

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР ИМ. А.А. ДОРОДНИЦЫНА
СООБЩЕНИЯ ПО ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКЕ

С.ДЭМБЭРЭЛ, Н.Н.ОЛЕНЕВ, И.Г.ПОСПЕЛОВ

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ОТРАСЛИ ЖИВОТНОВОДСТВА И
СТЕПНОЙ ЭКОСИСТЕМЫ

Вычислительный центр им. А.А. Дородницына РАН
МОСКВА

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР ИМ. А.А. ДОРОДНИЦЫНА
СООБЩЕНИЯ ПО ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКЕ

С.ДЭМБЭРЭЛ, Н.Н.ОЛЕНЕВ, И.Г.ПОСПЕЛОВ

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ОТРАСЛИ ЖИВОТНОВОДСТВА И
СТЕПНОЙ ЭКОСИСТЕМЫ

Вычислительный центр им. А.А. Дородницына РАН
МОСКВА 2003

УДК 519.86

Ответственный редактор
действительный член РАН А.А. Петров

Представлены новые результаты математического моделирования взаимодействия экономических и экологических процессов. Предложена модель взаимного влияния животноводства - одной из двух главных отраслей сельского хозяйства - и природных пастбищ, которые являются существенной составляющей кормовой базы животноводства. Приведены результаты численных экспериментов и анализ различных сценариев развития отрасли животноводства.

Работа частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (код проекта 01-01-00114) и программой государственной поддержки ведущих научных школ (код проекта 00-15-96118).

This paper presents new results of mathematical modeling of economy and environment interaction . A model of mutual interaction of livestock farming - one in a two main agricultural branches - and natural pastures that are the essential part of livestock farming forage reserve is proposed. Results of numerical experiments and analysis of various scripts of livestock farming is described.

The work is in part supported by the Russian Foundation of Basic Research (Grant 01-01-00114) and the Program of State Support of Leading Scientific Schools (Grant 00-15-96118).

Рецензенты: Ю.Н. Павловский,
А.А. Шананин

Научное издание

© Вычислительный центр имени А.А. Дородницына РАН, 2003

1 Экологический императив и коэволюция природы и общества

В начале прошлого века В.И. Вернадский [1] поставил вопрос о "перестройке биосферы в интересах свободного мыслящего человечества как единого целого" и назвал ноосферой такое состояние биосферы и общества, при котором разум человека будет определять развитие и природы, и общества. Четверть века назад Н.Н. Моисеев и его ученики [2, 3] в результате изучения компьютерной модели воздействия человеческой деятельности на биосферу пришли к понятию экологического императива, как условий, необходимых для обеспечения коэволюции природы и общества, условий, которые будет способен определить человеческий разум, а коллективная воля людей способна будет обеспечить пути для перехода в эпоху ноосферы.

Предлагаемая работа завершает начатое в [4, 5, 6] описание эколого-экономической модели, учитывающей специфику сельского хозяйства, а именно: взаимодействие отрасли животноводства и лугопастбищной (степной) экосистемы. В настоящей работе мы изучаем воздействие человеческой деятельности на степную экосистему и ищем условия, обеспечивающие благоприятную эволюцию этой экосистемы. Здесь мы строим модель экосистемы, основанную на описании кругооборота углерода в степной экосистеме, исследуем поведение модели экосистемы при различных сценариях антропогенного воздействия на нее. Для описания процессов в степной экосистеме используется предложенная нами модификация модели углеродного цикла в экосистеме, подверженной внешним воздействиям [7, 8].

В основе экономического блока модели лежит описание модели отрасли животноводства [4]. В [4] на основе последовательного микроописания жизненного цикла животных, дифференцированных по возрасту (возрастных когорт), получено описание динамики поголовья и технологии животноводства. Найдено условие, определяющее оптимальный возраст продажи животных в условиях,

допускающих получение кредита на закупку молодняка. Доказано существование равновесной цены молодняка, при которой задача экономически рационального поведения животноводческого хозяйства распадается на задачи управления отдельными возрастными когортами. Получены макросоотношения, определяющие выпуск отрасли животноводства, максимальный объем предоставляемого кредита и объем собственных средств, затрачиваемых на закупку молодняка.

Замыкает описание эколого-экономической модели описание механизмов регулирования экологических последствий экономической деятельности, которое ложится на государственные и общественные институты. Если использовать современные информационные технологии оценки экологических последствий экономической политики, то необходимо явным образом учитывать сложившиеся в обществе специфические экономические механизмы регулирования, через которые проявляются государственные решения.

Традиционное отгонное пастбищное животноводство не требует больших затрат труда, однако существенно зависит от внешних метеорологических условий и оказывает огромное влияние на травяную степную экосистему, вызывая при неумеренной нагрузке ее деградацию. В Монголии и ряде других стран (Ботсвана, Уругвай, Аргентина, Австралия, Новая Зеландия) пастбищное животноводство является ведущей отраслью экономики. Кроме того, пастбищное животноводство обладает главной особенностью животноводческой отрасли сельского хозяйства, которое надо явным образом отразить в модели. Сельскохозяйственные животные являются и основными производственными фондами, и конечным продуктом отрасли, поэтому здесь цикл производства совпадает с циклом воспроизводства и существенно дольше, чем цикл производства в растениеводстве или в промышленности. Он дольше и цикла восстановления природных растительных ценозов.

Параметры полученной модели идентифицируются на стати-

стических данных Монголии последнего времени. В современной экономике Монголии доминирующее положение занимают две сырьевые отрасли: животноводство и добыча полезных ископаемых [4]. Две основных отрасли сырьевого сектора практически не взаимодействуют друг с другом и поэтому могут изучаться по отдельности, если мы сделаем соответствующее расщепление банковской системы и домашних хозяйств. Пастбищное животноводство оказывает основное влияние на окружающую среду в Монголии, имея непосредственный контакт со степной экосистемой. Экосистема Монголии представляет собой набор довольно неоднородных как по водно-температурному режиму, так и по высотному положению ультраконтинентальных степных биогеоценозов, меняющихся в широтном направлении и ограниченных на севере таежными лесами и горами, а на юге пустыней Гоби. Использование идентифицированной модели дает возможность численно исследовать сложную взаимосвязь животноводческого комплекса Монголии и окружающей среды.

2 Степная экосистема под внешними воздействиями

Степями называют континентальные экосистемы Евразии с преобладанием травяной растительности. Особенностью степей является постоянная изменчивость внешних условий. Климатические параметры (такие как температура и влажность), характеристики растительного и животного мира степей (биомасса и численность особей) в течение суток, от сезона к сезону, а для ультраконтинентальных степей Монголии и от года к году колеблются в более широких пределах, чем у любой другой экосистемы мира. Само географическое положение монгольских степей на стыке южно-сибирских, центрально-азиатских и прихинганских ландшафтов обусловило экотонный характер степных ландшафтов Монголии. Удаленность срединных частей страны от океанов и морей, закрытость их от влияния влагопереносящих потоков при высоком

высотном положении (гипсометрическом уровне) определяют суровость природных условий Монголии. Она связана, прежде всего, с резко-континентальным климатом, основными чертами которого являются значительные суточные и годовые амплитуды температур, малое количество атмосферных осадков и большая сухость воздуха, преобладание в течение года ясного неба, холодная и малоснежная зима, а также сильная многолетняя изменчивость метеорологических характеристик [9]. Для исследования воздействия на степные экосистемы человеческой деятельности будем рассматривать более длительные процессы с характерными временами в несколько лет. Такое рассмотрение даст нам возможность исследовать влияние пастбищного животноводства на степные экосистемы.

Начиная с работы В.А. Костицына [10] описание биогеохимических циклов биогенных элементов кладут в основу моделирования природных экосистем. Например, в работе [7] в основе модели экосистемы, подверженной внешним воздействиям, лежит описание круговорота углерода в лесной экосистеме. Разнообразные глобальные и локальные модели, основанные на описании круговорота углерода, были разработаны и успешно используются группой под руководством профессора А.М. Тарко [8, 11] при изучении различных экосистем.

Для исследования качественных особенностей эволюции степной экосистемы возьмем модификацию динамического варианта модели экосистемы [7]. Модель [7] не изменила сути потоковой модели [8, 12], заменив громоздкие формулы для потоков более простыми. Такое описание, сохранив качественные свойства исходной модели, позволяет дать четкую физическую интерпретацию каждому параметру, позволяет в явном виде сформулировать исходные предположения, что делает модель открытой для критики.

Блок "Экосистема" модели описывает в каждый момент времени t оборот углерода между следующими компонентами степной экосистемы: запас углерода в зеленой фитомассе травяной

растительности $G(t)$, запас углерода в корневой системе растительности $W(t)$, запас углерода в подстилке $V(t)$, запас углерода в гумусе (перегное) $U(t)$. Внешние воздействия на эту экосистему в каждый момент времени t задаются тремя показателями, которые будут определены в экономическом блоке модели: комплексный показатель деградации экосистемы $P(t)$, объединяющий все вредные воздействия животноводческого комплекса на экосистему, измеряемый в баллах (аналог комплексного показателя загрязнения в [7]); скорость потребления углерода из травяной растительности (природного ресурса) пасущимися животными $F(t)$ и скорость восстановления углерода травяного покрова при рекультивации $S(t)$, которые определяются потреблением и восстановлением природного ресурса в экономике.

Рис.1 Схема круговорота углерода в модели степной экосистемы
($G = 28\%$, $W = 24\%$, $V = 3\%$, $U = 45\%$ [13])

Углерод воздуха фиксируется зеленой фитомассой раститель-

ного покрова со скоростью Q^G и оттуда в процессе роста травы со скоростью Q^W переходит в биомассу корней, а в результате увядания растений и их опада — в подстилку со скоростью Q^V . Кроме того, запас углерода в биомассе надземной растительности изменяется за счет потоков потребления ресурса животными F и восстановления этого ресурса S (см. рис.1, где показана потоковая схема модели степной экосистемы).

$$dG/dt = Q^G - Q^W - Q^V + S - F. \quad (1)$$

Запас углерода в биомассе корневой системы R уменьшается за счет разложения биомассы корней со скоростью Q^K :

$$dW/dt = Q^W - Q^K. \quad (2)$$

Углерод в подстилке V кроме растительного опада Q^V и разложения биомассы Q^K , образуется также за счет экскрементов животных Q^F , а уходит из подстилки вследствие ее разложения в гумус Q^U (депонирование), в атмосферу Q^H (дыхание) и выветривания R^V :

$$dV/dt = Q^V + Q^K + Q^F - Q^U - Q^H - R^V. \quad (3)$$

В результате разложения подстилки пополняется запас углерода в гумусе U со скоростью Q^U . Этот запас уменьшается в результате выветривания R^U и дыхания (выделения в атмосферу) Q^A :

$$dU/dt = Q^U - Q^A - R^U. \quad (4)$$

Предполагается, что в отсутствие внешних воздействий экосистема пребывает в некотором стационарном состоянии. Потоки и запасы углерода, соответствующие этому стационарному состоянию будем помечать нижним индексом "0", а фактические потоки определять по отношению к этому стационарному состоянию.

Скорость фиксации углерода зеленой фитомассой Q^G определяется запасом питательных веществ в почве, пропорциональным

U , запасом питательных веществ в корневой системе, пропорциональным W , определяется запасом зеленой растительности, пропорциональным G , возрастает при росте потребления, пропорционального F , уменьшается при неблагоприятном внешнем воздействии (вытаптывании), пропорциональным комплексному показателю деградации экосистемы P и зависит от того, достаточно ли биомассы подстилки V . Если биомасса подстилки меньше критической величины $V < V_-$, рост растительного покрова вообще прекращается. Для наших целей достаточно рассмотреть линейное приближение данной зависимости (до конца не изученной до сих пор) относительно стационарных значений U_0, W_0, F_0, G_0 при условии, что биомасса подстилки больше критической величины V_- , получаем, что $Q^G/Q_0^G = 1 + a^G U/U_0 + b^G W/W_0 + c^G F/F_0 + d^G G/G_0 - \beta^G P Q^G/Q_0^G$ при $V > V_-$ и $Q^G = 0$ при $V \leq V_-$. Следовательно,

$$\frac{Q^G}{Q_0^G} = \left[\frac{a^G U/U_0 + b^G W/W_0 + c^G F/F_0 + d^G G/G_0}{1 + \beta^G P} \right] \theta(V - V_-). \quad (5)$$

Здесь $\theta(x) = 1$ при $x > 0$, $\theta(x) = 0$ при $x \leq 0$ — функция Хевисайда. Постоянный параметр a^G — это предельная отдача запаса питательных веществ в гумусе в накоплении углерода при отсутствии неблагоприятных воздействий в зеленой фитомассе травяной растительности, b^G — предельная отдача биомассы корней в накоплении углерода в зеленой фитомассе, c^G — предельная норма восстановления зеленой растительности при ее потреблении, d^G — предельная отдача запаса зеленой фитомассы, а β^G — норма угнетения потока углерода в зеленую фитомассу, вызванная внешним воздействием животных (при идентификации параметров мы полагаем, что $a^G + b^G + c^G + d^G = 1$, так что на стационарном режиме $Q^G = Q_0^G$).

Поток углерода из зеленой фитомассы растительного покрова в корни Q^W считаем заданной долей потока Q^G с учетом угнетения процесса ростом неблагоприятного воздействия животных (вытаптывания), а поток углерода из подстилки в гумус Q^U —

фиксированной долей Q^H :

$$Q^W = (Q_0^W/Q_0^G) Q^G/(1 + \beta^W P), \quad (6)$$

$$Q^U = (Q_0^U/Q_0^H) Q^H. \quad (7)$$

В уравнении (6) величина β^W — постоянная, имеющая смысл нормы угнетения воздействием животных (выраженное через комплексный показатель деградации P) потока углерода в корни.

Считаем, что скорость опада растений в подстилку Q^V определяется запасом углерода в растительности G :

$$Q^V = (Q_0^W/Q_0^G) G. \quad (8)$$

Скорости разложения растительного покрова, подстилки и гумуса считаются пропорциональными соответствующим запасам с учетом того, что два последних процесса могут угнетаться воздействием животных при перевыпасе, когда уплотняется верхний слой почвы:

$$Q^K = (Q_0^K/W_0) W, \quad (9)$$

$$Q^H = (Q_0^H/V_0) V/(1 + \beta^H P), \quad (10)$$

$$Q^A = (Q_0^A/U_0) U/(1 + \beta^A P). \quad (11)$$

Здесь β^H — норма угнетения воздействием животных потока углерода из подстилки в гумус и атмосферу, а β^A — норма угнетения воздействием животных потока углерода из гумуса в атмосферу.

Большая часть углерода растений (углеводов и других органических веществ), поглощенного животными и другими консументами, окисляется в процессах дыхания и брожения с высвобождением углекислого газа. Меньшая часть углерода возвращается в кругооборот степной экосистемы (в подстилку) в виде экскрементов, поток которых Q^F считаем пропорциональным потоку

потребления животных F .

$$Q^F = (Q_0^F/F_0) F. \quad (12)$$

Интенсивности выветривания подстилки R^V и гумуса R^U также считаются пропорциональными соответствующим запасам

$$R^V = (Q_0^H/V_0)J(W)V, \quad R^U = (Q_0^A/U_0)J(W)U, \quad (13)$$

где множитель $J(W)$ описывает воздействие биомассы корневой системы, блокирующее разрушение почвы:

$$J(W) = J_1 + (J_2 - J_1)(1 - W/W_1)\theta(W_1 - W). \quad (14)$$

Здесь J_1 , J_2 , W_1 — постоянные: $J_1 < J_2$, $W_1 < W_0$. Величина W_1 задает некоторую эффективную величину биомассы корней.

Прежде чем использовать блок "Экосистема" в полной модели, с ним в автономном режиме были проведены численные эксперименты, которые показали работоспособность предложенной модели и позволяют надеяться на достаточную обоснованность проведенной идентификации параметров. Показатели внешних воздействий в автономном режиме задавались непосредственно: приравнивались стационарным или указанным ниже значениям.

Идентификация модели проведена на основе данных по степным экосистемам из [13, 14] и данных по овцам породы Монгольская из [15]. Были определены следующие стационарные значения показателей при отсутствии неблагоприятных внешних воздействий для нашей модели (кг/га): $G_0 = 45.6$, $W_0 = 38.6$, $V_0 = 4.8$, $U_0 = 71.9$, $F_0 = 1$, $Q_0^G = 3.1$, $Q_0^F = 0.8$, $V_- = 0.384$, $W_1 = 7.72$. Значения параметров $\alpha^V = 1/9$, $J_1 = 0.3$, $J_2 = 1.4$, $a^G = 0.2$, $b^G = 0.3$, $c^G = 0.3$, $d^G = 0.2$, $\beta^G = 0.2$, $\beta^W = 0.006$, $\beta^H = 0.0004$, $\beta^A = 0.0002$.

Остальные параметры нашей модели можно легко найти из стационарного решения уравнений (1)-(4). Таким образом, общее число независимых параметров в нашей модели степной экосистемы равно 19.

Рис.2 Динамика показателей модели экосистемы под влиянием неблагоприятных внешних воздействий

На рис.2 показана динамика следующих показателей степной экосистемы под влиянием неблагоприятных внешних воздействий (заданных в модели комплексным показателем деградации экосистемы) в процентном отношении к стационарным значениям этих показателей: биомасса надземной зеленой растительности G , биомасса корневой системы W , биомасса подстилки V , биомасса гумуса U . На всех графиках этого и последующих рисунков по оси абсцисс отложено время в годах. На всех графиках данного рисун-

ка по оси ординат отложены проценты. На Рис.2 а)-г) приведены показатели экосистемы при постоянных значениях показателя деградации (перевыпаса) $P = 1, 2, 3, 4$ (совпадает с соответствующими номерами на графиках). Видно, что при всех показателях деградации (перевыпаса) экосистема угнетается, причем более всего угнетается биомасса надземной растительности (пропорциональная G) и биомасса подстилки (V): например, при постоянном показателе деградации $P = 4$ за 100 лет объем надземной растительности сокращается до 20% (см. рис.2 а)), а подстилки до 40%(рис.2 в)) от стационарного уровня. Биомасса корневой системы (W) сокращается до 85%, а запас гумуса (U) в этих условиях сокращается до 92% от стационарного уровня (см. рис.2 б),г)).

Влияние потребления и посадки в случае травяной экосистемы проявляется в год применения, поэтому долгосрочные проявления этих показателей не так интересны, как в модели лесной экосистемы [7]. Качественное поведение нашего варианта модели степной экосистемы соответствует нашим представлениям об этих процессах и блок может быть использован в полной модели.

3 Модель отрасли животноводства

Рассмотрим агрегированную отрасль отгонного пастбищного животноводства, в которой функционирует единственная порода, то есть, полагаем, что все многообразие пород отрасли с помощью пересчетных коэффициентов сведено к одной. Кроме того, полагаем, что затрачиваемая рабочая сила однородна, а затрачиваемый природный ресурс единственен — травяная растительность степей. При таком описании пасущиеся животные являются неотъемлемой частью степной экосистемы, и разрабатываемая модель экономики строится на основе соответствующих описаний популяционной динамики экологической системы.

В [4] при указанных выше условиях получено описание производственных процессов в отрасли животноводства. При этом рассмотрено микроописание рационального регулирования пого-

ловья животных, дифференцированных по возрасту (возрастных когорт животных), на основе этого микроописания выведено макроописание отрасли животноводства: численность животных общая и по возрастам, численность молодняка, объем производства животноводческой продукции и затраты на производство, спрос на кредит и прибыль, оптимальный возраст забоя и равновесная цена молодняка. Воспользуемся полученными в [4] результатами для описания блока "экономика" полной эколого-экономической модели, ограничиваясь здесь только необходимыми пояснениями.

3.1 Жизненный цикл одновозрастной когорты животных

При отгонном пастбищном животноводстве производством управляют домашние хозяйства. Хозяйства управляют стадами примерно одинаково в соответствии с общей для всех хозяйств экономической конъюнктурой. Домашние хозяйства постоянно возникают, исчезают, разделяются, сливаются и могут полностью возобновлять стадо за счет покупки, если оно внезапно погибнет. Поэтому предполагается [4], что хозяйство продает весь народившийся молодняк $n_0(t)$ по цене $q(t)$ и при желании может всегда его купить по той же цене для дальнейшей эксплуатации. Тогда задача экономически рационального поведения хозяйства распадается на задачи управления отдельными когортами животных одного возраста. Таким образом, реально существующие хозяйства можно разбить на типовые хозяйства, которые управляют животными одного возраста (возрастные когорты).

Когорты продают единственный однородный продукт (продукцию, полученную за год с одной условной головы животного стандартного возраста: при идентификации модели в качестве такой условной головы мы берем овцу породы Монгольская в возрасте 4 лет) по единой текущей цене $p(t)$, нанимают рабочую силу по единой ставке заработной платы $s(t)$, выплачивают единый поголовный налог $s_0(t)$ за каждое животное, платят арендную плату за использование природного ресурса (пастбищ) по единой цене

$g(t)$.

Численность когорты $\tau \leq t$ в момент времени t обозначим через $n(t, \tau)$. Эта численность уменьшается со временем вследствие естественной смертности, случайной гибели при неблагоприятных внешних условиях, а также за счет убоя.

$$\partial n(t, \tau) / \partial t = -(d(t, t - \tau) + \Lambda)n(t, \tau) - w(t, \tau), \quad (15)$$

где $d(t, t - \tau) > 0$ — естественная смертность, а $w(t, \tau) \geq 0$ — скорость убоя животных возраста $t - \tau$ в момент t . Скорость убоя целиком определяется самим хозяйством. Смертность зависит главным образом от возраста когорты $t - \tau$, и как здесь предполагается, не зависит от действий хозяйства. Зависимость смертности от времени отражает технический прогресс отрасли. В принципе он в животноводстве выражен слабо и в основном состоит в замене одних пород другими, более жизнестойкими или продуктивными. Одна из основных проблем традиционного животноводства в том, что оно остается весьма рискованной отраслью, поэтому мы при учете численности, кроме ожидаемого $d(t, t - \tau)n(t, \tau)$ и управляемого $w(t, \tau)$ сокращения когорты, учитываем еще случайное с темпом Λ (заданная частота пуассоновского потока гибели от случайных причин), как возможность ее одномоментной гибели целиком от эпидемии, снегопадов на зимних пастбищах, засухи на летних и т.п.

Животные размножаются, давая начало новым когортам. Численность новорожденных животных в момент t задается соотношением

$$n_0(t) = n(t, t) = \int_{-\infty}^t \beta(t, t - \tau)n(t, \tau)d\tau, \quad (16)$$

где $\beta(t, t - \tau) > 0$ — фертильность животных когорты τ , которая, как и смертность, зависит в основном от возраста когорты

$t - \tau$. Для описания возрастной динамики при заданных управлениях и заданном уравнении рождаемости (16) надо задать еще начальную численность когорт $n(t_0, \tau)$, $\tau < t_0$.

Содержание животных общей численностью

$$N(t) = \int_{-\infty}^t n(t, \tau) d\tau, \quad (17)$$

наносит ущерб природе и требует затрат труда. Ущерб природе $E(t)$, затраты сырья $B(t)$ и затраты труда $H^D(t)$ будем считать пропорциональными численности стада в каждом возрасте

$$E(t) = \int_{-\infty}^t u(t, t - \tau) n(t, \tau) d\tau, \quad (18)$$

$$B(t) = \int_{-\infty}^t a(t, t - \tau) n(t, \tau) d\tau, \quad (19)$$

$$H^D(t) = \int_{-\infty}^t \lambda(t, t - \tau) n(t, \tau) d\tau, \quad (20)$$

где $u(t, t - \tau) > 0$ — наносимый природе ущерб с одного живого животного возраста $t - \tau$ в момент t , $a(t, t - \tau) > 0$ — норма затрат сырья на одну голову, а $\lambda(t, t - \tau) > 0$ — трудоемкость ухода за животными возраста $t - \tau$ в момент t .

Живые животные возраста $t - \tau$ производят определенный поток продукции (молоко, шерсть), а забитые — дают определенный запас (мясо, кожу). Будем считать, что эти продукты сводятся в один — объем производства — с помощью подходящих индексов

цен. Тогда можно считать, что выход продукции $Y(t)$ составляет

$$Y(t) = \int_{-\infty}^t (k(t, t - \tau)n(t, \tau) + m(t, t - \tau)w(t, \tau)) d\tau, \quad (21)$$

где $k(t, t - \tau) \geq 0$ — выход продукции с одного живого животного возраста $t - \tau$ в единицу времени в момент t , а $m(t, t - \tau) \geq 0$ — выход продукции с одного забитого животного возраста $t - \tau$ в момент t .

Зависимость функций $m(t, a)$ и $k(t, a)$ при заданном t от возраста a для породы овец Монгольская представлен на рис.3. Эти зависимости получены на основе данных [15].

Рис.3 Норма выхода конечной продукции при убое m и фондоотдача от производственного капитала в течение жизненного цикла k в возрасте a , в процентах к выходу от одной условной головы

Для покупки молодняка хозяйство может брать кредит. Чтобы оценить возможную роль банковской системы в развитии животноводства, будем считать, что банк позволяет хозяйству пользоваться наиболее прогрессивной системой расчетов — кредитной линией (кредитной картой). Именно, срок возврата кредита не назначается, и кредит может использоваться для проведения всех платежей. Известен только начисляющийся на текущую сумму кредита процент $r(t)$ и лимит кредитования. Будем считать, что

лимит кредитования определяется главным активом хозяйства — стоимостью имеющихся у него животных.

Считаем, что в соответствии с правилами кредитной линии все расчеты хозяйства идут через остаток кредита $l(t, \tau)$ (доходы из него вычитаются, а расходы к нему прибавляются). Тогда с учетом налоговых платежей s_0 , начисления процента $r(t)$ и доходов от продажи молодняка

$$\frac{\partial l(t, \tau)}{\partial t} = -\pi(t, \tau)n(t, \tau) - \kappa(t, \tau)w(t, \tau) + z(t, \tau) + rl(t, \tau), \quad (22)$$

где для удобства записи введены следующие обозначения для текущего и убойного элементов прибыли

$$\begin{aligned} \pi(t, \tau) = & p(t)k(t, t - \tau) - s(t)\lambda(t, t - \tau) - \\ & -g(t)a(t, t - \tau) - s_0 + q(t)\beta(t, t - \tau), \end{aligned} \quad (23)$$

$$\kappa(t, \tau) = p(t)m(t, t - \tau), \quad (24)$$

а $z(t, \tau)$ — есть чистый доход когорты τ после всех платежей.

Мы предполагаем, что хозяйство не может исполнять функции кредитора, т.е.

$$l(t, \tau) \geq 0. \quad (25)$$

Как уже говорилось, лимит кредитования определяется денежной оценкой наличного стада. Будем предполагать, что такой оценкой служит ликвидационная стоимость $p(t)m(t, t - \tau)n(t, \tau)$. Если стадо погибает, то долг не возвращается. Поэтому банк не будет давать кредит на всю эту величину, а потребует, чтобы часть стада был создана на собственные средства хозяйства.

$$l(t, \tau) \leq \sigma n(t, \tau)\kappa(t, \tau), \quad 0 \leq \sigma \leq 1. \quad (26)$$

Может вызвать возражение предположение о том, что кредит, данный на покупку когорты, гарантируется стоимостью именно

этой когорты, а не всем имуществом хозяйства. Заметим, однако, что если происходит стихийное бедствие, то гибнет не одна когорта, а все стадо и хозяйство становится банкротом, а пока бедствия не произошло, хозяйство функционирует в стационарном режиме, систематически беря кредиты на покупку новых когорт, так что общий долг хозяйства можно считать разложенным по когортам пропорционально их стоимости. Таким образом, предположение (26) о "финансовой самостоятельности" когорт, которое сильно упрощает задачу, с содержательной точки зрения не выглядит большим преувеличением.

В отличие от [4] мы здесь не разрешаем рост $z(t, \tau)$ выше текущих доходов при повышении с возрастом лимита кредитования: $z(t, \tau) \leq \pi(t, \tau)n(t, \tau) + \kappa(t, \tau)w(t, \tau)$. Будем считать, что собственники сберегают часть дохода $z(t, \tau)$, вкладывая его банковскую систему, так что депозиты собственников $q(t, \tau)$ изменяются в силу уравнения

$$\frac{\partial q(t, \tau)}{\partial t} = (1 - \eta(\rho(t)))z(t, \tau) + \rho(t)q(t, \tau), \quad q(\tau, \tau) = 0, \quad (27)$$

где $\rho(t) > 0$ — процент по депозитам, а $\eta(\rho)$ — функция склонности собственников к потреблению. Совокупная прибыль всех когорт

$$Z(t) = \int_{-\infty}^t z(t, \tau) d\tau. \quad (28)$$

3.2 Реализация планов хозяйства

Экономически рациональное решение хозяйства о покупке молодняка в момент t в количестве $n(t, t)$ и возраст рационального забоя животных определен в [4]. Для описания эволюции экономики важно не то, как хозяйства планируют, а то, как они реализуют свои планы. Реализуемость планов, в свою очередь зависит от того, насколько точно хозяйства прогнозируют цены. Кажется,

что моделирование попадает в ловушку парадокса: модель нужна, чтобы помочь хозяйствам прогнозировать цены, а для построения модели надо знать, как хозяйства делают прогноз цен. Парадокс решается применением гипотезы рациональных ожиданий [16, 17]: на потребном временном горизонте хозяйства прогнозируют цены правильно (во всяком случае не делают существенных систематических ошибок). Таким образом, в модели мы рассматриваем самосогласованные цены. Заметим, что в рамках детерминированной модели единственной альтернативой рассматриваемому подходу было бы описание совокупности хозяйств, которые всегда все одинаково ошибаются в оценке будущей конъюнктуры рынка. Опыт, однако, показывает, что экономически активная часть населения быстро адекватно оценивает недалекое будущее за исключением коротких периодов структурных кризисов. Современными моделями, впрочем, тоже не могут описывать кризисы. Хорошая модель может предсказать, какой и когда будет кризис, но не может сказать, какие экономические отношения возникнут после кризиса.

В [4] показано, что хозяйство, независимо от ожидаемых цен, берет максимально возможный кредит, если $r \leq \rho + \Lambda$ и отказывается пользоваться кредитом, если процент больше $\rho + \Lambda$. Для использования уравнения на возраст забоя, полученное в [4] запишем его в виде неравенства: когорту животных, рожденных в момент τ , целиком забивают в возрасте θ , когда первый раз нарушается неравенство

$$\begin{aligned} \pi(t, \theta)/\kappa(t, \theta) - d(t, \theta) - \Lambda - \rho(t) + (\rho(t) + \Lambda - r(t))_+ \sigma(t) + \\ + (1/m(t, \theta))dm(t, \theta)/dt + (1/p(t))dp/dt > 0. \end{aligned} \quad (29)$$

Видно, что решение этого правила θ зависит от времени, но не зависит от момента рождения τ животных когорты, $\theta = \theta(t)$.

При увеличении θ остаются ограниченными все члены уравнения (29), кроме величины $d(\theta)$, которая неограниченно возрастает. Это обеспечивает требуемый отрицательный знак правой части (29) при больших θ . То, что при некотором θ правая часть

(29) оказывается положительной, означает, что содержание животных хотя бы в одном возрасте достаточно рентабельно. Естественно ожидать, что такое условие обеспечивается ценами, которые соответствуют равновесию спроса и предложения на рынке продукции животноводства. При малых θ величина $\pi(t, \theta)/\kappa(t, \theta)$ мала, но велика величина $(\partial m(\theta)/\partial \theta)/m(\theta)$ (см. рис.3).

Таким образом, предположение о существовании корня уравнения (29) с требуемыми свойствами не противоречит представлениям о характере функций, задающих технологию животноводства и представлениям об механизмах регулирования этой отрасли, поэтому мы его принимаем.

В [4] получено следующее интегральное уравнение для равновесной цены молодняка $q(t)$

$$\begin{aligned}
q(t) = & p(t)m(0, t) + \\
& + \int_t^\infty [(-[\rho + \Lambda - r]_+ \sigma + \Lambda + d(x, x - t) + \rho)p(x)m(x, x - t) - \\
& - p(x)k(x, x - t) + s(x)\lambda(x, x - t) + s_0 - q(x)\beta(x, x - t) - \\
& - \partial(p(x)m(x, x - t))/\partial x]_- \exp\left(\int_x^t (d(\xi, \xi - t) + \Lambda + \rho)d\xi\right) dx. \quad (30)
\end{aligned}$$

Уравнение (30) описывают динамику стада в условиях рыночного хозяйства. Видно, что это уравнение содержит опережающие значения неизвестных. Для таких уравнений характерно сложное колебательное поведение решений, что отражает специфику животноводческой отрасли.

4 Замыкание модели

4.1 Рынок конечной продукции

В работах [19, 12, 7] при замыкании модели экономики, основанной на микроописании возрастной динамики производственных

мощностей, предполагалось равновесие на рынке товаров. Такое предположение хорошо описывает ситуацию на замкнутом рынке, когда все производимое в некоторой стране в ней же и потребляется. Однако, в нашем случае неправильно было бы считать, что цена на рынке конечной продукции отрасли животноводства полностью определяется в ней же. Большая часть конечной продукции животноводческого комплекса экспортируется, а значительная часть потребительских товаров импортируется. Считая здесь для простоты, что валютный курс w фиксирован, мы можем замкнуть описание модели отрасли животноводства¹, считая, что предложение товаров и спрос на них на внутреннем рынке оказывают влияние на колебание внутренней цены на конечную продукцию.

Будем считать, что цена на рынке товаров колеблется в соответствии с остатком запаса этого товара. А именно, если в некоторый момент времени t текущий запас продукции $Q(t)$ превышает некий нормативный запас $Q_0(t)$, то цена снижается, а при нехватке запаса ($Q(t) < Q_0(t)$) — повышается.

$$(1/p)dp/dt = (1/\theta_p)(1 - Q(t)/Q_0(t)). \quad (31)$$

Здесь θ_p — характерное время изменения цены, $Q(t)$ — запас продукции, а $Q_0(t)$ — нормативный запас продукции. В [18] показано, что оптимальный запас товаров у торговцев должен быть пропорционален некой растущей величине в степени $2/3$. Полагаем здесь, что нормативный запас определяется равенством

$$Q_0(t) = \alpha^Q Y^{2/3}(t), \quad (32)$$

где $Y(t)$ — суммарный выпуск отрасли.

Скорость изменения запаса продукции равна разнице между предложением и спросом на продукцию и определяется уравнением

$$dQ/dt = Y(t) - X(t) - \alpha^\Phi (\Phi^L(t) + \Phi^O(t))/p(t), \quad (33)$$

¹Напомним (см. введение и [4]), что данная модель отражает положение дел примерно в половине экономики Монголии.

где $X(t) = \alpha^X Y(t)$ — заданный экспорт продукции, α^Φ — доля отечественной продукции в потреблении, $\Phi^L(t) = s(t)H^D(t)$ — суммарный спрос семей занятых, $\Phi^O(t) = \eta Z(t)$ — суммарный спрос владельцев когорт².

Импорт в валютном выражении задается равенством

$$I(t) = ((1 - \alpha^\Phi)(\Phi^L(t) + \Phi^O(t)) + \Phi^G(t) + \Phi^T(t))/w, \quad (34)$$

где w — валютный курс, $\Phi^G(t) = g(t)B(t)$ — спрос фонда рекультивации пастбищ, а $\Phi^T(t) = s_0(t)N(t)$ — спрос фонда очистки и обустройства пастбищ.

4.2 Взаимодействие экономики и экосистемы

В отличие от комплексного показателя загрязнения, использовавшегося в [12, 7], будем считать здесь, что комплексный показатель деградации степной экосистемы $P(t)$ отражает кумулятивный эффект воздействия пастбищного животноводства на степную экосистему и его изменение будем описывать уравнением

$$dP/dt = (E(t) - d^P \Phi^T(t)/p(t))/A - \alpha^P P(t), \quad (P(t) \geq 0). \quad (35)$$

Здесь указано, что текущий ущерб природе $E(t)$ от суммарного поголовья животных, поделенный на общую площадь пастбищ A способствует росту комплексного показателя деградации $P(t)$, а темп естественной очистки последствий деградации $\alpha^P > 0$ и расходы фонда очистки и обустройства пастбищ $\Phi^T(t)$ с эффективностью использования средств $d^P > 0$ (мероприятия по исключению перевыпаса отдельных участков и др.) способствуют уменьшению показателя деградации.

Считаем, что с ростом комплексного показателя деградации

²Заметим, что фонды потребления отечественного и импортного продукта делятся в заданном отношении $\alpha^\Phi : (1 - \alpha^\Phi)$, если функция спроса потребителей есть функция Кобба-Дугласа $C^{\alpha^\Phi} I^{(1-\alpha^\Phi)}$ [20].

степной экосистемы P нелинейно растет смертность животных.

$$\begin{aligned} d(t, \tau) &= \phi(d^n(t - \tau), P(t)), \quad d\phi/dP > 0, \\ \phi(d^n(t - \tau), 0) &= d^n(t - \tau). \end{aligned} \quad (36)$$

Будем считать, что фонд рекультивации пастбищ в каждый момент времени полностью используется, так что рекультивация пастбищ определяется равенством

$$S(t) = \Phi^G(t)/(p(t)b^S A), \quad (37)$$

где $b^S > 0$ - фондоемкость мероприятий по рекультивации пастбищ.

Потребление травяной растительности на единицу площади задается равенством

$$F(t) = B(t)/A. \quad (38)$$

Предполагается, как и в [7], что цена на сырье колеблется в соответствии с остатком запаса его биомассы, пропорционального содержанию углерода в травяной растительности степей

$$dg/dt = \left(1 - G(t)/G^*\right)g(t)/\Delta_g. \quad (39)$$

Здесь параметр Δ_g определяет характерное время изменения цены, а параметр G^* характеризует некоторый "нормальный" размер биомассы надземной растительности степей, $G^* \leq G_0$.

Считаем, что поголовная ставка налога растет, когда комплексный показатель загрязнения превысит некоторую величину P_0^* .

$$ds_0/dt = \left(P(t)/P_0^* - 1\right)_+ s_0(t)/\Delta_{s_0}. \quad (40)$$

Здесь параметр Δ_{s_0} определяет характерное время изменения цены, а параметр P_0^* является предельным уровнем деградации степей, который терпит общество.

4.3 Рынок труда

Будем считать, что численность $H(t)$ населения, живущая на доходы, получаемые в отрасли, растет с заданным темпом $\gamma(t)$.

$$H(t) = H_0 \exp(\gamma(t)(t - t_0)). \quad (41)$$

При увеличении деградации степей, семьи могут переходить в другие отрасли. Такое поведение мы описываем зависимостью темпа роста населения в отрасли от показателя деградации P :

$$\gamma(t) = \gamma_0(1 - \delta^\gamma P), \quad (42)$$

где $\delta^\gamma > 0$.

Считаем, что численность активного населения в оставшемся в отрасли населении также падает при росте P :

$$H^A(t) = \varkappa(P(t))H(t), \quad \varkappa(P) = \varkappa_0 \exp(-\alpha_\varkappa P). \quad (43)$$

Эта зависимость выражает тенденции роста заболеваемости и смертности населения при ухудшении природных условий жизни.

Считаем, что предложение труда $H^S(t)$ пропорционально численности активного населения $H^A(t)$ с коэффициентом χ , зависящим от уровня потребления $\omega^R(t)$:

$$\begin{aligned} H^S(t) &= H^A(t)\chi(\omega^R(t)), \quad 0 \leq \chi(\omega^R) \leq 1, \\ \chi(\omega^R) &= \chi_0 \exp(-\alpha_\chi |\omega^R - \omega_0^R|). \end{aligned} \quad (44)$$

где

$$\omega^R(t) = (s(t)H^D(t) + \eta(\rho)Z(t)) / (p(t)H(t)). \quad (45)$$

Ставка заработной платы $s(t)$ быстро растет, когда спрос на труд H^D превышает его предложение H^S и остается неизменной в противном случае (см. [7]):

$$ds/dt = \left(D^D(t)/H^S(t) - 1 \right)_+ s(t)/\Delta_s, \quad (46)$$

где Δ_s — постоянная времени.

4.4 Кредитно-денежная система

Описание банковской системы является модификацией описаний [7] и [21]. Мы предполагаем, что банковские активы складываются из золото-валютного резерва R и задолженности когорт L , а пассивы — из депозитов собственников когорт и банков D , которые подчиняются основному финансовому балансу банковской системы:

$$wR(t) + L(t) = D(t). \quad (47)$$

Считаем, что золото-валютные резервы меняются в силу платежного баланса

$$dR/dt = (p(t)/w)X(t) - I(t). \quad (48)$$

Активы банка равны задолженности когорт выживших животных

$$L(t) = \int_{n(t,\tau)>0} l(t,\tau)d\tau. \quad (49)$$

Новая когорта берет весь предлагаемый кредит $C^S(t)$. Тогда

$$\frac{dL}{dt} = C^S(t) - \Lambda L(t) + J(t), \quad J(t) = \int_{n(t,\tau)\geq 0} \frac{\partial}{\partial t} l(t,\tau)d\tau, \quad (50)$$

где $\Lambda L(t)$ — описывает списание задолженности погибших когорт.

Депозиты собственников фирм (включая банки)

$$dD/dt = (1 - \eta)(Z(t) + d^B) + \rho D(t), \quad (51)$$

где d^B — банковская прибыль.

$$d^B = (r(t) - \Lambda)L(t), \quad (52)$$

Предполагаем, что резерв банковской системы $R(t)$ обеспечивает депозиты при законодательно установленной норме ξ :

$$wR(t) \geq \xi D(t). \quad (53)$$

Тогда банк стремится предоставить максимальный кредит, который допускают соотношения (48) и (53):

$$L = wR(1 - \xi)/\xi. \quad (54)$$

Таким образом, предложение кредита в силу (49),(54),(48)

$$C^S(t) = \frac{1 - \xi}{\xi}(p(t)X(t) - wI(t)) + \Lambda L(t) - J(t). \quad (55)$$

Как и в [19, 12, 7], отрицательность величины $C^S(t)$ означает крах банковской системы. Процент по задолженности определяется равенством

$$r(t) = \rho(t) + \Lambda. \quad (56)$$

Процент по депозитам определяется в силу равенства $wR(t) = \xi D(t)$ из уравнений (51-52),(48)

$$\rho(t) = \frac{(p(t)X(t) - wI(t))/\xi - (1 - \eta)Z(t)}{D(t) + (1 - \eta)L(t)}. \quad (57)$$

Доля кредитования определяется равенством

$$\sigma(t) = C^S(t)/(p(t)O(t)). \quad (58)$$

где

$$O(t) = p(t) \int_{-\infty}^t m(t, \tau)n(t, \tau)d\tau \quad (59)$$

— суммарная ликвидационная стоимость всех когорт.

5 Численные эксперименты с моделью

Первые пробные численные эксперименты с полной моделью проводились, чтобы уточнить описание модели. Численные эксперименты с внутренней равновесной ценой на выпускаемую продукцию показали крайнюю неустойчивость экономической системы в этом случае. Эксперименты, в которых использовался нормативный запас, прямо пропорциональный численности животных, приводил к неоправданно быстрому росту численности стада, что вело к быстрому исчерпанию трудовых и природных ресурсов и к краху банковской системы.

Численный вид формулы смертности животных при $dt = 1$ представлен ниже:

$$d(t, \tau) = d^n(t - \tau) + (1 - d^n(t - \tau))(P(t)/P_0)^\alpha, \quad (60)$$

где $\alpha > 1$ — показатель нелинейности, а $d^n(t - \tau)$ — некий нормативный показатель смертности.

Часть параметров модели удалось идентифицировать по данным [15], но за недостатком данных большую часть параметров пришлось подбирать исходя из качественного поведения модели. В численных экспериментах использовались значения экологического блока, указанные выше при описании численных экспериментов со степной экосистемой. Использовались следующие начальные данные на момент начала расчета $t_0 = 0$ (соответствует исходным данным 1996 года): $p(0) = 30.57$, $s_0(0) = 0.3$, $s(0) = 600.0$, $g(0) = 0.02$, $H(0) = 1.1257$, $D(0) = 40.0$, $R(0) = 4.0$, $L(0) = 36.0$, $Q(0) = 20.0$ — и следующие параметры: максимально возможный возраст когорты (максимальное число когорт) $a_{max} = 13$, $\Lambda = 0.02$, $G^* = 0.1G_0$, $\Delta_g = 5.0$, $P_0 = 10.0$, $P_0^* = 5.0$, $\Delta_{s_0} = 3.0$, $\omega_0^R = 10.0$, $\chi_0 = 0.7$, $\varkappa_0 = 0.54$, $\alpha^x = 0.02$, $\alpha_\varkappa = 0.01$, $\gamma_0 = 0.0145$, $\delta^\gamma = 0.01$, $\Delta_s = 6.0$, $\xi = 0.1$, $\varepsilon = 0.02$, $d^P = 1.0$, $A = 128.9$, $\alpha^P = 0.05$, $\theta_p = 10.0$, $b^S = 1.0$.

На рис.4-7 показана динамика макропоказателей эколого-эко-

номической модели при указанных выше значениях (базовый вариант).

Рис.4 Показатели степной экосистемы

Из рис.4 а) видно, что в базовом варианте биомасса травяной растительности (пропорциональная запасу в ней углерода G) падает практически линейно, достигнув уровня 36% от стационарного, биомасса корневой системы (W , рис.4 б)) падает до 89% за 100 лет, биомасса подстилки (V , рис.4 в)) падает до уровня 60% от стационарного, биомасса гумуса (U , рис.4 г)) снижается до 93% от стационарного. Итак, в базовом варианте расчета степная экосистема выживает за 100 лет, однако понятно, что эксплуатация степной экосистемы в таком режиме угрожает ее существованию.

Рис.5 Основные объемные макропоказатели отрасли животноводства

Динамика основных объемных макропоказателей отрасли животноводства показана на рис.5. Видно, что все объемные показатели в натуральных единицах возрастают, однако характер их подъема несколько отличается. Так, общая численность стада животных N (рис.5 а)) возрастает практически линейно в 2.5 раза, прирост численности молодняка M (рис.5 б)) за сто лет возрастает во столько же раз, несколько увеличивая прирост в каждый момент времени. Воздействие на экосистему со стороны экономики возрастает: комплексный показатель деградации P (рис.5 в)) возрастает за 100 лет от 0 (начальный уровень) до опасного уровня в 3.4 балла, что уже существенно отражается на экосистеме (см. рис.3 и рис.4), объем потребления надземной растительности степной экосистемы F (рис.5 г)) поднимается в 2.3 раза выше стационарного уровня.

Рис.6 Индексы цен

Динамика основных индексов цен показана на рис.6. Ставка заработной платы (индекс цен на трудовые ресурсы) s (рис.6 в) в базовом варианте остается неизменной (также остается неизменной ставка налога $s_0 = 0.3$), индекс цен на потребляемый природный ресурс g (рис.6 г) на первой половине расчета от 0 до 50 лет остается пренебрежимо малым, однако на второй половине расчета начинает быстро расти, увеличившись к концу расчета в 70 раз. Такое поведение индекса цен на природный ресурс практически не отразилось на поведении индекса цен на конечную продукцию p (рис.6 а) и индекса цен на молодняк q (рис.6 б), которые остаются практически неизменными на интервале времени от 0 до 80 лет, а затем испытывают некоторый рост.

Рис.7 Численность населения и их среднедушевые доходы

Численность населения, связанная с животноводческим комплексом, H (рис.7 г)), численность активного населения H^A (рис.7 б)), численность населения, предлагающего труд в отрасли животноводства H^S (рис.7 б)) возрастают с практически постоянным темпом 1.37%. Средние доходы занятых ω^R (рис.7 а)) колеблются в противофазе с колебаниями цены p (рис.6 а)), несколько снижаясь к концу расчета.

В качестве сценария было выбрано уменьшение порога для комплексного показателя деградации P_0^* , при превышении которого начинает расти налог на каждую голову животного s_0 . Доходы от этого налога используются на процесс рекультивации. В базовом варианте расчета этот порог был установлен на уровне в 3.5 балла, который не был достигнут. В сценарии этот уровень был снижен до 3.0 баллов.

На рис.8-12 показана динамика вариации сценарных показателей в сравнении с базовыми. Расчет вариации произведен в про-

центах для каждого момента времени t по следующей формуле

$$Var(X(t)) = (X^C(t)/X^B(t) - 1) \cdot 100\%,$$

где X^C — значение показателя в сценарном варианте, а X^B — соответствующее значение в базовом варианте.

Рис.8 Сравнение показателей степной экосистемы

Из рис.8 видно, что биомасса травяной растительности в сценарном варианте (G , рис.8 а)) возрастает на 1.4% в сравнении с базовым вариантом, биомасса корневой системы (W , рис.8 б)) возрастает на 0.5%, биомасса подстилки (V , рис.8 в)) возрастает на 0.7%, биомасса гумуса (U , рис.8 г)) возрастает на 0.1% к концу расчета. Стоит заметить, что указанный порог достигается только в 56 году от начала расчета. При этом налог на одну голову поднимается в 7 раз.

Рис.9 Сравнение объемных показатели отрасли животноводства

На рис.9 показано обратное влияние подъема налога на экономическую систему. Интересно отметить, что не смотря на возросшие издержки, общая численность животных (N , рис.9 а)) и численность молодняка (M , рис.9 б)) концу расчета возрастают на 0.5% и 0.4%, соответственно. В тоже время показатели воздействия экономики на степную экосистему ведут себя следующим образом: комплексный показатель деградации (P , рис.9 в)) снижается на 7%, а потребление надземной растительности степей (F , рис.9 г)) возрастает на 0.5%.

Рис.10 Сравнение индексов цен отрасли животноводства

Индексы цен меняются следующим образом: налог на одну голову животного s_0 (рис.10 в)) увеличивается на 600%, индекс цен на конечную продукцию p возрастает на 22% (рис.10 а)), индекс цен на молодняк q возрастает на 18%. Интересно отметить, что снизившаяся деградация степной экосистемы, ведет к снижению индекса цен на природный ресурс g на 1% (рис.10 г)).

Рис.11 Сравнение численности населения и среднедушевых доходов

При снизившейся деградации степи, суммарная численность населения H возрастает на 0.2% (рис.11 г)), что вместе с возросшими издержками ведет к снижению уровня жизни ω^R на 7% (рис.11 а)). При этом численность активного населения в отрасли H^A возрастает на 0.2% (рис.11 б), тем не менее предложение труда H^S снижается на 0.8% (рис.11 в).

6 Заключение

Итак, в настоящей работе построена новая эколого-экономическая модель, в которой блок экономики — животноводство — является составной частью экосистемы, а блок экологии — степная экосистема — впервые описывает специфику лугопастбищного ценоза.

На основании данной математической модели построена численная имитационная модель, идентифицированная на данных

Монголии и способная давать качественно верные количественные оценки главным тенденциям развития экономики, экологии и их взаимодействию. Данная численная имитационная модель является незаменимым инструментом для построения альтернативных сценариев будущего развития и дает возможность оценить последствия реализации этих сценариев.

Первые численные эксперименты с моделью показали работоспособность полной модели и отдельных ее частей: модели степной экосистемы и модели отрасли животноводства, — что дает основание рекомендовать ее для использования в дальнейшей работе.

Традиционное отгонное пастбищное животноводство не требует больших затрат труда, однако существенно зависит от внешних метеорологических условий и оказывает огромное влияние на травяную степную экосистему, вызывая при неумеренной нагрузке ее деградацию. Исследование динамики воздействия экономического роста на окружающую среду показывает, что учет структурной перестройки экономики, т.е. переход от традиционного отгонного пастбищного животноводства к более трудоемкому и капиталоемкому ведению хозяйства приведет к улучшению состояния окружающей среды.

В заключение авторы считают своим приятным долгом выразить глубокую признательность Петрову А.А. за постоянное внимание к работе.

Литература

- [1] Яа- а́а"© ,.ˆ. Начало и вечность жизни. М.: Сов. Россия, 1989. - 704 с.
- [2] ОЕ®"á¥¥¢ ••., €«¥á -аà¢ ,,. Модель климата и глобальная экология.//Природа, 9, 1981, с.68-77.
- [3] ОЕ®"á¥¥¢ ••., Šà "¢" - ,"., '¢"à¥!¥¢ ž.ОЕ., ' à® €.ОЕ.
Системный анализ динамических процессов биосферы: на пу-

ти к построению модели динамических процессов в биосфере. // Вестник АН СССР, 10, 1979, с. 88-104.

- [4] „í¬íàí« ‘., Ž«¥-¥¢ ••., •®á¥«®¢ ^f. К математической модели взаимодействия экономических и экологических процессов. // Математическое моделирование. 2002. т.14. В печати.
- [5] „í¬íàí« ‘., Ž«¥-¥¢ ••., •®á¥«®¢ ^f. Математическая модель отрасли животноводства. // Тезисы докладов научной конференции ”Математическое моделирование сложных систем и междисциплинарные исследования”, посвященной 85-летию академика Н.Н.Моисеева. ВЦ РАН, 2002. с.18.
- [6] „í¬íàí« ‘., Ž«¥-¥¢ ••., •®á¥«®¢ ^f. To a mathematical model of economy and environment interaction. // III российско - монгольская конференция по астрономии и геофизике. Абстракты. Иркутск: ИЗК СО РАН. 2002. с.11.
- [7] Ž«¥-¥¢ ••., •¥áà®¢ €€.€, •®á¥«®¢ ^f. Регулирование экологических последствий экономического роста. // Математическое моделирование. 1998. т 10. 8 с. 17-32.
- [8] ' àª® €œ., ,¥íèª- •.". ,ª à¥ª® •.". , à àª-®¢ ".€. Моделирование воздействия промышленных загрязнений на лесные экосистемы. М.: Вычислительный центр АН СССР, 1987, 19 с.
- [9] Š«¬-®¢ Ž.€. Геоэкологический мониторинг степных ландшафтов Монголии. / Совместная Российско — Монгольская комплексная экспедиция РАН и АН Монголии. Смоленск: Изд-во СГУ. 1999. 130 с.
- [10] Š®áâªë- ,€. Эволюция атмосферы, биосферы и климата. // Пер. с франц. под ред. и с послесловием Н.Н. Моисеева. - М.: Наука. 1984. 96 с.

- [11] •¥£¥«і¬ - f.†., ' àª® €.Є. Модель глобального цикла углерода с высоким пространственным разрешением. М.: ВЦ РАН, 1999. 26 с.
- [12] Ž«¥-¥¢ ••. Модель государственного регулирования экологических последствий экономического роста. М.: ВЦ АН СССР, 1991. — 43 с.
- [13] Akihiko I., Takehisa O. A simulation model of the carbon cycle in land ecosystems (Sim-CYCLE): a description based on dry-matter production theory and plot-scale validation. Elsevier: Ecological Modelling 151 (2002) pp. 143-176.
- [14] Žiã-æíæí£ —. Оптимальное использование пастбищных угодий лесостепной зоны. Кандидатская диссертация. Улаанбаатар. 2000.
- [15] •і¬ Ё. Биологические основы и пути увеличения производства баранины. Докторская (Sc) диссертация. Улаанбаатар. 1994.
- [16] Muth J.F. Rational Expectations and the Theory of Price Movements.// Econometrica, Vol. 29, No. 3. (Jul., 1961), pp. 315-335.
- [17] Fisher P. Rational Expectations in Macroeconomic Models, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. (Advanced Studies in Theoretical and Applied Econometrics: Vol. 26.) 1992. 224 pp.
- [18] •®á~¥«®¢ ^f. Вариационный принцип в описании экономического поведения хозяйства В кн.: Математическое моделирование: Процессы в сложных экономических и экологических системах. Под ред. Самарского А.А., Моисеева Н.Н., Петрова А.А. М: Наука, 1986, с.148-163
- [19] Ž«¥-¥¢ ••., •®á~¥«®¢ ^f. Модель инвестиционной политики фирм в экономической системе рыночного типа. В кн.:

Математическое моделирование: Процессы в сложных экономических и экологических системах. Под ред. Самарского А.А., Моисеева Н.Н., Петрова А.А. М.: Наука. 1986. с. 163-173

- [20] Mas-Colell A., Whinston M.D., and Green J.R. Microeconomic Theory. New-York Oxford: Oxford University Press, 1995. - 981 p.
- [21] •@á~«@ç ^f. Экономические агенты и системы балансов. Препринт WP2/2001/03 - М.: ГУ-ВШЭ, 2001. - 68 с.