

УДК 910.1

Доктор техн. наук

Ж.С. Мустафаев *

Доктор техн. наук

А.Т. Козыкеева *

Канд. экон. наук

К.Ж. Мустафаев *

**ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ
ПРИРОДНОЙ СИСТЕМЫ***КЛИМАТ, ТЕПЛОБЕСПЕЧЕННОСТЬ, ВЛАГООБЕСПЕЧЕННОСТЬ, ЭКОСИСТЕМА, ПОЧВА, СРЕДА, ПРИРОДНАЯ ЗОНА, ИНДЕКС СУХОСТИ*

В статье рассмотрены вопросы моделирования тепло- и влагообеспеченности природной системы и на их основе определены закономерности функционирования основных природных зон Казахстана при изменении климата.

Решение многих вопросов системы природопользования, связанных с пониманием процессов функционирования природных комплексов, во многом осложняется не недостатком информационного обеспечения, а отсутствием надежных теоретических построений и апробированного методического обеспечения, позволяющих оценить состояние и прогнозирование их изменения под воздействием природной и антропогенной деятельности.

Как известно, основные закономерности процессов развития природных систем формируются широтной зональностью, которая определяется распределением тепла и влаги на поверхности и высотной поясностью, обусловленной наличием географических зон с различными абсолютными высотами.

Высотная поясность служит ярким географическим следствием морфоструктурной дифференциации, обусловленной резким увеличением величины радиационного баланса, а также изменением количества осадков с возрастанием высоты поверхности суши над уровнем моря, при одновременном действии барьерного эффекта горной системы.

На основе этой закономерности был сформирован периодический закон географической зональности В.В. Докучаева–А.А. Григорьева–М.И. Будыко, который характеризуется соотношением между энергетическим балансом и количеством осадков, выраженным в тепловых единицах

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

[1-3]. В дальнейшем соотношение между энергетическим балансом и количеством осадков стало основным критерием для оценки продуктивности климата [4] и экологической продуктивности ландшафтов [5].

В настоящее время в результате антропогенной деятельности происходит повсеместная трансформация природной системы, что требует проведение комплексной оценки взаимодействия природы и общества, происходящего на одной территории в одно и то же время. Изменение структуры ландшафтов под воздействием антропогенной деятельности ведет, прежде всего, к трансформации растительного покрова, снижению природного потенциала и экологической устойчивости в целом. Для оценки изменения природной системы в условиях природной и антропогенной деятельности возникает необходимость построения интегральной математической модели природных систем в соответствии с законом географической зональности, который позволяет придать количественные значения качественным изменениям ареалов, занимаемых природными системами.

При моделировании природных систем, позволяющем придать количественные значения качественным изменениям ареалов, занимаемых природными экосистемами, при изменении климата можно использовать географические зоны, которые считаются однородными, характеризующиеся некоторыми интегральными величинами продуктивности ландшафтов.

В качестве интегральной величины, характеризующей состояние природной системы, была выбрана продуктивность растительного покрова. Она может быть определена соотношением таких осредненных индикаторных величин, как суммарная солнечная радиация (кДж/см^2), продолжительность безморозного периода (сутки), продолжительность периода с вегетационной активной температурой выше 10°C (сутки), сумма среднесуточных температур ($^\circ\text{C}$), количество атмосферных осадков за год (мм), количество атмосферных осадков за теплый период (мм), испаряемость (мм) и длительность вегетационного периода (сутки).

Создание корректной математической модели формирования продуктивности растительного покрова крайне затруднительно. Приходится прибегать к уменьшению числа предикторов, сосредоточившись на самых главных, определяющих производственный потенциал природной системы.

При этом связь между продуктивностью растительного покрова (Y) и индикатором природных систем, можно найти, используя зависимость суммы среднесуточных температур воздуха, длительности вегетационного периода, фактора плодородия почвы, а также количества осадков:

$$Y_i = Y_{max} \cdot K_t \cdot K_w \cdot K_T, \quad (1)$$

где Y_i – продуктивность растительного покрова природной системы; Y_{max} – максимальная продуктивность растительного покрова при самых благоприятных гидротермических условиях; K_t – коэффициент, определяющийся температурным режимом вегетационного периода; K_w – коэффициент, определяющийся режимом увлажнения; K_T – коэффициент, определяющийся длительностью вегетационного периода.

Потребности растений в тепле, влаге и длительности вегетационного периода в природной системе различны, поэтому различны и зависимости продуктивности от температурного режима, режима увлажнения и длительности вегетационного периода. Их удобно выражать в долях от оптимума, благодаря чему получается обобщенная для различных растений зависимость: $K_t = f(\sum t_i / \sum t_{onm})$, $K_w = f(W_i / W_{onm})$ и $K_T = f(T_i / T_{onm})$, где $\sum t_i$ – сумма среднесуточной температуры вегетационного периода; $\sum t_{onm}$ – оптимальная сумма среднесуточной температуры вегетационного периода; $W_i = O_{ci}$ – количество осадков; $W_{onm} = O_{conm}$ – необходимое или оптимальное количество осадков; T_i – длительность вегетационного периода; T_{onm} – оптимальная длительность вегетационного периода.

С учетом закона толерантности, продуктивность растительного покрова от влагообеспеченности (K_w) аппроксимируется уравнением параболы и для их математического описания можно использовать формулу В.В. Шабанова в следующем виде [6]:

$$K_w = \left(\frac{E_i - E_{min}}{E_{onm} - E_{min}} \right)^\beta \left(\frac{E_{max} - E_i}{E_{max} - E_{zo}} \right)^\beta \left(\frac{E_{onm} - E_{zo}}{E_{zo} - E_{min}} \right), \quad (2)$$

где E_{onm} – оптимальное биологическое водопотребление растений; E_{zo} – экологическое водопотребление растений; E_i – фактическое водопотребление растений; E_{min} , E_{max} – нижняя и верхняя границы нормы водопотребления сельскохозяйственных культур, соответственно, при которой урожай равен нулю.

При этом следует отметить, что первая часть уравнения полностью характеризует уровень влагообеспеченности при формировании урожайности сельскохозяйственных культур, а вторая часть – влияние нормы водопотребности на почвообразовательные процессы орошаемых земель, которые в определенной степени оказывают влияние на продуктивность растений.

В качестве основного критерия теплообеспеченности сельскохозяйственных культур принимают сумму активных температур, получаемую суммированием всех среднесуточных положительных температур, равных и больших +10 °С за продуктивный период от всходов весной до созревания урожая. При этом для описания продуктивности сельскохозяйственных культур от теплообеспеченности использованы три термических показателя: максимальная сумма температур выше +10 °С ($\sum t_i$), характеризующая возможные теплоресурсы в регионе; минимальные ($\sum t_{\min}$) и максимальные ($\sum t_{\max}$) суммы биологически активных температур, необходимые для вызревания растений.

Коэффициент (K_t), определяемый температурным режимом вегетационного периода, описывается следующим выражением:

$$K_t = \left(\frac{\sum t_i - \sum t_{\min}}{\sum t_{\max} - \sum t_{\min}} \right)^\beta \left(\frac{\sum t_{\max} - \sum t_{\text{opt}}}{\sum t_{\max} - \sum t_i} \right)^\beta \left(\frac{\sum t_{\max} - \sum t_{\text{opt}}}{\sum t_{\text{opt}} - \sum t_{\min}} \right), \quad (3)$$

где $\sum t_i$ – фактическая сумма температуры воздуха за вегетационный период; $\sum t_{\text{opt}}$ – оптимальная сумма температуры воздуха за вегетационный период, необходимая для вызревания растения; $\sum t_{\min}$ – минимальная сумма температуры воздуха за вегетационный период, необходимая для вызревания растения; $\sum t_{\max}$ – максимальная сумма температуры воздуха за вегетационный период, необходимая для вызревания растения.

Учитывая симметрию формы кривой коэффициента теплообеспеченности, примем оптимальную для фотосинтеза сумму температур воздуха за вегетационный период как среднее арифметическое между максимальными и минимальными для фотосинтеза суммами температуры воздуха за вегетационный период, т.е. $\sum t_{\text{opt}} = (\sum t_{\min} + \sum t_{\max})/2$.

Коэффициент (K_T), определяемый длительностью вегетационного периода можно определить как отношение продолжительности вегетационного периода к количеству дней в году, т.е. $K_T = T_i / 365$.

При моделировании процесса изменения ареалов природных экосистем под влиянием изменения климата были также введены комплексные функции, характеризующие, с одной стороны, потепление и иссушение климата, а с другой – его похолодание и увлажнение, представленные в виде следующей зависимости: $K = K(O_c, T)$, где T – температура вегетационного периода; O_c – количество осадков в вегетационный период.

Тогда потепление и иссушение климата будет характеризоваться величинами $1,2K = K(1,2T; 0,8O_c)$, а похолодание и увлажнение климата, соответственно $0,8K = K(0,8T; 1,2O_c)$ [7-9].

На основе полученных зависимостей $K_i = f(\sum t_i / \sum t_{omn})$, $K_w = f(W_i / W_{omn})$ и $K_T = f(T_i / T_{omn})$ построены графики (рис. 1). На рис. 1 видно, что при каждом температурном режиме для получения продукции необходима вполне определенная влагообеспеченность, т.е. существуют некие нормы водопотребности, при которых фотосинтез растений будет протекать благоприятным образом в конкретной географической зоне.

Очевидно, по мере повышения засухоустойчивости растений «купол» зависимости теплообеспеченности ($\sum t_i$) сдвигается вдоль оси в сторону меньших значений, для более теплолюбивых – «купол» сдвигается вдоль влагообеспеченности (E_i) в сторону больших значений. Таким образом, если некоторая географическая зона характеризуется средними многолетними значениями теплообеспеченности ($\sum t_i$) и влагообеспеченности (E_i), можно определить продуктивность ландшафтов в отношении различных культур от тепло- и влагообеспеченности. Используя предлагаемый принцип, можно решить обратную задачу выяснить ареалы возможного возделывания сельскохозяйственных культур.

Всем известно, что природные экосистемы в географических зонах различаются по показателю продукции растительного покрова, а продуктивность ландшафтов определяется по выражению (1). В модели использованы изменения интегрального показателя продукции как критерий, определяющий положение границ природных экосистем.

С помощью комплексной модели была определена продуктивность экосистем Казахстана в зависимости от влаго- и теплообеспеченности территории (табл. 1 и 2).

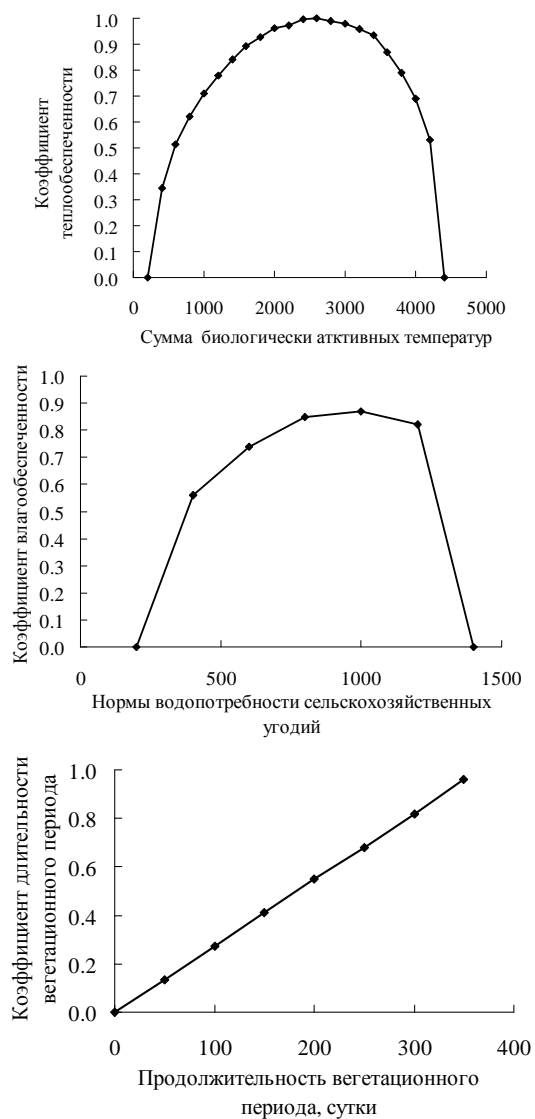


Рис. 1. Климатические коэффициенты: K_W – коэффициент теплообеспеченности; K_t – коэффициент влагообеспеченности; K_T – коэффициент длительности вегетационного периода.

Таблица 1

Продукция природных экосистем Казахстана в зависимости от влагообеспеченности территории

Природная зона	Индекс сухости (\bar{R})	Основные типы почвы	Нормы водопотребления сельскохозяйственных угодий, мм							K_w		
			$E_i = O_c$			E_{\min}	E_{\max}	$E_{\text{опт}}$	$E_{\text{эо}}$	0,80	1,00	1,20
			$0,8 \cdot E_i$	E_i	$1,2 \cdot E_i$							
Лесостепь	0,90...1,00	черноземы	300	375	450	200	620	415	366	0,68	0,87	0,98
	1,00...1,20	южные черноземы	274	343	411	200	640	425	395	0,57	0,86	0,95
Степь	1,20...1,30	темно-каштановые	264	330	396	200	700	465	405	0,49	0,79	0,88
	1,30...1,45	каштановые	248	310	372	200	740	495	425	0,40	0,66	0,76
Полупустыня	1,45...1,80	светло-каштановые	200	250	300	200	820	545	500	0,16	0,41	0,52
Пустыня северная	1,80...3,00	бурые, светлобурые	200	250	300	200	1100	755	564	0,17	0,31	0,50
Пустыня южная	3,00...2,00	сероземы	184	230	276	200	1400	950	710	0,11	0,20	0,32
Предгорная полупустыня	2,00...1,45	сероземы, темные сероземы	280	350	420	200	1360	910	615	0,34	0,48	0,58
Предгорная степь	1,45...1,30	каштановые	360	450	540	200	1290	860	535	0,51	0,62	0,69
	1,30...1,20	темно-каштановые	368	460	552	200	1060	710	450	0,59	0,67	0,68
Горные степи и леса	1,20...1,00	горные типы	392	490	588	200	840	560	335	0,62	0,68	0,70

Таблица 2

Продукция природных экосистем Казахстана в зависимости от теплообеспеченности территории

(при $\sum t_{\min} = 200 \text{ }^\circ\text{C}$; $\sum t_{\max} = 4400 \text{ }^\circ\text{C}$; $\sum t_{\text{opt}} = 2600 \text{ }^\circ\text{C}$)

Природная зона	Индекс сухости (\bar{R})	Основные типы почвы	$\sum t_i$			K_i		
			0,80	1,00	1,20	0,80	1,00	1,20
Лесостепь	0,90...1,00	черноземы	1360	1700	2040	0,21	0,30	0,44
Степь	1,01...1,20	южные черноземы	1760	2200	2640	0,35	0,47	0,67
	1,21...1,30	темно-каштановые	1920	2400	2880	0,40	0,57	0,77
	1,31...1,45	каштановые	2080	2600	3120	0,45	0,64	0,90
Полупустыня	1,46...1,80	светло-каштановые	2240	2800	3360	0,51	0,73	1,00
Пустыня северная	1,81...3,00	бурые, светлобурые	2880	3600	4320	0,77	1,00	1,00
Пустыня южная	3,01...2,00	сероземы	3360	4200	5040	0,95	1,00	1,00
Предгорная полупустыня	2,01...1,45	сероземы, темные сероземы	2720	3400	4080	0,69	1,00	1,00
Предгорная степь	1,46...1,30	каштановые	2240	2800	3360	0,51	0,73	1,00
	1,31...1,20	темно-каштановые	2080	2600	3120	0,45	0,64	0,90
Горные степи и леса	1,21...1,00	Горные типы	1920	2400	2880	0,40	0,57	0,77

На основе предложенного подхода оценки продуктивности экосистем, можно определить закономерность функционирования ландшафтов при изменении климата. Оценка должна ответить на вопрос о том, будет ли граница природной зоны оставаться неизменной во времени и пространстве, либо она будет смещена вверх или вниз по вертикальной поясности, а ареал природной зоны будет либо сужаться, либо расширяться.

В табл. 1 и 2 показано, как изменяется продуктивность природной экосистемы и ее границы, если температура и количество осадков за вегетационный период изменяются на 20 %. При увеличении температуры вегетационного периода на 20 % ,теплообеспеченность территории увеличивается от 0,14 до 0,27; при снижении на 20 % уменьшается от 0,09 до 0,22, что, в определенной степени, оказывает влияние на ареал возделывания отдельных видов сельскохозяйственных культур. При увеличении влагообеспеченности территории на 20 % увеличивается продуктивность естественных сельскохозяйственных угодий от 0,11 до 0,19. При снижении влагообеспеченности на 20 % продуктивность уменьшается от 0,19 до 0,26, что приводит к опустыниванию огромных территорий Казахстана.

Итак, при изменении климата определенной территории в степной зоне, происходит наступление полупустыни, а полупустыня переходит в пустыню, что будет оказывать воздействие на переформирование природной системы Казахстана. Распределение экосистем в природной зоне Казахстана при существующих и ожидаемых климатических характеристиках представлено на рис. 2 и 3.

На основе разработанной модели продуктивности экосистемы, определена продуктивность природных экосистем Казахстана (табл. 3). Как видно из данных табл. 3, результаты моделирования продуктивности экосистем природных зон Казахстана при ожидаемом изменении климата изменят ареал географических зон. Это приведет к смещению их границ и размеров площади. Так, в связи с понижением температуры (похолодание) и увеличением влажности (увлажнение) продуктивность и площади степной и пустынной экосистемы будут заметно уменьшаться. А при потеплении и росте сухости климата продуктивность природной зоны возрастает незначительно, площади степной и пустынной экосистем будут увеличиваться, что необходимо учитывать при размещении производительных сил агропромышленного комплекса страны.

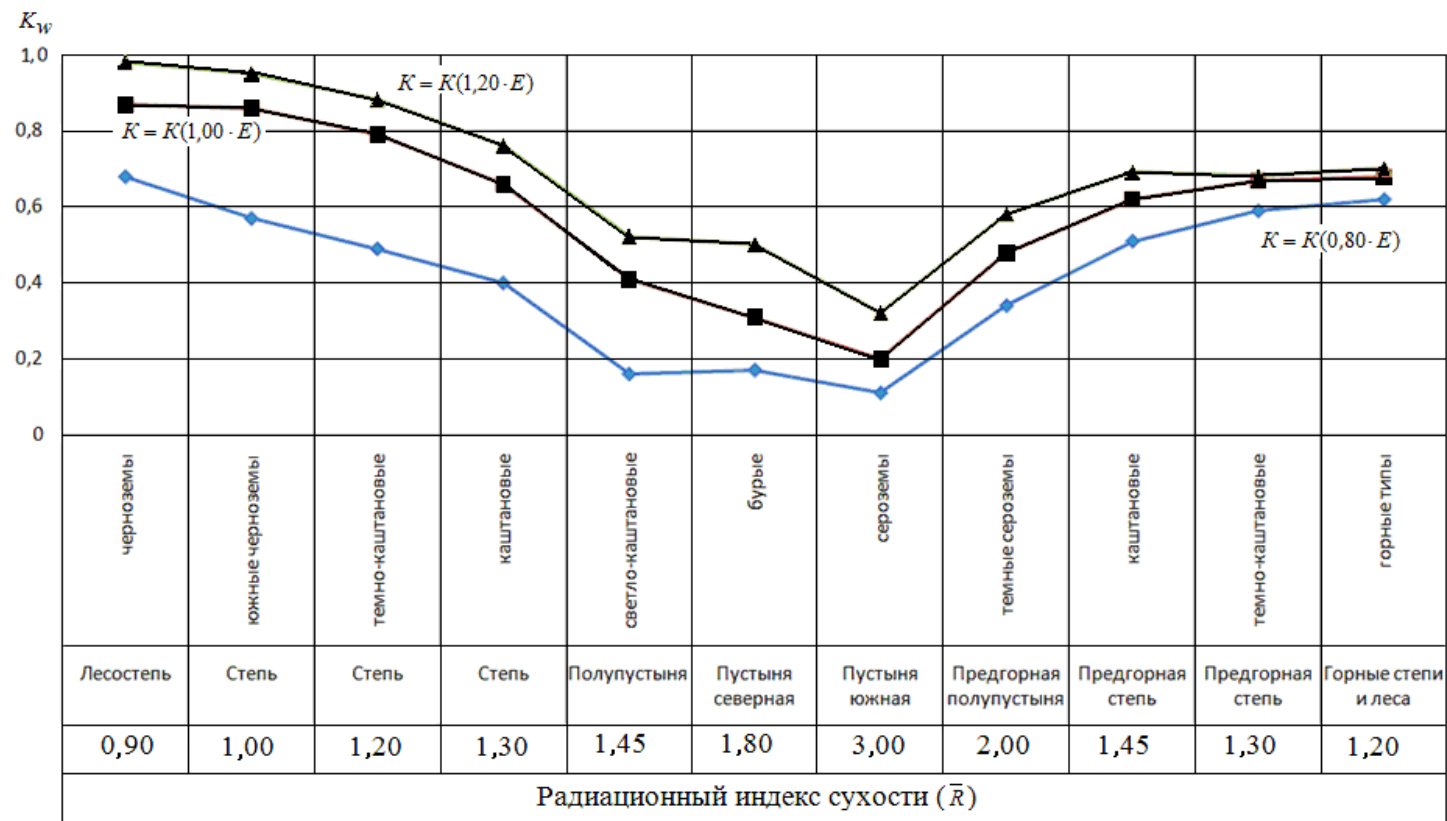


Рис. 2. Влияние колебаний климата на продуктивность экосистемы природных зон Казахстана при изменении влагообеспеченности.

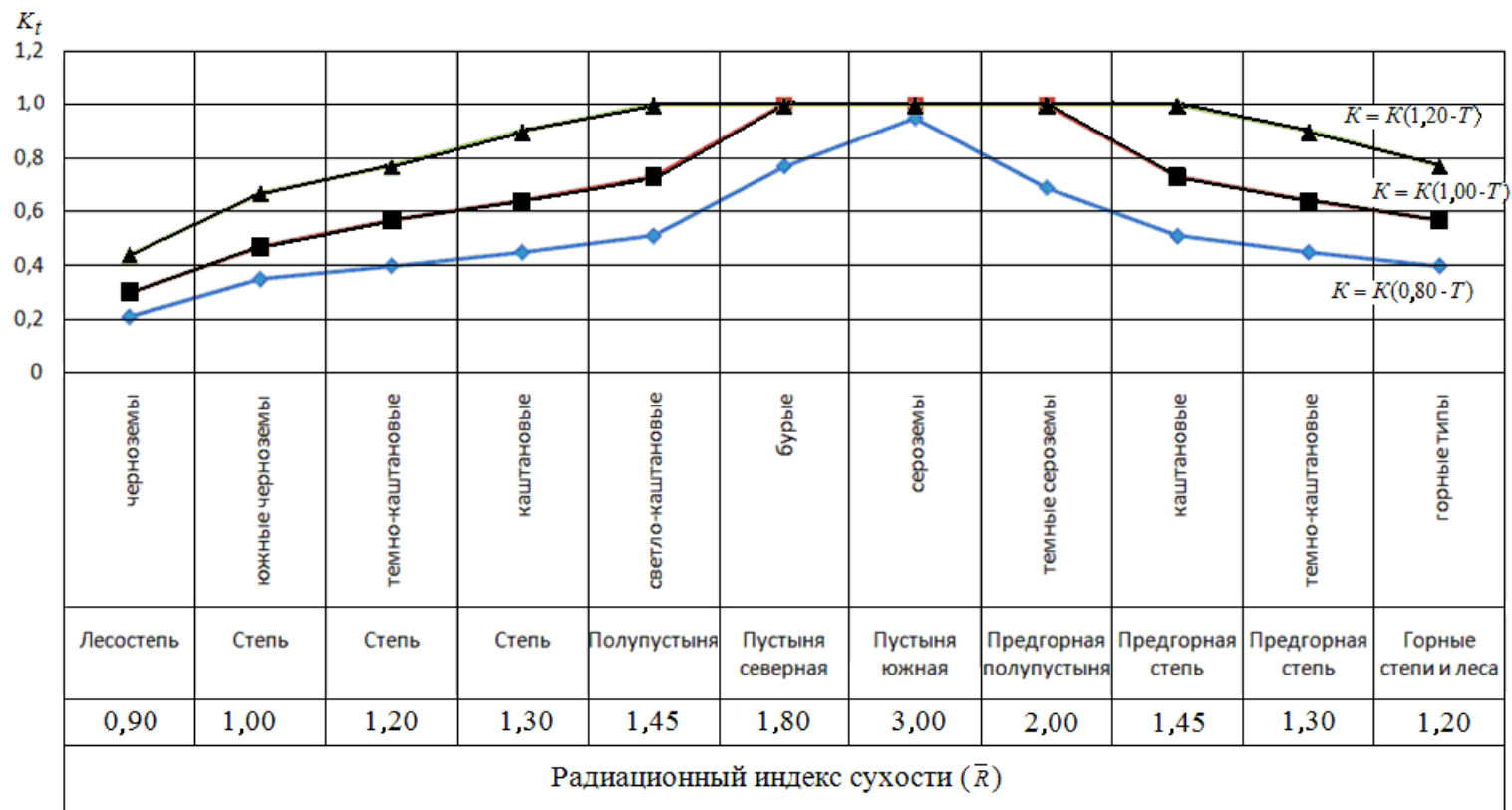


Рис. 3. Влияние колебаний климата на продуктивность экосистемы природных зон Казахстана при изменении теплообеспеченности.

Таблица 3

Продуктивность природных экосистем Казахстана

Природная зона	Индекс сухости (\bar{R})	Основные типы почвы	$Y_i = Y_{max} \cdot K_t \cdot K_w \cdot K_T$		
			0,80	1,00	1,20
Лесостепь	0,90...1,00	черноземы	0,140	0,261	0,431
Степь	1,01...1,20	южные черноз.	0,200	0,404	0,636
	1,21...1,30	темно-каштан.	0,196	0,450	0,677
	1,31...1,45	каштановые	0,180	0,422	0,684
Полупустыня	1,46...1,80	светло-каштан.	0,082	0,299	0,520
Пустыня северная	1,81...3,00	бурые, светлорубые	0,131	0,310	0,500
Пустыня южная	3,01...2,00	сероземы	0,105	0,200	0,320
Предгорная полупустыня	2,01...1,45	сероземы, темные сероземы	0,235	0,480	0,580
Предгорная степь	1,46...1,30	каштановые	0,260	0,453	0,690
	1,31...1,20	темно-каштан.	0,266	0,429	0,612
Горные степи и леса	1,21...1,00	горные типы	0,248	0,388	0,539

Таким образом, разработанная модель продуктивности экосистемы, на основе интеграции природных зон, входящих в нее в соответствии с их географической зональностью, позволяет определить закономерности функционирования природных экосистем не только при долговременном изменении климата, но и от степени антропогенного воздействия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бугровский В.В., Лютов Л.И., Меллина Е.Г., Цельникер Ю.Л., Теблеева У.Ц. Моделирование лесных экосистем / Эксперимент «Убсу-Нур». – М.: Интеллект, 1995. – С.3-50.
2. Будыко М.И. Тепловой баланс земной поверхности. – Л.: Гидрометеоздат, 1956. – 255 с.
3. Григорьев А.А. Закономерности строения и развития географической среды. – М.: Мысль, 1966. – 382 с.
4. Докучаев В.В. Избранные труды. / Под ред. акад. Б.Б. Польшова. – М.: Изд-во АН СССР, 1949. – 643 с.
5. Мустафаев Ж.С. Методологические и экологические принципы мелиорации сельскохозяйственных земель. – Тараз, 2004. – 306 с.
6. Мустафаев Ж.С. Почвенно-экологическое обоснование мелиорации сельскохозяйственных земель в Казахстане. – Алматы: Гылым, 1997. – 358 с.

7. Теблеева У.Ц. Интегральная математическая модель геосистемы Центрально-азиатского региона // Известия АН. Серия географическая. – 2000. – №1. – С. 94-101.
8. Теблеева У.Ц. Функциональные модели эко- и геосистем различного иерархического уровня. – М.: Институт географии РАН, 1995. – 175 с.
9. Шабанов В.В. Влагообеспеченность яровой пшеницы и ее расчет. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 142 с.

Поступила 23.10.2013

Техн. ғылымд. докторы	Ж.С. Мустафаев
Техн. ғылымд. докторы	Ә.Т. Қозыкеева
Экон. ғылымд. канд.	К.Ж. Мустафаев

ТАБИҒИ ЖҮЙЕНІҢ ҚЫЗМЕТТІК МАТЕМАТИКАЛЫҚ ҮЛГІСІ

Мақалада табиғи жүйенің жылумен және ылғалмен қамтамасыздығын бейнелеу мәселелері және олардың негізінде климаттың өзгеруі кезінде Қазақстанның негізгі табиғи аймақтарының жұмыс істеу заңдылықтары анықталған.