УДК 004.42:004.9+614.8.084

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ КАТОСТРОФИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ ПРИ ФУНКЦИОНИРОВАНИИ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

А.А. Волчек, Л.В. Образцов, П.В. Шведовский

В статье рассмотрены концептуальные основы прогнозирования проявления катастрофических процессов в функционировании экологических систем в условиях инновационного развития общества и возможностей управления ими. Предлагается использовать аппарат производящих функций и принципы максимума неопределенности. Рассмотрен практический пример формирования критического состояния экологических систем Белорусского Полесья.

Введение

Высокая цена ошибочных решений при прогнозировании катастрофических процессов при функционировании экологических систем в условиях инновационного развития обуславливает необходимость обращения к методологии системно-информационного анализа сложных процессов и систем и базирования исследований не на классических моделях, а на моделях, сформированных на рандомизации параметров закона Пуассона или использующих аппарат производящих функций, принцип максимума неопределенности и Лагранжевые вероятностные распределения.

Принципиальным отличием скачковых изменений в развитии экологических систем, от большинства эргономических и социально-экономических систем, является неопределенность и искажаемость «массовой» информации о прогнозируемых условиях их функционирования [1, 2, 3].

Поэтому системно-информационный анализ, особенно региональных экологических проблем, обуславливает необходимость учета фактора неопределенности и стохастичности, как объективных свойств условий, сопутствующих всему процессу развития экологических систем.

Учет вышеназванных факторов определяется как неопределенностью полноты, сложности и искаженности информации, т.е. внутренними и внешними факторами, так и неопределенностью разнообразия природоохранных технологий и условий их функционирования.

Построение прогнозных моделей для них требует использования вариационных принципов с разработкой методов построения экстремальных законов распределения их параметров в условиях ограниченной информации по тенденциям развития эколого-экономической, природоохранной, природовосстановительной, ресурсосберегающей и эргономической систем как высшего, так и низшего порядков.

Анализ традиционных методов решения проблемы

Прогнозирование значимых качественных скачковых изменений в структуре экологических систем относится к группе достаточно сложных математических задач. Сегодня оно чаще всего осуществляется на детерминистической или стохастической основе [4, 5, 6].

Детерминистическая модель ступенчатых катастрофических процессов базируется на следующей функции

$$z = \sum_{i=0}^{n} a_i \cdot n \cdot (t - t_i), \qquad (1)$$

где z – мера, определяющая уровень процесса; a_i – величина скачка меры z, связанная с появлением i-ой «разладки» эволюционного процесса развития экологической системы; t – момент реализации i-го скачка с частными законами распределением $F(Z)$ и $G(t)$ определяемыми функционалом –

$$J_o\left[F(z), G(t)\right] = \frac{\sigma_Z \cdot \sigma_t}{(\overline{z} + J_1) \cdot (\overline{t} + J_2)}; \qquad (2)$$

$$\left.\begin{aligned} J_1 &= 2 \cdot \int z \cdot f(z) \cdot F(z) \cdot dz; \qquad z \in w(z); \\ J_2 &= 2 \cdot \int t \cdot q(t) \cdot G(z) \cdot dz; \qquad z \in w(z); \end{aligned}\right\}; \qquad (3)$$

где $f(z)$ – возрастающая функция целочисленного аргумента определяющая рост величины скачков в условиях инновационного развития общества;
$q(t)$ – убывающая функция определяющая соответственно учащение скачков;
σ_z и σ_t – средние квадратические отклонения выборок.

Такой подход позволяет по маргинальным распределениям двух случайных величин и коэффициентам корреляции определять совместную плотность, ее параметры и построить моделирующий алгоритм формирования скачков вида:вида

$$f(z_1, \ldots z_n) = \frac{\partial^n F(z_1 \ldots z_n)}{\partial z_1 \ldots \partial z_n}. \qquad (4)$$

Если координаты вектора Z независимы, то

$$F(z_1, \ldots z_n) = \prod_{i=1}^{n} F_i(z_i), \qquad (5)$$

и тогда многомерная случайная величина Z моделируется путем последовательного моделирования каждой из ее независимых координат $\left(z_i, i = \overline{1,n}\right)$, подчиненных закону распределения $F_i(z_i)$.

Если координаты зависимы, то

$$f(z_1, \ldots z_n) = f_1(z_1) \cdot f_2(z_2 / z_1) \ldots f_n(z_n / z_1, \ldots, z_{n-1}), \qquad (6)$$

и тогда прогнозирование сводится к последовательному моделированию координат с условными плотностями распределений, при инверсировании функции с помощью операторных рядов.

Однако, эти модели на детерминистической основе не в полной мере учитывают случайные факторы объективно присущие экологическим системам.

Исходя из принципа максимума неопределенности, наиболее приемлемой является модель двухмерного показательного распределения Гумбеля

$$f(z,t)=\frac{1}{x_o\cdot t_o}\cdot\exp\left[\frac{z}{z_0}-\frac{t}{t_o}\right]\cdot\left[1+P\cdot\left(2\cdot\exp\frac{z}{z_o}-1\right)\cdot\left(2\cdot\exp\frac{t}{t_o}-1\right)\right], \quad (7)$$

где z_{o} и t_{o} – средние величины скачков и периодичность их появления; p – параметр закона распределения и $P=4r_{zt}$; r_{zt} – коэффициент корреляции.

С учетом проявления случайностей для маргинальных (частных) распределений плотность может быть описана в виде

$$n(z,t)=f(z)\cdot q(t)\cdot\left\{1+\gamma\cdot\left[1-2\cdot F(z)\right]\cdot\left[1-2\cdot G(t)\right]\right\}, \quad (8)$$

где $\gamma=z_{z,t}\cdot\dfrac{\sigma_Z\cdot\sigma_t}{\left(\overline{z}+J_1\right)\cdot\left(\overline{t}+J_2\right)}$; (9)

q – параметр закона распределения, определяемый линейной функцией коэффициента корреляции и $q=r_{zt}\cdot J_o\left[F(z),G(t)\right]$.

Наиболее простой моделирующий алгоритм для локальных, относительно однородных экологических систем, имеет вид:

$$z=-z_o\ln\alpha_1;\quad t=t_o\cdot\ln\frac{2k}{\sqrt{(1+k)^2-4k\alpha_2-1+a}}; \quad (10)$$

где $k=p\cdot\left(2\cdot\exp\dfrac{z}{z_o}-1\right);\ \alpha_1=F(z);\ \alpha_2=F_{2/z}(t/z);$ (11)

α_1 и α_2 – неизвестные равномерно распределенные на интервале [0, 1] случайные числа, имеющие совместную условную плотность вероятностей; z_0 и t_0 – соответственно средняя периодичность появления скачков; α – величина меры скачка, z, определяющая уровень процесса в условиях доиннавационного развития общества.

Так как, зачастую ограниченность объема информации затрудняет определимость маргинальных распределений $F(z)$ и G(t), то используется сглаженная функция квантилей, которая может быть прообразом моделирующего алгоритма имеющего вид –

$$z=\sum_{k=1}^{n-1}c_k\cdot p^k;\quad t=\sum a_k\cdot q^k, \quad (12)$$

где c_{k} – мера периодичности скачков.

В качестве количественной оценки качественных изменений однородных экологических систем при скачкообразном ее переходе из i-го состояния в (i+1)-ое состояние целесообразно принять момент времени, начиная с которого последующий процесс эволюционного развития будет осуществляться по другой траектории с новыми начальными параметрами.

Возможные оптимизационные методы решения проблемы

Ограниченность и множественность неопределенностей в функционировании экологических систем требует для прогнозирования и возможного управления развитием в них катастрофических процессов [1, 7], определяет необходимость использования теории нечетких множеств [1, 8] и мер базирующихся на моделях нечетких процессов (таблица 1).

Таблица 1

Применимость математических теорий с позиции учета основных характеристик неопределенности

Учитываемая характеристика неопределенности	Возможности теорий по учету факторов неопределенности						
	Вероятности	Ошибок (интервальных моделей)	Интервальных средних	Субъективных вероятностей	Многозначной логики	Нечетких множеств	Нечетких мер и интервалов
Физическая числовая неопределенность	+	+	+	+	-	+	+
Физическая нечисловая неопределенность	+	-	+	+	+	+	+
Противоречия между точностью и неопределенностью	-	-	+	+	+	+	+
Возможность количественной оценки неопределенности	+	-	-	+	-	+	+
Эффективность формализации полного незнания	-	+	+	+	+	+	+
Требования жесткого определения всех событий, факторов и характеристик	-	+	+	-	+	+	+
Возможность эффективного учета взаимовлияния неопределенности	-	-	-	-	+	-	+
Возможность получения оптимистических и пессимистических оценок и уровня доверия к ним	+	-	+	+	-	+	+
Единство подхода к представлению точных, неполных, неопределенных и нечетких знаний	-	-	-	-	-	-	+
Возможность работы с неопределенной информацией на базе малых статистических выборок	-	+	+	-	+	+	+

Примечание: (+) – возможен, (-) – невозможен учет факторов неопределенности.

Отметим, что нечеткая мера является обобщенным понятием вероятностной меры, свободной от ряда ограничений. При этом сама мера – это функция множества $m{:}P(x)\rightarrow R$, где $P(x)$ – множество всех подмножеств x, и R – множество действительных чисел [3].

С математической точки зрения нечеткая мера $q(\bullet)$ является однопараметрическим расширением вероятностной меры, которая удовлетворяет условиям ограниченности, монотонности и непрерывности.

Что касается понятия нечетких процессов, то под ними необходимо понимать процесс, состояние которого в каждый момент времени $t=T$ может быть описано некоторым распределением нечеткости на пространстве состояний процесса Ω.

Состояние любой экологической системы может быть определено совокупностью динамических процессов, которые формируются действием совокупности внешних и внутренних факторов $x=\{x\}$, при этом для фактора $x_k \in x$ возможное состояние процесса ограничивается некоторым нечётким процессом, описываемым нечётко-интегральным уравнением вида:

$$\sigma_{x_k}\left(\omega/_{t_{np}}\right)=\oint_T h_{x_k}\left(\omega,t_{np}\right)\cdot\oint_{\psi_{T(\omega)}} f_{t_{np}}(\omega)\cdot g_\omega(\bullet), \tag{13}$$

где $t_{np}\in T$; T – нечеткий временной интервал прогноза; $\sigma_{x_k}\left(\omega/_{t_{np}}\right)$ – функция распределения нечеткой меры (нечеткости) на T, связывающей пространства T и Ω, т. е. $\sigma_{x_k}\left(\omega/_{t_{np}}\right):T\to[01]$; $\int(\bullet)$ – нечеткий интеграл; $g_\omega(\bullet)$ – расширенная нечеткая мера; $h_{x_k}\left(\omega,t_{np}\right)$ – функция преобразования нечетной динамической системы, определяющей её динамику и $h_{x_k}\left(\omega,t_{np}\right):(\Omega\times T)\times\Omega\to[01]$; $f_{t_{np}}(\omega)$ – функция распределения плотности произвольного нечеткого множества.

Зная или задаваясь важностью влияния различных факторов $p(x):X\to[01]$, прогнозирование состояние экологической системы (объекта) сводится к нахождению такого нечеткого процесса, который бы агрегировал исходный процесс с учетом функции $p(x)$, т. е.

$$\bar{S}_{t_{np}}(\omega)=F\left(\sigma_{x_k}\left(\omega,t_{np}\right),p(x)\right), \tag{14}$$

где F – оператор оперирования функции.

Таким операторам может выступать нечеткий интеграл на множестве X по некоторой нечеткой мере $\bar{\omega}_x(\bullet)$. А так как агрегирующие свойства нечеткого интеграла определяются распределением меры $\bar{\omega}_x(\bullet)$, то в зависимости от нее он может определяться как операцией со свойствами объединения, так и операцией со свойствами нечетких множеств со следующими мерами [9, 10]:

– для объединения множеств

$$q_F=\oint_x \eta(x)\cdot\bar{\omega}(\bullet), \tag{15}$$

где $\eta\left(x_j\right)=\dfrac{n-j}{n-1},x_j\in X$;

– для пересечения множеств

$$\iota_F=1-q_F, \tag{16}$$

С учетом функции важности $p(x)$ нечетно-интегральное уравнение принимает вид:

$$\sigma'_{x_k}\left(\omega,t_{np}\right)=\left(p\left(x_k\right)|\iota_F\right)\cdot\sigma_{x_k}\left(\omega,t_{np}\right)^{\left(p\left(x_k\right)|q_F\right)}, \tag{17}$$

и соответственно –

$$\bar{S}_{t_{np}}(\omega)=\oint_x\sum\left(x_k\left|\omega,t_{np}\right.\right)\cdot\bar{\omega}_x(\bullet|\omega), \tag{18}$$

где $\bar{\omega}_x(\bullet|\omega)$ – условная нечеткая мера оператора F.

Для описания дискретного нечеткого процесса можно использовать уравнение вида:

$$\mu_{i+1}(\omega)=\iint\limits_{\Omega_1} h(\omega,\omega')\cdot\iint\limits_{\Omega}\mu_i(\omega)\cdot q(\bullet), \tag{19}$$

где $\mu_i(\omega)$ – функция, описывающая состояние нечеткого процесса в i - ый момент времени; $q(\bullet)$ – нечеткая мера на пространстве состояний; $h(\omega,\omega')$ – нечеткое отношение, реализующее оператор вход-выход на расчетном временном интервале и $h(\omega,\omega')=\mu_{i+1}(\omega')\cdot\chi_{H_{\mu_{i+1}}}(\omega)$, $\chi_{H_{\mu_{i+1}}}(\omega)$ – характеристическая функция множества для фиксированного $\omega'\in\Omega$.

Мера соответствия $\mu^m(\omega)$ истинному состоянию нечеткого процесса может определяться мерой возможности (оптимистический) или мерой необходимости (пессимистический вариант), т. е.

$$\begin{cases}\nu(\mu^u,\mu^m)=\min\limits_{\omega\in\Omega}\{\mu^u(\omega);\mu^m(\omega)\}\\ \nu(\mu^u,\mu^m)=\max\limits_{\omega\in\Omega}\{\mu^m(\omega),1-\mu^u(\omega)\}\end{cases}. \tag{20}$$

Для модели нечеткого процесса на пространстве Ω нечетко-дифференциальное уравнение имеет вид –

$$fd\mu(\omega)=\left[h(\omega ut)\cdot\overline{c}(\omega ut)\right]fdf_\tau'''(\omega), \tag{21}$$

где $\overline{c}(\omega ut)$ – нечеткая функция управления, заданная на пространстве U – значений управляющего воздействия ($u\in U$); $h(\omega ut)$ – оператор нечеткой динамической системы (объекта); $f_\tau'''(\omega)$ – нечеткий процесс на Ω пространстве ($\omega\in\Omega$).

Полагая, что эффективность управления нечетной динамической системой определяется множеством критериев $\theta(\nu)$ с нечеткой мерой их важности $q_\theta(\bullet):2^\theta\to[01]$, в общем случае потери (ухудшение, изменение) $l(\nu,u)$ по каждому из показателей (факторов, условий) $\nu\in\Omega$ зависят от выбора управления $u(t,\omega)\in U$ в конкретный момент времени и для конкретного сотояния системы, т. е. $l(\nu,u):\theta\times U\to[01]$.

При этом нечеткое отношение $l(\omega,u)$ характеризует распределение меры возможности потерь по $\nu\in\Omega$ при $u\in U$, а $l'(\nu,u)$ – меру выгодности и $l'(\nu,u)=1-l(\nu,u)$.

Отсюда соответственно максимально возможная выгодность по критерию $\nu\in\theta$ при выборе управления из подмножества $E\le U$ определится соотношением

$$j=\max_{u\in E}\left[1-l(\nu,u)\right], \tag{22}$$

а минимально возможные потери ν соотношением

$$\nu=1-\max_{u\in E}\left[\chi_E(\nu,u)\cdot\left(1-l(\nu,u)\right)\right], \tag{23}$$

где $\chi_E(\bullet)$ – характеристическая функция множества $E\le U$.

И тогда соответственно выигрыш по всем критериям в текущий момент времени определится зависимостью:

$$l'_{\theta}(u) = \oint_{\theta} l'(\nu, u) \cdot g_{\theta}(\bullet), \tag{24}$$

а интегральный выигрыш определится функционалом:

$$I = \oint_{T} l'_{\theta}(u) \cdot \int_{\psi_t(\bullet|\omega)} f_{\Gamma}(\omega) \cdot q(\bullet), \tag{25}$$

где $q(\bullet): 2^{\Omega} \to [01], f_{\Gamma}: \Omega \to [01]$ – нечеткий процесс на Ω задающей временную нечеткость динамики нечеткого динамического процесса.

Отсюда в соответствии с принципом оптимальности Белмана функциональное неравенство для определения оптимального управления примет вид:

$$I(u^{*}) \geq \max_{u \in U} \oint_{\theta} l'(u, \nu) \cdot q_{\theta}, \tag{26}$$

где $l'(u, \nu)$ – функция выигрыша является нечетким аналогом функции Беллана.

Если рассматривать случай, когда управление определяется не только временем $t \in T$, но и состоянием системы (объекта) $\omega \in \Omega$, т. е. выбором нечеткой стратегии управления $S_t(\omega): U \times \Omega \to [01]$ в момент $t \in T$, то нечеткий выигрыш определяется нечетким отношением $l(\nu, S_t(\omega): \theta \times (U \times \Omega)) \to [01]$ с расчетными зависимостями:

$$\phi_{\tau}(u) = \oint_{\mu_{\tau}(\omega)} b(u, \omega) \cdot q(\bullet); b(u, \omega) = \oint_{\theta} \left[1 - l(u, \nu) \cdot \sigma_{\theta}(\bullet|\omega)\right], \tag{27}$$

где $\mu_{\tau}(\omega)$ – текущее состояние системы (нечеткое подмножество); $\sigma_{\theta}(\bullet|\omega)$ – условная нечеткая мера важности критериев $\nu \in \theta$ в состоянии $\omega \in \Omega$.

Отсюда основу решения любых экологических проблем методами теории нечетких интегралов, множеств и мер составляет формализация нечетких данных.

Рассмотрим формализацию нечетких данных для оценки уровня риска $d \in D$ формирования критического состояния экологических систем Белорусского Полесья (таблица 2) [1].

При формализации использованы q – нечетких мер, следующим образом зависят от параметров нормировки:

$$\left.\begin{array}{l} M_{п} \in -1 < \lambda < 0; \quad M_{вз} \in \lambda = -1; \quad M_{H} \in \lambda > 0; \\ M_{D} \in \lambda > 0; \quad M_{вр} \in \lambda = 0. \end{array}\right\}. \tag{28}$$

Отметим также, что любые четкие данные представимы примитивным классом мер, т. е. мерами Дирака и

$$\mu_{A \subseteq X}(d) = \begin{cases} 1, x_0 \in A; \\ 0, x_0 \notin A, -\infty < \lambda < \infty \end{cases}, \tag{29}$$

где X_0 – заданный элемент в пространстве (носителе меры) X.

Таблица 2

Формализация нечетких данных для оценки уровня риска по экологическим системам Белорусского Полесья

Описание данных	Формализованное представление данных
Полная уверенность, что риска нет	$\mu(d)=\begin{cases}0, d\in D\mid\{6\}\\1, d=6\end{cases}$
Полная уверенность, что риск есть, но тяжело оценить его значение	$\mu(d)=\begin{cases}1, & \mu(\cdot)=M_{вз}(\cdot), d\neq 6\\ \lambda\in[0,1] & \mu(\cdot)=M_n(\cdot), M_D(\cdot), d\neq 6\\ 0, & \mu(\cdot)=M_H(\cdot), d=6\end{cases}$
Полная уверенность, что риск есть, однако известно, что его значение от минимального до допустимого	$\mu(d)=\begin{cases}1, d\in[2,3]\\0, d\notin[2,3]\\0, d=6\end{cases}$
Полная уверенность, что риск есть, но значение его четко неизвестно	$\mu(d)=\begin{cases}\varphi(d), d\in D\mid\{6\}\\0, d=6\end{cases}$, $\varphi(d)$ — распределение нечёткости для риска низкого уровня
Полная уверенность, что риск допустимый	$\mu(d)=\begin{cases}0, d\in D\mid\{3\}\\1, d=3\end{cases}$
Вполне правдоподобно, что есть риск достаточно высокого уровня, но имеется и ненулевая возможность λ что риска нет	$\mu(d)=\begin{cases}M_n, d\in D\mid\{6\}\\ \lambda, d=6\end{cases}$, M_n — распределение меры правдоподобия для риска высокого уровня
Неизвестно есть риск или нет, но если есть, то его величина вообще неизвестна	$\mu(d)=\begin{cases}1, & \mu(\cdot)=M_{вз}(\cdot)\\ \lambda\in[0,1] & \mu(\cdot)=M_n(\cdot), M_D(\cdot)\\ 0, & \mu(\cdot)=M_H(\cdot)\end{cases}$
Вполне возможно, что риска нет, но имеется и не нулевая возможность, что он есть и не выше критического	$\mu(d)=\begin{cases}\lambda, d<3\\0, d\geq 3\\1, d=6\end{cases}$

Примечание: 1 – событие возможно; 2 – событие невозможно; M_n – мера правдоподобия; $M_{вз}$ – мера возможности; Мн – мера необходимости; M_D – мера доверия; $M_{вр}$ – мера вероятности. Оценка риска: D=(1 – отсутствует, 2 – минимальный, 3 – допустимый, 4 – критический, 5 – недопустимый, 6 – неизвестно, является ли это риском); μ – функция принадлежности; λ –параметр нормировки.

Бесспорно, предложенная формализация нечетких данных не ограничивают всего спектра возможностей формализации. При необходимости, в каждой конкретной решаемой задаче, могут использоваться и другие варианты формализации, позволяющие более широко описать спектр разнородных и малодостоверных данных.

Заключение

На сегодня теория нечетких множеств, мер и интегралов в решении проблем прогнозирования процессов и соответственно состояния и управления экологическими системами практически не используется. Имеющиеся комплексы программных продуктов Fuzzy-технология и Expro-2000 позволяют лишь дать анализ данных, рисков и оценку событий при наличии информации, не вызывающей должного доверия (словесной, разнородной, низкокачественной) и недостаточной известности факторов будущего.

Отсюда поиск решения задач прогнозирования и управления катастрофическими процессами при функционировании экологических систем в условиях неопределенности на базе нечетких процессов в настоящее время весьма и весьма актуален.

Список литературы

1. Волчек, А.А. Мониторинг, оценка и прогноз чрезвычайных ситуаций и их последствий / А.А. Волчек, П.С. Пойта, П.В. Шведовский // Брест: Альтернатива, 2012. – 423 с.
2. Ивченко, Б.П. Информационная экология / Б.П. Ивченко, Л.А. Мартыщенко. – С.-Пб.: Нордметиздат, 1998. – 201 с.
3. Бочарников, В.П. Модель управляемого непрерывного нечеткого процесса на основе нечетко-интегрального уравнения / В.П. Бочарников // Проблемы управления и информатики – К.: КМУГА, 1998. – С. 72–77.
4. Зайченко, Ю.П. Исследование операций: Нечеткая оптимизация / Ю.П. Зайченко. – Киев: Выща школа, 1991. – 191 с.
5. Прикладные нечеткие системы. Пер. с япон. / Под ред. Т. Терно. – М.: Мир, 1993. – 386 с.
6. Райфа, Г. Анализ решений. Введение в проблему выбора в условиях неопределенности / Г. Райфа. – М.: Наука, 1970. – 402 с.
7. Рапопорт, И.А. Математические аспекты абстрактного анализа систем / И.А. Рапопорт // Исследования по общей теории систем. – М.: Прогресс, 1969. – С. 16– 18.
8. Чернышев, М.К. Математическое моделирование иерархических систем / М.К. Чернышев. – М.: Наука, 1998. – С. 44–49.
9. Гурман, В.И. Моделирование процессов в природно-экономических системах / В.И. Гурман. – Новосибирск: Наука, 1982. – 175 с.
10. Богарников, В.П. Fuzzy-технология. Математические основы. Практика моделирования в экономике / В.П. Богарников. – С.-Пб.: Наука, РАН. – 2001. – 328 с.

Волчек Александр Александрович, декан факультета инженерных систем и экологии Брестского государственного технического университета, доктор географических наук РФ и РБ, профессор, Volchak@tut.by

Образцов Леонид Владимирович, доцент кафедры экономики и организации строительства Брестского государственного технического университета, кандидат технических наук, доцент, olobr@rambler.ru

Шведовский Петр Владимирович, заведующий кафедрой геотехники и транспортных коммуникаций Брестского государственного технического университета, кандидат технических наук, профессор, ofig@bstu.by