

В'ячеслав ВОЛОШИН, д-р мед. наук, проф.,

Олександр АЗАРХОВ, д-р техн. наук, проф.,

Іван СІЛІ, канд. техн. наук, доц.

ДВНЗ «Призовський державний технічний університет», м. Дніпро, Україна, e-mail: azarhov_a_y@pstu.edu

СУБ'ЄКТИВНА ТА МЕДИЧНА СКЛАДОВА РИЗИКУ В СТРУКТУРІ РОУП-ДЖАМПІНГУ

Анотація. У статті досліджено можливості нейронних мереж для оцінки ризику людини в системі роуп-джампінгу. Визначено основні ризикоутворюючі фактори, запропоновані в даній моделі нейромережі для використання в спорті, показані шляхи зниження їх впливу, що може забезпечити безпеку в низці екстремальних видів спорту. Показано, що основний ризик у джампінгу походить від суб'єктивних дій двох людей – джампера та інструктора, і проявляються вони найбільш активно у крайній фазі польоту, а саме під час переходу від вільного падіння до реодинамічного руху тіла джампера. Суттєву роль віграють приховані медичні фактори джампера, які проявляються вже в процесі стрибка і не можуть бути скореговані.

Ключові слова: ризик, роуп-джампінг, нейронна мережа, невизначеність, подія.

Актуальність дослідження

Відносно нові види спорту, такі як роуп-джампінг (стрибки з еластичною скакалкою), дуже привабливі для сучасної молоді і не тільки. Світові результати травм і смертей спортсменів досить вражаючі. Як правило, це травми хребта, відкриті переломи ніг, розриви внутрішніх органів і т.д. При цьому тут, як ніде в інших випадках, роль біологічних і психологічних факторів в однієї ризикообразуючій події вкрай висока [1].

Процедура стрибка включає в себе кілька попередніх етапів: підготовка страхувального спорядження і підготовка джампера за участю інструктора, підйом на висоту стрибка, передпольотний інструктаж, і сам політ, що включає в себе два етапи. Перший складається з вільного польоту вниз, під дією сили тяжіння тіла джампера. Другий починається після досягнення мінімально допустимого рівня падіння і являє собою висхідний політ від нижньої критичної точки під дією реодинамічних сил пружного канату, які отримуються розрахунковим шляхом [2].

Психологічною основою такого виду спорту, звичайно ж, є потреба в викиді адреналіну, переконання підтвердити своє «єго», або це просто струс для психологічного застою організму. Це може дати людині почуття рішучості, здатність долати страх, невпевненість. У певному сенсі такі вимоги мають право на існування, але їх не можна порівнювати з ризиком травмування, часто несумісним з життям [2, 3].

Мета дослідження

Розробити модель щодо прогнозування ризиків, що виникають в процесі спортивної дії на прикладі роуп-джампінгу для оперативного виявлення подій, спроможних реалізувати ці ризики

Виклад основного матеріалу

Основні види небезпек і серії ризикоутворюючих заходів для цього виду спорту представлені в таблиці 1. Водночас такі означення вхідних сигналів у вигляді маркувань x_i , є підставою для формування моделі нейронної мережі для оцінки ризиків за методикою, що описана в [4].

Перед нами класична послідовність ризикоутворюючих подій [4, 5], очікування яких може призвести тільки до двох з них. Або це реальний ризик, як подія «А», вона стане рівною одиниці. Або це подія «О» і її ризик дорівнюватиме нулю. Таким чином, система переходить зі стану невизначеності події в стан чітко визначеної події. Вона характеризується своїм енергетичним вмістом [5], що є джерелом пошкодження для джампера.

Дуже зручно представляти систему показаних ризикоутворюючих подій у вигляді набору задалегідь заданих вхідних сигналів x_i (див. табл. 1) для нейромережевої моделі NM односпрямованої дії [6, 7], на виході якої є відомі сигнали про реалізацію (Y_1) потенційного ризику, або його відсутність (Y_0) у передбаченій мережі подій, що передували їм. Кількість прихованих шарів синапсів і число нейронів для обраної моделі визначається виключно силою вагових коефіцієнтів вхідних сигналів x_i , що позначаються як $m_0^{(01)}$, $i = 1, 15$, в порівнянні з їх прихованими значеннями в кожному наступному шарі синапсів.

Таблиця 1

Таблиця відповідності подій у моделі джампінга та в нейронній моделі *NM*

Означення	Вхідні си-гнали <i>NM</i>	Найменування ризикуутворюючоїподії
<i>S1</i>	x_1	Події з крафту несправного спорядження для джампера
<i>S2</i>	x_2	Знос матеріалу еластичного каната
<i>S3</i>	x_3	Поза межні механічні навантаження на пускову апаратуру
<i>S4</i>	x_4	Початковий неправильний розрахунок довжини мотузки
<i>S5</i>	x_5	Топографічні перешкоди для стрибків
<i>S6</i>	x_6	Метеорологічні умови
<i>S7</i>	x_7	Ліміт висоти падіння
<i>C1</i>	x_8	Помилки джампера перед стартом
<i>C2</i>	x_9	Помилки інструктора на старті
<i>C3</i>	x_{10}	Помилки джампера на старті
<i>C4</i>	x_{11}	Стан здоров'я джампера на старті
<i>B1</i>	x_{12}	Точка неповернення. Стартовий стрибок джампера
<i>B2</i>	x_{13}	Вільне падіння за рахунок сили тяжіння джампера
<i>B3</i>	x_{14}	Гальмування (точка рівноваги сили тяжіння і реодинамічної сили)
<i>B4</i>	x_{15}	Реодинамічна деформація, повернення і розгойдування джампера
<i>A</i>	Y_1	Факт аварії (травма або загибель джампера)
<i>O</i>	Y_0	Відсутність аварії

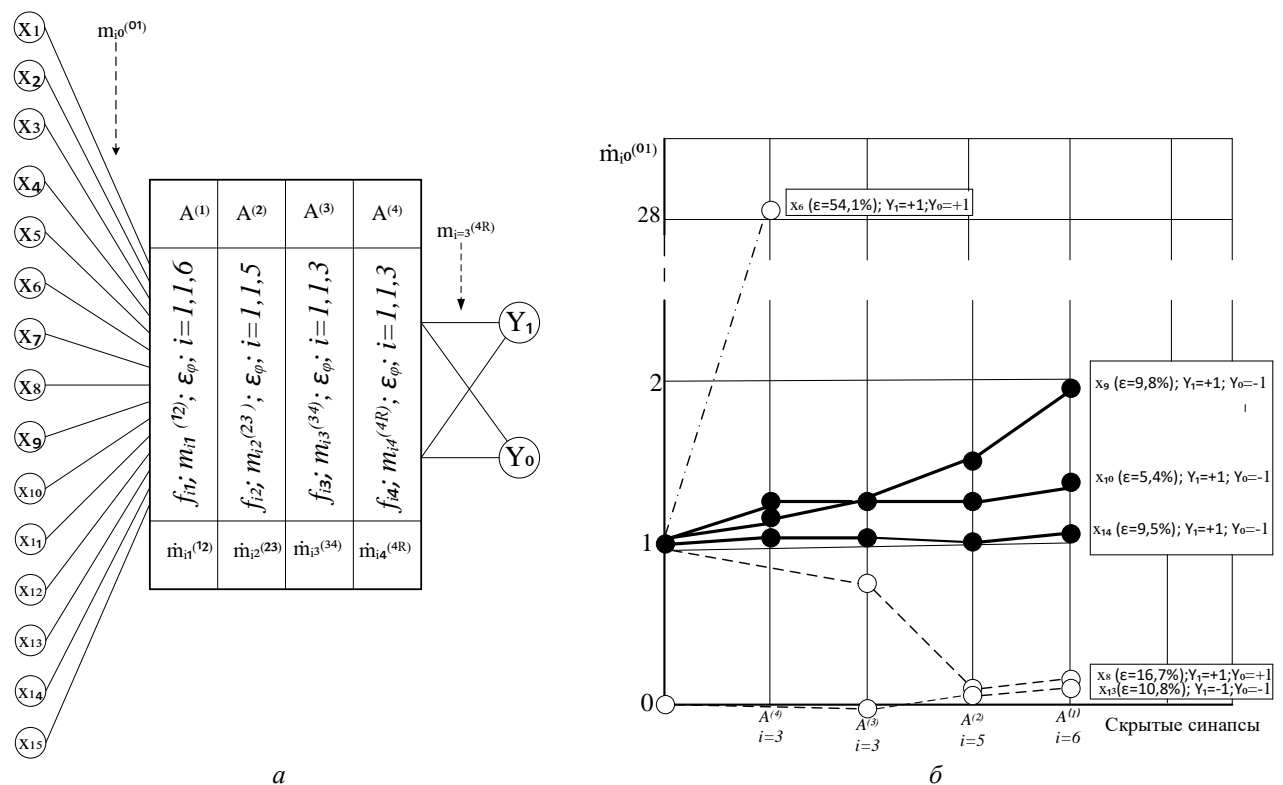


Рис. 1. Модель чотирисинапсної нейронної мережі *NM* для прогнозування та запобігання потенційним ризикам, пов'язаним зі спортивним роуп-джампінгом (а) та залежності в ній вагових коефіцієнтів вхідних сигналів від конфігурації прихованих синапсів у моделі *NS* роуп-джампінга (б).

При цьому корекція вагових коефіцієнтів вхідних сигналів здійснюється методом градієнтного спуску [8].

Апріорі прийемо в якості першого прихованого синапсного шару (позначимо його як $A^{(1)}$, що складається з $i = 6$ нейронів) з функціями активації послідовно f_i , ($i = 1, 1, 6$). Його синапси відповідають за технічні умови роботи системи, тобто за ті параметри, які задані попередньо, наприклад, довжина каната, його пружність, висота стрибка, тип і можливості страховального спорядження, тобто те, що не пов'язано безпосередньо з стрибком і індивідуальними особливостями

джампера. Вагові коефіцієнти цього шару позначаються як $m_i^{(12)}$. Другий синапсний шар $A^{(2)}$ з кількістю нейронів $i = 5$ та з активаційними функціями f_{i_2} , ($i = 1, 1, 5$) буде відповідати за управління сигналами, пов'язаними з чисто організаційною стороною джампа, а саме, вони пов'язані з попередньою підготовкою оснастки, попередніми інструктажами джампера, можливістю підняття його на висоту стрибка, ознайомлення зі джампом і т. д. Вагові коефіцієнти цього прихованого шару позначаються як $m_{i_2}^{(23)}$. Третій спрощений синапсний шар $A^{(3)}$ складається з трьох нейронів, для кожного з яких є функції активації f_{i_3} , ($i = 1, 1, 3$). Він відповідає за чисто суб'єктивні сигнали і події, з якими стикається система, у вигляді причинно-наслідкового зв'язку між джампером, інструктором і забезпечувальною системою, якщо такі з'являються в моделі. До них можна віднести, наприклад, приховані медичні причини для джампера, які виявляються під час самого стрибка. Вагові коефіцієнти тут позначаються як $m_{i_3}^{(34)}$. У прихованому синапсному шарі передбачено ще один, четвертий синапс $A^{(4)}$, з функціями активації f_{i_4} , ($i = 1, 1, 3$) трьох нейронів, який повинен реагувати своїми бінарними відгуками на можливі випадкові сигнали (якщо такі, згідно з умовами задачі, з'являються в моделі) або спонтанно виникають причинно-наслідкові зв'язки, що призводять до появи нових вхідних сигналів, які раніше не враховувалися при програмуванні моделі. Наприклад, непереборний страх у джампера, різка зміна погоди, вітер, шквали, поява на траєкторії стрибка незапланованих об'єктів, наприклад, птахів. У цьому шарі можна продублювати управління сигналами синапсів, що пов'язані з різкими змінами здоров'я джампера під час стрибка. Вагові коефіцієнти цього шару позначаються як $m_{i_r}^{(4R)}$, розуміючи наступний відкритий шар R як вихід системи у вигляді сигналів (Y_1, Y_0) .

Кожен з прихованих нейронних синапсних шарів має свої особливості в плані присвоєння власних функцій активації. Розв'язувана задача відрізняється тим, що *NM* повинна бути навчена простими функціями активації на першому, технічному етапі. Тут в якості функції активації нейронів (рис. 2, а) прийнята порогова функція типу $f_{i_1}(x) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } x \geq a; \\ 0, & \text{якщо } x < a. \end{cases}$ Другий і третій шари рівноцінні та визначаються функціями активації (див. рис. 2, б) типу ReLU – Rectified Linear Unit, виду $f_{i_2}(x) = \max(0, x)$.

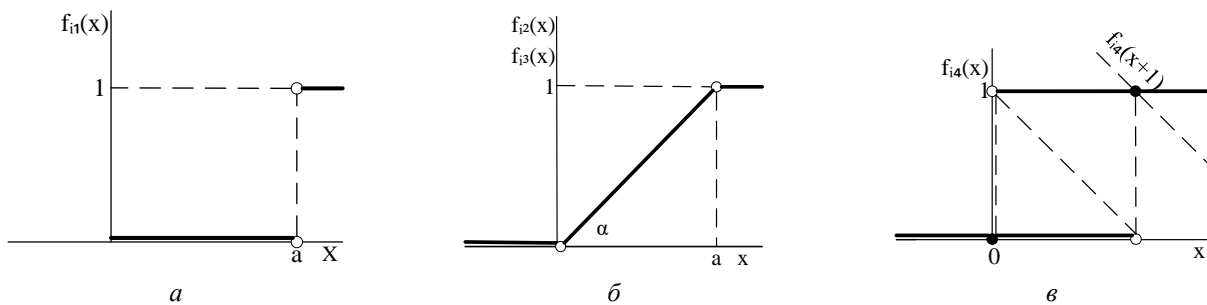


Рис. 2. Позначення функцій активації прихованих нейронних шарів у моделі *NS*: а – порогова функція активації нейронів; б – гранична функція активації; в – функція активації з невизначеними вхідними сигналами.

А ось четвертий синапсний шар, покликаний «справлятися» з випадковими і спонтанними вхідними сигналами в області їх невизначеності, пропонується описати функцією біфуркації (див. рис. 2, в)

$$\begin{cases} -[f_{i_4}(x) - f_{i_4}(x+1) + 1] = 0, & \text{коли } x \leq a; \\ -[f_{i_4}(x) - f_{i_4}(x+1) + 1] = 1, & \text{коли } x \geq a. \end{cases}$$

Слід зазначити, що всі ці функції активації легко програмуються на мові *Python* і відображені в програмних бібліотеках *Keras 2.3*, а програма функції активації біфуркації закладено авторами з використанням мови *Python*.

У процесі навчання *NM* (“*back propagation*”) вагові коефіцієнти як вхідних сигналів, так і коефіцієнтів на рівні прихованих нейронних синапсних шарів можуть мати деякі відмінності від початкових, тим самим виділяючи з числа виявлених ті, які відповідають актуальним подіям. Події,

що невизначені в моделі і незначні в ній, як правило, в процесі навчання *NM* мають вагові коефіцієнти, з великим розкидом значень від початкових, що говорить про те, що вони не виходять за межі можливого для правил експлуатації даної *NM*.

На виході нейронної мережі (*NM*) може бути отриманий бінарний сигнал (Y_1, Y_0) тобто «так-ні», який вказує на те, чи будуть реалізовані ті ризикоутворюючі події або їх комбінації, які можуть призвести до аварії, чи ні. Сфера реалізації - перехід подій зі стану подієвої невизначеності в одну, чітко визначену подію.

Фактори невизначеності (синапс $A^{(4)}$) проявили себе в 7 варіантах вхідних сигналів з 15-ти заявлених (табл. 2), що свідчить про достатність вибірки облікових подій. Початкові значення вагових коефіцієнтів зазнали певних, але, в деяких випадках, різних змін (коригувань), а оскільки вони несуть функції нейронної пам'яті в *NM*, то їх значення мають вирішальний вплив на кінцевий результат прогнозування. Ми можемо відразу звернути увагу на вхідні сигнали x_9 і x_{10} , а саме помилкові дії двох суб'єктів на старті – інструктора і джампера, що мають під собою психологічний стан обох суб'єктів. До цих вхідних сигналів примикає ще один сигнал x_{14} – точка переходу від вільної стадії польоту до іншої, пружної, що має під собою підставу у вигляді прихованих захворювань джампера (наприклад, серцево-судинні, кістково-суглобові), які проявляються в момент «точки неповернення», тобто без можливості щось виправити.

Таблиця 2

Основні параметри роботи нейронної мережі стосовно задачі про ризики у роуп-джампінгу

Вхідні сигнали <i>NM</i>	$m_{i_0}^{(01)}$	Ризикова помилка мережі, ε_Φ %		$A^{(4)}$				$A^{(3)}$	$A^{(2)}$	$A^{(1)}$	$m_{i_0}^{(01)}$	Вихідний сигнал	
				Коригування вагових коефіцієнтів на етапі «back propagation»									
				навч.	тест	$\Delta m_{i_0}^{(43)}$	$\Delta m_{i_0}^{(32)}$	$\Delta m_{i_0}^{(21)}$	$\Delta m_{i_0}^{(10)}$	Y_1		Y_0	
x_1	0,005	35,1	24,2	+0,2379	+0,0182	+0,0025	-0,2511	0,0125	-1	-1			
x_2	1,0	15,8	23,7	-	+0,8463	-0,1652	-1,4454	0,2357	+1	+1			
x_3	0,005	18,9	16,6	-	+0,2976	-0,2349	-0,0094	0,0583	-1	+1			
x_4	1,0	16,1	8,8	-	-0,4041	-1,2385	+1,6458	1,0032	+1	+1			
x_5	0,005	11,9	12,2	-	-0,2759	+0,3965	-0,1235	0,0021	-1	+1			
x_6	1,0	54,1	37,8	-4,686	+24,1191	+1,5423	+6,7777	28,754	+1	+1			
x_7	1,0	28,7	18,8	-	-0,0154	-0,2315	-0,5412	0,2119	-1	-1			
x_8	1,0	16,7	14,6	-	-0,2526	-0,7254	+0,1225	0,1445	+1	+1			
x_9	1,0	9,8	8,9	+0,1417	+0,1234	+0,3150	+0,4124	1,9925	+1	-1			
x_{10}	1,0	5,4	3,2	+0,1513	+0,1009	+0,0177	+0,0251	1,2950	+1	-1			
x_{11}	1,0	69,9	46,4	+23,641	+29,004	-0,9548	+11,725	64,415	-1	+1			
x_{12}	1,0	28,2	11,9	-0,2299	+0,3121	+0,0155	+0,0014	1,0991	+1	+1			
x_{13}	0,005	10,8	15,5	-	-0,0896	+0,0236	+0,1615	0,1005	-1	-1			
x_{14}	1,0	9,5	8,4	+0,0004	+0,0009	+0,0080	+0,0063	1,0156	+1	-1			
x_{15}	1,0	36,9	29,1	-	+1,2109	-0,0034	-1,5454	0,6681	+1	+1			
№	Нормативні показники												
1	Кількість вхідних сигналів								15				
2	Кількість вихідних сигналів								2				
3	Кількість спостережень								114				
4	Логічний опис класу подій						Клас Y_1 (правда)		Клас Y_0 (не правда)				
5	Кількість заданих образів для кожного класу								$N = 3$				
6	Порог активації								$h = 0,005$				
7	Параметр зсуву лінії розділу								$b = 1$				
8	Параметр очікуваного результату								$D = 2$				
9	Крок збіжності алгоритму “back propagation”								$\lambda = 0,005$				
10	Задана пошукова помилка мережі								$\varepsilon = 0,1$				

Саме ці три входи x_9, x_{10}, x_{14} пов'язані з найважливішими подіями, які найчастіше можуть призвести до остаточної реалізації ризику. Вони характеризуються високою узгодженістю вагових коефіцієнтів і низьким значенням фактичної похибки при навчанні і тестуванні системи. Але, навіть

ці три події при аналізі не завжди рівнозначні. Перші дві події, а саме помилки інструктора або джампера перед стартом, ще можуть бути усунені іншими уточнюючими подіями (їх вагові коефіцієнти вказують на це), і коригування вагових коефіцієнтів всередині синапсів в цьому випадку цілком послідовне і вони практично не залежать від рівня невизначеності (внутрішній синапс $A^{(4)}$). Тоді як стан з вхідним сигналом x_{14} і подія, пов'язана з переходом від однієї фази джампа до наступної, має дещо іншу передумову. Перш за все, ця подія програмується після проходження «точки неповернення», а це означає, що такий сигнал вже не підлягає уточненню або зміні в рамках потенційних ризиків події.

Аналогічні показники мають результати мережевого навчання за сигналом x_{12} , подією поза точки неповернення, а також сигналом x_4 . Вони також строго прив'язані до початкового значення вагового коефіцієнту, але з більшим розкидом даних в процесі корекції і більшою похибкою на етапі навчання. Результатом таких досліджень може стати лінія подій, які найчастіше призводять від очікуваних ризиків до реальних, за певний проміжок часу $\delta t \leq 30c$. До них відносяться формули (див. рис. 1) $S4 \rightarrow C2 \rightarrow B3 \rightarrow A$ і $S4 \rightarrow C3 \rightarrow B3 \rightarrow A$. Формули однотипні і обов'язково включають в себе або психологічні помилки інструктора на старті, або помилки джампера на старті, які проявляються в точці гальмування, тобто досягнення стану механічної рівноваги між двома основними етапами джампу, зокрема, те, що пов'язано зі станом здоров'я джампера (тиск, приховані хвороби кісних та м'язових тканин тощо). Інші події, які передують і супроводжують стрибки, не є основними у формуванні ризику. Ці формули безпосередньо відсікають ту частину подій, яка пов'язана з довгостроковими причинами.

Вивчаючи роботу нейронних мереж як механізму визначення ризиків в даному прикладі, звернемо увагу на сутність вагових коефіцієнтів для вхідних сигналів. Вони спочатку визначаються емпіричним шляхом особисто з досвіду користувача. Вагові коефіцієнти зазнають певних доопрацювань в процесі навчання NM («*back propogation*»). Потім за допомогою вагових коефіцієнтів, які відіграють роль пам'яті в NM , вхідні сигнали і їх групи ранжуються в залежності від їх важливості при послідовному проходженні через приховані шари нейронних синапсів, закладених у модель. Таким чином підтверджується важливість вагових коефіцієнтів для тих чи інших подій. Для розв'язуваної задачі в якості прикладу (рис. 1, б) звернемо увагу на величину уточнених вагових коефіцієнтів для сигналів, що відповідають подіям, зазначеним у формулах:

- $S4(x_4) : \dot{m}_{40}^{(01)} = 1,0032$ при помилках ($\varepsilon_{\phi 4}$) навчання – 9,8% і тестування – 8,9%;
- $C2(x_9) : \dot{m}_{90}^{(01)} = 1,9925$ при помилках ($\varepsilon_{\phi 9}$) навчання – 4% і тестування – 3,2%;
- $C3(x_{10}) : \dot{m}_{100}^{(01)} = 1,950$ при помилках ($\varepsilon_{\phi 10}$) навчання – 5,4% і тестування – 3,2%;
- $B3(x_{14}) : \dot{m}_{140}^{(01)} = 1,0156$ при помилках ($\varepsilon_{\phi 14}$) навчання – 9,5% і тестування 8,4%.

Ваговий коефіцієнт фактично показує ступінь впливу того чи іншого сигналу і пов'язаної з ним ризикоутворюючої події на всю систему. Тому уточнення або коригування цих показників залежить від динаміки зміни вагових коефіцієнтів, а отже, і від динаміки впливу тих чи інших сигналів на кінцевий результат. У процесі навчання NM кожен її нейрон, в залежності від своєї активаційної функції, «підлаштовує» кожен з вхідних сигналів таким чином, що на виході системи маємо однозначний розмір вихідного сигналу. Іноді вагові коефіцієнти стають позамежними, що свідчить про те, що або неправильно підібрана функція активації нейронів того чи іншого прихованого синапсного шару, або, це з'ясовується в процесі навчання, що величина впливу вхідного сигналу, не відповідає заданим нормативним показникам. Більш того, такі параметри будуть спотворювати загальну картину поведінки NM під час її навчання і експлуатації.

Для порівняння, інші уточнені в процесі навчання вагові коефіцієнти вхідних сигналів, або представлені позамежними значеннями, що виходять за рамки прийнятих в моделі NM стандартів, або мають досить великий розкид помилок навчання, що робить їх менш релевантними з точки зору ризикоутворюючих можливостей (рис. 1, б). Наприклад, це стосується сигналів x_6 ($\dot{m}_{40}^{(01)} = 28,754$) з похибкою на етапі навчання $\varepsilon_{\phi 60} = 54,1\%$, або x_{11} ($\dot{m}_{110}^{(01)} = 64,415$) з похибкою в навчанні у $\varepsilon_{\phi 110} = 69,9\%$.

Таким чином, основний ризик в роуп-джампі походить від суб'єктивних дій двох людей – джампера і інструктора – і найбільш активно проявляється в граничній фазі польоту, а саме при

переході від вільного падіння до реодинамічного руху тіла стрибуну. Найчастіше такі причини впливають з прихованих параметрів стану здоров'я джампера і виявляються вже після проходження «точки неповернення», що є суттєвою причиною реалізації ризиків. Модель *ММ* дозволяє самостійно, в процесі навчання і тестування, відсікати ті потенційні ризикоутворюючі події, які в конкретній ситуації не здатні привести до реалізації закладеного до них ризику і зосередитися на подіях, які гарантовано призведуть до реалізації реального ризику.

Литература

1. Коллери Ш. Бросая вызов притяжению: экстремальные виды спорта (Н. С. Кириллова, пер с англ.). Москва: АСТ-Пресс Книга. 2013. 77 с.
2. Гуць В. С., Коваль О. А. Роуп-джампінг. Математичне моделювання.//Education and science of today. Intersectoral issues and development of science. №327. Cambridg, UK. 2022. Електронний ресурс: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/file:///C:/Users/ASUS/Downloads/100%20(1).pdf.
3. Козіна Ж.Л., Остроушко С.С., Репко О.О. та ін. Особливості сприйняття екстремальної ситуації людей з різними типологічними особливостями вищої нервової діяльності (на прикладі роуп-джампінгу). Сборник статей XI Международной научной конференции «Физическое воспитание и спорт в высших учебных заведениях» Харьков, 2015. С.79–84.
4. Волошин В. С., Азархов О. Ю. Методика оцінки та інтерпретація ризику подій.// Міжнародна науково-практична конференція «Сучасний стан та перспективи біомедичної інженерії». Київ, 2023. НТТУ «КПІ». С. 64–66.
5. Волошин В. С. Models of event risks from the point of view of system's entropy// Вісник Приазовського державного технічного університету. Сер. Технічні науки. Вип. 43. 2021. С. 153–160.
6. Hopfield J. J. 1984. Neural with graded response have collective computational properties like those of two-state neurons. Proceedings of the National Academy of Science USA. 1984. Vol. 81, pp. 3088-3092/ // Електронний ресурс-[режим доступа]: <https://core.ac.uk/download/pdf/216115521.pdf>.
7. Hopfield, J.J., Tank, D.W. “Neural” computation of decisions in optimization problems. Biol. Cybern. 1985 Vol. 52, P.141–152.
8. Гасников А. В. Современные численные методы оптимизации. Метод универсального градиентного спуска : учебное пособие. – М.: МФТИ, 2018. – 291 с.