

# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИСХОДА У ПОСТРАДАВШИХ ПРИ ВЗРЫВАХ МЕТАНО-УГОЛЬНОЙ СМЕСИ

Э.Я. Фисталь<sup>1,2</sup>, В.Г. Гурьянов<sup>2</sup>, В.В. Солошенко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт неотложной и восстановительной хирургии им. В.К. Гусака НАМН Украины, Донецк,

<sup>2</sup> Донецкий национальный медицинский университет им. М. Горького, Украина

## MATHEMATICAL MODEL OF FORECASTING FOR OUTCOMES IN VICTIMS OF METHANE-COAL MIXTURE EXPLOSION

E.Y. Fistal<sup>1,2</sup>, V.G. Guryanov<sup>2</sup>, V.V. Soloshenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Urgent and Recovery Surgery n.a. V.K. Gusak, Donetsk

<sup>2</sup> Donetsk National Medical University n.a. M. Gorky, Ukraine

### АКТУАЛЬНОСТЬ

Тяжесть состояния пострадавших в раннем периоде после комбинированной травмы с доминирующей ролью термической травмы обусловлена развитием многочисленных изменений во всех органах и системах, что делает крайне затруднительной своевременную диагностику осложнений и определение вероятности смертельного исхода.

### МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В статье представлена математическая модель прогнозирования смертельного исхода у пострадавших при взрывах метано-угольной смеси, построенная на основании данных историй болезни 220 шахтеров, которые находились на лечении в Донецком ожоговом центре в период с 1994 по 2012 г.

### РЕЗУЛЬТАТЫ

Выявлено, что на вероятность смертельного исхода у пострадавших в результате взрывов метано-угольной смеси статистически значимо влияют площадь глубокого ожога ( $p < 0,001$ ) и тяжелая черепно-мозговая травма ( $p < 0,001$ ). На возможность развития смертельного исхода статистически значимо ( $p = 0,003$ ) также влияет тактика хирургического лечения ожоговых ран в первые сутки после травмы. Она подразумевает проведение первичной хирургической обработки ожоговых ран в периоде ожогового шока с одновременным закрытием участков поверхностного поражения временным биологическим покрытием.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нейросетевые модели удобны в практической деятельности и могут быть построены для наиболее распространенных патологических состояний, часто встречающихся в клинической практике.

### Ключевые слова:

ожог, математическая модель, прогнозирование, смертельный исход.

### BACKGROUND

The severity of the victims' state in the early period after the combined trauma (with the prevalence of a thermal injury) is associated with the development of numerous changes in all organs and systems which make proper diagnosis of complications and estimation of lethal outcome probability extremely difficult to be performed.

### MATERIAL AND METHODS

The article presents a mathematical model for predicting lethal outcomes in victims of methane-coal mixture explosion, based on case histories of 220 miners who were treated at the Donetsk Burn Center in 1994–2012.

### RESULTS

It was revealed that the probability of lethal outcomes in victims of methane-coal mixture explosion was statistically significantly affected with the area of deep burns ( $p < 0.001$ ), and the severe traumatic brain injury ( $p < 0.001$ ). In the probability of lethal outcomes, tactics of surgical treatment for burn wounds in the early hours after the injury was statistically significant ( $p = 0.003$ ). It involves the primary debridement of burn wounds in the period of burn shock with the simultaneous closure of affected surfaces with temporary biological covering.

### CONCLUSION

These neural network models are easy to practice and may be created for the most common pathologic conditions frequently encountered in clinical practice.

### Keywords:

burn, mathematical model, forecasting, lethal outcome.

ВИ — вероятностный интервал  
ВШ — вероятность шансов

ИТП — индекс тяжести поражения  
ЧМТ — черепно-мозговая травма

## ВВЕДЕНИЕ

Тяжесть состояния пострадавших в раннем периоде после комбинированной травмы с доминирующей ролью термической травмы обусловлена развитием многочисленных изменений во всех органах и системах, что делает крайне затруднительной своевременную диагностику осложнений и определение вероятности смертельного исхода [1, 2]. Для проведения эффективного лечения решающее значение имеет быстрая и точная оценка тяжести травмы. После завершения клинического, рентгенологического и лабораторного обследования необходимо проведение балльной оценки тяжести травмы. Для оценки тяжести больных с политравмой применяют шкалу комы Глазго (GSC — *Glasgow Coma Scale*), разработанную в университетской клинике Глазго (Англия), шкалу тяжести травм (ISS — *Injury Severity Score*), предложенную *Becker et al.* в 1974 г., и *PTS — Polytrauma schlussel* (ключ политравмы — Ганноверский код), разработанный *H. Tscherne* [3, 4]. Однако в практической деятельности комбустиологов данные шкалы не нашли широкого применения, так как необходимы более специфичные и простые системы оценки состояния обожженного с комбинированной травмой.

В комбустиологии используют традиционный индекс тяжести поражения (ИТП), а также модифицированный индекс тяжести поражения [5]. Основные компоненты для оценки тяжести травмы: измерение площади, глубины поражения, наличие и степень термоингаляционного поражения, тяжесть механической травмы, пролонгация в оказании помощи. Данные показатели характеризуют пусковые моменты в развитии дальнейших осложнений, однако не дают полноценной информации о патогенетических звеньях данного патологического процесса. В результате расчетов получают постоянную величину, что не позволяет их применять для оценки эффективности проводимых лечебных мероприятий на дальнейших этапах интенсивной терапии. В доступной литературе обнаружено много систем для проведения сравнительных оценок по тяжести и исходам заболевания, разработано множество диагностических шкал, но для пациентов с комбинированной термической травмой они не могут быть использованы [6].

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Для построения математических моделей прогнозирования смертельного исхода использовали статистические пакеты *Med Stat v. 4.5*, *Med Calc v. 11.6.1.0 (Med Calc Software, 1993–2011)* и *STATISTICA Neural Networks v. 4.0 C (Stat Soft Inc., 1996–1999)*. Данные лицензионные программы были приобретены Донецким национальным медицинским университетом для кафедры медицинской физики, математики и информатики, где и проводили математическое моделирование. Исследование основано на данных историй болезни 220 шахтеров (мужчины), которые пострадали при взрывах метано-угольной смеси и находились на лечении в Донецком ожоговом центре Института неотложной и восстановительной хирургии им. В.К. Гусака в период с 1994 по 2012 г. включительно. У 140 обожженных проводили тактику первичной хирургической обработки ожоговых ран в периоде ожогового шока с одновременным закрытием ран биологическими покрытиями (2004–2012 гг.), у 80 больных указанное лечение в периоде ожогового шока не проводили (1994–2003 гг.).

Выбор в пользу нейросетевых моделей обусловлен тем, что этот метод позволяет создавать и анализировать как линейные, так и возможные нелинейные модели. Основное преимущество нейронных сетей перед другими методами моделирования — их способность «учиться на примерах» (вместо целенаправленного построения модели для конкретной задачи). Для проведения анализа был использован метод построения многофакторных математических моделей прогнозирования. В качестве выходных переменных была выбрана вероятность смертельного исхода у пострадавшего. В качестве входных переменных анализировали: возраст пострадавшего, общую площадь ожога, площадь глубокого ожога, локализацию ожога (5 признаков — выделяется отдельно часть тела как признак), степень термоингаляционного поражения, степень отравления угарным газом, наличие переломов и их локализацию, черепно-мозговую травму (ЧМТ) и ее степень, величину пролонгации в оказании медицинской помощи, время доставки в ожоговый центр, осложнения ожоговой болезни (сепсис, пневмония, энцефалопатия и др.), смертельный исход, первичную хирургическую обработку ран при наличии шока, ампутации (уровень), время выполнения некротомии, время выполнения некрэктомии и общее количество данного вида операций, время выполнения аутодермотрансплантаций и их количество, а также трансплантация аллофибробластов (количество и сроки).

При работе с признаками не выделяли искусственно значимость какого-либо признака, это делала создаваемая модель. Для оценки адекватности модели все случаи с помощью генератора случайных чисел были разделены на три множества: обучающее множество (использовали для построения модели; включало результаты лечения 170 больных), контрольное множество (использовали для подбора порога принятия или отвержения; включало результаты лечения 10 больных), а также тестовое множество (использовали для проверки прогностической состоятельности модели на новых данных — 40 обожженных шахтеров).

Для построения моделей одной из основных задач являлся выбор минимального набора наиболее значимых факторов, влияющих на развитие смертельного исхода. В работе был использован генетический алгоритм (ГА) отбора данных, который является одним из методов обработки данных в оболочке программы *STATISTICA Neural Networks v. 4.0 C*. Особенность генетического алгоритма — это использование оператора «скрещивания», который производит операцию рекомбинации решений-кандидатов, роль которой аналогична роли скрещивания в живой природе. Генетический алгоритм соединил в себе скорость пошаговых методов и эффективность метода полного перебора признаков.

Для оценки прогностических характеристик модели рассчитывали показатели ее чувствительности и специфичности, оценивали соответствующий 95% вероятностный интервал (ВИ) значения показателя. Для оценки адекватности модели использовали метод проверки ее прогностических характеристик на тестовом множестве случаев, которые не были задействованы в процессе построения модели. В случае, если прогностические характеристики модели на тестовом

множестве случаев были не хуже, чем характеристики на учебном множестве случаев (которую использовали для оценки параметров модели), то модель считалась адекватной и пригодной для использования ее на практике [7]. Для верификации построенных моделей использовали метод построения кривых операционных характеристик (*Receiver Operating Characteristic (ROC) Curve*). Для случайной модели прогноза площадь под ROC кривой (*Area under the ROC curve (AUC)*) составляет 0,5, приближение AUC к 1 свидетельствует об адекватности модели.

Степень влияния на вероятность смертельного исхода оценивали по соотношению вероятности шансов (ВШ). Значение ВШ менее 1 свидетельствует об уменьшении, а значение ВШ более 1 — об увеличении возможности негативного результата [8]. В случае, когда ВШ статистически не отличались от 1 ( $p > 0,05$ ) — влияние факторного признака считалось не выявленным.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На первом этапе проведения анализа была построена модель классификации с использованием всех 37 факторных признаков. После обучения модели и проверки прогнозирования на тестовом множестве были получены следующие результаты: для обучаемого множества чувствительность модели составила 96,0% (95% ВИ 91,8–98,7%), специфичность — 95,7% (95% ВИ 82,9–100%); на тестовом множестве чувствительность модели была — 94,4% (95% ВИ 84,3–99,5%), специфичность — 100% (95% ВИ 55,2–100%). Чувствительность и специфичность модели статистически значимо не отличались на обучаемом и тестовом множестве ( $p=0,95$  и  $p=0,31$  соответственно при сравнении по критерию  $\chi^2$ ), что свидетельствует об адекватности построенной модели.

Для выявления минимального набора факторных признаков, связанных с риском развития смертельного исхода, был использован генетический алгоритм. В результате было отобрано три признака: принадлежность к группе по тактике хирургического лечения, наличие у пострадавшего тяжелой ЧМТ (шкала комы Глазго 4–7 баллов), площадь глубокого ожога. На выделенном наборе была построена модель прогнозирования.

Чувствительность модели на обучаемом множестве составила 88,0% (95% ВИ 81,7–93,1%), специфичность — 82,6% (95% ВИ 63,7–95,5%); на тестовом множестве чувствительность модели составила 88,9% (95% ВИ 76,2–97,1%), специфичность — 100% (95% ВИ 55,2–100%). Чувствительность модели на обучаемом и тестовом множестве статистически значимо не отличались ( $p=0,88$  и  $p=0,89$  соответственно при сравнении по критерию  $\chi^2$ ), что свидетельствует об адекватности построенной модели.

Для значимости выявления каждого из отобранных признаков была построена логистическая регрессионная модель прогнозирования вероятности развития смертельного исхода ( $\chi^2=94,3$ ,  $p < 0,001$ ). С целью верификации модели был использован метод анализа ROC-кривых. На рис. 1 приведена полученная кривая.

Полученное значение площади под кривой  $AUC=0,96$  (95% ВИ 0,92–0,98), статистически значимо отличается от 0,5 (на уровне  $p < 0,001$ ), что подтверждает адекватность построенной модели. Результаты анализа коэффициентов модели приведены в табл. 1.

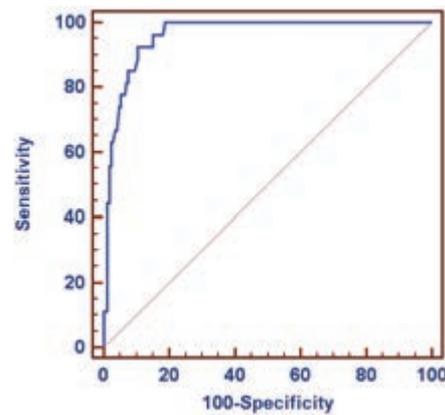


Рис. 1. ROC-кривая для трехфакторной логистической модели прогнозирования вероятности развития смертельного исхода

Из проведенного анализа следует, что на вероятность смертельного исхода у пострадавших при взрывах метано-угольной смеси статистически значимо ( $p < 0,001$ ) влияет площадь глубокого ожога, ВШ=1,13 (95% ВИ 1,08–1,18) при увеличении площади глубокого ожога на 1%. Также установлено, что вероятность смертельного исхода выше ( $p=0,003$ ) в тех случаях, когда не проводили оперативного лечения в периоде ожогового шока по разработанной в клинике системе — ВШ=16,0 (95% ВИ 2,6–98,4). Наличие тяжелой ЧМТ также повышает вероятность ( $p < 0,001$ ) развития смертельного исхода при ВШ=17,9 (95% ВИ 4,0–80,9).

Таблица 1

#### Анализ факторных признаков вероятности развития смертельного исхода (логистическая регрессионная модель, построенная на наборе трех наиболее значимых признаков)

Признак	Значение коэффициента прогнозирования, $b \pm m$	Уровень значимости отличия коэффициента от 0	ВШ (95% ВИ)
Принадлежность к группе (по тактике хирургического лечения в шоке)	2,77±0,93	0,003	16,0 (2,6–98,4)
Наличие тяжелой ЧМТ	2,89±0,77	<0,001	17,9 (4,0–80,9)
Площадь глубокого ожога	0,12±0,02	<0,001	1,13 (1,08–1,18)

Примечания: ВИ — вероятностный интервал; ВШ — вероятность шансов; ЧМТ — черепно-мозговая травма

Полученные в результате математической обработки данные свидетельствуют о значительном влиянии фактора ЧМТ на возможность смертельного исхода у пострадавших в результате взрывов метано-угольной смеси. Проведение инфузионной противошоковой терапии ожогового шока предполагает введение больших объемов жидкости, что негативно сказывается на состоянии мозговой гемодинамики при ЧМТ. В то же время лечение больного с тяжелой ЧМТ направлено на поддержание адекватного перфузионного давления, улучшение реологических свойств крови и снижение внутричерепного давления. Проблема объема интенсивной терапии ожогового шока в сочетании с тяжелой ЧМТ поэтому остается не решенной.

При построении моделей мы абстрагировались от клинической значимости признака и выполняли математические манипуляции со всеми 37 признаками. Полученные результаты показали, что на возможность развития смертельного исхода статистически значимо влияет тактика хирургического лечения ожоговых ран в первые сутки после травмы. Она подразумевает проведение первичной хирургической обработки ожоговых ран в периоде ожогового шока с одновременным закрытием участков поверхностного поражения временным биологическим покрытием. Благодаря данному оперативному вмешательству к моменту завершения периода ожогового шока уменьшается общая площадь термического поражения.

Для удобства работы с математическими моделями в практической деятельности врача — комбустиолога, анестезиолога, хирурга и травматолога — на этапах эвакуации создана оболочка для работы на платформе программы *Microsoft Excel*. Интерфейс компьютерной программы для прогнозирования тяжести ожоговой болезни, ее осложнений и риска смертельного исхода представлен на рис. 2.

Для работы с программой необходимо внести в соответствующие окна следующие данные: общая площадь ожога, площадь глубокого ожога, степень термингаляционного поражения, наличие и тяжесть ЧМТ. На выходе получают значение критерия  $Y$ , которое сравнивается с критическим значением  $Y_{крит} = 0,560$ . При  $Y < Y_{крит}$  прогнозируется высокий риск развития летального исхода, при  $Y \geq Y_{крит}$  риск развития смертельного исхода низкий.

Аналогично были выбраны линейные модели для прогнозирования тяжести ожоговой и осложнений ожоговой болезни. Как и при прогнозировании смертельного исхода, на выходе модели мы получали высокую или низкую вероятность развития события.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная математическая модель позволяет на этапах эвакуации просто и быстро определять вероятность развития смертельного исхода у пострадавших при взрывах метано-угольной смеси. Для нас важным фактом было выделение тактики хирургического лечения при наличии шока как статистически значимого

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ким В.Л., Хакимов М.Ш. Количественные клинические системы оценки тяжести состояния больных (обзор литературы) // Вестник врача общей практики. – 2005. – № 1. – С. 65–70.
2. Матвеев А.В., Чмырев И.В., Петрачков С.А. Определение тяжести состояния обожженных с помощью координатных сеток вероятности летального исхода // Скорая медицинская помощь. – 2013. – Т. 14, № 1. – С. 34–43.
3. Jaimes F., Farbiarz J., Alvarez D., Martinez C. Comparison between logistic regression and neural networks to predict death in patients with suspected sepsis in the emergency room // Crit. Care. – 2005. – Vol. 9, N. 2. – P. 150–156.
4. Swanson J.W., Otto A.M., Gibran N.S., et al. Trajectories to death in patients with burn injury // J. Trauma Acute Care Surg. – 2013. – Vol. 74, N. 1. – P. 282–288.



Заполнять только столбик, цифры черные если ЧМТ нет, то пишется 0, легкая – 1, средняя – 2, тяжелая – 3  
 S – общая площадь, цифра, %  
 S – площадь глубокого, цифра, %  
 ингаляционная травма: нет – 0, легкая – 1, средняя – 2, тяжелая – 3  
 ушиб мозга: нет – 0, есть – 1  
 ОСЛ – возможность развития осложнений ожоговой болезни  
 ТЯЖ – возможность развития тяжелой ожоговой болезни  
 ЛИ – возможность летального исхода

Рис. 2. Интерфейс программы прогнозирования смертельного исхода, тяжести и осложнений ожоговой болезни у пострадавших со взрывной шахтной травмой

( $p=0,003$ ), так как разработанная в нашем ожоговом центре система лечения пострадавших при взрывах метано-угольной смеси позволила в 2,6 раза снизить летальность у данного контингента больных.

Подобные нейросетевые модели удобны в практической деятельности и могут быть построены для наиболее распространенных патологических состояний, часто встречающихся в клинической практике. Для построения адекватных моделей необходим большой статистический массив данных. Полученные статистически значимые признаки укажут в таком случае на факторы, определяющие вероятность развития прогнозируемого явления, что позволит врачу предусмотреть осложнения и вовремя выполнить необходимые лечебно-диагностические мероприятия.

## ВЫВОДЫ

1. Математическая модель, построенная с помощью нейросетевого моделирования, позволила выделить наиболее значимые факторы, определяющие вероятность смертельного исхода у пострадавших при взрывах метано-угольной смеси, что в дальнейшем ускорило процесс сортировки пострадавших при массовом поступлении.
2. Для клинического применения математическая модель представлена в оболочке *Microsoft Excel* и внедрена в практическую деятельность врачей комбустиологов Донецкого и Луганского ожогового центров.

5. Фисталь Э.Я., Солошенко В.В., Фисталь Н.Н. Комплексное лечение и реабилитация шахтеров, пострадавших при взрывах метано-угольной смеси // Энергия инноваций. – 2008. – № 5. – С. 50–54.
6. Миронов П.И., Степанова П.И., Смольников В.В. Оценка тяжести и исходов тяжелой термической травмы на раннем госпитальном этапе // Скорая медицинская помощь. – 2010. – № 4. – С. 59–61.
7. Лях Ю.Е., Гурьянов В.Г., Хоменко В.Н., Панченко О.А. Основы компьютерной биостатистики: анализ информации в биологии, медицине и фармации статистическим пакетом Medstat. – Донецк: Папакица Е.К., 2006. – 214 с.
8. Петри А., Сэбин К. Наглядная статистика в медицине. – М.: ГЭОТАР-МЕД, 2003. – 144 с.

## REFERENCES

1. Kim V.L., Khakimov M.Sh. Quantitative clinical system assess the severity of the patients (review). *Vestnik vracha obshchey praktiki*. 2005;1;65–70. (In Russian).
2. Matveenko A.V., Chmyrev I.V., Petrachkov S.A. Practical application of coordinate grids of probability of the lethal outcome in treatment of the burnt. *Skoraya meditsinskaya pomoshch'*. 2013;14(1):34–43. (In Russian).
3. Jaimes F., Farbiarz J., Alvarez D., Martinez C. Comparison between logistic regression and neural networks to predict death in patients with suspected sepsis in the emergency room. *Crit Care*. 2005;9(2):150–156.
4. Swanson J.W., Otto A.M., Gibran N.S., et al. Trajectories to death in patients with burn injury. *J Trauma Acute Care Surg*. 2013;74(1):282–288.
5. Fistal' E.Ya., Soloshenko V.V., Fistal' N.N. Comprehensive treatment and rehabilitation of miners, victims of explosions of methane-coal mixtures. *Energiya innovatsiy*. 2008;5:50–54. (In Russian).
6. Mironov P.I., Stepanova P.I., Smol'nikov V.V. Estimation of severity and outcomes of severe burn injury on the hospital early stage. *Skoraya meditsinskaya pomoshch'*. 2010;4:59–61. (In Russian).
7. Lyakh Yu.E., Gur'yanov V.G., Khomenko V.N., Panchenko O.A. *Fundamentals of computer biostatistics: analysis of information in biology, medicine and pharmacy statistical package Medstat*. Donetsk: Papakitsa E.K. Publ., 2006. 214 p. (In Russian).
8. Petri A., Sebin K. *Transparent statistics in medicine*. Moscow: GEOTAR-MED Publ., 2003. 144 p. (In Russian).

---

Поступила 21.04.2016

Контактная информация:

**Солошенко Виталий Викторович**,  
к.м.н., старший научный сотрудник отдела термических поражений Института неотложной и восстановительной хирургии им. В.К. Гусака, Донецк  
e-mail: burncenter.vs@gmail.com