

---

УДК 504.05:519.2

**А.А. Попов**, канд. техн. наук  
Ин-т геохимии внешней среды НАН Украины  
(Украина, 03680, Киев, пр. Палладина, 34а,  
тел. (044) 4231796, e-mail: sasha\_popov1982@mail.ru)

## Математические модели оценки техногенного риска

Рассмотрены современные отечественные и зарубежные математические модели оценки техногенного риска. Предложена классификация моделей количественной оценки риска воздействия химически опасных объектов по источнику возникновения, объекту воздействия и назначению. Приведены формулы для определения рисков согласно предложенной классификации. Обоснован выбор и описаны возможности использования рассмотренных математических моделей при решении практических задач. Выполнен анализ природных и техногенных опасностей создания угрозы для людей.

Розглянуто сучасні вітчизняні та закордонні математичні моделі оцінки техногенного ризику. Запропоновано класифікацію моделей кількісної оцінки ризику від впливу хімічно небезпечних об'єктів за джерелом виникнення, об'єктом впливу та призначенням. Наведено формули для визначення ризиків згідно запропонованої класифікації. Обґрунтовано вибір та описано можливості використання розглянутих математичних моделей при вирішенні практичних задач. Виконано аналіз природних та техногенних небезпек створення загрози для людей.

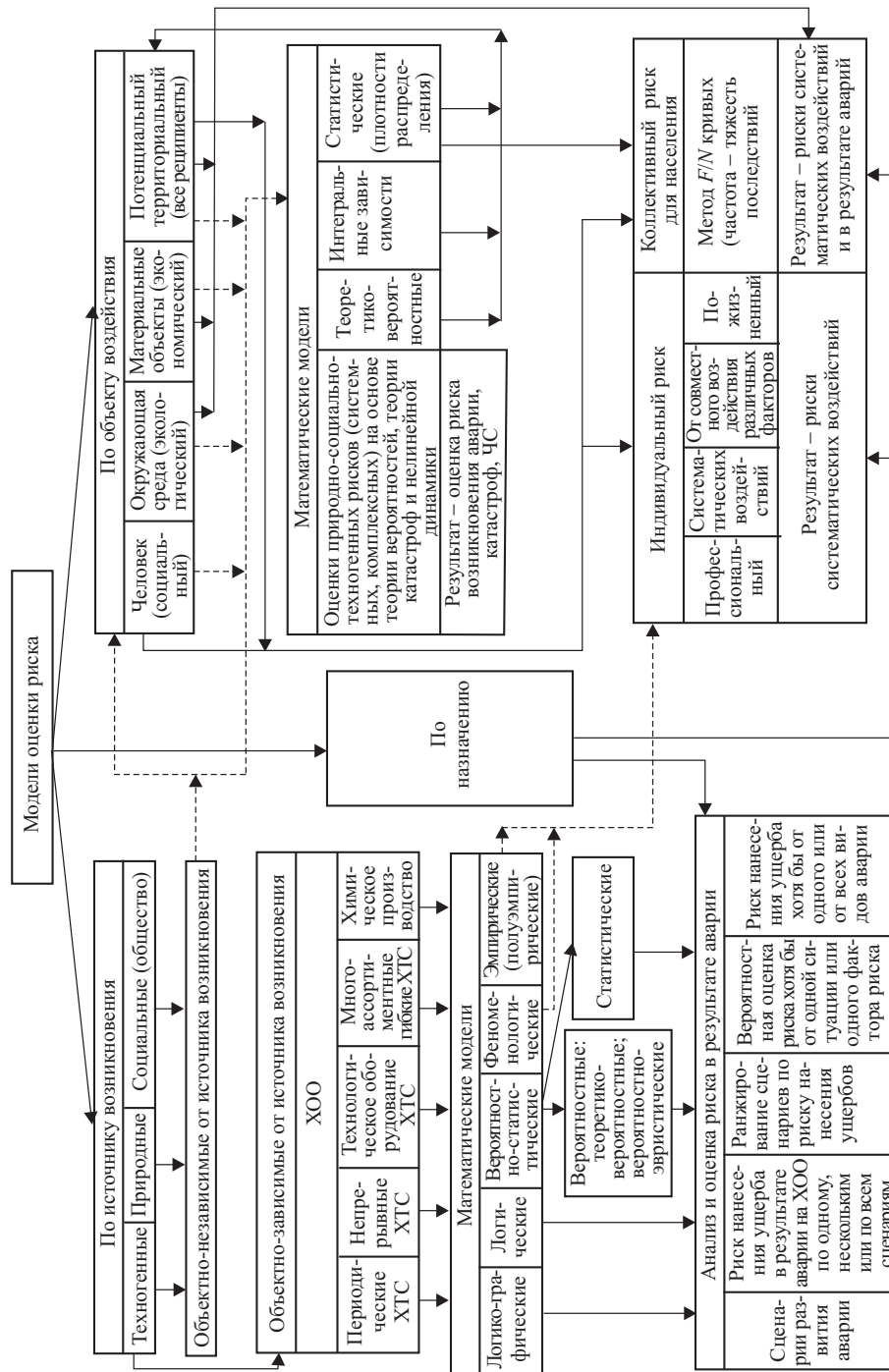
*К л ю ч е в ы е с л о в а:* математическая модель, техногенный риск, опасность, оценка, химически опасные объекты.

В настоящее время актуальной проблемой является анализ и прогноз отрицательных изменений качества окружающей среды в результате природных и антропогенных воздействий. При этом возникает необходимость, с одной стороны, количественной оценки вероятности возникновения процессов и явлений, снижающих качество окружающей среды, а с другой, — количественной оценки возможных ущербов от их проявления.

В основе оценки таких последствий лежит методология анализа, оценки и управления рисками влияния различных факторов на биосферу и здоровье населения с целью увеличить обоснованность принятия управленческих решений в области экологической безопасности.

**Постановка задачи.** Для обеспечения экологической безопасности на определенной территории (район, город, государство и др.) соответствующим

© А.А. Попов, 2015



Блок-схема классификации моделей оценки риска ХОО: ХТС — химико-технологические системы последствий

щим управленческим органам на начальном этапе следует выполнить анализ и оценку рисков для окружающей среды и населения, возникающих под влиянием природных или антропогенных факторов.

Наиболее важными из множества работ, посвященных анализу и оценке различных видов риска, являются работы [1—4], в которых рассмотрены современные теоретические и методологические основы анализа и оценки рисков, связанных с воздействием факторов природного и техногенного характера, а также определены особенности управления рисками аварий и чрезвычайных ситуаций. Однако ни одна из этих работ не содержит систематизированного материала, детального анализа и сравнения возможностей математических моделей техногенного риска, что является весьма важным при решении практических задач экологической безопасности химически опасных объектов (ХОО).

В работе [5] приведены результаты сравнения основных отечественных и зарубежных методов анализа рисков, которые отличаются методологическим подходом, целями и задачами анализа, математическим аппаратом.

**Систематизация и анализ известных математических моделей оценки техногенного риска.** На рисунке представлена блок-схема классификации моделей для количественной оценки риска. Классификация осуществлена по источнику возникновения, объекту воздействия и назначению [1, 2].

По источнику возникновения различают объектно-зависимые модели, предназначенные для оценки риска техногенных источников, т.е. ХОО, и объектно-независимые от источника возникновения модели, предназначенные для оценки риска, вызванного комплексными источниками опасности — природными, техногенными (различными видами опасных производственных (химически опасных) объектов, транспортом и др.), социальными в различных комбинациях (природно-техногенные, природно-социально-техногенные) и формах проявления (систематическое воздействие, совместное воздействие и др.).

По объекту воздействия различают модели, направленные на оценку риска для отдельных реципиентов: человека, населения (социальный риск), окружающей среды (экологический риск), материальных объектов (экономический риск) или на оценку потенциального территориального риска для различных реципиентов (населения, окружающей среды, материальных объектов). Данная группа моделей предназначена для оценки индивидуального и коллективного рисков.

По назначению различают модели оценки риска систематических отрицательных воздействий на человека и окружающую среду, риска в результате аварий на ХОО и риска профессиональной деятельности, связанного с работой во вредных условиях или с потенциально опасными веществами и материалами.

К объектно-зависимым от источника возникновения моделям анализа и оценки риска в результате аварий относятся логико-графические, логические и вероятностно-статистические модели (теоретико-вероятностные, вероятностно-эвристические, статистические (частотного анализа аварийных событий)), феноменологические и эмпирические (полуэмпирические) модели.

В результате использования логико-графических, логических и вероятностных моделей определяется следующее:

сценарий развития аварии;

риск нанесения ущерба различного вида по одному, нескольким или по всем сценариям;

ранжирование сценариев по степени их опасности и вероятностная оценка риска аварии при возникновении хотя бы одной аварийной ситуации или хотя бы от одного фактора риска;

риск нанесения ущерба хотя бы одного и (или) всех видов при реализации данной аварии.

Феноменологические модели используются для моделирования рисков систематических воздействий и рисков совместного воздействия нескольких факторов, а также рисков токсических воздействий в результате выбросов и сбросов отравляющих химических веществ и при обращении с опасными веществами и материалами.

При оценке социального (коллективного или группового риска для производственного персонала) и риска для населения в объектно-независимых от источника моделях используются статистические данные по плотностям распределения населения на рассматриваемой территории или численности персонала на различных объектах с учетом графиков работы и времени суток для расчетов методом  $F/N$  кривых. Однако в случае отсутствия статистически значимой информации для оценки последствий аварий на опасных производственных объектах в виде индивидуальных и коллективного риска часто используют упрощенные полуэмпирические зависимости.

При выборе модели оценки риска следует учесть, что природные и техногенные опасности с точки зрения создания угрозы для людей делятся на две группы.

К первой группе относятся опасные природные или техногенные явления, которые создают поражающие факторы (факторы риска) непосредственно для людей.

Ко второй группе относятся опасные явления, которые создают поражающие факторы для зданий и сооружений. В этом случае угрозу для людей представляют вторичные поражающие факторы, формирующиеся при разрушении зданий и сооружений.

Оценка риска для людей от опасностей первой группы проводится как для любых объектов. От опасностей второй группы угроза для людей существует при условии их нахождения в момент опасного природного или техногенного явления в зданиях и сооружениях. Степень угрозы в этом случае зависит от времени, проводимого человеком в подвергающихся поражающим факторам зданиях и сооружениях.

Основные модели оценки техногенного риска следующие [2, 6, 7].

1. Упрощенное обобщенное соотношение:

$$R^k = P_1 P_2 P_3. \quad (1)$$

Здесь  $R^k$  — риск  $k$ -го вида (экологический, экономический, социальный);  $P_1$  — вероятность возникновения аварии;  $P_2$  — вероятность формирования определенных уровней физических полей;  $P_3$  — вероятность того, что указанные уровни полей приведут к определенному ущербу,

$$P_3 = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\text{Pr}} e^{-t^2/2} dt, \quad (2)$$

где  $\text{Pr}$  — пробит-функция,

$$\text{Pr} = a \pm b \ln(y)^n; \quad (3)$$

$y$  — результирующее поле поражающих факторов,

$$y = (c_1 x_1^{n_1})^{m_1} \pm (c_2 x_2^{n_2})^{m_2} \pm \dots \pm (c_i x_i^{n_i})^{m_i}, \quad i = \overline{1, M}; \quad (4)$$

$a, b, c_1, c_2, \dots, c_i$  — эмпирические коэффициенты;  $n, n_1, \dots, n_i, m_1, \dots, m_i$  — показатели степени;  $x_1, x_2, \dots, x_i$  — переменные величины физических поражающих факторов;  $M$  — число поражающих факторов;  $t$  — время.

2. Риск как математическое ожидание (МО) ущерба всех видов:

$$R_{\text{МО}} = \sum_{k=1}^K \sum_{g=1}^G P_{ig} Y_g^k, \quad (5)$$

$$R_{\text{МО}} = \sum_{k=1}^K W(Y^k) P(Y^k), \quad (6)$$

где  $P_{ig}$  — вероятность возникновения опасного события  $i$ -го вида или реализации  $g$ -го сценария развития аварии;  $G$  — число сценариев;  $Y_g^k$  — ожидаемый ущерб  $k$ -го вида при  $g$ -м сценарии в стоимостном выражении;  $P(Y^k)$  — вероятность ущерба  $k$ -го вида;  $W(Y^k)$  — весовая функция, с помощью которой последствия различного вида приводятся к единой шкале ущербов, определяемая экспертно.

3. Среднее значение ущерба от опасного события за год или другой интервал времени  $\Delta t$ :

$$\bar{Y} = \sum_{i=0}^I P(H_i) Y_i = P(\Delta t) Y, \quad \Delta t = \overline{1, T}, \quad (7)$$

$$P(H_1) = P(\Delta t), \quad P(H_0) = 1 - P(\Delta t), \quad Y_1 = Y, \quad Y_0 = 0, \quad (8)$$

где  $P(\Delta t)$  — вероятность наступления события за время  $\Delta t$ ;  $P(H_0)$  — вероятность гипотезы отсутствия отрицательных воздействий на интервале времени  $\Delta t$ ;  $P(H_i)$  — вероятность гипотезы наступления  $i$ -го события на интервале времени  $\Delta t$ ;  $Y_i$  — ущерб при реализации  $i$ -го опасного события;  $I$  — число опасных событий на рассматриваемом интервале времени  $\Delta t$ .

4. Социальный риск:

а) по динамике смертности (на 1000 человек):

$$R_C = \frac{1000(C_2(t) - C_1(t))}{D}, \quad t = \overline{1, T}, \quad (9)$$

где  $C_1(t)$ ,  $C_2(t)$  — число умерших за единицу времени  $t$  в исследуемой группе в начале и в конце периода наблюдения  $T$ ;  $D$  — общая численность исследуемой группы;

б) для единичного события  $i$ :

$$D_p = P_2(\tau) P_3(\tau) \sum_{g_r=0}^{Gr} P_{0g_r}(\tau) d_{g_r}(\tau). \quad (10)$$

Здесь  $D_p$  — усредненное число людей, подвергающихся рассматриваемому виду ущерба;  $P_2(\tau)$  — вероятность формирования дозовых нагрузок определенного уровня;  $P_3(\tau)$  — вероятность того, что дозовые нагрузки вызовут рассматриваемый ущерб;  $P_{0g_r}$  — вероятность того, что в месте проявления отрицательного воздействия окажется группа людей с одинаковыми условиями отклика на данное воздействие;  $\tau$  — расчетный момент времени;  $d_{g_r}$  — число людей в группе;  $Gr$  — число расчетных групп, подвергающихся воздействию.

Численные значения социального риска при единичном опасном событии и ряде событий  $I$ :

$$R(d > D_p) = P_1, \quad (11)$$

$$R_I(d > D_p) = \sum_{i=1}^I P_{1i}, \quad (12)$$

где  $P_1$  — вероятность того, что число людей, не меньшее чем  $D_p$ , может быть подвержено ущербу;  $I$  — число учитываемых событий.

5. Индивидуальный риск:

$$R_u = \frac{C(t)}{D(f)}, \quad (13)$$

где  $C$  — число пострадавших (погибших) в единицу времени  $t$  от фактора риска  $f$ ;  $D$  — число людей, подверженных фактору риска  $f$  в единицу времени  $t$ .

6. Коллективный риск:

$$R = P(d) D, \quad (14)$$

где  $P(d)$  — вероятность поражения отдельного индивидуума в результате воздействия факторов опасности;  $D$  — общее число людей, подвергающихся потенциальному отрицательному воздействию.

Риск для индивидуума, относящегося к группе  $Gr$ , стать жертвой несчастного случая:

$$R_{Gr} = \frac{I_{Gr}}{D_{Gr}}, \quad (15)$$

где  $I_{Gr}$  — ожидаемое число несчастных случаев в год для группы  $Gr$ ;  $D_{Gr}$  — число индивидуумов, относящихся к группе  $Gr$ .

7. Коллективный риск как интегральная зависимость числа смертей в год от данного вида хозяйственной деятельности на данной территории:

$$R = \int_S R_{\Sigma}^*(x, y) D(x, y) dS. \quad (16)$$

Здесь  $R_{\Sigma}^*(x, y)$  — суммарное поле потенциальной опасности от всех  $i$ -х источников отрицательного воздействия с учетом их взаимного расположения,

$$R_{\Sigma}^*(x, y) = \sum_{i=1}^I R_{\Sigma}^i(x, y); \quad (17)$$

$D(x, y)$  — плотность распределения населения на территории  $S$ ;  $R_{\Sigma}^i(x, y)$  — суммарное поле потенциальной опасности от  $i$ -го источника негативного воздействия,

$$R_{\Sigma}^i(x, y) = \sum_{g=1}^G \sum_{j=1}^J \lambda_{ig} R_{jg}^i, \quad (18)$$

где  $\lambda_{jg}$  — частота (вероятность) реализации отрицательных воздействий всех видов (токсического, термического и давления ударной волны)  $j$ -й аварийной ситуации, развивающейся по  $g$ -му сценарию;  $R_{jg}^i$  — поле потен-

циальной опасности  $j$ -й аварийной ситуации, развивающейся по  $g$ -му сценарию для  $i$ -го источника.

8. Пожизненный риск:

$$R_q = \int_0^{\infty} H(z) \mu_q(z) dz, \quad (19)$$

$$R = \sum_{q=1}^Q \int_0^{\infty} \tilde{H}_0 \mu_q(z) dz, \quad (20)$$

где  $R_q$  — риск (вероятность) умереть от  $q$ -го источника риска на протяжении всей предстоящей жизни;  $\mu_q(z)$  — повозрастной коэффициент смертности от  $q$ -го источника риска;  $H(z)$  — функция выживания до возраста  $z$ ;  $\tilde{H}_0(z)$  — модифицированная функция выживания до возраста  $z$ ;  $q = 1, Q$  — число источников риска.

В выражении (1) вероятности являются условными, и для каждой составляющей требуется разработка или выбор методов и моделей расчета. Для определения вероятности возникновения события  $P_1$  используются методы теории надежности технических систем, а также соответствующие отраслевые банки статистических данных по характерным отказам и авариям. В случае отсутствия статистически значимой информации определение вероятности проводят с использованием причинно-следственных закономерностей (логик) возникновения аварийных ситуаций и развития аварий как совокупности промежуточных событий, т.е. на основе разработки соответствующих сценариев с использованием логико-вероятностных методов анализа и оценки риска [5, 8].

Для определения значения  $P_2$  необходимо использовать методы модельного подхода к анализу и оценке риска. Значения условной вероятности поражения от уровней полей и нагрузок  $P_3$  определяются с использованием соотношений (2)—(4). Эти зависимости приведены в ряде отечественных методик оценки индивидуального и социального рисков в результате аварий в производственных зданиях и на технологических установках. Риски оцениваются при возникновении таких поражающих факторов, как избыточное давление, развивающееся при сгорании газозо-воздушных смесей, тепловое излучение, токсическое воздействие. Эти методы основаны на построении логических схем возникновения и развития аварий для отдельных единиц технологического оборудования и определения для каждого из них количественных величин физических поражающих факторов.

Зависимость условных вероятностей поражения от этих факторов определяется с использованием эмпирических соотношений (3) и (4). В зависимости от полученного значения пробит-функции определяется условная



вероятность поражения человека от результирующего поля физических факторов. Эта функция для оценки риска поражения может быть представлена в виде интеграла, известного под названием функции Гаусса (функции ошибок):

$$R_3 = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\text{Pr}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt. \quad (21)$$

Верхний предел интегрирования в данном случае отражает связь между количественной мерой вредного воздействия на человека (поглощенной дозой вредного вещества, количеством тепловой энергии и др.) и вероятностью поражения объекта. Значения эмпирических коэффициентов и зависимостей условных вероятностей поражения от значений пробит-функций приведены в [6, 7]. Наряду с соотношением (21) для определения риска поражения часто используют соотношение

$$R_3 = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\text{Pr}-5} e^{-\frac{t^2}{2}} dt.$$

Аналогичные зависимости используют и при моделировании неблагоприятных воздействий, имеющих детерминированные уровни (концентрации вредных веществ, мощности доз излучения). Угроза для людей в этом случае оценивается дозой, полученной ими за время пребывания во вредной зоне. Далее риск причинения вреда здоровью определяется зависимостью «доза—эффект».

Кроме вероятностной составляющей существуют оценки риска в виде ущербов в натуральном выражении такие, как число пострадавших (для оценки социального риска), определение масс и площадей загрязнения территорий при выбросах и сбросах опасных химических веществ (для оценки экологического риска), определение максимальных размеров взрывоопасных зон и избыточного давления в ударной волне при взрывах паровоздушного облака (для оценки экономического и экологического рисков) и др. Для оценки риска в виде ущербов используют модели физико-химических, термодинамических, тепловых явлений и процессов и существующие методики расчета [3, 4].

Для определения риска как МО всех видов ущерба используют выражения (5) и (6). По соотношению (5) риск рассчитывают в денежном эквиваленте, а по (6) — риск определяют как безразмерную величину. Интерпретация риска как МО ущерба, рассматриваемого в виде случайной величины, свидетельствует о том, что один и тот же риск может быть вызван высокой вероятностью отказа с незначительными последствиями или ограниченной вероятностью отказа с высоким уровнем ущерба. Соотношения (1)—(6) являются упрощенными объектно-независимыми моде-

лями оценки риска в результате аварий и систематических воздействий. В явном виде они не описывают реальных механизмов исследований сценариев развития аварийных ситуаций.

Наиболее общим показателем риска является среднее значение ущерба от опасного события за год или другой интервал времени (7). Согласно (7), (8), если в течение года произойдет более одного опасного явления (события), то показателем риска будет сумма ущербов по всем состоявшимся событиям. Однако определение уровня риска как вероятностной категории является более удобным и приемлемым при решении широкого круга задач научного и практического характера, в особенности задач, касающихся общей (комплексной) оценки уровня безопасности.

Для оценки риска используют количественные показатели индивидуального, коллективного, потенциального территориального и социального рисков, определяемые из соотношений (9)—(18). В основе расчетов коллективного риска по соотношениям (16)—(18), в отличие от (14), (15), лежит построение полей потенциального территориального риска от различных источников отрицательных воздействий. Эти соотношения предназначены для расчета пожизненного ((19), (20)) и канцерогенного риска, обусловленного техногенными факторами.

Перспективы дальнейших исследований включают создание программного комплекса для оценки влияния потенциально опасных объектов на окружающую среду, основными составляющими которого будут: модуль математического моделирования, модуль расчета рисков и картографическая подсистема. Внедрение такого программного комплекса в работу отделов охраны окружающей среды техногенных объектов позволит принимать своевременные эффективные управленческие решения по регулированию состояния экологической безопасности в зонах их влияния, что обеспечит уменьшение уровня риска для здоровья населения прилегающих территорий.

## Выводы

По результатам анализа основных соотношений, предназначенных для количественной оценки риска, сформировано пять групп моделей.

1. Соотношения для оценки различных видов социального риска (коллективного, индивидуального) как составляющей совокупности отрицательных воздействий, объектно-независимые от источника опасности.

2. Соотношения для оценки интегрального риска на рассматриваемой территории (коллективного и потенциального территориального индивидуального риска) с учетом всех потенциально опасных объектов.

3. Полуэмпирические зависимости оценки последствий аварий (отрицательных воздействий) на опасных производственных объектах, используемые при оценке риска в результате аварий и систематических воздействий.

4. Феноменологические модели для расчета рисков систематических воздействий, совместного воздействия нескольких факторов и рисков токсических воздействий при обращении с опасными веществами и материалами, а также в результате выбросов и сбросов отравляющих химических веществ.

5. Соотношения, объектно-зависимые от источника опасности (опасного производственного объекта) для определения риска аварии в терминах теории вероятности.

Каждая группа моделей учитывает одну из сторон анализа и (или) оценки риска и не охватывает всего многообразия процессов возникновения и развития аварий на опасных производственных объектах.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алымов В.Т., Тарасова Н.П. Техногенный риск: Анализ и оценка: Учеб. пособие для вузов. — М. : ИКЦ «Академкнига», 2004. — 118 с.
2. Лисиченко Г.В., Забулонов Ю.Л., Хміль Г.А. Природний, техногенний та екологічний ризики: аналіз, оцінка, управління. — Київ: Наук. думка, 2008. — 542 с.
3. Большаков А.М., Крутько В.Н., Пуцилло Е.В. Оценка и управление рисками влияния окружающей среды на здоровье населения. — М. : Эдиториал УРСС, 1999. — 256 с.
4. Качинський А.Б. Безпека, загрози і ризик: наукові концепції та математичні методи. — Київ: Поліграфконсалтинг, 2004. — 472 с.
5. Попов О.О. Методи аналізу ризиків в екології // Зб. наук. праць Ін-ту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України. — Вип. 69. — Київ, 2013. — С. 19—28.
6. Лисиченко Г.В., Хміль Г.А., Барбашев С.В. Методологія оцінювання екологічних ризиків. — Одеса : Астропринт, 2011. — 368 с.
7. Хміль Г.А. Концептуально-методичний апарат аналізу й оцінки техногенного та природного ризиків // Екологія довкілля та безпека життєдіяльності. — 2007. — Вип. 5. — С. 47—55.
8. Яцишин А.В., Каменева И.П., Попов А.А., Артемчук В.А. Методы и технологии анализа рисков для здоровья на основе данных мониторинга // Материалы IV Международной науч.-техн. конф. «МОДЕЛИРОВАНИЕ-2012», 16-18 мая 2012 г. — Киев, 2012. — С. 469—473.

*A.A. Popov*

#### MATHEMATICAL MODELS OF TECHNOGENIC RISK ASSESSMENT

Modern national and foreign mathematical models of technogenic risk assessment have been considered in the paper. The models classification based on quantification of the risk of exposure to hazardous chemical facilities is proposed. They were classified by the source of origin, the impact of the object and purpose. The mathematical formulas that determine the risk according to the proposed classification are given. The choice of the models is substantiated as well as the possibility of using the mathematical models in solving practical problems is described. The analysis of natural and technogenic hazards which create the greatest threat to people has also been done.

*Keywords: mathematical model, technogenic risk, danger, assessment, chemically dangerous objects.*

REFERENCES

1. Alymov, V.T. and Tarasova, N.P. (2004), *Tehnogenny risk: Analiz i otsenka* [Technogenic risks: Analysis and evaluation], IKTs «Akademkniga», Moscow, Russia.
2. Lysychenko, G.V., Zabulonov, Yu.L. and Khmil, G.A. (2008), *Pryrodny, tehnogenny ta ekologichny ryzyky: analiz, otsinka, upravlinnya* [Natural, technogenic and environmental risks: analysis, assessment and management], Naukova dumka, Kyiv, Ukraine.
3. Bolshakov, A.M., Krutko, V.N. and Putsillo, E.V. (1999), *Otsenka i upravlenie riskami vliyaniya okruzhayushhey sredy na zdorov'e naseleniya* [Risk assessment and management of environmental influences on health], Editorial URSS, Moscow, Russia.
4. Kachynskiy, A.B. (2004), *Bezpeka, zagrozy i ryzyk: naukovi kontseptysi ta matematychni metody* [Safety, threats and risk: mathematical methods and scientific concepts], Poligraf-konsaltyng, Kyiv, Ukraine.
5. Popov, O.O. (2013), "Methods of risk analysis in ecology", *Zbirnyk naukovykh prats IPME im. G.E. Pukhova NAN Ukrainy*, Vol. 69, pp. 19-28.
6. Lysychenko, G.V., Khmil, G.A. and Barbashev, S.V. (2011), *Metodologiya otsinyvannya ekologichnykh ryzykiv* [The methodology of evaluation of environmental risks], Astroprint, Odessa, Ukraine.
7. Khmil, G.A. (2007), "Conceptually-methodical apparatus of analysis and assessment of technological and natural risks", *Ekologiya dovkillya ta bezpeka zhyttediyalnosti*, Vol. 5, pp. 47-55.
8. Yatsishin, A.V., Kameneva, I.P., Popov, A.A. and Artemchuk, V.A. (2012), "Methods and techniques of analysis of health risks based on monitoring data", *Materialy IV Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «MODELIROVANIE-2012»* [Proceedings of the IV International Scientific Conference «Simulation-2012"], Kyiv, May 16-18, 2012, pp. 469-473.

Поступила 14.09.15

ПОПОВ Александр Александрович, канд. техн. наук, ст. науч. сотр. Ин-та геохимии внешней среды НАН Украины. В 2004 г. окончил Житомирский государственный технологический университет. Область научных исследований — математическое моделирование экологических процессов, экологический мониторинг техногенных объектов, информационные технологии.