

УДК 608

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РИСКА ПРОИЗВОДСТВЕННОГО
ТРАВМАТИЗМА МЕТОДОМ ВЕЙВЛЕТ
И ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛИЗА**© 2009 Н.В. Муллер¹

В работе представлена методика, в основе которой лежит модель прогнозирования риска производственного травматизма с помощью вейвлет и фрактального анализа. Вейвлет-анализ применяется для анализа сложных данных и позволяет выявить различные свойства сложного сигнала, невидимые при обычном представлении в режиме реального времени. По величине фрактальной размерности, отражающей количество несчастных случаев в исследуемом промежутке, судят о степени хаотичности самого процесса.

Ключевые слова: прогноз, риск, вейвлет и фрактальный анализ, методика, производственный травматизм.

1. Предварительные сведения

В этой работе будем использовать следующую терминологию. Суть всех уже существующих методов исследования травматизма направлена на изучение проблемы с целью снижения количества несчастных случаев. Однако статистика показывает неуклонный рост случаев травматизма. В мире ежегодно травмируются около 120 миллионов человек, из них погибают 50 миллионов. Только в России на производстве подвергаются травмам ежегодно свыше 150 тысяч человек и погибают около 5 тысяч. В частности, в г. Комсомольске-на-Амуре в течение года в среднем из каждой 1000 жителей травмируются 144 человека и из каждой 1000 работающих в среднем травмируются 3 человека на производстве. Поэтому возникает необходимость дальнейшей научной проработки методов исследования и прогнозирования травматизма и поиск таких решений, которые обеспечивали

¹Муллер Нина Васильевна (only_nina@mail.ru), кафедра безопасности жизнедеятельности Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета, 681013, Россия, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27.

бы достоверную прогнозную оценку и снижение рисков производственного травматизма. Целью исследования является разработка методики, в основе которой лежит модель прогнозирования риска производственного травматизма с помощью вейвлет и фрактального анализа. В основе методики осуществлено применение статистики травматизма как временного ряда. На основании данного временного ряда можно прогнозировать всплески нестабильности или неустойчивости явления травматизма. Именно данный метод позволяет прогнозировать в режиме реального времени. Вейвлет-преобразования предпочтительно применять именно для анализа временных рядов. А изменение количества несчастных случаев имеет нестационарный, стохастический характер. Вейвлет-анализ применяется обычно для анализа сложных данных и их отображения в масштабно-временную плоскость, что позволяет выявить различные свойства сложного сигнала, невидимые при обычном представлении в режиме реального времени. Такое возможно благодаря большой избыточности преобразования. В области преобразования выделяются, высвечиваются интересующие нас свойства, то есть дополнительная информация, недоступная в исходном виде [1].

Применение методов фрактального анализа и теории информации позволяет находить глобальные взаимосвязи между переменными, входящими в процессы, происходящие на исследуемой территории и влияющие на количество несчастных случаев. При этом также по величине фрактальной размерности последовательности, отражающей количество несчастных случаев в исследуемом промежутке, судят о степени хаотичности самого процесса [2].

Модель прогнозирования риска производственного травматизма представляет собой сложное многомерное исследование, поскольку травматизм — это процесс, зависящий от большого количества факторов и предпосылок. Мы допускаем, что основной причиной травматизма является производственный фактор, поэтому в работе исследовалась статистика производственного травматизма по полу, возрасту пострадавших, месяцам реализовавшихся случаев и отраслям, психо-физиологический фактор в работе не учитывался. В основе исследования лежит использование в качестве входных данных временного ряда. Временной ряд — это совокупность наблюдаемых параметров изучаемой системы во времени. В качестве временного ряда использовалась статистика несчастных производственных случаев, предоставленная Отделом социального страхования г. Комсомольска-на-Амуре за период с 2000 по 2007 годы включительно. В работе рассмотрены травмы, произошедшие на 265 предприятиях в 118 отраслях народного хозяйства. Для реализации данной модели разработана методика прогнозирования травматизма на основе вейвлет и фрактального анализа, состоящая из пяти последовательных этапов.

1. Первым этапом реализации методики является формирование ряда значений, отражающих изменения количества несчастных случаев в исследуемом интервале времени с целью анализа его в качестве временного ряда.

2. Вторым этапом реализуемой методики является комплексная обработка временного ряда методом фрактального и вейвлет-анализа. Расчет фрактальной размерности в данном исследовании производился поточечным методом. В основе этого метода лежит подсчет расстояний от точки до всех точек исследуемого множества. В основе лежит алгоритм расчета поточечной размерности, который на сегодняшний момент известен и является классическим и заключается в следующем [3].

Рассмотрим какое-либо множество случаев травматизма X_1, X_2, \dots, X_N за исследуемый период, расположенных в m -мерном пространстве, представленное на рис. 1.1.

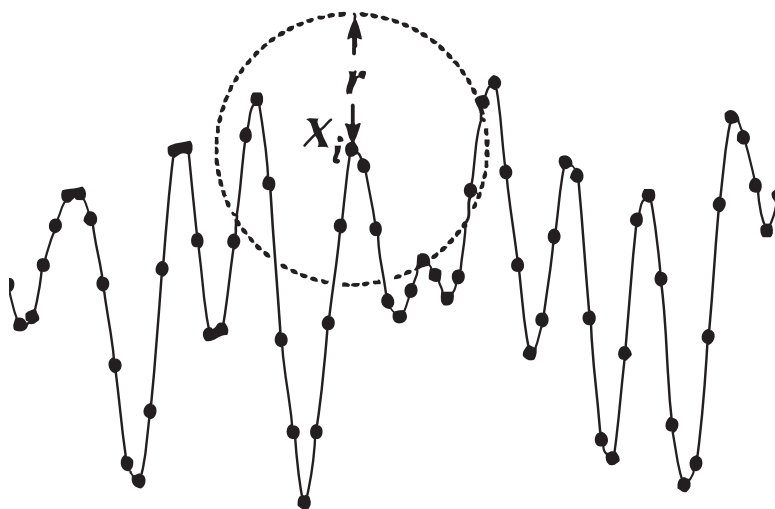


Рис. 1.1. График в двумерном пространстве с выборочными точками и окружностью, внутри которой производится подсчет выборочных точек

Опишем вокруг какого-либо случая сферу радиуса r и подсчитаем число случаев $M(X_i, r)$, попавших внутрь сферы. Вероятность того, что выборочный случай окажется внутри сферы, мы получим, разделив $M(X_i, r)$ на полное число случаев в исследуемом множестве:

$$P(X_i, r) = M_i(X_i, r)/N. \quad (1.1)$$

Как следует из определения фрактальной размерности при малых r , вероятность $P(X_i, r)$ должна вести себя как r^{-D_0} , где D_0 — Хаусдорфова размерность множества. В таком случае

$$D_0(X_i) = \lim(\log P(X_i, r)/\log r). \quad (1.2)$$

Для некоторых множеств это определение не зависит от выбора случая X_i . Но для многих других множеств D_0 зависит от X_i , и поэтому лучше пользоваться усредненной поточечной размерностью. При распределении случаев могут иметься пробелы, в результате чего $P(X_i, r)$ при r , стремящемся к 0, перестает быть непрерывной функцией от r . Чтобы полу-

читать усредненную поточечную размерность, выбираем случайным образом множество случаев размером $L < N$ и в каждом его случае вычисляем $P(X_i, r)$. После того как это сделано, усредненная Хаусдорфова размерность множества вычисляется по формуле:

$$D_0 = 1/L * (D_0(X_1) + D_0(X_2) + D_0(X_3) \dots + D_0(X_L)). \quad (1.3)$$

Число L подбирают опытным путем, начиная с какого-нибудь малого значения и постепенно увеличивая его до тех пор, пока D_0 не достигнет предела. В данном случае формула будет выглядеть следующим образом:

$$D_0(X_i) = \lim(\log P(X_i, p_{kj}) / (\log p_{kj})), \quad (1.4)$$

где p_{kj} — граничные значения радиуса. Нахождение предела сводится к поиску наиболее линейного участка зависимости $\log P(X_i, p_{kj})$ от $\log p_{kj}$ и построению линейной аппроксимации вида:

$$\log P(X_i, p_{kj}) = (b * \log p_{kj}) + c \quad (1.5)$$

по методу наименьших квадратов, как показано на рис. 1.2. В качестве оценки поточечной размерности берется

$$D_0(X_i) = -b. \quad (1.6)$$

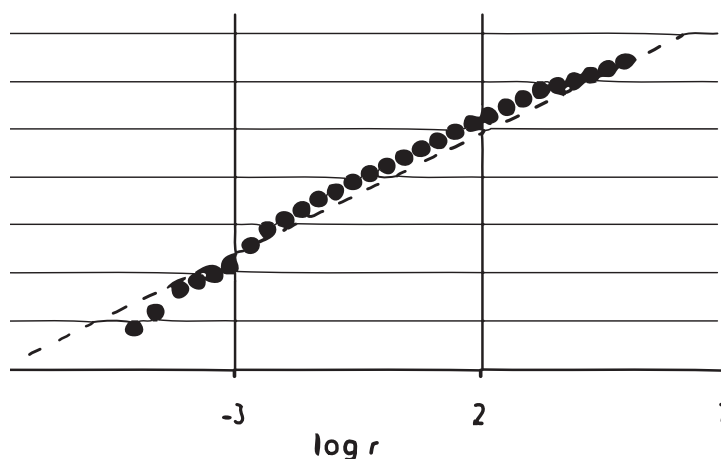


Рис. 1.2. Пример оценки емкости $DO(X_i)$ методом линейной аппроксимации

Далее необходимо удалить из множества p_{kj} все случаи, которые вносят нелинейность в зависимость $\log P(X_i, p_{kj})$ от $\log p_{kj}$ тогда оставшиеся случаи будут лежать на линейном участке. Реализовать данную процедуру можно путем итерационного алгоритма. Для каждого члена множества $p_{k1}, p_{k2}, \dots, p_{kq}$ производится тест — данный член временно удаляют из множества и вычисляют коэффициент корреляции S между $\log P(X_i, p_{kj})$ и $\log p_{kj}$ для оставшихся членов, а после теста опять возвращают в множество. Тот член

множества, при тестировании которого наблюдается наибольшее увеличение корреляции S , следовательно, вносит наибольшую нелинейность, и его необходимо выбраковать из множества. Итерации выбраковки продолжают до тех пор, пока количество q членов множества p_{kj} не уменьшится до 3–5. После этого мы можем быть уверены, что оставшиеся q точек лежат на линейном участке зависимости $\log P(X_i, p_{kj})$ от $\log p_{kj}$. Анализ стабильности процесса по величине фрактальной размерности невозможен без исследования структуры самого временного ряда. Размерность Хаусдорфа-Беизковича временного ряда равна 1 согласно исследованиям, показанным на рис. 1.3, топологическая фрактальная размерность всегда больше 1, следовательно, временной ряд появления несчастных случаев самоподобен, фрактален. Существенным моментом развиваемого подхода является наличие критического значения фрактальной размерности временной кривой, при приближении к которому система теряет устойчивость и переходит в неустойчивое состояние, и параметры либо быстро возрастают, либо убывают в зависимости от тенденции, имеющей место в данное время.

Иными словами, фрактальная размерность определенной величины может использоваться как индикатор кризиса или флаг катастрофы. Анализ экспериментальных данных показывает, что линия тренда для временного ряда хорошо описывается уравнением:

$$y(t) = y(t_0) + (K_f(t_0) * (t - t_0)) / ((D - D_0)^B), \quad (1.7)$$

где $y(t)$ — среднее значение величины за период, предшествующий прогнозируемому; K_f и B — коэффициенты, t_0 — период времени, предшествующий прогнозируемому, t — время, на которое делается прогноз, D_0 — фрактальная размерность на период, предыдущий прогнозируемому. Следующим этапом является обработка временного ряда методом вейвлет-анализа. Вейвлет-анализ оказывается очень удобным для анализа нестационарных процессов, в частности с перемежаемостью. Он позволяет выявить пространственно-временные свойства изучаемого объекта, определить наличие перемежаемости, получить локальную высокочастотную и глобальную крупномасштабную информацию об объекте достаточно точно и без избыточности. Вейвлет-преобразование — эффективный математический инструмент мультимасштабного анализа структуры нестационарных сигналов. Непрерывный вейвлет-анализ, состоящий в разложении сигналов по функциям, хорошо локализованным как в пространственной, так и частотной областях, имеет большую, по сравнению с фурье-анализом, возможность в выявлении структурных особенностей сигналов. Для реализации анализа модели и обработки статистических данных разработано программное обеспечение, написанное в Borland Delphi. Данная программа позволяет строить скалограммы по выбранным параметрам по полу, возрасту, дням недели, отраслям за заданный период времени.

3. Третьим этапом реализуемой методики является интерпретация полученных результатов, то есть преобразование, где выделяются, высвечиваются интересующие нас свойства, то есть дополнительная информация, недоступная в исходном виде. Фракталом называется множество, размерность Хаусдорфа-Базиковича для которого строго больше его топологической размерности. Любое множество с нецелым значением D является фракталом. Но фрактал может иметь и целочисленное значение, так кривая представляет фрактал размерностью 1, а траектория броуновского движения представляет фрактал размерностью 2 [4].

Поэтому построение фрактальных размерностей по факторам показывает сценарии развития ситуаций и позволит судить о предрасположенности процесса к устойчивому либо хаотичному состоянию. Фрактальная размерность является показателем сложности кривой. Анализируя чередование участков с различной фрактальной размерностью и тем, как на систему воздействуют внешние и внутренние факторы, можно научиться предсказывать поведение системы [5].

И что самое главное, диагностировать и предсказывать нестабильные состояния. Таким образом, в качестве критерия устойчивости исследуемого процесса мы и принимаем полученную величину фрактальной размерности, а по степени хаотичности процесса полученного фрактала многофакторность и "насыщенность" предпосылок, вызвавших несчастные случаи [6].

Вейвлет-преобразование обеспечивает двумерное исследование представленного сигнала в частотной области в плоскости "частота-положение", и его можно охарактеризовать как спектральный анализ локальных возмущений. Вейвлет-преобразования являются очень удобным инструментом для адекватной расшифровки данных, поскольку элементы базиса хорошо локализованы и обладают нужным частотно-временным окном. Любой сигнал можно охарактеризовать некоторыми обобщенными величинами — энергией, мощностью. Любой параметр сигнала может нести полезную информацию об исследуемом явлении. Таким образом, задачей обработки являются выбор этих параметров и оценивание этих величин, из которых затем извлекается информация об исследуемых процессах. Теория вейвлетов дает гибкую технику обработки сигнала. Одно из основных преимуществ заключается в том, что он позволяет заметить хорошо локализованные изменения сигнала. Поэтому методы фрактального и вейвлет-анализа необходимы не только для быстрого реагирования на изменения величины числа несчастных случаев, но и выявления наиболее опасных моментов для своевременного их предотвращения.

4. Четвертым этапом реализуемой методики является выделение факторов, наименее устойчивых, стремящихся к нестабильному состоянию, на основе которых можно выделить наиболее рискоопасные группы, временной период, людей, возрастной контингент и так далее и соответственно строить прогнозные оценки.

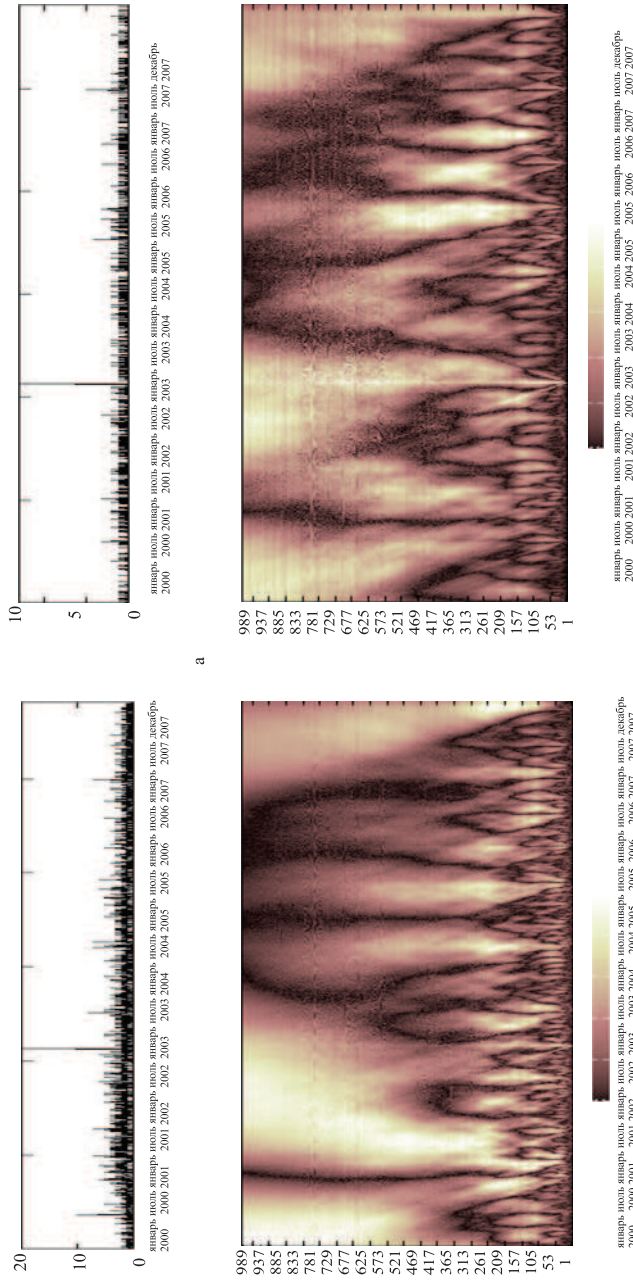


Рис. 2.1. Вейвлет-анализ появления несчастного случая у мужчин и у женщин (а) и временного ряда (б)

5. Пятым этапом реализуемой методики является разработка мероприятий и рекомендаций на основе полученных результатов.

2. Пример апробации

По результатам апробации методики и программного обеспечения, реализующего анализ модели и обработку статистических данных, произведено исследование производственных несчастных случаев на примере г. Комсомольска-на-Амуре с помощью вейвлет и фрактального анализа в зависимости от различных факторов: по временной характеристике, месяцам, полу, возрасту, дням недели. Далее приведен пример анализа временного ряда за исследуемый период и по полу. Исследуя вейвлет-спектр временного ряда, показанного на рис. 1.3, можно сделать вывод о наличии в его структуре периодичности как по временной, так и по масштабной оси. Самые яркие области вейвлет-спектра свидетельствуют о наличии некоторой возмущающей силы, вызывающей изменение ситуации с несчастными случаями. Яркая область вейвлет-спектра (в конце 2000 года) свидетельствует о переходе из стабильного состояния в хаотичное и способное перейти в катастрофичное. Таким образом, по ярким областям можно определять период, в который наблюдается максимальное количество несчастных случаев, и находить достоверные причины и предпосылки, предшествующие концентрации травм в данный период. Так, например, яркая область в начале 2004 года свидетельствует о переходе к стабильному состоянию, проанализировав реальные данные данного периода, было выявлено, что в 2004 г. наблюдается уменьшение объема производств на некоторых крупных предприятиях города, где занято более 40 человек. При этом количество работающих не изменилось, что говорит о равномерной меньшей нагрузке на людей в процессе трудовой деятельности, снижении усталости, что могло и вызвать снижение количества травм. Вейвлет-анализ временного ряда производственного травматизма у мужчин и женщин представлен на рис. 2.1.

Данный анализ свидетельствует о том, что наибольшее количество рисков травматизма приходится на мужчин, так как они заняты на более опасном производстве и преобладают по численности на производственных предприятиях. Фрактальная размерность временного ряда несчастных случаев на производстве у мужчин составляет 1,458, а у женщин 1,151. Также анализ вейвлет-спектров показал, что факторы, влияющие на уровень травматизма на мужчин и женщин, одинаковы, однако их реакция на эти возмущения отличается. Так, вейвлет-спектры имеют одинаковые всплески, но их интенсивность различна. Риск получить производственную травму практически равен риску уличной травмы (5,6 %) и занимает второе место среди остальных причин повреждений. Так, производственным травмам подвергается 25 мужчин и 6 женщин из 10000 жителей в г. Комсомольске-на-Амуре. При этом на первом месте стоит бытовая травма (40 %) как у мужчин,

так и у женщин, то есть, судя по уровню риска, бытовым травмам подвергается 540 мужчин и 380 женщин из 10000 жителей. Таким образом, судя по величине фрактала 1,458, приходим к выводу, что как на производстве, так и в быту мужчины относятся к более рискоопасной группе, которая наиболее часто подвергается негативным исходам. Причем анализ структуры характера повреждений показал, что мужчины чаще всего подвергаются таким травмам, как открытые раны, травмы кровеносных сосудов, поверхностные травмы, переломы, а среди женского населения преобладают переломы верхних и нижних конечностей и поверхностные травмы. Достоверность предложенной методики подтверждается сравнением двух величин построенной прогнозной оценки с определенными минимальными и максимальными пределами в заданный отрезок времени и уже фактическими данными по реализовавшимся случаям травматизма в данный период времени. Таким образом, в данном случае фактические данные попадают в определенный нами диапазон, что говорит о приемлемости предложенного метода.

Заключение

1. Представлена методика прогнозирования травматизма, в основе которой лежит вейвлет и фрактальный анализ.

2. На основе вейвлет и фрактального анализа разработана математическая модель прогнозирования травматизма, которая позволяет контролировать и снижать фактический уровень несчастных случаев и решать те проблемы, которые не под силу уже существующим методам.

3. На основе разработанной методики произведено исследование риска производственного травматизма по различным факторам и выявлены области накопления риска.

Литература

- [1] Астафьева, Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения / Н.М. Астафьева // Успехи физических наук. — 1996. — № 11. — С. 1145–1171.
- [2] Бережная, Е.В, Математические методы моделирования экономических систем: учебное пособие / Е.В. Бережная, В.И. Бережной. — М.: Финансы и статистика, 2001. — 368 с.
- [3] Дремин, И.М. Вейвлеты и их использование / И.М. Дремин, О.В. Иванов, В.А. Нечитайло // Успехи физических наук. — 2001. — № 5. — С. 465–501.
- [4] Федер, Е. Фракталы / Е. Федер. — М.: Мир, 1991. — 254 с.
- [5] Морозов, А.Д. Введение в теорию фракталов / А.Д. Морозов. — М.; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2002. — 160 с.

- [6] Манделъброт, Б. Фрактальная геометрия природы / Б. Манделъброт. — М.: Институт компьютерных исследований, 2002. — 656 с.

Поступила в редакцию 18/*XI*/2008;
в окончательном варианте — 24/*XII*/2008.

FORECASTING OF THE RISK OF AN OCCUPATIONAL TRAUMATISM BY MEANS OF WAVELET AND FRACTAL ANALYSIS

© 2009 N.V. Muller²

The paper is devoted to technique based on the model of forecasting of the risk of an occupational traumatism by means of wavelet and fractal analysis. Wavelet analysis is applied to the analysis of complex data and allows to reveal the various properties of a complex signal invisible at usual representation on a real time basis. We can judge about the degree of randomness of the process by the size of fractal dimension which reflects the number of accidents in the investigated interval.

Key words and phrases: forecast, risk, wavelet and fractal analysis, technique, occupational traumatism.

Paper received 18/*XI*/2008.

Paper accepted 24/*XII*/2008.

²Muller Nina Vasilevna (only_nina@mail.ru), Dept. of Safety of vital activity, The state educational establishment of the highest and professional training Komsomolsk-na-Amur State Technical University, Komsomolsk-na-Amur, 681013, Russia.