

Министерство сельского хозяйства РФ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Брянский государственный аграрный университет»

Пакшина С. М., Белоус Н. М.

Закономерности биовыноса из почвы элементов питания кормовыми травами

Учебное пособие

Брянск 2022

УДК 633.2/.3:631.86 (07)

ББК 42.23:35.32

П-13

Пакшина, С. М. Закономерности биовыноса из почвы элементов питания кормовыми травами: учебное пособие / С. М. Пакшина, Н. М. Белоус. – Брянск: Изд-во Брянский ГАУ, 2022. – 90 с.

В учебном пособии «Закономерности биовыноса элементов питания из почвы кормовыми травами» излагаются математические модели биовыноса элементов питания из почвы. Приведена модель конвективно-диффузионного биовыноса из почвы элементов питания, а также новая диффузионно-электростатическая модель описывающая адсорбцию катионов на поверхности сорбентов. Модели позволили раскрыть механизм биовыноса, который заключается в том, что напряжённости электростатического поля, выражаемого в Джоулях (Е). Получена формула напряжённости электростатического поля, показаны все компоненты, влияющие на биовынос, входящие в Е, выведены две закономерности биовыноса элементов питания из почвы культурами, которые обоснованы результатами экспериментально-полевых опытов, проведённых сотрудниками БГАУ под научным руководством д. с.-х. наук, профессора Н. М. Белоуса. Исследования были проведены с целью разработки эффективных способов, снижающих биовынос ^{137}Cs из почвы [1, 2, 5, 27, 47, 48, 65, 67, 98, 104, 108-115]. В пособии эти литературные источники были использованы для теоретического анализа процесса биовыноса элементов питания из почвы культурами. Издание предназначено для научных сотрудников, преподавателей и студентов аграрных вузов.

Авторы: С. М. Пакшина - разработка электрокинетической концепции биовыноса элементов питания из почвы кормовыми травами; Н. М. Белоус - разработка и постановка экспериментальных многолетних опытов по изучению биовыноса элементов питания разными видами сельскохозяйственных культур.

Рецензент: П. В. Прудников - д. с.-х. н., директор ФГБУ «Брянскагрохимрадиология»;

Е.В. Смольский - д. с.-х. н., доцент ФГБОУ ВО «Брянский государственный аграрный университет».

Рекомендовано к изданию учебно-методической комиссией института экономики и агробизнеса Брянского ГАУ, протокол №3 от 11 февраля 2022 года.

© С.М. Пакшина, 2022

© Н.М. Белоус, 2022

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	4
УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ.....	7
1. Разработка и формулировка закономерностей биовыноса ионов из почвы растениями.....	8
1.1 Открытие электростатического поля корней растений.....	8
1.2 Модель передвижения ионов из почвы к зоне «всасывания» (корневых волосков) корней растений.....	14
1.3 Модель адсорбции ионов на поверхности корневых волосков и ризодермы зоны «всасывания».....	20
2. Механизмы функционирования закономерностей биовыноса ионов из почвы растениями.....	25
2.1 Влияние напряженности электростатических полей корней и почвы от их поверхностной плотности зарядов.....	25
2.2 Влияние дозы полного минерального удобрения и температуры почвы на величину напряжённости электростатического поля системы корень-почва.....	34
2.3 Влияние природных карбонатов кальция на напряжённость электростатического поля системы корень-почва и доступность катионов и анионов корневой системе растений.....	39
2.4 Влияние чисел Pe на интенсивность биовыноса катионов и анионов из почвы культурами.....	44
3. Практическое значение закономерностей биовыноса ионов из почвы сельскохозяйственными культурами.....	48
3.1 Использование закономерностей для увеличения содержания белка в грубых кормах.....	48
3.2 Влияние возрастающих доз минеральных удобрений на биохимические показатели кормов.....	57
4. Использование закономерностей биовыноса элементов питания из почвы с.-х. культурами для размещения их в пространстве.....	67
4.1 Прогнозирование возделывания разных видов сельскохозяйственных культур на серых лесных легкосуглинистых почвах.....	67
4.2 Прогнозирование выбора почвы для возделывания овса посевного и озимей ржи в Брянской области.....	68
4.3 Прогнозирование содержания магния в надземной фитомассе люпина жёлтого.....	70
4.4 Сравнительная оценка экспериментальных данных элементного состава надземной фитомассы трав.....	71
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	75
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	76

«Путей к истине множество,
путей трудных и всегда индивидуальных»
П.У. Бровка (Сила поэзии, 1968)

ВВЕДЕНИЕ

В первой половине 20-го века учеными агрохимиками было обнаружено явление, заключающееся в том, что урожайность сельскохозяйственных культур зависит от вида азотного удобрения и рН почвенного раствора [4]. При использовании в питательных растворах в качестве удобрений нитратных и аммонийных ионов урожайность в кислых интервалах рН от нитратов была выше, чем аммонийных ионов. При повышении рН раствора урожайность от аммонийных ионов повышалась, нитратных снижалась.

С. Н. Алёшин, М. Т. Ястребов высказали предположение, что белок, содержащийся в корнях, который, как было известно, является амфолитоидом, вызывает данное явление. Для подтверждения данного предположения был сконструирован прибор для измерения электростатического потенциала на границе раздела корень проростка целого растения - раствор. Была получена линейная обратно пропорциональная зависимость потенциала на границе раздела фаз корень-раствор от рН раствора. Открытие электростатического поля вокруг поверхности корней растений не было востребовано исследователями в течение долгого времени [4].

Для описания биовыноса ионов из почвы растениями в 60-70-е годы 20-го века использовали диффузионные и конвективно-диффузионные модели (S. Barber, 1962, 1974; H. Jenny, 1966; M. Fried, H. Broeshart, 1967).

Б. В. Дерягин с соавторами в своей работе отмечали « ... При составлении выражений для потоков ионов необходимо принимать во внимание три механизма переноса ионов: диффузию, миграцию в электрическом поле и конвективный перенос» [37].

Впервые была разработана модель адсорбции ионов на поверхности корней растений, в которой учитывалось действие напряжённости электростатиче-

ских полей на границах раздела корень-раствор и почва-раствор, включающая два механизма: диффузию и миграцию ионов в электростатическом поле (процесс ионного обмена на поверхности объекта). Были разработаны две модели адсорбции ионов на поверхности корней растений: при наличии перекрывающихся и неперекрывающихся двойных электрических слоёв корней и почвы [67].

Модели позволили раскрыть содержание параметра биовыноса ионов из почвы растением, вести расчёты адсорбции ионов на поверхности корней и константы ионного обмена катионов, которые регулируют поглощение ионов во внутрь корня.

С. М. Пакшиной была разработана модель передвижения ионов в почве под действием напряжённости электростатического поля поверхности капилляров почвы (миграция), диффузии и конвекции [70]. Эта модель также описывает процесс биовыноса ионов из почвы к зоне «всасывания» (корневых волосков). Модель включает диффузию, конвекцию и миграцию ионов под действием электростатического поля на границе раздела корень-почвенный раствор, напряжённость электростатического поля, под действием которой поток направлен в сторону отрицательно заряженной поверхности корневой системы растений (ось x) и конвекцию (ось y), обусловленную транспирацией.

Данная модель позволила раскрыть две закономерности передвижения ионов в зоне «всасывания», которые объединяет параметр биовыноса и содержание параметра биовыноса ионов, который включает только физические величины: поверхностная плотность зарядов корневой системы и почвы, число Pe , валентность аниона и катиона удобрения, температура.

Закономерности объясняют следующие эмпирические явления: зависимость доступности почвенной влаги растениям от дозы минерального удобрения и зависимость содержания магния в фитомассе трав от отношения K/N в дозе $NPК$, зависимость содержания БЭВ от Mg в воздушно-сухой массе трав, зависимость биовыноса элементов питания от видовых различий культур, свойств ионов, скоростей потока почвенного раствора; зависимость содержания сырого протеина от содержания K в фитомассе трав и другие.

В работе данных исследователей реализованы модели, которые были построены с учётом четырёх открытий о существовании электростатических полей вокруг поверхности корневых систем растений [4], о наличии в почвах и грунтах тонких водных слоев с перекрывающимися ДЭС на обеих стенках пор [58], о возникновении потоков ионов под действием электростатических полей капиллярно-пористых тел [37], о подчинении потоков ионов в почве экспоненциальному закону [32].

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

Обозначение	Наименование величины	Единица
e	Заряд электрона	$1,6021892 \cdot 10^{-19}$ Кл
k	Постоянная Больцмана	$1,380662 \cdot 10^{-23}$ Дж/К
T	Термодинамическая температура	К
N	Постоянная Авогадро	$6,022045 \cdot 10^{23}$ моль ⁻¹
R	Молекулярная газовая постоянная	8,31441 Дж/моль·К
F	Постоянная Фарадея	96484,56 Кл/моль
C	Концентрация растворенных веществ в жидкой фазе	моль/м ³
η	Вязкость раствора	кг/мс
V_x	Объем парового раствора, занимаемый двойным электрическим полем	м ³
ϵ	Диэлектрическая постоянная	$8,85418782 \cdot 10^{-12}$ ф/м
α	Дебаевский радиус	1/м
D	Коэффициент диффузии иона в растворе	м ² /с
v	Скорость движения иона	м/с
$U = Dz/\kappa T$	Подвижность иона	м ² /Вс
$\alpha = c \gamma$	Активность иона	кмоль/м ³
Z_1	Валентность аниона	
Z_2	Валентность катиона	
t	Время	с
S	Удельная поверхность	м ² /г
Γ	Емкость поглощения	мг-экв/100 г
σ	Плотность поверхностных зарядов	Кл/м ²
r	Радиус капилляра	м
ψ	Электростатический потенциал	В
$E = 4 \pi \sigma / \epsilon$	Напряженность электростатического поля	В/м
h	Толщина пленки	м
P	Давление	Н/м ²
λ	Ионопроводная постоянная почвы	м ⁻¹
α	Параметр солеотдачи	м
$1/\alpha$	Толщина двойного электрического слоя	м

1. Разработка и формулировка закономерностей биовыноса ионов из почвы растениями

1.1 Открытие электростатического поля корней растений

В работе «Об электрическом заряде корня растений и методе его определения» установлено, что исследованию электрических свойств корней растений предшествовали экспериментальные опыты, которые не были объяснимы с точки зрения установившихся понятий [4].

«Многочисленные исследования Д. Н. Прянишникова, А. Г. Шестакова выявили различную урожайность льна, свеклы, табака и других культур от нитратных и аммонийных ионов, применяемых в качестве удобрений в питательных растворах с различным значением концентрации водородных ионов (рН). Как правило, урожайность в кислых интервалах рН от нитратов выше, чем от аммонийных удобрений, но с понижением концентрации водородных ионов с повышением рН, урожайность от нитратов понижается, а на аммонийных удобрениях повышается. Таковую реакцию живого организма на два взаимно противоположные по электрическому знаку заряда иона можно объяснить, учитывая электрические свойства носителя жизни - белка, находящегося в месте соприкосновения его с питательным раствором в корне. Белок, как амфолитоид, в своем составе имеет как кислотные группы, способные отщеплять водородные ионы (ацидоидная часть), так и основные группы, способные присоединять водородные ионы (базоидная часть). В зависимости от количества тех и других групп и прочности связи (химического сродства) этих групп с водородными ионами в водном растворе, белок будет заряжен положительно или отрицательно. В водном растворе можно создать такую концентрацию водородных ионов - рН, при которой количество положительных зарядов на частицах белка будет равно количеству отрицательных, - такое состояние белка, как и соответственное ему значение рН, будет называться изоэлектрическим. Повышение концентрации водородных ионов, в сторону от изоэлектрического состояния, будет заряжать амфолитоид положительно, а понижение концентрации водородных ионов, будет заряжать его отри-

цательно. Таким образом, об амфолитоидности исследуемого объекта можно судить по изменению его заряда в зависимости от pH.

Для измерения заряда корня использовался следующий прибор, на котором можно проводить измерения на корнях проростка целого растения (рис. 1).

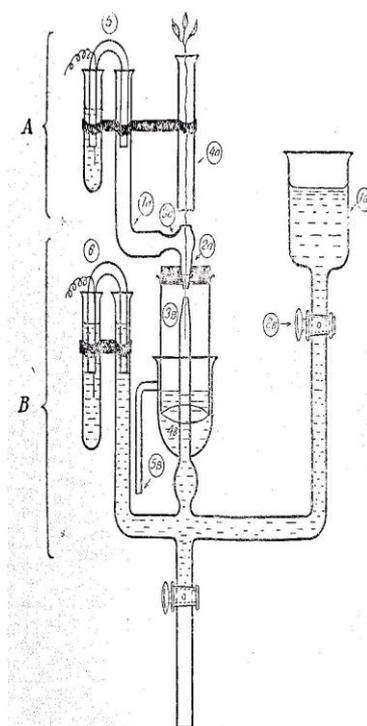


Рисунок 1 - Прибор для измерения потенциала на поверхности корней растений

Прибор состоит из двух электродов: верхнего «А» и нижнего «В». Верхний электрод «А» состоит из - стеклянной, изогнутой под прямым углом трубки, на нижнем конце которой припаян держатель корня 2а. При измерении потенциала корня эта трубка наполняется 0,01 н. раствором КСl, соприкасающегося с поверхностью корня через тампон фильтровальной бумаги 3а, закрывающий нижний конец этой трубки и обеспечивающий прохождение тока через измеряемый корень. Верхний конец этой трубки соединяет через агар-агаровый сифон (5), с пробиркой (6) заполненной 0,01 н. раствором CuSO_4 , через который электрод приключается к потенциометру. Нижний электрод «В» состоит из крестообразной трубки, заполняемой через воронку 1в и кран 2в, испытуемым раствором.

В 2-миллиметровое отверстие конца трубки 3в погружается кончик корня, омываемого непрерывно обновляющимся испытуемым раствором, скорость течения которого устанавливается поворотом крана 2в.

Стекающий через край трубки 3в раствор собирается в резервуаре 4в, из которого через сифон 5в этот раствор стекает по мере его накопления. В резервуаре 4в находится цилиндрическая трубка, покрытая изнутри фильтровальной бумагой с просветом вдоль оси трубки для наблюдения корня, погруженная своим нижним концом в жидкость. Сверху этот резервуар закрывается корковой пробкой с отверстием для держателя корня. Таким образом, в этом цилиндре создается пространство, насыщенное водяными парами, которое предохраняет корень от высыхания при последующих измерениях потенциала. Третий конец трубки нижнего электрода наполняется испытуемым раствором, который посредством агар-агарового сифона (б) соединяется с пробиркой, наполненной 0,01 н. раствором CuSO_4 и служит для подключения электрода к потенциометру. Через четвертый конец нижнего электрода, снабженного краном (бв), электрод опорожняется при окончании работы. Зерна пшеницы (Белорусская 269-А) проращивали на смоченной дистиллированной водой фильтровальной бумаге в чашках Петри на солнечном свете при температуре $22^\circ\text{-}27^\circ$. После появления стебелька и 2-3 корешков, крышка с чашки Петри снимали и проростки далее помещались в питательную смесь ($\text{pH} = 5,4$).

Измерение потенциалов корня производили на обычном компенсационном потенциометре с зеркальным гальванометром. Можно предположить, что потенциал корня возникает за счет различной подвижности ионов испытуемого раствора при контакте его с KCl непосредственно, или через растение. Чтобы исключить такую возможность, перед каждым измерением потенциала корня предварительно отмечали точку компенсации при непосредственном контакте раствора верхнего и нижнего электродов без корня. Измерение потенциала корня производили следующим образом: стебелек 4-5-дневного растения с отрезанными корешками, кроме измеряемого, вставляли в трубочку 4а, а корешок осторожно вводили в прорезь держателя корня. Для лучшего контакта с KCl в томпоне, корешок несильно прижимали в держателе фильтровальной бумагой, смоченной раствором KCl . Длина кончика корешка, выступающего из держателя, сохраняли примерно около 20 мм, причем кончик корешка погружали в от-

верстие нижнего электрода на глубину 10 мм. Для вычисления электродвижущей силы этого «живого» элемента бралась разность отсчетов точек компенсации элементов без корешка и элемента с корешком. Как правило, потенциал устанавливался в течение 3-4 минут. Измерения производили в марте-июне 1948 г. при дневном свете и температуре 22-27°. Перед измерением потенциала корешок растения тщательно промывали дистиллированной водой и затем вносился в держатель. Через нижний электрод пропускали непрерывный ток 0,1 н. раствора ацетатного буфера с изменяющимися значениями рН от 3,0 до 7,3 (табл. 1).

Таблица 1 - Потенциалы корня 4-5 дневного проростков пшеницы

рН среды в эл-де	Потенциалы корня «Е» измеренные, мВ		
	9.03.1948	12.03.1948	18.03.1948
3,0	-	15,3	8,6
4,0	17,0	15,3	7,6
5,0	-10,0	4,0	6,0
6,5	-13,0	-10,0	-11,0
7,3	-	-7,0	-

Изоэлектрическое значение рН = 5,5 - линейная функция потенциала в пределах рН 4,0-6,5 (рис. 2).

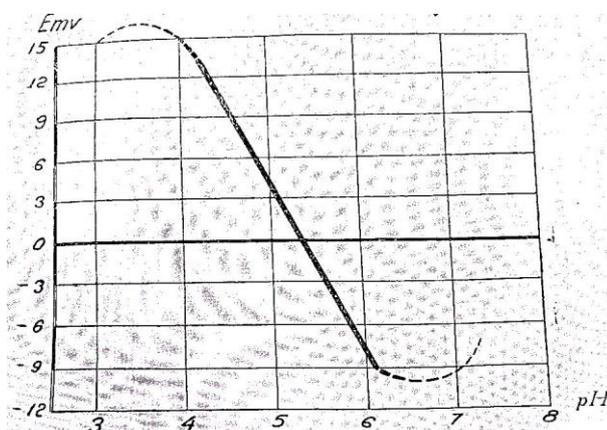


Рисунок 2 - Зависимость значений потенциалов корня проростка пшеницы от рН раствора

За пределами прямолинейного изменения в кислой среде снижение потенциала не наблюдалось, в то время как в щелочной среде происходило некоторое снижение. Перемена знака заряда корня отмечалась при рН 5,5 [3].

Таким образом, впервые было выявлено, что вокруг поверхности корней растений формируется электростатическое поле, знак заряда которого зависит от рН почвенного раствора [4]. В кислом интервале рН ($pH < 5,5$) поверхность корней

растений заряжена положительно, при $pH > 5,5$ - отрицательно. Знак заряда поверхности корней вызывает разные доступности анионов и катионов растениям. С.Н. Алешиным совместно с М.Т. Ястребовым был сконструирован прибор для измерения потенциала на границе раздела корень-раствор KCl (0,01 н.). Потенциал на границе раздела корень проростка пшеницы - раствор KCl составил 7,6-17 мВ в кислом интервале pH и (-7) - (-13) мВ в интервале $pH > 5,5$.

В середине 20-го века в смежных с почвоведением областях науки, коллоидной и физической химии, были подробно изучены электрокинетические свойства капиллярно-пористых тел, получена формула для расчёта межфазного потенциала раздела сред [34].

Потенциал на границе раздела фаз (ψ) при условии, что избыток зарядов на поверхности твердого тела незначителен по сравнению с емкостью поглощения, определяется формулой:

$$\sigma = \sqrt{\frac{C_0 \varepsilon RT}{2\pi}} \left(e^{\frac{z_1 e_0 \psi}{2RT}} - e^{-\frac{z_2 e_0 \psi}{2RT}} \right) \quad (1)$$

где σ - поверхностная плотность зарядов ($\text{Кл}/\text{см}^2$), которая находится путем деления емкости поглощения на удельную поверхность, Z_1 и Z_2 - электровалентности противоиона [34]. Фазовый потенциал ψ , определяемый формулой (1), значительно больше электрокинетического потенциала (Z-потенциала), измеряемого экспериментально. Фазовый потенциал характеризует скачок потенциала между поверхностью твердой фазы и раствором за пределом ДЭС, а ф-потенциал - между неподвижной частью ДЭС и раствором.

В таблице 1 представлены значения ψ на границах раздела фаз и поверхность корней растений - раствор, полученные путем расчета по формуле (1) с использованием данных емкости поглощения, удельной поверхности почвы S_2 и рабочей поглощающей поверхности корней S_1 .

Поверхность корней растений, способная не только к первичному поглощению, но и передаче ионов внутрь корня, незначительна по сравнению с удельной поверхностью почвы. Благодаря высокой удельной поверхности почвы имеют низкую по сравнению с корнями растений поверхностную плотность зарядов (σ) и соответственно более низкий по абсолютной величине межфазный потенциал.

По формуле (1) определяем поверхностную плотность зарядов корня проростка пшеницы при значении межфазного потенциала, равного 10 мВ.

$$C_{\text{екТ}}/2\pi = (10 \text{ моль/м}^3 \cdot 81 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}^2/\text{Дж} \cdot \text{м} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/град} \cdot 297 \text{ град} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \cdot 1/\text{моль})/2 \cdot 3,14 = 2,82 \cdot 10^{-6} \text{ Кл}^2/\text{м}^2;$$

$$(C_{\text{екТ}}/2\pi)^{1/2} = 1,68 \cdot 10^{-3} \text{ Кл/м}^2.$$

$$Z_{\text{e}_0}\Psi/2kT = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 10^{-2} \text{ В} / 2 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/град} \cdot 297 \text{ град} = 0,195.$$

$$\exp(Z_{\text{e}_0}\Psi/2kT) = 1,21; \quad \exp(-Z_{\text{e}_0}\Psi/2kT) = 0,82;$$

$$\sigma = 1,68 \cdot 10^{-3} \text{ Кл/м}^2 \cdot (1,21 - 0,82) = 0,65 \cdot 10^{-3} \text{ Кл/м}^2.$$

Рассчитаем значение σ посевов пшеницы в период вегетации, если известно, что ёмкость катионного обмена корней составляет 9 мг-экв/100г воздушно-сухой массы, удельная поверхность $10 \text{ м}^2/\text{г}$.

$$\sigma = 9 \text{ мг-экв}/100 \text{ г}/10 \text{ м}^2/\text{г} = 9 \cdot 10^{-5} \text{ экв/г} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}/10 \text{ м}^2/\text{г} = 0,87 \text{ Кл/м}^2.$$

Расчёт поверхностной плотности зарядов корней свидетельствует, что формула (1) достоверно отражает динамику формирования корневой системы пшеницы от 4-5 дневного проростка до завершения процессов роста и развития посевов, выращиваемых в поле в течение около 4-х месяцев.

Парксом и Де Брюном (Parks, De Bruyn, 1962) разработан способ определения знака заряда поверхности коллоидных частиц с зависящим от значения рН зарядом. Этот способ заключается в том, что разность значений рН водной суспензии и в 1 н. растворе КСl указывает на знак заряда коллоидов. Разность $\text{pH}_{1\text{н}\cdot\text{КСЛ}} - \text{pH}_{\text{H}_2\text{O}} = \Delta \text{pH}$ может иметь положительное, нулевое или отрицательное значение, соответствующее знаку заряда поверхности частиц. Если $\text{pH} < 0$, то частицы имеют отрицательный заряд, адсорбция катионов преобладает над адсорбцией анионов; если $\text{pH} > 0$, то частицы имеют положительный заряд и наоборот, преобладает адсорбция анионов. Значение рН водной суспензии коллоидов, при которой $\Delta \text{pH} = 0$, было названо «точкой нулевого заряда». Для обозначения этого рН предложен термин ZPC, состоящий из начальных букв понятия «точка нулевого заряда». Зная значение ZPC, по формуле, аналогичной формуле Нернста, можно рассчитать поверхностный потенциал:

$$\psi_0 = (RT/F) \ln(H^+)/(H^+)_{zpc} = 59(ZPC - pH) \quad (2)$$

где ψ_0 выражен в мВ при 25° С (Parks, De Bruyn, 1962).

Рассчитаем межфазные потенциалы корень-раствор по формуле (1). При значении рН, равном 4, 5, 6, рассчитанные значения ψ составили +33,8; +7,8; -18,2 мВ. Эти цифры указывают на то, что рассчитанные зависимости знака заряда поверхности корня проростка пшеницы и величины ψ от рН раствора сопоставимы с экспериментальными данными (рис. 2, табл. 1).

1.2 Модель передвижения ионов из почвы к зоне «всасывания» (корневых волосков) корней растений

Согласно современным представлениям процесс биовыноса из почвы элементов питания растениями включает 3 стадии:

- 1) передвижение ионов из почвы к поверхности корней растений;
- 2) передвижение ионов с внешней поверхности во внутрь корня (первичное поглощение);
- 3) передвижение ионов из корня в стебли и листья (транспорт ионов).

Поглощение воды и минеральных солей из почвенного раствора, необходимых растению, протекает в зоне «всасывания» корня. Зона «всасывания» - это участок в верхушке растущего корня, который расположен за конусом нарастания и зоной растяжения, в котором формируются проводящие ткани корня, по которым минеральные соли поднимаются вверх к стеблю и листьям [90].

Процесс передвижения воды и ионов к зоне «всасывания» корней растений описывается моделью, совпадающей с моделью передвижения ионов по капиллярам почвы под действием капиллярных или гравитационных сил, напряженности электростатических полей на поверхности почвенных частиц и капилляров. Первые два члена уравнения описывают доставку ионов корневым волоскам (ось X) под действием диффузии и напряжённости электростатического поля корневой системы. Третий член уравнения (3) описывает восходящий поток ионов по проводящим тканям корня (ось Y) под действием транспирации:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + D \frac{\partial}{\partial x} \left(C \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} (\vartheta C) \quad (3)$$

Решения дифференциального уравнения (3) для случая выноса ионов из поверхностного слоя почвы при промывке и аккумуляции ионов в почве при засолении имеют следующий вид:

$$C_t = C_0 e^{-\lambda v t} \quad (4)$$

здесь $C_0 \gg C_t$, C_t – содержание в почве вынесенных солей,

$$C_t = C_0 e^{\lambda v t} \quad (5)$$

здесь $C_0 \ll C_t$, C_t – содержание вносимых в слой почвы солей, v – скорость потока раствора, t – продолжительность процессов выноса и аккумуляции солей в почве, λ – параметр массопереноса ионов [70].

Для случая биовыноса ионов из почвы корневой системой растения на контроле и вариантах с применением минерального удобрения с транспирирующей водой из (4) и (5) следуют два уравнения:

$$C_i = C_K e^{-\lambda \Sigma E T} \quad (6)$$

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

$$C_i = C_K e^{\lambda \Sigma E T} \quad (7)$$

здесь $C_i > C_K$, λ – параметр биовыноса иона [67].

При решении уравнения (1) варианты с применением минеральных удобрений или технологических приемов сравнивали с контрольным вариантом. Если принять контрольный вариант за исходное значение биовыноса ($t=0$, $C(x,y) = C_K$), на вариантах с применением удобрений или технологических приемов имеют место два случая: при $t>0$, $y>0$ $C(x,y)=C_i$, где $C_K \gg C_i$ и $C_i \gg C_K$, то решение уравнения в нестационарном варианте принимает следующий вид:

$$C_i = C_K e^{-\lambda \delta \Sigma E T} \quad (8)$$

$$C_i = C_K e^{\lambda \delta \Sigma E T} \quad (9)$$

Уравнения (6) и (7) можно представить в следующем виде:

$$\ln(C_k/C_i) = \lambda \sum E_T \quad (10)$$

$$\ln(C_i/C_k) = \lambda \sum E_T \quad (11)$$

где λb - параметр массопереноса ионов в системе корень-почва.

Формула для параметра биовыноса имеет следующий вид:

$$\lambda b = 1,8 \cdot 10^3 \cdot (\sigma_k - \sigma_n) / T \cdot Re \cdot [(z_1 + z_2 / 2)]^{0,5} \quad (12)$$

Формула напряжённости электростатических полей равна:

$$E = 1,8 \cdot 10^3 \cdot (\sigma_k - \sigma_n) / T \quad (13)$$

Для перевода значений $1/m$ в Вольты использовали равенство:

$$\varphi_0 = \psi \cdot e z_0 / kT \quad (\text{В/м, Дж/Кл}\cdot\text{м}) \quad (14)$$

Величина E имеет размерность силы, которая используется для сдвига столба воды в капиллярах почвы к поверхности корней. Напряжённость электростатического поля системы корень-почва равна:

$$E = \alpha \varphi_0 = 4\pi \sigma e Z_0 / \epsilon kT = 1,8 \cdot 10^3 \sigma / T \quad (15)$$

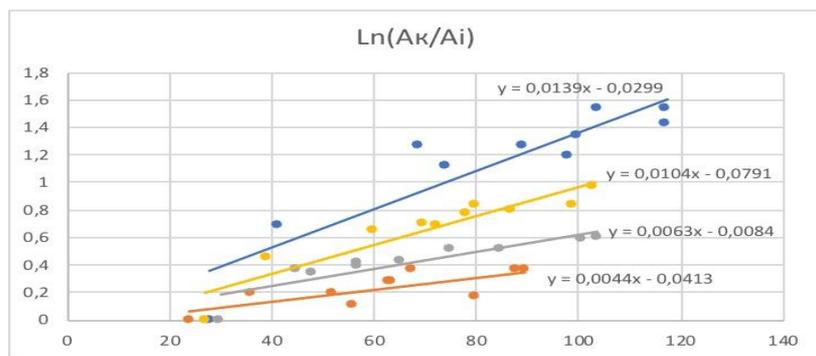
где σ – поверхностная плотность зарядов, Z_0 – валентность потенциало-пределяющего иона (аниона), φ_0 - безразмерный межфазный потенциал, ϵ – диэлектрическая проницаемость, e - заряд электронов, k - постоянная Больцмана, T - абсолютная температура, α – Дебаевский радиус [34].

Выражение для напряжённости электростатического поля получено из решения уравнения (3) и выражено через поверхностную плотность зарядов.

Как следует из формулы (15), величины E и σ при постоянной температуре имеют линейную прямо пропорциональную зависимость. Для доказательства этой зависимости были использованы результаты экспериментально-полевых работ.

Полевые опыты проведены на опытном поле Новозыбковской сельскохозяйственной опытной станции филиала ФНЦ кормопроизводства и агроэкологии имени В.Р. Вильямса в 2006-2013 гг.

На рисунке 3 представлена зависимость $\ln (A_k/A_i)$ от транспирации посевов озимой ржи.



$\Sigma \text{вЕт, мм}$

Рисунок 3 - Зависимость $\ln (A_k/A_i)$ от транспирации посевов озимой ржи ($\Sigma \text{вЕт, мм}$) для ^{137}Cs на разных вариантах опыта в 2006-2009 гг. [68].

A_k/A_i – соответственно удельная активность зерна на контроле и на варианте i . 1-2006 г. (КУ= 1,5); 2-2009 г. (КУ=1,45); 3-2008 г. (КУ= 1,14); 4-2007 г. (КУ= 1).

В корреляционной матрице отражена связь между $\ln (A_k/A_i)$ от транспирации посевов озимой ржи ($\Sigma \text{вЕт, мм}$). Коэффициенты регрессии между этими величинами равны параметру биовыноса и составляют в разные годы в зависимости от КУ разные значения. При КУ, равном 1,5; 1,45; 1,14; 1 соответственно $\lambda = 13,9; 10,4; 6,3; 4,4$ 1/м

Рисунок 3 наглядно свидетельствует, что формула (8) достоверно отражает биовынос цезия-137 из почвы товарной продукцией зерновых злаков.

Учитывая закономерности изменения кратности снижения биовыноса ^{137}Cs с одной тонной транспирирующей влаги, были построены полулогарифмические графики, у которых по оси абсцисс отложены значения транспирации за период вегетации, а по оси ординат – логарифмы кратности снижения.

На рисунке 4 представлены графики этой зависимости при внесении полного минерального удобрения на посевах злаковых трав по данным работы [48]. Травосмесь включала овсяницу луговую, двукосточник тростниковидный, лисохвост луговой и выращивалась на аллювиальной луговой песчаной почве центральной поймы реки Ипуть, где водный режим зависел не только от КУ, но и количества паводковых вод. В корреляционной матрице коэффициент детерминации отражает тесную связь между двумя величинами. Параметр биовыноса ^{137}Cs из почвы посевами травосмеси в разные годы составил соответственно: 7,7; 12,5; 7,3; 10,1; 11,2; 18,8 1/м.

При описании процесса биовыноса элемента питания с урожаем зерна озимой ржи примем за начальное значение содержания элемента на контроле (C_k) и найдем отношение значения (C_i/C_k). Здесь C_i – содержание элемента и в урожае на разных вариантах опыта.

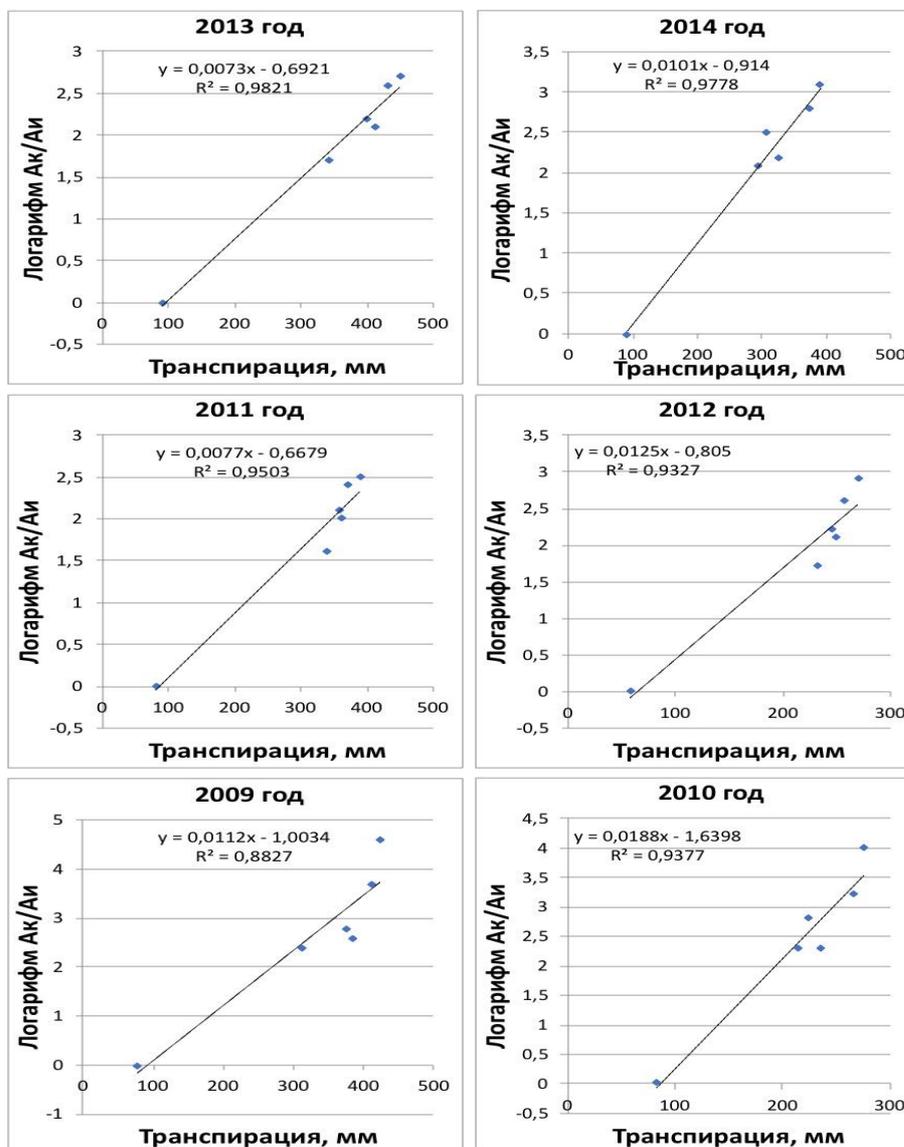


Рисунок 4 - Зависимость логарифма (A_k/A_i) первого укоса сеяных злаковых трав от транспирации в разные годы

Зависимость значений $\ln(C_i/C_k)$ от транспирации для макроэлементов (рис. 5), для микроэлементов (рис. 6) и зависимость логарифмов C_i/C_k для озимой ржи от транспирации, выращиваемой на дерново-подзолистых песчаных почвах при внесении органических и минеральных удобрений от транспирации.

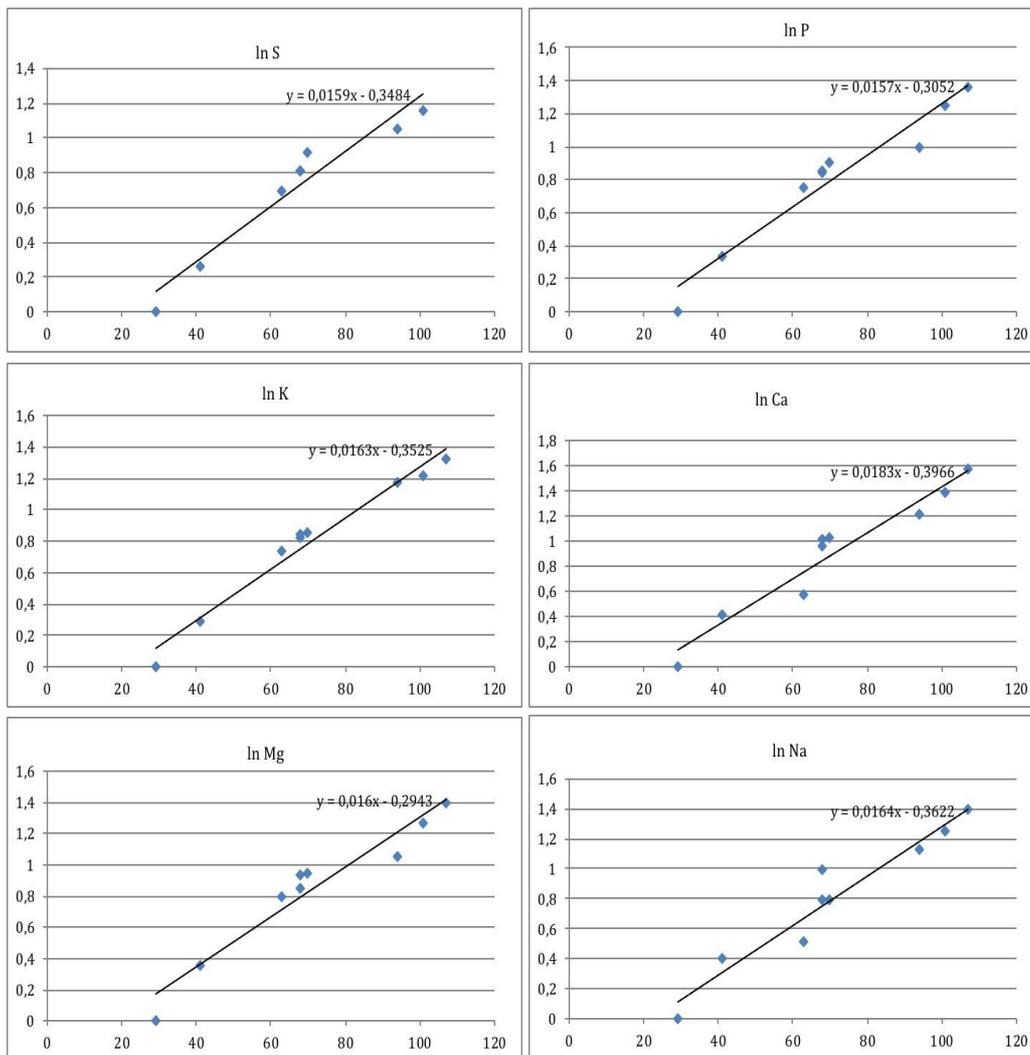


Рисунок 5 - Графики зависимости $\ln(C_i/C_k) = f(\Sigma_{вЕт})$ для макроэлементов P, K, Mg, S, Ca, Na для озимой ржи

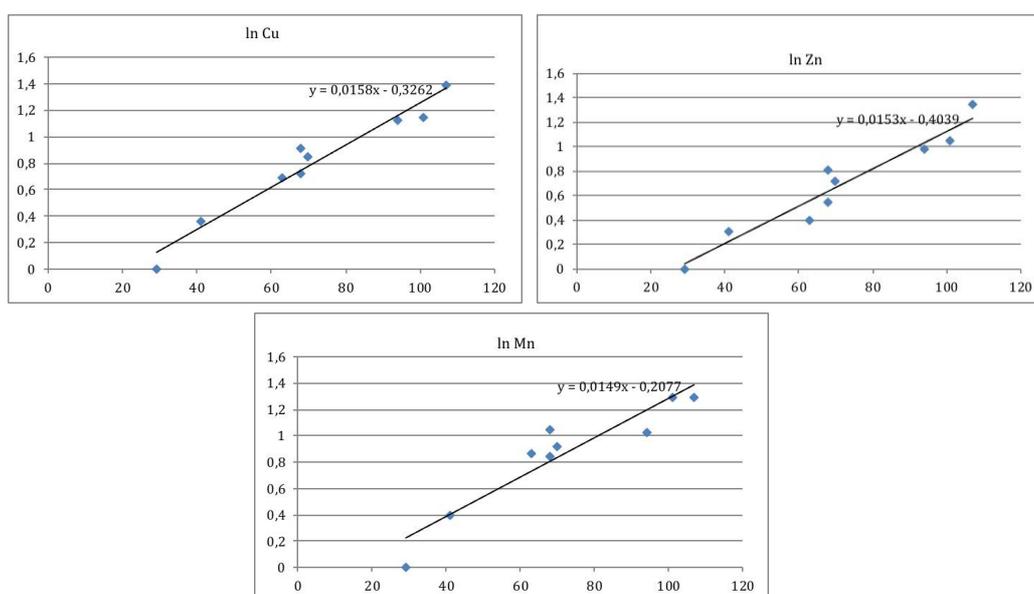


Рисунок 6 - Графики зависимости $\ln(C_i/C_k) = f(\Sigma_{вЕт})$ для микроэлементов Mn, Zn, Cu

Озимую рожь выращивали на дерново-подзолистой песчаной почве. Макроэлементы Ca, Na, K, Mg, S, P, имеют следующие значения интенсивности биовыноса из почвы соответственно: 18,3; 16,4; 16,3; 16; 15,9; 15,7 1/м.

Интенсивность биовыноса микроэлементов Cu, Zn, Mn, из почвы озимой рожью составило соответственно: 15,8; 15,3; 14,9 1/м.

Линейные прямо пропорциональные зависимости $\ln (C_i/C_k)$ от $\sum_{\text{вет}}$ для ^{137}Cs , макроэлементов и микроэлементов являются доказательством достоверности уравнений (8-11).

Как следует из рисунков 3-6, соблюдается линейная прямо пропорциональная зависимость между значениями $\ln (C_i/C_k)$ и $\sum_{\text{вет}}$. Тогда уравнение биовыноса элемента питания урожаем зерна примет следующий вид:

$$\ln (C_i/C_k) = \lambda_i \sum_{\text{вет}} \quad (5)$$

где λ_i (1/м) – постоянный коэффициент, независимый от содержания элемента питания в урожае зерна и транспирации.

Макроэлементы P, K, Mg, S, Ca, Na имеют следующие рассчитанные значения λ_i : 15,7; 16,3; 16,0; 15,9; 18,3; 16,4 м⁻¹. Микроэлементы Cu, Mn, Zn имеют следующие значения λ_i : 15,8; 14,9; 15,3 м⁻¹. По величине интенсивности биовыноса элементов из почвы корневой системой озимой ржи макроэлементы располагаются в следующей убывающей последовательности: P < S < Mg < K < Na < Ca. По величине интенсивности биовыноса элементов из почвы корневой системой микро-элементы располагаются в следующей последовательности: Mn < Zn < Cu.

Экспериментальное подтверждение формул (6-11) позволяет сделать вывод, что получена зависимость, выражающая существенную закономерность биовыноса ионов из почвы, которая справедлива для радионуклидов, макро- и микроэлементов.

1.3 Модель адсорбции ионов на поверхности корневых волосков и ризодермы зоны «всасывания»

Вторая стадия биовыноса ионов из почвы растениями (первичное поглощение) включает процессы ионно-обменной адсорбции на поверхности корней и передвижение ионов вглубь корня. Поверхность корней растений состоит из

оболочек клеток определённой толщины, приблизительно равной 0,5 мк. Оболочка представляет тонкопористое тело с диаметром пор, размер которых составляет 0,9 – 20 нм. Клетки поверхностного слоя (ризодермы) образуют особые выросты или корневые волоски. Длина корневых волосков составляет 0,05 – 10 мм и диаметр около 0,01 мм. Корневые волоски образуют зону «всасывания» почвенного раствора толщиной 1-2 см [90].

Промежуток между поверхностью корневого волоска и почвенных частиц может достигать 1,5 нм, тогда как толщина ДЭС не превышает 5 нм. Отсюда, в почвах в зависимости от влажности и концентрации почвенного раствора могут иметь место случаи перекрытия ДЭС, формирующихся на поверхности корневых волосков и частиц почвы, так и отсутствие перекрытия.

Ионы, передвигающиеся к корням растений с фильтрующей, капиллярной или пленочной влагой, прежде чем попасть на поверхность корней, должны преодолеть посредством диффузии электростатическое поле. Было рассмотрено, как влияет электростатическое поле на диффузию ионов в тонкой пленке раствора, расположенной между заряженными поверхностями корня и почвенных частиц, прилегающих к корням, для случая перекрывающихся и неперекрывающихся двойных слоёв. Последнее имеет место также при выращивании растений в водной среде.

До внесения удобрений в начальный момент времени раствор, окружающий корни, не содержит иона, который передвигается к поверхности корней, например K^+ . При передвижении питательного раствора к двойному слою, окружающему корни, ион K^+ будет диффундировать в этот слой. Вследствие электронейтральности ДЭС в обмен на этот ион во внешний раствор будут поступать ионы, содержащиеся в двойном слое.

В случае неперекрывающихся двойных слоев ион K^+ будет обмениваться на ионы, содержащиеся в ДЭС поверхности корней, например ион H^+ и другие. В случае перекрытия двойных слоев ион K^+ будет обмениваться также на ионы, содержащиеся в ДЭС почвенных частиц (например, Na^+ , Ca^{2+} и другие). Так как электростатическое поле препятствует диффузии ионов как в ДЭС, так и из него, то образуется определенное распределение этих ионов в ДЭС.

Сначала было определено, какое количество ионов K^+ может быть адсорбировано поверхностью корней при наличии неперекрывающихся двойных слоев. Для этого было составлено уравнение диффузии ионов в электростатическом поле вокруг отрицательно заряженной поверхности корней растений:

$$D - \omega C (e^{-\alpha x}) = 0 \quad (15)$$

где $\omega = D\psi b$, D – коэффициент диффузии, ψ – межфазный потенциал на границе раздела корень-раствор.

Решение уравнения получено в работе [67] и имеет вид:

$$C(\alpha - 1) = C(0)e^{(-zb\psi(1-e^{-1}))} \quad (16)$$

где $C(\alpha - 1)$ – концентрация катиона на расстоянии $\alpha - 1$ от поверхности корня или в почвенном растворе, $C(0)$ – концентрация катиона на поверхности корня, $b = eZ_0/kT$, $z b \psi$ – безразмерный потенциал.

В том случае, когда ДЭС вокруг корней и почвенных частиц не перекрыты, то адсорбция на корнях зависит только от потенциала на границе раздела корень-раствор. Оценка достоверности формулы (15) для описания процесса ионно-обменной адсорбции на поверхности почвенных частиц выполнена в работе [67].

Для расчета содержания катиона на поверхности корней растений при перекрывающихся двойных слоях было взято уравнение в следующем виде:

$$D \text{ grad} C - vC \text{ grad} \psi = D\alpha \quad (17)$$

где $v = bD$

Решение (17) имеет следующий вид:

$$C(\kappa) = C_p e^{-b(\psi_2 - \psi_1)} \quad (18)$$

где ψ_2, ψ_1 – межфазные потенциалы на границах раздела корень-раствор и почва-раствор.

Модель позволила установить, что концентрация иона на поверхности корней определяется разностью межфазных потенциалов на обеих границах раздела.

Отношение количества ионов, адсорбированных 1 г корней к его содержанию в одном мл равновесного почвенного раствора получило название коэффициента распределения (K_d) и служит характеристикой величины адсорбции [87].

Отношение значений K_d двух ионов равно константе ионного обмена, который определяет доли адсорбированных катионов.

Модель (17) позволила расшифровать параметр биовыноса иона из почвы растением.

Выражая межфазные потенциалы через поверхностную плотность зарядов, уравнение (18) в нестационарном варианте для периода вегетации приводится к следующему виду:

$$C_k = C_n e^{-(\lambda_k - \lambda_n) \Sigma E_t} \quad (19)$$

где ΣE_t – транспирация за период вегетации.

Расшифровка параметра массопереноса ионов в почве была выполнена в работе [74], а параметр биовыноса в работе [67].

Формула параметра массопереноса ионов в почве имеет следующий вид:

$$\lambda_b = 1,8 \cdot 10^3 \cdot \sigma \cdot Pe/T \cdot ((Z_1 + Z_2)/2)^{0,5} \quad (20)$$

где σ – поверхностная плотность зарядов на поверхности почвенных капилляров, z_1, z_2 – валентность аниона и катиона соли, Pe – число Пекле, T – абсолютная температура почвы.

Параметр биовыноса иона (λ_b) определяется следующей формулой:

$$\lambda_n = 1,8 \cdot 10^3 \cdot (\sigma_k - \sigma_p) \cdot Pe/T \cdot (Z_1 + Z_2)/2)^{0,5} \quad (21)$$

где σ_k – поверхностная плотность зарядов корневой системы растений.

Величина параметров массопереноса ионов и биовыноса независимо от происхождения капиллярно-пористого тела (почва, корень) определяется согласно формуле одними физическими показателями, имеющими разные значения.

Как следует из формул (20) и (21), процесс адсорбции ионов на корневой системе растений зависит, в основном, от плотности зарядов на их поверхности. Культуры с высоким значением σ_k , такие, как кукуруза зубовидная и овёс посевной способны приспосабливаться к разным почвенным условиям. Культуры с низким значением σ_k , такие, как пшеница, могут формировать высокий урожай в определённых почвенных условиях.

Как следует из таблицы 2 корни растений имеют более высокую плот-

ность поверхностных зарядов и более высокий межфазный потенциал, чем почвы. По интенсивности поглощения ионов из почвы, приведенные в таблице культуры, расположились в следующую последовательность: люпин желтый > кукуруза > овес > пшеница. Параметр биовыноса характеризует интенсивность поглощения ионов корнем. Расчеты абсорбции и константы ионного обмена позволяют сравнивать разные ионы по интенсивности поглощения.

Таблица 2 - Поверхностная плотность зарядов корней растений и четырёх почв

Показатель	S, М ² /г	ЕКО, Мг-экв/100г	σ, Кл/м ²
Культура, почва			
Озимая пшеница (<i>Triticum vulgара L.</i>)	10	9	0,87
Овес (<i>Avena sativa L.</i>)	14	22,8	1,57
Кукуруза зубовидная (<i>Zea mays indentata Sturt</i>)	12	22,2	1,78
Люпин жёлтый (<i>Lupinus luteus L.</i>)	33,3	47,7	1,37
Дерново-среднеподзолистая грунтово-глееватая легкосуглинистая	40	10	0,24
Чернозем южный тяжелосуглинистый	130	36,3	0,27
Чернозем мощный глинистый	150	37,7	0,24
Серозем среднесуглинистый	80	12,2	0,15

Примечание: S, ЕКО, σ – соответственно удельная поверхность, емкость поглощения, поверхностная плотность зарядов корней и почвы. Название почв и их свойства взяты из работы [24], емкость поглощения корней взята из работ [48,49,51,52].

Культуры, имеющие большую удельную поверхность корневой системы, как люпин жёлтый, способны усваивать труднодоступную влагу. Передвижение ионов с поверхности корневой системы в глубь корня зависит от констант ионного обмена.

Таким образом, модель адсорбции ионов на корнях растений дала возможность расшифровать параметр биовыноса, рассчитывать величину адсорбции ионов на корнях, интенсивность поглощения ионов корнем, проводить сравнительный анализ биовыноса разных культур.

Рассмотрение процесса биовыноса ограничили поглощением ионов во внутрь корня. По общепринятым представлениям, сложившимся в почвоведении, понятие «биовынос» - это максимальное количество питательных веществ, поступающих в растение из почвы в течение соответствующей фазы развития и за весь вегетационный период. В агрохимии понятие биовыноса означает общую потребность сельскохозяйственных культур в элементах минерального

питания, включает в себя содержание питательных веществ в продукции (хозяйственный вынос), так и в корневых, пожнивных остатках и листовом опаде (остаточный вынос). В данной работе рассматривается только хозяйственный вынос за весь вегетационный период и приводятся данные содержания элементов питания в воздушно-сухой массе продукции растениеводства.

2. Механизмы функционирования закономерностей биовыноса ионов из почвы растениями

2.1 Влияние напряженности электростатических полей корней и почвы от их поверхностной плотности зарядов

В настоящее время имеется множество фактов, полученных в ходе проведения экспериментально-полевых исследований с разными культурами и требующих теоретического объяснения. Закономерности биовыноса ионов из почвы растениями раскрывают сущность, внутренние механизмы, которые управляют процессом, позволяют описать и объяснить большое количество эмпирического материала. Для интерпретации различных явлений, возникающих в процессе биовыноса ионов из почвы растениями, были рассмотрены наиболее существенные механизмы функционирования закономерностей.

Формула параметра биовыноса ионов из почвы, входящая в закономерности (8), (9) включает следующие механизмы: напряжённость электростатического поля системы корень-почва ($E = \alpha \phi_0 = 4\pi e Z_0 / \epsilon k T = 1,8 \cdot 10^3 \sigma / T$) σ – поверхностная плотность зарядов, Z_0 – валентность потенциалопределяющего иона (аниона), ϕ_0 - безразмерный межфазный потенциал, T - абсолютная температура, α – Дебаевский радиус, валентности катиона и аниона соли.

Выражение для напряжённости электростатического поля (13) получено из решения уравнения (3) и выражено через поверхностную плотность зарядов (σ).

Как следует из формулы (15), величины E и σ при постоянной температуре образуют линейную прямо пропорциональную зависимость. Для доказательства этой зависимости $E = f(\sigma_k - \sigma_n)$ были использованы результаты экспериментально-полевых работ [27].

Полевые опыты проведены на опытном поле Новозыбковской сельскохо-

зяйственной опытной станции филиала ФНЦ кормопроизводства и агроэкологии имени В.Р. Вильямса в 2011-2013 гг.

Почва опытного участка – дерново-подзолистая песчаная, подстилаемая с глубины 1,2 м мощными водноледниковыми песками. Мощность гумусового слоя составляет 18-20 см. Содержание органического вещества (по Тюрину) составляет 2,14-2,5%; рНКСl – 6,7-6,9; сумма поглощённых оснований – 7,2-9,3 мг-экв. на 100 г почвы; гидролитическая кислотность – 0,59-0,73 мг-экв. на 100 г почвы; степень насыщенности основаниями равна 92-93%; содержание подвижного фосфора – 357-380 мг/кг; обменного калия – 69-110 мг/кг почвы (по Кирсанову). Обеспеченность почвы фосфором – очень высокое, калием – среднее. Почва не нуждается в известковании. Содержание гумуса – высокое для дерново-подзолистой песчаной почвы. Учитывая высокую окультуренность почвы и среднюю обеспеченность калием в опыт включены следующие варианты: контроль, K₁₈₀, K₂₁₀. В качестве калийного удобрения использовался хлористый калий с содержанием K₂O, равным 56%.

В качестве объектов исследования были взяты 5 видов культур, относимых к 2 семействам и 5 родам. Семейство Fabaceae (Бобовые) включало один род *Lupinus* (люпин), и один вид *Lupinus luteus* L. (люпин жёлтый). Семейство Gramineae (Злаковые) включало соответственно 4 рода и 4 вида: *Avena* L., *Avena sativa* L. (овёс посевной); *Arrhenatherum* P.B., *Lolium multiflorum* L. (райграсс однолетний); *Panicum* L., *Panicum miliaceum* L. (просо посевное); *Sorghum* Pers., *Sorghum sudanense* Pers. (суданская трава).

Виды и роды культур характеризуются присущими только им особенностями, обусловленными природной средой их обитания. Люпин, как зелёное растение, даёт за лето несколько укосов. Овёс – важнейшее кормовое растение. Райграсс – прекрасное пастбищное растение, не боится вытаптывания, при стравливании быстро отрастает. Просо – в засушливые годы даёт устойчивые высокие урожаи. Сорго – ценное засухоустойчивое кормовое растение.

Использовались следующие сорта культур: люпин жёлтый (Престиж), овёс посевной (Скакун), суданская трава (Кинельская-100), райграсс однолетний

(Изорский), просо посевное (Квартет). Норма высева семян составляла соответственно: 1,2; 5,0; 2,0; 8,0; 5,0 млн. шт./га. Опыт был развернут в звене севооборота со следующим чередованием культур: озимая рожь, картофель, одновидовые и бобово-злаковые посе­вы. Посев опытных делянок проводили сеялкой СН-10 в первой декаде мая. Учет зелёной массы одновидовых посевов кормовых культур проводили вручную.

Отобранные после уборки урожая растительные образцы после высушивания при постоянной температуре 105 °С, анализировали на определение показателей качества в центральной учебно-научной испытательной лаборатории БГАУ общепринятыми методами. Озоление проводили методом сжигания по Гинсбургу. Содержание калия определяли на пламенном фотометре (ГОСТ 30504-97), фосфора на фотоэлектроколориметре (ГОСТ 26657-97). Содержание азота в растительных образцах определяли по ГОСТ Р 51417-99, при пересчете на сырой белок использовали коэффициент – 6,25.

Полученные экспериментальные данные обрабатывались статистическими методами дисперсионного и корреляционного анализов с использованием стандартного компьютерного программного обеспечения (Excel 7,0; Statistic 7,0; NCSS – 2000).

Численные методы исследования включали следующие расчеты: транспирация рассчитывалась по формуле Пенмана [79], испаряемость - по формуле Н.Н. Иванова [40], параметр биовыноса (λ_b) находили по формуле (12), число Re рассчитывали по уравнению корреляции функции $\lambda_b - f(\sum V \sum T / \sum V E_0)$, как частное λ_b / λ_0 , где $\lambda_0 = \lambda_b$, при $\sum V E_T / \sum V E_0 = 0$. Параметр λ_b находился по формуле (11), напряженность электростатического поля системы корень-почва (E) находился как частное от деления формулы на число Re .

Период вегетации культур в 2013 году характеризовался повышенными значениями радиационного баланса, фотосинтетически активной радиации, испаряемости и дефицита атмосферной влаги (табл. 3). В 2013 году культуры выращивались в экстремальных по водообеспеченности условиях ($KY = 0,34$). Период вегетации культур в 2012 году культуры испытывали недостаток почвенной влаги ($KY \approx 0,5$).

Таблица 3 - Фитоклиматические показатели весенне-летней вегетации посевов культур в разные годы

Показатель \ Год	ΣvQc	ΣvQf	t, °C	L	ΣvE_0	ΣvH	$\Sigma vE_0 - \Sigma vH$	KY
2011	590	378	19,3	2,46	240	162	- 78	0,67
2012	597	397	19,4	2,46	243	119	- 124	0,49
2013	720	472	21,6	2,45	294	99	- 195	0,34

Примечание: ΣvQc – сумма суточных значений радиационного баланса в период вегетации, МДж/м²; ΣvQf – сумма суточных значений в течение вегетации фотосинтетически активной радиации, МДж/м²; T – температура воздуха в градусах Цельсия; L – теплота парообразования МДж/кг; ΣvE_0 – испаряемость за период вегетации, мм; ΣvH – сумма осадков за период вегетации, мм; $\Sigma vE_0 - \Sigma vH$ – дефицит атмосферной влаги в период вегетации, мм; KY- коэффициент увлажнения.

По величине К.т. культуры образуют последовательность: райграсс однолетний > овёс посевной > суданская трава > просо посевное > люпин жёлтый (табл. 4).

Таблица 4 - Транспирационные коэффициенты (К.т.) разных видов культур в период весенне-летней вегетации в разные годы

Культура \ Год	Люпин жёлтый	Овёс посевной	Райграсс однолетний	Суданская трава	Просо посевное
2011	362	467	496	469	378
2012	347	454	461	451	350
2013	355	461	470	457	355
Среднее	355	461	476	459	361

Примечание: К.т. - транспирационный расход влаги (т) на формирование одной тонны воздушно-сухой фитомассы.

Все культуры повысили значение К.т. в 2011 году, при оптимальном водном режиме по сравнению с 2012 и 2013 годами. Известно, что транспирационный расход влаги на формирование одной тонны воздушно-сухой фитомассы зависит от почвенно-климатических условий и вида культуры и не зависит от минерального питания культур [107]. Наибольшие различия в К.т. наблюдалась у разных видов культур. Люпин жёлтый и просо посевное затрачивали на формирование одной тонны фитомассы минимальное количество влаги (~360 т). Райграсс однолетний, являясь влаголюбивой культурой, затрачивал на формирование одной тонны фитомассы максимальное из представленных культур количество транспирируемой влаги (~480 т). Овёс посевной и суданская трава занимают среднее положение между влаголюбивыми и засухоустойчивыми культурами (К.т.~460).

Относительная транспирация, а также показатель влагообеспеченности (от-

ношение суммы транспирации и физического испарения воды из почвы к испаряемости) являются количественными показателями доступности почвенной влаги корневой системе растений [56, 80]. В работе [56] было установлено, что в интервалах влажности легкосуглинистых серозёмов, равных (1-0,65) ППВ, (0,65-0,5) ППВ, (0,5-0,4) ППВ доступность почвенной влаги составляет соответственно 1,0-0,7; 0,7-0,35; 0,35- 0,20. Этим интервалам доступности влаги соответствуют почвенно-гидрологические константы: ППВ, ВРК, ВЗ.

Одновременно, проведённые исследования запасов влаги в однометровом слое серой лесной легкосуглинистой почвы в конце вегетации и относительной транспирации разных видов злаковых культур позволили установить, что почвенно-гидрологическим константам ППВ, ВРК, ВЗ соответствуют следующие значения: $\Sigma_{вЕт}/\Sigma_{вЕ_0}$: 0,85-0,7; 0,67-0,42; 0,42-0,31. Эти значения сопоставимы со значениями доступности почвенной влаги корневой системы растений, полученными для хлопчатника [56].

Для пяти видов культур имеет место линейная зависимость урожайности от доступности почвенной влаги корневой системе растений (табл. 5). Максимальный урожай фитомассы кормовых культур был получен на посевах люпина жёлтого, минимальный – на посевах райграса однолетнего.

Таблица 5 - Характеристика процесса биовыноса ионов из дерново-подзолистой песчаной почвы одновидовыми посевами кормовых культур (среднее за 2011-2013 гг.)

Показатель \ Культура	Контроль			K ₁₈₀			K ₂₁₀		
	У	$\Sigma_{вЕт}$	$\Sigma_{вЕт}/\Sigma_{вЕ_0}$	У	$\Sigma_{вЕт}$	$\Sigma_{вЕт}/\Sigma_{вЕ_0}$	У	$\Sigma_{вЕт}$	$\Sigma_{вЕт}/\Sigma_{вЕ_0}$
Люпин жёлтый	6,0	213	0,82	6,2	222	0,86	6,8	242	0,93
Овёс посевной	2,1	97	0,37	2,6	108	0,42	2,8	128	0,49
Райграс однолетний	1,3	62	0,24	1,8	84	0,32	2,2	102	0,39
Суданская трава	3,9	179	0,69	4,2	194	0,75	4,7	216	0,83
Просо посевное	2,9	105	0,40	4,2	153	0,59	4,7	170	0,66

Примечание: У – урожайность воздушно-сухой фитомассы кормовых культур, т/га; $\Sigma_{вЕт}$ – транспирация за период вегетации, мм; $\Sigma_{вЕт}/\Sigma_{вЕ_0}$ – относительная транспирация.

Посевы люпина жёлтого в течение вегетации имели оптимальную до-

ступность почвенной влаги на трёх вариантах опыта. Посевы суданской травы развивались при оптимальной влажности лишь на вариантах с внесением хлористого калия. Посевы овса посевного и просо посевного развивались в условиях недостатка влаги, доступность почвенной влаги соответствовала ВРК или влажности замедления роста растений, при которой проводят полив. Посевы райграса однолетнего развивались в экстремальных условиях, при большом недостатке влаги, соответствующем влажности завядания. Природной средой обитания райграса являются влажные почвы и возделывание его на почве с низкой влагоемкостью и недостатком влаги в период вегетации оказало существенное влияние на его урожайность.

Виды культур, относимые к двум семействам, возделываемые на одной почве, имели разную обеспеченность доступной почвенной влагой. Доступность почвенной влаги корневой системы растений увеличивается по сравнению с контролем при внесении калийного удобрения и повышения его дозы (табл. 5).

Для раскрытия механизмов возникновения этих двух явлений были рассчитаны по формуле (12) значения напряжённости электростатических полей пяти видов кормовых культур.

Формула (12) включает разность напряженности электростатических полей поверхности корневой системы растений и почвенных капилляров (E), по которым передвигаются почвенные растворы. Величина E в формуле (12) представлена в виде члена: $1,8 \times 10^3 (\sigma_k - \sigma_p) / T$, 1/м. В таблице 6 приведены рассчитанные значения $(\sigma_k - \sigma_p)$, и E пяти видов трав.

Люпин жёлтый имеет стержневую корневую систему, более глубоко проникающую в глубь почво-грунта, чем мочковатая, присущая большинству злаковых культур. Напряжённость электростатического поля корневой системы люпина жёлтого самая большая по сравнению со злаковыми культурами. Природная среда обитания с низкой влажностью почвы сформировала у растений рода Люпин мощное электростатическое поле.

Засушливые условия обитания суданской травы сформировали электростатическое поле корневой системы лишь немного уступающее по вектору напряженности люпину жёлтому.

Среда обитания с оптимальной и избыточной влажностью почвы сформировала более слабое электростатическое поле корневой системы растений рода Райграс.

Наибольшее значение E имеют люпин жёлтый и суданская трава, более низкое – райграс однолетний, овёс и просо имел приблизительно равные значения E (табл. 6). По величине доступности почвенной влаги и напряженности электростатических полей системы корень-почва виды культур образуют следующую убывающую последовательность: люпин желтый > суданская трава > просо посевное > овес посевной > райграс однолетний. Линейная зависимость прямо пропорциональна напряжённости электростатических полей системы корень-почва от разности плотностей отрицательных зарядов корневой системы культуры и почвы.

Таблица 6 - Рассчитанные значения E одновидовых посевов кормовых культур

Показатель	Вариант							
	K ₁₈₀				K ₂₁₀			
	$\sigma_{к-сп}$ Кл/м ²	$\lambda\delta$, 1/м	E , 1/м	E , мВ/м	$\sigma_{к-сп}$ Кл/м ²	$\lambda\delta$, 1/м	E , 1/м	E , мВ/м
Культура								
Люпин жёлтый	0.05	0.26	0.34	8.74	0.05	0.22	0.30	7.71
Овёс посевной	0.02	0.09	0.11	2.83	0.03	0.15	0.18	4.63
Райграс однолетний	0.04	0.24	0.26	6.94	0.05	0.20	0.23	5.90
Суданская трава	0.05	0.25	0.32	8.23	0.06	0.27	0.35	9.00
Просо посевное	0.03	0.13	0.16	4.11	0.02	0.07	0.09	2.31

Отсюда следует, что основной причиной разной доступности почвенной влаги корневой системы растений в течение вегетации является разность плотностей отрицательных зарядов корневой системы и почвы. От доступности почвенной влаги корневой системе растений зависит число Pe , которое влияет на потоки анионов и катионов солей.

Люпин жёлтый отличается от злаковых культур более высоким содержанием в фитомассе макроэлементов (P, K, Ca, Mg) и почти в 2 раза более высоким содержанием N, являющегося органогенным элементом. Небольшие различия в содержании элементов на вариантах объясняются высоким содержанием

их в почве на контроле. Внесение в почву калийного удобрения повысило содержание в фитомассе трав всех элементов питания, за исключением Mg.

На контрольном и вариантах с внесением калийного удобрения по величине доступности N, P, K, Ca, Mg и напряженности электростатическими полей системы корень-почва для всех видов культур соблюдается последовательность, по доступности влаги. На вариантах с внесением калийного удобрения наблюдается увеличение биовыноса не только калия, но и N, P, Ca, Mg (табл. 7). Хлористый калий, растворяясь в почвенной влаге, вызывает сжатие ДЭС поверхностей корней и почвы, повышает напряженность электростатических полей и поток почвенного раствора к корневой системы растений. Повышается не только доступность влаги корневой системе, но и элементов питания (табл. 7).

Таблица 7 - Биовынос элементов питания из почвы кормовыми культурами с транспирирующей водой за период вегетации, кг/га

Вариант Культура	Контроль					K ₁₈₀					K ₂₁₀				
	N	P	K	Ca	Mg	N	P	K	Ca	Mg	N	P	K	Ca	Mg
Люпин жёлтый	120	9	107	30	10	129	11	118	34	10	144	12	130	36	10
Овёс посевной	26	3	33	10	3	30	3	37	11	3	36	9	44	13	7
Райграс однолетний	11	2	21	6	2	16	2	28	8	2	21	3	35	10	23
Суданская трава	38	5	54	17	7	444	5	61	18	5	51	6	69	19	5
Просо посевное	32	4	42	13	4	45	6	52	17	5	47	47	61	16	4

При определенной доступности влаги, присущей каждому виду, доступность элементов N, P, K, Ca, Mg различна. Каждому значению доступности влаги корневой системе растений соответствует определенное число Pe. Число Pe определяет соотношение диффузии и конвекции в общем потоке почвенного раствора.

В переносе элементов питания N и K из почвы к корневой системе растений участвуют одновалентные ионы: NH_4^+ , NO_3^- , NO^{2-} , K^+ , которые сосредоточены в объемной жидкости, за пределом ДЭС. Двухвалентные катионы Ca^{2+} и Mg^{2+} сосредоточены в основном в адсорбционном слое ДЭС. По адсорбционной способности Mg^{2+} превосходит Ca^{2+} . Элемент питания P передвигается в почве в

виде ионов PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} , H_2PO_4^- , при этом ионы PO_4^{3-} и HPO_4^{2-} обладают самой высокой задерживающей способностью в микропорах почвы [69].

Для подтверждения этого явления были рассчитаны по формуле (2) интенсивности биовыноса из почвы каждого элемента питания (λ_b) по сравнению с контролем (табл. 8).

Таблица 8 - Рассчитанные значения интенсивности биовыноса каждого элемента питания из почвы на вариантах с внесением калийного удобрения по сравнению с контролем (средние за 2011-2013 гг.)

Культура \ Вариант	K_{160}					K_{210}				
	N	P	K	Ca	Mg	N	P	K	Ca	Mg
Люпин жёлтый	0,32	0,21	0,45	0,59	-	0,75	1,24	0,80	0,75	-
Овёс посевной	1,29	0,88	1,05	0,97	0,90	2,52	2,11	2,25	2,13	1,68
Райграс однолетний	4,25	0,92	3,42	3,66	2,94	6,01	5,03	4,85	4,94	3,97
Суданская трава	0,76	0,40	0,63	0,41	0,44	1,35	0,84	1,11	0,61	0,56
Просо посевное	2,50	2,17	1,48	2,22	1,59	2,69	1,72	2,45	1,82	1,00

Все виды культур характеризуются разной величиной напряжённости электростатического поля системы корень-почва и интенсивности биовыноса элементов питания по сравнению с контролем. Наибольшее значение λ_b наблюдается для N, K и Ca, наименьшее – для P и Mg. Увеличение дозы калийного удобрения повышает интенсивность биовыноса всех элементов, но не изменяет их последовательность. Более низкая интенсивность биовыноса N на посевах люпина жёлтого по сравнению с другими видами культур объясняется наличием клубеньковых бактерий на контрольном варианте.

Интенсивность биовыноса Mg определяется не только его высокой адсорбционной способностью, но и соотношением величин K к N. При $K/N < 1$ наблюдается увеличение интенсивности биовыноса Mg. При $K/N < 1$ имеет место недостаток K для синтеза азотсодержащих веществ и увеличивается интенсивность биовыноса Mg. Таким образом, доставка элементов питания определяется не только физико-химическими свойствами ионов и числом P_e , но и потребностью растения. Интенсивность поглощения ионов корнями культур зависит от напряжённости электростатических полей системы корень-почва. Видовые различия процесса биовыноса ионов из почвы определяются разностью между поверхностной плотностью зарядов корней культуры и почвы.

2.2 Влияние дозы полного минерального удобрения и температуры почвы на величину напряжённости электростатического поля системы корень-почва

Для доказательства зависимости величины E от дозы НРК были использованы данные полевого опыта, включающего 6 разных доз полного минерального удобрения из работы [5].

Исследования были проведены на луговом участке центральной поймы реки Ипуть юго-запада Брянской области в 2009-2011 годах. Почва опытного участка - аллювиальная луговая маломощная среднегумусная, песчаная на супесчаном аллювии со следующим разделением профиля на генетические горизонты: A_d (0-4 см), A_1 (4-18 см); B_1 (18-40 см); B_g (40-60 см), C_g (60-90 см). Агрохимическая характеристика почвы: pH_{KCl} 5,2-5,6, гидролитическая кислотность – 2,6-2,8 мг-экв/100 г, сумма поглощенных оснований – 11,3-13,1 мг-экв/100 г, емкость катионного обмена – 13,9-15,9 мг-экв/100 г, насыщенность основаниями 81-82 %; содержание гумуса – 3,08-3,33 % (по Тюрину), подвижного фосфора – 620-840 мг/кг, обменного калия – 133-180 мг/кг (по Кирсанову).

Интенсивность биовыноса элементов питания N, P, K, Ca, Mg из почвы при разных дозах минерального удобрения изучали в одновидовых посевах многолетних мятликовых трав. По фону двухъярусной вспашки высевали ежу сборную (*Dactylis glomerata* L., сорт ВИК 61), овсяницу луговую (*Festuca pratensis* Huds., сорт Дединовская) и двухкосточник тростниковидный (*Phalaroides arundinacea* L., сорт Припятский); нормы посева всех семян – 15 кг/га. Схема опыта: 1 вариант – контроль, без удобрений, 2 – $N_{90}P_{60}K_{90}$, 3 – $N_{90}P_{60}K_{120}$, 4 – $N_{90}P_{60}K_{150}$, 5 – $N_{120}P_{60}K_{120}$, 6 – $N_{120}P_{60}K_{150}$, 7 – $N_{120}P_{60}K_{180}$. Применяли аммиачную селитру, простой гранулированный суперфосфат, хлористый калий. Удобрения вносили ежегодно: азотные и калийные в два приёма (половина расчетной дозы под 1-й укос, вторая половина – под 2-й укос), фосфорные – полной дозой в один приём под 1-й укос. Площадь посевной делянки составляла 63 м², уборочной – 24 м², повторность опыта 3-кратная. Урожайность трав учитывали методом сплошной поделяночной уборки и отбора пробного снопа. В год

проводили два укоса (1-й укос – с 1 по 10 июня, 2-й – с 23 августа по 1 сентября) [5]. Методы исследования описаны в параграфе 2.1.

Фитоклиматические условия весенне-летней вегетации представлены в таблице 9.

Таблица 9 - Фитоклиматические условия весенне-летней вегетации посевов сеяных мятликовых трав по укосам и годам наблюдения (данные метеостанции «Красная гора»)

Показатель	Год	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 – до 1-го укоса; 2 – от 1-го до 2-го укоса.

Транспирационный коэффициент выражается транспирационным расходом влаги на формирование 1 т сена мятликовых трав. До первого укоса, при недостатке почвенной влаги, значения К.т. определяются фитоклиматическими условиями возделывания и не зависят от видовых особенностей культур (табл. 10).

Таблица 10 - Транспирационный коэффициент (К.т.) мятликовых трав в период вегетации

Культура	Год	2009	2010	2011
Период от возобновления вегетации до первого укоса				
Ежа сборная		452	500	515
Овсяница луговая		450	500	510
Двукосточник тростниковидный		450	500	510
Период вегетации от первого укоса до второго				
Ежа сборная		472	490	441
Овсяница луговая		472	497	439
Двукосточник тростниковидный		472	465	442

Видовые особенности проявляются при недостатке почвенной влаги в 2010 году, вызванном понижением уровня грунтовых вод, повышением радиационного баланса, испаряемости и температуры воздуха в период вегетации от первого до

второго укоса. В этих условиях только двукисточник тростниковидный уменьшает поглощение ФАР и расход воды на формирование урожая.

С повышением дозы NPK увеличивается напряжённость электростатического поля и повышается разность поверхностных плотностей зарядов корней и почвы (табл. 11). Следует отметить, что при равной дозе NPK на двух вариантах, но разных дозах N и K более высокое значение E наблюдается на варианте при $K/N > 1$. Это явление имеет место на посевах трёх видов мятликовых трав в первый и во второй укосы, из трёх видов трав посева овсяницы луговой имели более высокую напряжённость электростатического поля в первый и второй укосы. Согласно формуле (15) с уменьшением протяженности ДЭС увеличивается величина E.

Таблица 11 - Рассчитанные по формулам (12) и (13) показатели биовыноса ионов из почвы одновидовыми посевами мятликовых трав (среднее 2009-2011 гг.)

Показатель Вариант	первый укос				второй укос			
	$\lambda_b, 1/м$	E, 1/м	E, мВ/м	$\sigma_k - \sigma_{п}$ Кл/м ²	$\lambda_b, 1/м$	E, 1/м	E, мВ/м	$\sigma_k - \sigma_{п}$ Кл/м ²
<i>ежа сборная</i>								
N ₉₀ P ₆₀ K ₉₀	0.98	2.13	55	0.34	1.32	1.50	39	0.24
N ₉₀ P ₆₀ K ₁₂₀	0.99	2.25	58	0.36	1.16	1.38	35	0.23
N ₉₀ P ₆₀ K ₁₅₀	1.00	2.38	61	0.38	1.43	1.72	44	0.28
N ₁₂₀ P ₆₀ K ₁₂₀	0.94	2.29	59	0.37	1.45	1.77	45	0.29
N ₁₂₀ P ₆₀ K ₁₅₀	1.06	2.72	70	0.44	1.64	2.02	52	0.33
N ₁₂₀ P ₆₀ K ₁₈₀	1.08	3	77	0.48	1.73	2.14	55	0.35
<i>овсяница луговая</i>								
N ₉₀ P ₆₀ K ₉₀	0.79	2.03	52	0.32	1.02	1.23	32	0.2
N ₉₀ P ₆₀ K ₁₂₀	1.03	2.51	64	0.40	1.82	2.22	57	0.36
N ₉₀ P ₆₀ K ₁₅₀	0.87	2.56	66	0.41	1.83	2.23	57	0.36
N ₁₂₀ P ₆₀ K ₁₂₀	0.83	2.44	63	0.39	1.8	2.22	57	0.36
N ₁₂₀ P ₆₀ K ₁₅₀	0.92	2.79	72	0.45	1.91	2.39	61	0.39
N ₁₂₀ P ₆₀ K ₁₈₀	0.94	3.03	79	0.49	1.83	2.38	61	0.39
<i>двукисточник тростниковидный</i>								
N ₉₀ P ₆₀ K ₉₀	0.73	1.7	44	0.27	0.59	0.72	18	0.12
N ₉₀ P ₆₀ K ₁₂₀	0.77	1.83	47	0.29	1.36	1.68	43	0.27
N ₉₀ P ₆₀ K ₁₅₀	0.87	2.17	61	0.35	1.58	1.95	50	0.32
N ₁₂₀ P ₆₀ K ₁₂₀	0.89	2.97	56	0.38	1.58	1.92	49	0.31
N ₁₂₀ P ₆₀ K ₁₅₀	0.88	2.38	63	0.40	1.62	1.97	51	0.32
N ₁₂₀ P ₆₀ K ₁₈₀	0.89	2.47	76	0.48	1.46	2.05	53	0.34

Примечание: λ_b - параметр биовыноса ионов из почвы корневой системой растений, E - напряжённость электростатического поля системы корень-почва, σ_k , $\sigma_{п}$ плотность поверхностных зарядов корней и почвы.

В работе [71] было исследовано влияние степени засоления почв на величину протяженности ионной атмосферы почвенных растворов.

Зависимость $1/\alpha = \varphi(c)$ подчиняется экспоненциальному закону, приближаясь к асимптоте, при которой концентрация почвенного раствора равна 25 мг/мл (рис. 7). Это означает, что при концентрации почвенного раствора, большего 25 мг/мл, протяжённость ДЭС почвенных частиц не изменяется.

Во второй укос имеет место замедление темпа роста E при внесении НРК в дозе, превышающей 330 д.в./га отсюда при дозах $\text{НРК} > 330$ д.в./га протяжённость ДЭС и E сохраняют постоянные значения.

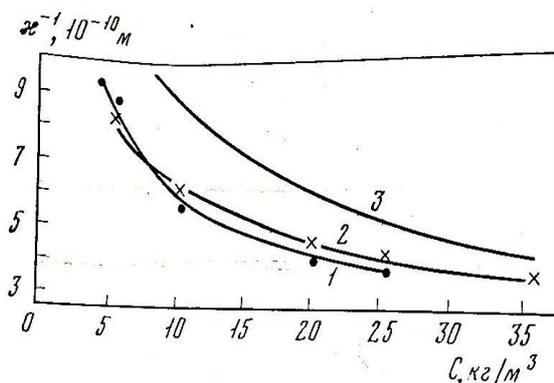


Рисунок 7 - Зависимость протяженности ионной атмосферы (α^{-1}) от концентрации почвенных растворов, по данным В. А. Ковды [1946, 1947]

- 1- почвы Голодной степи; 2- почвы Ферганской долины;
3- рассчитанная с учетом концентрации ионных пар

Представленные в таблицах данные разности плотностей зарядов корней культур и почвы позволяют рассчитать удельную поверхность корневых волосков при внесении разных доз удобрений и выяснить влияние повышения дозы удобрения на культуры семейства Злаковые (табл. 12). Для почвы имеются экспериментальные методы определения емкости катионного обмена (ЕКО, мэкВ/100г) и удельной поверхности (S_k , м²/г). В работах К. К. Гедройца [15] было выявлено, что навески черноземов в равных объемах 0,1 н. - 4 н. растворов NH_4Cl не изменяли значение ЕКО, обусловленное эквивалентностью ионного обмена. Поэтому можно предположить, что ЕКО корневых систем культур и почвы остаётся постоянной при внесении разных доз удобрений. В работах [116, 117, 124, 125] имеются данные ЕКО (мг экв/100 г) корней всех возделываемых в нашей стране культур и большинства сорных растений. В литературе имеется лишь незначительное количество данных об удельной поверхности корней некоторых культур.

Таблица 12 - Рассчитанные по формуле (12) удельные поверхности корневых систем 5 видов кормовых культур, возделываемых на дерново-подзолистых почвах при внесении минеральных удобрений

Показатель Культура	K ₁₈₀				K ₂₁₀	
	ЕКО, Мэкв/100 г	ЕКО, Кл/г	σк, Кл/м ²	Sк, м ² /Г	σк, Кл/м ²	Sк, м ² /Г
Люпин желтый	47.7	45.9	0.88	52.2	0.88	52.2
Овес посевной	22.8	22.0	0.85	25.8	0.86	25.5
Райграс однолетний	22.5	21.7	0.87	24.9	0.90	24.1
Суданская трава	13.5	13.0	0.88	14.9	0.89	14.6
Просо посевное	12.2	11.7	0.86	13.7	0.85	13.8

Злаковые культуры с увеличением дозы минерального удобрения уменьшают удельную поверхность корневой системы (табл. 13).

Таблица 13 – Рассчитанные по формуле (12) удельные поверхности корневых систем мятликов трав

Показатель Вариант	доза, д.в./Га	ЕКО, мг-экв/100 г	ЕКО, Кл/г	1 укос		2 укос	
				σк, Кл/м ²	Sк, м ² /Г	σк, Кл/м ²	Sк, м ² /Г
Ежа сборная							
N ₉₀ P ₆₀ K ₉₀	240	25.6	24.6	1.3	18.9	1.2	20.5
N ₉₀ P ₆₀ K ₁₂₀	270			1.32	18.6	1.19	20.7
N ₉₀ P ₆₀ K ₁₅₀	300			1.34	18.4	1.24	19.8
N ₁₂₀ P ₆₀ K ₁₂₀	300			1.33	18.5	1.25	19.7
N ₁₂₀ P ₆₀ K ₁₅₀	330			1.40	17.6	1.29	19.1
N ₁₂₀ P ₆₀ K ₁₈₀	360			1.41	17.4	1.31	18.8
Овсяница луговая							
N ₉₀ P ₆₀ K ₉₀	240	30.4	29.3	1.28	22.9	1.16	25.3
N ₉₀ P ₆₀ K ₁₂₀	270			1.36	21.5	1.32	22.2
N ₉₀ P ₆₀ K ₁₅₀	300			1.37	21.4	1.32	22.2
1	2	3	4	5	6	7	8
N ₁₂₀ P ₆₀ K ₁₂₀	300			1.35	21.7	1.32	22.2
N ₁₂₀ P ₆₀ K ₁₅₀	330			1.41	20.8	1.35	21.7
N ₁₂₀ P ₆₀ K ₁₈₀	360			1.45	20.2	1.35	21.7
Двукосточник тростниковидный							
N ₉₀ P ₆₀ K ₉₀	240	30.8	29.7	1.23	24.1	1.08	27.5
N ₉₀ P ₆₀ K ₁₂₀	270			1.25	23.8	1.23	24.1
N ₉₀ P ₆₀ K ₁₅₀	300			1.31	22.7	1.28	23.2
N ₁₂₀ P ₆₀ K ₁₂₀	300			1.34	22.2	1.27	23.4
N ₁₂₀ P ₆₀ K ₁₅₀	330			1.36	21.8	1.28	23.2
N ₁₂₀ P ₆₀ K ₁₈₀	360			1.44	20.6	1.3	22.8

Это явление связано с увеличением диаметра корневых систем или увеличением массы корней. С увеличением дозы минерального удобрения, повышается урожайность культур, возрастает поступление по ситовидным трубкам луба в корень органических веществ, образующихся в листьях (глюкоза, сахароза).

Представленные в таблицах данные дают возможность сделать следующие выводы:

1. Увеличение дозы NPK закономерно повышает напряжённость электростатических полей системы корень-почва

2. На посевах мятликовых трав значение величин E , $\sigma_k - \sigma_n$ в первый укос превышали эти значение во второй укос.

2.3 Влияние природных карбонатов кальция на напряжённость электростатического поля системы корень-почва и доступность катионов и анионов корневой системе растений

Установлено, что природный карбонат кальция, входящий в доломит, известняк, мергель, мел является минералом солевого типа. Заряд поверхности карбоната кальция зависит не только от преимущественной адсорбции или перехода в раствор одного из потенциалопределяющих ионов, но и их гидролиза и кислотно-основного равновесия в растворе. При значениях pH раствора, превышающих изоэлектрическую точку ($pH > 8,2-8,4$), поверхность карбонатов кальция заряжается отрицательно, при $pH < (8,2-8,4)$ – положительно [36].

Дополнительные данные о свойствах природных карбонатов кальция учитываются при анализе процессов адсорбции Ca^{2+} на почвенном поглощающем комплексе (ППК), растворения и осаждения вновь образованного $CaCO_3$ на поверхности коллоидных частиц карбоната кальция в зависимости от pH почвенного раствора. При значениях pH раствора, меньших изоэлектрической точки, путем адсорбции мицеллами карбоната кальция из раствора удаляются преимущественно ионы CO_3^{2-} и $CaCO_3$ растворяется. При растворении $CaCO_3$ в почвенном растворе и ППК увеличивается содержание Ca^{2+} . При значении pH раствора, больших изоэлектрической точки, удаляются из раствора ионы Ca, которые адсорбируются на поверхности коллоидных частиц карбоната кальция, достраивая его кристаллическую решетку.

Как видно из рисунка 8, карбонаты кальция образуют два концентрационных пика в профиле почвы: на глубине 50-70 см и глубже 120 см. Содержание обменных ионов Ca^{2+} в ППК по профилю почвы носит характер, противоположный распределению карбонатов кальция.

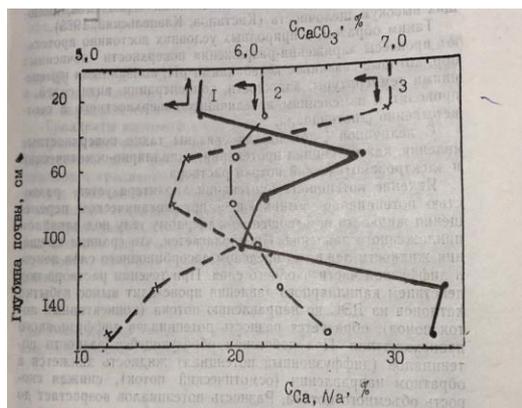


Рисунок 8 - Кривые распределения карбоната кальция, обменных Ca^{2+} , Na^{+} по профилю песчано-пустынной почвы:

1-Содержание CaCO_3 , в % от веса почвы. 2 - Содержание обменного Na^{+} в ППК, % от емкости поглощения 3 - Содержание обменного Ca^{2+} в ППК, в % от емкости поглощения [69]

Возникла необходимость рассмотреть роль природных карбонатов кальция в биовыносе элементов питания из почвы сельскохозяйственными культурами при pH почвенного раствора менее 8,2. Для этого были использованы данные из работы [104].

Исследования влияния природных карбонатов на интенсивность биовыноса катионов и анионов из почвы культурами проводили в период с 2001 по 2003 год в Новозыбковском районе Брянской области. Почва опытного участка – дерново-подзолистая песчаная на древнеаллювиальных отложениях и имеет следующую агрохимическую характеристику: pH_{kcl} – 6,4, гидролитическая кислотность – 0,66 мг-экв/100 г почвы, сумма поглощённых оснований 11,6 мг-экв/100 г почвы, степень насыщенности основаниями – 94,6%, содержание гумуса 1,2% (по Тюрину), содержание подвижного фосфора и обменного калия соответственно 337 и 62 мг/кг почвы (по Кирсанову).

Объектом исследования служила сеяная травосмесь, состоящая из следующих видов многолетних трав: ежа сборная (*Dactylis glomerata* L.), мятлик луговой (*Poa pratensis* L.), коострец безостый (*Bromopsis inermis* Holub.). В качестве минеральных удобрений использовали аммиачную селитру, хлористый калий, простой гранулированный суперфосфат. Имея высокую степень насыщенности основаниями, почва опытного участка не нуждалась в известковании. Для выяснения роли природного карбоната кальция в биовыносе элементов питания использовали вы-

сокую дозу доломитовой муки, с содержанием СаО и MgO соответственно 30 и 25%. Доза внесения доломитовой муки, равная 9 т/га, составила 0,36% от веса почвы в слое равном 0-20 см.

Схема опыта включала следующие варианты: 1. Контроль; 2. $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$; 3. $\text{N}_{180}\text{P}_{60}\text{K}_{100}$; 4. $\text{N}_{180}\text{P}_{60}\text{K}_{100} + \text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$. Площадь деланки составила 40 м², повторность опыта – четырехкратная. Учет урожая проводился вручную.

Агрохимический анализ почвы проведен по методам, принятым в агрохимической службе. Величина рН определялась ионометрическим методом (ГОСТ-24483-84), содержание P_2O_5 и K_2O по Кирсанову (ГОСТ-206207-84), содержание гумуса – по Тюрину (ГОСТ-26612-83), сумма поглощённых оснований – по Каппену-Гильковичу (ГОСТ-27034-85), содержание P_2O_5 – по Кирсанову в модификации ЦИНАО (ГОСТ-26207-84).

Макроэлементный химический анализ фитомассы трав выполнен во Всероссийском научно-исследовательском институте минерального сырья имени Н.М. Федоровского (ВИМС) на спектрометре Elan-6100 [104].

Необходимые метеорологические и фитоклиматические показатели в периоды вегетации были рассчитаны по данным метеостанции «Красная Гора», наиболее близко расположенной к месту проведения исследований.

В 2001 и 2003 годах установились приблизительно одинаковые погодные условия (табл. 14). Период вегетации многолетних трав в 2002 году характеризовался по сравнению с 2001 и 2003 годами повышенной температурой воздуха, высокой испаряемостью, чрезвычайно низким значением КУ, характерным для зоны черноземов степи, большим дефицитом атмосферной влаги, повышенными значениями радиационного баланса и ФАР. Показатели 2002 года оказали существенное влияние на средние значения за годы исследования.

Таблица 14 - Метеорологические и фитоклиматические показатели в период вегетации многолетних трав

Показатель \ Год	Показатель в период вегетации трав							
	t	P	$\sum E_0$	H	KY	$H - \sum E_0$	Q _c	Q _ф
2001	15,6	73,0	399	293	0,73	- 106	984	458
2002	16,3	63,8	563	185	0,33	- 378	1389	646
2003	15,0	72,4	401	350	0,87	- 51	991	461
Среднее	15,6	69,7	454	275	0,64	- 179	1121	522

Примечание: t, P соответственно температура (°C) и относительная влажность (%) воздуха, $\sum E_0$ – испаряемость (мм), H – осадки (мм), KY – коэффициент увлажнения в вегетационный период, $H - \sum E_0$ – дефицит атмосферного увлажнения (мм), Q_c, Q_ф – соответственно радиационный баланс и ФАР в период вегетации, МДж/м².

Урожайность сена многолетних трав, транспирации, коэффициента использования ФАР, транспирационного коэффициента (К.т.), биодоступности почвенной влаги в период вегетации на разных вариантах опыта (табл. 15).

Действие природного карбоната кальция на продуктивность многолетних трав сравнивали с контролем и вариантом с внесением полного минерального удобрения. Внесение CaCO₃•MgCO₃ в удобренную минеральными удобрениями и неудобренную почву повышало все показатели продуктивности многолетних трав, за исключением К.т.

Таблица 15 - Показатели продуктивности фитоценоза

Показатель \ Вариант	У, т/га	$\sum_v E_T$, мм	K _{фар} , %	К.т.	$\sum_v E_T / \sum_v E_0$	Pe
1	2	3	4	5	6	7
Контроль	2,83	185	1,02	654	0,41	0,85
CaCO ₃ •MgCO ₃	3,49	229	1,26	656	0,5	0,86
N ₁₈₀ P ₆₀ K ₁₀₀	6,15	402	2,21	654	0,88	0,76
N ₁₈₀ P ₆₀ K ₁₀₀ + CaCO ₃ •MgCO ₃	6,67	436	2,40	654	0,96	0,74

Примечание: У – урожайность; $\sum_v E_T$ – транспирация; K_{фар} – коэффициент использования травами фотосинтетически активной радиации; $\sum_v E_T / \sum_v E_0$ – относительная транспирация, К.т.- транспирационный расход воды (т) на формирование одной 1т воздушно-сухой фитомассы травы, Pe-число Пекле.

Как было доказано в работе [107], дозы и вид минеральных удобрений не влияют на величину К.т., которая зависит от вида растения и почвенно-климатических условий возделывания. Из данных К.т. следует, что природный карбонат кальция проявляет свойства минерала солевого типа.

Урожайность, транспирация, K_{фар}, по сравнению с контролем и вариантом

с внесением NPK при добавлении $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ увеличились соответственно на следующие значения:

6,6 ц/га; 44 мм; 0,24%,

5,2 ц/га; 34 мм; 0,19%.

Содержание NH_4^+ , K^+ , магния в сене многолетних трав при внесении $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ в удобренную и неудобренную почву уменьшается. Содержание нитратов повышается (табл. 16). Для выяснения причины данного явления были рассчитаны значения E и удельной поверхности корней посевов.

Таблица 16 - Элементный состав сена многолетних трав по данным работы [43]

Показатель	Содержание, %					
	фосфор	калий	кальций	магний	NO_3^-	NH_4^+
Вариант						
Контроль	0,29	2,05	0,76	0,40	0,07	1,55
$\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$	0,42	1,78	0,75	0,31	0,12	1,38
$\text{N}_{180}\text{P}_{60}\text{K}_{100}$	0,43	2,59	0,51	0,33	1,22	1,89
$\text{N}_{180}\text{P}_{60}\text{K}_{100} + \text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$	0,36	2,48	0,71	0,24	1,6	0,77

Наибольшая интенсивность поглощения суммы элементов из почвы культурами и напряжённость электростатических полей имели место на варианте с NPK (табл. 17). Внесение доломита в неудобренную и удобренную NPK почву вызывает уменьшение E и $\lambda\text{б}$.

Таблица 17 - Рассчитанные по формуле (13) напряжённости электростатических полей системы корень-почва и удельной поверхности корневой системы смешанного посева мятликовых трав при внесении доломита

Вариант	ЕКО, Мг-экв/100г	ЕКО, Кл/г	$\sigma\text{к}$, Кл/м ²	$S\text{к}$, м ² /г	$\lambda\text{б}$, 1/м	E , 1/м	E , мВ/м	$\sigma\text{к}-\sigma\text{п}$ Кл/м ²
$\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$	24	23,11	0,84	27,5	0,07	0,08	2,05	0,013
$\text{N}_{180}\text{P}_{60}\text{K}_{100}$			0,90	25,7	0,31	0,41	10,54	0,066
$\text{N}_{180}\text{P}_{60}\text{K}_{100} + \text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$			0,87	26,6	0,19	0,26	6,68	0,042

Примечание: $\lambda\text{б}$ - параметр биовыноса суммарного количества элементов питания из почвы посевами трав; E - напряжённость электростатического поля корневой системы в единицах: 1/м и мВ/м; $\sigma\text{к}-\sigma\text{п}$ - разность поверхностной плотности зарядов корней и почвы, Кл/м²; ЕКО - емкость катионного обмена корней смешанного посева трав по данным работ [48,49,51,52] в единицах мг-экв/100г и Кл/г; $\sigma\text{к}$, $S\text{к}$ - соответственно поверхностная плотность зарядов корней и их удельная поверхность.

Наличие экспериментальных данных $\sigma\text{п}$ позволили рассчитать поверхностную плотность корней посева и их удельную поверхность.

Внесение доломита в почву снижает значения E по сравнению с внесением

НРК и увеличивает удельную поверхность корней, вызванную уменьшением массы корней. Учитывая, что уравнение (12) получено из решения модели зоны «всасывания» (3), можно предположить, что уменьшение удельной поверхности корней при внесении НРК обусловлено увеличением размера корневых волосков. Это явление объясняется снижением напряжённости электростатического поля системы корень-почва при внесении доломита.

Внесение доломита уменьшает значение E и поглощение катионов NH_4^+ , K^+ , Ca^{2+} , по сравнению с контролем, но увеличивает поглощение нитратов, Mg^{2+} , фосфат ионов (табл. 18).

Таблица 18 - Влияние природных карбонатов на поглощение ионов по данным работы [43]

Показатель \ Вариант	NO_3^-	Фосфат-ионы	Mg^{2+}	NH_4^+	K^+	Ca^{2+}
$\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$	1,97	1,62	1,11	0,51	0,61	0,1
$\text{N}_{180}\text{P}_{60}\text{K}_{100}$	1,33	0,97	0,48	1,64	1,57	0,99
$\text{N}_{180}\text{P}_{60}\text{K}_{100} + \text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$	1,9	1,49	1,17	0,82	0,44	0,15

Наибольшая интенсивность биовыноса нитратов, фосфат-ионов и Mg наблюдается при наиболее низком значении E системы корень-почва. Элементы питания (катионы) выносятся из почвы наиболее интенсивно при высоком значении E . При pH почвенного раствора, меньше 8.2, коллоидные частицы доломита, имея положительный заряд, уменьшают напряжённость отрицательного электростатического поля системы корень-почва. При внесении доломита интенсивность биовыноса фосфат-ионов, нитратов и Mg^{2+} из почвы увеличивается, тогда как катионов NH_4^+ , K^+ , Ca^+ , уменьшается, что обусловлено уменьшением отрицательного заряда системы «корень-почва».

2.4 Влияние чисел Pe на интенсивность биовыноса катионов и анионов из почвы культурами

Число Pe равно отношению диффузионного потока раствора, обусловленного тепловым движением молекул воды (D , $\text{см}^2/\text{с}$) и конвективного потока, обусловленного скоростью движения и радиусом капилляра ($v\tau$, $\text{см}^2/\text{с}$) в общем потоке раствора. Согласно уравнению (15) увеличение концентрации почвенно-

го раствора повышает напряжённость электростатического поля системы корень-почва, ускоряет поток раствора к зоне «всасывания» (корневых волосков) и поглощение ионов.

Установлено, что при увеличении диффузионного потока вклад адсорбированных катионов может превышать вклад катионов, находящихся в объемной жидкости [87].

Для подтверждения данного предположения применительно к биовыносу использовались результаты полевых опытов, изложенные в параграфе 2.2

При внесении равных доз NPK виды культур имеют разную доступность почвенной влаги и отличающиеся числа Ре (табл. 19). Доли конвекции в посевах ежи сборной, овсяницы луговой и двукисточника тростниковидного в первый и второй укосы составили соответственно 54-64; 61-69; 57-64% и 12-18; 17-21; 18-24%. В первый укос более высокую доступность влаги имели посеы овсяницы луговой, во второй укос - двукисточника тростниковидного. Независимо от вида культуры повышение NPK приводило к повышению доли конвективного потока. Биовынос элементов питания N, P, K и Ca описывается формулой (6), согласно которой имеет место процесс аккумуляции этих элементов питания в фитомассе трав при повышении дозы NPK по сравнению с контролем.

Таблица 19 - Параметры биовыноса элементов питания

Показатель Вариант	Первый укос						Второй укос					
	Ре	N	P	K	Ca	Mg	Ре	N	P	K	Ca	Mg
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Ежа сборная												
N ₉₀ P ₆₀ K ₉₀	0,46	1,22	1,02	1,25	0,43	1,04	0,88	1,07	1,05	2,28	0,37	0,99
N ₉₀ P ₆₀ K ₁₂₀	0,44	1,24	1,22	1,21	0,60	1,05	0,84	1,16	0,6	1,89	0,5	1,13
N ₉₀ P ₆₀ K ₁₅₀	0,42	1,25	1,19	1,22	0,63	1,22	0,83	1,96	0,76	1,92	0,7	1,49
N ₁₂₀ P ₆₀ K ₁₂₀	0,41	1,16	0,94	1,16	0,53	0,87	0,82	1,6	0,56	2,14	0,68	0,89
N ₁₂₀ P ₆₀ K ₁₅₀	0,39	1,24	1,06	1,37	0,55	1,02	0,81	2,26	0,69	2,01	0,85	1,35
N ₁₂₀ P ₆₀ K ₁₈₀	0,36	1,21	1,08	1,43	0,61	1,17	0,81	2,56	0,67	2,04	0,93	2,11
Овсяница луговая												
N ₉₀ P ₆₀ K ₉₀	0,39	0,79	0,91	1,18	0,41	0,99	0,83	0,92	0,42	1,91	1,19	3,14
N ₉₀ P ₆₀ K ₁₂₀	0,41	1,0	1,0	1,28	0,46	1,45	0,82	2,4	0,82	2,29	1,93	3,55
N ₉₀ P ₆₀ K ₁₅₀	0,34	0,94	0,91	1,28	0,42	1,43	0,83	2,46	0,78	2,26	1,83	3,64
N ₁₂₀ P ₆₀ K ₁₂₀	0,34	0,87	0,83	1,11	0,42	1,42	0,81	2,51	0,38	2,08	2,96	2,26
N ₁₂₀ P ₆₀ K ₁₅₀	0,39	0,96	0,96	1,33	0,46	1,19	0,8	2,54	0,54	2,29	2,08	2,64
N ₁₂₀ P ₆₀ K ₁₈₀	0,31	0,99	0,95	1,39	0,52	1,28	0,79	2,51	0,69	2,24	2,09	2,97
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13

Двуклосточник тростниковидный												
N ₉₀ P ₆₀ K ₉₀	0,43	0,77	0,56	1,13	0,35	0,82	0,82	0,96	0,84	0,69	1	3,06
N ₉₀ P ₆₀ K ₁₂₀	0,42	0,79	0,86	1,19	0,48	1,39	0,81	2,07	1,2	1,62	1,19	3,14
N ₉₀ P ₆₀ K ₁₅₀	0,4	0,93	0,96	1,26	0,51	1,43	0,81	2,38	1,17	1,78	1,38	3,6
N ₁₂₀ P ₆₀ K ₁₂₀	0,3	0,85	0,83	1,17	0,38	0,96	0,8	2,41	0,76	1,74	1,34	2,49
N ₁₂₀ P ₆₀ K ₁₅₀	0,37	0,88	0,8	1,34	0,45	1,29	0,79	2,33	0,92	1,93	1,35	2,82
N ₁₂₀ P ₆₀ K ₁₈₀	0,36	0,88	0,89	1,33	0,5	1,32	0,76	2,08	1,19	1,67	1,23	2,38

Содержание Mg в фитомассе трав, наоборот, снижается по сравнению с контролем с увеличением дозы NPK. Как следует из таблицы, соблюдается обратно пропорциональные зависимости между содержанием Mg в фитомассе трав и Ca, а также K. Процесс биовыноса Mg описывается формулой, в которой перед экспонентой стоит знак минус и указывает на снижение содержания Mg в фитомассе трав по сравнению с контролем при увеличении дозы NPK.

Параметр биовыноса в уравнении (12) отражает интенсивность процесса биовыноса. Интенсивность биовыноса N, P, K, Ca увеличивается на вариантах опыта с повышением дозы NPK и снижением числа Pe (табл. 19).

Для выяснения причины своеобразного биовыноса Mg из почвы корневыми системами трав был рассмотрен процесс биовыноса аниона NO₃⁻.

С повышением дозы NPK и уменьшением числа Pe увеличивается интенсивность биовыноса из почвы NO₃⁻ по сравнению с контролем (табл. 20).

Таблица 20 - Параметр биовыноса NO₃⁻ из почвы

Показатель Варианты	Первый укос			Второй укос		
	ежа сборная	овсяница луговая	двуклосточник тростниковидный	ежа сборная	овсяница луговая	двуклосточник тростниковидный
N ₉₀ P ₆₀ K ₉₀	0,21	0,71	0,24	1,24	0,83	0,96
N ₉₀ P ₆₀ K ₁₂₀	0,7	1,07	0,4	2,08	1,87	1,8
N ₉₀ P ₆₀ K ₁₅₀	0,77	1,01	0,87	2,62	2,21	2,38
N ₁₂₀ P ₆₀ K ₁₂₀	0,65	1,06	0,85	2,04	2,17	2,06
N ₁₂₀ P ₆₀ K ₁₅₀	0,78	1,22	0,94	2,12	2,33	2,33
N ₁₂₀ P ₆₀ K ₁₈₀	0,95	1,37	1,06	2,3	2,41	2,18

Рассчитанные по формуле (12) средние по вариантам значения параметра биовыноса ионов из почвы посевами мятликовых трав при преобладании доли диффузионного (второй укос) и конвективного потоков в общем потоке раствора (первый укос) (табл. 21)

Таблица 21 - Параметры биовыноса элементов питания из почвы посевами трав

Ре	NO ₃ ⁻	Фосфат-ионы	Mg ²⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Ca ²⁺
Ежа сборная						
0,43-0,36	0,68	1,08	-1,06	1,22	1,27	0,52
0,88-0,81	2,07	0,72	-1,32	1,79	2,05	0,67
Овсяница луговая						
0,41-0,31	1,07	0,72	-1,32	1,42	2,05	0,67
0,83-0,79	1,97	0,60	-3,03	2,22	1,18	1,85
Двукосточник тростниковидный						
0,43-0,36	0,73	0,82	-1,20	0,85	1,24	0,44
0,76-0,82	1,95	1,01	-2,91	2,04	1,57	1,25

Интенсивность биовыноса катионов NH₄⁺, K⁺, Ca²⁺, выше при преобладании диффузионного потока раствора над конвективным, обусловленное адсорбцией катионов на поверхности корней и почвы.

Более высокая интенсивность биовыноса NO₃⁻ при преобладании диффузионного потока раствора объясняется незначительной задерживающей способностью тонких капилляров (тонкие водные слои), в которых ДЭС взаимно перекрыты.

Более низкие значения биовыноса фосфат-ионов и Mg во второй укос обусловлены высокой задерживающей способностью в тонких водных слоях.

Таким образом, после первого укоса посеvy мятликовых трав повышают интенсивность биовыноса элементов питания NH₄⁺, NO₃⁻, K⁺, Ca²⁺ по сравнению с периодом от возобновления вегетации до первого укоса. Высокая интенсивность биовыноса при Ре=0,76-0,88 ионов NH₄⁺, K⁺, Ca²⁺ объясняется аккумуляцией этих ионов в адсорбционном слое ДЭС, анионов NO₃⁻ и фосфат ионов разной способностью задерживаться в тонких водных слоях. Аккумуляция в фитомассе трав NH₄⁺, K⁺, Ca²⁺ при повышении дозы NPK сопровождается снижением содержания Mg в фитомассе трав по сравнению с контролем.

Анализ данных влияния чисел Ре на биовынос элементов питания из почвы культурами позволяет предположить, что корневые системы культур функционируют не только как сорбенты, но и как биологические системы. Корневая система культур поглощает ион Mg в том случае, когда испытывает недостаток Ca, K, органогенного элемента N.

3. Практическое значение закономерностей биовыноса ионов из почвы сельскохозяйственными культурами

3.1 Использование закономерностей для увеличения содержания белка в грубых кормах

Приведённые закономерности описывают динамику процесса биовыноса в течение вегетации основных элементов питания: N, P, K, Ca. Согласно закономерности для повышения интенсивности биовыноса этих элементов питания необходимо увеличить напряжённость электростатического поля системы корень-почва, которое достигается повышением величины (σ_k - σ_p) или путём применения увеличивающихся доз минеральных удобрений. Для повышения величины (σ_k) можно использовать культуры из семейства бобовые.

Полевые опыты проведены на опытном поле Новозыбковской сельскохозяйственной опытной станции филиала ФНЦ кормопроизводства и агроэкологии имени В.Р. Вильямса в 2011-2014 гг [14, 27, 86].

Почва опытного участка – дерново-подзолистая песчаная, подстилаемая с глубины 1,2 м мощными водноледниковыми песками. Мощность гумусового слоя составляет 18-20 см. Содержание органического вещества (по Тюрину) составляет 2,14-2,5%; pH_{KCl} – 6,7-6,9; сумма поглощенных оснований – 7,2-9,3 мг-экв. на 100 г почвы; гидролитическая кислотность – 0,59-0,73 мг-экв. на 100 г почвы; степень насыщенности основаниями равна 92-93%; содержание подвижного фосфора – 357-380 мг/кг; обменного калия – 69-110 мг/кг почвы (по Кирсанову). Обеспеченность почвы фосфором – очень высокая, калием – средняя. Почва не нуждается в известковании. Содержание гумуса – высокое для дерново-подзолистой песчаной почвы. Учитывая высокую окультуренность почвы и среднюю обеспеченность калием в опыте включили следующие варианты: контроль, K_{180} , K_{210} . В качестве калийного удобрения использовали хлористый калий с содержанием K_2O , равным 56%.

В качестве объектов исследования использовали одновидовые и смешанные посевы кормовых культур. Одновидовые посевы состояли из следующих культур: овёс посевной (*Avena sativa* L.), райграсс однолетний (*Lolium multiflorum* Lam.), суданская трава (*Sorghum sudanense* Pers.), просо посевное

(*Panicum milaceum L.*). Емкость катионного обмена корней этих кормовых культур составляет соответственно: 22,8; 22,5; 13,5; 12,2 мг-экв. на 100 г воздушно-сухой массы [116, 117, 124, 125].

Для повышения величины (σ) в качестве компонента при составлении смешанного посева необходимо было выбрать культуру, имеющую значительно большую ЕКО корневой системы, чем одновидовые посевы кормовых культур. К таким культурам относятся: горох посевной, люпин жёлтый, люпин синий, клевер красный, люцерна посевная. ЕКО корней этих культур составляет соответственно: 49,6; 47,7; 53,3; 47,5; 48,0 мг-экв. на 100 г воздушно-сухой массы [116, 117, 124, 125]. Для составления смешанных посевов был выбран люпин жёлтый, учитывая, что его природной средой обитания являются лёгкие почвы нижнего пояса горных систем, наиболее близкие к почвам в условиях возделывания введённого в культуру вида.

Использовались следующие сорта культур: люпин жёлтый (Престиж), овёс посевной (Скакун), суданская трава (Кинельская-100), райграсс однолетний (Изорский), просо посевное (Квартет). Норма высева семян составляла соответственно: 1,2; 5,0; 2,0; 8,0; 5,0 млн. шт./га. Опыт был развернут в звене севооборота со следующим чередованием культур: озимая рожь, картофель, одновидные и бобово-злаковые посевы. Посев опытных делянок проводили сеялкой СН-10 в первой декаде мая. Учет зелёной массы одновидовых посевов кормовых культур проводили вручную.

Отобранные после уборки урожая растительные образцы корма после высушивания при постоянной температуре 105 °С анализировали на определение показателей качества в центральной учебно-научной испытательной лаборатории БГАУ общепринятыми методами. Озоление проводили методом сжигания по Гинсбургу. Содержание калия определяли на пламенном фотометре (ГОСТ 30504-97), фосфора на фотоэлектроколориметре (ГОСТ 26657-97). Содержание азота в растительных образцах определяли по ГОСТ Р 51417-99, при пересчете на сырой белок использовали коэффициент – 6,25.

Полученные экспериментальные данные обрабатывались статистическими методами дисперсионного и корреляционного анализов с использованием

стандартного компьютерного программного обеспечения (Excel 7,0; Statistic 7,0; NC SS – 2000).

Численные методы исследования включали следующие расчеты: транспирация рассчитывалась по формуле Пенмана [36], испаряемость – по формуле Н.Н. Иванова [40], удельная поверхность почвы – по методу, изложенному в работе [74], емкость катионного обмена корней кормовых культур была взята из работ [116, 117, 124, 125].

Период вегетации культур в 2013 году характеризовался повышенным радиационным балансом, температурой воздуха, испаряемостью, дефицитом атмосферной влаги и коэффициентом увлажнения (КУ), соответствующим степной зоне. В другие годы 2011, 2012, 2014 условия были благоприятны для возделывания кормовых культур (табл. 22).

Таблица 22 - Фитоклиматические показатели вегетации (май-июль)

Показатель \ Год	$\sum_v Q_c$	$\sum_v Q_\phi$	t, °C	L	$\sum_v E_0$	$\sum_v H$	$\sum_v (H - E_0)$	КУ
2011	590	378	19,3	2,458	240	114,5	- 125,5	0,48
2012	597	397	18,3	2,458	243	119,8	- 123,2	0,50
2013	720	472	21,4	2,450	294	98,3	- 195,7	0,33
2014	659	428	18,7	2,458	268	134,5	- 133,5	0,50
Среднее	636	419	19,4	2,456	261	117,0	- 144,5	0,45

Примечание: $\sum_v Q_c$ – сумма суточных значений радиационного баланса в период вегетации, МДж/м²; $\sum_v Q_\phi$ – сумма суточных значений в течение вегетации фотосинтетически активной радиации, МДж/м²; T – температура воздуха в градусах Цельсия; L – теплота парообразования МДж/кг; $\sum_v E_0$ – испаряемость за период вегетации, мм; $\sum_v H$ – сумма осадков за период вегетации, мм; $\sum_v (H - E_0)$ – дефицит атмосферной влаги в период вегетации, мм; КУ-коэффициент увлажнения по Н. Н. Иванову

При приблизительно равной норме высева смешанные посевы: люпин + овёс, люпин + суданская трава, люпин + просо увеличили урожайность фитомассы культур по сравнению с одновидовыми посевами на вариантах: контроль, K₁₈₀, K₂₁₀ соответственно в 3,7; 2,2; 2,3; 2,8; 2,1; 2,1; 2,6; 2,6; 2,0 раз (табл. 23). При снижении нормы высева семян райграсса в 2 раза смешанные посевы люпин + райграсс увеличили урожайность фитомассы на тех же вариантах по сравнению с одновидовыми посевами райграсса в 4,4; 4,0; 3,6 раз. Из этих показателей следует, что произошло увеличение урожайности смешанных посевов кормовых культур по сравнению с одновидовыми посевами, полученными на контроле.

Таблица 23 - Доступность почвенной влаги, урожайность одновидовых и смешанных посевов кормовых культур (среднее за 2011-2014 гг.), транспирация и число Pe

Вариант Культура	Н	Контроль				K_{180}				K_{210}			
		У	$\Sigma_v E_T$	$\frac{\Sigma_v E_T}{\Sigma_v E_0}$	Pe	У	$\Sigma_v E_T$	$\frac{\Sigma_v E_T}{\Sigma_v E_0}$	Pe	У	$\Sigma_v E_T$	$\frac{\Sigma_v E_T}{\Sigma_v E_0}$	Pe
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
люпин жёлтый	1,2	5,8	274	1,0	0,71	6,4	302	1,1	0,68	6,6	311	1,2	0,65
овёс посевной	5,0	2,0	94	0,4	0,90	2,8	132	0,5	0,86	3,1	146	0,5	0,86
люпин + овёс	1+1,5	6,8	321	1,2	0,65	7,2	340	1,3	0,62	7,4	349	1,3	0,62
люпин + овёс	1+2,5	7,0	390	1,3	0,62	7,3	345	1,3	0,62	7,7	363	1,4	0,60
люпин + овёс	1+3,5	7,4	349	1,3	0,62	7,8	368	1,4	0,60	8,0	378	1,4	0,60
райграс однолетний	8,0	1,6	75	0,3	0,92	1,9	90	0,3	0,90	2,2	104	0,4	0,89
люпин + райграс	1+1,5	6,4	302	1,1	0,68	6,8	321	1,2	0,65	7,0	330	1,3	0,62
люпин + райграс	1+2,5	6,7	316	1,2	0,65	7,1	335	1,3	0,62	7,3	345	1,3	0,62
люпин + райграс	1+3,0	7,1	335	1,3	0,62	7,6	359	1,4	0,60	7,9	373	1,4	0,60
суданская трава	2,0	3,9	184	0,7	0,80	4,1	193	0,7	0,78	4,3	203	0,8	0,77
люпин + суданская трава	1+1,0	8,5	401	1,5	0,47	8,7	411	1,6	0,54	9,0	425	1,6	0,54
люпин + суданская трава	1+1,5	8,1	382	1,5	0,48	8,4	396	1,5	0,57	8,6	406	1,6	0,54
люпин + суданская трава	1+2,5	7,7	363	1,4	0,60	8,1	382	1,4	0,60	8,2	387	1,5	0,57
просо посевное	5,0	3,5	165	0,6	0,82	3,9	184	0,7	0,80	4,2	198	0,8	0,78
люпин + просо	1+2,0	7,4	349	1,3	0,62	7,6	359	1,4	0,59	7,9	373	1,4	0,80
люпин + просо	1+2,5	7,7	363	1,4	0,60	8,0	378	1,4	0,59	8,2	387	1,5	0,57
люпин + просо	1+3,5	8,1	382	1,5	0,47	8,3	392	1,5	0,57	8,6	406	1,6	0,57

Примечание: Н – норма выноса семян, млн. шт. на 1 га; У – урожайность воздушно-сухой фитомассы кормовых культур, т/га; $\Sigma_v E_T$ – транспирация за период вегетации, мм; $\Sigma_v E_T / \Sigma_v E_0$ – относительная транспирация; Pe – число Пекле (отношение деффузии к конвекции в общем потоке влаги, D/vr)

Смешанные посевы овса посевного, райграса однолетнего, суданской травы, просо посевного с люпином жёлтым в среднем на трёх вариантах повы-

сили урожайность фитомассы трав по сравнению с одновидовыми посевами соответственно на 5,1; 5,6; 4,6; 4,3 т/га.

Если сравнивать урожайность смешанных посевов кормовых культур с одновидовыми посевами люпина жёлтого, то средняя прибавка на вариантах опыта составит соответственно 1,5; 1,3; 2,5; 2,2 т/га. Отсюда следует, что наибольшую прибавку урожайности смешанные посевы имеют с засухоустойчивыми культурами: (суданская трава, просо посевное) по сравнению с одновидовыми посевами люпина жёлтого.

Доступность почвенной влаги, количественным показателем которой является относительная транспирация, корневой системе кормовых культур на смешанных посевах по сравнению с одновидовыми посевами увеличивалась в среднем на трёх вариантах соответственно в 3,1; 4,0; 2,1; 2,2 раза. Число Ре снизилось на смешанных посевах в 1,5 раза по сравнению с одновидовыми посевами кормовых культур.

Доступность почвенной влаги корневой системы растений смешанных посевов по сравнению с одновидовыми посевами люпина жёлтого увеличилась незначительно, соответственно в 1,3; 1,3; 1,4; 1,4 раза.

На одновидовых посевах овса посевного, райграса однолетнего, суданской травы, просо посевного доступность почвенной влаги корневой системе растений приблизительно равнялась соответственно ВРК, ВЗ, ВРК, ВРК, тогда как на смешанных посевах – оптимальной влажности, при ППВ.

Для выявления механизма, вызывающего увеличение скорости потока влаги к корневой системе смешанных посевов трав, были рассчитаны по формуле (13) напряженности электростатических полей одновидовых и смешанных посевов трав.

На смешанных посевах кормовых трав наблюдается повышение напряженности отрицательного электростатического поля вокруг корневых систем и поверхности почвенных капилляров (табл. 24). Напряженность электростатических полей смешанных посевов трав овса посевного, райграса однолетнего, суданской травы, проса посевного по сравнению с одновидовыми посевами повы-

силась соответственно в 9; 3; 1,5; 2,7 раза. Увеличение величины E вызвало ускорение потоков влаги к корневой системе, изменение соотношения конвекции и диффузии в общем потоке влаги.

Таблица 24 - Напряжённость электростатических полей корневых систем одновидовых и смешанных посевов трав в течение вегетации (средние за 2011-2014 г.)

Культура \ Вариант	Н	ΣC_i			K_{180}		K_{210}	
		контроль	K_{180}	K_{210}	λ_6	E	λ_6	E
Люпин жёлтый	1,2	4,64	5,04	5,11	0,28	-0,41	0,31	-0,48
Овёс посевной	5,0	2,27	2,65	2,82	1,17	-1,30	1,48	-1,79
Люпин + овёс	1 + 3,5	4,04	4,17	4,26	0,08	-0,13	0,14	-0,23
Райграс однолетний	8	2,46	2,53	2,64	0,33	-0,37	0,68	-0,76
Люпин + райграс	1 + 3	3,63	3,76	3,84	0,11	-0,18	0,16	-0,26
Суданская трава	2,0	3,20	3,27	3,37	0,10	-0,13	0,21	-0,27
Суданская трава + люпин	1 + 1	4,00	4,1	4,17	0,08	-0,13	0,10	-0,18
Просо посевное	5,0	2,62	2,71	2,81	0,16	-0,20	0,34	-0,43
Люпин + просо посевное	1 + 3	3,41	9,47	3,52	0,05	-0,09	0,07	-0,13

Примечание: Н – норма выноса семян, млн. шт. на 1 га; ΣC_i – суммарное содержание элементов питания в фитомассе трав, %; λ_6 – параметр биовыноса, 1/м; E – напряжённость электростатического поля корневой системы и почвы, 1/м.

Доля конвекции в потоке почвенной влаги к корневой системе растений на одновидовых посевах трав: овёс посевной, райграс однолетний, суданская трава, просо посевное составляла соответственно 14; 10; 13; 20%, тогда как на посевах смешанных трав соответственно 40; 40; 46; 45%.

Увеличение конвекции и потока почвенной влаги к корневой системе растений оказало существенное влияние на доступность элементов питания культурам.

Содержание макроэлементов P, K, Ca в фитомассе трав на вариантах, за некоторым исключением, относящимся к посевам суданской травы, повышается на смешанных в сравнении с одновидовыми посевами культур (табл. 25).

Таблица 25 - Элементный состав одновидовых и смешанных посевов кормовых трав (среднее за 2011-2014 год)

Показатель Культура	Н	C _i					K/N
		N	P	K	Ca	Mg	
1	2	3	4	5	6	7	8
контроль							
люпин жёлтый	1,2	2,02	0,17	1,64	0,57	0,40	0,8
овёс посевной	5,0	0,91	0,07	0,95	0,24	0,10	1,0
люпин + овёс	1 + 3,5	2,07	0,12	1,31	0,40	0,14	0,6
райграс однолетний	8,0	0,96	0,08	1,04	0,28	0,10	1,1
люпин + райграс	1 + 3	1,96	0,10	1,13	0,32	0,12	0,6
суданская трава	2,0	0,85	0,12	1,62	0,43	0,18	1,9
суданская трава + люпин	1 + 1	1,97	0,14	1,35	0,43	0,13	0,7
просо посевное	5,0	0,97	0,11	1,12	0,32	0,17	1,1
люпин + просо посевное	1 + 3	1,56	0,12	1,23	0,38	0,12	0,8
K ₁₈₀							
люпин жёлтый	1,2	2,06	0,18	1,97	0,6	0,23	0,96
овёс посевной	5,0	0,99	0,10	1,14	0,33	0,09	1,10
люпин + овёс	1 + 3,5	2,14	0,15	1,34	0,41	0,13	0,6
райграс однолетний	8,0	0,97	0,09	1,06	0,32	0,09	1,1
люпин + райграс	1 + 3	1,99	0,12	1,18	0,35	0,11	0,6
суданская трава	2,0	0,89	0,13	1,64	0,44	0,17	1,8
суданская трава + люпин	1 + 1	2,03	0,14	1,37	0,44	0,12	0,7
просо посевное	5,0	1,03	0,11	1,17	0,34	0,09	1,1
люпин + просо посевное	1 + 3	1,58	0,17	1,21	0,40	0,11	0,8
K ₂₁₀							
люпин жёлтый	1,2	2,13	0,19	1,97	0,61	0,21	0,9
овёс посевной	5,0	1,11	0,11	1,18	0,34	0,08	1,1
1	2	3	4	5	6	7	8
люпин + овёс	1 + 3,5	2,15	0,16	1,39	0,43	0,13	0,6
райграс однолетний	8,0	1,02	0,10	1,10	0,33	0,08	1,1
люпин + райграс	1 + 3	2,03	0,13	1,21	0,37	0,10	0,6
суданская трава	2,0	0,94	0,15	1,65	0,45	0,15	1,7
суданская трава + люпин	1 + 1	2,06	0,15	1,37	0,45	0,11	0,7
просо посевное	5,0	1,07	0,12	1,20	0,34	0,14	1,1
люпин + просо посевное	1 + 3	1,60	0,13	1,28	0,41	0,10	0,8

Примечание: Н – норма высева семян, млн. шт. на га; C_i – содержание элемента питания в воздушно-сухой фитомассе, %; K/N – соотношение содержания K и N в фитомассе трав.

Макроэлементы P, K, Ca передвигаются с потоком почвенной влаги в виде ионов PO₄³⁻, HPO₄²⁻, H₂PO₄⁻, K⁺, Ca²⁺. Доступность этих ионов корневой системе растений зависит от доли конвенции в общем потоке почвенного раствора, которая значительно повышается на смешанных посевах трав.

Ион Mg²⁺ обладает высокой адсорбционной способностью среди катионов, превосходящий ион Ca²⁺. Большая часть иона Mg²⁺ сосредоточена в ад-

сорбционном слое ДЭС и доставка его к поверхности корней может осуществляться диффузионным потоком. В корнеобитаемом слое смешанных посевов суданской травы и просо посевного доля диффузии в общем потоке почвенного раствора понижена в сравнении с посевами овса посевного и райграса однолетнего. Поэтому содержание Mg в фитомассе овса посевного и райграса однолетнего смешанных посевов увеличивается в сравнении с одновидовыми, в фитомассе суданской травы и просо посевного, наоборот, уменьшается.

Содержание азота в фитомассе смешанных посевов трав в 1,5-2 раза больше, чем в фитомассе одновидовых посевов трав. Увеличение содержания азота в фитомассе смешанных посевов трав позволяет предположить, что фиксированный клубеньковыми бактериями на корнях люпина жёлтого азот доступен корневым системам компонентов травосмеси.

Величина K/N является важным показателем процесса биосинтеза органических веществ в фитомассе посевов трав. Из экспериментальных данных работы [48] следует, что при $K/N \geq 1$ в фитомассе трав увеличивается содержание сырого протеина, при $K/N < 1$ увеличивается содержание безазотистых экстрактивных веществ (БЭВ). Имеет место одновременная прямо пропорциональная зависимость сырого протеина от содержания K в фитомассе трав и прямо пропорциональная зависимость БЭВ от содержания Mg в фитомассе трав.

На всех вариантах одновидовых посевов трав значение $K/N \geq 1$, тогда как на смешанных посевах – $K/N < 1$. Увеличение содержания N в фитомассе смешанных посевов трав, обусловленное доступностью N, фиксированного клубеньковыми бактериями на корнях люпина жёлтого, корневой системе основной культуры, не компенсируется необходимым количеством K для синтеза сырого протеина, и возникают условия для синтеза БЭВ, в фитомассе смешанных посевов трав.

Содержание Mg в фитомассе смешанных посевов трав повлияло на показатели качества трав, отношение кальция к магнию и калия к сумме кальция и магния (табл. 26).

Таблица 26 - Экспериментальные значения показателей качества кормов
одновидовых и смешанных посевов трав (среднее за 2011-2014 г.)

Вариант Культура	Н	Контроль			K ₁₈₀			K ₂₁₀		
		Ca Mg	Ca P	K Ca + Mg	Ca Mg	Ca P	K Ca + Mg	Ca Mg	Ca P	K Ca + Mg
люпин жёлтый	1,2	2,4	3,4	2,8	3,7	3,3	2,7	4,2	3,1	2,8
овёс посевной	5,0	2,9	3,3	2,4	3,1	2,7	2,5	3,3	2,7	2,5
люпин + овёс	1 + 3,5	2,8	3,5	2,7	3,6	3,6	2,6	4,1	3,3	2,7
райграс однолетний	8,0	2,7	3,2	2,6	3,2	2,9	2,6	3,7	2,8	2,6
люпин + райграс	1 + 3	2,4	3,6	2,7	2,6	3,4	2,7	3,0	3,0	2,7
суданская трава	2,0	3,3	3,1	2,4	3,7	3,1	2,4	4,1	3	2,4
суданская трава + люпин	1 + 1	3,2	2,9	2,7	3,8	3,1	2,7	4,2	2,8	2,9
просо посевное	50	3,2	3,2	2,5	3,6	2,3	2,4	4,1	3,1	2,5
Люпин+пр осо	1+3	3,2	3,2	2,5	3,6	2,3	2,4	4,1	3,1	2,5

Примечание: Н – норма высева семян, млн. шт. на 1 га .

Смешанные посевы суданской травы и просо посевного характеризуются большими значениями Ca/Mg и меньшими значениями K/(Ca+Mg), чем смешанные посевы овса посевного и райграса однолетнего. Показатель качества Ca/P зависит от доли конвекции в общем потоке влаги, которая более высокая, чем в одновидовых посевах трав. Смешанные посевы кормовых трав с люпином жёлтым повысили основные показатели качества корма по сравнению с одновидовыми посевами.

Сравнительная оценка смешанных посевов кормовых культур с бобовым компонентом, даёт возможность предложить следующие практические рекомендации: 1) для повышения доступности влаги, элементов питания и урожайности одновидовых посевов кормовых трав необходимо добавлять бобовый компонент; 2) при выборе бобового компонента для запланированного смешанного посева трав необходимо соблюдать следующие условия: природная среда обитания бобового компонента должна приблизительно совпадать со средой обитания основных культур и емкость катионного обмена корней бобового

компонента должна превышать емкость катионного обмена корней основной культуры; 3) для повышения содержания сырого протеина, которое обусловлено доступностью фиксированного клубеньковыми бактериями азота для корневой системы основной культуры и уменьшения содержания безазотистых экстрактивных веществ (БЭВ) в фитомассе смешанных посевов кормовых трав, внесение калийного удобрения является абсолютной необходимостью.

3.2 Влияние возрастающих доз минеральных удобрений на биохимические показатели кормов

Влияние биовыноса элементов питания из почвы корневой системой на процесс синтеза органических соединений в грубых кормах многолетних трав изучали по данным результатов полевых опытов, представленных в научной литературе. Полевые опыты данных работ поставлены с целью разработки эффективных агрохимических и агротехнологических приёмов получения высоких урожаев многолетних трав в условиях радиоактивного загрязнения окружающей среды. В данной работе рассмотрены вопросы, которые не связаны с проблемами, обсуждаемыми в работах [48, 116].

В качестве метода анализа полевых исследований использовали математические модели переноса ионов с потоком почвенного раствора по вектору напряжённости электростатических полей системы почва – корень к отрицательно заряженной поверхности корней и адсорбции катионов на поверхности корней растений.

Объектами исследований служили результаты анализов элементного и биохимического состава грубых кормов одновидового посева овсяницы луговой, сеяных посевов мятликовых трав и естественного травостоя, люпина жёлтого и зерна ржи посевной. Многолетние мятликовые травы возделывались с 2006 по 2008 и с 2009 по 2011 года в условиях центральной поймы реки Ипуть Брянской области Новозыбковского района. Люпин жёлтый и рожь посевную возделывали на дерново-подзолистых песчаных почвах соответственно с 1993 по 2008 и с 2009 по 2011 года [43].

В качестве минеральных удобрений применяли: аммиачную селитру

(34,5%), суперфосфат двойной гранулированный (45,4%), калий хлористый (55,8%).

Отобранные после уборки урожая растительные образцы, после высушивания, анализировали на определение элементного состава и биохимических показателей кормов в научно-исследовательской лаборатории при Брянском ГАУ общепринятыми методами: определение фосфора и калия из одной навески после мокрого озоления по методу Гинсбурга и смесью H_2SO_4 и $HClO_4$: фосфор по методу Мерфи-Райли колориметрически на КФК – 2, калий на пламенном фотометре (FLAPHO-4), кальций по ГОСТу-30178-96, общий азот определяли по Къельдалю, при пересчете на протеин использовали коэффициент 6,25, клетчатку весовым методом Геннеберга-Штомана в модификации ЦИНАО, жир по обезжиренному остатку (ГОСТ-13496.15-85), зола сжиганием и прокальванием (ГОСТ-26226-84).

Численные методы исследования включали расчёты коэффициента распределения (K_d) и константы ионного обмена K^+ на Mg^{2+} . Коэффициент распределения используется для характеристики величины адсорбции иона, который равен отношению адсорбированных ионов на 1 г твердой фазы адсорбента к его содержанию в 1 см³ равновесного почвенного раствора [87]. Константа ионного обмена K^+/Mg^{2+} равна отношению коэффициентов распределения ионов K^+ на Mg^{2+} .

Для расчета K_d ионов K^+ и Mg^{2+} , K^+ и Na^+ , была использована модель адсорбции ионов на поверхности корней растений. Решение модели получено в работе [67] и имеет следующий вид:

$$K_d = e^{-(\lambda_k - \lambda_p)\sum_v E_T} \quad (16)$$

где λ_k , λ_p соответственно параметры массопереноса ионов, обусловленные напряжённостью электростатических полей корневой системы и почвы, $\sum_v E_T$ – транспирация за период вегетации.

Для расчета произведения $(\lambda_k - \lambda_p)\sum_v E_T$ использовалась модель переноса ионов с потоком влаги по капиллярам почвы к зоне «всасывания» (корневых волосков). Решение модели получено в работе [70] и имеет следующий вид:

$$\ln(C_k/C_i) = \lambda \sum_b E_T, \quad (17)$$

где C_k , C_i – соответственно содержание иона в фитомассе на контроле и варианте с внесением минерального удобрения, здесь $\lambda = \lambda_k - \lambda_n$.

Содержание элементов питания в кормах многолетних трав обусловлено тремя процессами: перенос ионов с потоками влаги из почвы к корневой системе растений, адсорбция ионов на корнях и миграция их внутрь корня. Первый процесс зависит от доступности влаги растениям и числа Пекле (Pe). До первого укоса, после весеннего паводка, многолетние травы развиваются в условиях достатка влаги и в большей доли конвекции в общем потоке влаги. В опыте использовали две системы удобрения. В первой при постоянных дозах N и P в полном минеральном удобрении увеличивали соотношение K/N от 1,0 до 2,0 раз. Вторая отличалась только увеличением доз NPK в полном минеральном удобрении при сохранении соотношения K/N.

Содержание азота в грубых кормах при постоянных дозах $N_{60}P_{90}$ и $N_{90}P_{120}$ увеличивается с повышением доз K (табл. 27). Содержание калия в грубых кормах закономерно, независимо от систем внесения полного удобрения, повышается с увеличением дозы K. Содержание магния в грубых кормах, в отличие от азота и калия, уменьшается при повышении дозы K в полном минеральном удобрении в обеих системах. Содержание кальция и фосфора в грубых кормах при постоянных дозах $N_{60}P_{90}$ и $N_{90}P_{120}$ слабо изменяется с увеличением дозы K в полном минеральном удобрении.

Таблица 27 - Элементный состав и биохимические показатели качества грубых кормов первого укоса (среднее за 2006-2008 года) по данным работы [48]

Показатель Вариант	Содержание в воздушно-сухом веществе, %										К N
	N	P	K	Ca	Mg	сырая				БЭВ	
						клетчатка	зола	жир	протеин		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
естественный травостой											
контроль	1,51	0,23	1,60	0,51	0,40	26,3	7,12	3,29	9,44	53,86	–
$N_{60}P_{90}K_{60}$	1,80	0,34	1,87	0,58	0,28	28,7	7,34	3,68	11,25	48,96	1,00
$N_{60}P_{90}K_{90}$	1,89	0,34	2,12	0,60	0,24	29,2	7,58	3,72	11,81	47,65	1,50
$N_{60}P_{90}K_{120}$	2,24	0,34	2,33	0,59	0,23	29,7	7,93	3,81	14,00	44,55	2,00
$N_{90}P_{120}K_{90}$	2,07	0,37	2,79	0,61	0,29	31,1	8,32	3,81	12,94	43,75	1,00
$N_{90}P_{120}K_{135}$	2,23	0,36	2,98	0,61	0,25	31,6	8,36	3,89	13,94	42,19	1,50
$N_{90}P_{120}K_{180}$	2,27	0,38	2,99	0,62	0,22	32,1	8,43	3,96	14,13	41,32	2,00

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
сеяный травостой											
контроль	1,51	0,25	1,65	0,51	0,43	26,2	7,06	3,37	9,44	53,91	–
N ₆₀ P ₉₀ K ₆₀	2,09	0,31	2,07	0,57	0,29	29,0	7,84	3,64	12,69	46,82	1,00
N ₆₀ P ₉₀ K ₉₀	2,24	0,35	2,31	0,60	0,29	29,9	8,11	3,72	14,00	44,29	1,50
N ₆₀ P ₉₀ K ₁₂₀	2,34	0,37	2,40	0,60	0,28	30,0	8,24	3,78	14,63	43,32	2,00
N ₉₀ P ₁₂₀ K ₉₀	2,23	0,34	2,45	0,61	0,28	29,6	8,15	3,71	13,94	44,61	1,00
N ₉₀ P ₁₂₀ K ₁₃₅	2,32	0,38	2,67	0,60	0,26	29,9	8,40	3,78	14,30	43,39	1,50
N ₉₀ P ₁₂₀ K ₁₈₀	2,35	0,38	2,80	0,61	0,24	30,3	8,98	3,85	14,69	42,17	2,00

Отличительные особенности биовыноса элементов питания из почвы корневыми системами разных видов растений дают возможность рассмотреть закономерности синтеза различных органических веществ. Содержание сырой клетчатки, сырой золы и сырого жира закономерно увеличивается с повышением доз NPK. Содержание сырого протеина увеличивается в обеих системах внесения полного минерального удобрения с повышением азота и калия в сене многолетних трав. Имеет место линейная прямо пропорциональная зависимость между содержанием азота и калия в грубых кормах и содержанием сырого протеина, аналогичную закономерность выявили между содержанием магния и БЭВ.

Для расчёта $\ln C_i/C_k$ по данным содержания в фитомассе трав N, P, K, Ca и сырых клетчатки, золы, жира, протеина использовалось уравнение (9), для расчёта логарифма C_k/C_i по данным содержания в фитомассе трав Mg и БЭФ использовалось уравнение (8). Динамика содержания в фитомассе трав элементов питания совпадает с динамикой биохимических показателей корма при увеличении дозы NPK (табл. 28).

Таблица 28 - Рассчитанные значения $\ln (C_i/C_k)$ и $\ln (C_k/C_i)$ по данным содержания элементов питания в фитомассе трав и биохимических показателей корма на вариантах с внесением NPK по данным работы [48]

Показатель Вариант	Клетчатка	Ca	Зола	P	Жир	K	Протеин	N	БЭФ	Mg
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Естественный травостой										
N ₆₀ P ₉₀ K ₆₀	0,09	0,13	0,03	0,39	0,11	0,16	0,17	0,16	0,10	0,36
N ₆₀ P ₉₀ K ₉₀	0,10	0,17	0,06	0,39	0,12	0,28	0,22	0,22	0,12	0,51
N ₆₀ P ₉₀ K ₁₂₀	0,12	0,15	0,10	0,39	0,15	0,38	0,39	0,39	0,19	0,55
N ₉₀ P ₁₂₀ K ₉₀	0,17	0,18	0,16	0,48	0,15	0,55	0,31	0,31	0,21	0,32
N ₉₀ P ₁₂₀ K ₁₃₅	0,18	0,18	0,16	0,45	0,17	0,62	0,39	0,39	0,25	0,28
N ₉₀ P ₁₂₀ K ₁₈₀	0,20	0,20	0,17	0,5	0,18	0,63	0,40	0,40	0,26	0,43

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Сеянный травостой										
N ₆₀ P ₉₀ K ₆₀	0,10	0,11	0,1	0,21	0,08	0,22	0,29	0,32	0,14	0,39
N ₆₀ P ₉₀ K ₉₀	0,13	0,17	0,14	0,34	0,09	0,34	0,39	0,39	0,20	0,39
N ₆₀ P ₉₀ K ₁₂₀	0,13	0,17	0,16	0,39	0,11	0,37	0,44	0,44	0,21	0,43
N ₉₀ P ₁₂₀ K ₉₀	0,12	0,18	0,14	0,31	0,09	0,39	0,39	0,39	0,19	0,43
N ₉₀ P ₁₂₀ K ₁₃₅	0,13	0,17	0,17	0,42	0,11	0,48	0,41	0,43	0,21	0,50
N ₉₀ P ₁₂₀ K ₁₈₀	0,15	0,18	0,24	0,42	0,13	0,53	0,44	0,44	0,25	0,58

При увеличении дозы К в полном минеральном удобрении закономерно увеличивается содержание калия в грубых кормах и одновременно уменьшается магния, и соответственно происходит увеличение сырого протеина и уменьшение БЭВ.

Сеяный травостой состоит из введенных в культуру многолетних мятликовых трав следующих видов: овсяница луговая (*Festuca pratensis Huds.*), тимфеевка луговая (*Phleum pratense L.*), костёр безостый (*Bromopsis inermis Holub.*), канареечник тростниковидный (*Phalaris arundinacea L.*) лисохвост луговой (*Alopecurum pratensis L.*).

Сеяный мятликовый травостой отличался от естественного более высоким содержанием элементов питания и сырого протеина в продукции кормопроизводства. Для сеяных посевов соблюдались аналогичные зависимости, которые имели место для естественного травостоя при постоянных дозах N и P, увеличении дозы К в полном минеральном удобрении: 1) биовынос N из почвы увеличивается, а Mg уменьшается; 2) содержание сырого протеина в грубых кормах увеличивается, а БЭВ уменьшается; 3) линейная прямо пропорциональная зависимость содержания сырого протеина от содержания N и K и содержание БЭВ от Mg в грубых кормах; 4) максимальное содержание сырого протеина и минимальное БЭВ в грубых кормах достигается при отношении K/N превышающем 1.

Содержание элементов питания и биохимические показатели воздушно-сухого вещества (сена) второго укоса естественного травостоя и одновидового посева овсяницы луговой приведены в таблице 29. В период от первого до второго укоса мятликовые травы развивались в условиях недостатка почвенной влаги, вызванного снижением уровня грунтовых вод и дефицитом атмосферной влаги.

Таблица 29 - Элементный состав и биохимические показатели качества грубых кормов второго укоса (среднее за 2009-2011 года) по данным работы [48].

Показатель Вариант	Содержание в воздушно-сухом веществе, %										$\frac{K}{N}$
	N	P	K	Ca	Mg	сырая				БЭВ	
						клетчатка	зола	жир	протеин		
естественный травостой											
контроль	1,37	0,21	1,69	0,42	0,40	25,8	7,06	3,15	8,56	55,47	–
N ₄₅ K ₄₅	1,60	0,34	1,85	0,50	0,36	26,8	7,96	3,66	10,00	51,54	1,00
N ₄₅ K ₆₀	1,73	0,36	1,97	0,51	0,34	27,7	8,26	3,69	10,81	49,49	1,33
N ₄₅ K ₇₅	1,86	0,40	2,05	0,54	0,26	28,4	8,48	3,76	11,62	47,71	1,66
N ₆₀ K ₆₀	1,72	0,34	2,20	0,52	0,30	28,4	8,38	3,70	10,75	48,73	1,00
N ₆₀ K ₇₅	1,80	0,37	2,40	0,54	0,26	28,9	8,41	3,78	11,25	47,64	1,25
N ₆₀ K ₉₀	1,82	0,37	2,42	0,55	0,26	29,3	8,44	3,85	11,37	47,03	1,50
сеяный травостой овсяницы луговой											
контроль	1,48	0,32	1,62	0,44	0,40	26,4	7,42	3,17	9,25	53,80	–
N ₄₅ K ₄₅	1,68	0,34	2,10	0,52	0,26	28,3	8,26	3,67	10,50	49,24	1,00
N ₄₅ K ₆₀	2,09	0,36	2,25	0,58	0,24	29,5	8,31	3,79	13,06	45,38	1,33
N ₄₅ K ₇₅	2,15	0,36	2,28	0,60	0,22	29,8	8,48	3,84	13,44	44,44	1,66
N ₆₀ K ₆₀	2,20	0,34	2,25	0,60	0,28	30,1	8,38	3,81	14,06	43,65	1,00
N ₆₀ K ₇₅	2,25	0,35	2,36	0,62	0,26	30,8	8,46	3,88	14,25	42,60	1,25
N ₆₀ K ₉₀	2,28	0,36	2,38	0,63	0,24	31,2	8,54	3,93	14,43	41,88	1,50

Недостаток влаги и снижение доз N и K в минеральном удобрении не изменили ход зависимостей, отмеченных при анализе данных первого укоса. При постоянных дозах N₄₅ и N₆₀ увеличение дозы K в удобрении вызывает повышение содержания азота и уменьшение магния в грубых кормах естественного травостоя и овсяницы луговой.

Содержание сырых клетчатки, золы, жира, протеина увеличивается в кормах с повышением дозы K в азотно-калийном удобрении и уменьшается содержание БЭВ.

Применение возрастающих доз фосфорно-калийного удобрения вызвало повышение содержания N, P, K и уменьшение Mg в корме люпина жёлтого в сравнении с контролем (табл. 30). Произошло заметное повышение содержания в корме сырой клетчатки, золы и незначительное сырого протеина, что связано с недостатком калия в корме, его отношение к азоту было равно 0,6. Снижение в сравнении с контролем содержания Mg в корме жёлтого люпина и почти равное количество его на всех вариантах обусловило приблизительно равное на всех вариантах содержание БЭВ и более низкое, чем на контроле.

Таблица 30 - Элементный состав и биохимические показатели качества корма люпина жёлтого по данным работы [104] (среднее за 1993-2008 года)

Показатель Вариант	Содержание в воздушно-сухом веществе, %									К N	
	N	P	K	Ca	Mg	сырая					БЭВ
						клетчатка	зола	жир	протеин		
контроль	2,74	0,43	1,73	0,67	0,34	21,4	8,23	1,83	17,1	41,50	0,64
P ₂₀ K ₄₀	2,83	0,47	1,86	0,57	0,27	21,3	8,32	1,91	17,7	43,05	0,66
P ₄₀ K ₈₀	2,91	0,50	1,90	0,57	0,31	21,7	8,78	1,98	18,2	39,67	0,65
P ₆₀ K ₁₂₀	2,94	0,51	1,89	0,55	0,27	22,7	9,07	2,06	18,4	40,71	0,64
P ₂₀ K ₄₀ + пестициды	2,82	0,47	1,70	0,57	0,28	21,8	8,24	1,93	17,6	39,81	0,60
P ₄₀ K ₈₀ + пестициды	2,86	0,49	1,82	0,57	0,28	21,9	8,94	2,10	17,9	40,24	0,64
P ₆₀ K ₁₂₀ + пестициды	2,93	0,50	1,90	0,54	0,28	22,5	9,43	2,21	18,3	41,28	0,65

Применение возрастающих доз полного минерального удобрения под посевы озимой ржи увеличивали в зерне содержание фосфора, калия, крахмала, белка и снижали Na, жира (табл. 31). Увеличение содержания калия в зерне при увеличении дозы K в составе полного минерального удобрения вызывает снижение Na и жира в сравнении с контролем.

Таблица 31 - Элементный состав и показатели качества зерна озимой ржи (среднее за 2009-2012 года) по данным работы [2]

Показатель Вариант	Содержание в воздушно-сухом веществе, %								Крахмал Белок
	P	K	Ca	Mg	Na × 10 ⁻²	крахмал	жир	белок	
контроль	0,94	0,70	0,11	0,23	0,15	59,7	1,87	11,59	5,15
N ₇₀ P ₃₀ K ₆₀	0,92	0,74	0,12	0,25	0,16	60,2	1,77	12,31	4,89
N ₁₄₀ P ₆₀ K ₁₂₀	0,94	0,74	0,11	0,25	0,13	60,7	1,76	12,62	4,81
N ₂₁₀ P ₉₀ K ₁₈₀	0,95	0,76	0,12	0,25	0,13	62,3	1,75	13,09	4,76
N ₇₀ P ₃₀ K ₆₀ + пестициды	0,95	0,75	0,12	0,25	0,17	60,2	1,80	12,31	4,89
N ₁₄₀ P ₆₀ K ₁₂₀ + пестициды	0,95	0,75	0,12	0,26	0,15	60,5	1,77	12,60	4,81
N ₂₁₀ P ₉₀ K ₁₈₀ + пестициды	0,96	0,76	0,12	0,25	0,16	61,6	1,76	13,19	4,67

Для зерна озимой ржи соблюдается зависимость между отношением доз K к N в полном минеральном удобрении и содержанием белка, установленная для кормов многолетних трав, согласно которой при K/N > 1 достигается максимум содержания белка. На вариантах полевого опыта с озимой рожью отношение доз K/N в полном минеральном удобрении составило значение, равное 0,9. Отсюда незначительное увеличение содержания белка в зерне на вариантах опыта.

Для раскрытия механизма действия возрастающих доз К в составе полного минерального удобрения на снижение содержания Mg и БЭВ и увеличение содержания сырого протеина в корме многолетних трав, снижение содержания Na и жира в зерне озимой ржи и увеличения белка были рассчитаны адсорбция катионов K^+ , Mg^{2+} , Na^+ на поверхности корневых систем культур и константы ионного обмена K^+/Mg^{2+} и K^+/Na^+ .

Выявили, что адсорбция ионов K^+ , Mg^{2+} на корнях растений зависит от доступности влаги (табл. 32). В период от возобновления вегетации до первого укоса, при достатке почвенной влаги и высокой доли конвекции в общем потоке влаги к корневой системе растений в большем количестве переносится ион K^+ , чем Mg^{2+} . При недостатке почвенной влаги и увеличении диффузионного потока, с которым переносятся двухвалентные катионы, находящиеся в адсорбционном слое ДЭС, возрастает адсорбция иона Mg^{2+} в период от первого до второго укоса.

Таблица 32 - Адсорбционная способность корневых систем многолетних трав

Показатель Вариант	Kd, см ³ /г		K ⁺ /Mg ²⁺	Kd, см ³ /г		K ⁺ /Mg ²⁺
	K ⁺	Mg ²⁺		K ⁺	Mg ²⁺	
естественные травостой (1 укос)			сеяный травостой (1 укос)			
контроль	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
N ₆₀ P ₉₀ K ₆₀	1,16	0,70	1,60	1,25	0,68	1,84
N ₆₀ P ₉₀ K ₉₀	1,34	0,60	2,20	1,40	0,68	2,10
N ₆₀ P ₉₀ K ₁₂₀	1,45	0,58	2,50	1,45	0,65	2,20
N ₉₀ P ₁₂₀ K ₉₀	1,13	0,72	1,60	1,49	0,65	2,30
N ₉₀ P ₁₂₀ K ₁₃₅	1,86	0,62	3,00	1,62	0,61	2,70
N ₉₀ P ₁₂₀ K ₁₈₀	1,88	0,55	3,40	1,70	0,56	3,00
естественные травостой (2 укос)			овсяница луговая (2 укос)			
контроль	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
N ₄₅ K ₄₅	1,09	0,90	1,20	1,30	0,65	2,00
N ₄₅ K ₆₀	1,16	0,84	1,40	1,39	0,60	2,30
N ₄₅ K ₇₅	1,22	0,65	1,90	1,40	0,55	2,50
N ₆₀ K ₆₀	1,30	0,75	1,70	1,39	0,70	2,00
N ₆₀ K ₇₅	1,43	0,65	2,20	1,45	0,65	2,20
N ₆₀ K ₉₀	1,43	0,65	2,20	1,48	0,60	2,50

Прямо пропорциональная зависимость константы ионного обмена K^+/Mg^{2+} от дозы К в полном минеральном удобрении вызывается повышением концентрации ионов K^+ в почвенном растворе.

Величина K^+/Mg^{2+} , превышающая 1, означает что ион K^+ слабо адсорби-

руется на корневых системах многолетних трав, но характеризуется высокой миграционной подвижностью и способностью проникать вглубь корня и другие органы растения. Ион K^+ выполняет важную функцию, участвует в регулировании водного режима растения и в фотосинтезе, входит в состав ферментов и клеточного сока вакуолей.

Люпин жёлтый отличается от многолетних мятликовых трав более низким отношением калия к азоту в растении (около 0,6), которое вызвано недостатком ионов K^+ в почве для вовлечения азота, поступающего из клубеньков для синтеза органических веществ (табл. 33). При тех же дозах калийного удобрения, которые применяли, для посевов жёлтого люпина имело место более высокая адсорбция на корнях ионов K^+ , чем Mg^{2+} . Константа ионного обмена $K^+/Mg^{2+} > 1$ слабо изменяется от дозы калийного удобрения, которая обуславливает более высокое содержание сырого протеина и низкое БЭВ по сравнению с многолетними мятликовыми травами.

Таблица 33 - Адсорбционная способность корневых систем люпина и озимой ржи

Показатель Вариант	Kd, см ³ /г		K ⁺ /Mg ²⁺	Показатель Вариант	Kd, см ³ /г		K ⁺ /Na ⁺
	K ⁺	Mg ²⁺			K ⁺	Mg ²⁺	
люпин жёлтый				озимая рожь			
контроль	1,00	1,00	1,00	контроль	1,00	1,00	1,00
P ₂₀ K ₄₀	1,07	0,79	1,30	N ₇₀ P ₃₀ K ₆₀	1,05	1,06	0,99
P ₄₀ K ₈₀	1,09	0,91	1,20	N ₁₄₀ P ₆₀ K ₁₂₀	1,05	1,15	0,91
P ₆₀ K ₁₂₀	1,09	0,79	1,40	N ₂₁₀ P ₉₀ K ₁₈₀	1,09	1,15	0,95
P ₂₀ K ₄₀ +пестициды	1,02	0,83	1,20	N ₇₀ P ₃₀ K ₆₀ +пестициды	1,07	1,14	0,94
P ₄₀ K ₈₀ +пестициды	1,05	0,83	1,30	N ₁₄₀ P ₆₀ K ₁₂₀ +пестициды	1,07	1,14	1,00
P ₆₀ K ₁₂₀ +пестициды	1,09	0,83	1,30	N ₂₁₀ P ₉₀ K ₁₈₀ + пестициды	1,11	1,06	1,05

При анализе данных содержания органических веществ в зерне озимой ржи обнаружена обратно пропорциональная зависимость между содержанием белка и жира, обусловленная увеличением содержания ионов K^+ и снижением Na^+ с повышением дозы калийного удобрения. В соответствии с последовательностью катионов по способности адсорбироваться, адсорбция Na^+ на корневой системе озимой ржи превышает адсорбцию ионов K^+ [69].

Константа ионного обмена K^+ на Na^+ (K^+/Na^+), равная 1, означает, что катион Na^+ прочнее адсорбируется корневой системой растений и обладает меньшей миграционной способностью, чем K^+ .

Относительное увеличение содержания сырого протеина по сравнению с контролем при повышении доз калийного удобрения с 60 до 180 составило 12,9%, а снижение жира – 6,4%.

Теоретический анализ экспериментальных данных содержания элементов питания и органических веществ в продукции кормопроизводства выявил следующие особенности протекания процессов биологического выноса элементов из почвы и синтеза органических веществ в растении:

- выведена закономерность биосинтеза биохимических показателей кормов из закономерности биовыноса элементов питания на основе экспериментальных данных.

- увеличение дозы калийного удобрения в полном минеральном удобрении при постоянных дозах азотных и фосфорных удобрений повышает содержание N, K и сырого протеина в кормах многолетних мятликовых трав и снижает содержание Mg и БЭВ;

- обнаружена обратно пропорциональная зависимость содержания иона Na^+ и жира, и прямо пропорциональная зависимость иона K^+ и белка в зерне озимой ржи в зависимости от дозы калия в полном минеральном удобрении;

- установлена зависимость содержания сырого протеина от отношения N/K в растениях многолетних трав;

- доказана роль процесса адсорбции катионов на корневой системе растений и констант ионного обмена на процессы биосинтеза сырого протеина, БЭВ и сырого жира в растениях многолетних мятликовых трав, зернобобовых и зерновых культур;

- показана зависимость констант ионного обмена $\text{K}^+/\text{Mg}^{2+}$ и K^+/Na^+ на корневой системе растений от доз калийных удобрений в NPK, что открывает возможность регулирования качества корма путём изменения доз калия в полном минеральном удобрении.

4. Использование закономерностей биовыноса элементов питания из почвы сельскохозяйственными культурами для размещения их в пространстве

4.1 Прогнозирование возделывания разных видов сельскохозяйственных культур на серых лесных легкосуглинистых почвах

Формулы (8) и (9) включают в себя параметр биовыноса элементов питания (12) и напряжённость электростатического поля системы корень-почва (13), которая регулирует скорость потока почвенного раствора к зоне «всасывания». Чем выше значение E , тем больше доступность почвенной влаги корням растений и выше урожайность культуры.

В таблице приведены рассчитанные по формуле (13) значения E разных видов культур, возделываемых на серой лесной легкосуглинистой почве. Для расчёта E необходимо иметь данные ёмкости катионного обмена и удельной поверхности корневой системы культуры, а также значения E и удельной поверхности почвы. Значение ЕКО корневой системы с.-х. культур было взято из работ [116, 117, 124, 125]. Удельная поверхность корневых систем была рассчитана по формуле (13). Средняя температура воздуха в период вегетации (2005-2015 гг.) по данным метеостанции БГАУ составила 16.3 градуса Цельсия.

Расчёт значения E проводился по формуле (13):

$$E=1,8 \cdot 10^3 (\sigma_k - \sigma_p) / T, 1/\text{м}$$

Для перевода значения E (1/м) в мВ/м использовали равенство (14):

$$\varphi = \psi \cdot e z_0 / kT$$

где φ и ψ - соответственно безразмерный и имеющий размерность в Вольтах потенциалы, $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, z_0 - потенциалопределяющая валентность, принималась за 1, k - постоянная Больцмана, равная $1,38 \cdot 10^{-23}$, T - абсолютная температура, равная 289,3 °К [34].

Многолетние злаковые травы, введенные в культуру, природной средой обитания которых являются переувлажнённые почвы, при отсутствии легкодоступной влаги не в состоянии обеспечить урожайность, сравнимую при выращивании в природной среде обитания (табл. 34).

Таблица 34 - Рассчитанные по формуле (13) значения напряжённостей электростатических полей посевов разных видов культур, выращиваемых на серой лесной легкосуглинистой почве

Показатель Культура	ЕКО	S	δ_k, δ_p	E1 1/м	E2 1/м	E1 мВ/м	E2 мВ/м
Люпин жёлтый	47,7	53,6	0,86	3,23	3,0	52,0	47,7
Овёс посевной	22,8	26,8	0,82	2,99	2,74	74,4	68,2
Суданская трава	13,5	15,3	0,85	3,17	2,92	78,9	72,7
Просто посевное	12,2	14,3	0,82	2,99	2,74	74,4	68,2
Райграс однолетний	22,5	24,2	0,90	3,48	3,23	84,6	80,4
Ежа сборная	25,6	7,50	3,30	18,4	18,2	45,8	45,3
Овсяница луговая	30,4	8,20	3,55	20,0	19,7	49,8	49,0
Двукосточник тростниковидный	30,8	10,8	2,85	15,6	15,4	38,8	38,3
1. Агросерая лесная легкосуглинистая почва на лёссовидном суглинке	15,7	44,9	0,34				
2. Агросерая лесная легкосуглинистая почва на лёссовидном суглинке Микроповышение	14,9	38,1	0,38				

Примечание: ЕКО - ёмкость поглощения корней, мг-экв/100г; S - удельная поверхность корней м²/г; бк, бп - поверхностная плотность зарядов корней и почвы, E1, E2 - напряжённость электростатических полей, 1/м, мВ/м.

Остальные 5 видов культур пригодны для возделывания на серых лесных почвах. Увеличение плотности зарядов почвы на микроповышении сопровождается уменьшением значения E. Результаты возделывания с.-х. культур в производстве подтверждают закономерность биовыноса элементов питания из почвы корневой системой. Мятликовые травы не пригодны для возделывания на серых лесных почвах.

Таким образом, на серых лесных почвах, вводимых в севооборот, закономерность биовыноса элементов питания из почвы культурами позволяет проводить оценку пригодности ее для возделывания разных культур.

4.2 Прогнозирование выбора почвы для возделывания овса посевного и озимей ржи в Брянской области

Дерново-подзолистые почвы Брянской области характеризуются большим разнообразием подтипов, родов, видов, разновидностей и разрядов почв. В таблице 35 приведены 10 разных почв, относящихся к одному типу. Как следует из таблицы, почвы существенно отличаются друг от друга величиной плотности отрицательных зарядов. Самые высокие значения σ_p имеют первые 3 почвы, сравнимые со значениями σ_k . Отсюда следует, что напряжённость элек-

тростатического поля почвенных капилляров вносит существенный вклад в величину потоков почвенного раствора к корневой системе культур может повышать доступность почвенной влаги и элементов питания корневой системе культур, повышать транспирацию и урожайность.

Наиболее пригодными для возделывания овса посевного являются дерново-среднеподзолистые супесчаные почвы, характеризующиеся плотностью поверхностных зарядов, изменяющейся в интервале значений 0,47-0,12 Кл/м² (табл. 35)

Таблица 35 - Рассчитанные по формуле (13) значения E.

Почва	Овёс посевной					Рожь посевная		
	бк, Кл/м ²	бп, Кл/м ²	бк-бп, Кл/м ²	E, 1/м	E, мВ/м	бк-бп, Кл/м ²	E, 1/м	E, мВ/м
Дерново-слабоподзолистая, пылевато-супесчаная на покровных суглинках	0,82	0,72	0,1	0,62	15,6	0,37	2,29	57,5
Дерново-подзолистая, грунтово-глееватая легкосуглинистая на покровных суглинках		0,66	0,16	0,99	24,8	0,43	2,66	65,8
Дерново-среднеподзолистая супесчаная на водноледниковых отложениях, подстилаемых мореной в пределах 1 метра		0,80	0,02	0,12	3,0	0,29	1,79	44,9
Дерново-слабоподзолистая, легкосуглинистая на покровных суглинках		0,55	0,27	1,67	41,9	0,54	3,34	83,8
Дерново-среднеподзолистая пылевато-супесчаная на водноледниковых отложениях		0,47	0,35	2,17	54,5	0,62	3,84	97,4
Дерново-среднеподзолистая пылевато-супесчаная на водноледниковых отложениях, подстилаемых покровными суглинками		0,23	0,59	3,59	90,1	0,86	5,32	133
Дерново-среднеподзолистая супесчаная на водноледниковых отложениях		0,14	0,68	4,21	105,7	0,95	5,88	148
Дерново-среднеподзолистая супесчаная на водноледниковых отложениях, подстилаемых покровными суглинками в пределах 1 метра		0,12	0,17	3,83	96,1	0,97	6	151
Дерново-среднеподзолистая супесчаная на водноледниковых отложениях		0,18	0,64	3,96	99,4	0,91	5,63	141
Дерново-среднеподзолистая супесчаная на водноледниковых отложениях, подстилаемых покровными суглинками в пределах 1 метра		0,15	0,67	4,15	104,2	0,94	5,82	210

Корневая система озимой ржи имеет более высокую, чем овёс посевной плотность отрицательных зарядов ($1-0.9 \text{ Кл/м}^2$) и более требовательна к почвенным условиям. Как следует из таблицы 35, из 10 разных почв мало пригодны для возделывания озимой ржи являются первые 3, имеющие значение E , не достаточное для обеспечения корневых систем доступной влагой и элементами питания из-за отсутствия водозадерживающих экранов.

Почвенные очерки бывших колхозов и совхозов включали ЕКО и фракционные анализы почв, которые можно было использовать для расчёта удельной поверхности каждой почвы хозяйства. Емкости катионного обмена корневых систем всех с.-х. культур приведены в работах [116, 117, 120, 125]. Расчёт удельной поверхности корней проводили по формуле (13).

4.3 Прогнозирование содержания магния в надземной фитомассе люпина жёлтого

В работе [69] были собраны данные, указывающие на то, что в одном процессе (рассоление толщи почво-грунта обширной территории) ионы хлора, SO_4 , Са, Mg, Na подчиняются уравнению (8), а ионы HCO_3 - уравнению (9).

Аналогичные зависимости логарифмов C_i/C_k были получены для биовыноса элементов питания N, P, K, Са разными культурами при повышении дозы NPK. В отличие от N, P, K, Са динамика биовыноса Mg подчиняется уравнению (9).

Содержание Mg в фитомассе трав зависит не только от дозы NPK, но и отношения K/N в NPK и фитомассе трав, которое самое низкое имеет люпин жёлтый. Поэтому для повышения качества корма и уменьшения содержания Mg в фитомассе люпина жёлтого необходимо иметь информацию о пригодности разных почв для возделывания люпина жёлтого (табл. 36).

Содержание Mg в фитомассе люпина жёлтого и в надземной фитомассе трав проводился по формуле (9).

Таблица 36 - Рассчитанные значения содержания К и Mg в фитомассе люпина жёлтого

Показатель	бк, Кл/м ²	бп, Кл/м ²	бк-бп Кл/м ²	E1, 1/м	E2, мВ/м	λ, 1/м	Mg	K
Почва								
Дерново-слабоподзолистая, пылевато-супесчаная на покровных суглинках	0,86	0,72	0,14	0,87	21,8	0,6	0,33	2,07
Дерново-подзолистая, грунтово-глееватая легкосуглинистая на покровных суглинках		0,66	0,20	1,24	31,1	0,9	0,30	2,27
Дерново-среднеподзолистая супесчаная на водноледниковых отложениях, подстилаемых мореной в пределах 1 метра		0,80	0,06	0,37	9,3	0,3	0,37	1,89
Дерново-слабоподзолистая, легкосуглинистая на покровных суглинках		0,55	0,31	1,92	48,2	1,3	0,27	2,56
Дерново-среднеподзолистая пылевато-супесчаная на водноледниковых отложениях		0,47	0,39	2,41	60,5	1,7	0,24	2,88
Дерново-среднеподзолистая пылевато-супесчаная на водноледниковых отложениях, подстилаемых покровными суглинками		0,23	0,63	3,90	97,9	2,7	0,18	3,89
Дерново-среднеподзолистая супесчаная на водноледниковых отложениях		0,14	0,72	4,46	112,0	3,1	0,16	4,38
Дерново-среднеподзолистая супесчаная на водноледниковых отложениях, подстилаемых покровными суглинками в пределах 1 метра		0,12	0,74	4,56	115,0	3,2	0,15	4,52
Дерново-среднеподзолистая супесчаная на водноледниковых отложениях		0,18	0,68	4,21	106,0	2,9	0,17	4,13
Дерново-среднеподзолистая супесчаная на водноледниковых отложениях, подстилаемых покровными суглинками в пределах 1 метра		0,15	0,71	4,39	110,0	3,1	0,16	4,38

Содержание Mg в фитомассе люпина уменьшается с увеличением значения E разных почв (табл. 36). Содержание поглощенного K, наоборот, увеличивается с повышением E. Урожай фитомассы люпина жёлтого с лучшими показателями качества можно получить на почвах под номерами 6-10.

4.4 Сравнительная оценка экспериментальных данных элементного состава надземной фитомассы трав

Для сравнительной оценки, рассчитанных по формулам (8,9) и экспериментальных значений биовыноса элементов питания из почвы использовались ре-

зультаты полевых опытов, проводившихся на двух почвах: аллювиальные луговые и дерново-подзолистые по данным работ [5, 25, 27, 48, 86, 104].

На аллювиальных луговых почвах возделывались многолетние злаковые травы (мятликовые): ежа сборная, овсяница полевая и двукисточник тростниковидный (табл. 37).

На дерново-подзолистой почве возделывались 5 разных видов трав. Из семейства Злаковые 4 культуры: овес посевной, просо посевное, суданская трава, райграсс однолетний. Из семейства Бобовые - люпин жёлтый.

Таблица 37 - Экспериментальные (числитель) и рассчитанные (знаменатель) значения элементного состава фитомассы мятликовых трав

Показатель Культура	1 укос					2 укос				
	N	P	K	Ca	Mg	N	P	K	Ca	Mg
Ежа сборная	<u>2,48</u>	<u>0,37</u>	<u>2,82</u>	<u>0,65</u>	<u>0,25</u>	<u>2,25</u>	<u>0,38</u>	<u>2,33</u>	<u>0,63</u>	<u>0,28</u>
	2,47	0,37	2,83	0,65	0,25	2,24	0,38	2,32	0,63	0,28
Овёс посевной	<u>2,48</u>	<u>0,38</u>	<u>2,79</u>	<u>0,63</u>	<u>0,24</u>	<u>2,28</u>	<u>0,36</u>	<u>2,38</u>	<u>0,63</u>	<u>0,24</u>
	2,47	0,38	2,77	0,63	0,24	2,27	0,36	2,38	0,63	0,24
Двукисточник тростниковидный	<u>2,50</u>	<u>0,38</u>	<u>2,83</u>	<u>0,63</u>	<u>0,24</u>	<u>2,31</u>	<u>0,38</u>	<u>2,38</u>	<u>0,64</u>	<u>0,26</u>
	2,49	0,38	2,83	0,63	0,24	2,31	0,38	2,39	0,64	0,27

От возобновления вегетации до первого укоса посевы трав выращивались в условиях избытка и недостатка влаги после продолжительного паводка (22 дня). От первого укоса до второго выращивали в условиях близкого залегания грунтовых вод.

Посевы трёх видов мятликовых трав, выращиваемых при равной доступности почвенной влаги и значениях P_e , имели элементный состав надземной фитомассы, рассчитанный по формулам (9) и (8), сравнимый с экспериментальными данными.

Для выяснения влияния доступности влаги корневой системе растений разных видов трав были рассчитаны по формулам (9) и (8) элементный состав 5 видов культур, отличающихся друг от друга по доступности влаги и значениям P_e .

Посевы райграсса однолетнего отличались от других культур самой низкой доступностью почвенной влаги корневой системе и высокими относительными ошибками рассчитанных значений содержания N, P, K, Ca в фитомассе трав. Поглощение элементов питания N, P, K, Ca корневой системой просо посевное зависело от доступности почвенной влаги.

В отличие от N, P, K, Ca поглощение Mg корневой системой культур не зависело от доступности почвенной влаги и числа Ре. В работе [69] из полученной модели (3) для хлористых солей выведена следующая последовательность катионов по способности адсорбироваться: $H^+ > Mg^{2+} > Al^{3+} > Ca^{2+} > Na^+ > {}^{90}Sr^{2+} > K^+ > {}^{137}Cs^+ > NH_4^+$.

В работе [35] выявлено влияние адсорбционной способности катионов на содержание этого катиона в почвенном растворе: чем больше адсорбционная способность катиона, тем меньше содержание его в почвенном растворе Mg отличается от катионов NH_4 , K, Ca самой высокой адсорбционной способностью.

На контроле биовынос Mg надземной фитомассой меньше, чем K и Ca. Постепенное повышение дозы NPK вызывает закономерное уменьшение доли Mg в константе ионного обмена K на Mg, и биовыносе Mg.

Средняя относительная ошибка рассчитанных значений элементного состава 5 видов культур составила менее 20% (табл. 38).

Таблица 38 - Относительные ошибки рассчитанных значений элементного состава фитомассы кормовых культур

Показатель Культура	N	$\Delta C/$ Cэ	P	$\Delta C/$ Cэ	K	$\Delta C/$ Cэ	Ca	$\Delta C/$ Cэ	Mg	$\Delta C/$ Cэ
Люпин желтый	2,06/2,14	3,9	0,17/0,16	5,9	1,89/1,96	3,7	0,54/0,57	5,6	0,16/0,16	0
Овёс посевной	1,29/1,07	17	0,14/0,15	7,1	1,58/1,76	11,4	0,46/0,52	13	0,14/0,14	0
Райграс однолетний	0,92/1,24	34,8	0,14/0,15	7,1	1,68/2,12	32,5	0,45/0,61	35,6	0,13/0,13	0
Суданская трава	1,05/1,14	8,6	0,13/0,14	7,7	1,44/1,57	9	0,43/0,44	2,3	0,12/0,11	8,3
Просо посевное	1,13/1,59	40,7	0,14/0,2	42,9	1,48/1,84	24,3	0,43/0,6	39,5	0,12/0,12	0
Средняя относитель- ная ошибка, %		21		14,1		16,2		19,2		1,7

Таким образом, теоретический анализ результатов полевых опытов позволил установить следующие положения закономерностей биовыноса элементов питания из почвы:

- основным механизмом процесса биовыноса элементов питания из почвы является напряжённость электростатических полей корневой поверхности и поверхности почвенных капилляров;

- напряженность электростатических полей (E) зависит от толщины ДЭС, обусловленной дозой минеральных удобрений;

- закономерность биовыноса ионов NO_3^- , K^+ , NH_4^+ , Ca^{2+} из почвы отличается от таковой для иона Mg^{2+} обусловленная тем, что ионы NO_3^- , K^+ , NH_4^+ , Ca^{2+} передвигаются в основном с конвективным потоком влаги, тогда как Mg^{2+} с диффузионным потоком влаги из-за высокой адсорбционной способности;

- биовынос иона Mg^{2+} зависит от отношения K/N в удобрении. При K/N <1 имеет место увеличение выноса Mg^{2+} из почвы, при K/N >1 имеет место уменьшение биовыноса Mg^{2+} ;

- закономерность учитывает роль числа Pe в дифференциации ионов в фитомассе трав;

- видовые различия процесса биовыноса элементов питания из почвы определяются разностью между поверхностной плотностью зарядов на корневой системе и поверхности почвы;

- закономерность биовыноса элементов питания совпадает с закономерностью биовыноса веществ в растениях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном учебном пособии «Закономерности биовыноса элементов питания из почвы кормовыми травами» излагаются некоторые явления, возникающие в процессах биовыноса из почвы и биосинтеза элементов питания органических веществ в растении.

Полевые исследования с внесением доломита в почву подтвердили лабораторные эксперименты, проведённые в работе [4] о влиянии рН раствора на поглощение катионов и анионов корневой системой растений.

Установлено, что в биовыносе элементов питания участвует не только корневая система растений, но и почва, которая, как все капиллярно-пористые тела, обладает электрокинетическими свойствами.

Доказано, что напряжённость электростатического поля корней и поверхности почвенных капилляров, является движущей силой биовыноса, которая, действуя на столб воды в капиллярах почвы, направляет их к поверхности корневых волосков зоны «всасывания».

Выявлено, что доступность почвенной влаги зависит от дозы минерального удобрения и величины E , которое изменяется по экспоненциальному закону. Наличие асимптоты на кривых функций $Y=fN_{\text{НРК}}$, $E=fN_{\text{НРК}}$ позволяет считать понятие «агрохимический барьер», введённое в литературу Г.Т. Воробьевым [33, 45], реальной величиной, равной дозе минерального удобрения, при которой величина E приближается к асимптоте.

Выявлена роль K и Mg в процессах биосинтеза сырого протеина, БЭВ, а также роль Pe в дифференциации во время выноса ионов из почвы;

Закономерности биовыноса элементов питания можно использовать не только для объяснения полученных результатов, но и прогноза. Некоторые примеры использования прогностической функции закономерности приведены в учебном пособии.

Авторы надеются, что работа заинтересует студентов, магистрантов, аспирантов, особенно тех, кто занимается вопросами биовыноса из почвы элементов питания корневой системой и синтеза органических веществ в растении, которые обусловлены разностью поверхностных плотностей корней и почвы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Агрономическая и экономическая эффективность защитных мероприятий при реабилитации естественных кормовых угодий / В. Ф. Шаповалов, Г. П. Малявко, А. Л. Силаев, А. Н. Дзудзило // Вестник Брянской ГСХА. – 2014. – № 5. – С. 25-31.
2. Адамко, В. Н. Влияние комплексного применения средств химизации на урожайность и качество зерна озимой ржи в условиях радиоактивного загрязнения: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук / В. Н. Адамко. – Брянск, 2014. – 22 с.
3. Азотные удобрения и удельная активность ^{137}Cs фитомассы загрязненных радионуклидами пойменных сенокосов / С. М. Пакшина, Н. М. Белоус, Е. В. Смольский и др. // Проблемы агрохимии и экологии. – 2019. - № 1. – С. 26-32.
4. Алёшин, С. Н. Об электрическом заряде корня растений и методе его определения/ С. Н. Алёшин, М. Т. Ястребов // Доклады ТСХА. – 1950. – Вып. XII. – С. 188-194.
5. Анишина, Ю. А. Эффективность возделывания многолетних мятликовых трав в одновидовых посевах на радиоактивно загрязнённых пойменных лугах: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук / Ю. А. Анишина. – Брянск, 2012, – 20 с.
6. Белоус, И. Н. Влияние удобрений и обработки почвы на миграцию ^{137}Cs в почве кормовых угодий / И. Н. Белоус, Л. П. Харкевич, В. Ф. Шаповалов // Земледелие. – 2012. – № 8. – С. 8-10.
7. Белоус, И. Н. Оценка систем удобрения при возделывании озимой ржи в условиях радиоактивного загрязнения территорий / И. Н. Белоус, Л. П. Харкевич, В. Б. Коренев // Агрохимический вестник. – 2017. – № 3. – С. 2-5.
8. Белоус, И. Н. Применение систем удобрения при возделывании озимой ржи в условиях юго-запада Нечерноземья / И. Н. Белоус, В. Ф. Шаповалов, Г. П. Малявко // Агрохимия. – 2017. – № 9. – С. 49-57.
9. Белоус, И.Н. Растениеводство. Озимая рожь: учеб. пособие / И.Н. Белоус. – Брянск: Изд-во Брянский ГАУ, 2017. – 60 с.
10. Белоус, И. Н. Совместное действие минеральных и органических удобрений на урожайность и качество зерна озимой ржи в условиях радиоак-

тивно загрязненных почв / И. Н. Белоус, В. Б. Коренев // Агрохимикаты в XXI веке: теория и практика применения: материалы междунар. науч.-практ. конф. – Н. Новгород, 2017. – С. 14-16.

11. Белоус, И. Н. Экономическая эффективность использования систем удобрения на естественных кормовых угодьях / И. Н. Белоус, Т. В. Дробышевская // Вестник Брянской ГСХА. – 2015. – № 5. – С. 43-46.

12. Белоус, И. Н. Экономическая эффективность систем удобрения при улучшении радиоактивно загрязненных естественных кормовых угодий / И. Н. Белоус, Е. В. Смольский, Т. В. Дробышевская // Актуальные вопросы экономики и агробизнеса: сб. ст. VIII междунар. науч.-практ. конф. В 4 ч. Ч. 1. – Брянск: Изд-во Брянский ГАУ, 2017. – С. 90-93.

13. Белоус, И. Н. Эффективность агрохимических приемов при поверхностном улучшении естественных кормовых угодий, загрязненных ^{137}Cs / И. Н. Белоус, Е. А. Кротова, Е. В. Смольский // Агрохимия. – 2012. – № 8. – С. 18-24.

14. Белоус, Н. М. Система удобрения полевого и лугового кормопроизводства в условиях радиоактивного загрязнения территории / Н. М. Белоус, В. Ф. Шаповалов, Е. В. Смольский // Плодородие. – 2016. – № 5 (92). – С. 34-38.

15. Белоус, Н. М. Эффективность агротехнических приемов по получению безопасной продукции на пойменных кормовых угодьях / Н. М. Белоус, В. Ф. Шаповалов, Е. В. Смольский // Агро XXI. – 2013. – № 1. – С. 41-43.

16. Бельченко, С. А. Возделывание люцерно-мятликовых травосмесей / С. А. Бельченко, В. В. Дьяченко, А. В. Дронов // Животноводство России. – 2020. – № 6. – С. 56-58.

17. Биовынос ^{137}Cs и нитратов многолетними травами при известковании дерново-подзолистых песчаных почв / С. М. Пакшина, Л. П. Харкевич, Н. М. Белоус, Е. В. Смольский // Агрохимия. – 2020. – № 1. – С. 75-80.

18. Ведение лугового кормопроизводства в Российской Федерации и республике Беларусь при радиоактивном загрязнении территорий / Е. В. Смольский, А. Г. Подоляк, И. Н. Белоус и др. // Экономика с.-х. и перерабатывающих предприятий. – 2015. – № 11. – С. 30-34.

19. Вклад различных кормовых культур в биологический вынос элемен-

тов питания из почвы / С. М. Пакшина, С. Ф. Чесалин, В. Ф. Шаповалов, Е. В. Смольский // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. – 2020. – № 5. – С. 56–64.

20. Влияние азотных удобрений и биопрепаратов на урожайность зерна в смешанных бобово-мятликовых агроценозов / А. С. Кононов, Н. М. Белоус, В. Е. Ториков, В. Ф. Шаповалов, О. Н. Шкотова // Агрехимический вестник. – 2021. – № 2. – С. 3-9.

21. Влияние длительного применения средств химизации на продуктивность плодосменного севооборота и плодородие дерново-подзолистой почвы в условиях радиоактивного загрязнения / Н. М. Белоус, В. Г. Сычев, В. Ф. Шаповалов, И. Н. Белоус // Плодородие. – 2013. – № 3 (72). – С. 1-3.

22. Влияние минеральных удобрений и приёмов поверхностного улучшения почвы на урожай и качество зелёной массы многолетних трав / Н. М. Белоус, Л. П. Харкевич, В. Ф. Шаповалов, Е. А. Кротова // Кормопроизводство. – 2010. – № 4. – С. 15-19

23. Влияние минеральных удобрений на эвапотранспирацию и транспирацию посевов озимой ржи / С. М. Пакшина, Г. П. Малявко, И. Н. Белоус, А. Е. Колыхалина // Вестник Брянской ГСХА. – 2017. - № 3 (61). – С. 19-24.

24. Влияние различных систем удобрения на накопление тяжелых металлов в сельскохозяйственной продукции / Н.М. Белоус, В.Ф. Шаповалов, Ф.В. Моисеенко, М.Г. Драганская // Вестник Брянской ГСХА. – Отдельный выпуск. – 2005. – С. 22-29.

25. Влияние систем удобрений и пестицидов на качественные показатели зеленой массы кормового люпина / Н. М. Белоус, В. Ф. Шаповалов, Л. П. Харкевич, В. В. Талызин // Агрехимический вестник. – 2011. – № 3. – С. 3-6.

26. Влияние систем удобрения озимой ржи на урожайность и технологические качества зерна / И. Н. Белоус, Л. П. Харкевич, В. Ф. Шаповалов, Г. П. Малявко // Зерновое хозяйство России. – 2018. - № 3 (57). – С. 3-8.

27. Влияние средств химизации и способов обработки почвы на продуктивность и качество зеленой массы многолетних трав в условиях радиоактивного загрязнения / В. Ф. Шаповалов, Л. П. Харкевич, И. Н. Белоус, Ю. А. Анишина // Проблемы агрохимии и экологии. – 2011. – № 2. – С. 29-33.

28. Влияние удобрений и агротехнологических мероприятий при производстве сена многолетних трав на пойменном лугу в условиях радиоактивного загрязнения / Л. П. Харкевич, В. Ф. Шаповалов, Е. В. Смольский и др. // Агротехнический вестник. – 2017. – № 3. – С. 15-18.

29. Влияние удобрений и химических средств защиты растений на урожайность и накопление ^{137}Cs в зерне озимой ржи в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС / Л. П. Харкевич, Г. П. Малявко, И. Н. Белоус и др. // Вестник Брянской ГСХА. – 2016. - № 2 (54). – С. 28-35.

30. Воздействие агротехнических и агрохимических мероприятий на урожайность многолетних трав и плодородие почвы / Л. П. Харкевич, Н. М. Белоус, Е. В. Смольский, С. Ф. Чесалин // Плодородие. – 2013. – № 4. – С. 25-27.

31. Возделывание люцерно-мятликовых травосмесей / С. А. Бельченко, В. Е. Торицов, В. В. Дьяченко, А. В. Дронов // Животноводство России. – 2020. – № 6. – С. 56-58.

32. Волобуев, В. Р. Расчёт промывок засоленных почв / В. Р. Волобуев. - М.: Колос, 1975. – 71 с.

33. Воробьев, Г. Т. Почвы Брянской области / Г. Т. Воробьев. – Брянск: «Грани», 1993. – 160 с.

34. Воюцкий, С. С. Курс коллоидной химии / С. С. Воюцкий. – М.: Химия, 1975. – 512 с.

35. Гедройц, К. К. Избранные научные труды / К. К. Гедройц. – М.: Наука, 1975. – 637 с.

36. Григоров, О. Н. Исследование электрокинетических свойств природных карбонатов кальция методом потенциала течения на открытой поверхности / О. Н. Григоров, Г. Л. Левашова // Электрокинетические явления в дисперсных системах. – М.: Наука, 1972. – С. 6–9.

37. Дерягин, Б. В. К теории капиллярно-диффузионного осмоса / Б. В. Дерягин, С. С. Духин, М. М. Коптелова // Коллоидный журнал. – 1969. – Т. 31. – С. 359-370.

38. Дьяченко, О. В. Влияние борофоски на содержание и сбор сырого

протеина урожаем сена одновидовых и смешанных агрофитоценозов многолетних трав в юго-западной части Центрального региона / О. В. Дьяченко, С. А. Бельченко // Вестник Брянской ГСХА. – 2020. – № 2 (78). – С. 19-24.

39. Дьяченко, О.В. Материально-техническая база сельского хозяйства – основа развития аграрного сектора России (на примере Брянской области) / О. В. Дьяченко, С. А. Бельченко, И. Н. Белоус // Экономика с.-х. и перерабатывающих предприятий. – 2016. – № 6. – С. 27-31.

40. Иванов, Н. Н. Об определении величины испаряемости / Н. Н. Иванов // Известия Всесоюзного Географического общества. – 1954. – Т. 86, № 2. – С. 189-195.

41. Использование естественных кормовых угодий в условиях радиоактивного загрязнения / Н. М. Белоус, В. Ф. Шаповалов, Е. В. Смольский, И. Н. Белоус // Аграрная наука – сельскохозяйственному производству Сибири, Казахстана, Монголии, Беларуси и Болгарии: сб. науч. докл. XX междунар. науч.-практ. конф. – Новосибирск, 2017. – С. 327-329.

42. Использование смешанных травостоев в кормопроизводстве Брянской области / Н. А. Капошко, С. А. Бельченко, В. Ф. Шаповалов и др. // Агрэкологические аспекты устойчивого развития АПК: материалы XVII междунар. науч. конф. – Брянск: Изд-во Брянский ГАУ, 2020. – С. 356-366.

43. Итоги развития растениеводческой отрасли в 2019 году и задачи на 2020 год / С. А. Бельченко, В. Е. Ториков, А. В. Дронов и др. // Агрэкологические аспекты устойчивого развития АПК: материалы XVII междунар. науч. конф. – Брянск: Изд-во Брянский ГАУ, 2020. – С. 793-804.

44. К теории биологического выноса элементов питания из почвы посевами мятликовых трав при внесении минерального удобрения / С. М. Пакшина, Н. М. Белоус, С. Ф. Чесалин, Е. В. Смольский // Пермский аграрный вестник. – 2020. – № 3 (31). – С. 52-65.

45. Ковалёв, Л. А. Агрэкологическая оценка удобрений и цеолитов с целью создания агрохимических барьеров для цезия-137: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук / Л. А. Ковалёв. – Брянск, 2004. – 20 с.

46. Комбинированное использование травостоев / В. Е. Ториков, С. А. Бельченко, А. В. Дронов, И. Н. Белоус // Животноводство России. – 2016. – № 7. – С. 67-70.

47. Коренев, В. Б. Урожайность кормовых и зерновых культур, и накопление ^{137}Cs в зависимости от внесения возрастающих доз калийных удобрений / В. Б. Коренев, Л. А. Воробьева, И. Н. Белоус // Вестник Брянской ГСХА. – 2013. – № 5. – С. 3-6.

48. Кротова, Е. А. Продуктивность пойменных сенокосов в зависимости от агрохимических и агротехнических приемов в условиях радиоактивного загрязнения: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук / Е. А. Кротова. – Брянск: Изд-во Брянская ГСХА, 2011. – 22 с.

49. Ларетин, Н. А. Методические основы определения экономической эффективности сенокосов и пастбищ / Н. А. Ларетин, Е. П. Чирков // Экономика сельскохозяйственных и перерабатывающих предприятий. – 2011. – № 8. – С. 23-27.

50. Малявко, Г. П. Эффективность агрохимических средств при возделывании озимой ржи на техногенно-загрязненной почве / Г. П. Малявко, И. Н. Белоус, В. Ф. Шаповалов // Вестник Брянской ГСХА. – 2019. - № 6 (76). - С. 3-8.

51. Менгель, К. Влияние доступности растениям питательных веществ на образование урожая / К. Менгель. – М., 1973.

52. Минеев, В. Г. Агрохимия. - 2-е изд. перераб. и доп. / В. Г. Минеев. – М.: Изд-во МГУ, 2004. – 720 с.

53. Минеральные удобрения, эвапотранспирация, и транспирация посевов озимой ржи / С. М. Пакшина, Г. П. Малявко, И. Н. Белоус, А. Е. Колыхалина // Агроконсультант. – 2017. - № 3. – С. 17-21

54. Мичурин, Б. Н. Энергетика почвенной влаги / Б. Н. Мичурин. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 140 с.

55. Многолетние бобовые и злаковые травы: биология и технологии возделывания: монография / Н. М. Белоус, В. Е. Ториков, И. Я. Моисеенко, О. В. Мельникова. – Брянск, 2010. – 149 с.

56. Мушкин, И. Г. Тепловой и водный баланс хлопкового поля / И. Г. Мушкин, В. К. Гафуров. – Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 114 с.

57. Наумкин, В. П. Эффективность основной обработки почвы и удобрений / В. П. Наумкин, Г. П. Малявко, Л. А. Наумкина // Кукуруза и сорго. – 1993. – № 6. – С. 5-7.

58. Нерпин, С. В. Физика почвы / С. В. Нерпин, А. Ф. Чудновский. – М.: Наука, 1967. – 583 с.

59. О состоянии радиоактивного загрязнения сельскохозяйственных угодий в Брянской области и на необходимых объектах финансирования из средств федерального бюджета для проведения реабилитационных мероприятий на период 2017-2021 годы / С. А. Бельченко, В. Е. Ториков, В. Ф. Шаповалови др. // Агроэкологические аспекты устойчивого развития АПК: материалы XIV междунар. науч. конф. – Брянск: Изд-во Брянский ГАУ, 2017. – С. 18-25.

60. О тенденциях повышения эффективности использования мелиорированных земель / С. А. Бельченко, В. Е. Ториков, И. Н. Белоус, В. Ю. Симонов // Агроэкологические аспекты устойчивого развития АПК: материалы XV междунар. науч. конф. – Брянск: Изд-во Брянский ГАУ, 2018. – С. 791-799.

61. Озимые зерновые культуры на юго-западе России: учеб. пособие / В. Е. Ториков, И. Н. Белоус, С. А. Бельченко и др. - Брянск: Изд-во Брянский ГАУ, 2019. – 138 с.

62. Озимые зерновые культуры: биология и технологии возделывания: монография / Н. М. Белоус, В. Е. Ториков, Н. С. Шпилёв и др. – Брянск, 2010. – 138 с.

63. Организация системы ведения лугового хозяйства на основе комбинированного использования травостоев / С. А. Бельченко, В. Е. Ториков, А. В. Дронов и др. // Вестник Брянской ГСХА. – 2015. – № 5. – С. 8-14.

64. Особенности возделывания кормовых культур в условиях радиоактивного загрязнения / С. А. Бельченко, В. Е. Ториков, В. Ф. Шаповалов, И. Н. Белоус // Агроконсультант. – 2016. – № 2. – С. 43-50.

65. Оценка коренного улучшения лугов, загрязненных ^{137}Cs / И. Н. Бе-

лоус, Д. Н. Прищеп, Ю. А. Анишина, Е. В. Смольский // Аграрная наука. – 2011. – № 12. – С. 11-13.

66. Пакшина, С. М. Влияние биовыноса элементов питания из почвы на биохимические показатели корма / С. М. Пакшина, Н. М. Белоус, Е.В. Смольский // Вестник Алтайского ГАУ. – 2020. – № 9 (191). – С. 34-42.

67. Пакшина, С. М. Влияние двойных электрических слоёв поверхности корня и почвенных частиц на доступность питательных элементов растениям / С. М. Пакшина, В. Р. Петухов // Агротехника. – 1976. – № 5. – С. 97-102.

68. Пакшина, С. М. Влияние транспирации на содержание макро- и микроэлементов в зерне озимой ржи / С. М. Пакшина, Г. П. Малявко, И. Н. Белоус // Вестник Брянской ГСХА. – 2017. – № 4. – С. 7-16.

69. Пакшина, С. М. Закономерности движения и распределения солей в почве / С. М. Пакшина. – М., 1994. – 138 с.

70. Пакшина, С. М. Исследование закономерности вертикального распределения солей по профилю почвы и ее частных случаев / С. М. Пакшина // Почвоведение. – 1986. – № 2. – С. 86-93.

71. Пакшина, С. М. Передвижение солей в почве / С. М. Пакшина. – М.: Наука, 1980. – 120 с.

72. Пакшина, С. М. Сборник задач по почвоведению. Почвенные процессы: формулы, расчеты / С. М. Пакшина, Н. А. Сквородникова. – Брянск: Изд-во Брянская ГСХА, 2010. – 98 с.

73. Пакшина, С. М. Содержание макро- и микроэлементов в зерне озимой ржи / С. М. Пакшина, Г. П. Малявко, И. Н. Белоус // Агроконсультант. – 2017. – № 4. – С. 6-14.

74. Пакшина, С. М. Физическая интерпретация параметра солеотдачи почв и метод его расчета при проведении промывок засоленных почв / С. М. Пакшина // Доклады ВАСХНИЛ. – 1985. – № 12. – С. 34-36.

75. Полевое кормопроизводство в условиях радиоактивного загрязнения территории / В. Ф. Шаповалов, Л. П. Харкевич, Г. П. Малявко и др. // Земледелие. – 2016. – № 3. – С. 40-43.

76. Поцепай, С. Н. Продуктивность и эколого-химические характеристики сеяных лугов Подесенья в фоновых условиях (Брянской области) / С. Н. Поцепай, С. А. Бельченко, Л. Н. Анищенко // Вестник Ульяновской ГСХА. – 2019. – № 1. – С. 39-44.

77. Приемы поверхностного и коренного улучшения кормовых угодий в условиях радиоактивного загрязнения / С. Н. Поцепай, А. А. Справцев, Л. П. Харкевич, С. А. Бельченко, В. Ф. Шаповалов // Агрехимический вестник. – 2019. – № 4. – С. 58-62.

78. Продуктивность и качество одновидовых и поликомпонентных бобово-злаковых посевов в условиях радиоактивного загрязнения агроландшафтов / В. Ф. Шаповалов, И. Н. Белоус, А. Л. Силаев, Д. М. Ситнов // Вестник Брянской ГСХА. – 2016. – № 2 (54). – С. 35-44

79. Пенман, Х. Круговорот воды / Х. Пенман // Биосфера. – М., 1972. – С. 60-72.

80. Побережский, Л. Н. Водный баланс зоны аэрации в условиях орошения / Л. Н. Побережский. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 159 с.

81. Полевое и луговое кормопроизводство в условиях радиоактивного загрязнения территории на дерново-подзолистых почвах / В. Ф. Шаповалов, С. А. Бельченко, М. П. Наумова // Агрэкологические аспекты устойчивого развития АПК: материалы XVIII междунар. науч. конф. – Брянск: Изд-во Брянский ГАУ, 2021. – С. 145-159.

82. Почвы совхоза «Волна революции» Новозыбского района Брянской области и рекомендации по их использованию. – Воронеж: Изд-во ВГУ, 1978. – 46 с.

83. Применение агрохимических и агротехнических мероприятий при улучшении радиоактивно загрязненных пойменных кормовых угодий / Н. Н. Бокатуро, А. А. Справцев, С. Н. Поцепай и др. // Агрэкологические аспекты устойчивого развития АПК: материалы XVI Международной научной конференции. – Брянск: Изд-во Брянский ГАУ, 2019. – С. 133-138.

84. Применение минеральных удобрений в условиях радиоактивно загрязненного пойменного луга / Е. В. Смольский, Н. М. Белоус, В. Ф. Шаповалов и др. // Агрехимия. – 2018. – № 1. – С. 87–96.

85. Прогноз развития АПК Брянской области – 2019 год / В. Е. Ториков, С. А. Бельченко, И. Н. Белоус и др. // Вестник Брянской ГСХА. – 2019. – № 4 (74). – С. 51-59.

86. Продуктивность одновидовых и смешанных посевов многолетних трав, возделываемых в условиях радиоактивного загрязнения / В. Ф. Шаповалов, Н. М. Белоус., Г. П. Малявко и др. // Кормопроизводство. – 2015. – № 5. – С. 17-21.

87. Прохоров, В. М. Миграция радиоактивных загрязнений почвы. Физико-химические механизмы и моделирование: автореф. дис. ... д-ра х. наук / В. М. Прохоров. – Л., 1975. – 33 с.

88. Реализация подпрограммы «Развитие мелиорации земель сельскохозяйственного назначения Брянской области на (2014-2020 годы)» / С. А. Бельченко, И. Н. Белоус, О. В. Дьяченко, В. Ю. Симонов // Актуальные вопросы экономики и агробизнеса: сб. ст. IX междунар. науч.-практ. конф. – Брянск: Изд-во Брянский ГАУ, 2018. – С. 52-57.

89. Роль минеральных удобрений при использовании радиоактивно загрязненных пойменных лугов в качестве сенокоса / Е. В. Смольский, А. Л. Силаев, В. Е. Мамеева, К. А. Сердюкова // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. – 2019. – № 3. – С. 42-47.

90. Рубин, Б. А. Курс физиологии растений / Б. А. Рубин. – М.: Высшая школа, 1963. – 586 с.

91. Сердюков, А. П. Эффективность систем удобрения при поверхностном улучшении радиоактивно загрязненных пастбищ / А. П. Сердюков, Е. В. Смольский, А. Л. Силаев // Агропромышленные технологии Центральной России. – 2017. – № 1 (3). – 69-77.

92. Система удобрения на пойменных лугах в условиях радиоактивного загрязнения / Н. М. Белоус, В. Ф. Шаповалов, Е. В. Смольский и др. // Прогноз состояния и научное обеспечение плодородия почв земель с.-х. назначения на период до 2030 и 2050 гг.: материалы XI междунар. симп. НП «Содружество ученых агрохимиков и агроэкологов»; под ред. академика РАН В. Г. Сычева. – М.: ВНИИА, 2017. – С. 98-108.

93. Смольский, Е. В. Система удобрения при ведении лугового кормопроизводства на радиоактивно загрязненных территориях // Е. В. Смольский, Н. К. Жолудева, К. А. Сердюкова // Молодежь и инновации – 2017: материалы международной научно-практической конференции молодых ученых. В 2-х ч. Ч. 1. – Горки, 2017. – С. 258-260.

94. Смольский, Е. В. Экономическая эффективность применения минеральных удобрений на радиоактивно загрязненных пойменных лугах / Е. В. Смольский, И. Н. Белоус // Актуальные вопросы экономики и агробизнеса: сб. ст. IX междунар. науч.-практ. конф. – Брянск: Изд-во Брянский ГАУ, 2018. – С. 370-374.

95. Смольский, Е. В. Эффективность защитных мероприятий при улучшении радиоактивно загрязненных пойменных кормовых угодий в отдаленный период после аварии на ЧАЭС / Е. В. Смольский // Сборник докладов 3-й Всероссийской научно-практической интернет-конференции молодых ученых и специалистов с международным участием, 20-22 марта 2019 г. – Саратов: ФГБНУ «НИИСХ Юго-Востока», 2019. – С. 194-198.

96. Сорговые кормовые культуры в организации зеленого и сырьевого конвейеров в Брянской области / С. А. Бельченко, А. В. Дронов, В. Е. Ториков, И. Н. Белоус // Кормопроизводство. – 2016. – № 12. – С. 17-20.

97. Специализация кормопроизводства и управление / Н. А. Ларетин, Е. П. Чирков, А. О. Храмченкова, М. А. Бабьяк // Экономика сельского хозяйства России. – 2018. – № 7. – С. 43-50.

98. Сычев, В. Г. Радиоэкологическая оценка применения минеральных удобрений при коренном улучшении пастбищ пойменных угодий / В. Г. Сычев, Н. М. Белоус, Е. В. Смольский // Плодородие. – 2015. – № 3 (84). – С. 2-5.

99. Теоретические и практические аспекты возделывания озимой ржи в Брянской области: монография / С. М. Пакшина, Г. П. Малявко, И. Н. Белоус, А. Е. Колыхалина. – Брянск: Изд-во Брянский ГАУ, 2017. – 97 с.

100. Технологии возделывания кормовых культур в условиях радиоактивного загрязнения и их влияние на содержание тяжелых металлов и цезия-137 / С. А. Бельченко, В. Е. Ториков, В. Ф. Шаповалов, И. Н. Белоус // Вестник Брянской ГСХА. – 2016. – № 2 (54). – С. 58-67.

101. Удельная активность зерносенажа одновидовых и смешанных посевов кормовых культур / Н. М. Белоус, В. Ф. Шаповалов, И. Н. Белоус, Е. В. Смольский // Совмещенные посевы полевых культур в севообороте агроландшафта: междунар. науч. экол. конф. / под ред. И. С. Белюченко. – Краснодар: КубГау, 2016. – С. 220-223.

102. Урожайность и качество одновидовых и смешанных посевов кормовых культур, возделываемых на зерносенаж при радиоактивном загрязнении / Ю. И. Иванов, И. Н. Белоус, С. Ф. Чесалин, А. С. Кононов // Достижения науки и техники АПК. – 2016. – № 1. – С. 55-58

103. Харкевич, Л. П. Действие длительного применения органических и минеральных удобрений и сидерата на урожайность и динамику накопления ^{137}Cs в зерне озимой ржи / Л. П. Харкевич, В. Ф. Шаповалов, И. Н. Белоус // Проблемы экологизации сельского хозяйства и пути их решения: материалы нац. науч.-практ. конф. – Брянск: Изд-во Брянский ГАУ, 2017. – С. 44-49.

104. Харкевич, Л. П., Эффективность способов обработки почвы и агрохимических приемов при производстве кормов на радиоактивно загрязнённых сельскохозяйственных угодьях Юго-Запада России: автореф. дис. ... д-ра х. наук / Л. П. Харкевич; Брянская ГСХА, Новозыбковская с.-х. опытная станция ВНИИ люпина. – Брянск: Изд-во Брянская ГСХА, 2011. – 46 с.

105. Чирков, Е. П. Особенности исследования экономической эффективности в аграрном секторе экономики / Е. П. Чирков, А. О. Храмченкова // Вестник Брянской ГСХА. – 2018. – № 6 (70). – С. 53-59.

106. Шаповалов, В. Ф. Оценка защитных мероприятий при улучшении радиоактивно загрязненных пойменных лугов и пастбищ / В. Ф. Шаповалов, Н. М. Белоус, Л. П. Харкевич // Новые методы и результаты исследований ландшафтов в Европе, Центральной Азии и Сибири: монография. В 5 т. Т. V. Планирование, управление и реабилитация ландшафтов / под ред. В. Г. Сычева, Л. Мюллера. – М.: Изд-во ФГБНУ «ВНИИ агрохимии», 2018. – С. 204-208.

107. Шатилов, И. С. Водопотребление и транспирация растений в полевых условиях / И. С. Шатилов // Научные основы программирования урожаев культур. – М., 1978. – С. 53-66.

108. Экономико-энергетическая эффективность защитных мероприятий на естественных кормовых угодьях / В. Ф. Шаповалов, Л. П. Харкевич, Ю. А. Анишина, И. Н. Белоус // Вестник Брянской ГСХА. – 2011. – № 2. – С. 46-50.

109. Эффективность защитных мероприятий при возделывании многолетних мятликовых трав на радиоактивно загрязненных пойменных лугах / Н. Н. Бокатуро, А. А. Справцев, С. Н. Поцепай, Н. М. Белоус // Агрехимический вестник. – 2020. – № 1. – С. 65-70.

110. Эффективность защитных мероприятий при улучшении радиоактивно загрязнённых пойменных кормовых угодий в отдалённый период после аварии на ЧАЭС / Н. Н. Бокатуро, С. Н. Поцепай, Н. М. Белоус и др. // Кормопроизводство. – 2018. – № 2. – С. 11–16.

111. Эффективность комплексного применения агрохимических и агротехнических мероприятий при улучшении радиоактивного загрязнения пойменных кормовых угодий / Н. Н. Бокатуро, С. Н. Поцепай, А. А. Справцев и др. // Агрэкологические аспекты устойчивого развития АПК: материалы XV Международной научной конференции. – Брянск: Изд-во БГАУ, 2018. – С. 140-147.

112. Эффективность одновидовых и поликомпонентных бобово-злаковых посевов в условиях радиоактивного загрязнения агроландшафтов / В. Ф. Шаповалов, И. Н. Белоус, А. Л. Силаев, Д. М. Ситнов // Агроконсультант. – 2016. - № 2. – С. 26-33.

113. Эффективность окультуривания дерново-подзолистых почв в земледелии на радиоактивно загрязненных территориях / А. Н. Ратников, Т. Л. Жигарева, К. В. Петров и др. // Бюл. Всерос. науч.-исслед. ин-та агрохимии им. Д. Н. Прянишникова. – 2001. – № 114. – С. 151-152.

114. Эффективность применения удобрений и препарата Альбит при возделывании озимой ржи на радиоактивно загрязнённой почве / Н. Н. Андрюшина, М. В. Семышев, Л. Н. Анищенко, В. Ф. Шаповалов // Агрэкологические аспекты устойчивого развития АПК: материалы XVIII междунар. науч. конф. – Брянск: Изд-во Брянский ГАУ, 2021. – С. 193-201

115. Эффективность технологий возделывания сельскохозяйственных

культур в севооборотах юго-запада Нечерноземной зоны России / Н. М. Белоус, М. Г. Драганская, И. Н. Белоус, С. А. Бельченко. – Брянск: Изд-во БГСХА, 2012. – 241 с.

116. Drake, M. Soil chemistry and plant nutrition / M. Drake // Chemistry of the soil. New York – London. – 1964. – P. 395-444.

117. Drake, M. Cation exchange capacity of plant roots / M. Drake, A. Vengris, W. G. Colby // Soil Science. – 1951. – V. 72, № 2. – P. 139-149.

118. Dynamics of crop production and rational use of agricultural lands / N. M. Belous, V. F. Vaskin, A. A. Kuzmitskaya et al. // Earth and environmental science: 6th international scientific conference on advanced agri technologies, environmental engineering and sustainable development, AGRITECH-VI – 2021, Krasnoyarsk, november 18-20, 2021. – Krasnoyarsk: IOP Publishing Ltd, 2022. – Pp. 042009.

119. Calculation of ^{137}Cs accumulation by phytomass of MOTLEY herbs / S. M. Pakshina, N. M. Belous, V. F. Shapovalov et al. // International Journal of Green Pharmacy. – 2018. – V. 12, № 3. – P. 704-711.

120. Parks, G. A. The zero point of charge of oxides / G. A. Parks, P. L. De Bruyn, Y. Phys // Chem. – 1962. – V. 66. – P. 967–973.

121. Radio-ecological substantiation of applying mineral fertilizers in the field fodder production on radioactively contaminated territories / N. M. Belous, V. F. Shapovalov, I. N. Belous, E. V. Smolsky // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. – 2015. – № 6. – P. 1378-1385.

122. The effectiveness of Chemicals in the cultivation of winter rye on soil contaminated by radiation / I. N. Belous, V. F. Shapovalov, G. P. Malyavko et al. // Amazonia Investiga. - 2019. - T. 8, № 23. - P. 759-766.

123. Single-and multispecies farming ecosystems in field forage production / N. M. Belous, S. A. Belchenko, A. V. Dronov, V. E. Torikov // Natural Volatiles and Essential Oils. – 2021. – V.8, № 4. – P. 7745-7764.

124. Vengris, A. Chemistry of the soils / A. Vengris, M. Drake // New York. – 1955. – P. 286-328.

125. Willams, D. E. Cation exchange properties of plant root surfaces / D. E. Willams, N. T. Coleman // Soil and plant. – 1950. – № 2. – P. 243-256.

Учебное издание

Пакшина Светлана Михайловна

Белоус Николай Максимович

**Закономерности биовыноса из почвы
элементов питания кормовыми травами**

Учебное пособие

Редактор Осипова Е.Н.

Подписано к печати 11.07.2022. Формат 60x84 ¹/₁₆.
Бумага печатная. Усл. п.л. 5,23. Тираж 550 экз. Изд. № 7324.

Издательство Брянского государственного аграрного университета
2433365, Брянская обл., Выгоничский р-он., с. Кокино, Брянский ГАУ