

doi: <https://doi.org/10.15407/knit2019.01.038>

УДК 533.6.011.6+523.682

Л. Ф. Черногор

Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, Харьков, Украина

ЭФФЕКТИВНОСТЬ МОНИТОРИНГА КАТАСТРОФИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ КОСМИЧЕСКОГО И ЗЕМНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Работа посвящена актуальной проблеме — оценке эффективности мониторинга катастрофических процессов космического и земного происхождения. Целью настоящей работы является количественная оценка эффективности мониторинга, направленного на прогнозирование катастрофических процессов, вызванных космическими и земными источниками. Эффективность оценивается с использованием методов математической статистики и теории обнаружения сигналов. Получены соотношения, позволяющие рассчитать коэффициенты эффективности предупреждения опасностей (катастроф) и затрат, связанных с предсказанной катастрофой, за счет организации непрерывного комплексного мониторинга физических полей и их параметров, характеризующих катастрофы космического и земного происхождения. Показано, что коэффициент предупреждения катастрофы зависит только от условной вероятности пропуска опасности. Коэффициент затрат зависит от пяти параметров: априорной вероятности катастрофы, условных вероятностей ложной тревоги и пропуска опасности, относительных затрат, связанных с ложной тревогой и предотвращением последствий катастрофы при правильном ее предсказании. Оценен выигрыш от использования мониторинга для ряда катастроф космического и земного происхождения. В качестве космических катастроф выбраны солнечная супербурия, падение крупных космических тел, вспышки космического гамма-излучения и вспышки сверхновых звезд. В качестве земных катастроф выбраны извержения вулканов, землетрясения и другие опасности. Показано, что во многих случаях выигрыш может быть значительным. В других случаях малость выигрыша связана с невозможностью в настоящее время добиться низких значений вероятностей ложной тревоги и пропуска опасности.

Ключевые слова: катастрофические процессы, коэффициент затрат, коэффициент предупреждения, выигрыш, солнечная супербурия, падение космических тел, вспышки гамма-излучения, вспышки сверхновых, извержение вулкана, землетрясение, вероятность ложной тревоги, вероятность пропуска опасности.

ВВЕДЕНИЕ

Жителям нашей планеты угрожают возможные катастрофы как космического, так и земного происхождения. К первым относятся солнечные супербурии, сопровождаемые мощными вспышками и выбросами корональной массы; падения крупных космических тел (более 10 м в диаметре); вспышки космического гамма-излучения; вспышки сверхновых звезд в окрестности Солнечной системы и др. [1, 6, 7, 11, 12, 20, 23—25].

К катастрофам земного происхождения относятся извержения вулканов, мощные землетрясения, ураганы, лавины, оползни, цунами и многие другие процессы [6, 9, 10, 13, 14, 16, 17, 22].

Рост численности и плотности населения на Земном шаре, объема потребляемой энергии, увеличение добычи полезных ископаемых, истощение ресурсов, урбанизация, увеличение выбросов в атмосферу тепла и вредных веществ, усиление глобального потепления привели к образованию чуждой природе техносферы. В результате этого увеличилось количество техно-

© Л. Ф. ЧЕРНОГОР, 2019

генных и природных катастроф [4, 5, 13, 19, 21]. Считается, что это количество будет только увеличиваться [4, 19].

Изучению рисков катастроф и разработке превентивных мер посвящено большое количество работ (см., например, [2, 5, 13, 15, 18, 19, 21]). В работах [2, 18, 19] оцениваются вероятностные характеристики катастроф.

Так, в обзоре [18] приведена детальная информация о более чем 25 метриках для оценки рисков индивидуума, а также социальных, экономических, экологических и других рисков, вызванных катастрофами. Риск описывается при помощи функции вероятности наступления катастрофы и наносимого ею ущерба.

В работе [2] оценивается риск на основе разнородной геопространственной информации. Авторами предложен и обоснован метод решения поставленной задачи оценки риска и приведена схема системы оценивания плотности вероятности катастрофы.

Большинство катастроф, за исключением некоторых техногенных, невозможно предотвратить, но их можно предсказать. Главной задачей по обеспечению снижения негативных последствий катастроф космического и земного происхождения является организация непрерывного комплексного мониторинга многих параметров среды в системах «Солнце — межпланетная среда — магнитосфера — ионосфера — атмосфера — Земля (внутренние оболочки)» и «Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера». Сюда относится мониторинг сейсмических и вулканических процессов, атмосферной и космической погод, активности Солнца и т. д. При таком мониторинге будет получен огромный объем научной информации, подлежащий обработке и хранению, а также использованию в интересах минимизации ущерба от возможных катастроф различной природы.

Реализация мониторинга предполагает следующее.

1. Обеспечение непрерывного сбора данных о состоянии физических полей и процессах, способных привести к катастрофам.

2. Наличие суперкомпьютеров для обработки поступающих данных в реальном масштабе времени.

3. Наличие телекоммуникационных систем для обмена данными в глобальном масштабе.

4. Наличие прогностических моделей для выдачи прогнозов в различных пространственных и временных масштабах.

Другими словами, считается, что есть «предвестники» катастроф, и именно они подлежат выявлению. Для этого необходим комплексный и непрерывный мониторинг физических полей и их параметров.

Организация современного мониторинга потребует значительных финансовых затрат. В то же время затраты на ликвидацию последствий от произошедшей катастрофы в случае необнаружения ее наступления (в случае отсутствия мониторинга) могут значительно превысить затраты на создание непрерывного комплексного мониторинга, работы по предотвращению (ослаблению негативных последствий) предсказанной катастрофы и мероприятий при ложной тревоге.

Таким образом, важнейшей задачей является изучение эффективности мониторинга катастрофических процессов на нашей планете.

Целью настоящей работы является количественная оценка эффективности мониторинга, направленного на прогнозирование катастрофических процессов, вызванных космическими и земными источниками.

ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Задача оценки эффективности мониторинга, направленного на предсказание катастрофических процессов на нашей планете, является статистической. Она должна решаться с привлечением методов теории вероятностей и математической статистики.

Будем считать, что непрерывно работающая система мониторинга выдает сигнал об отсутствии или наличии тревоги. Качественными показателями системы мониторинга при условии априорного наличия сигнала S являются вероятность правильного обнаружения опасности D и вероятность пропуска сигнала, причем при этом образуется полная группа событий, а сумма названных вероятностей равняется 1.

Качественными показателями системы при условии априорного отсутствия сигнала являются

ся вероятность ложной тревоги и вероятность правильного необнаружения. При этом образуется полная группа событий, а сумма соответствующих вероятностей равняется 1.

Поскольку в общем случае отсутствует априорная информация о наличии или отсутствии сигнала, группу полных событий составляют следующие ситуации: правильное обнаружение, правильное необнаружение, ложная тревога и пропуск опасности.

Следовательно, при мониторинге возможны ошибки двух типов: ложная тревога с условной вероятностью $\alpha = P_1^1 S \bar{D}$, т. е. обнаружение сигнала S при отсутствии опасности (\bar{D}) и пропуск опасности с условной вероятностью $\beta = P(\bar{S} / D)$, т. е. необнаружение сигнала при наличии опасности. В системах мониторинга катастроф целесообразно неравенство $\alpha \gg \beta$, поскольку пропуск опасности приводит к непоправимым последствиям. Сигнал ложной тревоги приводит к дополнительным затратам. Разумеется, практический интерес представляет случай, когда $\beta \ll \alpha \ll 1$.

Эффективность предупреждения об опасности катастрофы определим при помощи следующего коэффициента:

$$k_D = \frac{P(D)}{P(DS)}, \quad (1)$$

где $P(D)$ — априорная, т. е. в отсутствие мониторинга, вероятность катастрофы, $P(DS)$ — вероятность необнаружения катастрофы при работе системы мониторинга. Конечное значение этой вероятности свидетельствует о том, что модель, связывающая измеряемые параметры с катастрофой, является не до конца полной. Используемые «предвестники» не дают полной гарантии в предсказании катастрофы.

По теореме об умножении вероятностей

$$P(D\bar{S}) = P(D)P(\bar{S} / D). \quad (2)$$

Тогда из выражений (1) и (2) получаем

$$k_D = \frac{1}{P(\bar{S} / D) \beta} = \frac{1}{\beta}. \quad (3)$$

Из (3) следует, что при уменьшении β эффективность предупреждения об опасности катастрофы быстро увеличивается. Важно, что k_D не зависит от априорной вероятности $p \equiv P(D)$.

В качестве априорных примем следующие затраты: затраты L от катастрофы при ее непредсказании; затраты l на мероприятия по минимизации последствий катастрофы при правильном ее предсказании; l_β — затраты на мероприятия в случае ложной тревоги. Введем параметры $\delta = l / L \ll 1$, $\gamma = l_\beta / l \leq 1$.

Реально затраты ξ являются случайной величиной. Будем их описывать при помощи математического ожидания. Математическое ожидание затрат в отсутствие мониторинга [2] равно

$$M[\xi_0] = Lp, \quad (4)$$

а при его наличии —

$$M[\xi] = L\beta p + l(1 - \beta)p + l_\beta \alpha(1 - p). \quad (5)$$

Как видно из соотношения (4), в отсутствие мониторинга математическое ожидание определяется лишь априорными значениями L и p . При наличии мониторинга (соотношение (5)) математическое ожидание состоит из трех частей: первая из них пропорциональна затратам L , априорной вероятности p наступления катастрофы и вероятности пропуска опасности β , вторая — затратам l , априорной вероятности p и вероятности не пропуска опасности $(1 - \beta)$, а третья — затратам l_β , вероятности ложной тревоги α и априорной вероятности избежания катастрофы.

Из (4) и (5) получаем выражение для коэффициента эффективности затрат; представляющих собой выигрыш в затратах за счет организации мониторинга (далее — выигрыш):

$$K = \frac{1}{\beta + [(1 - \beta) + \alpha\gamma(1 - p)p^{-1}]\delta}. \quad (6)$$

При $1 - p \ll 1$ имеем

$$K \approx \frac{1}{\beta + (1 - \beta)\delta}, \quad (7)$$

т. е. K не зависит от α и γ , а также от p .

Если к тому же $\beta \ll 1$, то из (7) получим

$$K \approx \frac{1}{\beta + \delta}. \quad (8)$$

Если же $p \ll 1$, то

$$K \approx \frac{1}{\beta + [(1 - \beta) + \alpha\gamma p^{-1}]\delta}. \quad (9)$$

При $\beta \ll 1$ выражение (9) несколько упрощается:

$$K \approx \frac{1}{\beta + (1 + \alpha \gamma p^{-1}) \delta}. \quad (10)$$

Из выражения (9) следует, что K зависит от α , β , γ и δ , а также от p . При $\alpha \gamma p^{-1} \ll 1$ из выражения (10) имеем

$$K \approx \frac{1}{\beta + \delta}, \quad (11)$$

т. е. выражение (11) совпадает с (8). В случае обратного неравенства

$$K \approx \frac{1}{\beta + \alpha \gamma p^{-1} \delta}. \quad (12)$$

Из выражения (12) видно, что при уменьшении p коэффициент K может уменьшаться, т. е. эффективность мониторинга будет снижаться.

Оптимальное значение $K_{\text{опт}}$, независимо от значения p , дается выражениями (8) и (11) при $\beta \ll \delta$. Тогда

$$K_{\text{опт}} \approx \frac{1}{\delta} = \frac{L}{l} \gg 1.$$

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Для расчета выигрыша использовалось соотношение (6). При этом рассматривались два предельных случая: априорная вероятность катастрофы большая ($p \approx 0.9$) и ее априорная вероятность достаточно мала ($p \approx 10^{-2}$). В обоих случаях параметры $\gamma = 0.5$, α и β изменялись от 10^{-6} до 10^{-1} . В таких же пределах варьировался и параметр δ .

Большая априорная вероятность катастрофы.

Результаты расчета $K(\alpha, \beta)$ при $p \approx 0.9$, $\gamma = 0.5$ и $\delta = 10^{-4}$ приведены на рис. 1. Видно, что при увеличении β выигрыш уменьшается от 10^4 до 10, причем K практически не зависит от вероятности ложных тревог.

Зависимость $K(\alpha, \delta)$ для $p = 0.9$, $\gamma = 0.5$ и $\beta = 10^{-5}$ показана на рис. 2. Можно видеть, что при увеличении δ от 10^{-6} до 10^{-1} значения K уменьшаются от 10^5 до 10. При этом значения K также практически не зависят от величины α .

Результаты расчета $K(\beta, \delta)$ для $p = 0.9$, $\gamma = 0.5$ и $\alpha = 10^{-4}$ представлены на рис. 3, из которого видно, что при малых $\delta = 10^{-6}$ и $\beta = 10^{-6}$ достигается максимальный выигрыш ($K_{\text{max}} = 5 \cdot 10^5$). При увеличении как β , так и δ значения K постепенно уменьшаются до 5–10.

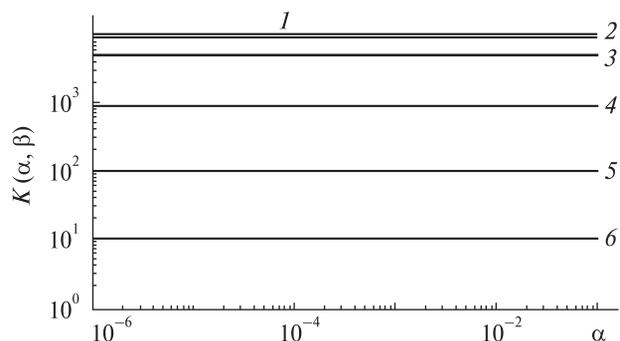


Рис. 1. Зависимость выигрыша $K(\alpha, \beta)$ от вероятностей ложной тревоги и пропуска опасности при $p = 0.9$, $\gamma = 0.5$, $\delta = 10^{-4}$: 1 — при $\beta = 10^{-6}$, 2 — при $\beta = 10^{-5}$, 3 — при $\beta = 10^{-4}$, 4 — при $\beta = 10^{-3}$, 5 — при $\beta = 10^{-2}$, 6 — при $\beta = 10^{-1}$

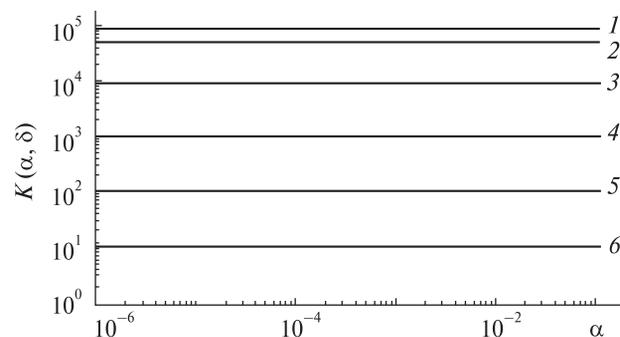


Рис. 2. Зависимость выигрыша $K(\alpha, \delta)$ от вероятности ложной тревоги и относительных затрат при $p = 0.9$, $\gamma = 0.5$, $\beta = 10^{-5}$: 1 — при $\delta = 10^{-6}$, 2 — при $\delta = 10^{-5}$, 3 — при $\delta = 10^{-4}$, 4 — при $\delta = 10^{-3}$, 5 — при $\delta = 10^{-2}$, 6 — при $\delta = 10^{-1}$

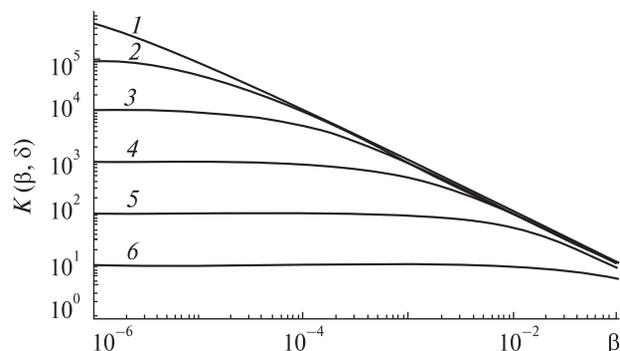


Рис. 3. Зависимость выигрыша $K(\beta, \delta)$ от вероятности пропуска опасности и относительных затрат при $p = 0.9$, $\gamma = 0.5$, $\alpha = 10^{-4}$: 1 — при $\delta = 10^{-6}$, 2 — при $\delta = 10^{-5}$, 3 — при $\delta = 10^{-4}$, 4 — при $\delta = 10^{-3}$, 5 — при $\delta = 10^{-2}$, 6 — при $\delta = 10^{-1}$

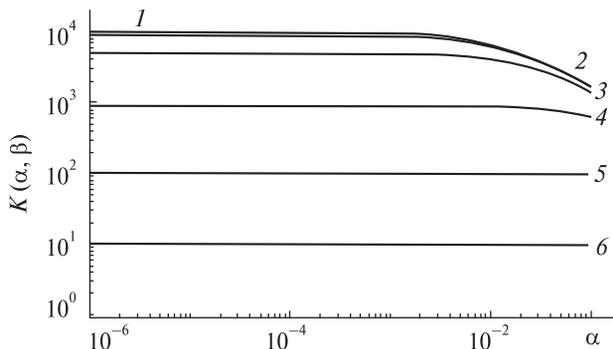


Рис. 4. Зависимость выигрыша $K(\alpha, \beta)$ от вероятностей ложной тревоги и пропуска опасности при $p = 0.01$, $\gamma = 0.5$, $\delta = 10^{-4}$: 1 — при $\beta = 10^{-6}$, 2 — при $\beta = 10^{-5}$, 3 — при $\beta = 10^{-4}$, 4 — при $\beta = 10^{-3}$, 5 — при $\beta = 10^{-2}$, 6 — при $\beta = 10^{-1}$

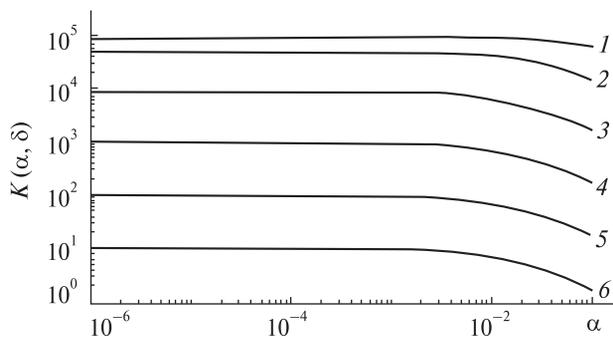


Рис. 5. Зависимость выигрыша $K(\alpha, \delta)$ от вероятности ложной тревоги и относительных затрат при $p = 0.01$, $\gamma = 0.5$, $\beta = 10^{-5}$: 1 — при $\delta = 10^{-6}$, 2 — при $\delta = 10^{-5}$, 3 — при $\delta = 10^{-4}$, 4 — при $\delta = 10^{-3}$, 5 — при $\delta = 10^{-2}$, 6 — при $\delta = 10^{-1}$

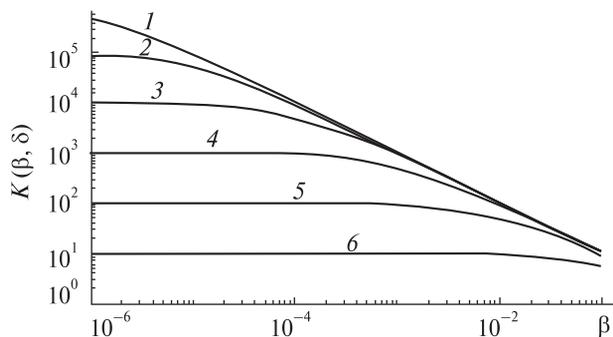


Рис. 6. Зависимость выигрыша $K(\beta, \delta)$ от вероятности пропуска опасности и относительных затрат при $p = 0.01$, $\gamma = 0.5$, $\alpha = 10^{-4}$: 1 — при $\delta = 10^{-6}$, 2 — при $\delta = 10^{-5}$, 3 — при $\delta = 10^{-4}$, 4 — при $\delta = 10^{-3}$, 5 — при $\delta = 10^{-2}$, 6 — при $\delta = 10^{-1}$

Малая априорная вероятность катастрофы. Зависимость $K(\alpha, \beta)$ при $p = 10^{-2}$, $\gamma = 0.5$ и $\delta = 10^{-4}$ показана на рис. 4, из которого следует, что при малых значениях β коэффициент K существенно зависит от вероятности ложных тревог. С увеличением α от 10^{-6} до 10^{-1} максимальное значение K уменьшается от 10^4 до $6.7 \cdot 10^2$. При $\beta = 10^{-2} \dots 10^{-1}$ величина K от α практически не зависит.

Результаты расчета $K(\alpha, \delta)$ для $p = 10^{-2}$, $\gamma = 0.5$ и $\beta = 10^{-5}$ приведены на рис. 5, из которого можно видеть, что при $\alpha \geq 10^{-2}$ выигрыш существенно зависит от α .

Зависимость $K(\beta, \delta)$ при $p = 10^{-2}$, $\gamma = 0.5$ и $\alpha = 10^{-4}$ показана на рис. 6. Видно, что она практически ничем не отличается от зависимости, приведенной на рис. 3. Это означает, что при $p \geq 5 \cdot 10^{-4}$ и $\alpha = 10^{-4}$ коэффициент K практически не зависит от p . Если же $p = 10^{-6}$, $\gamma = 0.5$ и $\alpha = 10^{-4}$, то $K_{\max} \approx 2 \cdot 10^4$ (при $\beta = \delta = 10^{-6}$), т. е. в 25 раз меньше, чем при $p = 0.9$, $\gamma = 0.5$ и $\alpha = 10^{-4}$. При $\alpha = 10^{-6}$ зависимость от p снова становится малозначительной.

ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим несколько примеров катастроф космического и земного происхождения. Заметим, что строгая оценка параметров p , α , β , γ и δ затруднена и далеко не тривиальна. Поэтому ниже в качестве примеров приводятся ориентировочные, но вполне возможные значения перечисленных параметров. Их выбор, конечно, не лишен некоторого субъективизма. По мере совершенствования мониторинга эти параметры будут уточняться.

Солнечная супербура. Супербура на Солнце может сопровождаться увеличением на несколько порядков энергии вспышек и корональных выбросов массы. При этом на Земле может возникнуть геокосмическая супербура. Обычно энергия и мощность вспышек не превышает значений 10^{25} Дж и 10^{22} Вт соответственно. Такие вспышки случаются один-два раза за 11-летний цикл солнечной активности.

К катастрофическим последствиям могут привести супервспышки с энергией около 10^{29} Дж

и мощностью 10^{26} Вт. При этом полностью разрушится озоносфера, которая сможет восстановиться примерно в течение одного года. Многие виды флоры и фауны не перенесут усиленного потока ультрафиолетового излучения. Вспышка может послужить триггером для начала оледенения поверхности Земли. Таких вспышек не было последние 7000 лет.

Вспышка с энергией 10^{26} Дж и мощностью 10^{23} Вт может произойти, например, раз в 300 лет $\approx 10^{10}$ с. При ее длительности, равной 10^3 с, $p \approx 10^{-7}$. Если положить $\alpha = 10^{-5}$, $\beta = 10^{-6}$, $\gamma = 0.5$ и $\delta = 10^{-4}$, из (6) получим, что мониторинг обеспечит выигрыш $K \approx 200$. Если же $\delta = 10^{-6}$, то $K \approx 2 \cdot 10^4$.

Кинетическая энергия выбросов корональной массы составляет $10^{24} \dots 10^{26}$ Дж, ей соответствует мощность около $10^{20} \dots 10^{23}$ Вт. В экстремальном случае эти параметры могут достичь 10^{27} Дж и $10^{23} \dots 10^{24}$ Вт соответственно [7]. При тех же значениях p , α , β , γ и δ имеем $K \approx 200 \dots 20000$.

Падение крупных космических тел. Тела с кинетической энергией $10 \dots 100$ Мт ТНТ могут упасть на Землю с частотой одно событие в 300 лет $\approx 10^{10}$ с [6]. При длительности воздействия на планету, равной 10 с, $p = 10^{-9}$. Пусть $\alpha = 10^{-5}$, $\beta = 10^{-6}$, $\gamma = 0.5$ и $\delta = 10^{-6}$. Тогда $K \approx 200$.

Вспышки космического гамма-излучения. Всплески этого излучения открыты в конце 1960-х гг. Их продолжительность Δt изменяется в широких пределах: от 10^{-3} до 10^4 с. Плотность потока энергии обычно не превышает 10^{-6} Дж/м², а общая энергия, падающая на поверхность Земли — 0.5 ГДж. Гамма-всплески приводят к разрушению озонового слоя. По нашим оценкам, при потоке порядка 1 МДж/м² объем озонового слоя за месяц сократится на 98% .

Вероятность значительного (на $10 \dots 12$ порядков) увеличения интенсивности космического гамма-излучения очень невелика, но она отлична от нуля. Для оценки $p = \Delta t/T$, где T — средний интервал между двумя событиями, необходимо изучить типы звезд, которые могут взрываться как сверхновые, оценить количество таких звезд в окрестности Солнечной системы. Примем для примера, что $\Delta t = 10$ с, $T = 3 \cdot 10^5$ лет $\approx 10^{13}$ с, т. е. $p = 10^{-12}$, $\alpha = 10^{-5}$, $\beta = 10^{-6}$, $\gamma = 0.5$ и $\delta = 10^{-6}$. Тогда $K \approx 0.2$, т. е. выигрыш от мониторинга не

достигается. Для увеличения K необходимо значительно уменьшить α и δ . Например, при $\alpha \approx 10^{-10}$, $\delta = 10^{-8}$ и тех же p , β и γ имеем $K \approx 6.6 \cdot 10^5$.

Вспышки сверхновых звезд. Для Земли опасность представляют лишь взрывы близких сверхновых звезд, удаленных на расстояния не более $10 \dots 100$ световых лет. В этом случае выделяется энергия 10^{46} Дж, ей соответствует мощность около $10^{40} \dots 10^{41}$ Вт. Энергия жесткого электромагнитного излучения при этом составляет $10^{42} \dots 10^{43}$ Дж, мощность — $10^{36} \dots 10^{38}$ Вт. Плотность потока энергии близка к $10^5 \dots 10^8$ Дж/м², а плотность потока мощности — $0.1 \dots 1000$ Вт/м². Для сравнения укажем, что плотность потока мощности оптического излучения Солнца на орбите Земли близка к 10^3 Вт/м².

Вспышки сверхновых приводят к истощению озонового слоя, экранированию земной поверхности плотными облаками, изменению климата и вымиранию биосферы.

В Галактике сверхновые взрываются один раз в $20 \dots 60$ лет, но близкие к Земле из них возникают один раз в 300 млн лет. При длительности процесса $\Delta t = 3$ года априорная вероятность $p = 10^{-8}$. Положим, что $\alpha = 10^{-5}$, $\beta = 10^{-6}$, $\gamma = 0.5$ и $\delta = 10^{-8}$. Тогда $K \approx 1.7 \cdot 10^5$. Если же δ увеличить до 10^{-6} , то $K \approx 1.7 \cdot 10^3$. При $\Delta t \approx 0.3$ года и $p = 10^{-9}$, $\alpha = 10^{-5}$, $\beta = 10^{-6}$, $\gamma = 0.5$ и $\delta = 10^{-8}$ имеем $K \approx 2 \cdot 10^4$.

Добавим, что данные [7] свидетельствуют, что вспышка, имевшая место 2.5 млн лет назад, могла существенно повлиять на развитие земной жизни.

Извержения вулканов. Положим, что длительность извержения вулкана $\Delta t \approx 1$ сут $\approx 10^5$ с, а $T \approx 30$ лет. Тогда $p = 10^{-4}$, $\alpha = 10^{-5}$, $\beta = 10^{-6}$, $\gamma = 0.5$ и $\delta = 10^{-6}$ и получим, что $K \approx 5 \cdot 10^5$. Выигрыш от мониторинга достигает значительных величин.

Землетрясения. В настоящее время предсказывать момент землетрясения с заданной достоверностью не удается. Поэтому вероятность ложных тревог очень велика, близка к единице. Велика и вероятность пропуска опасности. Положим что при длительности сейсмического процесса с афтершоками $\Delta t \approx 1$ сут $\approx 10^5$ с, а $T \approx 30$ лет $\approx 10^9$ с. Тогда при $p = 10^{-4}$, $\alpha = 1$, $\beta = 0.5$, $\gamma = 0.5$ и $\delta = 10^{-4}$ имеем $K \approx 1$. Как видим, выигрыша нет. Для увеличения K необходимо уменьшать α и β . Например, при $\alpha = \beta = 10^{-3}$ имеем $K \approx 700$.

Другие опасности. Как и для землетрясений, в настоящее время нет надежных методов предсказания моментов наступления многих других катастроф, к которым относятся цунами, лавины, оползни и др. Из-за больших значений α и β выигрыш $K \sim 1$.

Лучше других дело обстоит с прогнозом ураганов, тропических циклонов и тайфунов. В этом случае $p = 0.9$, $\alpha = 10^{-2}$, $\beta = 10^{-3}$. При $\gamma = 0.5$ и $\delta = 10^{-4}$ имеем $K \approx 10^3$. В этом случае выигрыш $K \approx \beta^{-1}$, т. е. определяется в основном значением β .

ОБЩИЙ ИТОГ

Анализ соотношений (6) и (9) показывает, что при достаточно малых значениях априорной вероятности наступления катастрофы p значения выигрыша могут уменьшаться. Такая ситуация неприемлема. Для ее устранения необходимо уменьшать вероятность ложных тревог α и параметр относительных затрат $\delta = l/L$. При достаточно малых α и δ имеем $K \approx \beta^{-1} \approx k_D$. В этом случае выигрыш близок к коэффициенту эффективности предупреждения и не зависит от α , γ , δ и p .

Приведенные оценки показали, что в ряде случаев выигрыш в затратах за счет применения непрерывного комплексного мониторинга опасностей может быть достаточно высоким, что подтверждает целесообразность такого мониторинга. Его применение существенно снижает негативные последствия космических и земных катастроф.

Добавим, что оценки рисков для космических и земных катастроф методически различаются. Земные катастрофы являются локализованными. Их характерный масштаб изменяется в пределах 1...1000 км. Применительно к локализованным катастрофам необходимо развивать подход, аналогичный подходу в работах [2, 18]. Он состоит в оценивании совокупного ожидаемого риска (совокупных ожидаемых затрат) в определенной области как интеграла от локального риска. Последний вычисляется как математическое ожидание функции ущерба с использованием плотности распределения вероятности катастрофы в заданной области пространства. Плотность распределения может быть оценена

на основе совместной обработки данных разнородного геопространственного мониторинга физических полей и их параметров. Такой подход является предметом другой работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Получены соотношения, позволяющие рассчитать коэффициенты эффективности предупреждения опасностей (катастроф) и затрат, связанных с предсказанной катастрофой, за счет организации непрерывного комплексного мониторинга катастроф космического и земного происхождения. Параллельно с мониторингом необходимо совершенствовать модели «предвестников».

2. Показано, что коэффициент предупреждения катастрофы зависит только от условной вероятности пропуска опасности.

Коэффициент затрат зависит от пяти параметров: априорной вероятности катастрофы, условных вероятностей ложной тревоги и пропуска опасности, относительных затрат, связанных с ложной тревогой и предотвращением последствий катастрофы при правильном ее предсказании.

3. Оценен выигрыш от использования мониторинга для ряда катастроф космического и земного происхождения. Показано, что во многих случаях выигрыш может быть значительным. В других случаях малость выигрыша связана с невозможностью в настоящее время добиться низких значений вероятностей ложной тревоги и пропуска опасности.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Вспышка* сверхновой могла повлиять на развитие земной жизни. — URL: <https://universemagazine.com/3700/>
2. Зельк Я. И., Куссуль Н. Н., Скакун С. В., Шелестов А. Ю. Оценка рисков стихийных бедствий на основе ансамблевой обработки и технологии слияния разнородных геопространственных данных // *Космічна наука і технологія*. — 2011. — 17, № 1. — С. 60–64.
3. Куракин А. Л., Лобковский Л. И. Экономическая оптимизация требований к системам геоэкологического мониторинга // *ДАН*. — 2012. — 446, № 1. — С. 86–88.
4. Осипов В. Н. Геоэкология — междисциплинарная наука о экологических проблемах геосфер // *Геоэколо-*

- гия. Инженерная геология. Гидроэкология. Геокриология. — 1993. — № 1. — С. 4—18.
5. Турчин А. Природные катастрофы и антропоный принцип. Проблемы управления рисками и безопасностью // Тр. Ин-та системного анализа РАН. — 2007. — 31. — С. 306—332.
 6. Черногор Л. Ф. Физика и экология катастроф. — Х.: ХНУ им. В. Н. Каразина, 2012. — 556 с.
 7. Черногор Л. Ф., Домнин И. Ф. Физика геокосмических бурь: Монография. — Х.: ХНУ им. В. Н. Каразина, Ин-т ионосферы НАН и МОН Украины, 2014. — 408 с.
 8. Bormann P.; Saul J. Earthquake magnitude // Encyclopedia of Complexity and Systems Science. — Springer-Verlag, New York, 2009. — Vol. 3. — P. 2473—2496.
 9. Bryan S. E.; Peate I. U.; Peate D. W.; Self S.; Jerram D. A.; Mawby M. R.; Marsh J. S.; Miller J. A. The largest volcanic eruptions on Earth // Earth-Sci. Revs. — 2010. — 102, N 3—4. 207—229. DOI:10.1016/j.earscirev.2010.07.001.
 10. Engdahl E. R., Villaseñor A. Chapter 41: Global Seismicity: 1900—1999 // International handbook of earthquake and engineering seismology / Eds W. H. K. Lee, P. C. Jennings, C. Kisslinger, H. Kanamori. — Acad. Press, 2002. — Part A. — P. 665—690. — ISBN 0-12-440652-1.
 11. Fan Y.; Piran T. Gamma-ray burst efficiency and possible physical processes shaping the early afterglow // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. — 2006. — 369, N 1. — P. 197—206. arXiv:astro-ph/0601054. Bibcode:2006MNRAS.369..197F. — DOI:10.1111/j.1365-2966.2006.10280.x.
 12. Gendre B., Stratta G., Atteia J. L., Basa S., Boër M., Coward D. M., Cutini S., d'Elia V., Howell E. J., Klotz A., Piro L. The ultra-long gamma-ray burst 111209A: The Collapse of a Blue Supergiant? // Astrophys. J. — 2013. — 766, N 1. — P. 30. — DOI:10.1088/0004-637X/766/1/30.
 13. Global Catastrophic Risks / Eds N. Bostrom, M. M. Cirrkovic. — Oxford: Univ. Press, 2011. — 576 p.
 14. Grünthal G. Earthquakes, intensity // Encyclopedia of Solid Earth Geophysics / Ed. by H. Gupta. — 2011. — P. 237—242. — ISBN 978-90-481-8701-0.
 15. Handbook of Cosmic Hazards and Planetary Defense / Eds J. N. Pelton, F. Allahdadi. — Springer, Cham, New York, NY, 2015. — LXX. — 1127 p.
 16. Hatakeyama N., Uchida N., Matsuzawa T., Nakamura W. Emergence and disappearance of interplate repeating earthquakes following the 2011 M9.0 Tohoku-Oki earthquake: Slip behavior transition between seismic and aseismic depending on the loading rate // J. Geophys. Res.: Solid Earth. — 2017. — 122, N 7. — P. 5160—5180.
 17. Hurricanes: climate and socioeconomic impacts 1 / Eds H. F. Diaz, R. S. Pulwarty. — Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1997. — 292 p.
 18. Jonkman S. N., van Gelder P. H. A. J. M., Vrijling J. K. An overview of quantitative risk measures for loss of life and economic damage // J. Hazard. Mater. — 2003. — A99. — P. 1—30.
 19. Kent A. A critical look at risk assessment for global catastrophes // J. Ref.: Risk Anal. — 2004. — 24. — P. 157—168.
 20. Levan A. J., Tanvir N. R., Starling R. L. C., Wiersema K., Page K. L., Perley D. A., Schulze S., Wynn G. A., Chornock R., Hjorth J., Cenko S. B., Fruchter A. S., O'Brien P. T., Brown G. C., Tunnicliffe R. L., Malesani D., Jakobsson P., Watson D., Berger E., Bersier D., Cobb B. E., Covino S., Cucchiara A., de Ugarte Postigo A., Fox D. B., Gal-Yam A., Goldoni P., Gorosabel J., Kaper L., et al. (2013-12-30). A new population of ultra-long duration gamma-ray bursts // Astrophys. J. — 2014. — 781, N 1. — P. 1—28. — DOI:10.1088/0004-637x/781/1/13.
 21. Natural hazards, unnatural disasters: the economics of effective prevention. — The World Bank and The United Nations, 2010. — 254 p.
 22. Rappaport N. E., Fernandez-Partagas J. The deadliest atlantic tropical cyclones, 1492 — 1996 / NOAA Technical Memorandum NWS NHC 47.
 23. Scalo J., Wheeler C. J. Astrophysical and astrobio logical implications of gamma-ray burst properties // Astrophys. J. — 2002. — 566. — P. 723—737.
 24. Vedrenne G., Atteia J.-L. Gamma-Ray Bursts: The brightest explosions in the Universe. — Springer, 2009. ISBN 978-3-540-39085-5.
 25. Woosley S. E., Bloom J. S. The Supernova Gamma-Ray Burst Connection // Annu. Rev. Astron. and Astrophys. — 2006. — 44. — P. 507—556. — DOI:10.1146/annurev.astro.43.072103.150558.

Стаття надійшла до редакції 29.10.2018

REFERENCES

1. Burst of supernova could affect on development Earth life. — URL: <https://universemagazine.com/3700/>
2. Zyelyk Ya. I., Kussul' N. M., Skakun S. V., Shelestov A. Yu. Natural disaster risk assessment based on the ensemble processing and technology of heterogeneous geospatial data fusion. *Kosmichna nauka i tehnologiya*, 17 (1), 60—64 (2011). DOI: 10.15407/knit2011.01.060
3. Kurakin A. L., Lobkovsky L. I. Economic optimization of specifications for geoecological monitoring systems. *Doklady Earth Sciences*, 446 (1), 1086—1088 (2012). DOI: 10.1134/S1028334X12090048
4. Osipov V. N. Geoecology is interdisciplinary science about ecological problems of geospheres. *Geoecology. Engineering geology. Hydroecology. Geocriology*, 1, 4—18 (1993) [in Russian].
5. Turchin A. Natural catastrophes and antropic principle. Problems of risk control and safety. *Proceeding of System Analyze Institute of RAS*. 31, 306—332 (2007) [in Russian].

6. Chernogor L. F. *Physics and Ecology of Disasters*, 556 p. (Kharkiv, Ukraine: V. N. Karazin Kharkiv National University Publ., 2012) [in Russian].
7. Chernogor L. F., Domnin I. F. *Physics of Geospace Storms: monograph*, 408 p. (Kharkiv, Ukraine: Kharkiv V. N. Karazin National University Publ., 2014) [in Russian].
8. Bormann P.; Saul J. Earthquake Magnitude, in *Encyclopedia of Complexity and Applied Systems Science*, 3, 2473–2496 (Springer-Verlag New York, 2009).
9. Bryan S. E.; Peate I. U.; Peate D. W.; Self S.; Jerram D. A.; Mawby M. R.; Marsh J. S.; Miller J. A. The largest volcanic eruptions on Earth. *Earth-Science Reviews*. **102**, (3–4). 207–227. (2010). Bibcode:2010ESRv.102..207B. doi:10.1016/j.earscirev.2010.07.001.
10. Engdahl E. R., Villaseñor A. Chapter 41: Global Seismicity: 1900–1999, in Lee, W.H.K., Jennings, P.C., Kisslinger, C., Kanamori, H. *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology, Part A*, 665–690 (Academic Press, 2002). ISBN 0-12-440652-1.
11. Fan Y.; Piran T. Gamma-ray burst efficiency and possible physical processes shaping the early afterglow. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **369** (1), 197–206 (2006). arXiv:astro-ph/0601054. Bibcode:2006MNRAS.369..197F. doi:10.1111/j.1365-2966.2006.10280.x.
12. Gendre B., Stratta G., Atteia J. L., Basa S., Boër M., Coward D. M., Cutini S., D’Elia V., Howell E., Klotz A., Piro L. The Ultra-Long Gamma-Ray Burst 111209A: The Collapse of a Blue Supergiant? *The Astrophysical Journal*, **766** (1), 30 (2013). DOI:10.1088/0004-637X/766/1/30.
13. Bostrom N., Cirkovic M. M. (Eds.) *Global Catastrophic Risks*, 576 p. (Oxford University Press, 2011).
14. Gr nthal G. Earthquakes, Intensity, in Gupta H. eds, *Encyclopedia of Solid Earth Geophysics*, 237–242 (2011). ISBN 978-90-481-8701-0.
15. *Handbook of Cosmic Hazards and Planetary Defense* [edited by Pelton J. N., Allahdadi F.], LXX, 1127 p. (Springer, Cham, New York, NY, 2015).
16. Hatakeyama N., Uchida N., Matsuzawa T., Nakamura W. Emergence and disappearance of interplate repeating earthquakes following the 2011 M9.0 Tohoku-Oki earthquake: Slip behavior transition between seismic and aseismic depending on the loading rate. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **122** (7), 5160–5180 (2017).
17. *Hurricanes: climate and socioeconomic impacts 1* [Eds by Henry F. Diaz, Roger S. Pulwarty], 292 p. (Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1997).
18. Jonkman S. N., van Gelder P. H. A. J. M., Vrijling J. K. An overview of quantitative risk measures for loss of life and economic damage. *Journal of Hazardous Materials*, **A99**, 1–30 (2003). DOI: 10.1016/S0304-3894(02)00283-2
19. Kent A. A critical look at risk assessment for global catastrophes. *J. Ref.: Risk Anal.*, **24**, 157–168 (2004).
20. Levan A. J.; Tanvir N. R.; Starling R. L. C.; Wiersema K.; Page K. L.; Perley D. A.; Schulze S.; Wynn G. A.; Chornock R.; Hjorth J.; Cenko S. B.; Fruchter A. S.; O’Brien P. T.; Brown G. C.; Tunnicliffe R. L.; Malesani D.; Jakobsson P.; Watson D.; Berger E.; Bersier D.; Cobb B. E.; Covino S.; Cucchiara A.; de Ugarte Postigo A.; Fox D. B.; Gal-Yam A.; Goldoni P.; Gorosabel J.; Kaper L.; et al. (2013-12-30). A new population of ultra-long duration gamma-ray bursts. *The Astrophysical Journal*, **781** (1), 1–28 (2014). DOI:10.1088/0004-637x/781/1/13.
21. *Natural hazards, unnatural disasters: the economics of effective prevention*, 254 p. (The World Bank and The United Nations, 2010).
22. Rappaport N. E., Fernandez-Partagas J. The Deadliest Atlantic Tropical Cyclones, 1492-1996 / NOAA Technical Memorandum NWS NHC 47.
23. Scalo J., Wheeler C. J. Astrophysical and Astrobiological Implications of Gamma-Ray Burst Properties. *Astrophys. J.*, **566**, 723–737 (2002).
24. Vedrenne G.; Atteia J.-L. *Gamma-Ray Bursts: The brightest explosions in the Universe*. (Springer, 2009). ISBN 978-3-540-39085-5.
25. Woosley S. E., Bloom J. S. The Supernova Gamma-Ray Burst Connection. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, **44**, 507–556 (2006). DOI:10.1146/annurev.astro.43.072103.150558.

Received 29.10.2018

Л. Ф. Черногор

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків, Україна

ЕФЕКТИВНІСТЬ МОНІТОРИНГУ КАТАСТРОФІЧНИХ ПРОЦЕСІВ КОСМІЧНОГО ТА ЗЕМНОГО ПОХОДЖЕННЯ

Роботу присвячено актуальній проблемі — оцінці ефективності моніторингу катастрофічних процесів космічного та земного походження. Метою цієї роботи є кількісна оцінка ефективності моніторингу, спрямованого на прогнозування катастрофічних процесів, викликаних космічними та земними джерелами. Ефективність оцінюється з використанням методів математичної статистики та теорії виявлення сигналів. Отримано співвідношення, що дозволяють розрахувати коефіцієнти ефективності попередження небезпек (катастроф) і витрат, пов’язаних з передбаченою катастрофою, за рахунок організації безперервного комплексного моніторингу фізичних полів і їх параметрів, що характеризують катастрофи космічного та земного походження. Показано, що коефіцієнт попередження катастрофи залежить тільки від умовної ймовірності пропуску небезпеки. Коефіцієнт витрат залежить від п’яти параметрів: апріорної ймовірності катастрофи, умовних ймовірностей хибної тривоги та пропуску небезпеки, відносних витрат, пов’язаних з хибною тривоگوю та запобіганням наслід-

ків катастрофи при правильному її передбаченні. Оцінено вигравш від використання моніторингу для низки катастроф космічного та земного походження. У якості космічних катастроф обрані сонячна супербуря, падіння великих космічних тіл, спалахи космічного гамма-випромінювання та спалахи наднових зірок. У якості земних катастроф обрано виверження вулканів, землетруси та інші небезпеки. Показано, що в багатьох випадках вигравш може бути значним. В інших випадках малість вигравшу пов'язана з неможливістю в даний час домогтися низьких значень ймовірностей хибної тривоги та пропуску небезпеки.

Ключові слова: катастрофічні процеси, коефіцієнт витрат, коефіцієнт попередження, вигравш, сонячна супербуря, падіння космічних тіл, спалахи гамма-випромінювання, спалахи наднових, виверження вулкану, землетрус, ймовірність хибної тривоги, ймовірність пропуску небезпеки.

L. F. Chernogor

V. N. Karazin Kharkiv National University,
Kharkiv, Ukraine

EFFECTIVENESS OF MONITORING CATASTROPHIC PROCESSES OF SPACE AND TERRESTRIAL ORIGIN

The work concerns an urgent problem — the assessment of the effectiveness of monitoring catastrophic processes of space and terrestrial origin. The purpose of this study is to provide quantitative estimates for the effectiveness of the monitoring

aimed at predicting catastrophic processes caused by space and terrestrial sources. The efficiency is assessed using the methods of mathematical statistics and signal detection theory. The obtained relations allow calculation indexes of the effectiveness of early warning of hazards (catastrophes) and of the costs of organizing the continuous complex multi-instrument monitoring of physical fields and their parameters characterized catastrophes of both origins. The index of the efficiency of the catastrophe warning has been shown to depend only on the conditional probability of the omission of a hazard. The cost index depends on five parameters: (1) the a priori probability of the catastrophe, (2) the conditional probability of a false alarm and (3) the conditional probability of the omission of a hazard, (4) the relative costs associated with a false alarm, and (5) costs saved by a successful prevention of catastrophe consequences, if prediction is correct. The gain from monitoring a few kinds of catastrophes of space and terrestrial origin has been estimated. Solar superstorms, the fall of large cosmic bodies, space gamma-ray bursts, and supernovae bursts have been chosen as cosmic catastrophes. Volcano eruptions, earthquakes, and other hazards have been chosen as terrestrial catastrophes. It has been shown that in many cases the gain could be significant. In other cases, the insignificance of the gain is due to the impossibility to attain low values of probabilities of the omission of a hazard and of a false alarm.

Keywords: catastrophic processed index of the costs, index of the early warning, gane, solar superstorm, celestial bodies entering, space gamma ray bursts, supernova star bursts, volcano eruption, earthquake, false alarm probability, miss probability.