

## ЭКОЛОГИЯ

УДК: 502/504:001.8

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА С УЧЁТОМ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

### THEORETICAL METHOD OF ENVIRONMENTAL RISK ASSESSMENT WITH GIVEN HYDROMETEOROLOGICAL FACTORS



© **Дмитриев** Виктор Георгиевич, учёный секретарь федерального государственного бюджетного учреждения «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт», кандидат технических наук, старший научный сотрудник.  
E-mail: V\_Dmitriev@aari.ru, тел. (812) 337 3106.

© **Dmitriev** Victor Georgievich, Academic Secretary of federal state budget institution "Arctic and Antarctic Scientific Research Institute", Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher. E-mail: V\_Dmitriev@aari.ru, tel. +7 (812) 337 3106.

**Аннотация.** Гидрометеорологические факторы влияют на состояние экологической обстановки, являясь причиной возникновения или усиления/ослабления экологической опасности.

**Ключевые слова:** экологический риск, гидрометеорологические факторы, вероятностный анализ, экологический мониторинг

**Abstract.** Hydrometeorological factors are significant for environmental conditions, being the origin or contributing to the increase/decrease of environmental hazards,

**Keywords:** environmental risk, hydrometeorological factors, probabilistic analysis, environmental monitoring

#### **Введение**

В статье приводится теоретический подход к оценке экологического риска с учетом гидрометеорологических факторов в вероятностной трактовке и даются рекомендации по выбору исходных данных. Метод позволяет учесть неопределённость состояния природной среды при оценке рисков, что особенно актуально для Арктики — глобальной кухни погоды.

#### **Дуализм определений риска**

Практически все авторы публикаций, посвящённых проблеме риска, отмечают отсутствие строгого и общепринятого определения понятия риска. Спектр множества определений весьма широк: от общеметодологических формулировок до строгих математических понятий. Анализ публикаций позволяет выделить два основных подхода к понятию риска:

- ✓ риск — это ожидаемый ущерб (как правило, в стоимостном выражении) с указанием меры неопределённости его достижения;
- ✓ риск — это безразмерная мера неопределённости осуществления неблагоприятного события с заданным ущербом/уровнем вреда.

Принципиальное различие подходов отчасти может быть объяснено тем обстоятельством, что, как указывают авторы работы [1], в английском языке слово «риск» имеет два значения: существо неблагоприятного события и вероятность (возможность) этого события.

Взаимосвязь этих подходов очевидна: имея совокупность неопределенностей осуществления неблагоприятного события с заданным ущербом для исчерпывающего множества различных ущербов, можно оценить ожидаемый средний (максимальный, минимальный, наиболее вероятный и т.п.) ущерб и получить представление о вероятностном распределении ущерба. При этом под ущербом может пониматься и более широкое понятие вреда в соответствующих единицах измерения.

Понимание ведущей роли неопределённости в анализе и оценке риска, в том числе и экологического риска, способствовало развитию статистического подхода, базовыми методами которого служат вероятностный (частотный) анализ и байесовский подход [2]. В работе [3] приводится краткий обзор развития вероятностного анализа в области оценки риска.

Согласно [4], понятие риска относится к влиянию неопределённости на достижение целей. Риск выражает вероятность события и его «вклад» наравне с возможностью воздействия на достижение целей некоторой структуры (организации). Как видно, это определение вполне согласуется с определением международного стандарта [5].

Современные представления о риске отдают предпочтение вероятностному подходу. Так, в законе «Об охране окружающей среды» [6] определение для экологического риска дано без нечётких терминов: «экологический риск — это вероятность наступления события, имеющего неблагоприятные последствия для природной среды и вызванного негативным воздействием хозяйственной и иной деятельности, чрезвычайными ситуациями природного и техногенного характера».

В 2007 году Агентство по охране окружающей среды США опубликовало отчёт, в котором был представлен анализ деятельности по оценке экологических рисков и определены пути развития методологической базы [7]. В отчете было отмечено, что развитие практики оценивания экологических рисков возможно путем совершенствования методов и инструментария в направлении более полного охвата физических, биологических и социально-экономических аспектов рассматриваемых проблем для принятия более обоснованных ре-

шений. В частности, речь идёт о пространственной и временной детализации, учёте сложности биологических систем и реакции окружающей среды на воздействия единичных или множественных источников.

Вероятностный подход к оценке риска наилучшим образом обеспечивает реалистичность оценок, которые недостижимы для детерминированных методов и, кроме того, позволяет учесть кумулятивный эффект множественных источников неопределённости. Однако применение вероятностного подхода требует дополнительных знаний и данных. В отношении вероятностного подхода к оценке экологических рисков Агентство отмечает, что применение аппарата теории вероятностей позволяет успешно решать проблемы учета неопределённостей, (при этом, правда, желательно иметь достаточно репрезентативные выборки).

Вариантом строгого подхода к «сочетанию» ущербов и неопределённостей может служить цитата из [8]: «...теоретико-вероятностным аналогом понятия ущерба, очевидно, является понятие случайной величины. Совокупность же значений случайной величины и их вероятностей в теории вероятностей задается распределением случайной величины. Таким образом, под риском хотелось бы понимать случайную величину. Однако, если риски отождествляются со случайными величинами, заданными на разных вероятностных пространствах, задача сравнения таких рисков оказывается принципиально неразрешимой и даже бессмысленной, так как соответствующие им случайные величины как функции элементарных исходов зависят от аргументов, имеющих разный смысл. Поэтому в подобных ситуациях приходится отождествлять риски с функциями распределения». В цитируемой работе объектом исследования является распределение случайной величины итогового страхового фонда или остатка средств страховой компании по некоторому фиксированному множеству договоров страхования.

Математическое обоснование моделирования финансовых рисков как функционалов на множествах распределений с определенными свойствами разработано в [9]. В этой работе измерение риска понимается как количественное описание предпочтений на множестве вероятностных распределений. Лаконичное, но вполне исчерпывающее определение риска дано в лекциях [10], а именно, риском называется любое распределение из множества всех вероятностных распределений на измеримом множестве результатов (т.е. на множестве результатов с соответствующей  $\sigma$ -алгеброй). В настоящей работе автор также будет придерживаться вероятностного подхода к оценке риска.

### ***Проблемы учёта гидрометеорологических факторов***

Представляется очевидным, что гидрометеорологические (в т.ч. и климатические) и географические факторы чрезвычайно важны для перечисленных видов воздействий, поскольку эти факторы могут усиливать/ослаблять эффект антропогенного воздействия (см., например, относительно благополучный исход инцидента в британском секторе Северного моря на нефте- и газодобывающей платформе компании «Тоталь», который привёл к утечке природного газа в 2012 году), а в ряде случаев могут быть источником возникновения экологических опасностей (ярчайшим примером может служить катастрофа на атомной станции Фукусима как следствие цунами).

Гидрометеорологические (в т.ч. и климатические) и географические факторы чрезвычайно важны для различных видов воздействий на окружающую среду, поскольку эти факторы могут быть причиной экологического риска и/или усиливать/ослаблять эффект антропогенного воздействия, однако в известных методах оценки экологических рисков гидрометеорологический фактор, как правило, в явном виде не присутствует.

В качестве одной из немногих попыток учесть природные факторы можно привести подход компании RAND Corporation к расчету риска в специальном исследовании, правда, связанным с оценкой оборонного потенциала США. RAND Corporation использует две величины: вероятность будущей угрозы и степень влияния на состояние обороны США [11]. Примечательно, что, хотя в работе приводятся лишь иллюстративные значения характеристик рисков, для такой опасности как природные катастрофы авторы вне зависимости от выбранной стратегии действий приводят одинаковые значения. Другими словами, при любой стратегии действий риск подвергнуться природной катастрофе как вероятное событие с фиксированными последствиями одинаков.

В то же время наблюдаются климатические изменения, вследствие которых вероятности природных катастроф также претерпевают изменения. Таким образом, возникает потребность формулирования метода оценки риска как величины, явно зависящей от гидрометеорологических факторов.

### ***Формальное описание метода оценки экологического риска с учетом гидрометеорологических факторов***

Будем предполагать, что выбраны и зафиксированы пространственные и временные условия оценки экологического риска. В основу метода положены следующие представления:

- ✓ гидрометеорологические факторы могут влиять на реализацию опасной экологической ситуации (либо могут быть причиной возникновения экологической угрозы, либо могут быть катализатором/ингибитором экологической угрозы);

- ✓ гидрометеорологические факторы, относящиеся к выбранным условиям времени и места, формируются независимо от других факторов;
- ✓ гидрометеорологические явления могут быть совместными вероятностными событиями;
- ✓ экологические угрозы могут быть следствием гидрометеорологических факторов (угрозы природного характера) или формироваться независимо (угрозы техногенного характера), при этом степень потенциального экологического ущерба может зависеть от гидрометеорологических факторов;
- ✓ экологические угрозы могут быть совместными вероятностными событиями.

Будем называть гидрометеорологическим фактором совокупность гидрометеорологических явлений, а экологической ситуацией — совокупность экологических угроз.

Пусть  $H = \{H_s\}_{s=1}^S$  — полная система попарно несовместных гидрометеорологических факторов (т.е., полная система гипотез), индуцированных совокупностью неблагоприятных гидрометеорологических явлений  $h_j, j = 1, 2, 3, \dots, J$ , относящиеся к выбранным условиям времени и места.

Т.е. события  $H_s$  представляют собой всевозможные произведения (в вероятностном смысле) явлений  $h_j$  и их отсутствия  $\bar{h}_k$  вида  $\prod_{r=1}^J h_{l_r} \prod_{g=1}^J \bar{h}_{l_g}, l_r, l_g \in \{1, 2, \dots, J | l_r \neq l_g\}$ . Например, гидрометеорологический фактор (гипотеза)  $H_s$  может состоять в наличии опасности условий появления дрейфующего льда и возникновения брызгового обледенения без опасности встречи с айсбергом и т.п.

Пусть  $Q = \{Q_m\}_{m=1}^M$  — полная система попарно несовместных неблагоприятных экологических ситуаций (т.е., другая полная система гипотез), индуцированных совокупностью экологических угроз (природного или техногенного характера)  $q_j, j = 1, 2, 3, \dots, K$  в тех же условиях времени и места.

События  $Q_m$  также представляют собой всевозможные произведения (в вероятностном смысле) экологических угроз  $q_j$  и их отсутствия  $\bar{q}_k$  вида  $\prod_{r=1}^K q_{l_r} \prod_{g=1}^K \bar{q}_{l_g}, l_r, l_g \in \{1, 2, \dots, K | l_r \neq l_g\}$ . Например, экологическая ситуация (гипотеза)  $Q_m$  может состоять в наличии опасности условий разлива нефти и пожара без столкновения с другим судном и т.п.

Пусть  $L$  — величина экологического ущерба, который может возникнуть в результате реализации той или иной экологической ситуации,  $L \in [0, L_{max}]$ . Предполагается, что ущербы имеют одну размерность (например, либо ущерб выражен в денежных единицах, либо представляет собой степень (долю) снижения численности популяции и т.п.).

Тогда (полная) вероятность возникновения экологической ситуации  $Q_m$  с учётом гидрометеорологических факторов может быть определена как

$$P(Q_m) = \sum_{s=1}^S P(H_s)P(Q_m/H_s). \quad (1)$$

Здесь  $P(H_s)$  — безусловная вероятность реализации  $s$ -го гидрометеорологического фактора,  $P(Q_m/H_s)$  — условная вероятность реализации экологической ситуации  $Q_m$  в условиях действия гидрометеорологического фактора  $H_s$ .

Формула (1) даёт вероятность возникновения экологической ситуации как величину, зависящую от состояния гидрометеорологических параметров, которые могут увеличивать или ослаблять степень экологической угрозы.

Под риском получения экологического ущерба  $L$  при реализации ситуации  $Q_m$  будем понимать величину

$$P(L) = \sum_{m=1}^M P(Q_m)P(L/Q_m), \quad (2)$$

где  $L$  — экологический ущерб,  $P(Q_m)$  — безусловная вероятность возникновения экологической ситуации  $Q_m$  (вероятность возникновения частной экологической ситуации),  $P(L/Q_m)$  — условная вероятность возникновения экологического ущерба  $L$  при реализации экологической ситуации  $Q_m$ .

Подставляя выражение (1) в формулу (2), получаем полную вероятность возникновения экологического ущерба  $L$  с учётом действия гидрометеорологических факторов:

$$P(L) = \sum_{m=1}^M \sum_{s=1}^S P(H_s)P(Q_m/H_s)P(L/Q_m), \quad (3)$$

которая является выражением для экологического риска возникновения ущерба  $L$ .

*Определение.* Распределение  $F = \{P(L_i)\}_{i=1}^I$  ущерба  $L$  как случайной величины для дискретного набора реализаций  $\{L_1, L_2, \dots, L_I\}$  или функция распределения  $F(x) = P(L < x)$  для непрерывного случая суть выражения для оценки экологического риска с учетом гидрометеорологических факторов.

Очевидно, что средний (ожидаемый) ущерб вычисляется по формуле:

$$\bar{L} = \sum_{i=1}^I P(L_i) L_i \quad (4)$$

для дискретного случая или как

$$\bar{L} = \int x dF(x)$$

для непрерывного варианта, где интегрирование идет по множеству значений ущерба.

В простейшем случае, когда  $I = 1$ , формула (4) приобретает вид  $\bar{L} = PL$ , которая широко применяется в многочисленных публикациях как мера риска.

Практическая значимость формулы (3) во многом определяется выбором систем гипотез  $H$  и  $Q$ . Излишняя детализация приведёт к недостатку данных для расчёта вероятностей (частот), а чрезмерное укрупнение может иметь следствием пропуск значимых для оценки рисков событий.

### ***К выбору условных вероятностей***

Любое знание о состоянии природы, используемое при оценке риска, носит прогностический характер. Чем точнее прогноз, тем более обоснованной будет оценка риска, и тем больше доверия к ней будет со стороны потребителя, что, в конечном итоге, позволит принять адекватное решение о выборе образа действия при осуществлении своей деятельности. Однако любой прогноз обладает неустранимой неопределённостью, которую необходимо оценивать и учитывать при принятии решений. Для конкретных прогностических методов может быть выполнена практическая оценка предельной предсказуемости состояния природы.

Из формулы (1) следует, что для оценки риска деятельности необходимо знать вероятности  $P(H_s)$  реализации  $s$ -го гидрометеорологического фактора, т.е. вероятности возникновения опасных состояний природной среды в районе и месте осуществления экологической угрозы.

Если нет данных о прогнозе состояния среды, в качестве вероятности реализации го гидрометеорологического фактора принимается климатическая вероятность возникновения опасного гидрометеорологического явления (комбинации явлений). Тогда

$$P(H_s) = P_{\text{клим}}(H_s), \quad (5)$$

где  $P_{\text{клим}}(H_s)$  — климатическая вероятность возникновения обобщённого опасного гидрометеорологического явления (фактора) в районе потенциальной экологической угрозы в период времени, на который рассчитывается риск. Климатические вероятности определяются как частоты возникновения явления  $H_s$  и либо приводятся в климатических справочниках, либо рассчитываются стандартным образом на основе имеющихся статистических данных.

При наличии данных о прогнозе состояния среды оценка риска для принятия решения о выборе стратегии и тактики деятельности зависит от качества прогностической информации и доверия или недоверия прогнозу.

В случае недоверия прогнозу величина  $P(H_s)$  рассчитывается по формуле (5), в случае доверия прогнозу

$$P(H_s) = P(\tilde{H}_s/H_s), \quad (6)$$

где  $P(\tilde{H}_s/H_s)$  — элемент матрицы сопряжённости используемого метода прогноза [12,13] или условная вероятность осуществления прогноза [14], т.е. вероятность осуществления явления  $H_s$  при условии, что оно прогнозировалось. Величины  $P(\tilde{H}_s/H_s)$  предоставляются соответствующей системой гидрометеорологического обеспечения.

### **Выводы**

Гидрометеорологические факторы существенным образом влияют на состояние экологической обстановки, являясь причиной усиления/ослабления экологической опасности, а в ряде случаев и собственно причиной возникновения экологической опасности.

Предложенный метод оценки экологического риска с учётом гидрометеорологических факторов позволяет учесть неопределённость в наших знаниях о состоянии природной среды при оценке экологических рисков, что несомненно актуально и для арктического региона.

Для полноценной реализации предложенного метода нужны репрезентативные выборки, позволяющие рассчитать оценки вероятностей реализации гидрометеорологических факторов, возникновения экологической ситуации, реализации экологической ситуации в условиях действия гидрометеорологического фактора и вероятностей возникновения экологического ущерба при реализации экологической ситуации и/или адекватные модели для оценок перечисленных величин.

Поскольку необходимые данные либо чрезвычайно фрагментарны, либо, что чаще всего, просто отсутствуют, очевидно, что оценки экологического риска требуют осуществления систематического комплексного экологического и гидрометеорологического мониторинга, в том числе и в Арктике.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России по государственному контракту от 14.03.2013 г. № 14.515.11.0001 в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы».*

### **Литература**

1. Beninson D., Lindell B. Critical views on the application of some methods for evaluating accident probabilities and consequences // IAEA-CN-39/4; Stockholm; Sweden. - 1980. Pp. 325-341.
2. Adler M. Against «Individual Risk»: A Sympathetic Critique of Risk Assessment / 153 University of Pennsylvania Law Review. – 2005. – Pp.1121-1250.
3. Fox D.R. and Burgman M. Ecological risk assessment / In Melnick, E. and Everitt, B. (eds)., Encyclopedia of Quantitative Risk Assessment and Analysis. pp 1600-1603. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK. – 2008.



4. Framework for the Management of Risk / Treasury Board of Canada Secretariat, Government of Canada, August 2010. URL: <http://www.tbs-sct.gc.ca/pol/doc-eng.aspx?id=19422&section=text#cha1>(дата обращения: 23 мая 2013 г.)
5. ISO 31000:2009—Risk Management: Principles and Guidelines / International Organization for Standardization (ISO), Geneva, 2009. - 24 pp.
6. Федеральный закон от 10 января 2002 г. № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды» / Принят Государственной Думой Российской Федерации 20 декабря 2001 года.
7. Dale V., Meyer J. Advice to EPA on Advancing the Science and Application of Ecological Risk Assessment in Environmental Decision Making: A Report of the U.S. EPA Science Advisory Board / U.S. Environmental Protection Agency, Office of the Administrator, Science Advisory Board, 2007 -163 pp.
8. Королев В.Ю., Бенинг В.Е., Шоргин С.Я. Математические основы теории риска. — М., Физматлит, 2007, 591 с.
9. Новоселов А.А. Математическое моделирование финансовых рисков. Теория измерения / Новосибирск, 2001. – 99 с.
10. Новоселов А.А. Основные понятия теории риска / Лекция для студентов Института математики СФУ. – 2001. URL: <http://risktheory.ru/lectures.htm> (дата обращения: 18 апреля 2013 г.)
11. Frank C., et al. Managing risk in USAF force planning / RAND Corporation, United States Air Force under Contract FA7014-06-C-0001. - 2009. – 15 pp. URL: <http://www.rand.org>(дата обращения: 26 апреля 2013 г.)
12. Жуковский Е.Е. Метеорологическая информация и экономические решения. –Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 304 с.
13. Murphy, A.H. and Katz, R.W., Probability, statistics, and decision making in the atmospheric sciences, Boulder, CO: Westview Press, 1985, p. 547.
14. Дмитриев В.Г. Вероятностная интерпретация прогноза дат достижения морским льдом толщины 20-25 см в арктических морях // Метеорология и гидрология, № 9, 2004 г., с. 45-56.

*Рецензент: Морозова Людмила Владимировна,  
доктор биологических наук, профессор*