

РОСТ И РАЗВИТИЕ РАСТЕНИЙ НА ПАСТБИЩАХ АРИДНОЙ ЗОНЫ И ВОПРОС ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ (НА ПРИМЕРЕ ИСКУССТВЕННО СОЗДАНЫХ МОДЕЛЕЙ)

С. Ю. ТУРКО, кандидат сельскохозяйственных наук, научный сотрудник,

К. Ю. ТРУБАКОВА, аспирант, инженер-исследователь,

Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН (400062 г. Волгоград, пр. Университетский, д. 97; тел.: 8 961 064-31-17; e-mail: turkosvetlana73@mail.ru, trubakova.karine@mail.ru)

Ключевые слова: биомасса, изъятие (выпас), коэффициент оптической плотности растений, коэффициент растительного экрана, испарение, модель, факторы.

В пастбищной проблеме очень важным является учет нагрузки и время выпаса животных. В статье подробно рассматриваются эти вопросы и даются соответствующие математические зависимости, касающиеся их дальнейшего развития. Установлен характер формирования растительного покрова на пастбищах различного сезона использования с вводом перспективных видов травосмесей злаковых, злаково-бобовых и злаково-полюнно-бобовых трав Ставропольской селекции. При этом использовались следующие травосмеси: житняк (*Agropyron cristatum L.*) + пырей удлиненный (*Agropyrum elangatum*) + коостер безостый (*Bromus inermis*), житняк (*Agropyron cristatum L.*) + овсяница луговая (*Festuca pratensis Huds.*) + люцерна (синяя) (*Medicago sativa L.*), житняк (*Agropyrum elangatum*) + полынь песчаная (*Artemisia arenaria*) + люцерна (синяя) (*Medicago sativa L.*). Приводятся конкретные данные о росте растений и математический аппарат для расчета параметров растительного экрана. Подробно путем математического моделирования изучен испарительный процесс в рамках продукционной составляющей растительного покрова. Исследования показали, что изъятие части биомассы не должно превышать 1/3 от общего количества. В противном случае пастбища неотвратно будут деградировать. Важно также правильно выбирать время изъятия части биомассы. Опыты показывают, что оно должно выбираться с учетом максимального прироста биомассы и кормовой ценности растений. Подобранные смеси трав для разных категорий пастбищ показали хорошие результаты как по части продуктивности, так и по части устойчивости в аридной зоне страны. Новизна исследований состоит в установлении закономерностей развития растений в искусственных кормовых фитоценозах и влияния удобрений на биоценотические процессы, продуктивность и качество кормовых ценозов в условиях сухой степи.

GROWTH AND DEVELOPMENT OF PLANTS ON PASTURES IN ARID ZONE AND QUESTION OF THEIR EXPLOITATION (ON THE EXAMPLE OF ARTIFICIALLY CREATED MODELS)

S. Yu. TURKO, candidate of agricultural sciences, researcher,

K. Yu. TRUBAKOVA, postgraduate student, research engineer,

Federal scientific center for agro-ecology, integrated land reclamation and protective forestation of RAS (97 Universitetskiy av., 400062, Volgograd; phone: 8 961 064-31-17; e-mail: turkosvetlana73@mail.ru, trubakova.karine@mail.ru)

Keywords: biomass, seizure (grazing), coefficient of optical density of plants, coefficient of vegetation screen, evaporation, model, factors.

In the pasture problem, it is very important to take into account the load and time of grazing animals. The article discusses these issues in detail and provides relevant mathematical dependencies related to their further development. The nature of the formation of vegetation on pastures of different season of use with the introduction of promising species of grass mixtures of cereals, cereals and legumes, and cereals, wormwood and legumes of the Stavropol breeding has been established. Tests were passed by grass mixtures – *Agropyron cristatum L.* + *Agropyrum elangatum* + *Bromus inermis*; *Agropyron cristatum L.* + *Festuca pratensis Huds.* + *Medicago sativa L.*; *Agropyrum elangatum* + *Artemisia arenaria* + *Medicago sativa L.* Concrete data on plant growth and a mathematical apparatus for calculating the parameters of a vegetative screen are given. In detail, by mathematical modeling, the evaporative process has been studied within the framework of the production component of vegetation. Studies have shown that the removal of part of the biomass should not exceed 1/3 of the total. Otherwise, pastures will inevitably degrade. It is also important to choose the right time for removal of part of the biomass. Experiments show that it should be selected taking into account the maximum increase in biomass and feed value of plants. Selected mixtures of herbs for different categories of pastures showed good results, both in terms of productivity, and in terms of sustainability, in the arid zone of the country. Novelty of researches consists in establishment of regularities of development of plants in artificial fodder phytocoenoses and influence of fertilizers on biocoenotic processes, productivity and quality of fodder prices in conditions of dry steppe.

Положительная рецензия представлена В. В. Бородычевым, академиком РАН, доктором сельскохозяйственных наук, профессором, директором Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники и мелиорации им. А. Н. Костякова.

Цель и методика исследований

Целью исследований с учетом жестких климатических условий и малогумусированных почв, которые часто встречаются на юго-востоке Европейской части РФ, было выявление лучшего времени производства выпаса скота (изъятия биомассы), при этом важно не забывать, что чрезмерное изъятие биомассы может нанести вред растительному покрову пастбища. Отсюда важно знать, сколько можно изымать биомассы с позиций нанесения меньшего вреда пастбищу.

Для создания фоновой картины моделей аридных пастбищных экосистем на основных полупустынных и пустынно-степных почвенных субстратах нами были созданы в 2015 г. имитационные лизиметрические модели мелиорированных пастбищ. Опыты закладывались на имитационных площадках лизиметрического комплекса ФНИЦ агроэкологии РАН для физического моделирования весенне-летних, летних и летне-осенних пастбищ. Размер участка на каждом пастбище 1,2×1,7 м. При этом использовались следующие травосмеси: житняк (*A. cristatum*) + пырей удлиненный (*A. elangatum*) + костер безостый (*B. inermis*): (ж + пр + к); житняк (*A. cristatum*) + овсяница луговая (*F. pratensis*) + люцерна (синяя) (*M. sativa*): (ж + о + л); житняк (*A. cristatum*) + полынь песчаная (*A. arenaria*) + люцерна (синяя) (*M. sativa*): (ж + пл + л). При подборе травосмесей учитывались засухоустойчивость, долговечность, урожайность, питательная ценность видов, т. к. травостой на пастбищах должен состоять из различных растений обеспечивающих устойчивость урожаев в случае неблагоприятных условий, а при повреждении одних видов другие должны их компенсировать [1, 2, 3].

Норма высева для трав Ставропольской селекции из расчета 10 кг/га, овсяницы луговой – 14 кг/га, для кохии простертой – 8 кг/га, полыни белой – 8 кг/га, полыни черной – 6 кг/га, полыни песчаной – 6 кг/га, люцерны – 8-12 кг/га. Соотношение видов 1:1:1. Повторность трехкратная. Посевы проводились на черноземовидных супесчаных субстратах, а также на Кумских и Бажиганских песках.

На всех моделях комплексных пастбищ в трехкратной повторности учитывались высота растений по фенологическим фазам, на неудобренном и удобренном фонах (при разных дозах изъятия биомассы растений); фитомасса в конце вегетации растений. Урожайность фитоценоза определялась укосным методом в трехкратной повторности на учетной площадке 1 м².

В качестве удобрений использовался комплексный препарат нитроаммофоска (NPK 16:16:16). Норма внесения была взята 20 г на 1 м². За вегетацию внесение проводилось 1 раз, первое внесение удобрений проводилось сразу после изъятия части биомассы, под выпадающие осадки.

Разработка моделей прогноза продуктивности природных пастбищ при разном изъятии биомассы путем обрезки осуществлялась исходя из двух моментов: общефизических законов продуцирования растений и результатов имитационных лизиметрических опытов по отрастанию растений при различной норме изъятия биомассы. Обрезка растений без удобрений и с удобрениями производилась одинаково на 1/3, 1/2, и 2/3 их высоты, начиная с середины мая.

При построении моделей и аппроксимациях использовались общепринятые принципы, с учетом работ Морли, Ной-Мейера и Броэма [4].

Результаты и их обсуждение

Основой ведения животноводства в условиях сухой степи является полноценная кормовая база. Для овцеводства и мясного скотоводства это высокопродуктивные пастбища и сенокосы, созданные на основе современных интенсивных технологий, требующие меньших затрат труда, средств и времени. Однако рентабельное устойчивое сельскохозяйственное природопользование на юго-востоке Европейской части РФ затрудняется по причине дефицита влаги и низкого плодородия почв – каштановых и светло-каштановых солонцеватых и солончаковых комплексных.

Вполне естественно, что в мире была сделана не одна попытка создания единой теории управления такой сложной системой как пастбище. В основном вся работа за рубежом была направлена на увязку двух компонентов – роста растений и нормы выпаса. Мы каждому компоненту уделяли большое внимание. Нужно отметить и то, что в основном теоретические работы по пастбищам проводились за рубежом, к тому же они были связаны с гумидными условиями. Хотя проблема очень важная и серьезная, поскольку касается управленческих решений и прогнозов на перспективу [5].

Что же касается аридной зоны, то серьезных работ по пастбищной тематике проводилось достаточно много [6, 7, 8, 9]. Однако во всех этих исследованиях не акцентировалось внимание на характер и закономерность отрастания растений после изъятия части их биомассы. Наши же исследования показывают, что это отрастание зависит от объема изъятия биомассы и времени этого изъятия. Несоблюдение этих закономерностей приводит со временем к ухудшению травостоя. В статье показывается выявление закономерностей этого ухудшения, что и является актуальным. На пастбищах в аридной зоне целесообразно иметь злаково-бобовый травостой, т. к. такие травосмеси лучше, чем одновидовые посевы, используют почвенно-климатический потенциал, более устойчивы к болезням и более продуктивны, дают сбалансированный по белку и энергии корм с низкой себестоимостью [10].

Таблица 1
Значения коэффициента оптической плотности ($K_{оп}$) растений на разного вида пастбищах
Table 1
Values of the coefficient of optical density of plants on different types of pastures

№ лизиметра Number of lysimeter	Вид пастбища Pasture species	Состояние почвы Soil condition	Среднее значение $K_{оп}$ Average value $K_{оп}$	Среднее значение $K_{оп}$ по лизиметру Average value $K_{оп}$ of the lysimeter	Среднее значение $K_{оп}$ по комплексу Average value $K_{оп}$ of the complex
№ 6 No. 6	Весенне-летнее Spring-summer	Без удобрений Without fertilizer	0.125	0.191* 0.199	
		С удобрениями With fertilizers	0.125		
	Летнее Summer	Без удобрений Without fertilizer	0.202		
		С удобрениями With fertilizers	0.228		
	Летне-осеннее Summer-autumn	Без удобрений Without fertilizer	0.247		
		С удобрениями With fertilizers	0.244		
№ 13 No. 13	Весенне-летнее Spring-summer	Без удобрений Without fertilizer	0.060	0.10 0.12	0.150* 0.153
		С удобрениями With fertilizers	0.066		
	Летнее Summer	Без удобрений Without fertilizer	0.138		
		С удобрениями With fertilizers	0.200		
	Летне-осеннее Summer-autumn	Без удобрений Without fertilizer	0.095		
		С удобрениями With fertilizers	0.091		
№ 15 No. 15	Весенне-летнее Spring-summer	Без удобрений Without fertilizer	0.106	0.16 0.14	
		С удобрениями With fertilizers	0.154		
	Летнее Summer	Без удобрений Without fertilizer	0.188		
		С удобрениями With fertilizers	0.083		
	Летне-осеннее Summer-autumn	Без удобрений Without fertilizer	0.237		
		С удобрениями With fertilizers	0.176		

Примечание. *числитель – без удобрений; знаменатель – с удобрениями.
Note. *numerator – without fertilizers; denominator – with fertilizers.

В более ранних наших исследованиях [11] было обнаружено, что при изъятии части биомассы с ценноза растения, его составляющие, замедляют свой дальнейший рост, причем, чем больше изымается биомассы, тем это замедление выше. Отсюда следует важность роли нагрузки на пастбище в деградации последней. А это значит, что необходимо соизмерять потребности животных в корме, время выпаса и количество изымаемой растительности. Наши исследования показали, что это изъятие не должно превышать 25–39 % даже при использовании удобрений (рис. 1).

В противном случае пастбища неотвратимо будут деградировать. Важно также правильно выбирать время изъятия части биомассы. опыты показывают, что оно должно выбираться с учетом максимального прироста биомассы и кормовой ценности растений.

Это примерно в середине вегетации растений, т. е. в период $(0.4 \div 0.5) \cdot t_b$, где t_b – период вегетации растений, (сутки).

Что же касается нагрузки на пастбище, то здесь нужно исходить из двух показателей: нормы, необходимой для нормального существования животного и количества животных на пастбище, с учетом изымаемой биомассы растений. Теоретически, значение биомассы в момент выпаса скота $q_{\phi}(t)$ представим следующим образом:

$$q_{\phi}(t) = 31.5 \cdot K_{он}(t) \cdot [H(t)]^{0.5} \cdot m_u, \quad (1)$$

где $K_{он}(t)$ – оптическая плотность растительного экрана в период вегетации растений; t – временной фактор (сутки); $H(t)$ – высота растений при временном факторе равном t ; m_u – норматив изымаемой биомассы (должен быть не более 0,25–0,39).

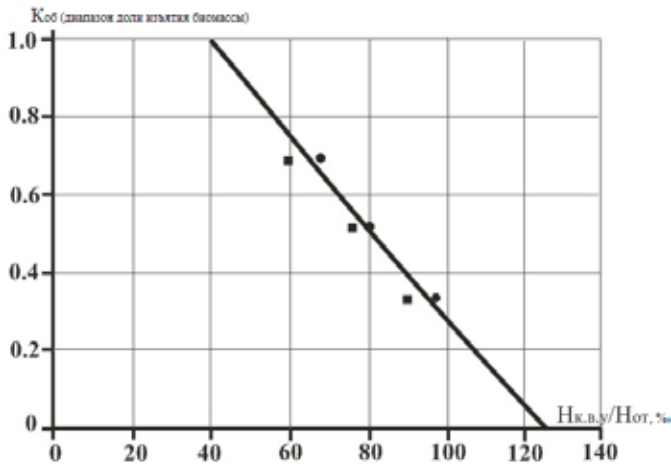


Рис. 1. Зависимость отношения высоты растений на удобренном $H_{к.в.у.}$ и неудобренном $H_{от}$ фонах в конце вегетации от доли изъятия биомассы $K_{об}$.

По горизонтали – $H_{к.в.у.}/H_{от}$ – максимум высоты растений в конце вегетации на удобренном и неудобренном фонах, %; по вертикали – $K_{об}$ – доля изъятия биомассы, %

Fig. 1. The dependence of the ratio of the height of plants fertilized $H_{к.в.у.}$ and inconvenient $H_{от}$ backgrounds at the end of the growing season from the biomass withdrawal share $K_{об}$.

X-axis – $H_{к.в.у.}/H_{от}$ – maximum height of plants in causes vegetation on fertilized and unfertilized backgrounds, %.
Y-axis – $K_{об}$ – biomass withdrawal share, %

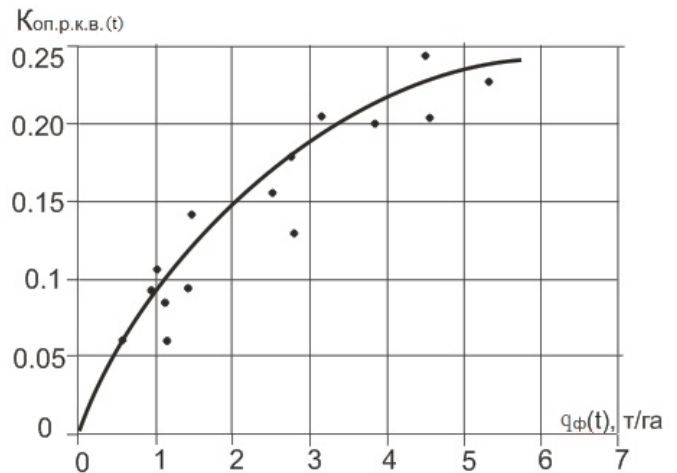


Рис. 2. Связь между коэффициентом оптической плотности растительного экрана $K_{оп.р.к.в.}(t)$ и урожайностью трав $q_{ф}(t)$ в лизиметрических опытах.

По горизонтали – $q_{ф}(t)$ – урожайность трав, т/га; по вертикали – $K_{оп.р.к.в.}(t)$ – коэффициент оптической плотности растительного экрана, %

Fig. 2. The relationship between the coefficient of optical density of the plant screen $K_{оп.р.к.в.}(t)$ and the yield of herbs $q_{ф}(t)$ in lysimetric experiments.

X-axis – $q_{ф}(t)$ – yield of herbs, tonnes per hectare. Y-axis – $K_{оп.р.к.в.}(t)$ – ratio of optical density of the plant screen, %

В этом уравнении неизвестными являются: $K_{оп}(t)$, $H(t)$. Используя полученные на экспериментальных площадках данные, было установлено, что период вегетации параметр $K_{оп}(t)$ можно найти из соотношения, включающего два компонента – коэффициент оптической плотности самих растений $K_{оп.р.}(t)$ и коэффициент покрытия почвенной поверхности растениями $K_{покр.}(t)$. С точки зрения математики это выглядит следующим образом:

$$K_{оп.}(t) = K_{оп.р.}(t) \cdot K_{покр.}(t), \quad (2)$$

где $K_{оп.р.}(t)$ – коэффициент оптической плотности отдельных растений растительного экрана; $K_{покр.}(t)$ – коэффициент покрытия почвенной поверхности растениями.

Для того чтобы раскрыть зависимость (2), были поставлены специальные опыты и проведено теоретическое обобщение полученных данных (табл. 1).

Что же касается параметра $K_{покр.}(t)$, то его значения, приведены ниже (табл. 2).

Как видно из табл. 1, основное влияние на показатель $K_{оп.р.}(t)$ оказывают условия произрастания растений, а точнее условия питания. На лизиметре № 6 они лучше и поэтому $K_{оп.р.}(t)$ здесь больше. Мы попытались связать этот показатель с урожайностью трав, которая также зависит от условий вегетационного периода и плодородия почв. Такое мероприятие было нами осуществлено, и результаты его представлены на рис. 2.

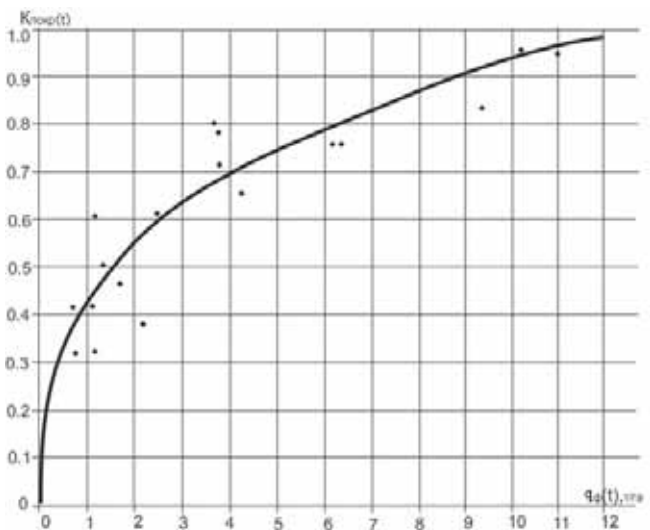


Рис. 3. Связь между коэффициентом покрытия почвенной поверхности растениями $K_{покр.}(t)$ и урожайностью растений $q_{ф}(t)$, в лизиметрических опытах.

По горизонтали – $q_{ф}(t)$ – урожайность трав, т/га; по вертикали – $K_{покр.}(t)$ – коэффициент покрытия почвенной поверхности растениями, %

Fig. 3. The relationship between the ratio of soil surface plants $K_{покр.}(t)$ and the yield of herbs $q_{ф}(t)$ in lysimetric experiments.

X-axis – $q_{ф}(t)$ – yield of herbs, tonnes per hectare. Y-axis – $K_{покр.}(t)$ – ratio of soil surface coverage by plants, %

Как видим, связь, показанная на рис. 2 близка к параболической, что вытекает из гипотезы, что $\frac{dq_{ф}(t)}{dK_{оп.р.}(t)} = K_{ф}^1 * K_{оп.}(t)$. Интегрирование этого выражения дает:

$$K_{оп.р.}(t) = K_{ф} \cdot q_{ф}(t)^{0.5} + C, \quad (3)$$

где $K_{ф} = 0.1$; $C = 0$.

Таблица 2

Коэффициент покрытия и коэффициент оптической плотности на лизиметрах ФНЦ агроэкологии РАН

Table 2

Coating coefficient and optical density coefficient on the lysimeter of the Federal Scientific Center for Agroecology of the RAS

№ лизиметра Number of lysimeter	Показатели Indicators							
	Коэффициент покрытия Coverage ratio						Коэффициент оптической плотности растительного экрана Plant screen optical density ratio	
	Время измерения Measurement time							
	15 мая 15 may		15 июня 15 june		15 июля 15 july		Конец вегетации End of vegetation	
Без удобрений Without fertilizer	С удобрениями With fertilizer	Без удобрений Without fertilizer	С удобрениями With fertilizer	Без удобрений Without fertilizer	С удобрениями With fertilizer	Без удобрений Without fertilizer	С удобрениями With fertilizer	
№ 6 No. 6	Весенне-летнее пастбище Spring-summer pasture							
	0.70	0.80	0.60	0.65	0.60	0.65	0.125/0.075*	0.125/0.081*
	Летнее пастбище Summer pasture							
	0.75	0.90	0.70	0.75	0.70	0.75	0.202/0.142	0.228/0.171
№ 13 No. 13	Летне-осеннее пастбище Summer-autumn pasture							
	0.75	0.90	0.60	0.70	0.60	0.70	0.247/0.148	0.244/0.171
	Весенне-летнее пастбище Spring-summer pasture							
	0.40	0.60	0.35	0.50	0.35	0.50	0.060/0.020	0.066/0.033
№ 15 No. 15	Летнее пастбище Summer pasture							
	0.50	0.70	0.40	0.50	0.40	0.50	0.138/0.055	0.200/0.100
	Летне-осеннее пастбище Summer-autumn pasture							
	0.50	0.70	0.40	0.45	0.40	0.45	0.095/0.038	0.091/0.041
№ 15 No. 15	Весенне-летнее пастбище Spring-summer pasture							
	0.40	0.60	0.35	0.50	0.35	0.50	0.106/0.037	0.154/0.017
	Летнее пастбище Summer pasture							
	0.50	0.70	0.40	0.60	0.40	0.60	0.138/0.055	0.083/0.050
№ 15 No. 15	Летне-осеннее пастбище Summer-autumn pasture							
	0.60	0.80	0.35	0.50	0.35	0.50	0.237/0.083	0.176/0.088

Примечание: *числитель – коэффициент оптической плотности растений; знаменатель – коэффициент оптической плотности объекта в целом.
Note: *numerator – coefficient of optical density of plants; denominator – coefficient of optical density of the object as a whole.

Аналогично поступили и по $K_{покр}$. Здесь связь между $K_{покр}$ и Y_{ϕ} выглядит следующим образом (рис. 3).

Связь $K_{покр}$ с q_{ϕ} , а точнее ее графическая интерпретация выглядит следующим образом (рис. 3). Это математически можно представить следующим образом:

$$K_{покр}(t) = 0.431 \cdot q_{\phi}^{0.333}(t), \quad (4)$$

где $q_{\phi}(t)$ – урожайность культуры, т/га (в функции времени).

Учитывая зависимость (2) получаем:

$$K_{он}(t) = 0.1 \cdot q_{\phi}^{0.5}(t) \cdot 0.431 \cdot q_{\phi}^{0.333}(t) = 0.0431 Y_{\phi}^{0.833}(t) \quad (5)$$

Что же касается показателя $q_{\phi}(t)$, то он рассчитывается либо по ранее выведенному уравнению (1), либо по уравнению (6). Однако нужно отметить, что в первом случае нужно знать закон изменения высоты растений в функции времени. Во втором случае значения биомассы во временном периоде t $q_{\phi}(t)$ находятся на прямую, и более точно. Однако и здесь необходимо раскрывать функции $I_{фap}(t)$, $K_{фap}(t)$, $\Delta T(t)$, $\Delta W(t)$, b_1 и b_2 , параметры $N_{\phi}(t)$, $P_{\phi}(t)$, $K_{\phi}(t)$, а точнее их изменение во времени (в вегетационный период).

$$q_{\phi}(t) = K_{\phi\phi} \frac{I_{\phi\phi}(t) \cdot K_{\phi\phi}(t)}{100 \cdot q_{k(t)}} \left\{ 1 - b_1 \left[\frac{\Delta T(t)}{T_{\text{опт}}} \right]^2 \right\} \left\{ 1 - b_2 \left[\frac{\Delta W(t)}{W_{\text{опт}}} \right]^2 \right\} \left(\frac{N_{\phi}(t)}{N_{\text{опт}}} \cdot \frac{P_{\phi}(t)}{P_{\text{опт}}} \cdot \frac{K_{\phi}(t)}{K_{\text{опт}}} \right)^m, \quad (6)$$

где $I_{\phi\phi}(t)$ – синтетически активная радиация и характер ее изменения в вегетационный период на рассматриваемой территории, $\left(\frac{\text{ккал}}{\text{г}}$); $q_k(t)$ – калорийность растительной массы во время t $\left(\frac{\text{ккал}}{\text{г}}$); $K_{\phi\phi}(t)$ – коэффициент использования синтетически активной радиации; $K_{\phi\phi}$ – коэффициент, зависящий от типа растительности (биологический компонент); b_1, b_2 – коэффициенты, учитывающие отклонение показателей от оптимума; $\Delta T(t), \Delta W(t)$ – отклонение от оптимума температуры воздуха и влажности почвы (в функции от времени); $N_{\phi}(t), P_{\phi}(t), K_{\phi}(t)$ – фактическое содержание в почве азотного, фосфорного и калийного питания во временном аспекте; $N_{\text{опт}}, P_{\text{опт}}, K_{\text{опт}}$ – оптимальные значения питательных элементов; t – текущие сутки вегетационного периода; m – показатель степени (ориентировочно равный 0,13 или 0,14).

Вполне очевидно, что суточный прирост биомассы будет равен:

$$\Delta q_{\phi}(t) = q_{\phi}(t) - q_{\phi}(t-1), \quad (7)$$

где t – очередные сутки вегетационного периода.

Чтобы найти q_{max} , необходимо знать $\Delta q_{\phi}(t)$ для каждых суток вегетационного периода. Сделать это можно лишь с помощью специальной программы. Такая программа разрабатывается нами, согласно общим требованиям по составлению моделей и программированию.

Проанализируем один из блоков программы – учет $I_{\phi\phi}(t)$, отклонения температурного и влажностного режима воздуха и почвы от оптимального значения, а также изменения режима питания и $K_{\phi\phi}(t)$. В данной статье рассмотрим лишь две позиции из перечисленного – изменение влажности почвы (из-за испарительного процесса) и значения $I_{\phi\phi}(t)$ на конкретной территории.

Изменение влажностного режима почвы будет рассматриваться в несколько упрощенном варианте, а точнее – для случая, когда на почвенной поверхности отсутствует защитный экран (позже покажем и роль растительного экрана в испарительном процессе). Таким образом, сегодняшние разработки можно считать базовыми, т. е. основой для начала функционирования пастбища.

В основе построения данной модели лежит дифференциальное уравнение вида:

$$\frac{dW}{dt} = -K_1 / (t + B), \quad (8)$$

где $\frac{dW}{dt}$ – производная изменения влаги в почвенном слое 0-100 см; B – коэффициент, зависящий от свойств почвенного слоя с влагой; t – временной фактор (сутки). Отсчет ведется от начала вегетации.

Разделяя переменные в уравнении (8) и производя интегрирование, получают:

$$W = -K_1 \ln(t + B) + C_1, \quad (9)$$

где W – влага в почвенном слое 0–100 см, (мм); C_1 – постоянная интегрирования неопределенного интеграла.

Принимая граничные условия, т. е. при $t = 0$, $W = W_0$ находим, что величина C равна:

$$C_1 = W_0 + K_1 \ln B \quad (10)$$

где W_0 – влага в почвенном слое 0–100 см в начале вегетации, (мм).

Подставляя значения C_1 в уравнение (9), получаем:

$$W = -K_1 \ln(t + B) + W_0 + K_1 \ln B \quad (11)$$

Свертывая уравнение (11) имеем:

$$W(t) = W_0 - K_1 \ln \left(\frac{t + B}{B} \right), \quad (12)$$

где W_t – влага в почвенном слое 0-100 см на момент времени t , (мм)

Полагая то, что начальное содержание влаги в почве в начале вегетации составляет W_0 , можно с уверенностью утверждать, что за время вегетации растений ($t = t_a$), испарение влаги из почвы в функции t можно рассчитать по уравнению вида:

$$E_{t_a} = W_0 - W_0 + K_1 \ln \left(\frac{t_a + B}{B} \right), \quad (13)$$

где E_{t_a} – испарение влаги из почвы в слое 0–100 см на момент времени t_a , (мм)

Используя наработки А. Р. Константинова, испарение влаги в функции факторов, его определяющих, может находиться с помощью соотношения вида [12]:

$$E = 0.3 DP \cdot de \cdot \gamma_1 \cdot V_1 (e_{0.5} - e_{2.0}) / \ln^2(100 / z_0), \quad (14)$$

где de, γ_1 – коэффициенты, зависящие от свойств испаряющей поверхности и температуры на уровнях 0.5 и 2.0 м, V_1 – скорость ветра на высоте 1 м; DP – коэффициент, учитывающий испаряющие свойства почвенного слоя.

Значения de может быть найдено из соотношения [12]:

$$de = 1 + 0.72 \sqrt{(1 - 28(z_0 - z_{00})R_1 - 1)}, \quad (15)$$

где z_0, z_{00} – соответственно параметр фактической шероховатости почвенной поверхности и параметр, равный 1 см; R_1 – число Ричардсона, определяемое с помощью соотношения вида:

$$R_1 = -0.025(T_{0.5} - T_{2.0}) \ln^2(100 - z_0) / V_1^2, \quad (16)$$

где $T_{0.5}, T_{2.0}$ – осредненная за вегетацию температура воздуха на высоте соответственно 0.5 и 2.0 м; z_0 – параметр шероховатости испаряющей поверхности; V_1 – скорость ветра на высоте 1 м.

Значение коэффициента γ_1 в уравнении находится по формуле А. Р. Константинова,

$$\gamma_1 = 1 / \sqrt[4]{1 - R_1}. \quad (17)$$

Что касается коэффициента K_1 в уравнении испарения влаги, то он зависит от многих факторов, определяющих испарительный процесс [12]. Это и число Ричардсона R_1 , влияющее на значение параметров

de и γ_1 , это и скорость ветра на высоте 1 м (V_1), это и градиент упругости водяного пара ($e_{0.5} - e_{2.0}$) в воздухе над почвенной поверхностью и сама шероховатость последней (z_0). Рассчитать этот коэффициент можно по формуле вида:

$$K_1 = \frac{0.3 \cdot DP \cdot de \cdot \gamma_1 \cdot V_1 (e_{0.5} - e_{2.0})}{\ln^2(100 / z_0)} \quad (18)$$

Значение DP в расчете брать равным 18.6, что соответствует рыхлой почве.

Анализ этого уравнения свидетельствует о том, что при большем градиенте упругости водяного пара в воздухе и большей разнице температуры на уровнях 0.5 и 2.0 м значения коэффициента K_1 оказываются большими. То же происходит с увеличением скорости ветра и с повышением шероховатости подстилающей поверхности. Нужно отметить и то, что градиент температуры и скорость ветра влияют на величину K_1 еще и через коэффициент Ричардсона. Временной фактор как в зависимости для влагозапасов, так и в математической структуре для расчета испарения влаги, стоит под знаком логарифма и влияет на влагообмен по логарифмическому закону.

Расчеты показали, что изменение влагозапасов в почве во временном аспекте суть процесс нелинейный. Конечный результат его неоднозначный. Во-первых, он существенно зависит от приходной части влаги, связанной с выпадающими осадками. А во-вторых, определяется временем выпадения осадков. Причем существенную роль играет также то, насколько равномерно эти осадки выпадают. В связи с этим следует учитывать тот факт, что при смещении приходной части влаги, связанной с осадками, в сторону начала вегетации в пределах вегетационного периода средние из десятидневки влагозапасы в первой части вегетационного периода увеличиваются, а во второй – наоборот, уменьшаются. При смещении же ее в сторону конца вегетации картина наблюдается обратная, т. е. в первой части вегетационного периода влагозапасы снижаются, а во второй – возрастают.

Конечно, возможны и другие расклады по временным периодам. Все зависит от характера периодичности пополнения влаги в почве, связанной с выпадающими осадками. Иначе говоря, конечный результат по влагозапасам есть функция нескольких факторов – начальных значений влагозапасов, того или иного характера временного их распределения и пополнения. Несомненно, он имеет вероятный характер, т. е. строго не детерминирован. Отсюда коэффициент водопотребления брать за оценочный показатель, как это делается сейчас, при определении водопотребления растениями, мягко говоря, рискованно, а точнее ошибочно. Это рискованно также и потому, что этот показатель может влиять ещё и на растительный экран. Более того, влияние растительного экрана, как правило, зависит также от его па-

раметров. Но это уже другая сфера научной проработки. Следует отметить один очень важный момент, что в предлагаемой модели использованы общетеоретические представления о динамике влагозапасов в почве и слабо интерпретирован такой параметр, как DP. Отсюда дальнейшие исследования должны быть направлены именно на его раскрытие, учитывая различные почвы, а также на установление пределов его вариации, в зависимости от технологических операций, при обработке различных по генезису почв. И последнее, касающиеся зависимости $I_{\text{фар}}$ от широты и долготы местности. Ее можно установить, основываясь на работу М. К. Каюмова [13].

Выводы. Рекомендации

Более ранние наши исследования показали, что изъятие части биомассы растений при их скармливании животным само по себе способствует деградиционным процессам растительного покрова пастбищ. Это касается биомассы, высоты и семенного возобновления фитоценозов. Отсюда возникла необходимость установления нагрузки на пастбища в зависимости от складывающихся погодных условий вегетационного периода, типа пастбищ и факторов плодородия почв пастбищ. Приведенные в статье результаты могут объективно способствовать правильной стратегии по данному вопросу уже на сегодняшнем этапе. Подобранные нами смеси трав для разных категорий пастбищ показали хорошие результаты как по части продуктивности, так и по части устойчивости, в аридной зоне страны. Они вполне могут обогатить пастбища аридной зоны.

Важнейшим условием успешного функционирования пастбищ является разработка прогнозирования физико-географических процессов на пастбищах аридной территории. Это позволит в какой-то мере контролировать состояние пастбищ и даст возможность оценивать, предвидеть те изменения, которые могут происходить. Дальнейшие направления исследований необходимо нацелить на раскрытие функций $I_{\text{фар}}(t)$, $K_{\text{фар}}(t)$, $\Delta T(t)$, $\Delta W(t)$ и $N_{\phi}(t)$, $P_{\phi}(t)$, $K_{\phi}(t)$ в период вегетации растений на разных почвенных субстратах при изменяющихся климатических факторах и питания. Определенные усилия должны быть направлены также на прогнозы погоды и компьютерное моделирование по пастбищной тематике. Это даст возможность организовать предохранительные мероприятия на случаи резких колебаний погоды и возникновения засух.

Большие работы предстоят и по влиянию растительного экрана на испарительный процесс, т. е. на фактор $\Delta W(t)$, поскольку последний в функции времени определяет объемы биомассы и коэффициент использования ФАР.

Выпас скота лучше всего производить в период наибольшего прироста растений, а норма изъятия не должна быть более 25–39 % (по биомассе).

Литература

1. Турко С. Ю., Трубакова К. Ю. Математическое моделирование в оптимизации использования пастбищ // Вестник Башкирского ГАУ. 2017. № 2 (42). С. 30–34.
2. Власенко М. В., Турко С. Ю. Методическая основа исследования влияния эдафического фактора на биоценотические процессы в искусственных кормовых ценозах // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2015. № 1 (57). С. 104–110.
3. Зволинский В. П. [и др.] Технология создания устойчивых кормовых фитоценозов в условиях орошения Северо-Западного Прикаспия // Адаптивное кормопроизводство. 2016. № 1. С. 70–79.
4. Турко С. Ю., Трубакова К. Ю. Математическое моделирование в оптимизации использования пастбищ // Вестник Башкирского ГАУ. 2017. № 2 (42). С. 30–34.
5. Гасанов Г. Н. [и др.] Видовой состав и продуктивность луговых фитоценозов горы маяк (Гунибское плато, республика Дагестан) // Растительные ресурсы. 2016. № 52 (2). С. 214–224.
6. Тубалов А. А., Вдовенко А. В., Кравченко А. С. Оценка состояния растительного и почвенного покровов аридных пастбищных ландшафтов // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2014. № 1 (33). С. 91–96.
7. Власенко М. В., Кулик А. К. Современное состояние степной растительности Придонских песчаных массивов // Аграрная Россия. 2017. № 9. С. 22–29.
8. Кулик К. Н., Салугин А. Н. Моделирование дефляции аридных пастбищ с помощью марковских цепей // Экосистемы: экология и динамика. 2017. № 1 (4). С. 5–22.
9. Кулик К. Н. К 30-летию Генеральной схемы по борьбе с опустыниванием черных земель и кизлярских пастбищ // Аридные экосистемы. 2018. Т. 24. № 1 (74). С. 5–12.
10. Лукашов В. Н. Роль многолетних бобовых трав в системе кормопроизводства // Кормопроизводство. 2001. № 6 С. 18–22.
11. Турко С. Ю., Власенко М. В., Кулик А. К. Математическое моделирование роста и развития кормовых трав на аридных пастбищах // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2016. № 1 (41) С. 219–228.
12. Константинов А. Р. Испарение в природе. – Л. : Гидропримиздат, 1968. – 532 с.
13. Каюмов М. К. Программирование продуктивности полевых культур. – М. : Росагропромиздат, 1989. – 368 с.

Refernces

1. Turko S. Yu., Trubakova K. Yu. Mathematical modeling for pasturing // Vestnik BSAU. 2017. No. 2 (42). Pp. 30–34.
2. Vlasenko M. V., Turko S. Yu. Methodological basis for the study of the influence of the edaphic factor on biocenotic processes in artificial forage cenoses // The ways of increasing efficiency of irrigated agriculture. 2015. No. 1 (57). Pp. 104–110.
3. Zvolinskiy V. P. Technology of creation of stable fodder phytocenosis in conditions of irrigation of the northwest Caspian Sea // Adaptive Fodder Production. 2016. No. 1. Pp. 70–79.
4. Turko S. Yu., Trubakova K. Yu. Mathematical modeling in optimization of use of pastures // Vestnik BSAU. 2017. No. 2 (42). Pp. 30–34.
5. Gasanov G. N. Species composition and productivity of meadow plant communities of Mayak mountain (Gunib Plateau, Dagestan) // Plant resources. 2016. No. 52 (2) Pp. 214–224.
6. Tubalov A. A., Vdovenko A. V., Kravchenko A. S. Assessment of the plant and soil cover of arid pasture landscapes // Proceedings of the Lower Volga agrodiversity complex: science and higher vocational education. 2014. No. 1. (33). Pp. 91–96.
7. Vlasenko M. V., Kulik A. K. The current state of steppe vegetation of the Don sandy massifs // Agrarian Russia. 2017. No. 9. Pp. 22–29.
8. Kulik K. N., Salugin A. N. Modeling deflation of arid ecosystems with Markov chains // Ecosystems: Ecologies and Dynamics. 2017. No. 1 (4). Pp. 5–22.
9. Kulik K. N. On the 30th Anniversary of the General Plan to Combat Desertification of Black Lands and Kizlyar Pastures // Arid Ecosystems. 2018. T. 8. No. 1. Pp. 5–12.
10. Lukashov V. N. The role of perennial legumes in the feed production system // Fodder Production. 2001. No. 6. Pp. 18–22.
11. Turko S. Yu., Vlasenko M. V., Kulik A. K. Mathematical modeling of growth and development of forage grasses on arid pastures // Proceedings of the Lower Volga agrodiversity complex: science and higher vocational education. 2016. № 1 (41) P. 219–228.
12. Konstantinov A. R. Evaporation in nature. – Leningrad, 1968. – 532 p.
13. Kayumov M. K. Programming the productivity of field crops. – M. Rosagropromizdat, 1989. – 368 p.