



DOI: <https://doi.org/10.15688/mpcm.jvolsu.2023.2.2>

УДК 519.6-519.8  
ББК 22.19+20.1

Дата поступления статьи: 28.02.2023  
Дата принятия статьи: 20.03.2023

## **МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ СОЦИОХОЗЯЙСТВЕННОГО ОСВОЕНИЯ ПОЙМЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ<sup>1</sup>**

**Александр Александрович Воронин**

Доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой  
фундаментальной информатики и оптимального управления,  
Волгоградский государственный университет  
voronin.prof@gmail.com, voronin@volsu.ru, fiou@volsu.ru  
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

**Инеcса Игоревна Исаева**

Аспирант кафедры фундаментальной информатики и оптимального управления,  
Волгоградский государственный университет  
isaeva-inessa@mail.ru, fiou@volsu.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-3045-6757>  
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

**Аннотация.** Представлена математическая модель управления процессом социохозяйственного освоения пойменных территорий, включающая в себя теоретико-игровую, сценарную имитационную и геоинформационную модели. Главной характеристикой управляемой системы является карта среднего ежегодного максимального затопления во время весенних паводков, рассчитываемая с помощью программно-математического комплекса геоинформационного и гидродинамического моделирования динамики поверхностных вод. С помощью инструментов теоретико-игрового моделирования проанализированы неуправляемый и управляемый процессы купли-продажи земли в условиях несимметричной информированности с использованием механизма штрафов.

Получен аналитический вид гарантирующих равновесий иерархической игры  $\Gamma_1$  на простейших функциях. Данный подход использован для оценки эффективности управления процессом социохозяйственного освоения территории северной части Волго-Ахтубинской поймы. Проведен численный поиск равновесий теоретико-игровых моделей при построении целевых функций игроков на основе геоинформационного и гидродинамического моделирования и проанализирована их зависимость от параметров. В имитационную модель включено численное построение зависимостей оценки экологического состояния Волго-Ахтубинской поймы от стратегий продажи территорий. Показано, что рост уровня экологического императива общества снижает негативный эффект использования продавцом стратегии агрессивного социохозяйственного освоения. С другой стороны, показано, что медленная стабилизация процесса социохозяйственного освоения при высоком платежеспособном спросе обусловлена исчерпанием доступной территории и падением качества жизни при деградации пойменной экосистемы.

**Ключевые слова:** эколого-экономическое управление, Волго-Ахтубинская пойма, гидродинамическое и геоинформационное моделирование, иерархические игры, социохозяйственное освоение.

### Введение

Особенностью пойменных территорий является их зависимость от весенних паводков, при которых затопливается значительная часть их территорий. Большая вариативность объемов паводковых вод обуславливает вариативность карт затоплений. Поэтому процесс освоения пойм незарегулированных рек ограничивается картами наибольших затоплений за период наблюдений. Параметры весенних попусков в зарегулированных реках сохраняются в некотором нормативном диапазоне, и, поэтому, поймы этих рек в силу привлекательности их природных условий, как правило, подвержены активному социохозяйственному освоению, стимулируемому муниципальной властью. Однако строительство ГЭС на крупных реках часто вызывает прогрессирующую техногенную деградацию их русел [2; 3].

Это, в свою очередь, вызывает прогрессирующее уменьшение территории паводкового затопления пойм. Эта негативная для пойменной экосистемы тенденция, с одной стороны, стимулирует непрерывное социохозяйственное освоение новых освобождающихся от затопления территорий, с другой — вызывает в долгосрочной перспективе их социально-экономическую неустойчивость. Действительно, привлекательный для проживания и хозяйствования на начальном этапе социохозяйственного освоения территории уровень влагообеспеченности, непрерывно снижаясь, в некоторый момент становится несовместимым с используемыми технологиями хозяйствования и условиями быта увеличивающегося населения пойм. В этих условиях потенциально возможна тенденция опережающего социохозяйственного освоения редко затопляемых пойменных территорий, выводящая их из зон потенциального затопления снижением нормативного уровня весенних попусков и, тем самым, ускоряющая деградацию пойменных социоприродо-хозяйственных систем.

Противодействие этой опасной тенденции со стороны Федерального (ФЦ) или Регионального центров при неполном совпадении интересов акторов развития территории

требует разработки эффективных механизмов согласования их интересов. В условиях распределенности финансовых ресурсов, несимметричной информированности наибольшую эффективность имеют механизмы стимулирования, описываемые моделями иерархических игр [1].

Проблемы социохозяйственного освоения пойменных территорий и связанные с ними проблемы эффективного распределения земельных и водных ресурсов речных систем в последние десятилетия являются предметом интенсивных исследований [6; 8–13]. Их главными темами являются проблема дефицита речных водных ресурсов для социально-экономических нужд, рациональный баланс между социально-экономическими и экологическими потребностями. Эти исследования объединяет с нашим использование экспертных методов и ГИС-технологий. Наше исследование отличается от вышеупомянутых использованием количественных методов и технологий моделирования (аналитическое и численное теоретико-игровое и гидродинамическое моделирование, высокопроизводительные вычисления). Для построения цифровых карт затопленных территорий использовался программно-математический комплекс моделирования динамики поверхностных вод «ЭКОГИС». Описание этого комплекса и некоторых результатов его использования представлено в работах: [4; 5].

### 1. Модель неуправляемого социохозяйственного освоения пойменной территории

В рамках непрерывного сокращения затопляемых территорий пойм в условиях весенних попусков естественно рассматривать процесс их социохозяйственного освоения как продолжающийся во времени многошаговый процесс. Рассмотрим его главную часть — процесс купли-продажи. В нашей модели продавцом выступает Муниципальный Центр (МЦ / МС), покупателем — один хозяйствующий субъект (Агент / А) или их совокупность.

Задача оптимизации (максимизации дохода) для МЦ имеет вид:

$$f^{MC} = \sum_{t=1}^T \left( S_t(K_t^U) p_t(K_t^U) + \eta \sum_{\tau=1}^t S_{\tau}(K_{\tau}^U) p_{\tau}(K_{\tau}^U) \right) \rightarrow \max_{p_t, K_t^U},$$

$$K_t^U = \bigcup_{\tau=1}^T K_{\tau}^U, p = (p_1, \dots, p_T), 0 \leq \eta < 1, p > 0, K_T^U \subset K^{\max}, S(K_T^U) \leq S_{lim}, \quad (1)$$

$$f_t^A = \varphi^A(k_t^u S_t, I_t^{ecol}) - S_t p_t \rightarrow \max_{S_t}, I_t^{ecol} = I_t^{ecol}(S_t^{flood}(K_t^U)),$$

где  $K_T^U \subset K^{\max}$  — карта всей территории, предложенной к продаже за период  $T$ ;  $p_t$  — стоимость участков;  $S_t(K_t^U)$  — площадь пойменных территорий, приобретаемых Агентом каждый год;  $\eta$  — коэффициент ставки ежегодного налога на землю;  $S_{lim}$  — максимально возможная площадь продаваемой территории;  $\varphi^A$  — функция полезности Агента;  $k_t^u$  — коэффициент качества покупаемого участка, характеризующий его ценность в краткосрочной перспективе;  $S_t^{flood}(K_t^U)$  — средняя ежегодная площадь затопленной территории поймы на карте проданной территории  $K_t^U$ ;  $I_t^{ecol}$  — функция оценки экологического состояния пойменных территорий.

Целевые функции игроков в задаче (1) можно приближенно описать следующими

зависимостями:

$$\begin{aligned} \varphi^A(k_t^u S_t, I_t^{ecol}) &= k_t^u S_t I_t^{ecol}, k_t^u = S_t^m, 0 \leq m(n) \leq n, \\ I_t^{ecol}(S_t) &= a_0 \left( I_{\max} - \frac{I_{\max} - I_{\min}}{S_{lim}^n} S_t^n \right), n \geq 0, I_{\max} = I^{ecol}(0), I_{\min} = I^{ecol}(S_{lim}), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $a_0$  — нормирующий коэффициент. При фиксированном  $t$  возможны две метастратегии МЦ. В рамках первой метастратегии продавец, предлагая Агенту покупку всей разрешенной к продаже территории по предлагаемой цене, играет с Агентом игру Штакельберга  $\Gamma_1$ , в которой Агент выбирает оптимальную для него площадь покупаемой территории. В рамках второй метастратегии продавец, фиксируя цену и площадь продаваемой каждому из Агентов территории  $S_{\min}$ , играет с ними игру Гермейера  $\Gamma_2$ , в которой стратегией Агентов является согласие на сделку и отказ от нее. Далее рассматривается игра  $\Gamma_1$ .

Помимо этого, в метастратегию МЦ входит стратегия выбора предлагаемых к продаже участков территории, варьируемая от экологической, при которой к продаже предлагается только незатапливаемая территория, до наиболее агрессивной, при которой к продаже в первую очередь предлагаются наиболее часто затапливаемые участки, имеющие наибольший коэффициент краткосрочной полезности. Вариативность метастратегий моделируется различными значениями показателя степени  $n$ . Кроме того, будем предполагать возможность выбора участков в случайной последовательности.

Задача (1) относится к области дифференциальных игр и решается методом динамического программирования, на каждом шаге которого разыскивается гарантирующее игровое равновесие. В рассматриваемом далее случае  $\eta = 0$  теоретико-игровые задачи на каждом шаге независимы.

На каждом шаге  $t$  задача (1), (2) принимает вид:

$$\begin{aligned} f_t^{MC} &= S_t p_t \rightarrow \max_{p_t}, \\ f_t^A &= a_0 \left( I_{\max} - \frac{I_{\max} - I_{\min}}{S_{lim}^n} S_t^n \right) S_t^{m+1} - S_t p_t \rightarrow \max_{S_t}. \end{aligned} \quad (3)$$

Ее решение имеет вид:

$$\begin{aligned} p^* &= \frac{a_0 a_1 (m+1)n}{n+m+1} \left( \frac{a_1 (m+1)^2}{b(n+m+1)^2} \right)^{\frac{m}{n}} = \frac{a_1 a_2 n}{n+1}, \\ S_t^* &= \left( \frac{a_1}{b(n+1)^2} \right)^{\frac{1}{n}} = \left( \frac{a_1 S_{lim}^n}{I_{\max} (n+1)^2} \right)^{\frac{1}{n}} = S_{lim} \left( \frac{a_1}{I_{\max} (n+1)^2} \right)^{\frac{1}{n}}, \\ a_1 &= I_{\max}, b = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{S_{lim}^n}. \end{aligned} \quad (4)$$

## 2. Модель управления социохозяйственным освоением пойменной территории

Будем предполагать, что Федеральный Центр (ФЦ / ФС) реализует свою стратегию развития пойменной территории с экологическим императивом, вариативность меры которого моделируется параметрическим механизмом штрафов за превышение нормативного уровня снижения величины агрегированного экологического критерия состояния

территории. Задачу управления процессом купли-продажи с использованием механизма штрафов можно представить в виде:

$$\begin{aligned} f^{FC} &= \sigma f_0^{FC} (I^{ecol}) + (1 - \sigma)P (I^{ecol}, \lambda) \rightarrow \max_{\lambda}, \\ f^{MC} &= Sp - P (I^{ecol}, \lambda) \rightarrow \max_p, \\ f^A &= \varphi^A (k^u, S, I^{ecol}) - Sp \rightarrow \max_S, 0 \leq S \leq S_0, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $S$  — площадь продаваемых земель;  $S_0$  — все пойменные территории;  $P (I^{ecol}, \lambda)$  — функция штрафа;  $\sigma \in [0; 1]$  — весовой коэффициент. Для линейных функций  $\varphi^A = aS_f S$ ,  $S_f = -\frac{S_f^0}{S_0} S + S_f^0$ ,  $f_0^{FC} = \mu S_f$ ,  $P = \lambda (S_f^0 - S_f)$  задача (5) принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} f^{FC} &= \sigma \mu \left( S_f^0 - \frac{S_f^0}{S_0} S \right) + (1 - \sigma) \lambda \frac{S_f^0}{S_0} S \rightarrow \max_{\lambda}, \lambda \geq 0, \\ f^{MC} &= Sp - \lambda \frac{S_f^0}{S_0} S \rightarrow \max_p, p \geq 0, \\ f^A &= aS \left( S_f^0 - \frac{S_f^0}{S_0} S \right) - Sp \rightarrow \max_S, 0 \leq S \leq S_0. \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь  $a \geq 0$  — нормирующий параметр, учитывающий спрос;  $S_f^0$  — средняя площадь территории паводкового затопления до продажи;  $\mu \geq 0$  — нормирующий параметр, одновременно учитывающий экологический императив;  $\lambda \geq 0$  — ставка штрафа. В таблице 1 приведено решение задачи (6) для различных диапазонов параметра  $\varepsilon = \mu \left( \frac{\sigma}{1-\sigma} \right) / (aS_0)$ , отражающего меру экологического императива ФЦ.

Таблица 1

Решение задачи (6) для различных  $\varepsilon$

$\varepsilon$	$\lambda^*$	$p^*$	$S^*$	$S_f^*$
$0 \leq \varepsilon \leq 1$	$aS_0(1 + \varepsilon)/2$	$aS_f^0(3 + \varepsilon)/4$	$S_0(1 - \varepsilon)/8$	$S_f^0(7 + \varepsilon)/8$
$\varepsilon > 1$	$aS_0$	$aS_f^0$	0	$S_f^0$

Равновесные значения целевых функций игроков приведены в таблице 2.

Таблица 2

Значения целевых функций игроков задачи (6)

$\varepsilon$	$f^{FC}$	$f^{MC}$	$f^A$
$0 \leq \varepsilon \leq 1$	$aS_0 S_f^0 (1 - \sigma) (1 + 14\varepsilon + \varepsilon^2) / 16$	$aS_0 S_f^0 (1 - \varepsilon)^2 / 32$	$aS_0 S_f^0 (1 - \varepsilon)^2 / 64$
$\varepsilon > 1$	$\sigma \mu S_f^0$	0	0

Решение соответствующей (6) двухуровневой игры имеет вид:

$$p^* = \frac{aS_f^0}{2}, S^* = \frac{S_0}{4}, S_f^* = \frac{3S_0}{4}, f^{MC} = \frac{aS_0S_f^0}{8}, f^A = \frac{aS_0S_f^0}{16}. \quad (7)$$

Сравнение решений двух- и трехуровневой задач показывает, что управление со стороны ФЦ существенным образом уменьшает значение  $S^*$  и, как следствие, увеличивает величину  $S_f^*$ . Даже при  $\varepsilon = 0$  значение  $S^*$  значительно меньше, а  $S_f^*$  больше, чем в решении двухуровневой игры.

Аналитические решения в задаче (6) получены для линейной зависимости экологического критерия состояния пойменной территории от средней величины площади затопления. Для модели неуправляемого процесса (3) аналитические решения (4) получены для степенной функции (2), вариативность показателя степени которой отражает различные метастратегии продавца. Далее в этом пункте представлены результаты численного решения задачи (5) для степенных функций при  $S_f^0 = 100$ ,  $S_0 = 250$ ,  $a = 4/S_0$ ,  $\mu = 1$ ,  $\sigma = 0,5$ .

Построение кривых на приведенных ниже рисунках проводилось путем поиска гарантирующих равновесий задачи (3), (5) при варьировании показателя степени функции  $S_f(S)$ , проходящей через точки  $(0; S_f^0)$  и  $(S_0; 0)$ , от кривой агрессивной урбанизации до кривой минимального ущерба.

На рисунке 1 при приближении функции  $S_f(S)$  к кривой минимального ущерба решения двух- и трехуровневых игр асимптотически сходятся. Вид кривых на рисунке показывает, что управление сдерживает продажи с целью замедления снижения средней площади паводкового затопления.

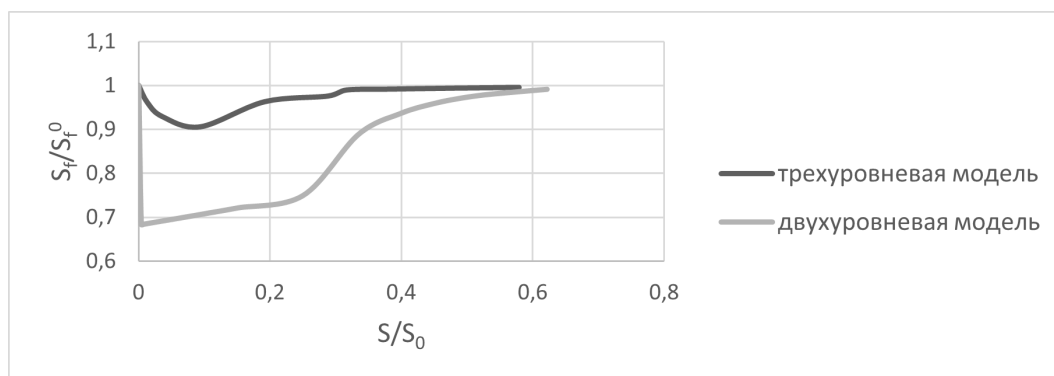


Рис. 1. Зависимость гарантирующих равновесий задачи (3), (5) от  $S_f(S)$

На рисунке 2 каждая кривая отвечает равновесиям двухуровневой игры (3) при варьировании степени функции  $S_f(S)$ . При росте величины параметра  $a$  кривые приближаются к некоторому предельному значению. При значениях  $S_f(S)$ , близких к кривой агрессивной урбанизации, получаемое равновесие отвечает низкому значению средней площади паводкового затопления.

На рисунке 3 каждая кривая получена путем поиска равновесий трехуровневой игры (5) при варьировании степени функции  $S_f(S)$ . При увеличении  $\sigma$  результат покупки территорий в меньшей мере сказывается на снижении средней площади затапливаемой территории. При этом номер стратегии, с которого начинается покупка территорий, увеличивается. Из рисунка видно, что наихудшая экологическая ситуация среди всех

стратегий приходится на функции, близкие к линейной. Это можно объяснить тем, что при использовании продавцом агрессивных стратегий Агенту не выгодно покупать территорию с большой площадью, и поэтому средняя площадь паводкового затопления уменьшается несущественно. При использовании продавцом экологических стратегий даже большая площадь купленной территории не приводит к существенному уменьшению площади паводкового затопления. Увеличение заинтересованности Агента в покупке территорий (параметр  $a$ ) способствует снижению ограничения на номер стратегии, с которого начинается покупка территорий. Агент готов покупать по большей цене, а, следовательно, МЦ обеспечивает прибыльность продаж при большом штрафе, компенсирующем эффект от снижения экологической полезности.

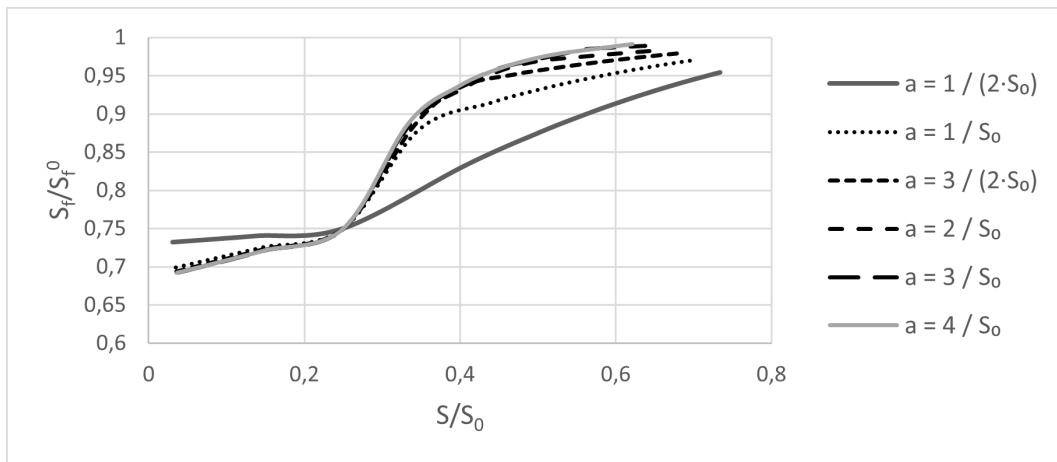


Рис. 2. Изменение равновесий двухуровневой игры (3) при различных  $a$

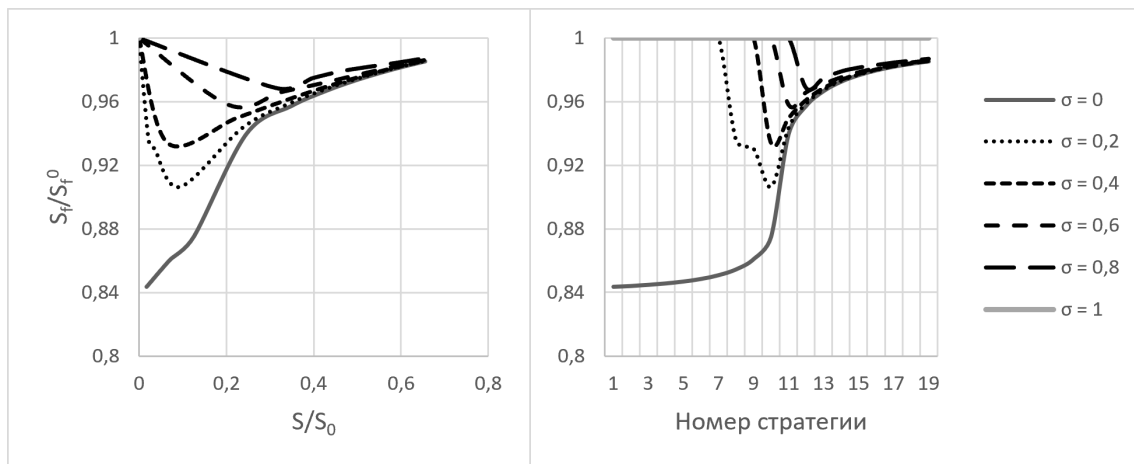


Рис. 3. Изменение равновесий и средней площади паводкового затопления трехуровневой игры (5) при различных  $\sigma$  ( $a = 1/S_0$ )

### 3. Имитационная геоинформационно-игровая модель управления социохозяйственным освоением территории северной части Волго-Ахтубинской поймы

Точный вид функции  $I^{ecol}(S)$  определяется особенностями рельефа, режима паводкового затопления, а также экологической значимости различных участков пойменной территории. Для численного построения этой функции для территории северной части Волго-Ахтубинской поймы (ВАП) использовались два вида цифровых карт: карты максимального ежегодного затопления территории, полученные в результате численного гидродинамического моделирования, и оцифрованные кадастровые карты этой территории с закрепленными за отдельными участками видами землепользования. Построение последних карт подробно описано в [7]. Для расчетов использовались  $M$  карт максимального паводкового затопления  $H_k(k = \overline{1, M})$  за предыдущие годы. Каждая карта представляет собой совокупность  $944 * 944$  точек (расстояние между которыми равно 50 м), в каждой из которых определена высота затопления. Эти карты использовались для подсчета средней оценки экологического состояния территории ВАП  $\Phi$  за предыдущие годы. Количество точек цифровой карты территории, одновременно предлагаемых для покупки в качестве одного участка, характеризуется параметром  $area\_size$ . Под стратегией продажи понимается последовательность из  $L$  участков размера  $area\_size$ .

Для оценки критерия экологического состояния для определенной карты затопления  $H_i$  с учетом экологической значимости участков территории каждый вид землепользования связывается с экологическим ( $I^{ecol}$ ) и социохозяйственным ( $I^{soc}$ ) индексами, величины которых характеризуются уровнями 0, 1, 2 (0 — минимально важен; 2 — максимально важен) и параметром затопления, определяющим, должны ли территории данного вида быть затопленными ( $-1$  — да,  $+1$  — нет). Тогда оценка экологического состояния  $\Phi_i$  для рассматриваемой карты затопления вычисляется по формуле:

$$\Phi_i = \sum_{x,y=1}^{944} I^{ecol}(x, y), \forall x, y : H_i(x, y) > 0. \quad (8)$$

Для карт затоплений  $H_k(k = \overline{1, M})$  подсчитывается оценка  $\Phi_k$ . Полученный отрезок  $[\Phi_{\min}; \Phi_{\max}]$  разбивается на интервалы длиной  $\Delta\Phi$  и составляется частотное распределение  $N_k(\Phi)$ , где  $N_k$  есть число карт затопления, оценка экологического состояния которых попадает в интервал  $[\Phi_{\min} + \Delta\Phi(k - 1); \Phi_{\min} + \Delta\Phi k]$ . Согласно распределению выбирается интервал с наибольшим  $N$  и средняя оценка экологического состояния полагается как медиана интервала. Для построения стратегий продажи участков на цифровой карте территории разыскивается множество точек  $Z$  предлагаемой к продаже территории. Для каждой такой точки определяются карты затопления, на которых она не затапливается. Задается  $area\_size$ . Множество  $Z$  разбивается на связные участки, содержащие число точек, равное  $area\_size$ . Эти участки формируют множество  $A$ . Для каждого элемента этого множества определяются карты затопления, на которых данный участок не затапливается. Для ранжирования участков задается параметр  $number\_cuts \in [1; M]$  уровня осведомленности МЦ о границах затопления территорий ВАП. Отрезок  $[0; M]$ , как и множество участков  $A$ , делится на  $number\_cuts$  частей. В часть  $i$  попадают те участки, для которых число карт затопления, которые их не затапливают, попадают в интервал:

$$\left( \frac{(i - 1)M}{number\_cuts}; \frac{iM}{number\_cuts} \right]. \quad (9)$$



Далее определяется перестановка из  $number\_cuts$  элементов, определяющая стратегию продажи участков. Так, перестановка  $1, 2, \dots, number\_cuts$  соответствует кривой агрессивной урбанизации, так как в первую очередь к продаже предлагаются территории, затапливаемые почти на всех картах. С другой стороны, перестановка  $number\_cuts, \dots, 2, 1$  определяет кривую минимального экологического ущерба. Для каждого номера  $i$  перестановки случайным образом формируется последовательность из участков, которые попали в часть  $i$  при построении интервала (9). Объединение таких последовательностей и выбор первых  $L$  участков дают результирующую стратегию продажи участков. После этого строится функция  $\Phi(S)$ . Для этого полученные  $L$  участков образуют  $L$  делений на оси  $S$ , цена деления которой —  $area\_size * 50 * 50$  м<sup>2</sup>. Для всех исходных карт затопления  $H_k (k = \overline{1, M})$  вычисляется средняя оценка экологического состояния ВАП  $\Phi(0)$ . Рассматривается последовательность выбранных  $L$  участков. Для любого члена этой последовательности среди оставшихся карт затопления  $H_k$  выбираются те, которые его не затапливают. Для полученного набора карт считается средняя оценка критерия экологического состояния ВАП  $\Phi(l_i)$ .

Поскольку в алгоритме поиска стратегий продажи выбор происходит случайным образом, алгоритм построения  $\Phi(S)$  для одной перестановки запускается по крайней мере  $T$  раз. Среди  $T$  полученных функций выбирается та, которая наилучшим образом выполняет роль «среднего» для полученных стратегий. Для такого выбора строится вспомогательная функция

$$F(i) = \frac{\Phi_1(i) + \Phi_2(i) + \dots + \Phi_T(i)}{T}, \forall i = \overline{1, L} \quad (10)$$

и из  $T$  функций выбирается  $\Phi(S) = \arg \min_{i=\overline{1, T}} \|\Phi_i(S) - F(S)\|_E$ .

#### 4. Результаты численного моделирования управления социохозяйственным освоением территории Волго-Ахтубинской поймы

Ниже представлены результаты тестовых расчетов для 18 тестовых карт затопления ВАП (15-ый день затопления, расход воды от 12 до 29 тыс. м<sup>3</sup>/с). На рисунке 4 каждая потенциально предлагаемая к продаже точка цифровой карты ВАП имеет оттенок, отражающий число карт затопления, на которых данная точка не затапливается. Таким образом, экологическая метастратегия соответствует самому светлому оттенку из трех.

На рисунке 5 приведена зависимость функции  $\Phi(S)$  от параметров  $number\_cuts$  и  $area\_size$  для кривой минимального экологического ущерба. Как показывает рисунок слева, продажи территории более крупными участками приводят к снижению оценки экологического состояния. На рисунке справа показано, что уменьшение степени осведомленности продавца о границах затапливаемой территории также приводит к снижению оценки экологического состояния ВАП.

На рисунке 6 показаны зависимости функции  $\Phi(S)$  от числа проданных участков для различных стратегий, которые были использованы для поиска численного решения задачи (3), (5) (1 — агрессивная урбанизация; 6 — минимальный экологический ущерб). Для численного поиска решений задачи использовались следующие значения параметров:  $\Phi_0 = 100$ ;  $S_0 = 150 * 680$ ;  $a = 50 * 680$ ;  $\mu = 10$ ,  $\sigma = 0, 5$ .

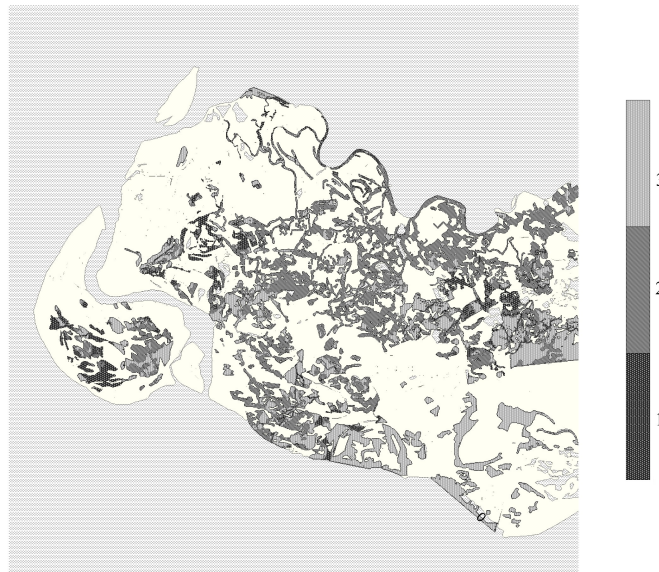


Рис. 4. Территории северной части ВАП с различными частотами весеннего затопления

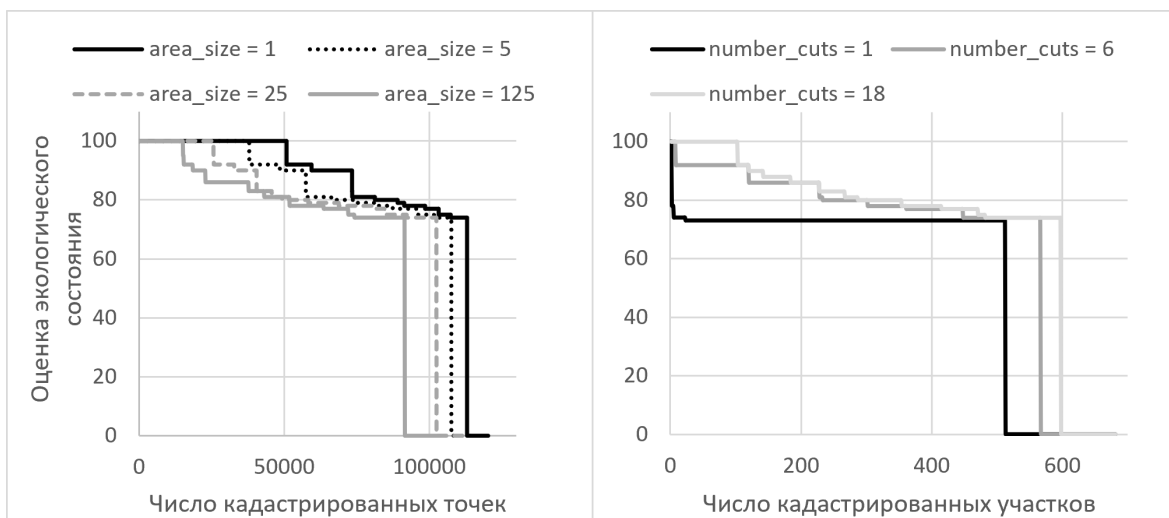


Рис. 5. Зависимость функции  $\Phi(S)$  для кривой минимального экологического ущерба от числа проданных точек цифровой карты / участков для различных значений  $area\_size$  при  $number\_cuts = 18$  и для различных значений параметра  $number\_cuts$  при  $area\_size = 150$

Полученный точный вид функций  $\Phi(S)$  определил особенности при численном построении равновесий моделей. На рисунке 7 при переходе от кривой агрессивной урбанизации к кривой минимального экологического ущерба наблюдается увеличение площади покупаемой территории с максимумом при реализации 4-й стратегии. В то же время для 4-й стратегии на рисунке 6 виден отрезок длительной стабильности, что может являться причиной немонотонности кривой на рисунке 7. В целом на рисунке 7 видно, что экологическая ситуация в управляемом процессе в большинстве случаев лучше, а в остальных — не хуже, чем в неуправляемом. Таким образом, реализация управлений

с оптимальными значениями параметров позволяет регулировать экологическую ситуацию, особенно при использовании продавцом стратегии агрессивной урбанизации.

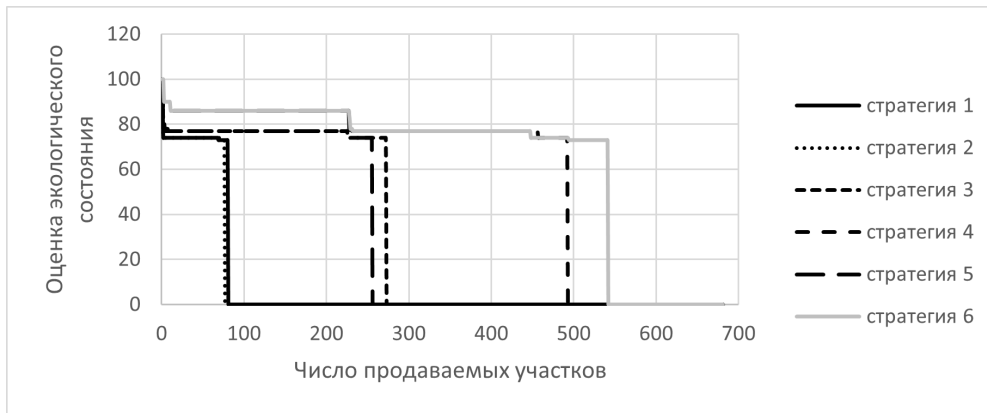


Рис. 6. Зависимость функции  $\Phi(S)$  от числа проданных участков для различных стратегий при  $area\_size = 150$ ,  $number\_cuts = 3$

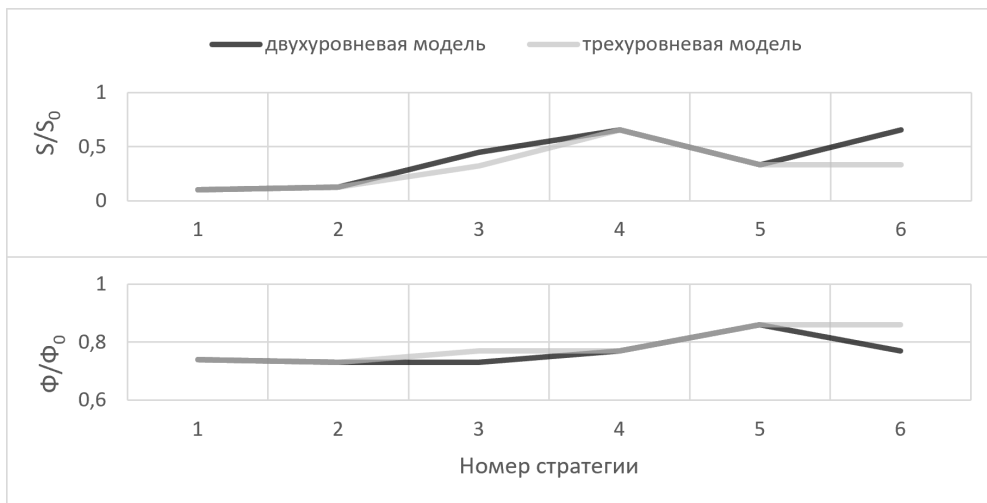


Рис. 7. Изменение площади покупаемой территории и оценки экологического состояния при  $\sigma = 0,5$

На рисунках 8, 9 приведены зависимости целевых функций участников процесса от стратегий продавца в неуправляемом и управляемом процессах. Как показывают эти рисунки, в управляемом процессе значение целевой функции Агента на большинстве стратегий ниже, чем в неуправляемом. Кроме того, управление приводит к перераспределению прибыли МЦ в пользу ФЦ. С увеличением значения параметра  $\sigma$  происходит стабилизация дохода ФЦ независимо от используемой стратегии МЦ, что объясняется ограничением площади продаваемой территории. Стратегия 4 дает МЦ наибольшую прибыль независимо от степени контроля ФЦ за состоянием окружающей среды. В целом прибыль МЦ в отсутствие управления растет при приближении выбранной стратегии к кривой минимального экологического ущерба. То же наблюдается и при увеличении параметра  $\sigma$ .

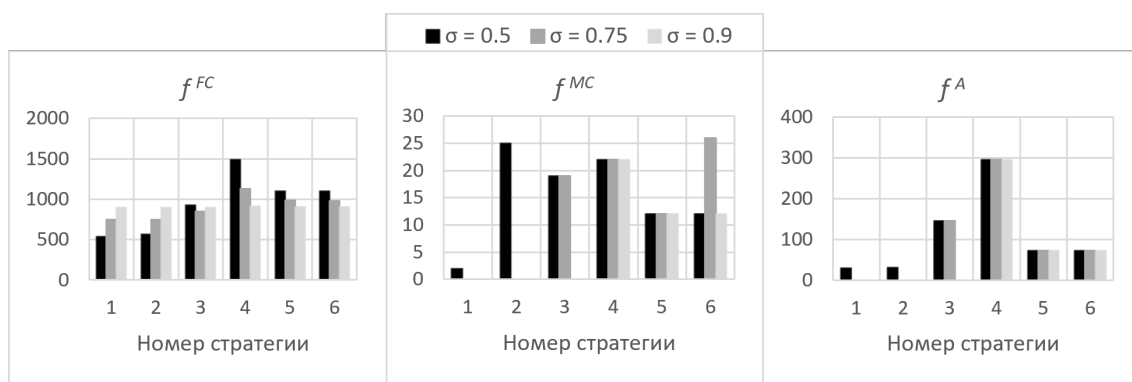


Рис. 8. Зависимость равновесных значений целевой функции участников от стратегии МЦ в управляемом процессе

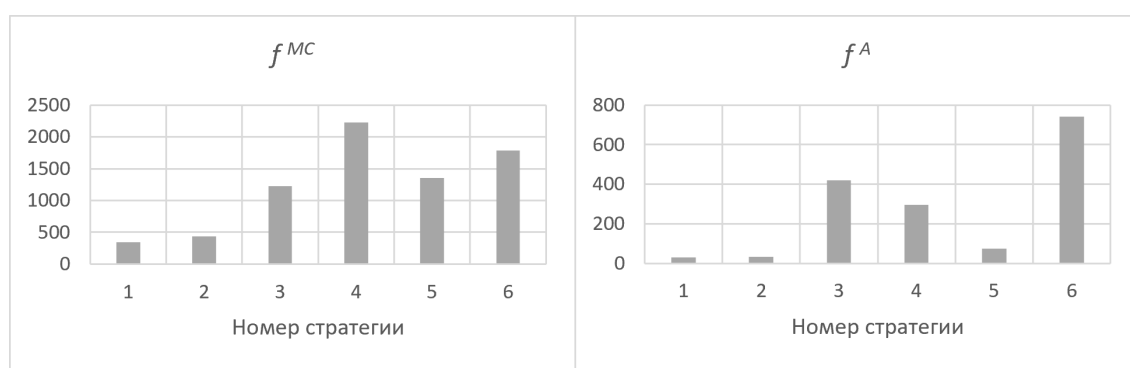


Рис. 9. Зависимость равновесных значений целевой функции участников от стратегии МЦ в неуправляемом процессе

### Заключение

В данной работе представлена математическая модель управления процессом социоэкономического освоения пойменных территорий, включающая в себя теоретико-игровую, сценарную имитационную и геоинформационную модели. Состояние управляемой системы моделируется с помощью программно-математического комплекса геоинформационного и гидродинамического моделирования динамики поверхностных вод «ЭКОГИС». С помощью инструментов теоретико-игрового моделирования описаны неуправляемый и управляемый процессы купли-продажи земель с использованием механизма штрафов. В имитационную геоинформационную модель включено построение зависимостей оценки экологического состояния Волго-Ахтубинской поймы от стратегий продажи территорий. Данные зависимости были использованы для численного поиска равновесий теоретико-игровых моделей и их анализа. Получен аналитический вид игровых равновесий моделей на простейших функциях. Проведен численный поиск равновесий теоретико-игровых моделей при построении целевых функций игроков на основе геоинформационного и гидродинамического моделирования и проанализирована их зависимость от параметров.

Показано, что управление процессом социоэкономического освоения пойменной территории оптимально регулирует состояние ее экосистемы путем выбора ставки штрафа.

При достаточной заинтересованности покупателя ограничения на продажу территории ослабевают. Показано, что рост уровня экологического императива ФЦ снижает негативный эффект использования продавцом стратегии агрессивной урбанизации. Большой диапазон стабильности функции агрегированного экологического критерия увеличивает величину площади покупаемой территории, что способствует реализации стратегии продажи земель, соответствующей такому виду функции. При этом ограничения площади продаваемой территории не происходит вследствие компенсации снижения величины агрегированного экологического критерия поступающими штрафами. Показано, что медленная стабилизация процесса урбанизации при высоком платежеспособном спросе обусловлена исчерпанием доступной территории и падением качества жизни при деградации пойменной экосистемы. В целом в рамках представленной модели сделан вывод о том, что управление сдерживает процесс урбанизации и не допускает существенного снижения агрегированного критерия состояния пойменной экосистемы.

Построение экологического критерия состояния территории на основе средней величины ежегодного весеннего затопления не в полной мере отражает все особенности экологического состояния реальных пойм зарегулированных рек в условиях прогрессирующей деградации их русловой системы. Поэтому предполагается дальнейшее исследование данной проблемы на основе модели русловой динамики и динамики гидрологической структуры пойменных территорий.

### ПРИМЕЧАНИЕ

<sup>1</sup> Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-21-00176, <https://rscf.ru/project/23-21-00176/>.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурков, В. Н. Механизмы эколого-экономического управления эколого-экономическими системами / В. Н. Бурков, Д. А. Новиков, А. В. Щепкин. — М. : Изд-во физ.-мат. лит., 2008. — 244 с.
2. Иванов, В. В. Влияние гидроузлов на деформации пойменных берегов и русловых форм в низовьях реки Волги и Кубани / В. В. Иванов, В. Н. Коротаев // Эрозия почв и русловые процессы. — 2008. — Вып. 16. — С. 224–242.
3. Храпов, С. С. Численное моделирование самосогласованной динамики поверхностных вод, влекомых и взвешенных наносов: II. Исследование поперечных деформаций русла и перераспределения расходов воды по рукавам р. Волги при промышленной добыче песка / С. С. Храпов // Математическая физика и компьютерное моделирование. — 2022. — Т. 25, № 4. — С. 52–65. — DOI: <https://doi.org/10.15688/mpcm.jvolsu.2022.4.5>
4. Храпов, С. С. Численное моделирование самосогласованной динамики поверхностных и грунтовых вод / С. С. Храпов // Математическая физика и компьютерное моделирование. — 2021. — Т. 24, № 3. — С. 45–62. — DOI: <https://doi.org/10.15688/mpcm.jvolsu.2021.3.5>
5. Численное моделирование самосогласованной динамики поверхностных вод, влекомых и взвешенных наносов: I. Влияние промышленной добычи песка на безопасность судоходства в русле р. Волга / С. С. Храпов, Е. О. Агафонникова, А. Ю. Кликунова, В. П. Радченко, Е. В. Баскаков, Е. С. Савин, И. С. Маковеев, Н. С. Храпов // Математическая физика и компьютерное моделирование. — 2022. — Т. 25, № 3. — С. 31–57. — DOI: <https://doi.org/10.15688/mpcm.jvolsu.2022.3.3>

6. A Decision Support System for Irrigation Water Allocation Along the Middle Reaches of the Heihe River Basin, Northwest China / Y. Ge, X. Li, C. Huang, Z. Nan // *Environmental Modelling & Software*. — 2013. — Vol. 47. — P. 182–192. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.05.010>
7. Decision Support System for Urbanization of the Northern Part of the Volga-Akhtuba Floodplain (Russia) on the Basis of Interdisciplinary Computer Modeling / A. Voronin, I. Isaeva, A. Khoperskov, S. Grebenjuk // *Communications in Computer and Information Science*. — 2017. — Vol. 754. — P. 419–429. — DOI: [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-65551-2\\_30](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-65551-2_30)
8. Decision Support Systems in Water Resources in the Demarcated Region of Douro — Case Study in Pinhao River Basin, Portugal / L. F. S. Fernandes, M. J. Marques, P. C. Oliveira, J. P. Moura // *Water and Environment J.* — 2014. — Vol. 28. — P. 350–357. — DOI: <https://doi.org/10.1111/wej.12042>
9. Development and Evaluation of Multiple Objective Decision Making Methods for Watershed Management Planning / F. Lamy, J. Bolte, M. Santelmann, C. Smith // *Journal of the American Water Resources Association*. — 2002. — Vol. 38. — P. 517–529. — DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2002.tb04334.x>
10. Intelligent Decision Support System for River Floodplain Management / P. Wriggers, M. Kultsova, A. Kapyshev, A. Kultsov, I. Zhukova // *Communications in Computer and Information Science*. — 2014. — Vol. 466. — P. 195–213. — DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-11854-3\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-319-11854-3_18)
11. Pecos River Decision Support System: Application for Adjudication Settlement and River Operations EIS / J. McCord, J. C. Carron, B. Liu, S. Rhoton, M. Rocha, T. Stockton. — Southern Illinois University Carbondale OpenSIUC. — Electronic text data. — Mode of access: [http://opensiuc.lib.siu.edu/ucowrconfs\\_2004/95](http://opensiuc.lib.siu.edu/ucowrconfs_2004/95). — Title from screen.
12. The Illinois River Decision Support System (ILRDSS), Report Prepared for the: Illinois Department of Natural Resources / D. Misganaw, Y. Guo, H. V. Knapp, N. G. Bhowmik. — Illinois : Illinois State Water Survey, 1999. — 50 p.
13. Weng, S. Q. An Integrated Scenario-Based Multi-Criteria Decision Support System for Water Resources Management and Planning — A Case Study in the Haihe River Basin / S. Q. Weng, G. H. Huang, Y. P. Li // *Expert Syst. with Applications*. — 2010. — Vol. 37. — P. 8242–8254. — DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2010.05.061>

## REFERENCES

1. Burkov V.N., Novikov D.A., Shchepkin A.V. *Mekhanizmy ekologo-ekonomicheskogo upravleniya ekologo-ekonomicheskimi sistemami* [Management Mechanisms of Ecologic and Economic Systems]. Moscow, Izd-vo fiz.-mat. lit., 2008. 244 p.
2. Ivanov V.V., Korotaev V.N. Vliyanie gidrouzlov na deformatsii poymennykh beregov i ruslovykh form v nizovyakh reki Volgi i Kubani [Effect of Hydro Strain on the Shores of the Floodplain and Channel Forms in the Lower Reaches of the Volga and Kuban]. *Eroziya pochv i ruslovye protsessy*, 2008, iss. 16, pp. 224–242.
3. Khrapov S.S. Chislennoe modelirovanie samosoglasovannoy dinamiki poverkhnostnykh vod, vlekomykh i vzveshennykh nanosov: II. Issledovanie poperechnykh deformatsiy rusla i pereraspredeleniya raskhodov vody po rukavam r. Volgi pri promyshlennoy dobyche peska [Numerical Modeling of Self-Consistent Dynamics of Shallow Waters, Traction and Suspended Sediments: II. Study of the Transverse Deformations of the Channel and the Redistribution of Water Discharges Along the Branches of the Volga River During Industrial Sand Mining]. *Matematicheskaya fizika i kompyuternoe modelirovanie* [Mathematical Physics and Computer Simulation], 2022, vol. 25, no. 4, pp. 52–65. DOI: <https://doi.org/10.15688/mpcm.jvolsu.2022.4.5>
4. Khrapov S.S. Chislennoe modelirovanie samosoglasovannoy dinamiki poverkhnostnykh i gruntovykh vod [Numerical Modeling of Self-Consistent Dynamics of Surface and Ground Waters]. *Matematicheskaya fizika i kompyuternoe modelirovanie*

[Mathematical Physics and Computer Simulation], 2021, vol. 24, no. 3, pp. 45-62. DOI: <https://doi.org/10.15688/mpcm.jvolsu.2021.3.5>

5. Khrapov S.S., Agafonnikova E.O., Klikunova A.Yu., Radchenko V.P., Baskakov E.V., Savin E.S., Makoveev I.S., Khrapov N.S. Chislennoe modelirovanie samosoglasovannoy dinamiki poverkhnostnykh vod, vlekomykh i vzveshennykh nanosov: I. Vliyanie promyshlennoy dobychi peska na bezopasnost sudokhodstva v rusle r. Volga [Numerical Modeling of Self-Consistent Dynamics of Shallow Waters, Traction and Suspended Sediments: I. Influence of Commercial Sand Mining on the Safety of Navigation in the Channel of the Volga River]. *Matematicheskaya fizika i kompyuternoe modelirovanie* [Mathematical Physics and Computer Simulation], 2022, vol. 25, no. 3, pp. 31-57. DOI: <https://doi.org/10.15688/mpcm.jvolsu.2022.3.3>

6. Ge Y., Li X., Huang C., Nan Z. A Decision Support System for Irrigation Water Allocation Along the Middle Reaches of the Heihe River Basin, Northwest China. *Environmental Modelling & Software*, 2013, vol. 47, pp. 182-192. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.05.010>

7. Voronin A., Isaeva I., Khoperskov A., Grebenjuk S. Decision Support System for Urbanization of the Northern Part of the Volga-Akhtuba Floodplain (Russia) on the Basis of Interdisciplinary Computer Modeling. *Communications in Computer and Information Science*, 2017, vol. 754, pp. 419-429. DOI: [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-65551-2\\_30](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-65551-2_30)

8. Fernandes L.F.S., Marques M.J., Oliveira P.C., Moura J.P. Decision Support Systems in Water Resources in the Demarcated Region of Douro — Case Study in Pinhao River Basin, Portugal. *Water and Environment J.*, 2014, vol. 28, pp. 350-357. DOI: <https://doi.org/10.1111/wej.12042>

9. Lamy F., Bolte J., Santelmann M., Smith C. Development and Evaluation of Multiple Objective Decision Making Methods for Watershed Management Planning. *Journal of the American Water Resources Association*, 2002, vol. 38, pp. 517-529. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2002.tb04334.x>

10. Wriggers P., Kultsova M., Kapysh A., Kultsov A., Zhukova I. Intelligent Decision Support System for River Floodplain Management. *Communications in Computer and Information Science*, 2014, vol. 466, pp. 195-213. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-11854-3\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-319-11854-3_18)

11. McCord J., Carron J.C., Liu B., Rhoton S., Rocha M., Stockton T. Pecos River Decision Support System: Application for Adjudication Settlement and River Operations EIS. *Southern Illinois University Carbondale OpenSIUC*. URL: [http://opensiuc.lib.siu.edu/ucowrconfs\\_2004/95](http://opensiuc.lib.siu.edu/ucowrconfs_2004/95).

12. Misganaw D., Guo Y., Knapp H.V., Bhowmik N.G. *The Illinois River Decision Support System (ILRDSS), Report Prepared for the: Illinois Department of Natural Resources*. Illinois, Illinois State Water Survey, 1999. 50 p.

13. Weng S.Q., Huang G.H., Li Y.P. An Integrated Scenario-Based Multi-Criteria Decision Support System for Water Resources Management and Planning — A Case Study in the Haihe River Basin. *Expert Syst. with Applications*, 2010, vol. 37, pp. 8242-8254. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2010.05.061>

## **CONTROL MODEL OF FLOODPLAIN SOCIO-ECONOMIC DEVELOPMENT PROCESS**

**Alexander A. Voronin**

Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor,  
Head of the Department of Fundamental Informatics and Optimal Control,  
Volgograd State University  
voronin.prof@gmail.com, voronin@volsu.ru, fiou@volsu.ru  
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

Inessa I. Isaeva

Postgraduate Student, Department of Fundamental Informatics and Optimal Control,  
Volgograd State University  
isaeva-inessa@mail.ru, fiou@volsu.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-3045-6757>  
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

**Abstract.** The paper presents a mathematical model for managing the process of floodplain socio-economic development, which includes not only a game-theoretic, but also a scenario simulation and a geoinformation models. The main characteristic of the controlled system is a map of the average annual maximum flooding during spring floods. The map is calculated using a software-mathematical complex for geoinformation and hydrodynamic modeling of surface water dynamics. With the help of game-theoretic modeling tools we analysed an uncontrolled and a controlled processes of buying and selling floodplain territories within the framework of asymmetric awareness using the mechanism of penalties. The paper includes an analytical representation of a  $\Gamma_1$  guaranteeing equilibrium for the simplest functions. The approach, described in the paper, is used to assess the effectiveness of managing the socio-economic development process of the northern part of the Volga-Akhtuba floodplain. We conducted a numerical search of game-theoretic models equilibria using constructed objective functions of players. The objective functions are based on geoinformation and hydrodynamic modeling. We also analysed the equilibria dependences on model parameters. The simulation model includes a numerical construction of the dependences of the Volga-Akhtuba floodplain ecological state assessment on the selling strategies. The paper shows that the level growth of the environmental imperative of society reduces the negative effect of a seller's use of an aggressive socio-economic development strategy. On the other hand, the slow stabilization of the socio-economic development process with high solvent demand is due to the available territory exhaustion and the decline in the quality of life with the floodplain ecosystem degradation.

**Key words:** ecologic and economic management, Volga-Akhtuba floodplain, hydrodynamic and geoinformation modeling, hierarchical games, socio-economic development.