УДК 330.111.4+502.54.06:712

Шведовский П.В., Бурлибаев М.Ж.

ОСОБЕННОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КАТАСТРОФИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ В СТРУКТУРЕ ПРИРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ И ПОИСКА ПУТЕЙ УПРАВЛЕНИЯ ИМИ

Введение

Изменения в динамике протекания многих природных процессов в последние десятилетия прошлого столетия привели к некоторому нарушению глобального равновесия. А это обусловило неопределенность состоянии природной среды и соответственно стратегии и тактики взаимодействия общества и природы.

Прогнозирование катастрофических изменений в структуре природных процессов относится к группе самых сложных математических задач [1, 4].

Высокая цена ошибочных решений при прогнозировании изменений обуславливает необходимость совершенствования методологии системно-информационного анализа процессов и базирования прогнозов не на классических моделях, а на моделях, использующих аппарат производящих функций, принцип максимума неопределенности и лагранжевые вероятностные распределения.

Принципиальным отличием катастрофических изменений природных процессов от катастрофических изменений в большинстве эргономических и экономических процессов и систем является неопределенность и искажаемость «массовой» информации о прогнозируемых условиях функционирования атмосферы, гидросферы и литосферы [5, 6].

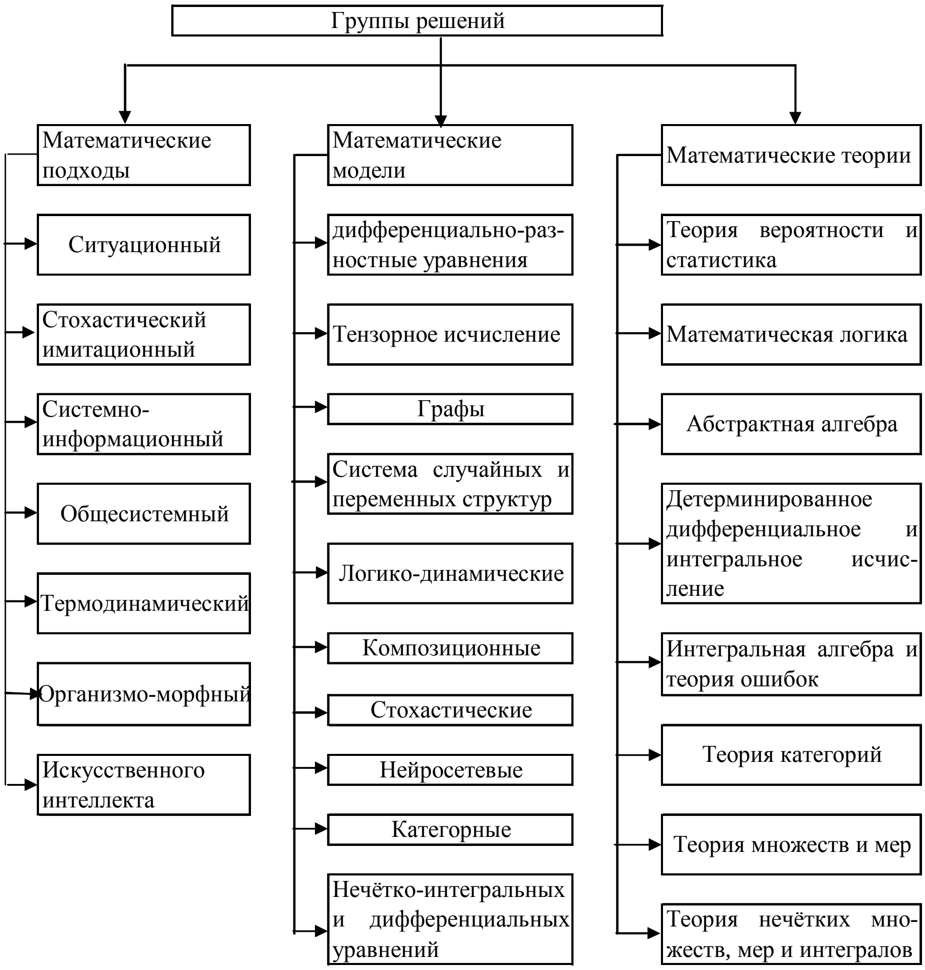

Рис. 1. *Возможные группы решений прогнозных задач*

Концептуально система таких прогнозных исследований может быть описана следующим образом [3, 8]:

- известны начальные (A_1) и конечные (A_T) состояния системы. Необходимо определить состояние A_k, где $m>k>T$;
- известно множество последовательных состояний системы ($A_1, A_2, \ldots, A_{m-1}$). Необходимо определить конечное состояние системы A_k;
- известны промежуточные и конечное состояния системы ($A_2, A_3, \ldots, A_m$) или конечное состояние системы A_m. Необходимо определить начальное A_1 или некоторые промежуточные состояния системы A_2, A_3;
- известны все состояния системы ($A_1, A_2, \ldots, A_m$). Необходимо отыскать набор элементов системы $a_1, a_2, \ldots, a_m$ и ее структуру $\vec{a}_1, \vec{a}_2, \ldots, \vec{a}_m$;
- известен набор элементов системы ($a_1, a_2, \ldots, a_m$). Необходимо описать поведение системы с переходами последовательных состояний $\vec{A}_1, \vec{A}_2, \ldots, \vec{A}_m$;
- известен последовательный переход системы по состояниям ($\vec{A}_1, \vec{A}_2, \ldots, \vec{A}_m$). Необходимо отыскать структуру перехода состояний и основных элементов ($\vec{a}_1, \vec{a}_2, \ldots, \vec{a}_m$).

Методы исследований

Для решения этих задач в целом применимы следующие группы решений и подходов (рис. 1).

Каждая из групп обладает своими особенностями, но все

Шведовский Петр Владимирович, *профессор, к.т.н., профессор каф. оснований, фундаментов, инженерной геологии и геодезии. Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.*
Бурлибаев Малик Жолдасович, *д.т.н., профессор, зам. директора Казахского научно-исследовательского института мониторинга окружающей среды и климата.*
Казахстан, КазНИИМОСК, 480072 г. Алматы, пр. Сейфулина, 597.

они позволяют в той или иной мере учесть конфликтность среды существования и развития процесса, а также многокритериальность, неопределенность, случайность действий и противодействий и многозначность их описания.

Конфликтная природа процессов требует формализации неопределенной (неоднозначной, недостоверной, неизвестной) информации методами математических теорий. Наиболее эффективными являются теории вероятности, ошибок, интервальных средних, субъективных вероятностей, многозначной логики нечетких множеств и нечетких мер и интегралов [3, 4].

Применимость всех этих теорий для решения конкретных прогнозных задач зависит от особенностей учета ими факторов неопределенности (табл. 1).

Анализ табл. позволяет отметить, что одной из наиболее эффективных математических теорий при решении проблем с множественностью неопределенностей является теория нечетких интегралов, множеств и, особенно, нечетких мер, базирующиеся на нечетких процессах.

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 [2, 7].

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 $\mu_t(\omega)\in F(\Omega)$ на пространстве состояний процесса Ω.

Результаты исследований

Состояние любой 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:

$$\sigma_{x_k}\left(\omega\big/_{t_{np}}\right) = \oint_T h_{x_k}\left(\omega, t_{np}\right)\cdot \oint_{\psi T(\omega)} f_{t_{np}}(\omega)\cdot g_{\omega}(\bullet), \quad (1)$$

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

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

$$\bar{S}_{t_{np}}(\omega) = F\left(\sigma_{x_k}\left(\omega, t_{np}\right), p(x)\right), \quad (2)$$

где F – оператор оперирования функции.

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

Таблица 1. *Применимость математических теорий для решения прогнозных задач*

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.

- для объединения множеств

$$q_F = \oint_x \eta(x) \cdot \overline{\omega}(\bullet), \tag{3}$$

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

- для пересечения множеств

$$\iota_F = 1 - q_F\ . \tag{4}$$

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

$$\sigma'_{x_k}(\omega, t_{np}) = (p(x_k) | \iota_F) \cdot \sigma_{x_k}(\omega, t_{np})^{(p(x_k)|q_F)}, \tag{5}$$

и соответственно –

$$\overline{S}_{t_{np}}(\omega) = \oint_x \sum (x_k | \omega, t_{np}) \cdot \overline{\omega}_x(\bullet|\omega), \tag{6}$$

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

Для описания дискретного нечеткого процесса можно использовать уравнение вида:

$$\mu_{i+1}(\omega) = \oint_{\Omega_1} h(\omega, \omega') \cdot \oint_{\Omega} \mu_i(\omega) \cdot q(\bullet), \tag{7}$$

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.

$$\begin{cases} \nu(\mu^u, \mu^m) = \min\limits_{\omega \in \Omega} \{\mu^u(\omega); \mu^m(\omega)\} \\ \nu(\mu^u, \mu^m) = \max\limits_{\omega \in \Omega} \{\mu^m(\omega), 1 - \mu^u(\omega)\} \end{cases}. \tag{8}$$

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

$$fd\mu(\omega) = [h(\omega ut) \cdot \overline{c}(\omega ut)] fdf''_\tau(\omega), \tag{9}$$

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; $f''_\tau(\omega)$ – нечеткий процесс на Ω пространстве ($\omega \in \Omega$).

Полагая, что эффективность управления нечеткой 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

$$j = \max_{u \in E} [1 - l(\nu, u)], \tag{10}$$

а минимально возможные потери ν соотношением

$$\nu = 1 - \max_{u \in E} [\chi_E(\nu, u) \cdot (1 - l(\nu, u))], \tag{11}$$

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

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

$$l'_\theta(u) = \oint_\theta l'(\nu, u) \cdot g_\theta(\bullet), \tag{12}$$

а интегральный выигрыш определится функционалом:

$$I = \oint_T l'_\theta(u) \cdot \int_{\psi_t(\bullet|\omega)} f_\Gamma(\omega) \cdot q(\bullet), \tag{13}$$

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 Беллана функциональное неравенство для определения оптимального управления примет вид:

$$I(u^*) \ge \max_{u \in U} \oint_\theta l'(u, \nu) \cdot q_\theta, \tag{14}$$

где функция выигрыша $l'(u, \nu)$ является нечетким аналогом функции Беллана [6].

Если рассматривать случай, когда управление определяется не только временем $t \in T$, но и состоянием системы $\omega \in \Omega$, 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:

$$\varphi_\tau(u) = \oint_{\mu_\tau(\omega)} b(u, \omega) \cdot q(\bullet); b(u, \omega) = \oint_\theta [1 - l(u, \nu) \cdot \sigma_\theta(\bullet|\omega)], \tag{15}$$

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

Все это позволяет сделать вывод, что основу решения любых проблем методами теории нечетких интегралов, множеств и мер составляет формализация нечетких данных.

Заключение

На сегодня теория нечетких множеств, мер и интегралов в решении проблем прогнозирования природных процессов и соответственно состояния и управления гео- и экосистемами 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.

Наблюдающиеся в последние годы катастрофические изменения в структуре природных процессов и функционировании глобальных и региональных гео- и экосистем и объектов обуславливают насущную актуальность исследований в области разработки методик решения прогнозных задач в условиях неопределенности на базе теории нечетких множеств.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Беляев В.И. Теория сложных систем. – Киев: Навукова думка, 1978. – 216с.
2. Бочарников В.П. Модель управляемого непрерывного нечеткого процесса. Проблемы управления. – Киев: КМУГА, 1998. – С. 72-77.

3. Бурлибаев М.Ж., Волчек А.А., Шведовский П.В. Проблемы оптимизации природопользования и природообустройства в математических моделях и методах. – Алматы.: Каганат, 2003. – 532 с.
4. Ивченко Б.П., Мартыщенко А.А. Информационная экология. – С.-Пб.:Кормедиздат, 1998. – 201с.
5. Логинов В.Ф., Волчек А.А., Шведовский П.В. Практика применения статистических методов при анализе и прогнозе природных процессов. – Брест: БрГТУ, 2004. – 301с.
6. Логинов В.Ф. Причины и следствия климатических изменений. – Минск: БГУ, 1997. – 320 с.
7. Мартыщенко А.А., Панов В.В. Моделирование распределений, заданных характеристическими функциями. – М.: Кибернетика, 1985. – №3. – С. 19-26.
8. Шведовский П.В., Волчек А.А., Бурлибаев М.Ж. Особенности прогнозирования эколого-фитоценотических изменений при агротрансформации ландшафтов // Вестник БрГТУ. Водохозяйственное строительство и теплоэнергетика. – 2004, №2 (20). – С. 22-29.

Статья поступила в редакцию 26.02.2007

УДК 502.63(476)

Волчек А.А., Волчек Ан.А.

ТРАНСФОРМАЦИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД РЕК БЕЛАРУСИ

Введение

Антропогенным воздействиям на водные ресурсы гидрология и смежные с ней науки уделяют пристальное внимание уже более 100 лет. Вначале исследовались преимущественно изменения водного режима территории под влиянием различных видов хозяйственной деятельности. Затем, с началом «научно-технической революции» и связанного с ней роста загрязнения природных вод, стало актуальным изучение трансформации качества водных ресурсов. Это вызвано в первую очередь влиянием загрязнения вод на окружающую среду, здоровье населения и т. д.

В настоящее время Беларусь не испытывает острого дефицита в воде, аналогичная картина сохранится и на обозримую перспективу. Однако проблема качества поверхностных вод уже в настоящее время дает о себе знать. Под воздействием природных и антропогенных факторов произошли изменения гидрохимического режима рек Беларуси и зачастую не в лучшую сторону. Этот процесс, по мере роста промышленного производства, городов и интенсификации сельского хозяйства, будет нарастать. Картина усугубляется тем, что почти все крупные реки Беларуси являются трансграничными и ухудшение качества поверхностных вод может не только негативно отразиться на состоянии окружающей среды, эффективности производства, создать проблему сохранения биоразнообразия, но и может стать причиной конфликтных ситуаций между государствами, расположенными в одном бассейне. Поэтому необходима современная оценка качества поверхностных вод и прогноз изменения гидрохимического режима рек.

Подробная современная гидрохимическая картина поверхностных вод Беларуси представлена в монографии [1]. Целью настоящей работы является оценка трансформации гидрохимического режима поверхностных вод по основным показателям.

Исходные данные и методика исследований

В исследовании использовались данные Государственного водного кадастра Республики Беларусь за период с 1994 по 2005 гг. Анализировались изменения по следующим показателям: содержание в воде растворенного кислорода, никеля, нефтепродуктов, железа, меди, цинка, фосфатов, азота нитритного, азота аммонийного, синтетические поверхностно-активные вещества (СПАВ), индекс загрязнения, биохимическое потребление кислорода за 5 суток ($БПК_5$).

Основным стандартом качества речных вод в Беларуси является предельно допустимая концентрация химических веществ (ПДК), устанавливаемая для водных объектов различного назначения. Оценка качества воды при этом производится с использованием интегрального показателя – индекса загрязнения воды (ИЗВ), при помощи которого идентифицируются 7 различных степеней загрязнения поверхностных вод.

Для оценки трансформации гидрохимического режима рек в основном использовались линейные тренды, значимость которых определялась коэффициентами корреляции. В зависимости от хронологического хода того или иного элемента использовались также и нелинейные тренды. Оценка изменения временных рядов оценивалась градиентом изменения (α), т. е. величиной численно равной коэффициенту регрессии (a), умноженному на 10 лет ($\alpha = a \cdot 10$ лет). Значимость коэффициента корреляции установлена на 5 %-ом уровне ($r_{кр}=0{,}576$).

Обсуждение результатов

Способы определения качества природных вод

Величина критерия ИЗВ нормирована, и эта норма является экспертной оценкой; в зависимости от величины ИЗВ участки водных объектов подразделяются на классы (табл. 1).

Таблица 1. *Классы качества вод в зависимости от значения индекса загрязнения вод*

Оценка качества воды	Значение ИЗВ	Классы вод
Чистая	≤0,30	I
Относительно чистая	0,31 – 1,00	II
Умеренно загрязненная	1,01 – 2,50	III
Загрязненная	2,51 – 4,00	IV
Грязная	4,01 – 6,00	V
Очень грязная	6,01 – 10,00	VI
Чрезвычайно грязная	>10,00	VII

Данная система оценки качества воды является наиболее распространенной из-за ее относительной простоты, несмотря на очевидные недостатки.

Основной недостаток системы ПДК заключается в требовании к очистным сооружениям обеспечить концентрацию всех компонентов ниже допустимых. Эта задача теоретически выполнима, но требует значительных финансовых затрат. Поэтому на практике большинство систем очистки воды ориентированы на те приоритетные компоненты состава, которые

Волчек Александр Александрович*, д.г.н., доцент, заместитель директора по научной работе ГНУ Полесский аграрно-экологический институт НАН Беларуси.*
Беларусь, 224020, г. Брест ул. Московская, 202.
Волчек Анастасия Александровна, *аспирант каф. сельскохозяйственных гидротехнических мелиораций Брестского государственного технического университета.*
Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.