

УДК 504.064.36

**Б. Б. Поспелов**, д. т. н., проф., науч. сотр.  
**В. А. Андронов**, д. т. н., проф., проректор  
 Национальный университет гражданской защиты Украины  
 ул. Чернышевская, 94, г. Харьков, Украина, 61023

## МОДЕЛИ КАЧЕСТВА ОБНАРУЖЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ ПО РЕАЛЬНЫМ ДАННЫМ МОНИТОРИНГА

Представлена обобщенная математическая модель качества обнаружения экологической опасности по реальным данным мониторинга объектов. Данная модель базируется на таких важных параметрах обнаружения экологической опасности как текущие априорные вероятности наличия и отсутствия экологической опасности на объекте, средний риск обнаружения экологической опасности, вероятности правильного и ложного обнаружения экологической опасности, а также стоимости ошибочных решений, связанных с ее пропуском и ложным обнаружением. На основе обобщенной модели предложена частная упрощенная модель качества обнаружения экологической опасности по реальным данным мониторинга объектов в условиях неопределенности, связывающая средней риск ошибочных решений с вероятностями правильного и ложного обнаружения экологической опасности. Данная модель может быть использована на практике для определения базовых показателей качества обнаружения экологической опасности по данным мониторинга объектов в условиях неопределенности.

**Ключевые слова:** математическая модель, качество обнаружения экологической опасности объектов, данные мониторинга.

**Постановка проблемы.** Важным фактором обеспечения экологической безопасности государства является способность своевременно обнаруживать и предотвращать опасные состояния объектов техногенной и природной сферы. Это является актуальной и достаточно сложной многоплановой проблемой, имеющей экологический, технологический и экономический аспекты. Большая региональная нагрузка территории Украины мощными промышленными и энергетическими объектами (в 2015 г. функционировало 9919 объектов повышенной опасности), наличие старого оборудования, используемого на объектах повышенной опасности, отсутствие систем раннего обнаружения опасных ситуаций повышают риск аварий и экологической опасности, убытки от которых можно сравнить с размером национального бюджета среднего государства [1].

При этом важным в решении рассматриваемой проблемы является обеспечение не только своевременного, но и надежного (достоверного) обнаружения экологической опасности на основе реальных данных мониторинга с целью принятия соответствующих эффективных воздействий для устранения угрозы. Особое место при этом отводится математическим моделям качества обнаружения экологической опасности.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В большом числе публикаций, посвященных проблематике обнаружения экологической опасности объектов и экологического риска, отмечается, что в настоящее время в программах мониторинга экологического состояния различных объектов делается упор на получение данных с использованием технических измерительных средств дистанционного наблюдения в режиме реального времени [2–5]. Однако возникновение любой

экологической опасности на реальных объектах является событием случайным [6].

По этой причине получаемые с помощью технических средств экологического мониторинга данные о текущем экологическом состоянии объектов и возможном развитии экологической опасности во времени и пространстве, должны рассматриваться в виде реализаций случайных процессов. При этом решение об обнаружении экологической опасности по реальным данным мониторинга носит вероятностный характер. Это порождает проблему оценки качества такого решения. Несмотря на особую важность [7], проблема оценки качества решения об обнаружении экологической опасности по реальным данным мониторинга в литературе экологической направленности до настоящего времени практически не рассматривается.

Вместе с тем, в работах [8–10] развивается подход, базирующийся на использовании результатов классической теории обнаружения при решении задачи качества обнаружения чрезвычайных ситуаций и загораний на объектах. Для оценки качества обнаружения загораний пожарными извещателями, наряду с традиционными показателями и параметрами, предлагается использовать для извещателей рабочие характеристики и характеристики обнаружения, количественно характеризующие качество обнаружения загораний извещателями в различных условиях их применения.

Развитию конструктивных направлений повышения оперативности и достоверности обнаружения возгораний на объектах посвящены работы [11–13].

**Постановка задачи и ее решение.** Целью работы является рассмотрение моделей качества обнаружения экологической опасности по реальным

данным мониторинга на основе классической задачи проверки двух статистических гипотез.

Вне зависимости от конкретного способа получения данных экологического мониторинга решение об обнаружении экологической опасности выносится на основе сравнения данных с принятым пороговым (допустимым) уровнем. В случае оценки динамики экологической опасности текущие данные мониторинга сравниваются с несколькими пороговыми значениями, характеризующими соответствующие допустимые уровни опасности.

Далее для определенности будем рассматривать случай сравнения с одним порогом – классическая задача обнаружения экологической опасности. В этом случае решение принимается при двух взаимно исключающих условиях, характеризующих наличие и отсутствие экологической опасности: «экологическая

опасность есть» –  $H_1$ , «экологической опасности нет» –  $H_0$ . Вследствие случайного характера ситуации и реальных данных экологического мониторинга указанные решения будут приниматься с ошибками, поскольку истинное состояние опасности остается неизвестным. В этом случае решения об экологической опасности могут быть только предположительными (в виде соответствующих гипотез), а именно: «экологическая опасность есть» –  $H_1^*$ , «экологической опасности нет» –  $H_0^*$ . В результате такого решения можно предложить обобщенную схему обнаружения экологической опасности по реальным данным мониторинга, которая имеет вид, изображенный на рисунке 1.



Рисунок 1 – Обобщенная схема обнаружения экологической опасности

Анализ схемы на рисунке 1 свидетельствует о том, что при обнаружении экологической опасности по данным мониторинга возможны как ошибочные, так и правильные решения. Ошибочные решения возникают в двух случаях, соответствующих фактическому отсутствию и наличию экологической опасности. Они называются соответственно:

– *ложное обнаружение*, когда принимается решение о наличии экологической опасности при ее фактическом отсутствии;

– *пропуск*, когда принимается решение об отсутствии экологической опасности при ее фактическом наличии.

При этом существуют и два вида правильных решений, соответствующих также фактическому наличию и отсутствию экологической опасности, которые соответственно называются:

– *правильное обнаружение*, когда принимается решение о наличии экологической опасности при ее фактическом наличии;

– *правильное необнаружение*, когда принимается решение об отсутствии экологической опасности при ее фактическом отсутствии.

При этом каждый из рассмотренных выше случаев характеризуется безусловной вероятностью, которая в соответствии с теоремой

умножения вероятностей может быть представлена в следующем виде:

Безусловная вероятность правильного обнаружения экологической опасности

$$P(H_1^*, H_1) = P(H_1)P(H_1^*/H_1). \quad (1)$$

Безусловная вероятность ложного обнаружения экологической опасности

$$P(H_1^*, H_0) = P(H_0)P(H_1^*/H_0). \quad (2)$$

Безусловная вероятность правильного необнаружения экологической опасности

$$P(H_0^*, H_0) = P(H_0)P(H_0^*/H_0). \quad (3)$$

Безусловная вероятность пропуска экологической опасности

$$P(H_0^*, H_1) = P(H_1)P(H_0^*/H_1). \quad (4)$$

В выражениях (1)–(4)  $P(H_1)$  и  $P(H_0)$  – априорные вероятности наличия и отсутствия экологической опасности на объекте, а  $P(H_1^*/H_1)$ ,

$P(H_1^*/H_0)$ ,  $P(H_0^*/H_0)$  и  $P(H_0^*/H_1)$  – соответствующие условные вероятности решений, вычисленные в предположении фактического наличия и отсутствия экологической опасности. Обычно эти вероятности принято называть апостериорными.

Определить безусловные вероятности (1) – (4) можно, если известны априорные и апостериорные вероятности. Априорные вероятности  $P(H_1)$  и  $P(H_0)$  в принципе могут быть определены по известным предварительным статистическим или другим данным о предполагаемом текущем состоянии объектов и окружающей среды. Эти вероятности аккумулируют информацию о появлении и отсутствии экологической опасности объектов в прошлом. Если такая информация отсутствует, то возникает так называемая априорная трудность обнаружения экологической опасности. В этом случае можно, по-видимому, считать, что отсутствие или наличие экологической опасности на объекте является равновероятным  $P(H_1) = P(H_0) = 0,5$ . Такое предположение можно считать справедливым для особо опасных объектов.

Апостериорные вероятности решений можно определить на основе эмпирических функций плотности распределения вероятностей по статистическим данным мониторинга экологической опасности и используемым порогам при принятии решения. Пусть  $p_1(x)$  и  $p_0(x)$  представляют собой плотности распределения вероятности данных экологического мониторинга для заданного временного интервала соответственно в случае наличия и отсутствия экологической опасности на объекте. Часто в качестве аргумента  $x$  в этих распределениях понимают нормированное значение  $U$  случайных данных мониторинга по отношению к среднему значению возмущений  $\sigma$ , т. е.  $x = U / \sigma$ .

Будем полагать, что величина  $x_0$  определяет относительную величину порога обнаружения опасности (или оценивания ее соответствующего уровня). Это означает, что величина  $x_0 = U_0 / \sigma$ , где  $U_0$  – абсолютная величина порога обнаружения. С учетом этого апостериорные вероятности, характеризующие качество обнаружения экологической опасности, могут быть определены в соответствии с выражениями.

1. Вероятность правильного обнаружения экологической опасности  $D$  при заданном пороге  $x_0$  будет определяться величиной

$$P(H_1^* / H_1) = D = \int_{x_0}^{+\infty} p_1(x) dx . \quad (5)$$

2. Вероятность пропуска экологической опасности  $\bar{D}$  при заданном пороге  $x_0$  будет определяться величиной

$$P(H_0^* / H_0) = \bar{D} = \int_0^{x_0} p_1(x) dx . \quad (6)$$

3. Вероятность ложного обнаружения экологической опасности  $F$  при заданном пороге  $x_0$  будет определяться величиной

$$P(H_1^* / H_0) = F = \int_{x_0}^{+\infty} p_0(x) dx . \quad (7)$$

4. Вероятность правильного необнаружения экологической опасности  $\bar{F}$  при заданном пороге  $x_0$  будет определяться величиной

$$P(H_0^* / H_0) = \bar{F} = \int_0^{x_0} p_0(x) dx . \quad (8)$$

Учитывая, что интеграл от функций плотности вероятности в бесконечных пределах равен единице, для (5)–(9) будут справедливы очевидные соотношения:

$$D + \bar{D} = 1 \text{ и } F + \bar{F} = 1 . \quad (9)$$

Следуя (5)–(9), из четырех параметров, характеризующих качество обнаружения экологической опасности, независимыми являются только  $D$  и  $F$ ;  $\bar{D}$  и  $\bar{F}$ . Любая пара этих величин может быть принята за исходную характеристику количественных показателей качества обнаружения (оценивания уровня) экологической опасности по данным мониторинга.

Например, показатели качества  $D$  и  $F$  обнаружения экологической опасности являются противоречивыми. Естественным требованием при обнаружении экологической опасности по реальным данным мониторинга является обеспечение максимальной вероятности  $D$  правильного обнаружения и минимальной вероятности  $F$  ложного обнаружения. Однако при реализуемом пороговом принципе обнаружения экологической опасности удовлетворить одновременно этим требованиям невозможно. Объясняется это тем, что для увеличения  $D$  (5) необходимо уменьшать величину порога  $x_0$ , в то время как для уменьшения  $F$  (7) величину порога необходимо увеличивать.

Обычно реальные условия обнаружения экологической опасности по данным мониторинга объектов характеризуются большим разнообразием. Поэтому качество обнаружения целесообразно рассматривать в среднем для совокупности возможных условий с учетом стоимости ошибочных решений.

Пусть стоимость ложного обнаружения экологической опасности определяется величиной  $r_F$ , а стоимость пропуска –  $r_D$ . Тогда средняя стоимость ошибочных решений (средний риск обнаружения экологической опасности)

$$R = r_F P(H_0) + r_D \bar{D} P(H_1). \quad (10)$$

Учитывая (9) выражение (10) может быть представлено в виде:

$$R = r_D P(H_1) \{1 - [D - l_0 F]\}, \quad (10)$$

где  $l_0 = r_F P(H_0) / r_D P(H_1)$  - весовой множитель. Из выражения (10) следует, что в общем случае повышение качества обнаружения экологической опасности на объекте в среднем (уменьшение среднего риска) связано с увеличением величины  $D - l_0 F$ , которая зависит от реализуемых показателей качества обнаружения экологической опасности, априорных данных о наличии и отсутствии экологической опасности, а также стоимости соответствующих ошибочных решений. Если решение об обнаружении экологической опасности по реальным данным мониторинга осуществляется с помощью технических средств, то те средства, для которых величина  $D - l_0 F$  будет иметь большее значение, будут в среднем обеспечивать и лучшее качество обнаружения экологической опасности.

Выражение (10) совместно с (5) – (8) определяют обобщенную модель качества обнаружения экологической опасности на объекте. Полученная обобщенная модель теоретически обоснована и связывает такие важные параметры обнаружения как априорные вероятности наличия и отсутствия экологической опасности на объекте (информацию о прошлом экологической опасности), средний риск обнаружения, а также реализуемые показатели качества обнаружения в виде вероятностей правильного и ложного обнаружения экологической опасности и стоимостей ее ложного обнаружения и пропуска.

Часто в реальных условиях мониторинга экологической опасности на объекте в текущий момент времени отсутствует информация о ее истории –  $P(H_0) = P(H_1) = 0,5$ . При этом бывает трудно оценить и стоимость (риск) ошибочных решений. Действительно, как оценить потери, связанные с ложным обнаружением и пропуском экологической опасности на объекте? Как оценить количественно результаты паники среди населения, вызванной ложным обнаружением экологической опасности, или притупления бдительности

аварийных и спасательных служб и подразделений? В каких единицах можно измерить человеческие жертвы и разрушения, вызванные пропуском экологической опасности и ее последствиями? Отсутствие данных о стоимости потерь в ряде случаев приводит к необходимости полагать, что  $r_D = r_F = 1$ . При этих условиях  $l_0 = 1$  и тогда обобщенная модель (10) упрощается

$$R = 0,5\{1 - [D - F]\}. \quad (11)$$

Модель (11) можно принять в качестве частной упрощенной и использовать ее при ориентировочных расчетах количественных показателей качества ( $D$  и  $F$ ) обнаружения экологической опасности по реальным данным мониторинга объектов в условиях неопределенности. Данная модель определяет средний риск от возможных ошибок обнаружения экологической опасности, который, следуя (11), является функционалом соответствующих плотностей распределения вероятности данных мониторинга и используемого порога. Из выражения (11) следует, что для обеспечения нулевого среднего риска при обнаружении экологической опасности (максимального качества обнаружения опасности) на объектах в условиях неопределенности разность вероятностей правильного и ложного обнаружения ( $D$  и  $F$ ) экологической опасности должна стремиться к единице.

**Выводы.** Таким образом, на основе известного статистического подхода обоснована обобщенная математическая модель качества обнаружения экологической опасности по реальным данным мониторинга объектов. Данная модель связывает такие важные параметры обнаружения экологической опасности как текущие априорные вероятности наличия и отсутствия экологической опасности на объекте, средний риск обнаружения экологической опасности, вероятности правильного и ложного обнаружения экологической опасности, а также стоимости ошибочных решений, связанных с пропуском и ложным обнаружением экологической опасности.

На основе обобщенной модели предложена частная упрощенная модель качества обнаружения экологической опасности по реальным данным мониторинга объектов, определяющая связь среднего риска ошибочных решений, с вероятностями правильного и ложного обнаружения экологической опасности. Упрощенная модель может быть использована на практике для ориентировочного определения показателей качества обнаружения экологической опасности по реальным данным мониторинга объектов в условиях неопределенности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Аналітичний огляд стану техногенної та природної безпеки в Україні за 2015 рік. – К.: Укр. НДЦЗ ДСНС України, 2016. – 356 с.
2. От оценки состояния природной среды методами дистанционного зондирования Земли к обеспечению устойчивого развития общества [Текст] / В. И. Волошин, Е. И. Бушуев, А. Г. Шапарь и др. // Космічна наука і технологія. – К.: НАН України, 2006. – Т. 12. – № 2/3. – С. 70–78.

3. Посудін, Ю. І. Методи вимірювання параметрів навколишнього середовища [Текст] / Ю. І. Посудін. – К.: Світ, 2003. – 285 с.
4. Шовенгердт, Р. А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений [Текст] / Р. А. Шовенгердт. – М.: Техносфера, 2010. – 560 с.
5. Mashkov, O. Geoinformation and aerospace technologies for information from satellite processing: environmental monitoring [Text] / O. Mashkov, V. Vasilyev, V. Frolov // Екологічні науки: наук.-практ. журн. – К.: ДЕА, 2013. – № 2/2013(4). – С. 107–113.
6. Kishore, K. Das. Development of New Probability Model with Application in Drinking Water Quality Data [Text] / K. Das Kishore, Das Bhanita, K. Baruah Bhupen et al. // Advances in Applied Science Research. – 2011. – 2(4). – P. 306–313.
7. Lindenmayera, D. B. Improved probability of detection of ecological «surprises» [Text] / D. B. Lindenmayera, G. E. Likensa, C. J. Krebs et al. // PNAS. – December 21, 2010. – Vol. 107. – № 51. – P. 21957–21962.
8. Поспелов, Б. Б. Выбор показателей качества и критерии оптимизации современных систем раннего обнаружения чрезвычайных ситуаций [Текст] / Б. Б. Поспелов, Р. И. Шевченко, А. Е. Басманов, А. А. Федцов // Проблеми надзвичайних ситуацій. – Х.: НУЦЗ України, 2012. – Вип. 15. – С. 122–131.
9. Поспелов, Б. Б. Рабочие характеристики пожарных извещателей систем пожарной автоматики [Текст] / Б. Б. Поспелов, Р. И. Шевченко // Проблемы пожарной безопасности. – Х.: НУГЗ Украины, 2012. – Вып. 32. – С. 166–173.
10. Поспелов, Б. Б. Метод определения рабочих характеристик для групповых пожарных извещателей систем пожарной автоматики [Текст] / Б. Б. Поспелов, Р. И. Шевченко // Проблемы пожарной безопасности. – Х.: НУГЗ Украины, 2013. – Вып. 33. – С. 136–146.
11. Andronov, V. Development of a method to improve the performance speed of maximal fire detectors [Text] / V. Andronov, B. Pospelov, E. Rybka // Eastern European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 2. – Issue 9 (86). – P. 32–37. – doi: 10.15587/1729-4061.2017.96694.
12. Andronov, V. Examining the learning fire detectors under real conditions of application [Text] / V. Andronov, B. Pospelov, E. Rybka, S. Skliarov // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 3. – Issue 9(87). – P. 53–59. – doi: 10.15587/1729-4061.2017.101985.
13. Pospelov, B. Design of fire detectors capable of self-adjusting by ignition [Text] / B. Pospelov, V. Andronov, E. Rybka, S. Skliarov // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 4. – Issue 9(88). – P. 53–59. – doi: 10.15587/1729-4061.2017.108448.

*Стаття надійшла до редакції 26.10.17 р.*

**Б. Б. Поспелов, В. А. Андронов**

#### **МОДЕЛЬ ЯКОСТІ ВИЯВЛЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ НЕБЕЗПЕКИ ПО РЕАЛЬНИХ ДАНИХ МОНІТОРИНГУ**

Представлена узагальнена математична модель якості виявлення екологічної небезпеки за реальними даними моніторингу об'єктів. Модель, що пропонується, базується на таких важливих параметрах виявлення екологічної небезпеки об'єктів за реальними даними моніторингу як поточні апріорні ймовірності наявності і відсутності екологічної небезпеки на об'єкті, середній ризик виявлення екологічної небезпеки, ймовірності правильного та помилкового виявлення екологічної небезпеки, а також вартості помилкових рішень, пов'язаних з пропуском і помилковим виявленням. На основі узагальненої моделі запропонована спрощена модель якості виявлення екологічної небезпеки за реальними даними моніторингу об'єктів, що визначає зв'язок середнього ризику помилкових рішень, з вірогідністю правильного і помилкового виявлення екологічної небезпеки. Спрощена модель може бути використана на практиці для орієнтовного визначення базових показників якості виявлення екологічної небезпеки за реальними даними моніторингу об'єктів в умовах не визначення.

**Ключові слова:** математична модель, якість виявлення екологічної небезпеки об'єктів, дані моніторингу.

**B. Pospelov, V. Andronov**

#### **MODEL OF QUALITY OF DETECTION OF ENVIRONMENTAL HAZARDS USING REAL DATA OF MONITORING**

Development of quality models of environmental hazard detection for real data monitoring in the form of the problem of testing two statistical hypotheses. Well-known methods and the results of solving the problem of testing two statistical hypotheses using in relation to the problem of detection of environmental hazard according to monitoring by technical means. Propose a generalized mathematical model of quality environmental hazard detection. On the basis of the generalized model have proposed the simplified model of the quality of detection of environmental hazards on the monitoring data. The generalized model is based on the current priori probability of the presence and absence of environmental hazards, on the average risk of environmental hazard detection, on the probability of correct and false detection of danger, as well as the cost of wrong decisions related to the pass, and false detection. Simplified model determines the relationship of average risk of erroneous decisions, with the probabilities of correct and false detection of environmental hazards. The models can be used in practice for assessing and determining of basic indicators of the quality of detection of environmental hazard according to monitoring real objects.

**Keywords:** mathematical model, the quality of detection of environmental hazards objects monitoring data.