

УДК 504.064.2

DOI: 10.17277/voprosy.2015.01.pp.010-025

### **БИОНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОРГАНИЗАЦИИ СЕТИ МОНИТОРИНГА ТЕХНОГЕННЫХ ОПАСНОСТЕЙ В ПРИРОДО-ПРОМЫШЛЕННЫХ МАКРОСИСТЕМАХ**

**Н. С. Попов, В. А. Лузгачев, О. В. Пещерова, А. А. Чуксин**

*ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет»; ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный университет им. Г. Р. Державина», г. Тамбов*

*Рецензент д-р. техн. наук, профессор М. А. Промтов*

**Ключевые слова и фразы:** бионическая модель; защита от астероидно-кометных тел; интеллектуальная сеть; мониторинг; природо-промышленные макросистемы; распределение Коши; техногенная опасность; триада «насекомое – сеть – паук».

**Аннотация:** Предложена новая бионическая модель мониторинга техногенных опасностей, в основу которой положен механизм защиты жизненного пространства паука от внешних воздействий. Методика ее построения базируется на последовательном отображении фактов реального мира в гомоморфную и изоморфную формы. Изучена роль распределения Коши в механизме работы биосистемы как источника неопределенностей. Формализованы: «задача паука», «принципы паука», свойства ловчей сети, имеющие решающее значение при построении систем мониторинга нового поколения. Рассмотрен концептуальный пример использования бионической модели в системе защиты Земли от астероидно-кометных тел.

*В науке мы можем знать только  
как произошло что-нибудь,  
а не почему и для чего.*

*И. В. Гёте*

Приблизительно с середины прошлого века научно-технический прогресс в передовых странах мира сопровождается небывалым ростом техногенных систем – укрупнением территориально-производственных ком-

---

Попов Николай Сергеевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Природопользование и защита окружающей среды», e-mail: esco@nnn.tstu.ru; Лузгачев Валерий Алексеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Природопользование и защита окружающей среды»; Пещерова Ольга Викторовна – аспирант кафедры «Природопользование и защита окружающей среды», ТамбГТУ, г. Тамбов; Чуксин Антон Андреевич – студент медицинского института, ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный университет им. Г. Р. Державина», г. Тамбов.

плексов, увеличением размеров транспортных артерий (вплоть до межконтинентальных), накоплением и распределением высокопотенциальных энергий, использованием сложнейших автоматизированных систем управления материально-энергетическими потоками, в том числе и дистанционных.

На фоне расширения «поля контактов» промышленных систем с экологическими возникли опасности и угрозы глобального уровня, вследствие чего любая экосистема, как и любая точка ее жизненного пространства оказываются уязвимыми в случае возникновения промышленных аварий и катастроф. Потенциальными источниками глобальных техногенных опасностей в наше время стали нефте- и газодобывающие комплексы, магистральные продуктопроводы, аэропорты и космодромы, порты и судовой верфи, терминалы и мегаполисы, энергетические и транспортные системы.

Только в начале нынешнего столетия в разных странах мира произошли тяжелейшие техногенные катастрофы: на Саяно-Шушенской ГЭС и шахте «Ульяновская» (Россия), АЭС «Фукусима-1» (Япония), химическом комбинате AZF в Тулузе (Франция), нефтяной платформе британской компании BP Deepwater Horizon в Мексиканском заливе (США) и другие. В каждой из них имели место и несовершенство существующих систем аварийного предупреждения и защиты, и «человеческий фактор».

На данном этапе развития мировой энергетики активно ведутся работы по добыче нефти и газа на шельфах морей Северного Ледовитого океана, что требует сверхнадежной техники, эффективных систем раннего оповещения, высочайшей производственной культуры и осторожности из-за особой чувствительности морских экосистем к промышленным загрязнениям. В этой связи актуально предупреждение академика В. И. Вернадского: «Человек должен теперь принимать все большие и большие меры к тому, чтобы сохранить для будущих поколений никому не принадлежащие морские богатства» [1].

Человечество реально стало «мощной геологической силой», преобразующей биосферу в ее качественно новое состояние – ноосферу, в которой все основные процессы жизнеобеспечения должны определяться Разумом. Необходимость защиты ноосферы прежде всего от результатов деятельности самих людей определяет актуальность, срочность и важность объединения различных знаний в рамках теории безопасности и по своей значимости выводит ее в разряд востребованных системных наук [2].

В XXI веке назрела потребность в расширении проблемы безопасности до глобального ноосферного уровня [3]. Деятельность ООН и ее структур в этом направлении изменила масштабы мониторинга окружающей природной среды и оценки ее состояния, дав возможность отслеживать не только произошедшие изменения, но и предупреждать их последствия [4]. Особенно важен вклад ученых в разработку научных основ обнаружения и диагностики неисправностей на потенциально опасных производственных объектах [5, 6].

Тем не менее, эффективность систем раннего обнаружения и диагностики техногенных опасностей в природо-промышленных макросистемах (ППМ) [7] еще далека от совершенства, о чем свидетельствует и приведенный выше перечень катастроф. Необходимы новые научные идеи

и подходы, осмысление недостатков организации во взаимодействии человека с распределенными производственными комплексами в условиях особой требовательности к защите его здоровья и окружающей среды от антропогенных, техногенных и природных воздействий.

Нужны системы мониторинга техногенных опасностей нового поколения, основанные не только на опыте защиты ППМ от негативных воздействий, но и на изучении принципов работы аналогичных по смыслу механизмов защиты популяций в живой природе, сформировавшихся в процессе длительной эволюции биологических систем. Такое направление исследований должно быть связано с бионикой [8]. Бионические модели, подобные нейронным сетям, генетическим алгоритмам, когнитивным механизмам, методу «проб и ошибок» и другим, эффективно используются в инженерии [9].

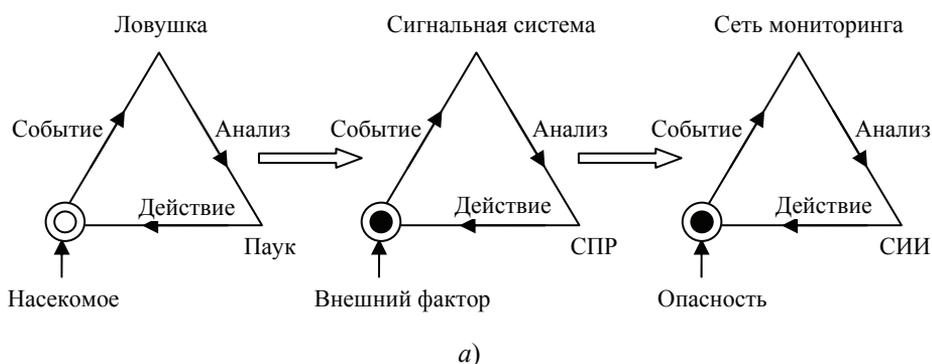
Целями данной работы являются обоснование и обсуждение перспектив использования бионической модели мониторинга техногенных опасностей в ППМ, основанной на способностях ловли насекомых пауком.

Выбор такой биосистемы не случаен. Пауки появились предположительно в Палеозойскую эру в Каменноугольный период примерно 2–2,5 млрд лет назад. Они относятся к группе беспозвоночных живых существ, типу членистоногих. Выживание пауков напрямую связано с их умением ловить насекомых для питания, используя для этого собственный уникальный инструмент – нить, с помощью которой они строят ловчие сети разных конструкций, а также используют ее для фиксации жертв и, в случае необходимости, для бегства от хищников. Сеть, по сути, – продолжение самого паука.

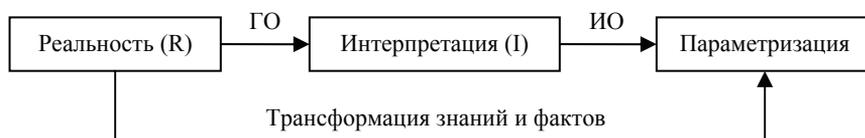
За время эволюции пауки освоились на всех континентах и адаптировались к сложным метеоусловиям. Их встречают повсюду – от заброшенных шахт до вершин Эвереста. Издавна деятельность пауков становилась объектом пристального внимания ученых.

Насекомое, попавшее в ловушку, вызывает в ней реальные изменения (колебание нитей, разрывы и слипания) и может рассматриваться не только с традиционной позиции жертвы паука, но и как внешняя опасность для его жизненного пространства, определенного контуром паутины. Ловчая сеть в таком случае служит для информирования паука о возникшей опасности, а сам паук, являясь весьма разумным существом, способен адекватно на нее реагировать, например, парализовать насекомое, запеленать и перенести его в другое место, высвободить из паутины и т.д.

Итак, объектом настоящего исследования является триада: «насекомое – ловушка – паук», как фрагмент картины реального мира. Заменяя биологические понятия триады на абстрактные и систематизируя отношения между ними, получаем ее гомоморфное отображение (**ГО**) в виде концептуальной схемы «внешний фактор – сигнальная система – система принятия решений». В дальнейшем, формализуя данную схему с кибернетических позиций, можно получить изоморфное (тождественное) отображение (**ИО**) оригинала в виде бионической модели «опасность – сеть мониторинга – система искусственного интеллекта». Такая последовательность действий показана на рис. 1, а, а трансформация знаний и фактов о реальном мире в математическую форму представлена на рис. 1, б.



a)



b)

**Рис. 1. Структурно-функциональное соответствие оригинала R его модели M:**

a – последовательность действий; б – схема трансформации знаний и фактов;

⊙ – жизненное пространство паука; ● – пространство жизнеспособности ППМ;

СПР – система принятия решений; СИИ – система искусственного интеллекта

Смысл ГО заключается в свертке всей доступной информации об исследуемых элементах, явлениях и процессах биосистемы в более компактную и более емкую удобообозримую и удобообрабатываемую форму [10].

Рассмотрим физическую модель реального мира, предполагая, что паук является представителем рода аранеоморфных пауков, семейства кругопрядов (*Araneidae*), а его ловчая сеть имеет колесовидную форму. Пусть воздушный поток с насекомыми движется в направлении жизненного пространства паука  $L_S$  (рис. 2). Скорость движения воздушного потока обозначим вектором  $\underline{V}_\Pi$ , а индивидуальную скорость полета  $i$ -го насекомого – вектором  $\underline{V}_i$ , полагая, что она меняется случайным образом по многим необъяснимым причинам. Тогда полная скорость полета  $i$ -го насекомого равна  $\underline{v}_i = \underline{V}_\Pi \pm \underline{V}_i$ , из чего следует, что траектории движения насекомых являются случайными функциями времени.

Хитроумное устройство паутины таково, что для одних насекомых, способных различать особые «инфракрасные нити», ловушка становится притягательным цветком, на который они стремятся попасть. У других – наоборот, срабатывают сенсорные механизмы на внезапно возникшее препятствие, и насекомое вынужденно меняет траекторию полета. Часть насекомых попадает в сеть и при резких порывах ветра. Некоторые виды пауков плетут на паутине хорошо заметные крестообразные ленты, отпугивающие крупных насекомых и птиц, способных разрушить сеть.

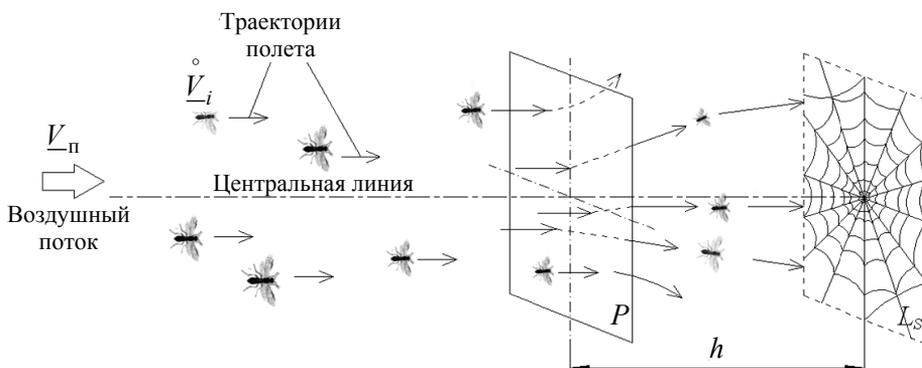


Рис. 2. Модель движения потока насекомых

Учитывая данные факты, обозначим на некотором расстоянии  $h$  от плоскости  $L_S$  плоскость  $P$ , при пересечении которой  $i$ -е насекомое меняет траекторию дальнейшего полета (см. рис. 2). Момент времени пересечения плоскости  $\tau_i$  является случайной величиной из-за стохастического поведения  $\overset{\circ}{V}_i$ , и поэтому возможность одновременного появления двух и более насекомых на плоскости  $P$  следует считать маловероятным событием.

Пусть траектории движений насекомых в потоке воздуха являются стационарными случайными процессами. Тогда, принимая гипотезу эргодичности [11], ансамбль траекторий движения насекомых представим в виде единственной траектории (рис. 3).

Пересекая плоскость  $P$  насекомые могут с равной вероятностью изменять угол поворота траектории  $\theta$  в интервале  $\left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right)$ . В итоге механизм «вторжения» насекомых в жизненное пространство паука  $L_S$  оказывается следующим: на плоскости  $P$  в т.  $O$  в произвольный момент времени  $\tau_i$ ,  $i=1, 2, \dots$ , появляются особи с траекторией полета в случайную точку  $X = x_0 + h \operatorname{tg} \theta$ , принадлежащую распределению Коши в интервале  $(-\infty, +\infty)$ , где  $x_0$  – координата максимума плотности вероятности равномерного моде и медиане.

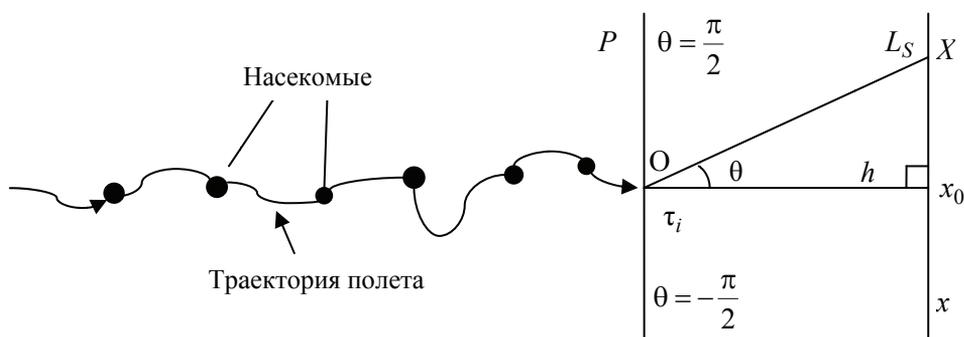


Рис. 3. Механизм «вторжения» насекомых в жизненное пространство паука  $L_S$

Одномерная функция плотности вероятности Коши имеет вид [12]

$$f(x; x_0, h) = \frac{1}{\pi} \frac{h}{h^2 + (x - x_0)^2}. \quad (1)$$

Данное распределение обладает рядом необычных свойств: математическое ожидание не существует, дисперсия бесконечна, для (1) характерны «тяжелые», медленно спадающие хвосты при  $x \rightarrow \pm\infty$ .

Заметим, что (1) не учитывает изменчивость размеров особей в воздушном потоке, тогда как в действительности они могут значительно меняться (в диапазоне от 0,2 до 20 мм и более [13]). С учетом данного факта реальное распределение насекомых, попавших в  $L_S$ , представляет композицию двух случайных величин – координат особей, попавших в  $L_S$  и их размеров.

В качестве функции плотности вероятности размеров насекомых могут быть использованы: функция равномерной плотности вероятности, Вейбулла (часто применяемая в теории надежности), Гаусса и ряд других.

Пусть размеры особей описываются центрированной плотностью вероятности Гаусса

$$g(x; \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right), \quad (2)$$

а распределение координат насекомых в  $L_S$  – центрированной плотностью вероятности Коши

$$f(x; h) = \frac{h}{\pi(x^2 + h^2)}. \quad (3)$$

Тогда, композиция функций распределения  $g(x; \sigma) * f(x; h)$  приводит к распределению Фойгта [14]

$$V(x; \sigma, h) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(x; \sigma) f(x - x'; h) dx' = \operatorname{Re}[\omega(z)] / (\sigma\sqrt{2\pi}), \quad (4)$$

где  $\operatorname{Re}[\omega(z)]$  – реальная часть функции Фаддеева, вычисленная для  $z = \frac{x + ih}{\sigma\sqrt{2}}$ ; \* – символ свертки.

Для функции (4) характерно следующее: среднее и дисперсия не определены, максимальное значение при  $x = 0$  равно моде и медиане.

Таким образом, наличие распределения Коши в механизме работы рассматриваемой биосистемы порождает ряд вопросов.

1. Как выбрать наилучшую, в смысле захвата насекомых, пространственную ориентацию паутины в условиях равновероятного направления их «вторжения»?

2. Каким образом достичь компромисса между необходимостью ограничения радиальных размеров сети, по причине конечного биофизического ресурса паука, и затяжными хвостами плотности вероятности (1)?

3. Какие действия могут повлиять на повышение эффективности работы сети, если неизвестны средние за день результаты попадания в нее насекомых?

Ответы на данные вопросы попытаемся отыскать в действиях паука. Для этого рассмотрим подробнее ситуацию с попаданием насекомых в сеть, представляющую собой плоскую спиралевидную конструкцию. Радиальные нити служат для сигнализации о попавших в сеть насекомых, а кольцевые усеяны каплями липкого вещества, вследствие чего насекомое, коснувшееся их, не может выбраться из паутины.

Множество  $D$  всех возможных траекторий полета насекомых в воздушном потоке разобьем на два непересекающихся подмножества:  $D_1$  – траектории, не приводящие к попаданию особей в  $L_S$ ;  $D_2$  – завершающиеся в  $L_S$ . Для траекторий из  $D_2$  введем понятие события  $A$ , состоящего в том, что в случайный момент времени  $\tau$  насекомые оказываются в плоскости  $L_S$  в точке  $L_{S_i}$  с координатами  $(x, y)$ . В течение дня событие  $A$  повторяется многократно, порождая двумерный случайный процесс, компонентами которого являются вектора  $(x, y; x_1, y_1; x_2, y_2; \dots)$ .

Если  $F_1(x, y), F_2(x, y), \dots$  – суть функции распределения компонент процесса  $\{X, Y\}$  и  $\lim_{n \rightarrow \infty} F_n(x, y) = F(x, y)$  в каждой точке непрерывности функции  $F(x, y)$  по  $x$  и  $y$  справа, то процесс  $\{X, Y\}$  сходится по распределению к  $F(x, y)$ . Из этого следует, что множество всех точек  $L_{S_i}(x, y)$ ,  $i = 1, 2, \dots$ , принадлежащих жизненному пространству паука, подчиняется двумерному распределению Коши с функцией плотности вероятности [15]

$$f(x, y; x_0, y_0, h) = \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{h}{\left( (x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + h^2 \right)^{1,5}} \right]. \quad (5)$$

Поскольку часть пространства  $L_S$  покрывает спиралевидную сеть паука  $S$ , то некоторые координаты насекомых, попавших в  $L_S$ , оказываются тождественно равными координатам точек спирали:  $L_{S_i}(x, y) \equiv S_i(x, y)$ ,  $i = 1, 2, \dots$ .

Можно допустить, что паук организует свое жизненное пространство  $L_S$  таким образом, чтобы насекомые оказывались в сети. Для этого он действует рационально, как минимум, в двух ситуациях: при контакте с насекомыми, попавшими в сеть, и при строительстве сети. В первой ситуации его действия являются «тактическими», во второй – «стратегическими». К стратегическим относятся, в частности, выбор места расположения сети, ее структуры, размеров, угла наклона и т.д.

Если множество всех стратегических действий обозначить символом  $U$ , то возможна запись  $S = S(u)$ ,  $u \in U$ . То есть структура сети зависит от выбора стратегий паука. С учетом этого сформулируем следующую задачу.

На множестве  $U$  необходимо найти такую комбинацию действий (стратегию  $\underline{u}^* \in U$ ), использование которой максимизирует вероятность попадания насекомых в сеть:

$$\max_{\underline{u} \in U} P \left( \left| S_{(x_i, y_i)}(\underline{u}) - L_{S_{(x_j, y_j)}} \right| \leq \Delta, \forall i, j = 1, 2, \dots \right), \quad (6)$$

при ограничении на биофизический потенциал паука

$$\Gamma(S(\underline{u})) \leq \Gamma_g \quad (7)$$

и условии

$$S_{(x_i, y_i)}(\underline{u}) \in S(\underline{u}) \subseteq L_S, \quad i = 1, 2, \dots, \quad (8)$$

где  $P$  – символ вероятности;  $S_{(x_i, y_i)}(\underline{u})$  –  $i$ -я точка, попавшая на сетку  $S$ ;  $L_{S_{(x_j, y_j)}}$  –  $j$ -я точка в  $L_S$ ;  $\Delta$  – минимальный линейный размер особей, застревающих в сети;  $\Gamma_g$  – «допустимые» биофизические затраты паука на создание и обслуживание сети;  $\underline{u}$  – вектор.

Выбор критерия оптимизации «задачи паука» в форме (6) объясняется тем, что в условиях неопределенности направлений «вторжения» насекомых в  $L_S$  паук нашел ассиметричный «детерминированный ответ» – в виде сетки с размерами ячеек не меньше  $\Delta$ , равномерно покрывающей  $L_S$ . Величина  $\Delta$ , возможно, определяется пауком исходя из пищевой полезности для него насекомых размера не хуже  $\Delta$ .

Среди многих известных типов структур сети  $S$  паук выбрал алгебраическую спираль Архимеда по двум возможным причинам: из-за удобства ее плетения и ежедневного обновления, а также из-за необходимости создания с ее помощью сеточного покрытия  $L_S$  нужной плотности. А с учетом электростатических свойств паутины эффективность ловли насекомых оказывается еще более высокой, так как сеть становится активной ловушкой уже при приближении к ней насекомого.

Итак, ответ на первый вопрос, поставленный выше, состоит в выборе структуры сети  $S$  инвариантной относительно направлений «вторжения» насекомых в  $L_S$ , что позволяет обеспечить тотальную защиту жизненного пространства паука посредством паутины.

Ответ на второй вопрос нуждается в обсуждении следующих обстоятельств:

- ограничения биофизического потенциала паука;
- наличия в (1) «тяжелых» хвостов.

Строить сети произвольно большого размера пауки не способны из-за ограничения его биофизического ресурса (7), в том числе: скорости движения по паутине к жертве; запаса биоматериала нити; времени на восстановление сети и т.д. Несоответствие между биофизическим потенциалом и размерами слишком большой паутины приводит к потере контроля над состоянием сети. Для крупных пауков с большим биофизическим потенциалом, например найденных в лесах Бразилии, диаметр паутины может достигать и до 2 м.

Второе обстоятельство – «тяжелые» хвосты распределения. Преодолеть его невозможно. Даже существенное увеличение размеров паутины не способно значимо увеличить вероятность попадания насекомых в сеть.

В целях проверки данного утверждения проведен имитационный эксперимент методом Монте-Карло с использованием двумерных случайных чисел из распределения Коши. Результаты показаны на рис. 4. Из анализа полученных данных следует, что увеличение числа радиальных и кольцевых нитей, а значит и площади паутины в 3 раза, не дает существенного улучшения работы сети.

Из вышесказанного следует, что на протяжении столетий пауки участвовали в реальном эксперименте по определению наилучших размеров паутины, в результате которого ими были «осознаны» следующие «компромиссные» размеры: число радиальных нитей  $n = 39$ , кольцевых  $m = 35$ , площадь паутины  $300 \dots 900 \text{ см}^2$ . Другого варианта природа дать не смогла.

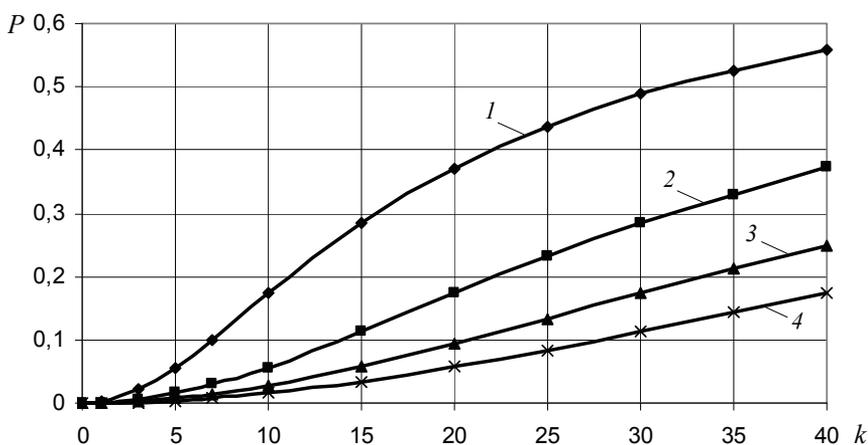
На основании сказанного сформулируем ответ на второй вопрос: компромисс между необходимостью ограничения размеров сети и наличием затяжных хвостов в распределении Коши достигается не только за счет структурных параметров паутины, но прежде всего за счет рационального выбора места и времени размещения ловушки. На это, в частности, указывают факты «прослушивания» пауком звуков насекомых в брачный период и строительство сетей в близких к ним местах [16].

Использование паутины конечных размеров означает, что вместо (1) реализуется усеченное распределение Коши, центрированная функция плотности вероятности которого имеет вид

$$f(x) = \frac{1}{2 \operatorname{arctg} X} \frac{1}{1+x^2}, \quad -X \leq x \leq X, \quad (9)$$

с математическим ожиданием  $E(x) = 0$ , дисперсией  $D(x) = \frac{X}{\operatorname{arctg} X} - 1$

и моментами:  $\mu_3 = 0$  и  $\mu_4 = \frac{X}{\operatorname{arctg} X}$  [17].



**Рис. 4.** Зависимость вероятности  $P$  попадания в сеть насекомых от числа витков паутины  $k$  при различных значениях  $h$ , см: 1 – 100; 2 – 200; 3 – 300; 4 – 400. Расстояние между витками  $R = 0,5$  см; размер насекомых  $\Delta = 0,25$  см

Из условия (8) следует, что «средний» за день улов насекомых все-таки известен и паук может улучшать его результат своими «тактически-ми» действиями, например, реконструируя профиль паутины и проявляя оперативность в поиске и удержании насекомых, попавших в сеть.

Смысл систематической ночной реконструкции сети пауком состоит не только в восстановлении порванных или слипшихся нитей и удалении мусора из паутины, но и в целесообразном изменении формы сети с тем, чтобы увеличить вероятность попадания насекомых с некоторых наиболее «продуктивных» для их ловли направлений, характерных для предшествующего периода времени [18].

При попадании насекомого в сеть пауку требуется оперативно его обнаружить в паутине, оценить размер и нейтрализовать. Иначе возможно высвобождение насекомого из ловушки. И, несмотря на наличие у пауков четырех пар глаз, они обладают плохим зрением и всю диагностику проводят при помощи волосков ножек, чувствительных к вибрациям нитей [19].

Уникальность строения сети состоит в том, что все радиальные нити независимы друг от друга и сходятся в едином «командном» центре паука. При этом каждая нить «настроена» на свою частоту [20].

В физическом плане радиальную нить можно сравнить со струной, поперечные колебания которой возникают при внешних воздействиях. Математическое описание колебательного процесса дает решение неоднородного дифференциального уравнения гиперболического типа

$$\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} = \alpha^2 \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} + \Phi(x,t) \quad (10)$$

с конкретными начальными и граничными условиями, где  $\Phi(x,t)$  соответствует внешней силе воздействия насекомого;  $\alpha^2$  – коэффициент, характеризующий свойства материала нити.

Ввиду неопределенности описания  $\Phi(x,t)$  рассмотрим более простую задачу:

$$\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} = \alpha^2 \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2}, \quad 0 \leq x \leq X, \quad t > 0, \quad (11)$$

с граничными

$$u(0,t) = 0, \quad u(X,t) = 0, \quad t > 0$$

и начальными условиями

$$u(x,0) = f(x), \quad \frac{\partial u(x,0)}{\partial t} = 0, \quad 0 \leq x \leq X,$$

где  $f(x)$  – начальное смещение нити.

Решение (11) получим методом разделения переменных в виде ряда

$$u(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin\left(\frac{n\pi x}{X}\right) \cos\left(\frac{n\pi \alpha t}{X}\right), \quad (12)$$

где  $a_n$  – амплитуда  $n$ -й гармоники,

$$a_n = \frac{2}{L} \int_0^X f(x) \sin\left(\frac{n\pi x}{X}\right) dx; \quad (13)$$

$\omega_n$  – ее частота,

$$\omega_n = \frac{n\pi\alpha}{X} = \frac{n\pi}{X} \sqrt{\frac{T}{\rho}}, \quad (14)$$

где  $T$  – натяжение нити;  $\rho$  – линейная плотность.

Наличие у пауков развитых рецепторов (датчиков колебаний) по всей вероятности позволяет им оценивать весь эксклюзивный спектр колебаний каждой нити и на его основе идентифицировать и место попадания насекомого, и его размеры, а зная их – эффективно проводить его захват.

С учетом сделанных выводов дадим ответ на третий вопрос в следующей форме: повышение эффективности работы сети в условиях неопределенности достигается в результате комбинированных «тактических» действий паука, основанных на анализе ранее произошедших событий и на прогнозе ожидаемых.

Обобщая все вышеизложенное, сформулируем базисные «принципы паука», имеющие ключевое значение при разработке бионической модели:

1) принцип организации тотальной системы защиты «жизненного пространства» ППМ от всех видов внешних опасностей;

2) принцип преодоления условий неопределенности с помощью сетевой (инструментальной) системы защиты;

3) принцип достижения паритета между сложностью системы защиты и характером потенциальных угроз;

4) принцип ликвидации опасных событий в «пространстве жизнеспособности» ППМ с использованием оптимальных стратегий поведения в чрезвычайных ситуациях.

Инструментом физической защиты в реальной биосистеме является сеть, обладающая в паре с пауком многими уникальными свойствами: локации, активности, адаптации, чувствительности, эффективности и интеллектуальности. Данные свойства должны присутствовать и в бионической модели мониторинга опасностей ППМ.

В математическом плане сеть – это обобщение понятия графа. Войцеховский М. И. дает определение сети как «отображение направленного множества в топологическое пространство» [21], из которого следует, что множество объектов материальной и нематериальной природы, допускающее интерпретацию в виде ориентированного графа, является сетью.

Бионическая модель реализуется с помощью многослойных сетей:

– сенсорных, ответственных за получение первичной информации;

– коммуникационных (типа Интернет), обеспечивающих получение и передачу информации по линиям связи;

– смысловых или семантических, полученных на основе анализа некоторых сущностей (событий, свойств или процессов) и отношений между ними. Примером семантической сети является информационная модель предметной области знания, необходимая при создании системы искусственного интеллекта. С учетом данного факта бионическую модель мониторинга опасностей в ППМ необходимо рассматривать как интеллектуальную сеть (SMART GRID).

Изоморфную структуру бионической модели представим в виде четырех типов подсистем: 1 – раннего обнаружения опасностей; 2 – оперативного реагирования на события; 3 – управления рисками; 4 – принятия решений с использованием искусственного интеллекта (рис. 5).

Информационные потоки в бионической модели циркулируют в соответствии с диаграммой на рис. 6. Смысл движения потоков – в необходимости параметризации всех этапов рабочего цикла бионической модели – от появления потенциально опасных воздействий до их ликвидации с помощью систем защиты. Данный рабочий цикл в соответствии с рис. 1, б назовем контуром параметризации, в котором создается количественное описание явлений и процессов, позволяющее решать задачу каждого этапа на компьютере, под контролем интеллектуальной системы управления.

В качестве концептуального примера бионической модели рассмотрим сеть мониторинга астероидно-кометных тел, представляющих серьезную опасность для жителей Земли. По оценкам специалистов в ближнем космосе находится 1500 объектов крупнее 1 км и 135 000 крупнее 100 м, тогда как на сегодня известно лишь 418 объектов с размерами 100 м и более [22]. Существующие системы наблюдения способны отслеживать всего 1 % объектов, вращающихся вокруг Солнца.

Падение в 2013 г. Чебаркульского метеорита, от которого пострадало свыше 1600 человек, побудило ООН на разработку программы «Международная группа по предупреждению астероидной угрозы», старт которой намечен на 2017 год. Смыслом программы является сбор информации и предупреждение правительств о потенциальных угрозах из космоса.



Рис. 5. Архитектура бионической модели мониторинга опасностей ППМ



**Рис. 6. Контур параметризации задач мониторинга опасностей в ИПМ:**

1 – локация опасностей; 2 – проверка гипотез; 3 – адаптация сети мониторинга;  
 4 – фильтрация помех; 5 – оценка риска; 6 – диагностика неисправностей;  
 7 – отображение предаварийных и аварийных ситуаций; 8 – выбор системы защиты; 9 – блокировка/ликвидация опасностей

К лучшим методам траекторных измерений космических объектов относят радио- и лазерное зондирование, позволяющее достаточно точно определять их угловые координаты и вектора скорости.

Бионическую модель представим в виде сети, образуемой низкоорбитальной группировкой спутников, оснащенных локаторами и космическими телескопами (подобно NEOSat), сопряженной с наземными станциями наблюдения и управления, осуществляющей сканирование геоцентрической небесной сферы такого радиуса, при котором с момента времени обнаружения космического тела в «жизненно важном пространстве Земли» удастся рассчитать траекторию его движения, определить размеры, возможное место падения и подготовиться к устранению опасности.

В такой модели мониторинга спутники с полярными орбитами адекватны радиальным нитям в спиралевидной паутине, а кольцевые образуются на поверхности небесной сферы виртуально в процессе ее зондирования поисковыми или отраженными лучами по траекториям, рассчитанным в зависимости от структуры сети: состава спутниковой группировки, параметров орбит, возможностей локаторов и другое. При разработке сети требуется, как и в «задаче паука», максимизировать вероятность обнаружения космических объектов, сближающихся с Землей.

### Список литературы

1. Вернадский, В. И. Несколько слов о ноосфере / В. И. Вернадский // Успехи современной биологии. – 1944. – Т. 18, № 2. – С. 113 – 120.
2. Попов, Н. С. Методологические основы теории безопасности / Н. С. Попов, Н. В. Лузгачева, А. Хайри // Вопр. соврем. науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2010. – № 10 – 12(31). – С. 10 – 28.
3. Ярочкин, В. И. Теория безопасности / В. И. Ярочкин, Я. В. Бузанова. – М. : Академ. проект : Мир, 2005. – 176 с.
4. Глобальная экологическая перспектива (ГЭО-3) [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.unep.com.ru/publications/geo3> (дата обращения: 05.02.2015).
5. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Анализ риска и безопасности. В 4 ч. Ч. 2. Безопасность гражданского и оборонного комплексов и управление рисками / под ред. К. В. Фролова, Н. А. Махутова. – М. : Знание, 2006. – 752 с.
6. Химмельблау, Д. Обнаружение и диагностика неполадок в химических и нефтехимических процессах : пер. с англ. / Д. Химмельблау. – Л. : Химия, 1983. – 352 с.
7. Попов, Н. С. Повышение энергоэффективности природо-промышленных систем / Н. С. Попов. – Тамбов : Изд-во Першина Р. В., 2014. – 146 с.
8. Энциклопедия кибернетики. В 2 т. Т. 1. Абс – Мир / под ред. В. М. Глушкова. – Киев : УСЭ, 1974. – 607 с.
9. Tronci, S. Monitoring Pollutant Emissions in a 4.8 MW Power Plant through Neural Network / S. Tronci, R. Baratti, A. Servida // Neurocomputing. – 2002. – No. 43. – P. 3 – 15.
10. Гастев, Ю. А. Гомоморфизмы и модели. Логико-алгебраические аспекты моделирования / Ю. А. Гастев. – М. : Наука, 1975. – 152 с.
11. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров : пер. с англ. / Г. Корн, Т. Корн. – М. : Наука, 1968. – 720 с.
12. Хальд, А. Математическая статистика с техническими приложениями : пер. с англ. / А. Хальд. – М. : Иностр. лит-ра, 1956. – 664 с.
13. Определитель насекомых Дальнего Востока СССР. В 6 т. Т. 1. Первично-бескрылые, древнекрылые, с неполным превращением / под общ. ред. П. А. Лера. – Л. : Наука, 1988. – 452 с.
14. DLFM: §7.19 Voigt Functions [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://dlmf.nist.gov/7.19> (дата обращения: 05.02.2015).
15. Рао, С. Р. Линейные статистические методы и их применения : пер. с англ. / С. Р. Рао. – М. : Наука, 1968. – 548 с.
16. Чтобы обнаружить добычу, пауки подслушивают их брачные песни [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.bugdesign.com.ua/insect-news/?id=2380> (дата обращения: 05.02.2015).
17. Walck, C. Hand-book on Statistical Distributions for Experimentalists / C. Walck. – Stockholm : University of Stockholm, 2007. – 190 p. – Internal Report SUF-PFY/96-01.
18. Maciejewski, W. An Analysis of the Orientation of an Orb-Web Spider / W. Maciejewski // J. of Theoretical Biology. – 2010. – No. 265. – P. 604 – 608.
19. Про пауков [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.panasia.ru/main/activ/exotic/exoticanimal/1.html> (дата обращения: 05.02.2015).
20. Пауки настраивают паутину как гитару [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://lafox.net/118/pauki-nastravayut-pautinu-kak-gitaru> (дата обращения: 05.02.2015).

21. Математическая энциклопедия. В 5 т. Т. 4. Ок – Сло / под ред. И. М. Виноградова. – М. : Советская энциклопедия, 1984. – 1123 с.

22. Зайцев, А. Л. Радиолокационные исследования астероидов, сближающихся с Землей : дис. ... д-ра физ.-мат. наук : 01.04.03 / Зайцев Александр Леонидович. – Фрязино, 1997. – 70 с.

### References

1. Vernadskii V.I. *Biology Bulletin Reviews*, 1944, vol. 18, no. 2, pp. 113-120.
2. Popov N.S., Luzgacheva N.V., Khairi A. *Voprosy sovremennoi nauki i praktiki. Universitet imeni V. I. Vernadskogo*, 2010, no. 10-12(31), pp. 10-28.
3. Yarochkin V.I., Buzanova Ya.V. *Teoriya bezopasnosti* (Theory safety), Moscow: Akademicheskii proekt, Mir, 2005, 176 p.
4. <http://www.unepcom.ru/publications/geo3> (assecced 5 February 2015).
5. Frolov K.V., Makhutov N.A. (Eds.) *Bezopasnost' Rossii. Pravovye, sotsial'no-ekonomicheskie i nauchno-tehnicheskie aspekty. Analiz riska i bezopasnosti. V 4 chastyakh. Chast' 2. Bezopasnost' grazhdanskogo i oboronnoogo kompleksov i upravlenie riskami* (Russia's security. Legal, socio-economic and scientific-technical aspects. Risk analysis and security. In 4 parts. Part 2 of the Security-civil and defense systems and risk management), Moscow: Znanie, 2006, 752 p.
6. Himmelblau D. *Obnaruzhenie i diagnostika nepoladok v khimicheskikh i neftekhimicheskikh protsessakh* (Detection and diagnosis of faults in the chemical and petrochemical processes), Leningrad: Khimiya, 1983, 352 p.
7. Popov N.S. *Povyshenie energoeffektivnosti prirodo-promyshlennykh sistem* (Improving the energy efficiency of nature and industrial systems), Tambov: Izdatel'stvo Pershina R.V., 2014, 146 p.
8. Glushkov V.M. (Ed.) *Entsiklopediya kibernetiki. V 2 tomakh. Tom 1. Abs – Mir* (Encyclopedia of cybernetics. In 2 volumes. Volume 1. Abs - World), Kiev: USE, 1974, 607 p.
9. Tronci S., Baratti R., Servida A. *Neurocomputing*, 2002, no. 43, pp. 3-15.
10. Gastev Yu.A. *Gomomorfizmy i modeli. Logiko-algebraicheskie aspekty modelirovaniya* (Homomorphisms and model. Logical and algebraic aspects of modeling), Moscow: Nauka, 1975, 152 p.
11. Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* (Mathematical Handbook for Scientists and Engineers), Moscow: Nauka, 1968, 720 p.
12. Hald A. *Matematicheskaya statistika s tekhnicheskimi prilozheniyami* (Mathematical Statistics with technical applications), Moscow: Inostrannaya literatura, 1956, 664 p.
13. Ler P.A. (Ed.) *Opredelitel' nasekomyh Dal'nego Vostoka SSSR. V 6 t. T. 1. Pervichnobskrylye, drevnekrylye, s nepolnym prevrashheniem* (Keys to the insects of the Far East of the USSR. Vol. 1 of 6. Pervichnobskrylye, drevnekrylye with incomplete metamorphosis), Leningrad: Nauka, 1988, 452 p.
14. <http://dlmf.nist.gov/7.19> (assecced 5 February 2015).
15. Rao C.R. *Linear Statistical Inference and its Applications*, New York: John Wiley, 1965, 522 p.
16. <http://www.bugdesign.com.ua/insect-news/?id=2380> (assecced 5 February 2015).
17. Walck C. *Hand-book on statistical distributions for experimentalists*, Stockholm: University of Stockholm, 2007, 190 p., Internal Report SUF-PFY/96-01.
18. Maciejewski W. *J. of Theoretical Biology*, 2010, no. 265, pp. 604-608.
19. <http://www.panasia.ru/main/activ/exotic/exoticanimal/1.html> (assecced 5 February 2015).

20. <http://lafox.net/118/pauki-nastraivayut-pautinu-kak-gitaru> (assecced 5 February 2015).

21. Vinogradov I.M. (Ed.) *Matematicheskaya entsiklopediya. V 5 tomakh. Tom 4. Ok – Slo* (Encyclopedia of Mathematics. In 5 vol. Vol. 4. Ok – Slo), Moscow: Sovetskaya entsiklopediya, 1984, 1123 p.

22. Zaitsev A.L. *PhD dissertation (Physical and mathematical sciences)*, Fryazino, 1997, 70 p.

---

### **Bionic Model of Man-Made Hazards Monitoring Network in Natural-Industrial Macrosystems**

**N. S. Popov, V. A. Luzgachev, O. V. Peshcherova, A. A. Chuksin**

*Tambov State Technical University, Tambov;  
G. R. Derzavin Tambov State University, Tambov*

**Key words and phrases:** bionic model; the Cauchy distribution; defense from asteroids and comets; intellectual network; man-made hazards; monitoring; natural-industrial macrosystems; triad «insect – web – spider».

**Abstract:** We propose a new bionic model to monitor man-made hazards, which is based on the protective mechanism of a spider's living space from external impacts. The method of its construction is based on a sequential display of the facts of the real world in the homomorphic and isomorphic forms. We studied the role of the Cauchy distribution in the mechanism of biological systems as a source of uncertainty. The “spider task”, “spider principles”, trapping properties of the web, which are crucial in the construction of a new generation of monitoring systems, were formalized. We considered a conceptual example of the bionic model application in the Earth protection system from asteroids and comets.

---

© Н. С. Попов, В. А. Лузгачев,  
О. В. Пещерова, А. А. Чуксин, 2015