

*Предложена математическая модель управления водными ресурсами в условиях возрастающей неопределенности. Модель позволяет оценивать риск скачкообразных изменений в поведении гидрологических систем и эффективность стратегий управления адаптацией аграрного комплекса к климатическим изменениям.*

© К.Л. Атоев, В.А. Пепеляев,  
А.Б. Садыгов, 2012

УДК 658.012.011.56

К.Л. АТОЕВ, В.А. ПЕПЕЛЯЕВ, А.Б. САДЫГОВ

## **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ ДЛЯ АДАПТАЦИИ АГРАРНОГО КОМПЛЕКСА К ИЗМЕНЕНИЮ КЛИМАТА**

**Введение.** Возрастающий дефицит водных ресурсов, вызванный климатическими изменениями, превращается в весомую угрозу устойчивому развитию аграрного комплекса. Экономия водных ресурсов через повышение эффективности их использования становится основным путем решения этой проблемы. Одним из факторов, ограничивающих эффективность систем управления водными ресурсами является генерирование глобальными изменениями принципиально новых рисков, которые ведут к более непредсказуемому миру, характеризующемуся более высокой чувствительностью к малым флуктуациям. Упомянутые причины уменьшают горизонт прогнозирования и эффективность управления. Возможности систем принятия решения могут быть увеличены с помощью подхода, предложенного в [1], который основывается на применении теории гладких отображений для прогнозирования влияния глобальных изменений на экологическую безопасность и водный баланс. Он позволяет определять критические значения параметров, при которых происходит скачкообразный переход от устойчивого развития системы к турбулентным режимам функционирования. Цель работы – дальнейшее развитие этого метода с учетом возрастания неопределенности, связанной с климатическими изменениями, для повышения эффективности управления водными ресурсами.

### **1. Влияние климатических изменений на дефицит водных ресурсов.**

Глобальное потепление вызывает деформацию тепловых полей как в Европе в целом, так и в отдельных ее регионах. С одной стороны, изменение направления Гольфстрима грозит такими климатическими изменениями как очень сильные дожди, учащающиеся штормовые циклоны в Северной и крайне переменчивая погода в Центральной Европе, риск похолодания в Великобритании, Ирландии, Исландии, Нидерландах, Бельгии, скандинавских странах, на европейском севере России. С другой стороны, прогнозируются долгие засушливые и очень жаркие периоды в Южных регионах Восточной Европы и Средиземноморье, увеличение площадей, подверженных засухе – с 2% всей суши до 10% к 2050 году, поднятие уровня Мирового океана и частичное либо полное затопление многих прибрежных территорий [2].

Изменение температурных режимов, связанное с потеплением, приводит к дестабилизации фитосанитарного состояния агроценозов, что вместе с дефицитом водных ресурсов способствует увеличению потенциальных потерь урожая [3]. Учитывая это возникает необходимость интенсификации исследований по снижению уязвимости сельского хозяйства и разработки научно обоснованных рекомендаций относительно его адаптации к климатическим изменениям.

Разработка эффективной политики управления рисками, связанными с климатическими изменениями, требует комплексного подхода, который учитывает природно-климатические, социально-экономические и гидрологические факторы. Такой подход позволит создать эффективную систему поддержки принятия решений для оценки вклада каждого из компонентов в интегральную уязвимость сельского хозяйства, ранжирования рисков, определения слабых звеньев аграрного комплекса, расчета оптимальных перераспределений средств с целью повышения эффективности адаптации аграрного сектора к климатическим изменениям.

Важным звеном такой системы должны стать математические методы, позволяющие поддерживать эффективное управление водными ресурсами в условиях их дефицита. Такие методы должны учитывать комплексный характер проблемы, особенности деформации пространства безопасности под воздействием глобальных изменений, сужения горизонта прогнозирования существующих систем управления, возрастающую неопределенность, уникальность многих явлений, обусловленную внедрением новых технологий, увеличением информационных потоков, небывалым возрастанием разрушительной мощности чрезвычайных ситуаций, долговременностью и масштабами их последствий.

**2. Моделирование скачкообразных изменений.** Авария на японской АЭС «Фукусима» в марте 2011 года вновь сфокусировала внимание на проблеме кризиса современных систем управления, проявляющегося в сужении горизонта прогнозирования и неспособности предвидения наступления маловероятных событий, таких как авария на Чернобыльской АЭС, гибель Шатлов, цунами «Катрина», авария на нефтедобывающей платформе Deepwater Horizon в Мексиканском заливе, сочетанный эффект землетрясения и цунами в Японии). Анализ различных причин, приведших к недооценке вероятности возникновения

указанных катастроф, и огромного ущерба от них, позволяет сделать вывод о том, что степень уязвимости систем управления рисками возникновения чрезвычайных ситуаций техногенного и природного характера на потенциально опасных объектах в условиях возрастающей неопределенности значительно выше расчетных значений, получаемых с помощью традиционных методик расчета риска, базирующихся на использовании статистических методов. Это связано с тем, что существующие модели [4], используемые для прогнозирования поведения гидрологических систем, не являются эффективными при моделировании систем с высокой чувствительностью к начальным условиям, когда малое возмущение приводит к катастрофе с непредсказуемыми последствиями. Кроме того предположения и упрощения, лежащие в основе таких моделей, недостаточная точность исходных данных и их неполнота также вносят неизбежную ошибку в результаты моделирования [5].

В работе [1] предложена методология прогнозирования поведения гидрологических систем, основывающаяся на теории гладких функций. Допускается, что гидрологическая система удовлетворяет всем требованиям потенциальной системы и может быть описана потенциальной функцией  $U(X, A_1, A_2, \dots, A_N)$  экологической поведенческой переменной  $X$  (водный стресс) и параметров управления  $A_i$ . Модель позволяет расчет бифуркационных значений, кривых и поверхностей параметров управления гидрологической системы, проводить оценку риска возникновения чрезвычайных ситуаций и эффективность управления водными ресурсами рассчитывая отклонение текущих параметров управления от их бифуркационных значений. Трансформация безопасности описывалась одной из универсальных деформаций теории гладких функций – «бабочка» в 4-х мерном пространстве параметров, характеризующих изменение климатических, социально-экономических, экологических и гидрологических переменных.

Наличие временной иерархии позволяет упростить модель [1]. Климато-экологические и гидрологические угрозы реализуются быстро, имеют большую разрушительную силу и связаны с непосредственной угрозой жизни, здоровью и благосостоянию населения и связаны с внешним влиянием на гидрологическую систему (фактором асимметрии). Социальные и экономические угрозы реализуются с запаздыванием и их последствия отдалены по времени от начала действия факторов, вызвавших увеличение угроз, и связаны с эффективностью адаптации системы к воздействию внешних факторов (фактор бифуркации). Таким образом, разный временной масштаб реализации угроз, позволяет уменьшить число параметров управления до двух. Этому случаю в формализме теории гладких функций соответствует универсальная деформация – «сборка». Динамика детерминистической градиентной системы описывается уравнением вида:

$$dX/dt = -\partial U/\partial X. \quad (1)$$

Равновесным многообразием данной системы является множество величин  $X$  таких, что

$$dX/dt = -\partial U/\partial X = 0.$$

В случае двух параметров управления функция  $U$  описывается полиномом четвертой степени относительно переменной  $X$ , характеризующей уровень уязвимости гидрологической системы. Система находится в равновесии, когда

$$-\partial U(X, A_1, A_1) / \partial X = X^3 + A_1 X + A_2, \quad (2)$$

где  $A_1$  и  $A_2$  – параметры управления, характеризующие соответственно социально-экономические и природно-гидрологические показатели.

Эти параметры могут задаваться с помощью индексов, которые используются для оценки устойчивости окружающей среды [6], глобальной конкурентоспособности [7], глобализации [8], устойчивого развития общества [9]. Кроме того, для прогнозирования динамики их изменения могут использоваться математические модели, описывающие социально-экономические и природно-гидрологические системы [5, 10, 11]. Таким образом, параметры  $A_1$  и  $A_2$  являются неявными функциями времени и описывают некоторые траектории на фазовой плоскости.

Система имеет три стационарных состояния, два из которых устойчивы и различаются разными уровнями уязвимости  $X$ , высоким и низким. Использование метода теории гладких функций позволяет определить бифуркационные значения параметров управления, по достижении которых система переходит из одного состояния в другое. Кривая бифуркационных значений описывается следующим выражением:

$$F(A_1, A_1) = 4A_1^3 + 27A_2^2 = 0. \quad (3)$$

Под интегральным риском  $R_1$  перехода с низкого уровня уязвимости гидрологической системы на высокий уровень уязвимости, будем понимать возможность пересечения бифуркационной кривой траекторией точки, координаты которой соответствуют текущим параметрам управления.  $R_{CE}$  и  $R_{ПГ}$  соответственно социально-экономический и природно-гидрологический компоненты  $R_1$ .

Мерой риска такого перехода выберем величину обратную расстоянию от текущего состояния системы, определяемого текущими значениями параметров управления, до соответствующей бифуркационной кривой. Чем больше расстояние до бифуркационной кривой, тем меньше риск. Таким образом, определяются резервные возможности гидрологической системы и могут рассчитываться предельно допустимые нагрузки.

При выполнении условия  $A_1 < 0$  существует область скачкообразных переходов поведенческой переменной  $X$  из одного стационарного состояния в другое (кривые  $A$  и  $B$  на рисунке). При  $A_2 > 0$  существуют только гладкие изменения поведенческой переменной (кривая  $C$  на рисунке).

В том случае, когда текущее состояние гидрологической системы соответствует высокому уровню уязвимости, возникает задача оптимального перевода ее в состояние с низким уровнем уязвимости. Для этого используется интегральный индекс  $I$ , характеризующий способность системы достичь низкого уровня уязвимости. Мерой этого индекса является величина обратная расстоянию от текущей точки управления до нижней границы триггерной области. Его компоненты  $I_{CE}$

и  $I_{ПГ}$  соответственно характеризуют способность системы к снижению социально-экономической и природно-гидрологической уязвимости. Чем меньше расстояние – тем больше значение индекса. Выбор стратегии нормализации ситуации связан с расчетом уровней, до которых при заданном количестве ресурсов, следует уменьшить значения социально-экономических и природно-гидрологических параметров управления, чтобы осуществился переход системы из группы высокого уровня уязвимости в группу с низким уровнем уязвимости.

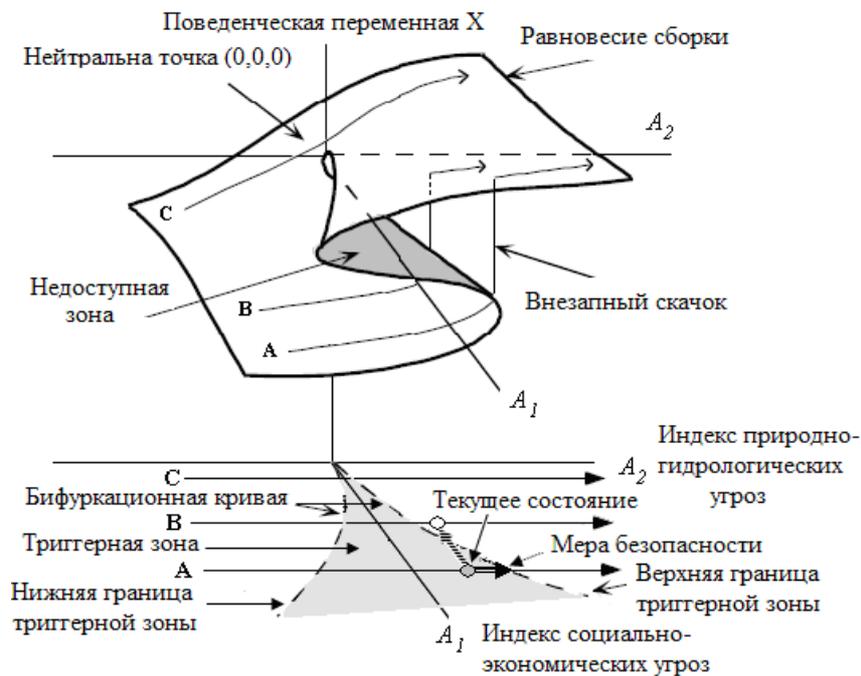


РИСУНОК. Концептуальная модель оценки риска

Индекс социально-экономических угроз ( $A_1$ ) рассчитывается на основании данных о криминогенной ситуации ( $V_1$ ), количестве суицидов ( $V_2$ ), уровне смертности среди населения ( $V_3$ ), сумме задолженности по выплате заработной платы ( $V_4$ ), уровне безработицы ( $V_5$ ), уровне дифференциации жизненного уровня населения – децильный коэффициент дифференциации общих доходов населения ( $V_6$ ). Индекс определяется следующим образом:

$$A_1 = \sum_{i=1}^6 a_i V_i . \quad (4)$$

Индекс природно-гидрологических угроз ( $A_2$ ) рассчитывается на основании данных о количестве оползней ( $W_1$ ), подтоплений ( $W_2$ ), пожаров

и взрывов ( $W_3$ ), выбросах вредных веществ в атмосферу ( $W_4$ ), проценте территории, находящейся в зоне водного стресса ( $W_5$ ), интенсивности использования воды в сельском хозяйстве ( $W_6$ ). Индекс определяется следующим образом:

$$A_2 = \sum_{j=1}^6 b_j V_j . \quad (5)$$

Параметры  $a_i$  и  $b_j$  – весовые коэффициенты, сумма которых равна единице.

Для оценки вклада гидрологических составляющих используются данные [4], которые приведены в таблице.

ТАБЛИЦА

Параметры и единицы измерения	Азербайджан	Грузия	Турция	Украина	Россия	Исландия
ВВП/на душу населения (долларов США)	5,981	3,885	11,58	6,032	12,797	35,607
Территория в зоне водного стресса (%)	31,39 <b>17,04</b>	7,03 <b>50,31</b>	13,9 <b>35,56</b>	24,19 <b>23,04</b>	2,06 <b>73,32</b>	0,92 <b>84,44</b>
Интенсивность использования воды в сельском хозяйстве (% от общего объема водных ресурсов)	26,9 <b>59,28</b>	1,666 <b>100,0</b>	13,85 <b>86,87</b>	14,1 <b>86,14</b>	0,302 <b>100,0</b>	0,0001 <b>100,0</b>
Охрана морских прибрежных вод от загрязнений (% территории исключительной экономической зоны)		0,045 <b>1,829</b>	1,106 <b>31,06</b>	1,612 <b>40,03</b>	2,616 <b>53,60</b>	0,385 <b>13,59</b>

Примечание: жирным шрифтом показан процент от значения принятого за эталон

**3. Повышение эффективности управления водными ресурсами.** Задача управления сводится к следующему. Даны текущие значения параметров  $A_1$  и  $A_2$ , их максимальные и минимальные значения, бифуркационные значения этих параметров  $A_1^*$  и  $A_2^*$ . Пусть  $C_1$  и  $C_2$  коэффициент стоимости нормализации, соответствующий числу единиц выделяемых ресурсов, необходимых для изменения соответствующего параметра управления на единицу размерности, используемой для его вычисления. Введем параметры управления  $u_1$  и  $u_2$ , характеризующие величину средств, выделяемых на нормализацию соответственно социально-экономической и природно-гидрологической сфер. Тогда  $u_i / C_i$  – величина, на которую изменится значение  $A_i$  после осуществления очередной итерации управления. Существуют следующие ограничения: 1)  $u_1 + u_2 = u_0$ , где  $u_0$  – средства, выделяемые на повышение эффективности управления водными ресурсами; 2) бифуркационные значения  $A_1^*$  и  $A_2^*$  определяются выражением (3).

В рамках введенных обозначений и существующих ограничений задача оптимального управления повышением эффективности управления водными ресурсами формулируется следующим образом. Дана математическая модель (2), минимальные и максимальные значения переменных  $A_1$  и  $A_2$  и параметры управления  $u_1$  и  $u_2$ . Требуется найти траектории управлений  $u_1(t)$  и  $u_2(t)$  на интервале  $(0, T)$ , минимизирующие для случая высокой уязвимости гидрологической системы расстояние между текущим положением системы и бифуркационной кривой (3), и максимизирующее это расстояние, для случая низкой уязвимости при указанных ограничениях.

В первом случае определяется оптимальная траектория перевода системы из области параметров, соответствующих высокому уровню уязвимости, в область параметров, соответствующих высокому уровню уязвимости. Во втором случае определяется оптимальная траектория увода системы как можно дальше от бифуркационных значений параметров, соответствующих скачкообразному переводу в область высокого уровня уязвимости.

**Заключение.** Проблема адаптации сельского хозяйства к изменяющимся климатическим условиям приобретает приоритетное значение в свете прогнозируемого мирового продовольственного кризиса. Ее решение невозможно без разработки эффективных систем поддержки принятия решений в сфере управления рисками, связанными с климатическими изменениями. Важной функцией таких систем является эффективное управление водными ресурсами в условиях их дефицита. В работе на основе теории гладких функций проведено развитие метода моделирования скачкообразных изменений в поведении гидрологических систем в условиях возрастающей неопределенности. Для оценки риска возникновения неустойчивости управления водными ресурсами использована универсальная деформация теории гладких функций – «сборка». Рассмотрена задача оптимального управления водными ресурсами.

Авторы выражают благодарность руководству международного проекта, выполняемого в соответствии с Распоряжением Президиума НАН Украины № 212 от 28.02.12 в рамках сотрудничества НАН Украины и Международного института прикладного системного анализа (IIASA), за поддержку данной работы.

*К.Л. Атоєв, В.А. Пенеляєв, А.Б. Садигов*

#### МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ КЕРУВАННЯ ВОДНИМИ РЕСУРСАМИ ДЛЯ АДАПТАЦІЇ АГРАРНОГО КОМПЛЕКСУ ДО ЗМІН КЛІМАТУ

Розроблена математична модель для керування водними ресурсами, яка дозволяє розширити можливості керування за умов зростання невизначеності, дозволяє оцінювати ризик стрибкоподібних змін у поведінці гідрологічної системи та ефективність стратегій керування водними ресурсами для адаптації аграрного комплексу до змін клімату.

*S.V. Yershov*

#### MODEL OF INTELLIGENT AGENTS BASED ON A FUZZY LOGIC OF HIGHER TYPE

A model of behavior of intelligent agents, operating on the basis of higher type (type 2) fuzzy logic, is considered. To describe such aspects of behavior of agent group as a distance between them, velocity matching, and obstacle avoidance, a structure of fuzzy rules is developed. Criteria for estimating efficiency of the behavior of the group of agents with respect to distances and velocities are created.

1. *Атоев К.Л., Пепеляев В.А.* Моделирование влияния глобальных изменений на экологическую безопасность и водный баланс // Компьютерная математика. – 2008. – № 1. – С. 42–53.
2. *Пятое национальное сообщение Украины по вопросам изменения климата.* – Киев: 2009. – 366 с.
3. *Адаменко Т.* Перспективы украинского зернового рынка в контексте потепления климата. – <http://zerno-ua.com/?p=2633>.
4. *Global estimates of water withdrawals and availability under current and future «business-as-usual» conditions / J. Alcamo, P. Döll, N. Henrichs et al. // Hydrol. Sci. J. – 203. – 48(3). – P. 339 – 348.*
5. *Садыгов А.Б.* Математические модели и методы решения задач управления по региональной защите в чрезвычайных ситуациях. – Баку: «Элм», 2004. – 188 с.
6. *Environmental Performance Index 2010.* – <http://www.epi.yale.edu/>
7. *The Ukraine Competitiveness Report 2008: Towards Sustained Growth and Prosperity // Edd by M. Drzeniek Hanouz, T. Geiger – Geneva: World Economic Forum 2008, 2008 – 272 p.*
8. *Measuring globalization the A.T. Kearney / Foreign Policy Magazine Globalization Index // Foreign Policy. – November/December. – 2006. – P. 52–61.*
9. *Згуровский М.З., Гвишиани А.Д.* Глобальное моделирование процессов устойчивого развития в контексте качества и безопасности жизни людей (2005–2007/2008 гг.). – Киев: Изд-во «Политехника», 2008. – 331 с.
10. *Садыгов А.Б.* Создание математических моделей и методов решения задач оперативного управления в чрезвычайных ситуациях // Компьютерная математика. – 2011. – № 1. – С. 37–45.
11. *Атоев К.Л., Пепеляев В.В., Томин А.А.* Нелинейная динамическая модель для интегральной оценки системных рисков в техногенной сфере // Компьютерная математика. – 2006. – № 1. – С. 29 – 40.

Получено 14.12.2011

#### **Об авторах:**

*Атоев Константин Леонович,*

кандидат биологических наук, старший научный сотрудник  
Института кибернетики имени В.М. Глушкова НАН Украины,

*Пепеляев Владимир Анатольевич,*

доктор физико-математических наук, заведующий отделом  
Института кибернетики имени В.М. Глушкова НАН Украины,

*Садыгов Аминага Бахман-оглы,*

кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник  
Института кибернетики НАН Азербайджана.