

МЕХАНИЗМЫ «МАКСИМИЗАЦИИ» УРОЖАЙНОСТИ КУЛЬТУР ПРИ НЕДОСТАТКЕ ПОЧВЕННОЙ ВЛАГИ В ЗОНЕ КОРНЕВОЙ СИСТЕМЫ РАСТЕНИЙ

С.М. Пакшина, д.б.н., И.Н. Белоус, д.с.-х.н., С.М. Сычев, д.с.-х.н.,
В.В. Дьяченко, д.с.-х.н., А.В. Дронов, д.с.-х.н.

Брянский государственный аграрный университет, e-mail: bgsha@bgsha.com

В работе З.Н. Бихеле, Х.А. Молдау, Ю.К. Росс (1980) было описано явление «максимизации» урожайности культур при недостатке почвенной влаги корневой системе растений, что позволило объяснить явление регулирования поглощения воды и солнечной энергии растениями. Для раскрытия механизмов поглощения воды и ФАР сельскохозяйственными культурами в зависимости от уровня минерального питания была использована электро-диффузионно-конвективная модель, включающая три механизма переноса почвенного раствора к зоне «всасывания» (корневых волосков): перенос почвенного раствора под действием электростатического поля корней и почвы, диффузия и конвекция. Установлено, что напряженность электростатического поля системы «корень – почва», выступая силой, направляет поток почвенного раствора к отрицательно заряженной поверхности корней зоны «всасывания». Повышается доступность почвенной влаги корневой системе растений, поглощение ФАР, увеличивается диффузионный поток влаги при ее недостатке и конвективный при достатке влаги, транспирация и урожайность. Повышение значений напряженности при недостатке влаги позволяет поддерживать кратность увеличения урожайности, равную при достатке влаги. В этом заключается сущность явления «максимизации» урожайности при недостатке влаги корневой системе растений.

Ключевые слова: напряженность электрического поля системы корень-почва, поверхностная плотность зарядов корней и почвы, транспирация, ФАР, Дебаевский радиус, ДЭС, электро-диффузионно-конвективная модель.

MECHANISMS FOR «MAXIMIZING» CROP YIELDS WITH LACK OF SOIL MOISTURE IN PLANT ROOT SYSTEM

Dr.Sci. S.M. Pakshina, Dr.Sci. I.N. Belous, Dr.Sci. S.M. Sychev, Dr.Sci. V.V. Dyachenko, Dr.Sci. A.V. Dronov
Bryansk State Agrarian University, e-mail: bgsha@bgsha.com

In the work of Z.N. Bichele, H.A. Moldau, Y.K. Ross (1980), the phenomenon of «maximizing» crop yields with a lack of soil moisture in the plant root system was described, which made it possible to phenomenologically explain the phenomenon of regulating the absorption of water and solar energy by plants. The purpose of the work is to determine the mechanisms for absorption of water and FAR by crops depending on the level of mineral nutrition. For this, an electro-diffusion-convective model was used, including three mechanisms for transferring soil solution to the «suction» zone (root hairs): transfer of soil solution under the influence of the electrostatic field of roots and soil, diffusion and convection. It has been established that the stress of the electrostatic field of the root-soil system, being a force, directs the flow of soil solution to the negatively charged surface of the roots of the «suction» zone. The availability of soil moisture to the root system of plants, the absorption of FAR, the diffusion flow of moisture increases with its lack and convective with moisture, transpiration and yield. Increase of intensity values at lack of moisture makes it possible to maintain multiplicity of yield increase equal at moisture availability. This is the essence of the phenomenon of «maximizing» yield with a lack of moisture in the root system of plants.

Keywords: electric field intensity of the root-soil system, surface density of roots and soil charges, transpiration, PAR, Debaevsky radius, DPS, electro-diffusion-convective model.

«Максимизация» урожайности растений, представленная З.Н. Бихеле, Х.А. Молдау, Ю.К. Росс [1], не получила теоретического обоснования, не были установлены механизмы, вызывающие регулирование поглощения воды и фотосинтетически активной радиации (ФАР). Поэтому при исследо-

вании механизмов «максимизации» урожайности сельскохозяйственных культур при недостатке влаги была использована электро-диффузионно-конвективная модель, которая описывает два потока раствора: горизонтальный, направленный к зоне «всасывания» (корневых волосков) и вертикальный

– вдоль стебля к листьям, обусловленный транспирацией [2, 3]. Модель имеет следующий вид:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + D \frac{\partial}{\partial x} \times \left(C \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) = \frac{\partial (vc)}{\partial y} \quad (1)$$

где: C – концентрация иона; D – коэффициент диффузии; t – время; x – ось координат, направленная перпендикулярно поверхности пор; y – ось координат, направленная вдоль движения раствора; v – скорость движения раствора; φ – безразмерный электростатический потенциал поверхности объекта [4, 5].

Основными механизмами модели служат поверхностная плотность зарядов (σ), напряженность электростатического поля объекта на уровне двойного электрического слоя ($DЭС, \text{э}^{-1}$), диффузия и конвекция. Поверхностная плотность определяется делением емкости катионного обмена на удельную поверхность объекта и выражается в $\text{Кл}/\text{м}^2$.

Напряженность электростатического поля корней и почвы определяется по формуле:

$$\varphi \text{э} = 1,8 \times 10^3 \sigma / T, \quad (2)$$

где: T – абсолютная температура объекта ($^{\circ}\text{К}$); величина $\varphi \text{э}$ выражается в $\text{В}/\text{м}$ или $\text{Дж}/\text{Кл м}$ [4, 5].

Диффузия и конвекция оценивается числом Pe (Пекле), которое определяли по корреляционной связи числа Pe и относительной транспирации ($\sum_v E_v / \sum_v E_0$).

Темп увеличения урожайности (λ) при повышении дозы $НРК$ определяется по формуле (3), полученной при решении модели для процесса формирования урожайности в течение вегетации:

$$U_i = U_k \exp(\lambda (\sum_v E_v)), \quad (3)$$

где: U_i и U_k – соответственно урожайность на вариантах опыта и в контроле [3].

Цель работы – определить механизмы поглощения воды и $ФАР$ сельскохозяйственными культурами в зависимости от уровня минерального питания.

Объекты и методы. Для проведения численных расчетов по формулам (1) – (3) были взяты данные урожайности разных культур двух опытов [6, 7]. Первый опыт был заложен на луговом участке центральной поймы реки Ипуть (Новозыбковский район, Брянская область). Почва аллювиальная луговая песчаная, pH_{KCl} 5,2-5,6, гидролитическая кислотность и сумма поглощенных оснований соответственно 2,6-2,5 и 11,3-13,1 мг-экв/100 г почвы, содержание гумуса 3,08-3,33% (по Тюрину), подвижных форм фосфора и калия соответственно 620-840 и 133-180 мг/кг (по Кирсанову).

Объектами исследования служили одновидовые посевы мятликовых трав: ежа сборная (сорт ВИК 61); овсяница луговая (сорт Дединовская) и двуколосный тростниковидный (сорт Припятский).

Опыт включал семь вариантов применения минерального удобрения – аммиачную селитру, простой гранулированный суперфосфат и хлористый калий вносили ежегодно. Урожайность воздушно-сухой массы травостоев устанавливали путем высушивания вегетативной массы с 1 м^2 . Раститель-

ные образцы отбирали с 1-10 июня (первый укос), с 23-30 августа (второй).

Второй полевой опыт проведен на опытном поле Новозыбковской сельскохозяйственной опытной станции филиала ФНЦ кормопроизводства и агроэкологии им. В.Р. Вильямса в 2011-2013 гг. Почва дерново-подзолистая песчаная, pH_{KCl} 5,7-5,9, сумма поглощенных оснований 7,2-9,3 мг-экв/100 г почвы, содержание гумуса 1,3-1,5% (по Тюрину), подвижных форм фосфора и калия соответственно 357-380 и 69-110 мг/кг (по Кирсанову).

Объектами исследования служили одновидовые посевы: овес посевной (сорт Скаун), суданская трава (сорт Кинельская 100), просо посевное (сорт Квартет), райграс однолетний (сорт Изорский) и бобовая культура – люпин желтый (сорт Престиж).

Опыт включал три варианта ежегодного применения хлористого калия.

Были рассчитаны следующие показатели процесса формирования урожайности культур на вариантах по сравнению с контролем: λ ; напряженность электростатического поля системы «корень – почва» (E_1, E_2), выраженные в разных единицах ($1/\text{м}$ и $\text{мВ}/\text{м}$), поверхностная плотность зарядов системы «корень – почва», равная разности поверхностной плотности зарядов корней и почвы ($\sigma_k - \sigma_n$), транспирацию за период вегетации рассчитывали по формуле Пенмана:

$$\sum_v E_v = 0,4 K_{\text{Фар}} \sum_v B / L, \quad (4)$$

где: $K_{\text{Фар}}$ – коэффициент использования фотосинтетически активной радиации; $\sum_v B$ – сумма суточных значений радиационного баланса за период вегетации, $\text{МДж}/\text{м}^2$; L – удельная теплота парообразования при температуре воздуха в период вегетации, $\text{Дж}/\text{кг}$ [8]. Темп увеличения урожайности по сравнению с контролем (λ) рассчитывали по формуле (3), число Pe находилось по зависимости значения Pe от относительной транспирации [9], значение E_1 рассчитывали по формуле (2).

Относительная транспирация $\sum_v E_v / \sum_v E_0$ служит количественным показателем доступности почвенной влаги корневой системе растений [10, 11].

Почвенно-гидрологическим константам: полной влагоемкости (ПВ), предельной полевой влагоемкости (ППВ), влажности разрыва капилляров (ВРК), равной влажности замедления роста растений, влажности завядания (ВЗ) соответствуют следующие приблизительные значения $\sum_v E_v / \sum_v E_0 \geq 1$: 0,85-0,70; 0,67-0,42; 0,42-0,30 [10-12], где $\sum_v E_0$ – испаряемость за период вегетации, которую рассчитывали по формуле М.И. Будыко [13].

Результаты. Наибольшие размеры восполнения весенне-летнего дефицита влаги осенне-зимними осадками наблюдали в годы, характеризующиеся промывным типом водного режима (2009, 2010, 2011 гг.). В годы, характеризующиеся периодически промывным типом водного режима поч-

наблюдали отсутствие восполнения весенне-летнего дефицита влаги осенне-зимними осадками (2006, 2007, 2013, 2014) [14].

Период вегетации от первого до второго укоса отличался повышением радиационного баланса, ФАР, температуры воздуха, испаряемости, но большей суммой осадков, меньшим дефицитом атмосферной влаги, более высоким значением КУ по сравнению с периодом от возобновления вегетации до первого укоса (табл. 1).

Показатели процесса формирования урожайности мятликовых трав в период от возобновления

вегетации до первого укоса представлены в таблице 2. На всех вариантах с внесением разных доз NPK рост и развитие культур проходили при достатке легкодоступной влаги, при полной влагоемкости почвы после весеннего паводка.

На вариантах трех видов трав с увеличением дозы NPK повышались значения напряженности электростатического поля системы «корень – почва». Чем выше доза минерального удобрения солевого типа, тем больше напряженность на границе ДЭС, формирующихся на стенках капилляров почвы и поверхности корней растений.

1. Фитоклиматические показатели весенне-летней вегетации посевов сеяных мятликовых трав по укосам и годам наблюдения (данные метеостанции Красная Гора)

Показатель	2009 г.		2010 г.		2011 г.		Среднее	
	*1	2	1	2	1	2	1	2
Сумма среднесуточных значений радиационного баланса, МДж/м ²	394	569	439	688	432	485	422	580
Сумма среднесуточных значений ФАР, МДж/м ²	266	460	268	426	256	336	263	407
Температура воздуха, °С	13,9	19,4	16,2	25,0	16,3	21,1	15,5	21,8
Удельная теплота парообразования, МДж/кг	2,47	2,46	2,47	2,45	2,47	2,45	2,47	2,45
Испаряемость, мм	160	231	178	281	175	198	171	237
Сумма осадков, мм	75,8	155,3	86,7	200,7	84,1	169,1	82,2	175
Дефицит влаги, мм	-84	-76	-91	-80	-91	-29	-89	-62
Коэффициент увлажнения, КУ	0,47	0,67	0,49	0,71	0,48	0,85	0,48	0,74

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

2. Показатели формирования урожайности посевов мятликовых трав в период вегетации до 1-го укоса (среднее за 2009-2011 гг.) [6, 16]

Вариант	K/N	*У, т/га	$\sum_n E_{tr}$, мм	$\sum_n E_t / \sum_n E_0$	Re	λ , 1/м	E ₁ , 1/м	E ₂ , мВ/м	$\sigma_k - \sigma_n$, Кл/м ²
Ежа сборная									
Контроль	–	1,77	87	0,51	0,86	–	–	–	–
N ₄₅ P ₆₀ K ₄₅	1,00	6,90	342	2,0	0,46	3,98	8,65	215	1,39
N ₄₅ P ₆₀ K ₆₀	1,33	7,11	353	2,06	0,44	3,94	8,95	223	1,43
N ₄₅ P ₆₀ K ₇₅	1,67	7,32	363	2,12	0,42	3,91	9,31	232	1,49
N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	1,00	7,49	371	2,17	0,41	3,89	9,49	236	1,52
N ₆₀ P ₆₀ K ₇₅	1,25	7,40	383	2,24	0,39	3,36	8,61	214	1,38
N ₆₀ P ₆₀ K ₉₀	1,50	8,06	400	2,34	0,36	3,79	10,53	262	1,69
Овсяница луговая									
Контроль	–	1,80	89	0,52	0,83	–	–	–	–
N ₄₅ P ₆₀ K ₄₅	1,00	7,22	359	2,10	0,39	3,87	9,92	247	1,50
N ₄₅ P ₆₀ K ₆₀	1,33	7,15	353	2,06	0,41	3,91	9,54	237	1,53
N ₄₅ P ₆₀ K ₇₅	1,67	7,81	388	2,27	0,34	3,79	11,15	277	1,79
N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	1,00	7,72	390	2,28	0,34	3,73	10,97	273	1,76
N ₆₀ P ₆₀ K ₇₅	1,25	8,02	396	2,32	0,33	3,78	11,45	285	1,83
N ₆₀ P ₆₀ K ₉₀	1,50	8,25	409	2,39	0,31	3,72	12,00	298	1,92
Двукосточник тростниковидный									
Контроль	–	1,86	92	0,54	0,84	–	–	–	–
N ₄₅ P ₆₀ K ₄₅	1,00	7,49	372	2,17	0,43	3,75	8,72	217	1,40
N ₄₅ P ₆₀ K ₆₀	1,33	7,64	379	2,22	0,42	3,79	8,88	221	1,42
N ₄₅ P ₆₀ K ₇₅	1,67	7,92	393	2,30	0,40	3,69	9,22	229	1,48
N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	1,00	7,81	387	2,26	0,30	3,71	12,37	308	1,98
N ₆₀ P ₆₀ K ₇₅	1,25	8,19	405	2,37	0,37	3,66	9,89	246	1,58
N ₆₀ P ₆₀ K ₉₀	1,50	8,60	425	2,48	0,36	3,60	10,0	249	1,60

Примечание: У – урожайность, т/га; $\sum_n E_{tr}$ – транспирация за период вегетации; $\sum_n E_t / \sum_n E_0$ – относительная транспирация; Re – число Пекле; λ – темп роста урожайности; E₁, E₂ – напряженность электростатического поля системы корень-почва, соответственно в 1/м и мВ/м; $\sigma_k - \sigma_n$ – поверхностная плотность зарядов корней (σ_k) и почвы (σ_n). Данные урожайности взяты из работы [6], остальные получены путем расчета.

Согласно формуле (2) уменьшение значения α^{-1} или увеличение Дебаевского радиуса (α) приводит к увеличению значений E .

Напряженность электростатического поля системы «корень – почва», выступая силой (В/м, Дж/Кл м), направляет поток воды к отрицательно заряженной поверхности корневых волосков зоны «всасывания». Повышается доля конвекции в общем потоке влаги (уменьшаются значения Pe), увеличивается доступность почвенной влаги корневой системе растений ($\sum_{\nu} E_{\nu} T / \sum_{\nu} E_{\nu} E_0$), поглощение солнечной энергии и транспирация ($\sum_{\nu} E_{\nu} T$) [15].

Зависимость $K_{\text{фар}}$ от относительной транспирации озимой ржи в годы с промывным и периодически промывным режимом на разных вариантах применения минерального удобрения представлена в работе [14]. Линейная прямопропорциональная зависимость значений $\sum_{\nu} E_{\nu} T$ и $\sum_{\nu} E_{\nu} T / \sum_{\nu} E_{\nu} E_0$ от напряженности электростатических полей системы корень-почва (E_1, E_2) и значений $K_{\text{фар}}$ от $\sum_{\nu} E_{\nu} T / \sum_{\nu} E_{\nu} E_0$ экспериментально доказывает, что основной причиной поглощения влаги и солнечной энергии растениями согласно формуле (2) служит поверхностная плотность зарядов системы «корень – почва» ($\sigma_k - \sigma_n$).

Ежа сборная, овсяница луговая, двукосточник тростниковидный имеют следующие значения плотности зарядов на корневой поверхности (σ_k): 2,46; 2,63 и 2,34 Кл/м². Поверхностная плотность зарядов аллювиальной луговой почвы составляет

0,96 Кл/м². Отсюда, значение ($\sigma_k - \sigma_n$) составило соответственно 1,5, 1,67 и 1,38 Кл/м² [9].

В полевых опытах при достатке почвенной влаги корневой системе растений и внесении разных доз NPK эти культуры имели следующие значения ($\sigma_k - \sigma_n$) соответственно: 1,48; 1,72 и 1,58. Небольшие различия в поверхностной плотности зарядов трех видов трав обусловили приблизительно равные показатели процесса формирования урожайности культур.

Средние показатели из шести вариантов имеют следующие значения Pe (0,41, 0,35 и 0,38); относительная транспирация (2,1, 2,2 и 2,3); транспирация (369, 383 и 393 мм); урожайность (7,38, 7,70 и 7,94 т/га) для культур соответственно ежа сборная, овсяница луговая, двукосточник тростниковидный.

В период от первого до второго укоса рост и развитие посевов трав проходили, за исключением вариантов с внесением доз NK, равных 135 и 150 кг д.в. на га, при влажности почвы, равной влажности замедления роста растений (ВРК).

Данные таблицы 3 показывают, что на всех вариантах с внесением разных доз NPK и видов трав наблюдается более высокая напряженность электростатического поля системы корень-почва (E_1, E_2) и $\sigma = \sigma_k - \sigma_n$ по сравнению с периодом от возобновления вегетации до первого укоса, обусловленная уменьшением ДЭС не только внесением минеральных удобрений, но и снижением водных слоев

3. Показатели процесса формирования урожайности посевов мятликовых трав в период вегетации от 1-го до 2-го укоса (среднее за 2009-2011 гг.) [6, 7]

Вариант	K / N	*У, т/га	$\sum_{\nu} E_{\nu} T, \text{мм}$	$\sum_{\nu} E_{\nu} T / \sum_{\nu} E_{\nu} E_0$	Pe	$\lambda, \text{1/м}$	$E_1, \text{1/м}$	$E_2, \text{мВ/м}$	$\sigma_k - \sigma_n, \text{Кл/м}^2$
Ежа сборная									
Контроль	–	0,80	43	0,18	0,95	–	–	–	–
N ₄₅ K ₄₅	1,00	2,93	106	0,45	0,88	11,09	12,60	320	2,06
N ₄₅ K ₆₀	1,33	3,09	143	0,60	0,84	8,62	10,26	261	1,68
N ₄₅ K ₇₅	1,67	3,20	150	0,63	0,83	8,46	10,19	269	1,67
N ₆₀ K ₆₀	1,00	3,29	154	0,65	0,82	8,42	10,27	261	1,68
N ₆₀ K ₇₅	1,25	3,51	163	0,70	0,81	8,25	10,18	259	1,67
N ₆₀ K ₉₀	1,50	3,61	169	0,71	0,81	8,22	10,15	258	1,66
Овсяница луговая									
Контроль	–	0,93	44	0,19	0,95	–	–	–	–
N ₄₅ K ₄₅	1,00	2,95	137	0,58	0,83	8,42	10,14	258	1,66
N ₄₅ K ₆₀	1,33	3,08	144	0,61	0,82	8,31	10,14	258	1,66
N ₄₅ K ₇₅	1,67	3,23	152	0,64	0,82	8,16	9,98	254	1,63
N ₆₀ K ₆₀	1,00	3,39	158	0,67	0,80	8,18	10,09	256	1,65
N ₆₀ K ₇₅	1,25	3,58	165	0,70	0,80	7,83	9,70	249	1,60
N ₆₀ K ₉₀	1,50	3,68	172	0,73	0,79	8,00	10,13	257	1,66
Двукосточник тростниковидный									
Контроль	–	0,99	47	0,20	0,92	–	–	–	–
N ₄₅ K ₄₅	1,00	3,12	146	0,63	0,82	8,52	10,39	264	1,70
N ₄₅ K ₆₀	1,33	3,25	152	0,64	0,81	7,83	9,66	245	1,58
N ₄₅ K ₇₅	1,67	3,33	156	0,66	0,81	7,77	9,59	244	1,57
N ₆₀ K ₆₀	1,00	3,53	161	0,68	0,80	7,90	9,88	251	1,62
N ₆₀ K ₇₅	1,25	3,66	171	0,72	0,79	7,65	9,68	246	1,58
N ₆₀ K ₉₀	1,50	4,29	201	0,85	0,76	7,29	9,59	244	1,57

* также как в таблице 2.

4. Показатели процесса формирования урожайности разных видов культур при отсутствии (2011 г.) и наличии почвенной засухи (2013 г.)

Культура	Вариант	*У, т/га	$\Sigma_{в}E_{г}$, мм	$\Sigma_{в}E_{т} / \Sigma_{в}E_{0}$	Рс	λ , 1/м	E_1 , 1/м	E_2 , мВ/м	$\sigma_k - \sigma_n$, Кл/м ²
2011 г. КУ = 0,67, $\Sigma_{в}H - \Sigma_{в}E_0 = -78$ мм									
2013 г. КУ = 0,34, $\Sigma_{в}H - \Sigma_{в}E_0 = -200$ мм									
Люпин желтый	Контроль	15,3	—	—	—	—	—	—	—
		27,3	—	—	—	—	—	—	—
	K ₁₈₀	18,7	170	0,71	0,86	1,17	1,36	343	0,22
		28,6	256	0,87	0,83	0,19	0,23	58	0,04
	K ₂₁₀	193	173	0,72	0,86	1,36	1,62	408	0,26
		29,1	259	0,88	0,82	0,26	0,32	81	0,05
Овес посевной	Контроль	6,3	—	—	—	—	—	—	—
		8,3	—	—	—	—	—	—	—
	K ₁₈₀	15,6	182	0,76	0,85	4,99	5,87	1480	0,95
		8,9	100	0,34	0,92	0,68	0,74	188	0,12
	K ₂₁₀	16,8	199	0,83	0,84	4,93	5,87	1480	0,95
		9,3	106	0,36	0,93	1,07	1,15	292	0,19
Райграс однолетний	Контроль	8,3	—	—	—	—	—	—	—
		3,3	—	—	—	—	—	—	—
	K ₁₈₀	10,4	125	0,52	0,90	1,78	1,98	500	0,32
		3,6	41	0,14	0,93	2,10	2,26	574	0,37
	K ₂₁₀	11,2	139	0,58	0,88	2,16	2,45	617	0,40
		3,9	47	0,16	0,87	3,52	3,63	922	0,59
Суданская трава	Контроль	18,0	—	—	—	—	—	—	—
		13,9	—	—	—	—	—	—	—
	K ₁₈₀	18,7	221	0,92	0,82	0,18	0,22	55,5	0,04
		14,4	165	0,56	0,89	0,24	0,27	68,6	0,04
	K ₂₁₀	19,3	226	0,94	0,81	0,30	0,36	90,7	0,06
		14,9	168	0,57	0,88	0,40	0,45	114	0,07
Просо посевное	Контроль	16,2	—	—	—	—	—	—	—
		14,6	—	—	—	—	—	—	—
	K ₁₈₀	17,1	158	0,66	0,87	0,37	0,42	10,6	0,07
		15,1	135	0,46	0,91	0,22	0,24	61	0,04
	K ₂₁₀	18,0	211	0,88	0,86	0,49	0,57	14,4	0,09
		15,8	141	0,48	0,90	0,55	0,61	155	0,10

* также как в таблице 2, урожайность из работы [7], остальные получены путем расчета.

вокруг корней и поверхности капилляров почвы. Уменьшается темп роста урожайности уменьшается поглощение воды и солнечной энергии, а также имеет место равенство кратностей урожайности (U_k / U_0) на вариантах с внесением NPK и контролем при возделывании мятликовых трав при влажности почвы равной ВРК. Это равенство служит подтверждением реальности «максимизации» урожайности при недостатке влаги по данным [7].

В таблице 4 приведены показатели процесса формирования урожайности разных видов культур при отсутствии и наличии почвенной и атмосферной засух.

В период вегетации в 2011 г. доступность почвенной влаги корневой системе всех культур соответствовала ППВ, кроме райграса однолетнего, посевы которого развивались при недостатке влаги и влажности почвы, равной ВРК. Все культуры увеличивали значения E_1 , E_2 , ($\sigma_k - \sigma_n$) с повышением дозы калийного удобрения, что сопровождалось

повышением поглощения воды, солнечной энергии, урожайности по сравнению с контролем.

Исследованиями, проведенными в Брянской области [16, 17], установлено, что основным условием повышения средней урожайности сельскохозяйственных культур было внесение азотных удобрений, однако при низком содержании обменного калия в почве применение калийных и фосфорно-калийных удобрений также способствовало увеличению получения продукции растениеводства [18-20].

В период вегетации в 2013 г. посевы овса посевного и райграса однолетнего развивались в условиях почвенной и атмосферной засух, остальные культуры только при атмосферной засухе. Даже при наличии почвенной и атмосферной засух посевы овса посевного и райграса однолетнего, а остальные культуры при наличии атмосферной засухи с увеличением дозы калийного удобрения повышали значения E_1 , E_2 , ($\sigma_k - \sigma_n$), λ , $\Sigma_{в}E_{т}$, $\Sigma_{в}E_{т} / \Sigma_{в}E_{0}$, урожайность на вариантах U_i по сравнению с контролем U_k (табл. 5).

5. Кратность повышения урожайности культур в зависимости от дозы калийного удобрения и атмосферной засухи, а также почвенной и атмосферной засухи

Культура	2011 г.			2013 г.		
	вид засухи	K ₁₈₀	K ₂₁₀	вид засухи	K ₁₈₀	K ₂₁₀
Овес посевной	атмосферная	2,5	2,7	почвенная + атмосферная	1,1	1,1
Райграс однолетний	атмосферная	1,2	1,9	почвенная + атмосферная	1,1	1,2
Люпин желтый	атмосферная	1,2	1,3	атмосферная	1,0	1,1
Суданская трава	атмосферная	1,0	1,1	атмосферная	1,0	1,0
Просо посевное	атмосферная	1,1	1,1	атмосферная	1,0	1,1

Засухоустойчивые культуры, выращиваемые при достатке и недостатке почвенной влаги, характеризовались приблизительно равными значениями $\sum_{v} U_i / \sum_{v} U_0$. Увеличение дозы калийного удобрения независимо от достатка почвенной влаги корневой системе растений вызывало повышение значения $\sum_{v} U_i / \sum_{v} U_0$.

Таким образом, показана связь между дозой минерального удобрения, влажностью почвы и напряженностью электростатического поля системы «корень – почва», обусловленная протяженностью ДЭС вокруг поверхностей корней и почвы. В интервале влажности почвы от ПВ до ВЗ напряженность электростатического поля системы корень-почва повышается с увеличением дозы минерального удобрения. Теоретиче-

ски доказано и экспериментально обосновано, что напряженность электростатического поля системы «корень – почва», выступающая силой (В/м, Дж/Кл м), направляет поток воды к поверхности корней, увеличивает поглощение воды, солнечной энергии, урожайности культур. Дано теоретическое обоснование явлению «максимизации» урожайности растений при недостатке влаги, которое заключается в увеличении напряженности электростатического поля системы «корень – почва» при наличии в почве минеральных удобрений солевого типа. При возделывании многолетних трав в засушливые годы данная работа может найти практическое применение.

Литература

1. Бихеле З.Н., Молдау Х.А., Росс Ю.К. Математическое моделирование транспирации и фотосинтеза растений при недостатке почвенной влаги. – Л.: Гидрометеоиздат, 1980. – 223 с.
2. Пакшина С.М., Петухов В.Р. Влияние двойных электрических слоев поверхности корня и почвенных частиц на доступность питательных элементов растениями // *Агрохимия*, 1976, № 5. – С. 97-102.
3. Пакшина С.М. Исследование закономерности вертикального распределения солей по профилю почвы и ее частичных случаев // *Почвоведение*, 1989, № 2. – С. 86-93.
4. Воюцкий С.С. Курс коллоидной химии. – М.: Химия, 1976. – 512 с.
5. Астахов А.В., Широков Ю.М. Курс физики, том 2. Электромагнитное поле. – М.: Наука, 1980. – 360 с.
6. Харкевич Л.П., Силаев А.Л., Анишина Ю.А., Прицеп Д.Н. Обработка почвы и удобрение многолетних трав в условиях радиоактивного загрязнения // *Агрохимический вестник*, 2012, № 5. – С. 25-27.
7. Шаповалов В.Ф., Белоус Н.М., Белоус И.Н., Иванов Ю.И. Продуктивность и качество одновидовых и смешанных посевов кормовых культур в условиях радиоактивного загрязнения // *Агрохимический вестник*, 2015, № 5. – С. 29-31.
8. Пенман Х. Круговорот воды. Биосфера. – М.: Мир, 1972. – С. 60-72.
9. Пакшина С.М., Белоус Н.М., Чесалин С.Ф., Смольский Е.В. К теории биологического выноса элементов питания из почвы посевами мятликовых трав при внесении минерального удобрения // *Пермский аграрный вестник*, 2020, № 3(31). – С. 52-65.
10. Побережский Л.Н. Водный баланс зоны аэрации в условиях орошения. – Л.: Гидрометеоиздат, 1977. – 159 с.
11. Мушкин И.Г., Гафуров В.К. Тепловой и водный баланс хлопкового поля. – Л.: Гидрометеоиздат, 1973. – 117 с.
12. Пакшина С.М., Кольхалина А.Е. Исследования влияния питательного и водного режимов серой лесной почвы на поглощение фотосинтетически активной радиации зерновыми культурами в период вегетации // *Проблемы агрохимии и экологии*, 2014, № 4. – С. 17-22.
13. Будыко М.И. Тепловой баланс земной поверхности. – Л.: Гидрометеоиздат, 1956. – 255 с.
14. Пакшина С.М., Малявко Г.П., Белоус И.Н., Кольхалина А.Е. Теоретические и практические аспекты возделывания озимой ржи в Брянской области. – Брянск: Изд-во Брянского ГАУ, 2017. – 97 с.
15. Пакшина С.М., Белоус Н.М. Биовынос цезия-137 из почвы продукцией растениеводства. – Брянск: Изд-во Брянского ГАУ, 2019. – 125 с.
16. Смольский Е.В., Белоус Н.М., Шаповалов В.Ф., Харкевич Л.П., Чесалин С.Ф., Сердюкова К.А. Применение минеральных удобрений в условиях радиоактивно загрязненного пойменного луга // *Агрохимия*, 2018, № 1. – С. 87-96.
17. Белоус Н.М., Шаповалов В.Ф., Симоненко Н.К., Смольский Е.В. Влияние удобрений на продуктивность и накопление радионуклидов при возделывании мятликовых трав в одновидовых посевах // *Агрохимический вестник*, 2012, № 5. – С. 22-24.
18. Шаповалов В.Ф., Харкевич Л.П., Малявко Г.П., Белоус И.Н., Никифоров М.И. Полевое кормопроизводство в условиях радиоактивного загрязнения территории // *Земледелие*, 2016, № 3. – С. 40-43.
19. Белоус Н.М., Смольский Е.В., Чесалин С.Ф., Шаповалов В.Ф. Роль минерального калия в снижении поступления ¹³⁷Cs в кормовые травы и повышении их урожайности на радиоактивно загрязненных угодьях // *Сельскохозяйственная биология*, 2016, том 51, № 4. – С. 543-552.
20. Чесалин С.Ф., Смольский Е.В., Харкевич Л.П. Калийные удобрения в продуктивности кормовых культур в условиях радиоактивного загрязнения территории // *Аграрная наука*, 2020, № 11-12. – С. 108-111.