноса элементов из почвы корневой системой мятликовых трав:

1. Минеральные удобрения солевого типа при растворении в почвенной влаге вызывают сжатие диффузного слоя ДЭС, формирующихся на стенках капилляров почвы и поверхности корней растений; увеличение напряженности электростатических полей и потоков влаги к корневой системе растения; доступность влаги и уменьшение числа Re . При значениях числа Re , равных 0,3-0,4, в большом количестве выносятся из почвы азот и калий, находящиеся в основном в диффузных слоях ДЭС,

тогда как при значениях числа Re , равных 0,8-0,9, – элементы питания Ca^{2+} , Mg^{2+} , которые находятся в адсорбционном слое.

2. Видовые различия биовыноса элементов питания обусловлены разностью между поверхностной плотностью зарядов на поверхности корней и почвенных капилляров.

3. Биовынос элементов питания описывается зависимостью, устанавливающей связь между содержанием элемента питания в воздушно-сухой массе растения, транспирацией посевов в течение вегетации и параметром биовыноса.

4. Доказана адекватность зависимости биовыноса элементов питания из почвы реальным процессам, которая даёт возможность использовать её к другим культурам для доказательства общего характера этой зависимости.

Литература

1. Минеев В.Г. Агрохимия: учебник / Под ред. В. Г. Минеева. М.: Изд-во ВНИИА имени Д.Н. Прянишникова, 2017. 854 с.
2. Нормы и рационы кормления сельскохозяйственных животных: справочное пособие / Под ред. А. П. Калашникова, В. И. Фисина, В. В. Щеглова, Н. И. Клейменова. Москва, 2003. 456 с.
3. Джалалова М. И., Абдурашидова П. А., Загидова Р. М. Особенности миграции солей в компонентах дельтовых экосистем // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2018. № 6. С. 28-29.
4. Пакшина С. М., Белоус Н. М., Смольский Е. В., Силаев А. Л. Расчет коэффициента накопления ¹³⁷Cs фитомассой мятликовых трав // Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии. 2018. № 6 (70). С. 21-32.
5. Пакшина С. М., Петухов В. Р. Влияние двойных электрических слоёв поверхности корня и почвенных частиц на доступность питательных элементов растениям // Агрохимия. 1976. № 5. С. 97-102.
6. Анишина Ю. А. Эффективность возделывания многолетних мятликовых трав в одновидовых посевах на радиоактивно загрязнённых поймах: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Брянск, 2012. 20 с.
7. Ли Ц. Характеристика изменчивости водопотребления лесных и луговых экосистем аридного региона Центрального И Южного Нинся // Аридные экосистемы. 2019. Т. 25. № 4 (81). С. 3-15.
8. Кирейчева Л. В., Юрченко И. Ф., Яшин В. М. Научные основы создания и управления мелиоративными системами в России. М.: ВНИИГиМ, 2017. 152 с.
9. Смагин А. В. К термодинамической теории водоудерживающей способности и дисперсности почв // Почвоведение. 2018. № 7. С. 836-851.
10. Drake M. Soil chemistry and plant nutrition // Chemistry of the soil. New York – London. 1964. Pp. 395-444.
11. Drake M., Vengris A., Colby W. Cation exchange capacity of plant roots // Soil Science. 1951. Vol. 72. No. 2. Pp. 139-149.
12. Власенко М. В., Трубакова К. Ю. Водный режим видов семейства Роасеае в условиях засухи // Аграрный вестник Урала. 2019. № 11 (190). С. 2-8.
13. Дубенок Н. Н., Сухарев В. И. Водный баланс агроландшафтов Центрального Черноземья и его регулирование. М.: Колос, 2010. 187 с.
14. Сухарев В. И., Елизарова Т. А. Разработка методологии и методики определения дефицитов водопотребления сельскохозяйственных культур // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии, 2015, № 8. С. 128-130.
15. Зимон А. Д. Коллоидная химия: Общий курс. М.: Красанд, 2019. 342 с.
16. Алешин С. Н., Ястребов М. Т. Об электрическом заряде корня растения и методе его определение // Доклады ТСХА. 1950. Вып. 12. С. 188-194.
17. Переволоцкий А. Н., Спирин Е. В., Переволоцкая Т. В., Спиридонов С. И. Модель расчета мощности поглощенной дозы в вертикальном профиле почвы в острую фазу радиоактивных выпадений // Радиационная биология. Радиоэкология. 2018. Т. 58. № 4. С. 415-424.
18. Прохоров В. М. Миграция радиоактивных загрязнений в почвах. М.: Энергоиздат, 1981. 99 с.

TO THE THEORY OF BIOLOGICAL REMOVAL NUTRIENTS FROM THE SOIL WITH POACEAE GRASSES WHEN APPLYING MINERAL FERTILIZER

S. M. Pakshina, Dr. Biol. Sci., Professor; **N. M. Belous**, Dr. Agr. Sci., Professor;

S. F. Chesalin, Cand. Agr. Sci., **E. V. Smolsky**, Cand. Agr. Sci.;

Bryansk State Agrarian University

2a, Sovetskaya St., Kokino, Vygonickiy District, Bryanskaya Oblast, Russia, 243365

E-mail: sev_84@mail.ru

ABSTRACT

The work deals with the process of biological removal of nutrient elements (N, P, K, Ca, Mg) from alluvial meadow soil with the crops of poaceae grasses: *Dáctylis glomeráta*, *Festuca pratensis*, *Phalaris arundinacea*. To reveal the mechanisms involved in biological removal of nutrients from the soil and to form qualitative indices of fodder herbs, the parameter of biological removal of ions

from the soil was used. *Dáctylis glomeráta*, *Festuca pratensis*, *Phalaris arundinacea* have the following values σ_k : 2.46; 2.63; 2.34 C/m². As the dose of total mineral fertilizer increases, electrostatic field tension around the surface of root systems of plants and soil solution flow to the roots increases, the value of Pe decreases and biological removal of nutrients increases. A particular role of magnesium in the process of biological removal of ions from soil has been established, in that the root system of plants absorbs magnesium under extreme conditions caused by lack of potassium for synthesis of nitrogen-containing organic substances, which are replenished with nitrogen-free extractive substances, which include magnesium. This phenomenon leads to a 2-3-fold improvement in the quality of the feed compared to the control with full mineral fertilizer applications. Calculations according to the formula of biological removal lead to comparable numerical values of experimental and calculated data of nutrient elements content in air-dry mass of herbs, as well as quality indicators of fodder. These results lead to the conclusion that the dependence expressing a significant pattern of biological removal of nutrient elements from the soil by poaceae grasses has been experimentally confirmed. This pattern is true for each nutrient.

Key words: alluvial soil, bluegrass herbs, nutrients, mineral fertilizer, regularity, biological removal.

References

1. Mineev V. G. Agrokhimiya (Agrochemistry), учебник, Pod red. V. G. Mineeva, M., Izd-vo VNIIA imeni D.N. Pryanishnikova, 2017, 854 p.
2. Normy i ratsiony kormleniya sel'skokhozyaistvennykh zhivotnykh (Farm animal feeding norms and rates), справochnoe posobie, Pod red. A. P. Kalashnikova, V. I. Fisinina, V. V. Shcheglova, N. I. Kleimenova, Moskva, 2003, 456 p.
3. Dzhahalova M. I., Abdurashidova P. A., Zagidova R. M. Osobennosti migratsii solei v komponentakh del'tovyykh ekosistem (Features of salt migration in components of delta ecosystems), Vestnik rossiiskoi sel'skokhozyaistvennoi nauki, 2018, No. 6, pp. 28-29.
4. Pakshina S. M., Belous N. M., Smol'skii E. V., Silaev A. L. Raschet ko-effitsienta nakopleniya ¹³⁷Cs fitomassoí myatlikovykh trav (Calculation of accumulation factor ¹³⁷Cs phytomass of mint herbs), Vestnik Bryanskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaistvennoi akademii, 2018, No. 6 (70), pp. 21-32.
5. Pakshina S. M., Petukhov V. R. Vliyanie dvoynnykh elektricheskikh sloev poverkhnosti kornya i pochvennykh chastits na dostupnost' pitatel'nykh elementov rasteniyam (Effect of double electrical layers of root surface and soil particles on nutrient availability to plants), Agrokhimiya, 1976, No. 5, pp. 97-102.
6. Anishina Yu. A. Effektivnost' vozdeystviya mnogoletnykh myatlikovykh trav v odnovidovykh posevakh na radioaktivno zagryaznennykh poimakh (Efficiency of cultivation of monologous poaceae herbs in single-liquid crops on radioactively contaminated catches), avtoref. dis. ... kand. s.-kh. nauk, Bryansk, 2012, 20 p.
7. Li Ts. Kharakteristika izmenchivosti vodopotrebleniya lesnykh i lugo-vykh ekosistem aridnogo regiona Tsentral'nogo i Yuzhnogo Ninsya (Characteristics of variability of water consumption of forest and grassland ecosystems of arid region of Central and Southern Ningxia), Aridnye ekosistemy, 2019, T. 25, No. 4 (81), pp. 3-15.
8. Kireicheva L. V., Yurchenko I. F., Yashin V. M. Nauchnye osnovy sozdaniya i upravleniya meliorativnymi sistemami v Rossii (Scientific foundations of creation and management of reclamation systems in Russia), M., VNIIGiM, 2017, 152 p.
9. Smagin A. V. K termodinamicheskoi teorii vodouderzhivayushchei sposobnosti i dispersnosti pochv (To thermodynamic theory of water-retaining capacity and dispersion of soils), Pochvovedenie, 2018, No. 7, pp. 836-851.
10. Drake M. Soil chemistry and plant nutrition, Chemistry of the soil, New York – London, 1964, pp. 395-444.
11. Drake M., Vengris A., Colby W. Cation exchange capacity of plant roots, Soil Science, 1951, Vol. 72, No. 2, pp. 139-149.
12. Vlasenko M. V., Trubakova K. Yu. Vodnyi rezhim vidov semeistva Po-aceae v usloviyakh zasukhi (Aquatic regime of species of the Poaceae family in drought), Agrarnyi vestnik Urala, 2019, No. 11 (190), pp. 2-8.
13. Dubenok N. N., Sukharev V. I. Vodnyi balans agrolandshaftov Tsen-tral'nogo Chernozem'ya i ego regulirovanie (Water balance of agro-landscape of the Central Black Earth Region and its regulation), M., Kolos, 2010, 187 p.
14. Sukharev V. I., Elizarova T. A. Razrabotka metodologii i metodiki opredeleniya defitsitov vodopotrebleniya sel'skokhozyaistvennykh kul'tur (Development of methodology and methodology for determination of water consumption deficits of crops), Vestnik Kurskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaistvennoi akademii, 2015, No. 8, pp. 128-130.

15. Zimon A. D. Kolloidnaya khimiya: Obshchii kurs (Colloidal Chemistry: General Course), M., Krasand, 2019, 342 p.
16. Aleshin S. N., Yastrebov M. T. Ob elektricheskom zaryade kornya rasteniya i metode ego opredelenie (About the electric charge of the plant root and its method of determination), Doklady TSKhA, 1950, Vyp. 12, pp. 188-194.
17. Perevolotskii A. N., Spirin E. V., Perevolotskaya T. V., Spiridonov S. I. Model' rascheta moshchnosti pogloshchennoi dozy v vertikal'nom profile pochvy v ostruyu fazu radioaktivnykh vypadenii (Model for calculation of absorbed dose rate in vertical profile of soil in acute phase of radioactive fallout), Radiatsionnaya biologiya. Radio-ekologiya, 2018, T. 58, No. 4, pp. 415-424.
18. Prokhorov V. M. Migratsiya radioaktivnykh zagryaznenii v pochvakh (Migration of radioactive contamination in soils), M., Energoizdat, 1981, 99 p.

DOI 10.24411/2307-2873-2020-10036

УДК 631.17 (470.42)

ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ АГРТЕХНОЛОГИЙ В ЗЕРНОПАРОВОМ СЕВООБОРОТЕ

М. М. Сабитов, канд. с.-х. наук,

Самарский федеральный исследовательский центр РАН,

Ульяновский научно-исследовательский институт сельского хозяйства,

ул. Институтская, 19, п. Тимирязевский, Ульяновский район, Ульяновская область, Россия, 433315

E-mail: m_sabitov@mail.ru

Аннотация. Исследования проводили с целью изучения влияния технологий при возделывании с.-х. культур в агроландшафтах Ульяновской области на повышение их эффективности. Они применялись в зернопаровом севообороте с использованием отечественных сельскохозяйственных машин и районированных сортов по Средневолжскому региону. Эксперименты проводили в 2010–2015 гг. на выщелоченном среднемощном среднесуглинистом черноземе. В многофакторном опыте изучали экстенсивную, включающую отвальную без применения агрохимических средств; нормальную с использованием средних доз макроудобрений и защиты от сорняков; интенсивную рассчитанную на получение программируемого урожая агротехнологии. Применяемые агротехнологии в зерновых севооборотах способствуют улучшению водного, питательного режимов почвы, а также снижению засоренности за счет оптимальных сочетаний химических препаратов. Высокая степень интенсификации агротехнологий в хозяйствах может использоваться в зависимости от ресурсного потенциала землепользователей. Наибольшее ресурсосбережение обеспечила нормальная на естественном фоне, затраты снизились на 3,5%, а по интенсивной – на 2,9%. Наиболее низкая себестоимость в опытах была получена при поддерживающих дозах удобрений 3496 руб./т. По самой насыщенной агротехнологии средствами при урожайности 2,43...2,71 т/га, рентабельность была на уровне 53...86%. По классическому варианту выращивания культур в севообороте продуктивность была получена 2,39...2,97 т/га с рентабельностью в 52...76%, а по нормальной она сложилась 58...83% с продуктивностью 2,46...2,88 т/га.

Ключевые слова: технология, обработка, защита растений, засоренность, биологическая активность, урожайность, экономическая эффективность.