

УДК 626.80:626.81/84

Доктор техн. наук
Доктор техн. наук
Канд. экон. наук

Ж.С. Мустафаев *
А.Т. Козыкеева *
К.Ж. Мустафаев *
К.Б. Абдешев *

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ВЫРАЖЕНИЕ ПРОДУКТИВНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР НА ЗАСОЛЕННЫХ ОРОШАЕМЫХ ЗЕМЛЯХ

*ПОЧВА, КУЛЬТУРА, МИНЕРАЛИЗАЦИЯ, ТОКСИЧНОСТЬ,
УРАВНЕНИЕ, КРИТЕРИЙ, ВОДА, ОЦЕНКА, РЕЖИМ, ОПТИМУМ,
КРИВАЯ, ЗАКОН*

На основе систематизации и интерпретации результатов исследования водного режима на продуктивность сельскохозяйственных культур и степень засоления орошаемых земель, получена модель управления гидрохимическими процессами агроландшафтных систем.

Введение. С начала зарождения земледелия и до наших дней неоспоримым является желание людей получить максимальный урожай с одного и того же участка при имеющихся в распоряжении средствах возделывания сельскохозяйственных культур. С появлением средств автоматизации и механизации сельскохозяйственных работ их эффективность значительно возросла, но цель осталась прежней. Для правильного понимания целей и задач мелиорации сельскохозяйственных земель надо точно определить систему ценностей и обозначить объект воздействия. Такими ценностями в настоящее время и в будущем являются человек и среда его обитания, а объект воздействия – почва, как основная составная часть биосферы ландшафта в целом и как основное средство и предмет в сельскохозяйственном производстве [16].

Таким образом, основная цель мелиорации сельскохозяйственных земель – качественное улучшение и расширение воспроизводства почвенного плодородия, получение урожая сельскохозяйственных культур при наименьших отрицательных воздействиях на окружающую среду. При этом сущность

* Таразский ГУ им. М.Х. Дулати, г. Тараз

мелиорации сельскохозяйственных земель заключается в качественном целенаправленном изменении и управлении почвенными, гидрогеологическими, геохимическими и биохимическими процессами, что может быть обеспечено за счет регулирования потоков вещества и энергии.

Цель и методика исследований. С точки зрения современных представлений факторной экологии суть закона лимитирующего фактора состоит в том, что далее единственный фактор за пределами зоны своего оптимума приводит к стрессовому состоянию организма и к его гибели. Этот фактор называют лимитирующим.

Наблюдения показали, что закон лимитирующих факторов относится как к биотическим, так и абиотическим факторам, и применим к растениям, животным и человеку. Согласно этому закону стресс и гибель растений, животных и человека, могут быть вызваны как чрезмерными техногенными нагрузками, так и недостаточным уровнем использования природных ресурсов для компенсации их потребности. Закон ограничивающего (лимитирующего) фактора или закон минимума Либиха – один из фундаментальных законов в экологии, гласящий, что наиболее значим для организма тот фактор, который более всего отклоняется от оптимального его значения [20]. Поэтому во время прогнозирования экологических условий или выполнения экспертиз очень важно определить слабое звено в жизни организмов и общества.

Результаты исследований. Научной основой оценки предельно-допустимого уровня использования природных ресурсов может стать закон лимитирующего фактора, так как он является по сути дела законом продуктивности растений (рис. 1). При этом закон лимитирующего фактора может быть выражен следующей математической зависимостью [20]:

$$Y_{\phi} = Y_n \cdot K_{\text{lim}}; \quad 0 \leq K_{\text{lim}} \leq 1,0, \quad (1)$$

где Y_{ϕ} – продуктивность посевов при возделывании сельскохозяйственных культур в условиях, отличающихся от оптимальных; Y_n – потенциальная продуктивность; K_{lim} – коэффициент, понижающий потенциальную продуктивность на величину, зависящую от степени отклонения лимитирующего фактора от оптимума.

Уравнение (1) адекватно словесному определению, но воспользоваться им нельзя, так как оно является «черным ящиком», в нем неизвестна ни потенциальная продуктивность, ни оптимальные параметры факторов жизни, при которых она может быть получена, ни функциональная

связь урожая с количеством лимитирующего фактора, хотя попытки установить их предпринимались многими исследователями.



Рис. 1. Диапазон действия влажности почвы (от НВ) на продуктивность многолетних трав.

Поэтому цель управления водно-солевым режимом почв на орошаемых территориях заключается в сохранении и дальнейшем повышении уровня их естественного плодородия, т.е. оптимальное управление процессами переноса солей и влаги в почвогрунтах, которые обеспечат получение такого уровня плодородия почв, при котором урожаи выращиваемых на этих почвах сельскохозяйственных культур V_{\max} достигнут предельно-допустимого (возможного) значения.

Критерий оптимальности при этом определяется с помощью некоторой числовой функции $M \rightarrow \Phi(M) \geq 0$ в области определений по закону $V(u) = \Phi[(M)(u)]$, т.е. требуется найти оптимальное управление $u \in u_g$ (u элемент множества u_g), при котором выполняется условие $V(u) = \max$ и $Q(u) = \max$ (где $Q(u) = \max$ – затраты энергии на почвообразование) [10].

В настоящее время трудность решения данной задачи заключается в отсутствии данных зависимости культуры от состояния $\beta(x,t)$, $c(x,t)$, $n(x,t)$, $m(x,t)$ и $s(x,t)$, т.е. водного, светового, пищевого, теплового и солевого режимов почвы, управляемых почвенно-гидрогеологическими процессами. Следовательно, для оценки урожайности сельскохозяйственных культур с заданными генетическими качествами сводится к необходимости решения уравнения вида [17]:

$$Y = f(c, \beta, m, n, s), \quad (2)$$

где c – светообеспеченность; β – влагообеспеченность; t – теплообеспеченность; n – пищеобеспеченность; z – газообеспеченность.

В полевых условиях имитирование перечисленных факторов осуществлялось на основе планируемых опытно-производственных исследований с применением различных агротехнических приемов и промывки.

Характерная биологическая кривая (рис. 2) общего урожая в зависимости от предполивной влажности почвы $\beta = W_i / W_{не}$ (где W_i – предполивная влажность расчетного слоя почвы; $W_{не}$ – влажность расчетного слоя, соответствующая наименьшей влагоемкости) в общем виде показывает значение нижнего порога увлажнения почвы, соответствующего максимально возможной урожайности (Y_{max}) для данных условий и оптимальной урожайности (Y_{opt}), когда затрачивается наименьшее количество воды на единицу урожая ($K_e = E / Y$, где E – суммарное водопотребление) [6].

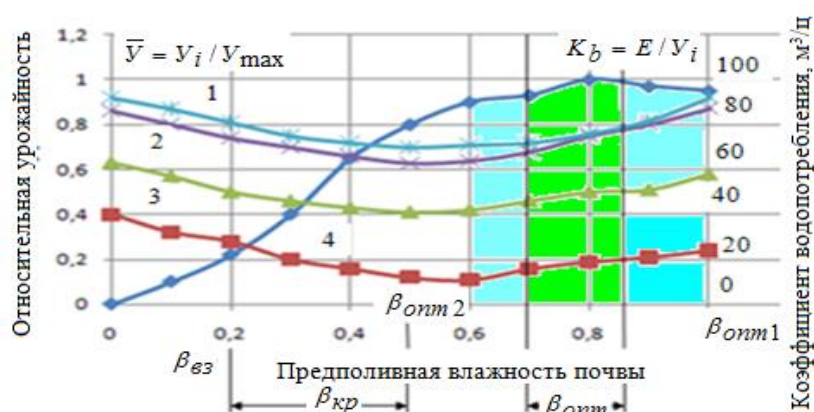


Рис. 2. Зависимость относительного урожая и коэффициента водопотребления сельскохозяйственных культур от предполивной влажности почвы (1 – сахарная свекла, 2 – люцерна, 3 – кукуруза, 4 – озимая пшеница).

Митчерлих Э.А. зависимость урожайности сельскохозяйственных культур от влажности корнеобитаемой зоны почв при постоянстве других факторов выражает формулой [6]:

$$\frac{d\theta}{d(\lambda_{i=1}^k + \eta_i)} = C_\lambda (\theta_o - \theta), \quad (3)$$

где θ_o – оптимальное максимальное значение урожая, т/га; θ – величина фактического урожая, т/га; $\lambda_{i=1}^k$ – величина влажности почвы до проведения управляющих воздействий (i -го полива); η_i – количество воды, до-

полнительно внесенной в почву; $d\theta$ – прирост урожая; $d(\lambda_{i=1}^k = \eta_i)$ – изменение влажности почвы; C_λ – коэффициент, определяющий действие влажности на рост растений.

Решая уравнение Э.А. Митчерлиха, получаем зависимость следующего вида:

$$\theta = \theta_o \left(1 - e^{-C_\lambda (\lambda_{i=1}^k + \eta_i)} \right). \quad (4)$$

Изменение урожая под воздействием факторов внешней среды dy/dx пропорционально степени оптимальности x_{opt} и отклонения от оптимального значения $(x_{opt} - x_i)$ соответствует закону Э.А. Митчерлиха, т.е.:

$$dy/dx = C_i (x_{opt} - x_i), \quad (5)$$

где C_i – постоянная для этого фактора; x_{opt} – оптимальное значение фактора.

Для оценки влияния водного режима на величину урожая уравнения $dy/dx = C_i (x_{opt} - x_i)$ решается при следующих ограничениях [14]:

$$\begin{aligned} x_i &= W_i - W_{\epsilon 3}, & Y_i &= 0; \\ x_i &= W_i - W_{opt}, & Y_i &= Y_{max} = Y_{opt}. \end{aligned}$$

После некоторых преобразований получим:

$$Y_i = Y_{max} \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{W_i - W_{\epsilon 3}}{W_{opt} - W_{\epsilon 3}} \right) \right]^2 \right\}, \quad (6)$$

где Y_{max} – максимальный урожай при существующих значениях факторов; W_i – действительное значение влагозапасов за период вегетации; $W_{\epsilon 3}$ – минимальный влагозапас, ограничивающий жизнедеятельность растений (влажность завядания).

Предположим, что $(W_i - W_{\epsilon 3}) / (W_{opt} - W_{\epsilon 3}) = E_i / E_{opt}$, тогда зависимость урожая от суммарного водопотребления будет следующей:

$$Y_i = Y_{max} \left\{ 1 - \left[1 - (E_i / E_{opt}) \right]^2 \right\}, \quad (7)$$

где E_i – фактическое суммарное водопотребление сельскохозяйственных культур; E_{opt} – оптимальное суммарное водопотребление сельскохозяйственных культур.

Еще в древности, в районах традиционного орошаемого земледелия, было замечено, что наличие солей в почвах отрицательно влияет на урожайность сельскохозяйственных культур, поэтому стремились сделать

содержание солей в почвах как можно меньше. По мере накопления знаний, появились понятия допустимости содержания определенного количества солей, пороги токсичности. Затем допустимое количество солей стало дифференцироваться в зависимости от типа солей, почв, вида сельскохозяйственных культур.

В настоящее время существуют многочисленные, иногда весьма сложные классификации допустимого количества солей в почвах для различных видов сельскохозяйственных культур, на различных почвах, при различных типах засолениях (табл. 1) [5].

Таблица 1

Классификация почвы по степени засоления в зависимости от содержания плотного остатка (по Н.И. Базилович, Е.И. Панковой)

Степень засоления почвы	Содержание солей			Состояние растений, характеризующее среднюю солеустойчивость, (Y_i/Y_{max})
	сухой остаток (γ_i) , %	S_{max} , т/га	почвенный раствор (C_p^n) , г/дм ³	
Незасоленные	< 0,30	35,0	11,2	1,00
Слабозасоленные	0,30...0,50	70,0	22,4	0,80
Среднезасоленные	0,50...1,00	140,0	44,8	0,75
Сильнозасоленные	1,00...2,00	280,0	89,6	0,25
Солончаки	> 2,00	> 280,0	> 89,6	0,00

Содержание солей в почвенном слое определяется по формуле: $S = 100 \cdot H \cdot d \cdot \gamma$, где H – мощность расчетного слоя, м; d – объемная плотность почвы, т/м³; γ – содержание солей в почве, в % от веса сухой почвы.

Количественное значение раствора на засоленных почвах можно определить по формуле: $C_p^n = S / (100 \cdot H \cdot d \cdot \beta_{нв})$, где $\beta_{нв}$ – влажность почвы, соответствующая наименьшей влагоемкости в % от массы сухой почвы.

Обобщение материалов о влиянии засоления почв на урожайность сельскохозяйственных культур показало, что это влияние имеет следующую классификацию: I – чем меньше солей в почвах, тем выше урожайность; II – увеличение количества солей до определенного предела (порога токсичности) существенно не влияет на урожайность культур, но при засолении сверх порога токсичности урожайность снижается; III – существует оптимальное количество солей в почвах, при котором развитие растений и их урожайность является наибольшими. При уменьшении или

увеличении содержания солей в почвах по сравнению с оптимальным уровнем урожайность снижается.

Как известно, почвогрунты Средней Азии и Казахстана преимущественно имеют сульфатный и хлоридно-сульфатный составы солей, и наиболее характерными для них являются I и II классификация.

На определенных почвах зависимость урожайности от содержания солей одинакова для всех культур (однотипны). Однако будучи однотипными для заданных почв кривые индивидуальны для отдельных культур, а также могут отличаться в зависимости от водно-физических и агрохимических свойств почв. Так, внесение удобрений и повышение уровня агротехники обычно приводят к тому, что указанные кривые на графике располагаются правее и выше, т.е. сдвигаются в сторону большей солеустойчивости и большей урожайности (обозначенные цифрами на рис. 3).

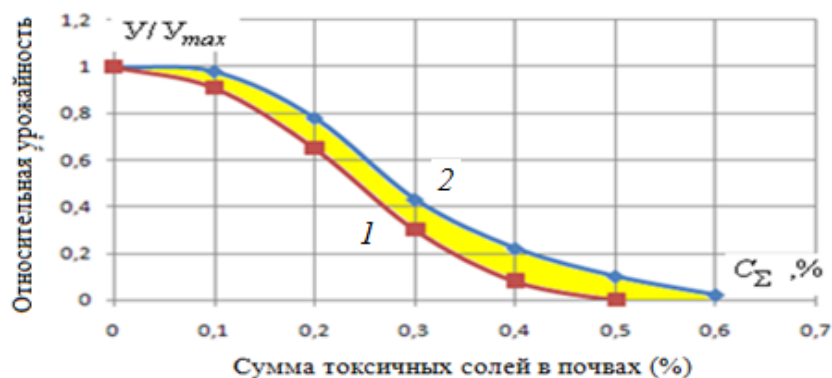


Рис. 3. Изменение относительной урожайности от содержания сумм токсичных солей в почвах $\bar{Y} = Y_i / Y_{\max} = C / C_{\Sigma}$ для различных сельскохозяйственных культур.

Приведенные на рис. 3 кривые указывают на принципиальный характер взаимосвязи продуктивности растений с качеством и количеством солей в почвах. В течение вегетации сельскохозяйственных культур эти зависимости, сохраняясь в принципе, значительно изменяются в своих абсолютных значениях.

Урожайность зависит от содержания токсичных солей (прежде всего, анионов Cl , SO_4 , HCO_3), растворенных в почвенном растворе, а также от катионов состава почвенного поглощающего комплекса (в основном от содержания Na , Ca , Mg) и величины pH почвенного раствора.

Характерная зависимость относительной урожайности различных сельскохозяйственных культур от содержания суммы токсичных солей C_{Σ} в почве показана на рис. 4 [1].

Изменение катионного состава почвенного поглощающего комплекса (особенно за счет внедрения катионов Na) снижает подвижность фосфора (при возрастании содержания Na до 10 %, подвижность фосфора снижается в 4 раза) и доступность растениям питательных веществ. В результате уменьшается урожайность, что иллюстрируется рис. 4, где показано изменение относительной урожайности $\bar{Y}_i = Y_i / Y_{max}$ при различных дозах ежегодно вносимых удобрений NPK от величины $SAR = 1,41 / \sqrt{Ca + Mg}$.

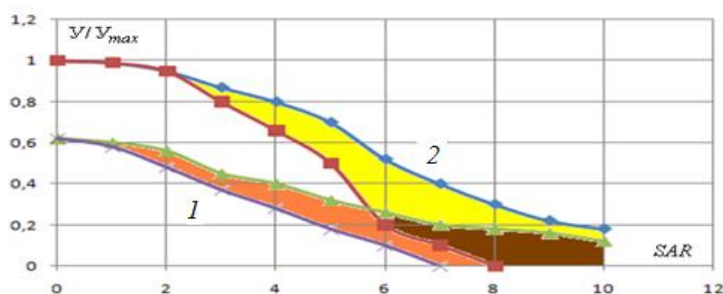


Рис. 4. Изменение относительной урожайности для различных культур в зависимости от катионного состава ППК-SAR и доз вносимых удобрений (1 – одиночная доза PK – 320 кг/га в год; 2 – двойная доза PK – 640 кг/га в год) [1].

По убыванию чувствительности к C_{Σ} и $SAR = 1,41 / \sqrt{Ca + Mg}$ сельскохозяйственные растения распределяются примерно в такой ряд: кукуруза, хлопчатник, пшеница, люцерна.

На основе обобщения материалов установлено, что существует достаточно много экспериментальных зависимостей урожайности сельскохозяйственных культур от типа и степени засоления почв и концентрации почвенного раствора [15]. Для ведущей сельскохозяйственной культуры – хлопчатника такая зависимость показана на рис. 5.

Для большинства сельскохозяйственных культур пределы оптимальной концентрации почвенного раствора составляют 3...4 г/дм³ по плотному остатку и 0,8...1,0 г/дм³ по хлор-иону (рис. 6) [23].

Динамика урожайности в зависимости от степени засоления может быть определена по кривой, полученной на основе обработки опытных данных [23]. При высоком исходном засолении почвы всходы хлопчатника получается недружными, густота состояния ниже нормы, у растений

меньше количество репродуктивных органов; в результате урожайность снижается (рис. 7 и 8).

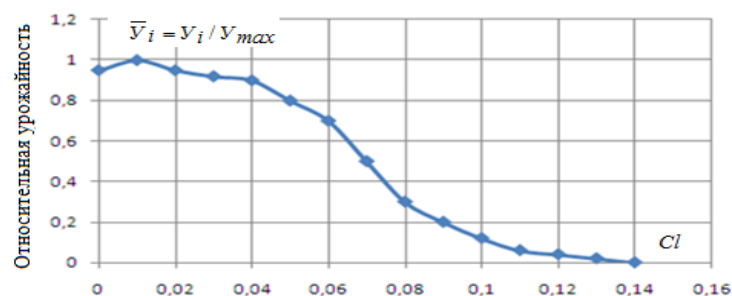


Рис. 5. Зависимость урожайности хлопчатника от исходного засоления почвы по хлору [25].

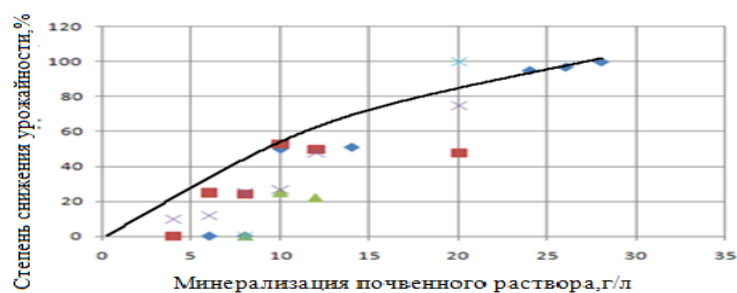


Рис. 6. Относительное снижение урожайности хлопчатника при различных концентрациях почвенного раствора [23].

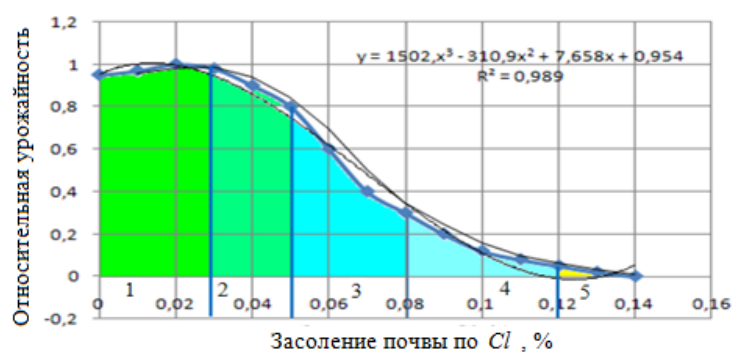


Рис. 7. Зависимость урожайности хлопчатника от исходного засоления почвы по хлору (по обобщенным данным В.А. Духовного): 1 – не засоленные; 2 – слабо засоленные; 3 – средне засоленные; 4 – сильно засоленные; 5 – очень сильно засоленные.

Как видно на рис. 8, содержание солей по хлору, при котором урожайность не снижается, или не происходит массовая гибель хлопчатника в зависимости от фазы развития растений, колеблется в значительных пределах и составляет 0,015...0,07 % и 0,11...0,40 % от массы почвы.

Такая же закономерность наблюдается и при высоком положении уровня грунтовых вод с высокой минерализацией (рис. 9).

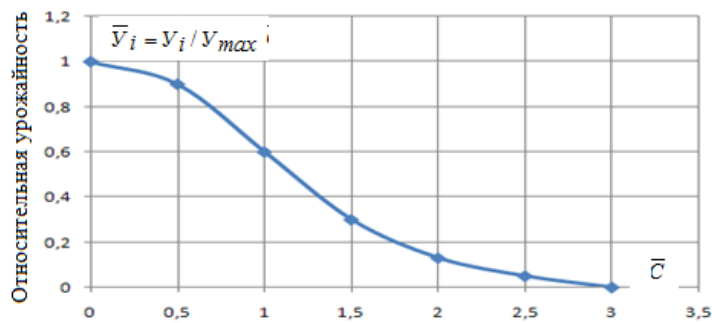


Рис. 8. Зависимость урожайности хлопчатника от суммы токсичных солей в почвенном растворе [4].

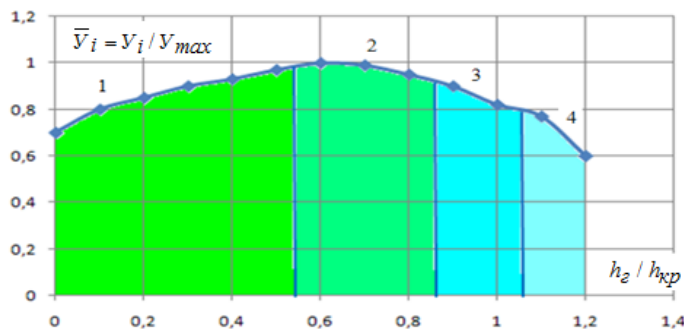


Рис. 9. Влияние относительного уровня грунтовых вод и мелиоративного режима на урожайность хлопчатника. 1 – гидроморфный режим; 2 – полугидроморфный режим; 3 – полуавтоморфный режим; 4 – автоморфный режим.

Установлено, что относительная урожайность в зависимости от факторов жизни растений C_{opt} , K_{lim} определяется по формуле:

$$\bar{Y} = A \cdot \exp\left(\frac{\bar{C}^2}{2}\right); \quad \bar{C} = \frac{C - C_{opt}}{C_{lim} - C_{opt}},$$

где \bar{Y} – относительная урожайность $\bar{Y} = Y_i / Y_{max}$; Y_i – текущая урожайность; Y_{max} – максимальная урожайность при оптимальном значении фактора жизни растений; C – текущее значение фактора жизни; C_{lim} – предельное значение фактора жизни, при котором урожайность стремится к нулю ($Y_i \rightarrow 0$); A – цифровой коэффициент, в данном случае равен 1.

На основе обобщения и систематизации данных установлено, что уровень снижения продуктивности зависит от солеустойчивости растений (табл. 2 и рис. 10).

Таблица 2

Снижение урожайности сельскохозяйственных культур в зависимости от степени засоления почвы, в % от контроля [4]

Культура	Изменение урожайности сельскохозяйственных культур в зависимости от содержания солей в почве (% к массе сухого веса)				
	0,1 контроль	0,3	0,6	0,9	1,2
	не засоленные	слабо засоленные	средне засоленные	сильно засоленные	очень сильно засоленные
Хлопчатник	100	94	50	22	6
Пшеница	100	80	39	15	0
Кукуруза на зерно	100	95	46	0	0
Кукуруза на силос	100	98	72	57	35
Люцерна	100	96	73	53	39
Подсолнух	100	98	84	53	46
Картофель	100	90	68	0	0
Помидор	100	98	74	54	34
Горох	100	66	27	0	0
Сладкий перец	100	71	43	39	0
Баклажан	100	92	74	48	32
Свекла	100	95	88	73	66

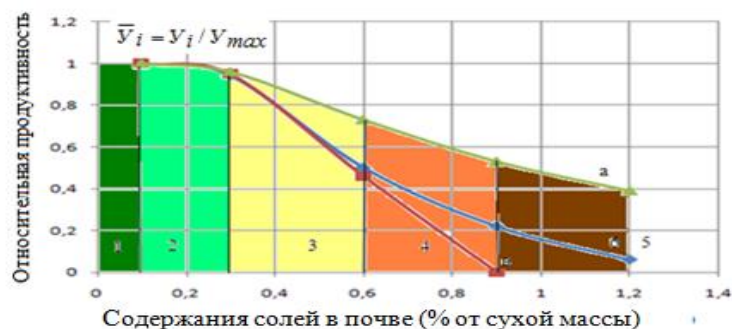


Рис. 10. Зависимость урожайности ($\bar{Y}_i = Y_i / Y_{max}$) от содержания солей в почве (% от сухой массы): а – люцерна; б – хлопчатник; в – кукуруза на зерно; 1 – незасоленные; 2 – слабо засоленные; 3 – средне засоленные; 4 – сильно засоленные; 5 – очень сильно засоленные.

Для описания общих закономерностей снижения урожайности сельскохозяйственных культур в зависимости от содержания солей в корнеобитаемом слое почвы, полагая, что оно прямо пропорционально начальному содержанию солей, можно получить дифференциальное уравнение первого порядка: $dY_i/dC = -k \cdot C$, знак минус в уравнении берется потому, что урожайность убывает.

Интегрирование уравнения $dY_i/dC = -k \cdot C$, при решении в виде зависимости между Y_i , C_n и произвольной постоянной A , дает $\ln Y_i = -k \cdot C + \ln A$.

Учитывая, что при $C_n = 0$, $Y_i = Y_{max}$ получаем $A = Y_{max}$, т.е. $\ln Y_i = -k \cdot C + \ln Y_{max}$, отсюда можно получить $-\ln(Y_i/Y_{max}) = -k \cdot C$ и, наконец, $Y_i = Y_{max} \cdot \exp(-k \cdot C)$, где k – коэффициент солеустойчивости сельскохозяйственных культур; Y_i – урожайность сельскохозяйственных культур при данной степени засоления почвогрунта, ц/га; Y_{max} – максимальная урожайность сельскохозяйственных культур при допустимой степени засоления почвогрунта, ц/га; C_n – комплексный показатель, характеризующий содержание солей в почве, который имеет вид: $C_n = (C_{ni}/C_{ndc})^a$, здесь C_{ni} – содержание солей в почвенном растворе; C_{ndc} – предельно-допустимое содержание почвенного раствора, обеспечивающее максимально-возможную урожайность сельскохозяйственных культур (Y_{max}).

Тогда, в общем случае уравнение для определения урожайности сельскохозяйственных культур в зависимости от содержания почвенного раствора может быть записано в виде:

$$Y_i = Y_{max} \cdot \exp[-k \cdot (C_{ni}/C_{ndc})^a].$$

Таким образом, зависимость урожайности сельскохозяйственных культур от степени засоления почвы описывается экспоненциальным уравнением и его можно использовать для описания типа кривых на рис. 6.

При этом учитывается то, что при содержании солей в расчетном слое почвы, меньшем или равном порогу токсичности (C_{ndc}), относительный урожай сельскохозяйственных культур будет равен единице, то есть $\bar{Y} = Y_i/Y_{max} = 1$. Результаты аппроксимации зависимости $\bar{Y} = f(\bar{C})$

приведены в табл. 3. Для определения параметров зависимости $\bar{Y} = f(\bar{C})$ использованы экспериментальные материалы, полученные в различных регионах нашей страны [1-9, 11, 12, 14, 15, 18, 19, 21-25].

Таблица 3

Зависимость относительной урожайности сельскохозяйственных культур

$$Y_i = Y_{max} \cdot \exp[-k \cdot (C_{ni} / C_{ndc})^a]$$

от типа и степени засоления почв C_{ni}

Засоление почвы	Параметры уравнения				
	k	a	\bar{y}	C_{ndc}	пределы достоверности
Аридная зона					
Хлоридное	0,173	2	1,0	0,15	$0 \leq C \leq 0,15$
Хлоридно-сульфатное	0,110	2	1,0	0,20	$0 \leq C \leq 0,20$
Сульфатное с талым содержанием гипса	0,100	2	1,0	0,30	$0 \leq C \leq 0,30$
Сульфатное с большим содержанием гипса	4,7	2	1,0	0,90	$0 \leq C \leq 0,90$
Степная зона					
Содовое	0,13	2	1,0	0,05	$0 \leq C \leq 0,05$
Хлоридно-содовое и содово-хлоридное	0,077	2	1,0	0,10	$0 \leq C \leq 0,10$
Сульфатно-содовое и содово-сульфатное	0,043	2	1,0	0,10	$0 \leq C \leq 0,10$
Содержание обменного натрия в почвенно-поглощающем комплексе (ППК)					
Обменный натрий (Na , % от ППК) – C	0,077	2	1,0	5,00	$0 \leq C \leq 5$
Токсичная щелочность (HCO_3), связанная с Na и Mg (мг-экв/100 г) – C	0,070	2	1	0,80	$0 \leq C \leq 0,80$
Реакция почвенной среды (pH водной суспензии 1:2,5) – C	19,49	2	1	7,5	$0 \leq C \leq 7,5$

Обработка результатов исследований и экспертные оценки, проведенные А.У. Усмановым, позволили установить связь между относительной урожайностью и содержанием хлора в почве в различные фазы развития хлопчатника (рис. 11). Серия кривых, которые хорошо аппроксимируются в виде степенной функции – относительное снижение урожайности хлопчатника от изменения засоления почвы по фазам развития растений [23].

На солонцах и содово-засоленных почвах, обладающих высокой щелочностью ($pH > 7$), резко сокращается усвояемость фосфора растениями и снижается урожайность сельскохозяйственных культур (рис. 12).

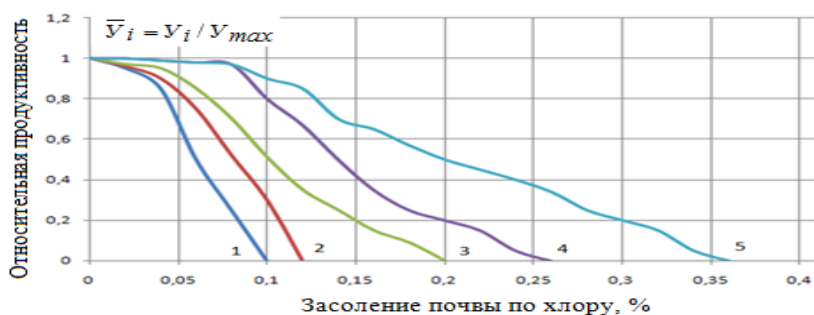


Рис. 11. Урожайность хлопчатника в зависимости от засоления почв по фазам развития растений (данные М.А. Белоусова, Т. Бекматова, В.А. Бурьгина, И.К. Киселева, В.М. Легостаева, Б.Г. Лунева, А.Е. Нерозина, И.С. Рабочева, А.У. Усманова): 1 – от посева до двух настоящих листочков; 2 – от двух настоящих листочков до бутонизации; 3 – от бутонизации до цветения; 4 – от цветения до плодообразования; 5 – от плодообразования до созревания.

Суммарное снижение урожайности определяется произведением частных величин, полученных в отдельных фазах развития растений, по выражению [23]:

$$\bar{Y} = \prod_{i=1}^s \left(1 - \frac{S_p^i - S_{don}^i}{S_k^i - S_{don}^i} \right)^a \cdot 100,$$

где \bar{Y} – относительная урожайность; $i = 1, 2, 3, \dots, 5$ – номера фазы развития хлопчатника, принятые в обобщении; S_{don} – допустимое засоление почвы для данной фазы развития; S_k – критическое засоление почвы, при котором наблюдается массовая гибель растений:

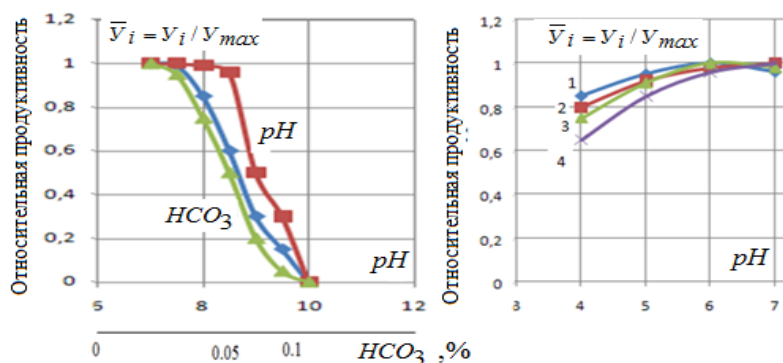


Рис. 12. Зависимость урожайности сельскохозяйственных культур от плодородия почвы и pH (по И.П. Айдарову): 1 – рожь; 2 – овес; 3 – пшеница; 4 – ячмень.

$$S_p = \begin{cases} S_{доп}^i, \text{ если } -S_{факт}^i \leq S_{доп}^i \\ S_{факт}^i, \text{ если } -S_{доп}^i < S_{факт}^i < S \\ S_k^i, \text{ если } -S_{факт}^i \geq S_k^i \end{cases}$$

здесь S_p – расчетное значение засоления почвы (по хлору); $S_{факт}$ – фактическое засоление почвы по фазам развития.

Степень токсичности засоленных почв для сельскохозяйственных культур характеризуется рядом показателей (содержание отдельных ионов в водной вытяжке, сумма токсичных солей, токсичная щелочность, реакция почвенной среды, содержание обменного натрия). Предельное значение показателя токсичности, выше которого начинается угнетение роста и развитие сельскохозяйственных культур, называют порогом токсичности. Значения порогов токсичности, ниже которых обеспечивается нормальное развитие всех сельскохозяйственных культур, приведены в табл. 4.

Таблица 4

Оптимальные интервалы почвенного раствора для растений и микроорганизмов

Растение	pH	Растение	pH
Люцерна	7,2...8,0	Хлопчатник	6,5...7,3
Сахарная свекла	7,0...7,5	Просо	5,5...7,5
Конопля	6,7...7,4	Рожь	5,0...7,7
Капуста	6,5...7,4	Овес	5,0...7,5
Огурцы	6,4...7,5	Гречиха	4,7...7,5
Лук	6,4...7,5	Редис	5,0...7,3
Ячмень	6,0...7,5	Морковь	5,6...7,0
Пшеница озимая	6,3...7,5	Томат	5,0...8,0
Пшеница яровая	6,0...7,3	Лен	5,5...6,5
Кукуруза	6,0...7,5	Картофель	4,5...6,3
Соя	6,5...7,5	Чайный куст	4,0...5,0
Горох	6,0...7,0	Люпин	4,6...6,0
Кормовые бобы	6,0...7,0	Брюква	4,8...5,5
Фасоль	6,4...7,1	Тимофеевка	4,5...7,6
Клевер	6,0...7,0	Азотобактерии	6,0...8,0
Салат	6,0...7,0	Нитрификаты	6,8...7,8
Подсолнечник	6,0...6,8	Денитрификаты	7,0...8,0

Для регулирования кислотности почв и связанной с ней подвижных форм токсичных элементов необходимо знать оптимальные интервалы кислотности для сельскохозяйственных растений и полезных микроорганизмов. Оптимальный интервал pH зависит не только от физиологиче-

ских особенностей сельскохозяйственных культур, но и от растворимых почвенных компонентов. Многочисленными исследованиями установлены оптимальные пределы реакции почвенного раствора для возделываемых культур и микроорганизмов (табл. 4).

По содержанию обменного натрия порог токсичности составляет 10 % ППК для высокогумусных и 5 % для малогумусных почв. Содержание обменного магния не должно превышать 20 % ППК.

Солеустойчивость растений зависит также от других условий среды: температуры воздуха, уровня водообеспеченности растений, интенсивности их освещения и минерального питания. Большое влияние на солеустойчивость растений оказывает также плодородие почвы и, в частности, уровень минерального питания. На бедных почвах солеустойчивость растений заметно снижается, а на почвах с повышенным уровнем минерального питания – повышается. Для повышения солеустойчивости растений перед посевом их семена замачивают в растворах солей, применяют микроэлементы (*B*, *Mn*, *Cu*, *Zn*, *Co*, *Cd*, *J*, *Al*, *Mo*), увеличивают уровень минерального питания, а также дозы азотных и фосфорных удобрений.

На кислых почвах реакция почвенной среды оказывает разностороннее влияние на свойства почв и на растения (рис. 13).

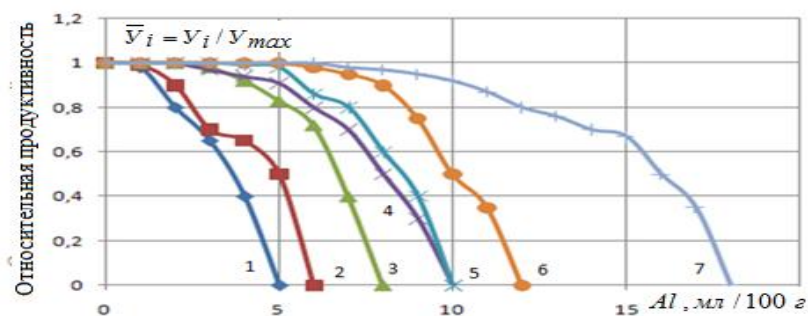


Рис. 13. Влияние содержания подвижных форм алюминия на относительную урожайность культур: 1 – свекла столовая и сахарная; 2 – люцерна; 3 – клевер красный; 4 – гречиха; 5 – кукуруза, ячмень, кормовые бобы; 6 – лен; 7 – овес.

При повышенном содержании подвижных соединений алюминия в почве образуются труднорастворимые фосфаты алюминия, фосфор который становится малодоступным растениям. Алюминий токсичен для многих растений; уже при концентрации *Al* в растворе, равной 2 мг/дм³, наблюдается резкое ухудшение развития корневой системы, нарушается углеводный, азотный и фосфатный обмен в растениях. Более высокие кон-

центрации алюминия вызывают резкое снижение урожая зерновых культур, и даже их гибель (см. рис. 13). Повышение кислотности почвы резко увеличивает подвижность тяжелых металлов, которые отрицательно влияют на рост и развитие растений (рис. 14).

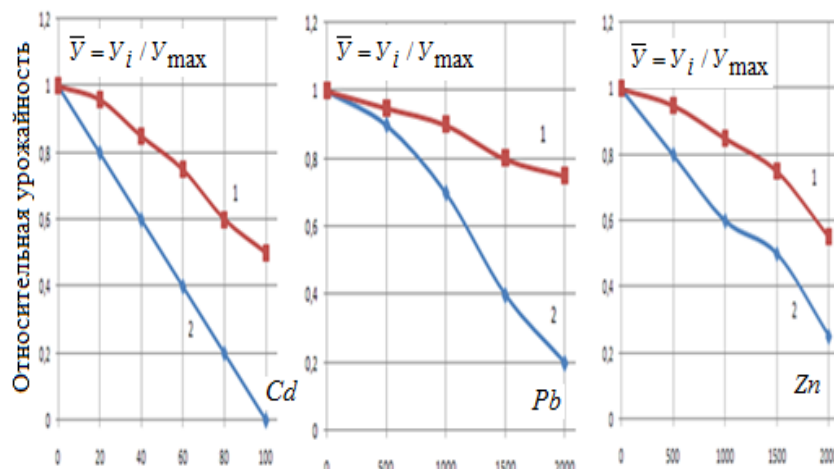


Рис. 14. Урожайность зерновых и кормовых культур в зависимости от содержания в почве тяжелых металлов Cd , Pb , Zn (по И.П. Айдарову): 1 – чернозем типичный; 2 – дерново-подзолистая почва.

По устойчивости к содержанию в почвенном растворе подвижного алюминия сельскохозяйственные растения подразделяют на особо-, слабочувствительные, среднеустойчивые и устойчивые. К особо чувствительным относятся: клевер красный, свекла сахарная и столовая, озимая пшеница, озимая рожь, люцерна; к слабочувствительным: горох, фасоль, гречиха, яровая пшеница, ячмень, лен, турнепс; к среднеустойчивым: кукуруза, просо и картофель; к устойчивым: тимофеевка, люпин, овес.

Влияние минерализации оросительной воды на относительную урожайность хлопчатника проиллюстрировано на рис. 15.

На рис. 15 видно, что для хлопчатника при минерализации используемых вод $1...2$ г/дм³ снижение составляет $2...6$ %, при $2...4$ г/дм³ – $2...12$ %, а при $4...6$ г/дм³ снижение урожайности составляет до $30...40$ % в зависимости от обеспеченности [8].

По результатам натурных исследований при использовании дренажных вод и их влиянию на урожайность растений построен график (рис. 16). На рис. 16, приведена зависимость снижения урожайности люцерны (сена и зеленой массы) от минерализации поливной воды, где в контрольном варианте минерализация воды составляет $0,80...1,20$ г/дм³.

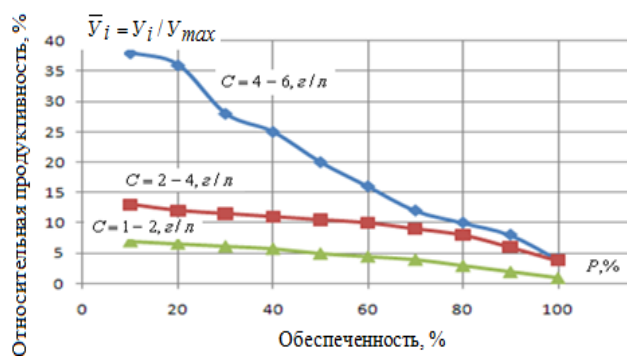


Рис. 15. Кривые обеспеченности относительного снижения урожайности хлопчатника при поливе оросительной водой с различной минерализацией (С).

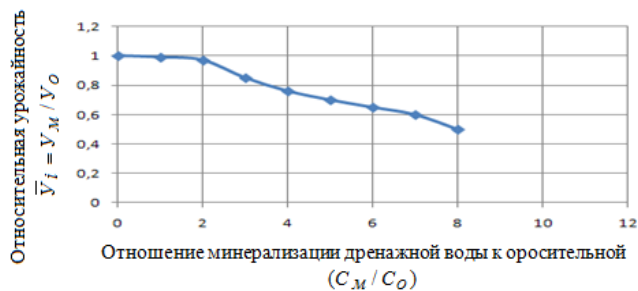


Рис. 16. Зависимость урожайности хлопчатника от минерализации оросительной воды (Y_M – урожайность при орошении минерализованной водой; Y_0 – урожайность при орошении оросительной водой, с минерализацией 1 г/дм³; C_M / C_0 – отношение минерализаций дренажной воды к оросительной воде).

На основе изучения орошения почв минерализованными водами ценные теоретические и практические выводы содержатся в работах Н.Г. Минашиной [11], которая вплотную приблизилась к решению проблемы всесторонней оценки качества оросительной воды (рис. 17).

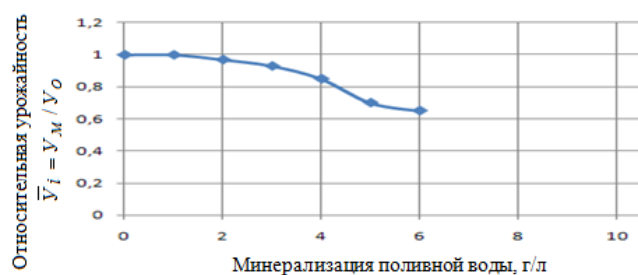


Рис. 17. Зависимость урожайности люцерны (сена и зеленой массы) от минерализации поливной воды.

Как видно на рис. 17, урожайность сельскохозяйственных культур снижается при повышении минерализации оросительных вод, то есть зависит от солеустойчивости сельскохозяйственных культур и сравнение данных по скорости снижения урожайности при нарастании минерализации оросительных вод показывает определенное совпадение кривизны убывающей экспоненты с оценками их устойчивости.

Полученные авторами на основе анализа литературных данных уравнения вида $\bar{Y} = Y / Y_{max} = f(C_o)$ для различных сельскохозяйственных культур с высоким коэффициентом корреляции (R) приведены в табл. 5 [6].

Таблица 5

Зависимость урожайности сельскохозяйственных культур от минерализации оросительных вод ($\bar{Y} = Y_i / Y_{max}$)

Культура	Уравнение	Параметр		
		R	$C_o^{дон}$	\bar{Y}
Ячмень	$Y_i = Y_{max} \left[1 - (\sqrt{C_o} - 3,75) / 2,5 \right]$	0,81	3,75	1,0
Сахарная свекла	$Y_i = Y_{max} \left[1 - (\sqrt{C_o} - 2,9) / 21,25 \right]$	0,80	2,90	1,0
Хлопчатник	$Y_i = Y_{max} \left[1 - (\sqrt{C_o} - 2,9) / 21,25 \right]$	0,80	2,90	1,0
Пшеница	$Y_i = Y_{max} \left[1 - (\sqrt{C_o} - 2,2) / 20 \right]$	0,78	2,20	1,0
Сорго	$Y_i = Y_{max} \left[1 - (\sqrt{C_o} - 1,9) / 17,8 \right]$	0,85	1,90	1,0
Рис	$Y_i = Y_{max} \left[1 - (\sqrt{C_o} - 1,5) / 14 \right]$	0,82	1,50	1,0
Кукуруза	$Y_i = Y_{max} \left[1 - (\sqrt{C_o} - 1,5) / 14 \right]$	0,82	1,50	1,0

Таким образом, система математических моделей для оценки и прогнозирования продуктивности сельскохозяйственных культур в зависимости от степени засоления почв (таблица 3) и минерализации оросительных вод (таблица 5), позволяет осуществлять оптимальное управление и регулирование процессами промывки засоленных почв и мелиоративными режимами орошаемых земель.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айдаров И.П. Голованов А.И., Никольский Ю.Н. Оптимизация мелиоративных режимов орошаемых и осушаемых сельскохозяйственных земель. – М.: Агропромиздат, 1990. – 60 с.
2. Айдаров И.П., Пестов Л.Ф., Корольков Т.П. Влияние типа и степени засоления почв на урожайность сельскохозяйственных культур // Сб.

- научн. тр. МГМИ / Комплексное мелиоративное регулирование почвенных процессов. – М.: 1982. – С. 120-131.
3. Безднина С.Я. Качество воды для орошения, принципы и методы оценки. – М.: Рома, 1997. – 186 с.
 4. Горбачев Р.М. Разработка вопросов эффективности переустройства ГМС в нижнем течении р. Амударьи. – Ташкент: САНИИРИ, НТО, 1980. – 54 с.
 5. Горюнов Н.С. Как бороться с засолением орошаемых земель. – Алматы: Кайнар, 1973. – 110 с.
 6. Даримбетов У.Д., Мустафаев Ж.С. Математическое моделирование почвенно-мелиоративных процессов в орошаемых землях // Тр. ТИИИМСХ / Вопросы рационального использования водных ресурсов и охраны их от загрязнения в условиях Казахстана. – 1983. – Вып. 129. – С. 77-85.
 7. Духовный В.А., Баклушин М.Б., Томин Е.Д., Серебренников Ф.В. Горизонтальный дренаж на орошаемых землях (Под ред. В.А. Духовного). – М.: Колос, 1979. – 256 с.
 8. Духовный В.А., Умарджанов Д. Методика оценки эффективности переустройства оросительных систем // Сборник научных трудов / Совершенствование гидромелиоративных систем. – Ташкент: 1982. – Вып. 167. – С. 41-80.
 9. Ковда В.А., Мамаева Л.И. Пределы токсичности солей в почвах Пахта-Арала для люцерны и хлопчатника // Почвоведение. – 1939. – №4. – С. 80-99.
 10. Марюшин П.А. Разработка схемы регулирования водно-солевого режима почв при орошении черноземов // Строительство и техногенная безопасность. – 2005. – Вып. 10. – С. 145-151.
 11. Минашина Н.Т. Токсичные соли в почвенном растворе, их расчет и классификация почв по степени засоления // Почвоведение. – 1970. – №8. – С. 65-75.
 12. Мирзаев З.М. Реакция некоторых сельскохозяйственных культур на засоленность почв и грунтовых вод в условиях равнинного Дагестана. // В кн. «Вопросы рационального использования и повышение плодородия почв Дагестана». – Махачкала, 1972. – С. 142-149.
 13. Митчерлих Э.А. Почвоведение. – М.: Изд-во ин. лит-ры, 1957. – 416 с.
 14. Мустафаев Ж.С., Даримбетов У.Д. Математическое моделирование программных урожаев сельскохозяйственных культур на орошаемых землях // Вестник сельскохозяйственной науки Казахстана. – 1983. – №6. – С. 64-69.
 15. Мустафаев Ж.С., Козыкеева А.Т., Мустафаев К.Ж., Абдешев К.Б. Моделирование засоления и рассоления почвы. – Тараз: 2013. – 204 с.
 16. Мустафаев Ж.С., Мустафаев К.Ж. Методологические основы оценки предельно-допустимого использования природных ресурсов (Аналитический обзор). – Тараз: 2011. – 45 с.

17. Нерпин С.В., Чудновский А.Ф. Энерго-массообмен в системе растение – почва – приземный воздух. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 358 с.
18. Патахов М.Н. Солеустойчивость люцерны к водно-растворимым солям почвы // Вестник сельскохозяйственной науки Казахстана. – 1961. – №11. – С. 61-65.
19. Пирузян С.С. Влияние засоления почв на рост и развитие кукурузы // Почвоведение. – 1959. – №2. – С. 45-50.
20. Попов В.А. Математическое выражение закона лимитирующего фактора и его приложение к задачам мелиоративного земледелия // Мелиорация и водное хозяйство. – 1997. – №2. – С. 30-34.
21. Рабочев И.С., Бурдыгина В.С. Влияние концентрации почвенного раствора на урожай хлопчатника // В сб. статей. – Ашхабад: «Ылым», 1968. – С. 125-145.
22. Рау А.Г. Водопотребление на рисовых системах. – М.: ВО «Агропромиздат», 1988. – 86 с.
23. Усманов А.У. Влияние качества оросительной воды на урожайность сельскохозяйственных культур // Мелиорация земель низовий рек Аральского региона / Тр. САНИИРИ. – 1988. – С. 38-42.
24. Цвылев Е.М. Влияние солонцеватости южных черноземов на урожайность зерновых культур // Почвоведение – 1975. – №11. – С. 61-65.
25. Шмидт С.М. О статистической связи урожайности хлопчатника с засолением почвогрунтов // Сборник научных трудов САНИИРИ / Принципы регулирования мелиоративных режимов почв. – 1982. – Вып. 166. – С. 132-143.

Поступила 23.09.2014

Техн. ғылымд. докторы	Ж.С. Мұстафаев
Техн. ғылымд. докторы	Ә.Т. Қозыкеева
Экон. ғылымд. канд.	Қ.Ж. Мұстафаев
	Қ.Б. Абдешев

ТҮЗДАНҒАН СУҒАРМАЛЫ ЖЕРЛЕРДЕГІ АУЫЛШАРУАШЫЛЫҚ ДАҚЫЛДАРЫНЫҢ ӨНІМДІЛІГІНІҢ МАТЕМАТИКАЛЫҚ ӨРНЕГІ

Суғармалы жерлердің топырағының ылғалдану тәртібінің және тұздану дәрежесінің ауылшаруашылық дақылдарының өнімділігіне әсерін зерттеуге арналған нәтижелерін жүйелеу және өрнектеудің негізінде агроландшафттық жүйелердегі гидрогеохимиялық үрдістерді басқаруға және реттеуге арналған үлгі құрылған.