10. Savinykh P. A., Bulatov S. Yu., Smirnov R. A. Optimization of the working process of the root-tuberose chopper // Bulletin of the Mari State University. Series "Agricultural sciences. Economic Sciences". 2015. No. 3 (3). P. 36-41.
11. Cattle feeding experiment and chopping device parameter determination for mechanized harvesting of forage rape crop / X. Wan [et al.] // Transactions of the ASABE. 2021. 64 (2). P. 715-725.
12. Cutting resistance of soft materials: effects of blade inclination and friction / A. Spagnoli [et al.] // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. 2019. No. 101. P. 200-206.
13. Determination of the optimal incline angle of the incision of the cutting machine of the tuber grinder of potatoes / S. N. Shukhanov [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. V. 548(5). 052026.
14. Jamshidpouya M., Najafi G., Tavakoli Hashjin T. Design, fabrication and evaluation of electric forage chopper with adjustable helix angle // Journal of Agricultural Science and Technology. 2018. V. 20 (5). P. 923-938.
15. Upgraded rotary cross-shaped food shredder knife / U. D. Batyrov [et al.] // International Conference «Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies», IT and QM and IS 2017. 2017. P. 309-311.

Authors Information

Ryadnov Alexey Ivanovich, Professor of the Department "Operation and technical service of machines in agriculture", Volgograd state agrarian University (400002, southern Federal district, Volgograd region, Volgograd, 26 Universitetskiy Ave.), honored worker of the higher school of the Russian Federation, doctor of agricultural Sciences, Professor.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2364-4944>. E-mail: alex.rjadnov@mail.ru;

Fedorova Olga Alekseevna, Professor of the Department of "Technical systems in agriculture", Volgograd state agrarian University (400002, southern Federal district, Volgograd region, Volgograd, 26 Universitetskiy Ave.), Doctor of Technical Sciences, associate Professor,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2615-1101>, E-mail: foa_77@mail.ru;

Mamakhai Angela Kanvekovna, specialist of the Laboratory of processing and storage of plant Products Federal Scientific Agroengineering Center VIM (Russian Federation, 109428, Russia, Moscow, 1st Institutsky proezd, house 5),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8582-108>, E-mail: mamakhaeva@mail.ru

Информация об авторах

Ряднов Алексей Иванович, профессор кафедры «Эксплуатация и технический сервис машин в АПК» Волгоградского государственного аграрного университета (РФ, 400002, г. Волгоград, пр. Университетский, д. 26), доктор сельскохозяйственных наук,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2364-4944>. E-mail: alex.rjadnov@mail.ru;

Федорова Ольга Алексеевна, профессор кафедры «Технические системы в АПК» Волгоградского государственного аграрного университета (РФ, 400002, г. Волгоград, пр. Университетский, д. 26), доцент, доктор технических наук,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2615-1101>, E-mail: foa_77@mail.ru;

Мамахай Анжела Канвековна, специалист лаборатории переработки и хранения продукции растениеводства, Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ (РФ, 109428, г. Москва, 1-й Институтский проезд, дом 5),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8582-108>, E-mail: mamakhaeva@mail.ru

DOI: 10.32786/2071-9485-2021-03-38

ANALYTICAL MODELING OF ARID PASTURE DEGRADATION

A. N. Salugin, M.V. Vlasenko

*Federal Research Centre of Agroecology, Amelioration and Protective Afforestation
of the Russian Academy of Sciences, Volgograd, Russia*

Received 26.05.2021

Submitted 11.08.2021

Abstract

Introduction. The use of mathematical methods in the study of the dynamics of degradation of the vegetation cover in arid territories is currently relevant in the problems of managing the bioproductivity and sustainability of pasture ecosystems. **Object.** The object of research was the plant associations

of the arid belt of Russia. **Materials and methods.** The purpose of the research is to study degradation processes of vegetation cover by mathematical methods using ordinary differential equations. The implementation of such models was carried out numerically by the analytical method of finite differences in the form of arrays describing the time dependence of the areas of soil cover phytocenoses. The dynamics of degradation of phytocenoses was analyzed using interactive graphics. The rate of degradation was associated with the characteristic points of the evolution curves. The novelty of research lies in obtaining solutions to mathematical models of systems of ordinary differential equations in the form of explicit dependences of the areas of projective coverings of phytocenoses on time. **Results and conclusion.** Models are compiled for those cases when the system of ordinary differential equations admits a solution in the form of algebraic expressions in a closed form. Solutions were obtained for various schemes of succession transitions between plant communities. It is noted that an important feature of soil-plant systems is their high sensitivity to the intra-systemic diversity of interactions between phytocenoses, which in turn is determined by the general biodiversity of pasture ecosystems. Such an analysis is promising in specific problems of stability and self-organization of pastures. The results of such models can be applied in the management of pasture biological resources, provided that the regime of their rational use is observed. The matrix of mutual transitions, as a matrix of coefficients of the right parts of the system of ordinary differential equations, is a quantitative measure of adequate «loading» (animal load) on pastures operating in the self-recovery mode.

Key words: *autonomous systems of differential equations, mathematical modeling, dynamics of successions, extreme points, biodiversity.*

Citation. Salugin A.N., Vlasenko M.V. Analytical modeling of arid pasture degradation. *Proc. of the Lower Volga Agro-University Comp.* 2021. 3(63). 366-376 (in Russian). DOI: 10.32786/2071-9485-2021-03-38.

Author's contribution. All authors of this research paper have directly participated in the planning, execution, or analysis of this study. All authors of this paper have read and approved the final version submitted.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

УДК 631.432.3

АНАЛИТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕГРАДАЦИИ АРИДНЫХ ПАСТБИЩ

А. Н. Салугин, доктор сельскохозяйственных наук
М. В. Власенко, кандидат сельскохозяйственных наук

ФГБНУ Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций
и защитного лесоразведения Российской академии наук, г. Волгоград

Дата поступления в редакцию 26.05.2021

Дата принятия к печати 11.08.2021

Актуальность. Применение математических методов при изучении динамики деградации растительного покрова засушливых территорий в настоящее время актуально в задачах управления биопродуктивностью и устойчивостью пастбищных экосистем. **Объектом исследований** являлись растительные ассоциации аридного пояса России. **Материалы и методы.** Цель исследований – изучение деградационных процессов растительного покрова математическими методами с использованием обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ). Реализация таких моделей осуществлялась численно аналитическим методом конечных разностей в виде массивов, описывающих временную зависимость площадей фитоценозов почвенного покрова. Динамика деградации фитоценозов анализировалась с применением интерактивной графики. Скорость протекания деградации связывалась с характерными точками кривых эволюции. **Новизна исследований** заключается в получении решения математических моделей систем ОДУ в виде явных зависимостей площадей проективных покрытий фитоценозов от времени. **Результаты и выводы.** Составлены модели для случаев, когда система ОДУ допускает решение в виде алгебраических выражений в замкнутой форме. Были получены решения для различных схем сукцессионных переходов между растительными сообществами. Замечено, что важной особенно-

стью почвенно-растительных систем является их высокая чувствительность к внутрисистемному разнообразию взаимодействий между фитоценозами, что в свою очередь определяется общим биоразнообразием пастбищных экосистем. Подобный анализ перспективен в конкретных задачах устойчивости и самоорганизации пастбищ. Результаты таких моделей могут применяться в управлении пастбищными биоресурсами при условии соблюдения режима их рационального использования. Матрица взаимных переходов, как и матрица коэффициентов правых частей системы ОДУ, являются количественной мерой адекватного «нагружения» (животной нагрузки) на пастбища, функционирующие в режиме самовосстановления.

Ключевые слова: *деградация аридных пастбищ, математическое моделирование деградации пастбищ, динамика сукцессий, экстремальные точки.*

Цитирование. Салугин А. Н., Власенко М. В. Аналитическое моделирование деградации аридных пастбищ. *Известия НВ АУК.* 2021. 3(63). 366-376. DOI: 10.32786/2071-9485-2021-03-38.

Авторский вклад. Все авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении или анализе данного исследования. Все авторы настоящей статьи ознакомились и одобрили представленный окончательный вариант.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение. На аридных территориях резкие климатические колебания и антропогенные нагрузки являются серьезным препятствием для обеспечения нормальной кормовой базы и способствуют различным видам деградации пастбищных экосистем (дефляции, биологической регрессии и т. д.) [5, 12-15, 17, 18, 20]. Моделирование состояния аридных пастбищных экосистем при их хозяйственной эксплуатации помогает в решении задач управления их продуктивностью и устойчивостью [2, 9, 10, 11]. В современной математической биологии развивается новое направление моделирования, основанное на дифференциальных уравнениях. Вводятся такие понятия, как «оператор сдвига» (оператор эволюции), «качественная эквивалентность», «бифуркация» и т.д. Математическое моделирование с помощью линейной системы обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) успешно используется для исследования динамики почвенных растительных экосистем [3, 7, 8]. Иногда эти уравнения называют эволюционными, а их решение реализуется численно. Успешно решали экологические проблемы с привлечением ОДУ и детально анализировали полученные результаты в своих работах отечественные и зарубежные ученые в середине прошлого – начале настоящего столетий: Самарский А. А., Курдюмов С. П., Свиричев Ю. М., Смирнов, Тихонов А. Н., Jorgensen S. E., Bendoricchio G., Logofet D. O., Ulanova N. G., Klochkova I. N., Demidova A. N. Моделирование с применением дифференциальных уравнений, на наш взгляд, наиболее эффективно для описания динамики многомерных экосистем. Данная методология адекватно отражает развитие сложных экосистем и их устойчивость. При математическом моделировании динамики деградации агроландшафтов преимущество таких моделей неоспоримо. Кроме того, построение оператора эволюции (фазовой траектории), определение точек качественного перелома в динамике экосистем (точек бифуркации) дают ценную информацию об их устойчивости и способности к самоорганизации.

Материалы и методы. Цель исследований – изучение деградационных процессов растительного покрова в аридном поясе России математическими методами с использованием обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ). В настоящей работе моделирование осуществлялось на автономных системах линейных дифференциальных уравнений второго и четвертого порядков, описывающих динамику деградации растительности на пастбищах при антропогенном воздействии (в виде распашки и перевыпаса).

При изучении механизмов деградации растительного покрова основное влияние уделяется исследованию формы кривого временного тренда площадей фитоценозов, составляющих покров [1, 4]. Вместе с тем механизмы деградации, приводящие к наблюдаемым формам тренда, не были выявлены. Актуально определить влияние сукцессионных превращений на динамику функционирования фитоценозов, учитывая различную сложности схемы переходов. Были рассмотрены случаи систем ОДУ, когда они решаются в замкнутом виде с начальными условиями (задача Коши). При нахождении общих решений использовался метод неопределенных коэффициентов с графическим наблюдением полученных результатов. Вначале рассматривалась упрощенная схема, когда в сукцессии участвуют всего два фитоценоза (рисунок 1а). В данном случае процесс динамического сукцессионного перехода описывается линейной системой ОДУ (1) второго порядка:

$$\begin{cases} \frac{dS_1}{dt} = -\alpha_{12} \cdot S_1 + \alpha_{21} \cdot S_2 \\ \frac{dS_2}{dt} = -\alpha_{21} \cdot S_2 + \alpha_{12} \cdot S_1 \end{cases}, \quad (1)$$

где α_{ij} – коэффициенты переходов: α_{12} – интенсивность передачи биомассы фитоценоза 1 фитоценозу 2.

Рисунок 1 – Схема сукцессионных переходов, когда в сукцессии участвуют два фитоценоза: а) – ориентированный граф для двух фитоценозов; б) – решение модели (1) с взаимными переходами, изображенными слева

Figure 1 – Scheme of succession transitions when two phytocenoses participate in succession: а) –oriented graph for two phytocenoses; б) –solution of model (1) with mutual transitions shown on the left.

Интенсивность обратного процесса описывается коэффициентом α_{21} . Знаки этих коэффициентов определяют направление сукцессий: если элемент разрушается, ставится знак минус, если восстанавливается – плюс, линейная система дифференциальных уравнений (1) может быть решена в явном (замкнутом) виде (Смирнов, 1974). Математически модель сукцессионных переходов для любого числа фитоценозов записывается в виде матрицы:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & \alpha_{12} & \dots & \alpha_{1n} \\ \alpha_{21} & 0 & \dots & \alpha_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \alpha_{n1} & \alpha_{n2} & \dots & 0 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

В нашем случае для системы (1) матрица (2) выглядит так:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & \alpha_{12} \\ \alpha_{21} & 0 \end{pmatrix}.$$

Система ОДУ решалась методом неопределённых коэффициентов с использованием системы алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} A(k + \alpha_{12}) - \alpha_{21} \cdot B = 0, \\ -\alpha_{12} \cdot A + B(\alpha_{21} + k) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

и начальных условий: $S_1(0)=S_{10}$, $S_2(0)=S_{20}$ (задача Коши), где S_{10} и S_{20} – значения площадей фитоценозов в начальный момент времени. Решение получено в виде:

$$\begin{cases} S_1(t) = \frac{\alpha_{21}}{\alpha_{12} + \alpha_{21}} + \frac{(\alpha_{21} - \alpha_{12}) \cdot S_2(0) \cdot \alpha_{12}}{\alpha_{12} + \alpha_{21}} \cdot e^{-(\alpha_{12} + \alpha_{21})t} \\ S_2(t) = \frac{\alpha_{12}}{(\alpha_{21} + \alpha_{12})} - \frac{(\alpha_{21} - \alpha_{12}) \cdot S_2(0) \cdot \alpha_{12}}{\alpha_{12} + \alpha_{21}} \cdot e^{-(\alpha_{12} + \alpha_{21})t} \end{cases} \quad (4)$$

где α_{ij} – коэффициенты переходов ($i=1,2; j=1,2$), $S_i(0)$ начальные значения площадей, t – время. Для качественного анализа представим решение в упрощенном виде (сделав замену), объединяя постоянные коэффициенты:

$$\begin{cases} S_1(t) = A + B \cdot e^{-\alpha_{12}t} \\ S_2(t) = A - D \cdot e^{-\alpha_{21}t} \end{cases},$$

где $A = \frac{\alpha_{21}}{\alpha_{12} + \alpha_{21}}$, $B = \frac{(\alpha_{21} - \alpha_{12}) \cdot S_2(0) \cdot \alpha_{12}}{\alpha_{12} + \alpha_{21}}$,

$$D = \frac{(\alpha_{21} - \alpha_{12}) \cdot S_2(0) \cdot \alpha_{12}}{\alpha_{12} + \alpha_{21}}, \quad \alpha = \alpha_{12} + \alpha_{21}.$$

На рисунке 1b приведены графики динамики фитоценозов $S_1(t)$ и $S_2(t)$. Видно, что первый монотонно уменьшается, а второй – асимптотически возрастает, приближаясь к значениям, определяемым условием нормировки: $S_1(t)+S_2(t)=1$. Начальные условия модели: $S_1(0)=0,99$, $S_2(0)=0,01$, $\alpha_{12} = 0.4$, $\alpha_{21} = 0.01$ (1/год).

Результаты. Основным результатом сукцессионных перемен внутри системы, состоящей из двух фитоценозов, является монотонное и асимптотическое приближение их площадей к предельным значениям. В данной модели не учитывается связь почвенно-растительной системы с внешней средой (система замкнутая). Взаимодействие пастбищных растительных сообществ с учетом биосферного окружения описывается дополнительными математическими конструкциями, отражающими конкретные характеристики подобного контакта (изменение климата, антропогенного воздействия). В описанной модели не была учтена ограниченность биосферных ресурсов, где сосуществуют и развиваются фитоценозы. Приведенная модель, скорее демонстрация приёма дифференциальных урав-

нений, чем реальность. Отметим, что в аридных условиях начальной стадии сукцессии пастбищ в процессе деградации порождают промежуточные фитоценозы [16, 19]. Ниже будет рассмотрен вариант с расширенной конфигурацией связей между четырьмя типами подобных фитоценозов. Адекватность описания их динамики с помощью системы ОДУ зависит от точности задания начальных условий, определение которых является отдельной задачей. Отметим, что решая задачу Коши для почвенных растительных экосистем, исследователь получает возможность моделирования их динамики для определения условий их динамического равновесия. Концепция такого моделирования основана на возможности качественной теории ОДУ решать более общие задачи устойчивости пастбищных экосистем и описывать их эволюцию. Это важно для задач управления, когда знание динамики деградации предопределяет стратегию потребления растительными ресурсами пастбищ РФ (нормы выпаса, животная нагрузка).

Модели динамики в виде систем ОДУ допускают аналитическое решение в замкнутом виде. Рассмотрим систему четвёртого порядка с начальными условиями в виде четырех компонент вектора исходных площадей фитоценозов S_{0i} . В нашем случае правая часть системы уравнений не содержит времени (автономные системы). Это означает, что процессы, протекающие внутри экосистемы, не связаны с изменениями внешних воздействий во времени (стационарный случай). Такое упрощение адекватно описывает процессы только стационарных деградационных разрушений без катастроф. Вместе с тем качественная картина, полученная в таком упрощении, имеет принципиальное значение для понимания физической природы сукцессионных механизмов. Результаты такого «промежуточного» моделирования использовались нами для объяснения результатов, полученных при вариантах с более развитой схемой сукцессионных переходов. Для случаев, когда аналитическое решение системы ОДУ не представляется возможным, его получают численно с помощью вычислительного эксперимента (метод конечных разностей) [3, 7, 8]. В настоящей статье рассмотрены аналитические варианты решения системы уравнений второго и четвертого порядков.

Вначале рассмотрим взаимодействие четырёх фитоценозов по схеме, представленной ориентированным графом, изображенном на рисунке 2а, где показаны переходы от исходного состояния к полной деградации. Фитоценозы под номерами 2 и 3 являются промежуточными как результат перемещения в ряду сукцессионных переходов к финальной стадии деградации.

Рисунок 2 – Схема сукцессионных переходов, когда в сукцессии участвуют четыре фитоценоза: а) – ориентированный граф модели деградации; б) – решение математической модели деградации (5)

Figure 2 – Scheme of succession transitions, when four phytocenoses participate in the succession: а) – oriented graph of degradation model; б) – solution of the mathematical model of degradation (5)

Подобная схема была использована в работе Титляновой А. А. и Самбуу А. Д. [9] при изучении залежной сукцессии в степях Тувы. В нашем случае роль залежи играет финальное состояние при антропогенной деградации пастбищ – разбитые пески. В аридных условиях Тувы сукцессионные процессы формирования залежей проходят через две промежуточные стадии (в нашем случае: 2-я и 3-я вершины орграфа). Данная модель не учитывает обратных переходов (восстановление) и описывает только разрушительную эволюцию по механизму «без восстановления». Математически модель в данном случае описывается автономной системой четвёртого порядка:

$$\begin{cases} \frac{dS_1}{dt} = -\alpha_{12}S_1 \\ \frac{dS_2}{dt} = -\alpha_{23}S_2 + \alpha_{12}S_1 \\ \frac{dS_3}{dt} = -\alpha_{34}S_3 + \alpha_{23}S_2 \\ \frac{dS_4}{dt} = \alpha_{34}S_3 \end{cases} \quad (5)$$

где α_{ij} – коэффициент переходов между i и j -ым фитоценозами (слева – направо по схеме). Знак «+» означает рост, «-» – убыль площадей. Опуская промежуточные выкладки, получим решение системы (5) в виде:

$$\begin{cases} S_1(t) = S0_1 \cdot e^{-\alpha_{12}t} \\ S_2(t) = S0_2 \cdot e^{-\alpha_{23}t} + S0_1(e^{-\alpha_{12}t} - e^{-\alpha_{23}t}) \\ S_3(t) = S0_3 \cdot e^{-\alpha_{34}t} + \left(\frac{S0_1 \alpha_{12} \alpha_{23}}{(\alpha_{23} - \alpha_{12})(\alpha_{34} - \alpha_{23})} - \frac{S0_2 \alpha_{23}}{\alpha_{34} - \alpha_{23}} \right) \\ \cdot (e^{-\alpha_{12}t} - e^{-\alpha_{34}t}) + \frac{S0_1 \alpha_{12} \alpha_{23} (e^{-\alpha_{12}t} - e^{-\alpha_{34}t})}{(\alpha_{23} - \alpha_{12})(\alpha_{34} - \alpha_{23})} \\ S_4(t) = S0_1(e^{-\alpha_{12}t} - e^{-\alpha_{34}t}) \frac{\alpha_{12} \alpha_{23} \left(\frac{1}{\alpha_{34} - \alpha_{12}} - \frac{1}{\alpha_{34} - \alpha_{23}} \right)}{\alpha_{23} - \alpha_{12}} \\ S0_2(e^{-\alpha_{12}t} - e^{-\alpha_{34}t}) \frac{\alpha_{23}}{\alpha_{34} - \alpha_{23}}, \end{cases} \quad (6)$$

графики которого представлены на рисунке 2b.

Приведенные результаты качественно отличаются от предыдущего (два фитоценоза): $S_1(t)$ и $S_4(t)$ монотонны, но не симметричны относительно друг друга, как это было в двухэлементной модели. Ярко выраженная немонотонность поведения промежуточных фитоценозов $S_2(t)$ и $S_3(t)$ с чёткими экстремумами предсказывает существование особых точек. Полученные аналитические выражения (6) для $S_i(t)$ сложны для анализа поведения фитоценозов во времени. Вместе с тем ценность таких моделей в том, что они дают исследователю возможность посредством качественной теории ОДУ изучать устойчивость экосистем и делать прогнозы на будущее. Количественно определение элементов матрицы переходов, соответствующих стационарным фазовым траекториям, с помощью моделирования может принести практическую пользу в задачах оптимального природопользования и управления пастбищными биоресурсами. Приведённый пример указывает на то, что си-

стема нестабильна. То есть элементы либо асимптотически исчезают (S_1, S_2, S_3), либо занимают всё пространство (S_4). Модель качественно адекватно отражает процесс необратимой деградации четырехкомпонентной экосистемы.

Аналитические решения позволяют изучать поведение фитоценозов в экстремальных точках. В нашем случае наблюдают два экстремума для кривых $S_2(t)$ и $S_3(t)$ (рисунок 2b). Для более точного определения положения экстремальных точек продифференцируем решения, получив явные формулы для производных, с помощью которых можно анализировать скоростную динамику деградации. Графически эти скорости представлены на рисунке 3.

Рисунок 3 – Динамика решений математической модели (5)

Figure 3 – Dynamics of solutions to a mathematical model (5)

Исследуемые сукцессионные процессы имеют различную природу: дефляция и восстановление, деградация и развитие, прогресс и регресс и т.п. При анализе аналитических решений дифференциальных уравнений представляется возможным получать информацию о динамике того или иного фитоценоза растительной экосистемы, определять точки качественных переломов. Графическое представление результатов деградации даёт наглядную интерпретацию модели. Из рисунка 3 видно, что S_1 (также как и S_4) изменяется без изменения знака производной: процессы имеют однородный характер в виде монотонных функций. Кривые $\frac{dS_2(t)}{dt}$ и $\frac{dS_3(t)}{dt}$ пересекают ось времени. Это означает, что в точках пересечения происходит изменение знака скорости деградационного перехода в другие состояния. Качественно изменяется динамика процессов: ускорение меняется на замедление в точке t_{max} . Таким образом, алгебраические выражения для производных дают возможность изучать экстремумы решения модели. Точки качественных переломов при этом определяются из условия равенства нулю вторых производных.

Выводы. Получены и проанализированы две качественно отличные друг от друга аналитические модели деградации почвенных растительных экосистем. Различие определяется числом растительных сообществ, участвующих в сукцессиях, а также числом связей, сопровождающих процесс деградации. Промежуточные фитоценозы

развиваются во времени немонотонно, демонстрируя неустойчивость экосистемы (точки бифуркаций). Качественное изменение динамики фитоценозов модели служит индикатором устойчивости растительных сообществ в целом. Подобный аналитический анализ перспективно использовать в задачах устойчивости и самоорганизации пастбищных фитоценозов. Результаты таких моделей могут применяться в управлении пастбищными биоресурсами. Матрица взаимных сукцессионных переходов (матрица коэффициентов системы ОДУ) является количественной мерой оптимальной животной нагрузки на пастбище при их эксплуатации в режиме самовосстановления.

Библиографический список

1. Бородычев В. В., Власенко М. В., Кулик А. К. Сезонные изменения кормовой продуктивности аридных пастбищ // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2021. № 1 (61). С. 14-24.
2. Кулик А. К., Власенко М. В. Эколого-гидрологическая оценка воздействия сельского и лесного хозяйства на песчаные земли Верхнего Дона // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2015. № 1 (57). С. 89-94.
3. Кулик К. Н., Салугин А. Н. Моделирование дефляции аридных пастбищ с помощью Марковских цепей // Экосистемы: экология и динамика. 2017. № 1 (4). С. 5-22.
4. Материалы к флоре Волгоградской области / С. А. Сенатор [и др.] // Фиторазнообразие Восточной Европы. 2018. Т. 12. № 4. С. 23-43.
5. Панкова Е. И., Конюшкова М. В., Мухортов В. И. Тренд развития почв аридных экосистем под влиянием различного антропогенного воздействия (Астраханская область) // Экосистемы: экология и динамика. 2018. Т. 2. № 2. С. 40-64.
6. Роль почв в оценке деградации земель (обзор) / Е. В. Цветнов, О. А. Макаров, А. С. Строков, О. Б. Цветнова // Почвоведение. 2021. № 3. С. 363-371.
7. Салугин А. Н. Численное моделирование сукцессионных переходов в агроэкологии // Российская сельскохозяйственная наука. 2020. № 1. С. 62-65.
8. Салугин А. Н. Математические модели динамической устойчивости аридных экосистем // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2018. № 4 (52). С. 339-345.
9. Титлянова А. А., Самбуу А. Д. Детерминированность и синхронность залежной сукцессии в степях Тувы // Известия РАН. Серия Биологическая. 2014. № 6. С. 621-630.
10. Турко С. Ю., Трубакова К. Ю. Моделирование функционирования пастбищ в целях прогнозирования их состояния при хозяйственной эксплуатации // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2018. № 1 (45). С. 33-38.
11. Шинкаренко С. С., Кошелева О. Ю., Солодовников Д. А. Прогностно-картографическое моделирование продуктивности пастбищ Волгоградской области на основе данных дистанционного зондирования // Юг России: экология, развитие. 2020. Т. 15. № 1 (54). С. 69-78.
12. A quantitative approach to zoning arid territories in Russia with respect to climatic and soil-granulometric parameters / D. I. Rukhovich [et al.] // Doklady Earth Sciences. 2019. Vol. 485. No. 2. Pp. 428-431.
13. Experience in approbation of societal land value as a basis for ecological and economic assessment of damage from land degradation / E. V. Tsvetnov [et al.] // Eurasian Soil Science. 2019. Vol. 52. No. 10. Pp. 1298-1305.
14. Geoinformational analysis of desertification of the Northwestern Caspian / K. N. Kulik [et al.] // Arid Ecosystems. 2020. Vol. 10. No 2. Pp. 98-105.
15. Kulik K. N., Rulev A. S., Sazhin A. N. Global processes of deflation in steppe ecosystems // Russian Meteorology and Hydrology. 2018. Vol. 43. No 9. Pp. 607-612.
16. Manaenkov A. S., Rybashlykova L. P. Increasing the efficiency of plant-cover restoration in the modern focus of deflation on pastures of the Northwestern Caspian region // Arid Ecosystems. 2020. Vol. 10. No. 4. Pp. 358-367.

17. On the 30th anniversary of the "General plan to combat desertification of black lands and Kizlyar pastures" / K. N. Kulik [et al.] // *Arid Ecosystems*. 2018. Vol. 8. No 1. Pp. 5-12.

18. Pugacheva A. M. Climatic fluctuations in dry steppes and their role in the demutation process // *Arid Ecosystems*. 2020. Vol. 10. No. 3. Pp. 181-187.

19. Radochinskaya L. P., Kladiev A. K., Rybashlykova L. P. Production potential of restored pastures of the Northwestern Caspian // *Arid Ecosystems*. 2019. Vol. 9. No. 1. Pp. 51-58.

20. Vlasenko M. V., Kulik A. K., Salugin A. N. Evaluation of the ecological status and loss of productivity of arid pasture ecosystems of the Sarpa lowland // *Arid Ecosystems*. 2019. Vol. 9. No 4. Pp. 273-281.

Conclusions. Two qualitatively different analytical models of degradation of soil plant ecosystems have been obtained and analyzed. The difference is determined by the number of plant communities participating in successions, as well as by the number of connections accompanying the degradation process. Intermediate phytocenoses develop non-monotonously in time, demonstrating the instability of the ecosystem (bifurcation points). A qualitative change in the dynamics of phytocenoses in the model serves as an indicator of the stability of plant communities as a whole. It is promising to use such an analytical analysis in the problems of stability and self-organization of pasture phytocenoses. The results of such models can be applied in the management of pasture bioresources. The matrix of mutual successional transitions (the matrix of coefficients of the ODE system) is a quantitative measure of the optimal animal load on the pasture during their operation in the self-recovery mode.

Reference

1. Borodychev V. V., Vlasenko M. V., Kulik A. K. Seasonal changes in forage productivity of arid pastures // *News of the Nizhnevolzhsky agro-university complex: Science and higher professional education*. 2021. No. 1 (61). Pp. 14-24.

2. Kulik A. K., Vlasenko M. V. Ecological and hydrological assessment of the impact of agriculture and forestry on the sandy lands of the Upper Don // *Ways to improve the efficiency of irrigated agriculture*. 2015. No. 1 (57). Pp. 89-94.

3. Kulik K. N., Salugin A. N. Modeling deflation of arid pastures using Markov chains // *Ecosystems: ecology and dynamics*. 2017. No. 1 (4). Pp. 5-22.

4. Materials for the flora of the Volgograd region / S. A. Senator [et al.] // *Phytocovota of Eastern Europe*. 2018. V. 12. No. 4. Pp. 23-43.

5. Pankova E. I., Konyushkova M. V., Mukhortov V. I. Development trend of soils in arid ecosystems under the influence of various anthropogenic impacts (Astrakhan region) // *Ecosystems: ecology and dynamics*. 2018. Vol. 2. No. 2. Pp. 40-64.

6. The role of soils in assessing land degradation (review) / E. V. Tsvetnov, O. A. Makarov, A. S. Stokov, O. B. Tsvetnova // *Soil science*. 2021. No. 3. Pp. 363-371.

7. Salugin A. N. Numerical modeling of successional transitions in agroecology // *Russian agricultural science*. 2020. No. 1. Pp. 62-65.

8. Salugin A. N. Mathematical models of dynamic stability of arid ecosystems // *Bulletin of the Nizhnevolzhsky agro-university complex: Science and higher professional education*. 2018. No. 4 (52). Pp. 339-345.

9. Titlyanova A. A., Sambuu A. D. Determinism and synchronicity of fallow succession in the steppes of Tuva // *Izvestiya RAN. Biological series*. 2014. No. 6. Pp. 621-630.

10. Turko S. Yu., Trubakova K. Yu. Modeling the functioning of pastures in order to predict their condition during economic exploitation // *Bulletin of the Bashkir State Agrarian University*. 2018. No. 1 (45). Pp. 33-38.

11. Shinkarenko S. S., Kosheleva O. Yu., Solodovnikov D. A. Predictive-cartographic modeling of pasture productivity in the Volgograd region based on remote sensing data // *South of Russia: ecology, development*. 2020. Vol. 15. No. 1(54). Pp. 69-78.

12. A quantitative approach to zoning arid territories in Russia with respect to climatic and soil-granulometric parameters / D. I. Rukhovich [et al.] // *Doklady Earth Sciences*. 2019. Vol. 485. No. 2. Pp. 428-431.

13. Experience in approbation of societal land value as a basis for ecological and economic assessment of damage from land degradation / E. V. Tsvetnov [et al.] // Eurasian Soil Science. 2019. Vol. 52. No. 10. Pp. 1298-1305.
14. Geoinformational analysis of desertification of the Northwestern Caspian / K. N. Kulik [et al.] // Arid Ecosystems. 2020. Vol. 10. No 2. Pp. 98-105.
15. Kulik K. N., Rulev A. S., Sazhin A. N. Global processes of deflation in steppe ecosystems // Russian Meteorology and Hydrology. 2018. Vol. 43. No 9. Pp. 607-612.
16. Manaenkov A. S., Rybashlykova L. P. Increasing the efficiency of plant-cover restoration in the modern focus of deflation on pastures of the Northwestern Caspian region // Arid Ecosystems. 2020. Vol. 10. No. 4. Pp. 358-367.
17. On the 30th anniversary of the "General plan to combat desertification of black lands and Kizlyar pastures" / K. N. Kulik [et al.] // Arid Ecosystems. 2018. Vol. 8. No 1. Pp. 5-12.
18. Pugacheva A. M. Climatic fluctuations in dry steppes and their role in the demutation process // Arid Ecosystems. 2020. Vol. 10. No. 3. Pp. 181-187.
19. Radochinskaya L. P., Kladiev A. K., Rybashlykova L. P. Production potential of restored pastures of the Northwestern Caspian // Arid Ecosystems. 2019. Vol. 9. No. 1. Pp. 51-58.
20. Vlasenko M. V., Kulik A. K., Salugin A. N. Evaluation of the ecological status and loss of productivity of arid pasture ecosystems of the Sarpa lowland // Arid Ecosystems. 2019. Vol. 9. No 4. Pp. 273-281.

Authors Information

Salugin Alexander Nikolaevich, Chief Researcher, Laboratory of Hydrology of Agroforest Landscapes of the Federal Research Center for Agroecology of the Russian Academy of Sciences, Doctor of agricultural sciences (Russia, 400062, Volgograd, Universitetsky Ave., 97), ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5443-7326>, e-mail: saluginan@mail.ru.

Vlasenko Marina Vladimirovna, Leading Researcher, Laboratory of Hydrology of Agroforest Landscapes of the Federal Research Center for Agroecology of the Russian Academy of Sciences, Candidate of agricultural sciences (Russia, 400062, Volgograd, Universitetsky Ave., 97), ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6356-2225>, e-mail: vlasencomarina@mail.ru.

Информация об авторах

Салугин Александр Николаевич, главный научный сотрудник лаборатории гидрологии агролесоландшафтов ФНЦ агроэкологии РАН (РФ, 400062, г. Волгоград, пр-т Университетский, 97), доктор сельскохозяйственных наук, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5443-7326>, e-mail: saluginan@mail.ru.

Власенко Марина Владимировна, ведущий научный сотрудник лаборатории гидрологии агролесоландшафтов ФНЦ агроэкологии РАН (РФ, 400062, г. Волгоград, пр-т Университетский, 97), кандидат сельскохозяйственных наук, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6356-2225>, e-mail: vlasencomarina@mail.ru.

DOI: 10.32786/2071-9485-2021-03-39

THE SPECIFICS OF DIGITAL TECHNOLOGIES FOR REGULATING THE RECLAMATION REGIME OF THE AGROECOSYSTEM

I. F. Yurchenko

*All – Russian Research Institute of Hydraulic Engineering and Land Reclamation
named after A. N. Kostyakov, Moscow*

Received 20.05.2021

Submitted 29.07.2021

Introduction. The offers of the market of digital technologies in agriculture in Russia, which are increasingly receiving the palm in assessing the competitiveness of agro-production, are being intensively improved, which actualizes the solution of the problems of developing and operating innovative digital solutions that increase the efficiency of agribusiness on reclaimed land. **The purpose of the work** is to establish the distinctive features of digital technologies for regulating the reclamation regime of agroecosystems, contributing to the solution of the strategic problem of the domestic agro-industrial complex to ensure the food and environmental security of society. The scientific novelty of