

УДК 504.064.36:574,550.8

ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ДЛЯ НЕФТЕГАЗОДОБЫВАЮЩИХ КОМПЛЕКСОВ НА ШЕЛЬФЕ

© 2014 г. А. Л. Куракин, Л. И. Лобковский

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

e-mail: a.kurakin@inbox.ru

Поступила в редакцию 19.10.2012 г., после доработки 18.03.2012 г.

Требования к надежности сигналов мониторинговых систем (к ошибкам 1- и 2-го рода, т.е. ложным тревогам и пропускам опасности) выведены из соотношений затрат разного рода (как эксплуатационных, так и аварийных). Полученные выражения можно использовать для экономического обоснования технических требований к мониторинговым системам (оптимизации ТЗ). Для тех случаев, когда оптимальные параметры недостижимы, приводится достаточное условие экономической эффективности МС.

DOI: 10.7868/S0030157414010079

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на очевидную актуальность мониторинга с экологической точки зрения, проблема разработки и внедрения мониторинговых систем (МС) для контроля среды и предотвращения техногенных аварий [5] связана с недостаточной ясностью в вопросе экономической эффективности мониторинга. Сложности этого вопроса объясняются, во-первых, известными разночтениями в постановке задачи (например, с точки зрения общегосударственных интересов и с точки зрения фирм, занимающихся разработкой месторождений). Во-вторых, проблемой обоснования экономической эффективности МС может представляться случайный характер экономических затрат. Последние являются случайными как вследствие случайного возникновения самих опасностей и аварий, так и из-за возможных ошибок. Автоматическим МС (работающим в режиме обеспечения безопасности, т.е. подающим сигналы тревоги [2]) свойственны ошибки двух родов: ложная тревога о наличии опасности и необнаружение (пропуск) реальной опасности. Поскольку эти ошибки различаются по смыслу (по пагубности последствий), они называются ошибками 1- и 2-го рода.

Вследствие всех этих неопределенностей добывающие компании воздерживаются от вложений в мониторинг нефтегазодобычи, принимая риск в качестве неизбежного и неустраняемого фактора своей деятельности.

Некоторую ясность в данный вопрос вносят современные административные методы применения штрафных санкций к виновникам аварий. Размеры, например, финансовых потерь фирмы

ВР в результате известной аварии нефтедобывающей платформы в Мексиканском заливе колеблются (в зависимости от способов оценки) в диапазоне от 21 до 43 миллиардов долларов США.

После того, как размеры экологических бедствий стали обретать таким образом денежное выражение, стала решаемой и проблема несопоставимости ошибок 1- и 2-го рода. Принято было считать, что требования к этим ошибкам невозможно получить аналитическим путем, т.е. вывести из каких-либо теоретических соображений или обосновать математически. Традиционно предполагалось [6], что эти требования должны задаваться изначально, исходя из таких общих (неформальных и не поддающихся научному анализу) представлений как ценность человеческой жизни или экосистем, недопустимость социальных потрясений и кризисов (вызванных экологическими бедствиями), а также иных возможных последствий, опасностей и угроз для человеческой цивилизации.

Далее излагается метод [3] вывода требований к ошибкам 1- и 2-го рода из экономических установок: цены экологического ущерба и стоимости превентивных мероприятий.

МЕТОД

Определение ошибок и экологическая эффективность мониторинга. Оценим, прежде всего, экологическую эффективность мониторинга, являющуюся его исходной идеей. Начнем с известного определения точности МС.

Характеристики четырех возможных состояний МС (правильные и ошибочные решения)

Гипотеза о наличии опасности D	Гипотеза принимается (сигнал S)	Гипотеза отвергается (сигнала нет \bar{S})
Гипотеза верна (D)	Правильное обнаружение опасности $P(S, D) = P(S/D)P(D) = (1-\beta)p$ Затраты l – на предотвращение аварии	Ошибка 2-го рода – пропуск опасности $P(S, \bar{D}) = P(S/\bar{D})P(\bar{D}) = \beta p$ Затраты L – ущерб от произошедшей аварии
Гипотеза неверна (\bar{D})	Ошибка 1-го рода – ложная тревога $P(\bar{S}, D) = P(\bar{S}/D)P(D) = \alpha(1-p)$ Затраты l_f – на мероприятия по ложной тревоге	Правильное отсутствие тревоги $P(\bar{S}, \bar{D}) = P(\bar{S}/\bar{D})P(\bar{D}) = (1-\alpha)(1-p)$ Затраты отсутствуют – мероприятий нет

Вероятности α и β ошибок 1- и 2-го рода определяются тождественными равенствами вида

$$\alpha \equiv P(S/\bar{D}), \quad \beta \equiv P(\bar{S}/D), \quad (1)$$

где $P(S/\bar{D})$ – условная вероятность того, что сигнал S опасности будет подан при условии \bar{D} отсутствия последней, $P(\bar{S}/D)$ – условная вероятность того, что сигнал S опасности не будет подан при условии D наличия опасности. Обычными требованиями к ошибкам (являющимися по сути дела требованиями к работоспособности МС) являются требования $\alpha \ll 1$ и $\beta \ll 1$ – малости вероятностей обеих ошибок, причем вышеупомянутая асимметрия требований к МС выражается в виде дополнительного условия $\beta \ll \alpha$.

Эффективность предупреждения (распознавания опасности) естественно оценивать коэффициентом K_{ecol} вида

$$K_{ecol} \equiv \frac{P(D)}{P(D, S)}, \quad (2)$$

который показывает, во сколько раз изначальная (при отсутствии МС) вероятность $P(D)$ угроз (аварий, вредностей) больше вероятности $P(D, \bar{S})$ угроз, остающихся необнаруженными при функционировании МС. При учете элементарного выражения $P(D, \bar{S}) = P(\bar{S}/D)P(D)$ и определения (1) для вероятности β , выражение (2) приводится к виду

$$K_{ecol} = \frac{1}{\beta}. \quad (3)$$

Из соотношения (3) очевидно, что МС, отвечающие требованию малости β , соответствуют и условию экологической эффективности.

Экономическая эффективность и оптимизация МС. Как уже отмечалось, экономические затраты неизбежно оказываются случайной величиной – как вследствие случайного возникновения опас-

ностей и аварий, так и из-за ошибок 1- и 2-го рода. Тем не менее, вполне строгой количественной оценке поддается математическое ожидание (“среднее значение”) этих затрат.

Будем полагать известными (заранее заданными) следующие величины:

1. Затраты L , представляющие экологический ущерб от произошедшей аварии (выраженный, например, в виде суммы штрафа) при необнаружении опасности.

2. Затраты l на работы по предотвращению аварии при правильном обнаружении опасности.

3. Затраты l_f – на мероприятия по ложной тревоге.

4. Затраты при правильном отсутствии сигнала тревоги будем полагать нулевыми.

Смысл и количественные характеристики соответствующих четырех состояний МС (включающих два возможных правильных решения и две возможные ошибки) сведены в таблицу. С целью упрощения дальнейших выкладок, обозначение вероятности $P(D)$ уровня риска аварии заменено в таблице на p .

Количественные характеристики состояний МС в таблице – это вероятности состояний и затраты. Сумма произведений вероятностей на соответствующие затраты представляет математическое ожидание $E\chi$ случайной величины χ экономических затрат:

$$E\chi = L\beta p + l(1-\beta)p + l_f\alpha(1-p). \quad (4)$$

Величины L, l, l_f связаны существенной (в экономическом смысле) цепочкой неравенств

$$L \gg l \geq l_f. \quad (5)$$

Помимо условия (5), при анализе экономической эффективности мониторинга в выражении (4) надлежит учитывать малость величин α и β . Кроме того, воспользуемся приближенными выражениями математического ожидания $E\chi$ в областях

высокого ($p \sim 1$) и низкого ($p \ll 1$) уровней риска аварий.

Нетрудно видеть, что в случае $p \sim 1$ можно пользоваться примерной оценкой порядка ожидаемых затрат в виде

$$E\chi \sim L\beta + l, s \quad (6)$$

а в противоположном случае $p \ll 1$ – приближенным равенством

$$E\chi \approx [L\beta + l]p + l_f\alpha. \quad (7)$$

Учитывая соотношение (5), стратегию снижения затрат в условиях высокой аварийности естественно сводить к уменьшению относительного вклада первого слагаемого правой части выражения (6), откуда следует основное условие

$$\beta \ll \frac{l}{L} \quad (8)$$

экономической оптимальности МС.

При низкой аварийности имеем из (7) требование для величины α в виде

$$\alpha \ll \frac{l}{l_f} p. \quad (9)$$

В общем случае уровень аварийности приходится полагать неизвестным; и пара неравенств (8), (9) может использоваться в качестве наиболее общих (и универсальных) условий, на которые следует ориентироваться при экономической оптимизации. Для оптимизированных МС ожидаемые затраты достигают минимально возможной величины, определяемой приближенным равенством

$$E\chi \approx lp. \quad (10)$$

Достаточное условие экономической эффективности. Математическое ожидание $E\chi_0$ величины χ_0 затрат при отсутствии МС определяется очевидным выражением

$$E\chi_0 = Lp, \quad (11)$$

позволяющим оценивать экономический эффект от применения МС коэффициентом эффективности вида

$$K_{econ} \equiv \frac{E\chi_0}{E\chi}, \quad (12)$$

который для оптимальных МС имеет вид

$$K_{econ_opt} \approx \frac{l}{l_f}. \quad (13)$$

Достижение предельного значения (13) экономической эффективности бывает связано, однако, с известными ограничениями возможности снижения обеих вероятностей (1) – например, [1, 4]. Выполнение требования (8), например, может оказаться проблематичным в связи с экономическим условием (5).

Однако и во всех тех случаях, когда оптимальных параметров α и β достигнуть не удастся, достаточным условием экономической оправданности МС остается условие $K_{econ} > 1$, сводящееся к упрощенному выражению вида

$$\frac{l}{L} + \frac{\alpha l_f}{p L} + \beta < 1. \quad (14)$$

Практический интерес представляют случаи (типичные для реальных МС), когда вероятности α и β достаточно малы (т.е. МС работоспособны), однако требования (8) и (9) оказываются чрезмерно жесткими (практически недостижимыми). При этом можно иметь в виду, что при замене в условиях (8) и (9) знаков “ \ll ” на знаки “ \approx ”, величина $E\chi$ примерно удваивается по сравнению с оценкой (10). В подобного рода случаях экономическая эффективность (12) в итоге оказывается не более чем на порядок меньше предельного значения (13).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Отсутствие зависимости экологической эффективности от существующего уровня риска аварий говорит о том, что невысокую аварийность, отмечаемую на тех или иных нефтегазодобывающих производствах, не следует считать свидетельством неактуальности мониторинга. Практическим подтверждением этого (парадоксального на первый взгляд) вывода является множество известных экологических бедствий, неожиданно происшедших в последние десятилетия.

При возможности достаточного уменьшения вероятностей обеих ошибок, экономические потери могут быть в пределе уменьшены во столько раз, во сколько затраты на своевременный ремонт меньше цены экологического ущерба от аварии. Такое свойство идеальных МС можно было бы считать достаточно очевидным и без специальных исследований. Однако нетривиальным является вопрос о тех критериях качества МС, которые делают ее сигналы надежными в экономическом смысле. С целью ответа на этот вопрос определены критерии предельной экономической эффективности мониторинга.

Другим возможным критерием (которым можно пользоваться вне зависимости от возможности приблизиться к пределу экономической эффективности), является достаточное условие экономической оправданности МС (неравенство (14)).

Данное условие представляет практический интерес постольку, поскольку актуальной проблемой внедрения мониторинга на сей день является не достижение предельной эффективности, а теоретическое доказательство его безусловной экономической выгоды. Заметим, что практиче-

ское доказательство этого факта невозможно в силу случайного характера предотвращаемых аварий.

Полученные результаты представляют интерес для обоснования и оптимизации ТЗ на МС. Они доказывают экономическую оправданность мониторинга даже при невысоких (далеких от оптимума) показателях качества.

Заметим, что аналогичной (по использованному методу сопоставления затрат с показателями надежности) является технико-экономическая оптимизация сейсмо- и цунами-устойчивости сооружений на шельфе (пример аварии 11 марта 2011 г. на АЭС Фукусима-1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вероятность и математическая статистика. Энциклопедия / Гл. ред. Прохоров Ю. В. М.: Изд-во Большая Российская Энциклопедия, 1999. 910 с.
2. Куракин А.Л. Алгоритм обнаружения объектов в условиях непрерывного мониторинга // Программные продукты и системы. 2011 № 3. С. 166–169.
3. Куракин А.Л., Лобковский Л.И. Экономическая оптимизация требований к системам геоэкологического мониторинга // Докл. РАН. 2012. Т. 446. № 1. С. 86–88.
4. Леман Э.Л. Проверка статистических гипотез / Пер. с англ. 2-е изд. испр. М.: Наука, 1979. 408 с.
5. Лобковский Л.И., Левченко Д.Г., Леонов А.В., Амбросимов А.К. Геоэкологический мониторинг морских нефтегазоносных акваторий / Отв. ред. Лаппо С.С. М.: Наука, 2005. 326 с.
6. Флейшман Б.С. Использование несимметричности требований к ошибками 1-го и 2-го рода в экологии // 47-я Научная сессии, посвященная Дню радио. М.: РНТОРЭС, 1992. с. 56.

Ecological and Economical Efficiency of Monitoring Systems for Oil and Gas Production on the Shelf

A. L. Kurakin, L. I. Lobkovsky

Requirements to signals reliability of monitoring systems (with respect to the errors of 1st and 2nd kinds i.e. false alarm and skipping of danger) are deduced from the ratio of expenditures of different kind (of exploitation expenses and losses due to accidents). The expressions obtained in the research may be used for economic foundations of specifications for monitoring systems. In cases when optimal parameters are not available, the sufficient condition of monitoring systems economical efficiency is presented.