
АДАПТАЦИЯ ЛИНЕЙНОГО КЛЕТЧНОГО АВТОМАТА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НА БАЗЕ ПРИРОДНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ¹

Кумратова Альфира Менлигуловна, канд. экон. наук, доц.

Попова Елена Витальевна, д-р экон. наук, проф.

Костенко Иван Викторович, маг.

Дунская Лада Константиновна, студент

Кубанский государственный аграрный университет, Калинина, 13, Краснодар, Россия, 350044; e-mail: alfa05@yandex.ru

Цель: данная статья продолжает исследование по использованию математических методов нелинейной динамики при разработке и адаптации математических методов и прогнозных моделей для анализа временных рядов урожайностей озимой пшеницы регионов юга России. *Обсуждение:* в качестве инструментального средства рассматривается линейный клеточный аппарат, способный наглядно показать и наиболее точно спрогнозировать поведение наблюдаемой системы. Исследуются значения показателей урожайности озимой пшеницы регионов юга России. Выбор данных рядов обусловлен следующим фактом – каждый содержит разное количество статистических данных, причем некоторые из изученных рядов представляют малую выборку. В работе показано, что составление достаточно точного прогноза возможно на основе малого количества данных. *Результаты:* в данной статье раскрывается применимость для прогнозирования нелинейных динамических систем с помощью линейного клеточного автомата, который решает вопрос так называемых «малых выборок».

Ключевые слова: прогнозирование, временной ряд, малая выборка, урожайность озимой пшеницы, линейный клеточный автомат.

DOI: 10.17308/meps.2019.9/2196

Введение

Одной из основных задач науки является стремление описать с помощью уравнений все системы, функционирующие вокруг человека и взаимодействующие с ним. Благодаря этому опровергнута теория детерминированности явлений, возникающих в окружающей среде, так как

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-06-00354 А).

на многие системы действует большое количество факторов, которые зачастую не так просто выявить, а также предугадать, что произойдет в результате такого взаимодействия. Так, например, появился термин «эффект бабочки», обозначающий, что взмах крыльев бабочки способен вызвать последствия, несущие разрушения, даже в других регионах, расположенных значительно дальше от «объекта-инициатора». Благодаря появлению многих теорий и математических моделей появилась и до сих пор развивается теория нелинейной динамики, описывающей системы стохастической и хаотической природы. Ее становлению и развитию способствовали следующие этапы:

1) описание А. Пуанкаре бифуркационной теории (точка бифуркации – разрыв; область, где система принимает другое значение под воздействием набора действующих на нее факторов [2]), вычисления которой положены в основание второго этапа;

2) разработка теории катастроф в 1972 г. и 1977 г. Р. Томом и Е. Зигманом соответственно;

3) появление теории хаоса (Э. Лоренц в 1963 г., С. Смейл в 1967 г.);

4) появление фрактальной геометрии Б. Мандельброта в 1977 г.;

5) в 1977 г. нобелевский лауреат И. Пригожин предложил рассматривать теорию хаоса и фрактальную геометрию диалектически противоположными друг другу, поясняя это тем, что при синтезе обеих возможно приведение системы к порядку.

Таким образом выявлено, что простые системы, уже описанные несложными уравнениями, при изменении или добавлении факторов действия, могут иметь хаотический характер, а с предпосылок Т.-У. Ли и Дж. Йорка в 1975 году природные явления начали называть хаосом [2].

Однако хаотическая природа вещей, опровергающая получение точных значений выходных данных систем, не останавливает ученых в стремлении найти модели, способные описать их и найти решение (математически вычислить состояние (или набор состояний), к которым придет система в определенную точку времени) и зачастую для построения модели необходимо иметь данные по предыдущим состояниям системы. Таким образом объясняется важность накопления временных рядов (ВР) – набора значений системы в разрезе времени и измерения значений за период, разделенный на равные промежутки, в которые происходит получение выходных значений системы.

Учитывая факт сложности в выявлении факторов, действующих на систему, а также определении степени и характера воздействия на нее, выбор аппаратов прогнозирования является одной из основных задач, так как от этого выбора зависит получение наиболее вероятного прогнозного значения. К тому же необходимо понимать важность построения модели предсказания, имеющую определенные метрики, показывающие как адекватность самой модели, так и прогноза. Стоит отметить, что многие средства про-

гнозирования подвержены жесткой критике за неимением моделей и метрик оценки их адекватности [1, 2, 5, 11].

Методология исследования

В качестве аппарата прогнозирования, использующего для построения прогнозной модели временные ряды, авторами предложено рассмотреть линейный клеточный автомат.

Составление прогноза проходит в несколько этапов:

1) перевод полученного множества значений в лингвистический временной ряд (ЛВР), который состоит из трех значений (термов). Традиционно используются Н – низкий, С – средний и В – высокий. Если во временном ряду встречаются значения, явно выделяющиеся на фоне всего ряда (либо очень низкое значение, либо очень высокое, с большим разрывом по сравнению с рядом стоящими точками), принято вводить терм П – пороговое значение для наиболее точного прогноза [4, 6, 12], так как жесткое деление на три термина при описанных выше «скачках» влечет за собой понижение процента валидации модели и, как следствие, менее точный прогноз.

Для получения ЛВР необходимо построить гистограмму по значениям ВР, отметить самые верхние и нижние точки. По отмеченным значениям нарисовать линии (верхняя и нижняя ломаные линии (ВОЛ и НОЛ)), которые образуют собой коридор. Разделив его на три равные части, получим зоны (верхняя, средняя и нижняя), пересекая которые столбцы гистограммы приобретают соответствующее значение (например, при пересечении верхней границы или нахождении в верхней зоне соответствующая точка переводится в терм В) [8, 12];

2) особенностью в расчете прогноза при помощи линейного клеточного автомата является нахождение количества переходов в одно из трех состояний для каждой вариации отрезков, состоящих из термов до того момента, пока данные отрезки не перестанут иметь подобные переходы (пока не произойдет потеря памяти). Например, отрезок ННВН переходит в состояние Н 15 раз, в терм С 5 раз, в терм В 1 раз. В данном шаге находится также глубина памяти, равная числу лингвистических переменных отрезка. Причем *l*-конфигурацией называют набор отрезков длиной *l* с просчитанными переходами в три состояния [9];

3) выявленная глубина памяти показывает, какой длины отрезки временного ряда будут рассматриваться для построения прогноза. С конца ряда выписываются наборы термов длиной *l*, а затем для каждой части отрезка вычисляется общая частота перехода в состояния Н, С и В (например, части ННВ отрезка ВВННВ в состояние Н для каждого значения из 1 – по *l*-конфигураций, складываются значения из 2-конфигурации (НВ->В) и 3-конфигурации (ННВ->Н)). Прогнозное значение получают путем деления просчитанного числа переходов в одно значение (например, в терм Н) на общую сумму для всех трех переходов (сумма переходов в Н, С и В). Таким образом, наибольшее значение, показывающее вероятность перехода отрезка в

одно из состояний, является прогнозным. Все полученные прогнозные значения составляют прогнозный ЛВР [7]. Описывают данный процесс формулой:

$$\sum_{i=1}^n u_t^i,$$

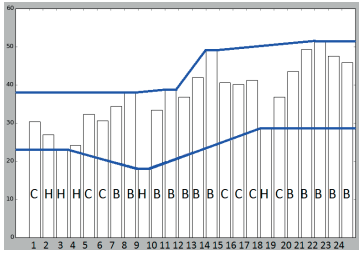
где u_t^i – сумма переходов; i – показатель конфигурации, на которой завершается поиск закономерностей и в которой находится данный отрезок; t – показатель состояния, для которого учитывается количество переходов (Н, С и В) для каждой части данного отрезка; n – количество конфигураций (причем $n=l$).

4) валидация и верификация – этапы, на которых сверяются исходные ЛВР и полученный в ходе вычислений третьего этапа, для выявления неугаданных значений. Выявив процент отклонения количества несовпавших прогнозных значений от общего числа, получаем процент валидации, показывающий адекватность построенной модели и степень отклонения прогноза от реальных показателей. Чем ближе процент к отметке в 20%, тем модель менее адекватна [3].

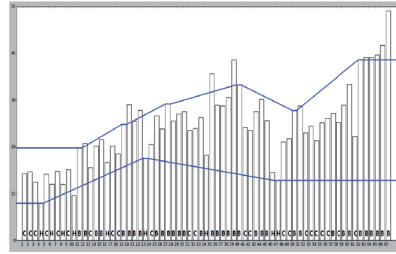
В данной статье рассматриваются временные ряды урожайности озимой пшеницы для следующих регионов: Адыгея (сокращенное наименование ряда – «Адыгея». Значения с 1995 года по 2018 год, 23 значения), Карачаево-Черкесская Республика («КЧР», 1952-2018 гг., 66 значений), Волгоградская область («Волгоград», 1930-2017 гг., 87 значений), Краснодарский край («Краснодар», 1966-2018 гг., 52 значения), Ставропольский край («Ставрополь», 1870-2018 гг., 148 значений), а также рассматриваются ВР урожайности озимой пшеницы по России («Россия», 1913-2018 гг., 105 значений) и временной ряд показателей валового сбора страны («Сбор», 1913-2014 гг.).

Учитывая то, что прогноз составляется для семи временных рядов, большая часть из которых содержит более 60 значений, авторы использовали программу для прогнозирования «Линейный клеточный автомат» [10], благодаря которой получены адекватные прогнозные модели с глубиной памяти не более 11 и процентом валидации моделей не более 20%. Одна из проблем статистики – отсутствие данных, когда их сбор велся неправильно, потеря документов при переходе от одного способа ведения статистических значений к другому, некоторые значения невозможно привести к новым стандартам и т.д. В перечисленных выше ВР такими рядами считается ряд «Адыгея», так как насчитывает всего 23 значения. Также к малым рядам можно отнести «КЧР», «Волгоград» и «Краснодар», так как количество их значений не превышает 100 точек в отличие от остальных рядов (ВР по данным регионам с отмеченными ВОЛ и НОЛ представлены на рис. 1).

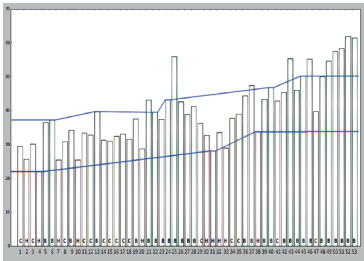
При построении прогнозных моделей для временных рядов с малым количеством точек получены следующие значения (в соответствии с табл. 1):



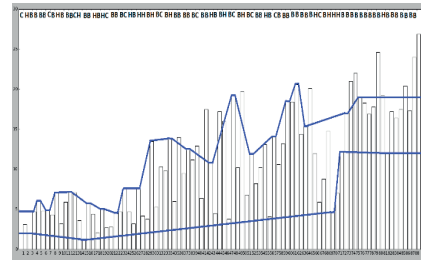
a)



b)



c)



d)

Рис. 1. Временные ряды урожайности озимой пшеницы по регионам:
а – «Адыгея», б – «КЧР», с – «Краснодар», d – «Волгоград»

Таблица 1

Прогнозные характеристики применения линейного клеточного автомата в исследовании временных рядов урожайности озимой пшеницы для рядов «Адыгея», «Краснодар», «Ставрополь», «КЧР» и «Волгоград»

	«Адыгея»	«Краснодар»	«КЧР»	«Волгоград»	«Ставрополь»
Порядок глубины памяти, l	5	7	6	8	7
Величина ошибки прогноза, %	8,33%	11,321%	14,93%	11,36%	17,45%
Численное значение прогноза, ц/га	32,26	45,1	23,1	21,97	33,18
Прогноз в виде лингвистического термина	B	C	B	B	C

С учетом того, что величина ошибки прогноза не превышает 20%, а глубина памяти не более 10 значений (что говорит о получении большего числа отрезков для рассмотрения их на этапе построения прогноза, тем самым вероятность расчета переходов для найденных уникальных комбинаций возрастает), построенные прогнозные модели, а также полученные значения прогноза являются адекватными.

При переходе к ВР с большим количеством значений «Ставрополь» авторы столкнулись с тем, что по точкам 1918, 1919, 1933 и 1942 год отсутствуют значения, поэтому рассчитано среднее из предыдущих и последующих значений за 5 лет. Временной ряд представлен на рис. 2.

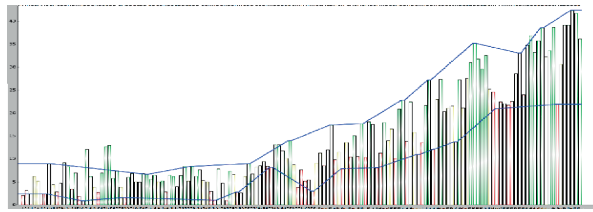
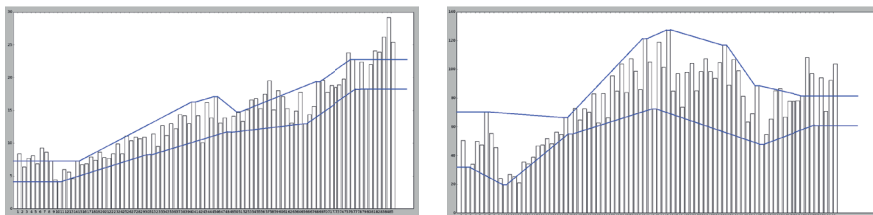


Рис. 2. Временной ряд урожайности озимой пшеницы по Ставропольскому краю (ВР «Ставрополь»)

По представленной гистограмме также видна тенденция к скачкам значений по региону, а также общая тенденция гистограммы к быстрому росту во второй части. Для подобных графиков первый этап выбора значений представляет трудную задачу, так как от данного шага зависит получение подходящего прогноза. Несмотря на все сложности в работе с данным ВР получены следующие значения:

Оставшиеся ряды по валовому сбору и урожайности России стоит рассматривать отдельно. Так как сбор (количество урожая со всей площади) зависит от урожайности (сбор зерна с 1 га земли), то проверку моделей на адекватность можно провести, сравнив значения за соответствующие значения. Временные ряды представлены на рис. 3.



a)

b)

Рис. 2. Временные ряды урожайности озимой пшеницы:
а – урожайность по России, b – валовой сбор России

На первый взгляд, зависимость представленных гистограмм не прослеживается, однако при их наложении отмечается одинаковое поведение в соответствующих частях. На рис. 3 представлено наложение обоих графиков с целью наглядной демонстрации зависимости гистограмм друг от друга.

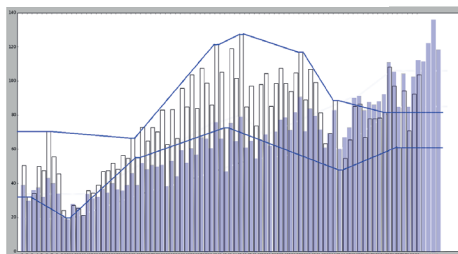


Рис. 3. Результат наложения гистограмм по значениям двух временных рядов: белые столбцы – валовой сбор урожайности озимой пшеницы России («Сбор»), темный цвет – урожайность озимой пшеницы России («Россия»)

Результаты построения прогнозных моделей для рядов «Россия» и «Сбор» представлены в табл. 3.

Таблица 3

Прогнозные характеристики применения линейного клеточного автомата в исследовании временных рядов урожайности озимой пшеницы России («Россия») и валового сбора озимой пшеницы России («Сбор»)

	Ошибка прогноза, %	Глубина памяти, l	Числовое прогнозное значение	Лингвистическое прогнозное значение
«Россия»	10,59%	8	18,774 ц/га	B
«Сбор»	13,58%	10	77,775 ц	C

Обсуждение результатов

Прогнозы представлены на 2019 год для ВР «Россия» и на 2015 год для ряда «Сбор». Этот прогноз на 2015 год ожидаем, так как значение ВР «Россия» за этот год (22,7 ц/га (терм В)) имеет незначительный спад в сравнении с 2014 годом (23 ц/га, терм В), однако, учитывая, что урожайность – составляющая общего валового сбора, то данный спад имеет большое воздействие на его значения. Таким образом, авторами наглядно показано, что прогнозирование стохастических систем, используя линейный клеточный автомат, действительно составляет адекватные и наглядные модели. А за счет того, что прогнозная модель имеет расхождение с реальным результатом в 0-15% (как в положительную, так и в отрицательную сторону), напрашивается вывод, что спрогнозированное значение поможет лицу, принимающему решение, либо принять меры для того, чтобы реальное значение в будущем не стало ниже, либо удостовериться в правильности принятых решений и мер при получении значения выше прогнозного.

При расчете прогнозных моделей по представленным временным рядам авторами доказано:

– клеточный автомат является таким инструментом прогнозирования, для которого неважно ВР представляет собой малую выборку или имеет большое количество значений;

– замененные прогнозные значения влияют только на процент валидации, приближая его к 20%, однако, расчет прогноза для ВР «Ставрополь» составил всего 17% валидации модели, что говорит о сохранении адекватности модели. В конечном итоге прогнозное значение имеет подобное отклонение от реального значения за прогнозируемую точку, тем самым при отклонении значения в меньшую сторону лица, принимающие решения принять меры по воздействию на систему для получения лучшего результата в будущем, а в случае отклонения в большую сторону, имеют подтверждение правильности своих действий в процессе воздействия на систему.

Таким образом, можно утверждать, что линейный клеточный автомат является универсальным средством прогнозирования временных рядов, причем как для малых, так и для больших выборок.

Список источников

1. Давнис В.В., Добрина М.В., Чекмаев А.В. Основы моделирования адаптивно-таргетированных прогнозных траекторий и анализ их устойчивости // *Современная экономика: проблемы и решения*, 2018, no. 9 (105), с. 17-31.
2. Кричевский М.Л. *Интеллектуальные методы в менеджменте*. Санкт-Петербург, Питер, 2005.
3. Кумратова А.М. Исследовательская «платформа» синергетического прогнозирования // *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*, 2017, no. 132, с. 581-591.
4. Кумратова А.М. Концептуальная основа получения и исследования максимального времени прогноза с заранее заданной точностью // *Современная экономика: проблемы и решения*, 2017, no. 6 (90), с. 23-31.
5. Кумратова А.М. Математические образы последовательных и параллельных экономических рисков // *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*, 2015, no. 113, с. 230-243.
6. Кумратова А.М. Слайд-технологии в исследовании основных факторов, определяющих качество прогноза урожайности озимой пшеницы // *Современная экономика: проблемы и решения*, 2018, no. 5 (101), с. 8-17.
7. Кумратова А.М. Теория и практика моделирования, анализа и прогнозирования эволюционных социально-экономических систем методами нелинейной динамики // *Труды Кубанского государственного аграрного университета*, 2017, no. 69, с. 30-35.
8. Кумратова А.М., Попова Е. В., Курносова Н. С., Попова М. И. Снижение экономического риска на базе предпрогнозного анализа // *Современная экономика: проблемы и решения*, 2015, no. 3 (63), с. 18-28.
9. Кумратова А.М., Попова Е.В., Савинская Д.Н., Курносова Н.С. Комплексная методика анализа экономических временных рядов методами нелинейной динамики // *Современная экономика: проблемы и решения*, 2015, no. 8 (68), с. 35-43.
10. Свид. 2016661998 Российская Федерация. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Линейный клеточный автомат. А.М. Кумратова, В.В. Романович; заявитель и правообладатель ФГОУ ВО КубГАУ (RU). №2016661998; заявл. 29.07.16; опубл. 26.10.16, Реестр программ для ЭВМ, 1 с.
11. Соловьев В.И. Современные подходы к учету случайности, неопределенности и риска при анализе макроэкономических процессов // *Вестник Университета (Государственный университет управления)*, 2001, no. 1 (2), с. 228-242.
12. Янгишиева А.М. *Моделирование экономических рисков методами нелинейной динамики (на материалах Карачаево-Черкесской Республики)* // Автореферат дис. ... кандидата экон. наук. СГУ, Ставрополь, 2005.

ADAPTATION OF LINEAR CELLULAR AUTOMATON FOR SOLVING THE PROBLEMS OF FORECASTING ON THE BASIS OF NATURAL AND ECONOMIC TIME SERIES

Kumratova Alfira Menligulovna, Cand. Sc. (Econ.), Assoc. Prof.

Popova Elena Vital'evna, Dr. Sc. (Econ), Full Prof.

Kostenko Ivan Viktorovich, M.A. student

Dunskaya Lada Konstantinovna, student

Kuban State Agrarian University, Kalinina st., 13, Krasnodar, Russia, 350044; e-mail: alfa05@yandex.ru

Purpose: this article continues the study on mathematical methods of nonlinear dynamics utilization in the development and adaptation of mathematical methods and predictive models for the analysis of time series of winter wheat yields in the regions of southern Russia. *Discussion:* the authors chose a linear cellular apparatus was chosen as a main tool in order to demonstrate and predict the behavior of the observed system. The values of indicators of winter wheat yield in the regions of southern Russia are studied. The choice of data series was made due to the following fact – each contains a different number of statistics, and some of the studied series represent a small sample. It is shown that the preparation of a sufficiently accurate forecast is possible on the basis of a small amount of data. *Results:* this article reveals the applicability of using a linear cellular automaton for nonlinear dynamic systems forecasting, which solves the problem of so-called «small samples».

Keywords: forecasting, time series, small sample, winter wheat yield, linear cellular automaton.

References

1. Davnis V.V., Dobrina M.V., Chekmarev A.V. Osnovy modelirovaniya adaptivno-targetirovannykh prognoznnykh trayektoriy i analiz ikh ustoychivosti [Fundamentals of modeling adaptive-targeted predictive trajectories and analysis of their stability]. *Sovremennaya ekonomika: problemy i resheniya*, 2018, no. 9 (105), pp. 17-31. (In Russ.)
2. Krichevskiy M.L. *Intellektual'nyye metody v menedzhmente* [Intellectual methods in management]. Saint-Petersburg, Piter, 2005. (In Russ.)
3. Kumratova A.M. Issledovatel'skaya «platforma» sinergeticheskogo prognozirovaniya [Research «platform» synergistic forecasting]. *Politematicheskyy setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal KubGAU*, 2017, no. 132, pp. 581-591. (In Russ.)
4. Kumratova A.M. Kontseptual'naya osnova polucheniya i issledovaniya maksimal'nogo vremeni prognoza s zaraneye zadannoy tochnost'yu [Conceptual basis for obtaining and researching the maximum forecast time with a predetermined accuracy]. *Sovremennaya ekonomika: problemy i resheniya*, 2017, no. 6 (90), pp. 23-31. (In Russ.)
5. Kumratova A.M. Matematicheskiye obrazy posledovatel'nykh i parallel'nykh

ekonomicheskikh riskov [Mathematical images of sequential and parallel economic risks]. *Politematicheskiiy setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal KubGAU*, 2015, no. 113, pp. 230-243. (In Russ.)

6. Kumratova A.M. Splayn-tehnologii v issledovanii osnovnykh risk-faktorov, opredelyayushchikh kachestvo prognoza urozhaynosti ozimoy pshenitsy [Spline technologies in the study of the main risk factors that determine the quality of winter wheat yield forecast]. *Sovremennaya ekonomika: problemy i resheniya*, 2018, no. 5 (101), pp. 8-17. (In Russ.)

7. Kumratova A.M. Teoriya i praktika modelirovaniya, analiza i prognozirovaniya evolyucionnykh social'no-ekonomicheskikh sistem metodami nelineynoy dinamiki [Theory and practice of modeling, analysis and prediction of evolutionary socio-economic systems by methods of nonlinear dynamics]. *Proceedings of KubGA*, 2017, no. 69, pp. 30-35. (In Russ.)

8. Kumratova A.M., Popova Ye.V., Kurnosova N.S., Popova M.I. Snizheniye ekonomicheskogo riska na baze predprognoznogo analiza [Reducing the economic risk on the basis of a predictive analysis]. *Sovremennaya ekonomika: problemy i resheniya*, 2015, no. 3 (63), pp. 18-28. (In Russ.)

9. Kumratova A.M., Popova Ye.V., Sa-

vinskaya D.N., Kurnosova N.S. Kompleksnaya metodika analiza ekonomicheskikh vremennykh ryadov metodami nelineynoy dinamiki [Complex method of analysis of economic time series by nonlinear dynamics methods]. *Sovremennaya ekonomika: problemy i resheniya*, 2015, no. 8 (68), pp. 35-43. (In Russ.)

10. Svid. 2016661998 Rossiyskaya Federatsiya. Svidetel'stvo ob ofitsial'noy registratsii programmy dlya EVM. Lineynyy kletochnyy Avtomat [Linear cellular automaton]. A.M. Kumratova, V.V. Romanovich; zayavitel' i pravoobladatel' FGOU VO KubGAU (RU), №2016661998; zayavl. 29.07.16; opubl. 26.10.16, Reyestr programm dlya EVM, 1 p. (In Russ.)

11. Soloviev V.I. Sovremenniye podhodi k uchetu sluchaynosti, neopredelennosti i riska pri analize makroekonomicheskikh processov [Modern approaches to accounting for randomness, uncertainty and risk in the analysis of macroeconomic processes]. *Vestnik Universiteta (State University of management)*, 2001, no. 1 (2), pp. 228-242. (In Russ.)

12. Yangishieva A.M. *Modelirovanie ekonomicheskikh riskov metodami nelineynoy dinamiki* [Modeling the economic risks of nonlinear dynamics methods]. Synopsis, SGU, Stavropol', 2005. (In Russ.)