

Ю.Н. Бардачев, М.В. Жарикова, В.Г. Шерстюк

Событийно-сетевая модель процессов разрушительного характера для риск-ориентированной системы поддержки принятия решений реального времени

Описана формальная правдоподобная модель процесса разрушительного характера в геокотехносистемах, представляющих собой территориальные системы, дискретизированные посредством сетки из равновеликих ячеек. Предложенный формализм позволяет совмещать в рамках одной структуры различные оценки правдоподобия – нечеткие, вероятностные или приближенные.

Ключевые слова: геокотехносистемы, процесс разрушительного характера, чрезвычайная ситуация разрушительного характера, система поддержки принятия решений.

Описано формальну правдоподібну модель процесу руйнівного характеру в геокотехносистемах, що являють собою територіальні системи, дискретизовані сіткою з рівновеликих комірок. Запропонований формалізм дозволяє поєднувати в межах однієї структури різні оцінки правдоподібності – нечіткі, імовірнісні або наближені.

Ключові слова: геокотехносистеми, процес руйнівного характеру, надзвичайна ситуація руйнівного характеру, система підтримки прийняття рішень.

Введение. Первые десятилетия XXI в. характеризуются активизацией опасных природных процессов, рост масштабов которых связан с такими факторами, как рост промышленного производства, урбанизация, деградация природной среды, глобальное потепление и пр. Такие процессы могут носить разрушительный характер, приводя к травмам и гибели людей, к ущербу для их имущества и инфраструктуры. В данной статье под опасными природными процессами следует понимать процессы разрушительного характера (ПРХ), возникающие в геокотехносистемах (ГЭТС) – целостных территориальных образованиях, формируемых в тесной взаимосвязи природы, населения и искусственных объектов.

На ГЭТС воздействует окружающая среда, в результате возмущающего воздействия которой и возникают ПРХ, характеризующиеся нарушением стабильного функционирования системы и приводящие к негативным последствиям в виде материального ущерба и нарушения условий жизнедеятельности людей. Таким образом, ПРХ являются проявлением последовательности возмущенных состояний ГЭТС, влекущим за собой чрезвычайные ситуации природного характера (ЧСПХ).

В свою очередь, под ЧСПХ будем понимать обстановку в ГЭТС, сложившуюся в результате ПРХ и оказывающую отрицательное воз-

действие на общество и материальные ценности, причиняя различного рода ущерб и требуя принятия управленческих решений.

При возникновении ЧСПХ требуется принимать меры по их локализации и ликвидации, обеспечивая минимизацию причиняемого ущерба. Поскольку ЧСПХ являются результатом одновременного воздействия значительного числа факторов стохастической природы, а развивающиеся при их возникновении процессы нелинейны, нестационарны и быстротечны, принимать меры противодействия весьма непросто [1]. Неточность, неполнота и противоречивость исходной информации, территориальная распределенность событий, а также значительный дефицит времени и высокая ответственность затрудняют принятие решений, что стимулирует разработку систем поддержки принятия решений (СППР) по противодействию ЧСПХ, основанных на геоинформационных системах (ГИС). В то же время, применение устойчивых подходов не обеспечивает требуемого быстрого действия и приемлемой эффективности СППР [2], что обуславливает актуальность дальнейшего поиска нетрадиционных моделей и методов поддержки принятия решений по противодействию ЧСПХ. Таким образом, принятие решений в режиме реального времени в условиях природных разрушительных процессов представляет собой актуальную научно-техническую проблему.

Обзор литературы

СППР, функционирующие в условиях ПРХ, как правило, основаны на оценке риска, отражающего потенциал реализации неблагоприятных последствий для определенного множества ценных объектов. Классификация риск-ориентированных СППР в условиях ПРХ приведена в [3].

Существует четыре основных подхода к анализу риска в таких СППР [4]: *количественный*, на основе *матрицы риска, индикаторов и деревьев событий*. *Количественный* подход к оценке риска основан на статистической обработке данных и требует знания вероятностей возникновения ПРХ и охвата определенного участка этим процессом [5–7]. В силу сложности получения значимой статистической выборки оценки вероятности принимают для значительных участков местности (часто в масштабе региона или страны) и за большой промежуток времени (10–100 лет), компенсируя таким образом непрезентативность исходных данных [6]. Недостаток статистических данных, как правило, компенсируют использованием методов имитационного моделирования, что связано с высокой вычислительной сложностью [7]. Оценка риска, полученная при таком подходе, является величиной статической, поэтому для СППР в условиях реального времени количественный подход не всегда применим.

Подход на основе матрицы риска позволяет оценивать риск с использованием обобщенных значений (классов) вместо точных значений, тем самым позволяя преодолеть проблему недостаточной репрезентативности выборки. Матрицы риска строят на основе экспертных знаний так, чтобы классифицировать участки местности по степени риска на основе информации о частоте ПРХ и ожидаемых убытках [2]. Отметим, что оценка частоты ПРХ не всегда однозначна, так как одному и тому же участку могут быть сопоставлены различные комбинации частот и ожидаемых убытков. Кроме того, данный подход не позволяет получать количественные значения оценки риска.

Подход на основе индикаторов используется в случаях, когда количественные и полуко-

личественные методы не применимы из-за недостатка исходных данных. Этот подход позволяет проводить оценку риска с учетом дополнительных компонентов: социального, экономического факторов, уязвимости объектов, находящихся в зоне риска, которым присваиваются определенные весовые коэффициенты. Существенным недостатком подхода является относительная результирующая оценка риска, не отражающая информацию об ожидаемых убытках [1].

Деревья событий позволяют моделировать последовательности событий различного уровня сложности, их недостаток – отсутствие пространственной привязки событий [8, 9]. При этом подход достаточно гибкий и обладает большим потенциалом для развития. В частности, привязка событий не только к временным меткам, но и к участкам местности позволила бы адекватно моделировать динамику пространственно-распределенных ПРХ. Кроме того, деревья событий могут быть адаптированы к различным способам учета неопределенности (вероятностным, нечетким, приближенным и пр.).

Приведенный обзор позволяет сделать вывод о том, что вследствие статичности оценки риска большинство существующих подходов позволяет оценивать его лишь на этапе, предшествующем возникновению ПРХ и практически не применимы в системах реального времени при развитии ПРХ. Исключение составляют деревья событий. В целом же в настоящее время отсутствуют пространственно-временные модели ПРХ, учитывающие динамику риска в процессе развития ЧСПХ в реальном времени.

Данная статья посвящена описанию предложенной авторами событийно-сетевой модели ПРХ, которая, в отличие от существующего подхода на основе деревьев событий, имеет пространственную привязку и позволяет моделировать динамику ПРХ в условиях неопределенности информации. Такая модель позволяет осуществлять динамическую диагностику ЧСПХ посредством оценки риска, что необходимо для рассматриваемого класса СППР реального времени.

Цель исследования

Проведенные исследования имели целью построить формальную правдоподобную событийно-сетевую модель процесса разрушительного характера, события которой имеют привязку как к моментам времени, так и к участкам местности, что делает ее пригодной для решения задач поддержки принятия решений по противодействию ЧСПХ в СППР реального времени.

Модель пространственной составляющей процессов разрушительного характера

Предположим, что ПРХ развиваются в пределах некоторой территориальной системы (ТС). Рассмотрим трехмерное евклидово пространство C , содержащее ТС как открытое связное подпространство $X \subseteq C$. Предположим, что каждая его точка $x \in X$ имеет непустое конечное множество атрибутов $A = \{a_1, \dots, a_m\}$, где V_{a_i} – область значений $a_i \in A$, $V = \bigcup_{a_i \in A} V_{a_i}$, f – функция значений атрибутов, такая что $f: X \times A \rightarrow V \forall x \in X$.

Пусть $R^{\geq 0}$ – множество неотрицательных вещественных чисел, ξ_C – функция $\xi_C: X \times X \rightarrow R^{\geq 0}$, удовлетворяющая следующим условиям:

- a) $\xi_C(x, y) = 0$, если и только если $x = y$;
- b) $\xi_C(x, y) = \xi_C(y, x)$;
- c) $\xi_C(x, y) + \xi_C(y, z) \geq \xi_C(x, z) \forall x, y, z \in X$.

Тогда ξ_C является функцией расстояния (метрикой), а $\xi_C(x, y)$ – евклидовым расстоянием между точками x и y . Такая пространственная модель, построенная на уровне отдельных точек пространства, не может использоваться в задачах анализа в реальном времени из-за высокой вычислительной сложности. Для этого ее необходимо дискретизировать на три уровня: *нижний* уровень будет содержать ячейки равного размера в качестве минимальных пространственных объектов, *средний* будет состоять из регионов различного размера, а *верхний* уровень будет представлять собой большие пространственные области.

Нижний уровень пространственной модели

Предположим, e_1, e_2, e_3 – базис, сохраняющий метрику ξ_C равномерной на всем пространстве C . Декомпозиция вектора $v = \alpha_1 e_1 + \alpha_2 e_2 + \alpha_3 e_3$ дает координаты $v(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$ некоторой точки пространства C . Наложим на пространство C метрическую сетку координатных линий размером δ , используя метрику ξ_C и линейное отображение ϕ так, чтобы образовалось множество D равновеликих кубических ячеек размера $\delta \times \delta \times \delta$, $\phi: D \rightarrow C$. Тогда можно сказать, что пространство C дискретизировано сеткой $D = \{d_{xyz}\}$ кубических ячеек равных размеров d_{xyz} , где x, y, z соответствуют базису e_1, e_2, e_3 . Соответственно, всякая ячейка $d \in D$ представляет собой пространственный объект минимального рассматриваемого размера, ассоциированный с помощью функции $f(d, A)$ с некоторым множеством значений атрибутов $a_i, a_j \in A$, называемым состоянием ячейки. Значения атрибутов различных точек, принадлежащих одной и той же ячейке d , рассматриваются как равные, поэтому каждая ячейка $d \in D$ представляет собой однородный участок местности ТС относительно значений атрибутов A . Следовательно, всякая ячейка $d \in D$ может быть сведена к некоторой точке подпространства X , причем все ее точки A -неразличимы: $(\forall d_1, d_2 \in D)(\forall a \in A)[f(d_1, a) = f(d_2, a)]$. Таким образом, на нижнем уровне пространственной модели местоположение объектов ТС дискретно и ограничено определенной ячейкой сетки.

Верхние уровни пространственной модели

Подпространство X также может быть разделено на конечное множество непересекающихся объектов, представляющих собой геометрические фигуры однородных областей ТС. Рассмотрим непустое подмножество атрибутов $A_i \subseteq A$. Определим отношение A_i -неразличимости [10] на множестве ячеек D как $R_D^A = \{(d_m, d_n) \in D \times$

$\times D \left\{ \forall a_j \in A_i, f(d_m, a_j) = f(d_n, a_j) \right\}$ Для двух различных ячеек $d_m, d_n \in D$ это означает, что если $(d_m, d_n) \in R_D^{A_i}$, то не только все различные точки x, y ячейки d_m (d_n) имеют равные значения атрибутов $a_j, \dots, a_m \in A_i$, но и различные точки y, z различных ячеек d_m, d_n также имеют равные значения заданного подмножества атрибутов.

Таким образом, определен структурный элемент среднего уровня пространственной модели как некоторая однородная в терминах значений подмножества атрибутов пространственная область, которая может быть представлена аппроксимирующим набором ячеек. Такой элемент назовем *регионом* h . Все ячейки, принадлежащие этому региону, являются A_i -неразличимыми. Каждый регион представляет собой объект определенного класса на карте ГИС, который назовем геотаксоном. Такие объекты не могут перекрываться или перекрывать друг друга, но они могут быть смежными или примыкающими друг к другу. Таким образом, их важнейшими свойствами будут непрерывность и связность (пространственная концентрация аппроксимирующих клеток).

Однако часто приходится анализировать пространственные области, содержащие множество различных объектов, находящихся в определенных пространственных отношениях между собой. Такие области могут состоять из множества пространственно-распределенных регионов, и представлять собой зоны, однородные относительно определенных оценок некоторых показателей (например, опасности, угрозы, риска), зависящих от текущих значений атрибутов $A_j \subseteq A$. Очевидно, что такие зоны не обладают свойством непрерывности. Рассмотрим множество регионов $H = \{h_1, \dots, h_k\}$. Определим отношение A_j -неразличимости $R_H^{A_j}$ на множестве регионов H так же, как и отношение A_i -неразличимости на множестве ячеек. Соответственно все регионы, принадлежащие

$R_H^{A_j}$, являются A_j -неразличимыми относительно значений атрибутов $a_1, \dots, a_p \in A_j$. Таким образом, определен структурный элемент верхнего уровня пространственной модели (распределенной пространственной области), являющийся однородным относительно значений атрибутов и представленный аппроксимирующим множеством регионов.

События и состояния

Предположим, что множество атрибутов A может быть разделено на три подмножества: не изменяющихся во времени (статических) атрибутов A_S , изменяющихся во времени (динамических) атрибутов A_D , медленно изменяющихся во времени атрибутов (среды) A_E , $A = A_S \cup A_D \cup A_E$. Поскольку ячейка – наиболее малый пространственный объект в предлагаемой пространственной модели, определим категории состояний ячейки.

Рассмотрим упорядоченное множество категорий состояния ячейки $W = \{w_0, \dots, w_i, \dots, w_F\}$, где w_0 – категория начальных состояний, w_F – категория конечных состояний и w_i – категория переходных состояний. Пусть ϑ – функция категории, такая что $\vartheta: D \times A \rightarrow W$. Всякая категория $w \in W$ имеет три составляющие: статус ячейки $w_S = \vartheta(A_S)$, условие $w_C = \vartheta(A_S \cup A_E)$ и фазу $w_D = \vartheta(A_D)$. Таким образом, каждая категория есть некоторым подпространством n -мерного пространства значений атрибутов $V_{a_1} \times \dots \times V_{a_i} \times \dots \times V_{a_n}$.

Каждое случайное изменение значений любых динамических параметров $A_k \subseteq A_D$ может изменить условие w_C ячейки так, что фаза w_D ячейки также вынужденно изменяется. Такое изменение не обязательно, но возможно. Если условие ячейки w_C изменяется, ячейка, возможно, переходит в другую категорию состояний w_i (изменяет режим своего поведения).

Предположим, что отношение достижимости связывает фазы категорий состояний меж-

ду собой. Пусть некоторое двоичное отношение $R_{acc} \subseteq W_D \times W_D$ на множестве фаз W_D рефлексивно, асимметрично и нетранзитивно, тогда достижимость может быть определена как функция $f_{acc} : W_D \times W_D \rightarrow \{\xi\}$, возвращающая возможность перехода из одного состояния в другое (распределение переходов).

Некоторые фазы могут быть несовместимы с определенными условиями (например, песчаные области, не покрытые растительностью, не могут быть подвержены горению). Поэтому также целесообразно определить отношение совместимости между фазами и условиями ячеек. Пусть некоторое двоичное отношение $R_{com} \subseteq W_C \times W_D$ – нерефлексивно, симметрично и нетранзитивно, тогда совместимость может быть определена как функция $f_{com} : W_C \times W_D \rightarrow \{\text{true}, \text{false}\}$, отображающая условие $w_C \in W_C$ в фазу состояния ячейки $w_D \in W_D$.

Рассмотрим всякое значительное (возможно, скачкообразное [11]) изменение значения некоторого атрибута ячейки, вынуждающее ее изменять свое состояние, как событие, обозначая его ψ , таким образом, что $\psi : w_i \rightarrow w_j$. Модель ПРХ может быть представлена как модель динамических изменений состояний некоторого подмножества ячеек, охваченных процессом в пространственной модели ТС.

Тогда задача моделирования динамики ПРХ на сетке из ячеек сводится к задаче моделирования смены состояния ячеек. При изменении состояния в условиях ПРХ ячейка проходит через последовательность качественно различных классов (категорий) состояний, принадлежащих упорядоченному (при переходе ячейки из одного класса состояний в другой) множеству W . Например, в простейшем случае для ячейки, моделирующей участок леса при пожаре, можно построить множество $W = \{w_0, w_1, w_2, w_3, w_4\}$ (рис. 1), где:

- разогрев лесного горючего материала (ЛГМ) до температуры горения – w_0 ;
- термическое разложение ЛГМ (пиролиз) – w_1 ;

- воспламенение ЛГМ – w_2 ;
- горение ЛГМ – w_3 ;
- затухание горения – w_4 .



Рис. 1

В общем случае для ячеек ТС можно выделить неограниченное количество классов состояний. Состояния оцениваются в процессе непрерывных наблюдений (мониторинга), позволяющих получать упорядоченные по времени последовательности событий (случайные потоки событий без последствий). Формализуем базовые понятия события, модели событий и потока событий [12] и вводя в модель параметр времени.

Модель событий

Рассмотрим множество отсчетов времени T с начальным моментом $t_0 \in T$ и отношение порядка $<_T$, задающее полностью упорядоченную временную шкалу $\langle t_0, T, <_T \rangle$ на T .

Для дальнейшего анализа различных аспектов наблюдаемого события в зависимости от точности наблюдения, его необходимо классифицировать, придерживаясь определенной иерархии.

Как минимум, необходимо построить таксономическую иерархию I_1 , соответствующую множеству классов $Class = \{c_i\}_{i=1}^n$, где c_i – класс события с определенным на нем отношением частичного порядка $<_1$, упорядочивающим информацию от абстрактной до детальной: $c_1 <_1 c_2$ означает, что класс c_1 содержит меньше информации, чем c_2 .

Кроме того, каждое фиксируемое событие может быть частью некоторой более сложной структуры событий, например, цепочки, триггера и др. Соответственно, целесообразно построить композиционную иерархию I_2 , соответствующую определенной структуре событий $\psi_j = \psi_k \uplus \psi_l$ с определенным на ней от-

ношением частичного порядка \prec_2 , упорядочивающим местоположение наблюдаемого события в данной структуре: $\psi_k \prec_2 \psi_j$ будет означать, что ψ_j включено в структуру ψ_k в качестве составляющей.

Кроме того, можно построить пространственную иерархию I_3 на основе предложенной пространственной модели с множеством элементов (ячейка, регион, зона) и заданным на нем отношением частичного порядка \prec_3 , а также временную иерархию I_4 с множеством элементов (секунда, минута, час, день, ...) и заданным на нем отношением частичного порядка \prec_4 . Именно пространственная и временная иерархии служат базовыми для построения адекватной пространственно-временной модели ЧСПХ.

Таким образом, базовый элемент модели событий – иерархия. Рассмотрим иерархию \mathfrak{I}_i как тройку: $\mathfrak{I}_i = \langle \perp_i, I_i, \prec_i \rangle$, где I_i – множество некоторых элементов, соответствующее некоторому отношению ν_i , \prec_i – заданное на множестве I_i отношение частичного порядка, \perp_i – наименьший (младший) элемент порядка \prec_i . Модель событий может определять на событиях отношения таксономии ν_1 , композиции ν_2 , пространственные ν_3 , временные ν_4 , достижимости ν_5 , совместимости ν_6 и другое, как отдельно, так и совместно.

Представим сигнатуру события как кортеж $s = \langle A, \{\mathfrak{I}_i\}_{i=1}^m \rangle$, где A – множество атрибутов, $\{\mathfrak{I}_i\}_{i=1}^m$ – множество иерархий \mathfrak{I}_i , индуцированных соответствующими отношениями ν_i . Тогда модель событий может быть определена как $E = \langle q, s \rangle$, где q – некоторое множество переменных, s – сигнатура событий.

Событие ψ в модели E может быть представлено структурой $\psi = \langle Y, c, t, d, A_\psi \rangle$, где $Y \in E.q$ – уникальная метка события, $c \in E.s.I_1$ – класс

события, $t \in T$ – время фиксации события (момент наблюдения, $t \in E.s.I_4$), $d \in D$ – ячейка пространства (геолокация наблюдения события, $d \in E.s.I_3$), A_ψ – множество атрибутов события, $A_\psi \in A$.

Таким образом, событие ψ представляет собой сложный объект, принадлежащий некоторому классу событий $c \in Class$ и принимающий значения атрибутов соответствующей ячейки $d \in D$, содержащей точку пространства, в которой событие произошло. Поскольку условия и точность наблюдения событий могут быть различными в разные моменты времени и в разных точках пространства, событие ψ также может быть описано атрибутами, различающимися точностью (определенностью) в разных точках временной шкалы T .

Поток событий $S = [\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_n]$ в модели E представляет собой последовательность событий, упорядоченную по $<_T$ так, что $\psi_1.t \leq_T \psi_2.t \leq_T \dots \leq_T \psi_n.t$ для всех событий последовательности. Событие ψ последовательности S_i с индексом j будем обозначать как ψ_j^i , так что $\psi_i.t = t_j \in T$. Следовательно, полное упорядочение модели E по $<_T$ при наличии $\langle t_0, T, <_T \rangle$ – необходимое условие ее адекватности.

Путь события $\rho(d_i, d_j)$ представляет собой последовательность событий, распространяющихся по цепочке от ячейки d_i к ячейке d_j . Два и более путей могут быть объединены оператором конкатенации.

Оценка правдоподобия событий

Пусть L – непустое множество–носитель с заданными на нем мультипликативным \otimes и аддитивным \oplus операторами. Если данное множество удовлетворяет условиям идемпотентности, коммутативности, ассоциативности и дистрибутивности для любых $x, y, z \in L$, может быть построена дистрибутивная квазирешетка $R = \langle L, \otimes, \oplus \rangle$. Далее, задавая нульарные

операции ноль и единица, а также условие поглощения, получим ограниченную дистрибутивную решетку (полукольцо) $Z = \langle L, \otimes, \oplus, 0, 1 \rangle$, не замкнутую относительно объединения [13], где $\langle L, \otimes, 1 \rangle$ – моноид, а $\langle L, \oplus, 0 \rangle$ – коммутативный моноид. Полученное полукольцо Z имеет следующие свойства:

$$\begin{aligned} a) \sum(\{x\}) &= x; & б) \sum(0) &= 0; \\ в) \sum(L) &= 1; & г) \sum\left(\bigcup_{i \in I} L_i\right) &= \sum\left(\sum_{i \in I} L_i\right). \end{aligned}$$

Исходя из идемпотентности аддитивного оператора \oplus относительно L и свойств полукольца Z , можно задать на L отношение порядка \prec_Z , такое что $\forall x, y, z \in L \ x \prec_Z y \leftrightarrow x \oplus z = y$. Отношение \prec_Z является отношением частичного порядка на L , позволяющим сравнивать различные элементы множества–носителя, при этом $x \prec_Z y$ означает, что значение y – более предпочтительно, чем значение x .

Предложенная модель полукольца и отношение частичного порядка могут служить каркасом модели правдоподобия. Выбирая соответствующее исходное множество–носитель L , определяя на нем аддитивный \oplus и мультипликативный \otimes операторы, а также операции взятия точной нижней грани *inf* и верхней грани *sup* на Z , может быть построена модель правдоподобия ℓ , которая может выражать степень правдоподобия как меры принадлежности элемента к множеству–носителю.

Таким образом, можно использовать оценку относительного правдоподобия на шкале $[0, 1]$, и вместо оценки вероятности событий оценивать их как более возможные, менее возможные либо одинаково возможные на основе числового значения (степени) их правдоподобия. Это позволит в рамках единой структуры комбинировать оценки вероятности некоторых событий, полученные на основе статистических наблюдений, с оценками возможности других событий, получаемыми от экспертов, а также учитывать неполноту и неточность наблюдения событий, представленных посредством нечетких (*fuzzy*) или приближенных (*rough*) множеств.

Правдоподобные древовидные сети событий

Построим сетевой формализм представления знаний в модели событий E , основанный на совместном отображении множества индуцированных иерархий в древовидную структуру событий.

Рассмотрим направленный связный ациклический мультиграф $g = \langle v, e \rangle$, где v – множество вершин, e – множество дуг. Непустое множество вершин мультиграфа v разобьем на три непересекающихся множества: множество концевых узлов (листьев) $r \subset v$, множество корней, содержащих вершины наивысшего уровня $u \subset v$, и множество узлов b , не являющихся корнями или листьями, причем $g = u \cup b \cup r$, $u \cap b = u \cap r = b \cap r = \emptyset$. Непустое множество дуг e разобьем на подмножества $e = e_{\prec_{vi}} \cup \dots \cup e_{\prec_{vn}}$, каждое из которых отображает определенное отношение v_i , заданное на v .

Введем мультиграф g в модель событий E .

Можно использовать модель правдоподобия ℓ для того, чтобы пометить дуги мультиграфа коэффициентами правдоподобия, принадлежащими множеству–носителю L . Наличие перехода (дуги $e_{\prec_{vi}} \in e$) между двумя узлами отражает наличие некоторого отношения v_i между событиями, представленными узлами. Оценки правдоподобия $\lambda_i \in L$, сопоставленные дугам на основании модели ℓ , выражают степень наличия отношения v_i между двумя узлами, соединенными данной дугой.

В качестве модели ℓ можно использовать:

- детерминированный аппарат (D), позволяющий пометить дуги булевыми оценками $L_D = \{0, 1\}$, отображающими наличие (1) или отсутствие (0) соответствующего отношения;
- аппарат теории вероятности (P), с помощью которого оценивают вероятность перехода от узла к узлу, $L_P = [0, 1]$;
- аппарат теории нечетких множеств (F), с помощью которого оценивают возможность перехода от узла к узлу, $L_F = [0, 1]$;

Варианты реализации модели правдоподобия ℓ^* на основе полукольца Z

Модель правдоподобия, ℓ	L	\otimes	\oplus	0	1
Детерминированная, D	$\{0,1\}$	\wedge	\vee	0	1
Вероятностная, P	$[0,1]$	\cdot	$1 - \prod_{i=1}^k (1 - p_i)$	0	1
Нечеткая, F	$[0,1]$	$\min_{i=1}^k (\mu_i)$	$\max_{i=1}^k (\mu_i)$	0	1
Приближенная, R	$[0,1] \times [0,1]$	$(\prod_{i=1}^k \underline{d}_i, \prod_{i=1}^k \bar{d}_i)$	$(\bigcup_{i=1}^k \underline{d}_i, \bigcup_{i=1}^k \bar{d}_i)$	$\langle 0,0 \rangle$	$\langle U,U \rangle$
Временная, T	$[0, \infty[$	$+$	$\min_{i=1}^k (t_i)$	0	∞
Вероятностно-временная, PT	$[0,1] \times [0, \infty[$	$(\prod_{i=1}^k p_i, \sum_{i=1}^k t_i)$	$(1 - \prod_{i=1}^k (1 - p_i), \min_{i=1}^k (t_i))$	$(0,0)$	$(1, \infty)$
Нечетко-временная, FT	$[0,1] \times [0, \infty[$	$(\min_{i=1}^k (\mu_i), \sum_{i=1}^k t_i)$	$(\max_{i=1}^k (\mu_i), \min_{i=1}^k (t_i))$	$(0,0)$	$(1, \infty)$
Приближенно-временная, RT	$[0,1] \times [0,1] \times [0, \infty[$	$((\prod_{i=1}^k \underline{d}_i, \prod_{i=1}^k \bar{d}_i), \sum_{i=1}^k t_i)$	$((\bigcup_{i=1}^k \underline{d}_i, \bigcup_{i=1}^k \bar{d}_i), \min_{i=1}^k (t_i))$	$(\langle 0,0 \rangle, 0)$	$(\langle U,U \rangle, \infty)$

• аппарат теории приближенных множеств (R), с помощью которого оценивают степень возможности и необходимости перехода от узла к узлу, $L_R = [0,1] \times [0,1]$;

• аппарат временной теории (T), с помощью которого оценивают ожидаемое время перехода от узла к узлу, $L_T = [0, \infty)$.

Аддитивный оператор \oplus модели правдоподобия ℓ позволяет оценивать λ при наличии множества переходов из некоторого (одного) узла, мультипликативный оператор \otimes – для транзитивных замыканий переходов. На основе простых моделей (D, T, P, R, F) могут быть построены сложные композиционные модели, например (PT, FT, FR, FRT).

Композиционной моделью правдоподобия ℓ^* назовем модель, построенную из моделей ℓ_i и ℓ_j так, что полукольцо композиционной модели Z^* является декартовым произведением полуколец исходных моделей, $Z^* = Z_i \times Z_j$.

В таблице приведены варианты построения некоторых моделей правдоподобия. Композиционные модели построены на основе простых моделей, их полукольца – это результаты декартовых произведений исходных полуколец.

Сложной моделью правдоподобия μ назовем совместно используемое множество $\{\ell_i\}_{i=1}^n$ простых и композиционных моделей правдоподобия.

Правдоподобной древовидной сетью событий (ПДСС) в модели E на основе потока со-

бытий $S = [\psi_1, \dots, \psi_n]$, такого что $\psi_i \in E.s$, назовем структуру $G = \langle g, \varphi, \gamma, \{\prec_i, \phi_i\}_{i=1}^k, \tau, \delta, \mu \rangle$, где g – ациклический связный мультиграф, $\varphi: r \rightarrow S$ – отображение конечного узла r в некоторое событие из потока S , $\tau: r \rightarrow T$ – отображение конечного узла r на множество значений времени $E.s.I_4$, $\delta: r \rightarrow X$ – отображение конечного узла r на множество пространственных локаций $E.s.I_3$, $\gamma: v \rightarrow 2^{E.s.A}$ – отображение узла v на множество атрибутов $E.s.A$, $\{\prec_i\}_{i=1}^k$ – множество отношений частичного порядка \prec_i на множестве узлов v , каждый из которых индуцирован отношением U_i и представлен подмножеством узлов $e_{\prec_i v} \in e$, μ – сложная модель правдоподобия, $\phi_i: e_j \xrightarrow{\lambda_j} \ell$ – отображение меток каждой из дуг $e_j \in e_{\prec_i v}$ на оценки правдоподобия λ_j модели $\ell \in \mu$.

Корневые узлы $h \in u$ ПДСС G определяют множество последовательностей (потоков), состоящих из всех событий в конечных узлах $r \in r$, упорядоченных по $\{\prec_i\}$. Каждый конечный узел $r \in r$ соответствует определенным атрибутам события γ , временной локации τ и пространственной локации δ . Неконцевые узлы представляют собой значимые потоки событий, представленных конечными узлами $r \in r$. Каждый узел ДСС соответствует последовательности событий, представленной h , а потомки

каждого узла представляют собой некоторую цепочку родительской последовательности.

ПДСС можно использовать для формализации частично упорядоченных множеств событий, происходящих одновременно и совместно. В этом случае концевые узлы представляют собой элементарные (наблюдаемые) события, а неконцевые узлы соответствуют сложным агрегатным событиям, представляющим собой последовательности элементарных событий. Более того, неконцевые узлы содержат ограничения на своих потомков, включая временные, пространственные и иные отношения $v_i \in \mathcal{V}$ и порядок их появления.

Существенной особенностью представленной формализации ПДСС служит возможность расширения множества представимых отношений между событиями любыми новыми отношениями v_k с добавлением соответствующего подмножества дуг e_k и реализацией соответствующего отношения порядка \prec_k .

Построенная авторами композиционная иерархия I_2 позволяет рассматривать ПДСС как составную структуру, включающую в качестве элементов иные древовидные структуры. При наличии нескольких потоков событий в модели E и множества различных отношений между ними образуется сложная композиционная структура.

Композиционной правдоподобной древовидной структурой событий в модели E с множеством потоков событий $\{S_j\}_{j=1}^n$, $S_j = [\psi_1^j, \dots, \psi_m^j]$, таких что $\psi_i^j \in E.s$, будем называть структуру вида $G^e = G_1 \oplus \dots \oplus G_n$, представляющую собой лес поли-мульти-деревьев.

На основе предложенной формализации ПДСС возможно: классифицировать каждое событие ψ^S из E , т.е. определить его класс $c \in Class$ согласно заданному порядку \prec_1 ; установить порядок \prec_T и состав \prec_2 событий некоторой последовательности событий, происходящей при развитии ПРХ; установить последовательность и параметры событий, определяю-

щие их принадлежность определенному пути, ведущему к некоторой ячейке d ; определить соответствие наблюдаемой последовательности событий некоторому возможному пути ρ ; определить достижимость одного узла ПДСС из другого узла ПДСС (наличие определенного конечного пути ρ); определить совместимость различных узлов ПДСС; выполнить вывод от концевых узлов ПДСС к корневым и наоборот.

Выводом на ПДСС G^e является некоторый концевой узел $r \in r$, такой что путь $\rho(h, r)$ к нему от исходного узла h удовлетворяет установленному порядку появления событий \prec_T .

Выполнение вывода, как и выполнение других операций, требует локализации различных фрагментов ПДСС по определенному критерию, например, выделение среза всех узлов, соответствующих заданному временному промежутку; выявление всех абстрактных узлов относительно некоторого конкретного узла; выделение всех узлов, удовлетворяющих заданным ограничениям и т.д.

Таким образом, ПДСС как формальная система предоставляет достаточно мощный инструментарий, реализующий операции над деревьями, их фрагментами и композициями. Для оценки временных отношений v_4 между событиями могут быть использованы нечеткие (FT) и приближенные (RT) временные теории, для чего модель правдоподобия μ расширяется FT - и RT -композициями.

Фрагмент нечетко-временной FT -ПДСС представлен на рис. 2. Можно заметить, например, что агрегатное событие ψ_{111} является последовательностью из события ψ_{1111} и возможно (с нечеткой оценкой 0,8) следующего за ним с интервалом от одной до пяти минут события ψ_{1112} . Также, если ψ_{111} является составляющей абстрактного события ψ_{11} , то, возможно, (с оценкой 0,5) в течение интервала от двух до шести минут должно произойти событие ψ_{112} .

Предложенную формализацию ПДСС можно рассматривать как абстракцию известной модели сети доверия (*Belief Network*) [14]. Так,

в случае использования нечетких оценок доверия имеется аналогия F -ПДСС с нечеткими байесовскими сетями, в случае вероятностных оценок – аналогия P -ПДСС с вероятностными байесовскими сетями [15].

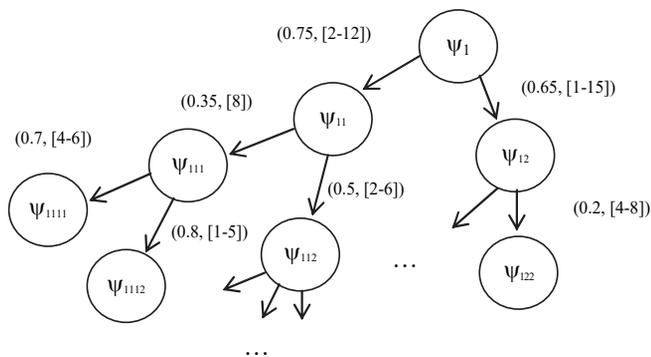


Рис. 2

Важной особенностью ПДСС есть то, что сложность вывода на них линейно зависит по времени от размера имеющейся ПДСС [16].

Многоуровневые правдоподобные древовидные сети событий

Определенная авторами сигнатура $E.s$ позволяет формально отобразить отношения между объектами, в частности таксономическую и композиционную иерархии, временную шкалу и пр. Однако сигнатура модели E может быть дополнена и другими отношениями между объектами и классами, например каузальными [17].

Множество таких отношений (назовем их *наложенными* на модель E) между объектами не может быть представлено формально в самой модели E , поскольку они выражены не как связь между объектами, а как изменение указанной связи. Соответственно, в ассоциированной с моделью событий E ПДСС наложенные отношения должны представляться не дугами между вершинами ПДСС, а воздействием на изменение оценок правдоподобия λ , присвоенных таким дугам. Поскольку формализация ПДСС таких возможностей не предоставляет, расширим ее соответствующим образом.

Правдоподобной древовидной многоуровневой сетью событий (ПДМСС) будем называть структуру $\tilde{G}^e = \left\langle \{G_1^e, \dots, G_j^e, \dots, G_m^e\}_{j=1}^m, \mu^e, \varepsilon \right\rangle$, где G_j^e – ПДСС j -го уровня, $j = 1 \dots m$, μ^e – общая

модель (метамодель) правдоподобия, ε – множество дуг, соединяющих узлы и вершины i -го и j -го уровней ПДМСС, $\varepsilon = \cup_{i=1}^m \cup_{j=1}^m e_{ij}$, $\varphi_{ij} : e_{ij} \xrightarrow{\lambda_{ij}} \ell$ – отображение, помечающее каждую дугу из $e_{ij} \in \varepsilon$ определенной оценкой правдоподобия λ_{ij} в некоторой модели $\ell \in \mu^e$. Структура \tilde{G}^e представляет собой гиперлес поли-мультидеревьев.

ПДМСС \tilde{G}^e включает в себя множество ПДСС $\{G_1^e, \dots, G_j^e, \dots, G_m^e\}$, формирующих уровни сети $j = 1, \dots, m$, наложенные друг на друга так, что узлы и дуги ПДСС нижнего уровня зависят от оценок правдоподобия, связанных с узлами верхнего уровня. При числе уровней m ПДМСС называется *правдоподобной древовидной m -уровневой сетью событий* и обозначается G^{em} .

Фрагмент трехуровневой ПДМСС, образованной на множестве ПДСС $\{G_X, G_Y, G_Z\}$ представлен на рис. 3. Сплошными стрелками изображены дуги e , соответствующие отношениям, заданным на множестве вершин каждой из ПДСС.

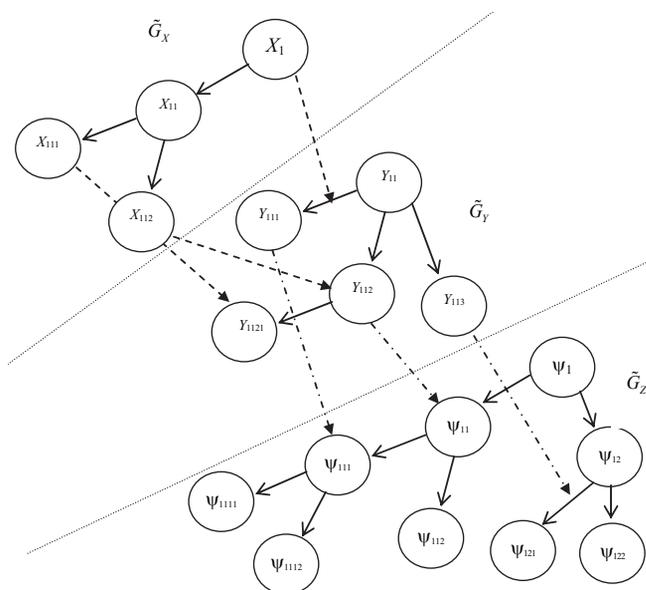


Рис. 3

Пунктирными – изображены дуги e_{XY} , соответствующие отношениям, заданным между вершинами ПДСС G_X и множеством вершин и дуг ПДСС G_Y , в то время как штрихпунктирными

стрелками изображены дуги e_{YZ} , заданные между вершинами ПДСС G_Y и множеством вершин и дуг ПДСС G_Z . Каждая из дуг $e_{ij} \in \varepsilon$ может иметь связанную оценку правдоподобия λ_{ij} .

С помощью одного уровня ПДМСС (например, G_Z) может быть задано множество переходов, другой уровень (G_Y) может содержать причинно-следственные (каузальные) связи переходов, а третий слой (G_X) может содержать событийную модель. Такой подход удобен при необходимости представлять изменения оценок правдоподобия переходов между событиями от внешних по отношению к событийной модели факторов, например, от внешней среды (погодные условия и др.) либо от управляющих воздействий со стороны ЛПР.

Представленная формализация ПДМСС может быть сопоставлена с метасетью Байеса [11], и на нее могут быть обобщены соответствующие методы вывода.

ПДМСС – сложная структура, позволяющая организовать частично упорядоченные совокупности совместно происходящих событий, наблюдаемые множеством независимых источников, в потоки событий различного уровня абстракции, что дает возможность на основе ПДМСС представлять и обрабатывать неполную и неточную исходную информацию о динамике ПРХ в рамках ТС.

Результаты эксперимента

Предложенная модель ПРХ, основанная на формализме правдоподобной древовидной сети событий, была реализована в веб-ориентированной СППР, разработанной посредством языка программирования *Python*, фреймворка *Django*, его расширения *GeoDjango*, библиотеки *OpenLayer* и системы управления базами данных *PostgreSQL*.

СППР позволяет в реальном времени оценивать степень опасности, угрозы и риска для определенного набора ценных объектов в условиях ЧСПХ.

На рис. 4 представлена карта Цюрупинского лесничества (Херсонская область, Украина),

созданная на основе предложенной пространственной модели с наложенной сеткой с переменным размером ячеек.

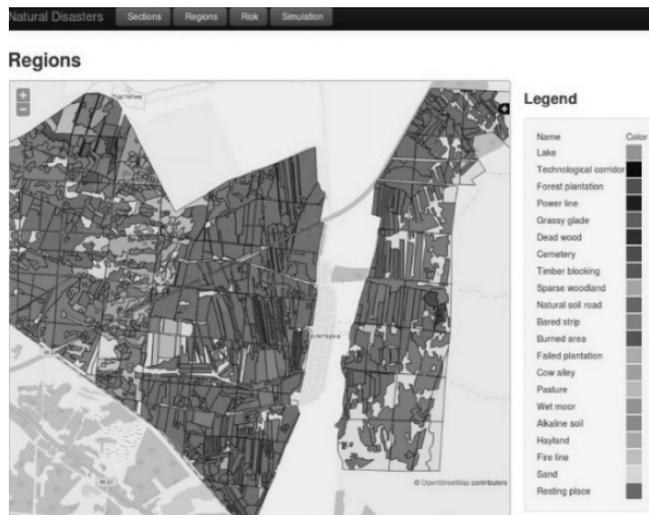


Рис. 4

Для проверки эффективности использования предложенной событийно-сетевой модели при принятии решений был проведен эксперимент на основе статистической информации, описывающей серию крупномасштабных пожаров в Цюрупинском и Голопристанском лесничествах Херсонской области (Украина) 20–31 июля 2007 г.

С использованием предложенной правдоподобной сетевой модели была воспроизведена динамика пожара и оценено общее время, необходимое для принятия решений, а также общие убытки в результате пожара (рис. 5).



Рис. 5

Путем варьирования количества источников возгорания от одного до восьми было проанализировано влияние этого параметра на быстродействие системы.

Результаты эксперимента (рис. 6) позволяют сделать следующие выводы. Практическое использование модели правдоподобной древовидной сети событий дает возможность адекватного представления динамики ПРХ. Использование предложенной модели для представления динамики ПРХ позволяет ускорить процесс принятия решений почти на 60 процентов. Полученное ускорение процесса принятия решений приводит к уменьшению общих убытков на 35 процентов. Общий вид кривых быстродействия (см. рис. 6) показывает, что зависимость времени принятия решений от количества источников возгорания – практически линейная.

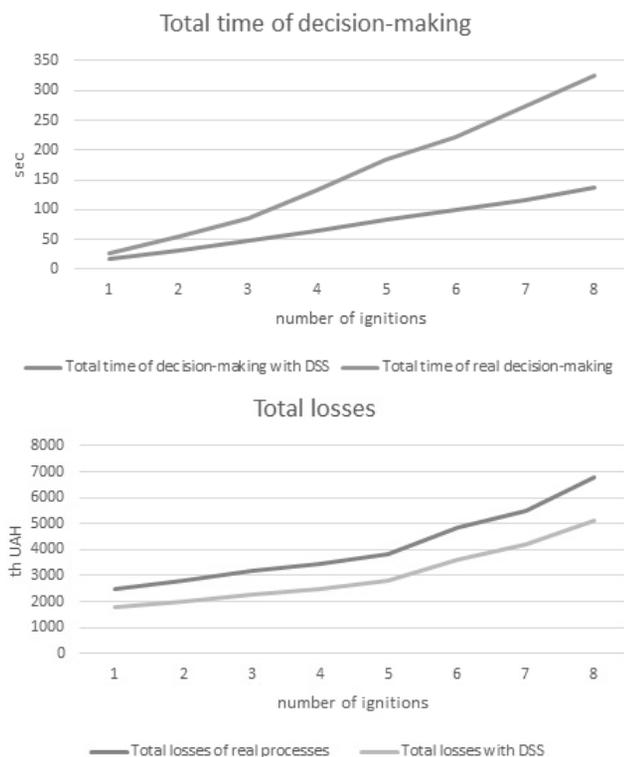


Рис. 6

Заключение. В результате исследований построена формальная правдоподобная модель динамики ПРХ в ГЭТС, основанная на дискретизации пространства посредством сетки из равно- великих ячеек. Формальная правдоподобная модель динамики ПРХ представляет собой древо-

видную ситуационно-событийную сеть, в основу которой положена последовательность перехода ячеек ТС из состояния в состояние при развитии ПРХ и позволяющей оценить правдоподобность перехода ячейки в новое состояние, а также интервал времени, на котором предполагается такой переход. Модель реализует явную привязку событий к моментам времени и точкам пространства ТС.

Предложенный формализм ПДСС допускает описание событий, характеризуемых неполными и недостоверными наблюдаемыми параметрами, в виде оценки правдоподобности перехода ячейки из одного класса состояний в другой. В рамках одной структуры могут быть совмещены различные оценки правдоподобия – нечеткие, вероятностные или приближенные. Формализация значений параметров и привязка их к моментам времени и точкам геолокации обеспечивают адекватное отображение динамики знаний о событиях и их параметрах.

Предложенная модель может быть использована в СППР реального времени по противодействию ЧСПХ, основанных на геоинформационных системах, что позволит увеличить степень эффективности принимаемых решений при ликвидации ЧСПХ с учетом их информационно-аналитической поддержки.

1. Miller C., Ager A. A review of recent advances in risk analysis for wildfire management // *Int. J. of Wildland Fire.* – 2013. – 22, N 1. – P. 1–14.
2. Loboda T., Kriszar I. Assessing the risk of ignition in the Russian Far East within a modeling framework of fire threat // *Ecological Applications.* – 2007. – 17, N 3. – P. 791–805.
3. Review of literature on decision support systems for natural hazard risk reduction: current status and future directions / J.P. Newman H. Maier, G. Riddell et al. // *Environmental modeling & software.* – 2017. – 96. – P. 378–409.
4. Van Western C.J., Greiving S. Multi-hazard risk assessment and decision making // *Environmental hazards. Methodologies for risk assessment and management.* – IWA Publishing, 2017. – P. 31–94.
5. A real-time assessment tool supporting wildland fire decision making / D.E. Calkin, M.P. Thompson, M.A. Finney et al. // *J. For.* – 2011. – N 109. – P. 274–280.
6. Finney M. Modeling the spread and behaviour of prescribed natural fires / *Proc. of the 12th Conf. on Fire*

- and Forest Meteorology. – Society of American Foresters. – 1993. – P. 138–143.
7. *Finney M.* The challenge of quantitative risk analysis for wildland fire // *Forest Ecology and Management*. – 2005. – **211**. – P. 97–108.
 8. *Lacasse S., Eidsvig U., Nadim F.* Event tree analysis of Aknes rock slide hazard // *Proc. of 4th Canadian Conf. on Geohazards, Quebec, Canada*. – 2008. – P. 551–557.
 9. *Peila D., Guardini C.* Use of the event tree to assess the risk reduction obtained from rockfall protection devices // *Natural Hazards Earth System Sciences*. – 2008. – N 8. – P. 1441–1450.
 10. *Pawlak Z.* Rough Sets // *Int. J. of Comp. and Inf. Sciences*. – 1982. – **11**, N 5. – P. 341–356.
 11. *Sherstjuk V., Zharikova M.* Approximate model of spatially distributed Markov process for GIS-based decision support system // *Proc. of IEEE 12th Int. Sc. and Tech. Conf. on Comp. Sciences and Inf. Technologies (CSIT), Lviv, Ukraine*. – 2017. – P. 300–304.
 12. *Martin F.J.* Case-Based Sequence Analysis in Dynamic, Imprecise, and Adversarial Domains: tesi doctoral. – Barcelona: Univ. Politecnica De Catalunya, 2004. – 285 p.
 13. *Bistarelli S., Montanari U., Rossi F.* Semiring-Based Constraint Satisfaction and Optimization // *J. of the ACM*. – 1997. – **44**, N 2. – P. 201–236.
 14. *Pearl J.* Fusion, propagation and structuring in belief networks // *Artificial Intelligence*. – 1986. – **29**, N 3. – P. 241–288.
 15. *Darwiche A.* Modeling and Reasoning with Bayesian Networks. – Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2009. – 526 p.
 16. *Kocka T., Zhang N.* Effective Dimensions of Partially Observed Polytrees // *Proc. of The European Conf. on Symbolic and Quantitative Approaches to Reasoning with Uncertainty*, 2003. – P. 311–322.
 17. *Pearl J.* Causality: Models, Reasoning, and Inference. – MA.: Cambridge University Press, 2009. – 464 p.
 18. *Терзьян В.Я., Витько А.В.* Вероятностные метасети для решения задач интеллектуального анализа данных // *Искусственный интеллект*. – 2002. – № 3. – С. 188–197.

Поступила 14.11.2017

E-mail: rector@kntu.net.ua, marina.jarikova@gmail.com,

vgsherstyuk@gmail.com

© Ю.Н. Бардачев, М.В. Жарикова, В.Г. Шерстюк, 2017

UDK 574:004.2

Yurij Bardachov¹, Maryna Zharikova², Volodymyr Sherstjuk³

¹ Doctor of Technical Sciences, Professor, the Department of High Mathematics and Mathematical Modeling of Kherson National Technical University, Beryslavske highway, 24, Kherson, 73008, Ukraine, rector@kntu.net.ua

² PhD in Techn. Sciences, Associate Professor, the Department of Information Technologies of Kherson National Technical University, Beryslavske highway, 24, Kherson, 73008, Ukraine, marina.jarikova@gmail.com

³ Doctor of Technical Sciences, Professor, the Department of Information Technologies of Kherson National Technical University, Beryslavske highway, Kherson, 73008, Ukraine, vgsherstyuk@gmail.com

Event-Network Model of Destructive Processes for the Real-Time Risk-Oriented DSS

Keywords: geocotechnosystems, destructive process, natural emergency, decision support system.

Introduction. Giving the fact that the natural emergency is a result of simultaneous influence of epy considerable number of factors, and the evolving processes are non-linear and transient, making decisions a difficult task in the natural emergency conditions. Uncertainty, incompleteness and inconsistency of the input information, territorial distribution of the events, as well as time shortage and high responsibility embarrass decision making, which stimulate the developing of the decision making systems for natural emergency counteracting. Using the traditional approaches to developing the models of destructive processes doesn't provide the required system performance, which stipulates the topicality of the further search of non-conventional models and methods of decision making for natural emergency counteracting.

Purpose. The purpose of the work is the development of formal plausible model of destructive process propagation, suitable for the tasks solution of the natural emergency counteracting in the real time decision making systems.

Method. The authors used the event-based approach for the developing the plausible model of the destructive process. The methods of fuzzy, probabilistic and rough sets were used to assess the likelihood of cell transitions between states.

Results. The formal plausible model of the destructive process in geocotechnosystems is described, having the form of territorial system, which is discretized using the grid of equal cells. The model of destructive process is represented as the formalism of plausible tree network of the events modeling the transitions of cells from one state to another and allowing to assess the likelihood of such transition and the time during which such transition is anticipated. The proposed formalism allows combining the different likelihood assessments, such as fuzzy, probabilistic and rough, in the frame of one structure.

Conclusion. The proposed model can be used in decision support systems for the natural emergencies counteracting, which are based on geoinformation technologies. Using the proposed model allows increasing the efficiency of decision making in the natural emergency conditions by means of informational support.