

А.С. Крючкова, Л.Г. Аржавкина, А.Н. Жекалов,  
О.В. Протасов, Е.А. Чернявский

## Влияние поражения воздушной ударной волной легкой и средней степени на физическую работоспособность и поведенческие реакции животных

Военно-медицинская академия им. С.М. Кирова, Санкт-Петербург

**Резюме.** Представлены результаты изучения динамики физической работоспособности и поведенческих реакций белых крыс в различные интервалы первых суток после поражения воздушной ударной волной легкой и средней степени тяжести. Физическую работоспособность оценивали через 30 мин, 3 и 24 ч после подрыва, поведенческие реакции – на 2-е и 3-е сутки. Расстояние от эпицентра взрыва боеприпаса равнялось 5 и 7 м, что по расчетам соответствовало легкой и средней степени тяжести повреждения. Установлено, что через 30 мин после воздействия статистически значимое снижение работоспособности наблюдалось только у животных со средней степенью тяжести поражения воздушной ударной волной, располагавшихся на расстоянии 5 м от источника взрыва. У животных из этой же группы наблюдалось выраженное нарушение поведенческих реакций. Животные с легкой степенью тяжести поражения, располагавшиеся на расстоянии 7 м от эпицентра взрыва, сохраняли физическую устойчивость на уровне контрольной, но у них нарушались поведенческие реакции. Через 3 ч после травмы у подавляющего большинства животных наблюдалось резкое снижение уровня физической работоспособности и усугублялись нарушения условно-рефлекторного поведения. К исходу первых суток после воздействия посттравматическая устойчивость частично восстанавливалась, но нарушения поведенческих реакций сохранялись. Полагаем, что у пострадавших во время взрыва при поражении воздушной ударной волной легкой и средней степени тяжести утрата трудо- и боеспособности будет непродолжительной, не более суток, при этом умственная работоспособность, по-видимому, будет страдать в большей степени и восстанавливаться медленнее.

**Ключевые слова:** воздушная ударная волна, контузионная травма, физическая работоспособность, степень тяжести травмы, поведенческие реакции, ориентировочно-исследовательское поведение, условная реакция пассивного избегания, условный рефлекс.

**Введение.** Исследованию повреждающего действия воздушной ударной волны (ВУВ) посвящены многочисленные работы отечественных и зарубежных исследователей [3, 6, 13, 14, 15] второй половины XX века, когда артиллерия и массированные авиационные бомбардировки имели решающее значение в ходе проведения боевых операций [8]. В настоящее время эта проблема не теряет актуальности вследствие угрозы международного терроризма.

ВУВ, образуемая при взрыве, имеет положительную и отрицательную фазы, а также фазу перемещения воздушной массы [2, 8]. Наряду с величиной избыточного давления во фронте ударной волны большое значение имеет длительность положительной фазы давления, которая, в свою очередь, зависит от массы взрывчатого вещества [19]. Скорость распространения ударной волны в эпицентре взрыва достигает 3000 м/с, затем снижается до скорости звука. Отрицательное давление, как правило, не превышает 100 кПа, но эта фаза гораздо дольше. Избыточное давление во фронте ударной волны может достигать несколько тысяч кПа [5, 7, 17, 18]. Воздействие ВУВ на человека представляет собой сложный процесс, в котором принято учитывать действие следующих

параметров:  $\Delta P$  (разность между нормальным давлением и уровнем давления во фронте ударной волны), форма волны (величина перепада давления перед фронтом ударной волны и позади него), действие динамического давления во фронте ВУВ и продолжительность действия ударной волны. Однако считается, что основной травмирующий эффект ВУВ зависит от скорости нарастания максимума  $\Delta P$ , т.е. импульса ударной волны [5, 7, 9–11]. Как правило, исследователи воздействия ВУВ на человека и подопытных животных классифицируют контузионную травму по пяти степеням тяжести в зависимости от величины  $\Delta P$  [1]. Характер повреждений при тяжелых контузионных травмах носит выраженный системный характер и к настоящему времени достаточно хорошо изучен. При этом в литературных источниках редко встречаются сведения, касающиеся повреждающего эффекта ВУВ средней и легкой степени тяжести.

**Цель исследования.** Исследовать физическую работоспособность и поведенческие реакции экспериментальных животных, подвергшихся поражению воздушной ударной волной легкой и средней степени тяжести.

**Материалы и методы.** Объектом исследования являлись 650 крыс-самцов линии vistar с массой тела 160–190 г. Содержание и использование животных соответствовало принятым правилам и законам.

На экспериментальной базе производились наземные подрывы 122 мм осколочно-фугасных боеприпасов (28 подрывов) и 3 кг тротила (4 подрыва). Расчетные величины избыточного давления во фронте ВУВ были близкими на исследуемых дальностях (5 и 7 м), поэтому данные, полученные при подрывах 122 мм снарядов и 3 кг тротила, объединены. Животные располагались по периметру на открытой местности на расстоянии 5 и 7 м от эпицентра взрыва. Учитывая, что в пределах поражаемого радиуса ВУВ могут возникать два вида взрывных поражений – многофакторный (поражение ударной волной в сочетании с другими факторами, прежде всего осколками) и монофакторный (поражение только ВУВ), в настоящем исследовании учитывался исключительно последний. Это достигалось размещением животных в зоне поражения ВУВ (при известных закономерностях картированного распределения осколков). Эмпирическим аналогом повреждения организма человека могут служить показатели устойчивости биологических объектов, одним из которых является время плавания в жидкой среде. Для адекватной оценки физической работоспособности лабораторных животных после воздействия ВУВ использовалась методика свободного плавания крыс «до отказа» с грузом, составляющим 8% от массы тела при температуре воды 22–24°C [12, 16]. Интегральность данной модели заключается в том, что практически любое серьезное нарушение функции какого-либо органа, системы или целостного организма обязательно ухудшает физическую выносливость [4]. Пробу с плаванием проводили в условиях полевой базы в специальном вертикальном бассейне из оргстекла, а на экспериментальной площадке – в пластиковом резервуаре диаметром 55 см. Глубина воды в бассейне исключала для животных возможность становиться на задние лапы. Утопление считалось полным тогда, когда крысы после очередного погружения на дно не всплывали в течение 10–15 с, что отвечало критериям создания «истинного» утопления, при котором первичным звеном повреждений в организме является обязательное проникновение жидкости в легкие. В качестве показателя физической выносливости животных при описании полученных результатов использовали время предельной продолжительности плавания (ВППП), выраженное в процентах от уровня данного показателя у крыс, не подвергавшихся воздействию поражающих факторов ВУВ (контрольная группа), т.е.  $VPPП = (t/t_1) 100\%$ , где  $t$  – среднее время плавания для исследуемых групп животных,  $t_1$  – среднее время плавания интактных крыс. Все животные прошли предварительную трехдневную тренировку, в ходе которой из опыта исключили как более слабых, так и наиболее выносливых особей.

Поведенческие реакции лабораторных животных изучали с помощью двух моделей – условная реакция

пассивного избегания электрокожного раздражения (УРПИ), представляющая элементарный оборонительный рефлекс, и ориентировочно-исследовательская реакция (ОИР), необходимая для формирования условно-рефлекторных связей. Именно этот тип реакций наиболее полно соответствует готовности, направленной на мобилизацию анализаторных систем. ОИР начинается как безусловный сигнал, а протекает как условный, поскольку подвергается угасанию – внутреннему условному торможению. При этом угасательное торможение ОИР следует рассматривать как вид привыкания биологически более общего проявления пластичности нервной системы. Пластичность делает привыкание активным процессом, позволяющим быстро приспосабливаться к изменившейся обстановке. Таким образом, ОИР позволяет адекватно оценить адаптацию к условиям окружающей среды.

Экспериментальная установка состояла из двух соединенных круглым отверстием камер: большой освещенной и малой темной с электрифицированным полом. Для выработки УРПИ крысу помещали на середину освещенной камеры хвостом к отверстию в темную камеру. Исследуя освещенное пространство, животное находило отверстие в темную камеру и проникало в нее. Латентный период включал время от момента помещения животного в установку до полного помещения его в темную камеру. Через 15 с на решетчатый пол камеры подавали переменный ток (50 Гц, 2–3 с, 10 мс), величину которого для каждого животного подбирали индивидуально по вокализации. Отверстие между камерами оставалось открытым. За перебежавшей в освещенную камеру крысой наблюдали в течение 3 мин. Если в течение этого времени животное не пыталось вернуться в темную камеру, УРПИ считалась выработанной с одной пробы. Крыс, повторно зашедших в темную камеру в течение 3 мин, исключали из опыта. Крыс с выработанной УРПИ извлекали из освещенной камеры и помещали в клетку, где они обычно содержались. Прочность выработанного навыка проверяли, помещая обученное животное в освещенную камеру на 3 мин. Если в течение этого времени крыса заходила в темную камеру, то это расценивали как амнезию навыка. Проверка, проведенная через 10, 15, 30, 45 мин, 1, 2, 4, 6, 8, 24 и 72 ч после выработки УРПИ, показала ее сохранность у всех подопытных животных контрольной группы.

В этой же установке изучали и ОИР экспериментальных животных. Во всех случаях, когда крыса впервые помещалась в освещенную камеру, отмечали выраженную реакцию кратковременного торможения («замирания»). Затем животное обнюхивало помещение и переходило в темный отсек, после чего – снова в светлый. Переходы повторялись в течение 3 мин 3–5 раз. На следующий день большинство животных сразу же пряталось в темный отсек. В опыте регистрировались время (с) обследования освещенной камеры и количество переходов из одной камеры в другую.

Физическую работоспособность животных оцени-

вали через 30 мин, 3 и 24 ч после подрыва, поведенческие реакции – на 2 и 3 сутки.

Статистическую обработку результатов проводили с помощью критериев Фишера и Стьюдента.

**Результаты и их обсуждение.** Установлено, что через 30 мин после подрыва у экспериментальных животных, подвергшихся поражению ВУВ легкой степени тяжести (I группа), не наблюдалось падения физической работоспособности относительно контрольного уровня. Через 3 ч после начала эксперимента отмечено значительное снижение исследуемого показателя, уровень которого составил 31% от контрольных величин. Через сутки происходило частичное восстановление посттравматической устойчивости, которая все же продолжала оставаться ниже фоновых значений (65%), хотя различия уже не носили статистически значимого характера. У крыс, подвергшихся поражению ВУВ средней степени тяжести, снижение физической работоспособности происходило во все изученные временные интервалы, достигая максимума через 3 ч после подрыва, когда потеря работоспособности становилась критической и падала в 5 раз по сравнению с контролем (табл. 1).

Таблица 1

**Изменение физической работоспособности крыс при поражении воздушной ударной волной легкой и средней степени тяжести в различные сроки первых суток после воздействия**

Время после воздействия	Время плавания, мин (M±m)		
	I группа, n=21	II группа, n=23	контроль, n=10
30 мин	15,31±3,65	9,02±1,78*	15,03±3,08
3 ч	4,69±0,47**	2,86±0,32**	
24 ч	9,74±1,69	7,11±1,09*	

**Примечание:** \* – p<0,05; \*\* – p<0,01 по сравнению с контролем.

Таким образом, поражение ВУВ средней степени тяжести приводило к немедленному (в отличие от легкой травмы) и более выраженному падению и менее быстрому по сравнению с первой группой восстановлению относительной посттравматической устойчивости пораженных животных.

Нарушения поведенческих реакций животных наблюдались во все сроки первых суток после воздействия ВУВ. Если физическая работоспособность ко вторым суткам практически восстанавливалась, то ориентировочно-исследовательское поведение животных достоверно отличалось от контрольных значений на 2-е и 3-и сутки после подрыва (табл. 2).

Выработка УРПИ во все установленные в эксперименте сроки после воздействия ВУВ была значительно затруднена, особенно через 3 ч после подрыва. Количество обучившихся животных достоверно отличалось от контрольных значений, принятых за 100%, и соответствовало через 30 мин после подрыва 85 и 72%, через 3 ч – 43 и 33%, через 24 ч – 51 и 41%, через 48 ч – 77 и 55% (в I и II группах соответственно).

Таким образом, через 30 мин после воздействия статистически значимое снижение работоспособности наблюдалось только у животных со средней степенью тяжести поражения ВУВ, располагавшихся на расстоянии 5 м от источника взрыва. Животные с легкой степенью тяжести поражения, располагавшиеся на расстоянии 7 м, сохраняли устойчивость на уровне контрольной группы. Через 3 ч у подавляющего большинства животных наблюдалось резкое снижение работоспособности. К исходу первых суток после воздействия посттравматическая устойчивость частично восстанавливалась. Поведенческие реакции животных нарушались сразу же после травмы и сохранялись на протяжении всего срока наблюдения. При этом пик нарушений ориентировочно-исследовательского поведения и способности к обучению также приходился на 3 часовой интервал. Можно предположить, что даже при легкой степени повреждения ВУВ более тонкие механизмы регуляции высшей нервной деятельности нарушаются в большей степени, чем физическая активность животных.

**Выводы**

Физическая работоспособность животных, подвергшихся воздействию воздушной ударной волны средней и легкой степени тяжести, незначительно снижается через 30 мин после взрыва, резко падает через 3 ч и постепенно восстанавливается к исходу первых суток.

Таблица 2

**Ориентировочно-исследовательское поведение крыс при поражении воздушной ударной волной легкой и средней степени тяжести в различные сроки после воздействия**

Время после воздействия	Ориентировочно-исследовательское поведение крыс					
	время (с) обследования освещенной камеры			количество переходов из одной камеры в другую		
	I группа, n=80	II группа, n=85	контроль, n=65	I группа, n=80	II группа, n=85	контроль, n=65
30 мин	140,9±7,1*	173±3,2**	40,4±2,7	0,6±0,01*	0,4±0,06*	2,4±0,01
3 ч	170,0±3,8*	173,0±3,1*		0,5±0,02*	0,2±0,04*	
24 ч	152±8,3*	101,9±9,6*		0,4±0,03*	0,3±0,03*	
48 ч	150,0±6,9*	97,1±5,3*		0,8±0,01*	0,2±0,01*	
72 ч	139±4,2*	139,0±4,2*		0,7±0,01*	0,3±0,07*	

**Примечание:** \* – p<0,01 по сравнению с контролем.

Ориентировочно-исследовательское поведение крыс и их способность к обучению условной реакции пассивного избегания снижаются сразу же после воздействия воздушной ударной волны как средней, так и легкой степени тяжести. Нарушения усугубляются через 3 ч после воздействия и сохраняются на протяжении 3 суток наблюдения.

Полагаем, что у пострадавших во время взрыва при поражении воздушной ударной волной легкой и средней степени тяжести утрата трудо- и боеспособности будет непродолжительной, не более суток, при этом умственная работоспособность, по-видимому, будет страдать в большей степени и восстанавливаться медленнее.

### Литература

1. Александров, Л.Н. Спец. тема: автореф. дис. ...д-ра мед. наук / Л.Н. Александров. – Л.: ВМА, 1956. – 214 с.
2. Баум, Ф.А. Физика взрыва / Ф.А. Баум. – М.: Наука, 1975. – 704 с.
3. Дзуцов, Н.К. Медико-тактическая характеристика террористических актов с использованием взрывоопасных предметов / Н.К. Дзуцов, Ш.Л. Меараго. – Росс. семейный врач. – 2008. – Т. 12. – С. 39–43.
4. Медицина катастроф. Отчет по теме / А.В. Смирнов [и др.]. – СПб., 1995. – 68 с.
5. Минно-взрывная травма / Э.А. Нечаев [и др.]. – СПб.: ВМА, 1994. – 488 с.
6. Миннуллин, И.П. Минно-взрывные поражения – глобальная проблема человечества / И.П. Миннуллин, Н.Ф. Фомин, Э.А. Нечаев // Медицина катастроф. – 2010. – № 2. – С. 34–36.
7. Насонкин, О.С. Патология физиология воздушной (взрывной) травмы / О.С. Насонкин // Лекции для слушателей. – Л.: Медицина, 1970. – 96 с.
8. Нечаев, Э.А. Взрывные поражения / Э.А. Нечаев // Тр. ВМА. – Т. 236. – СПб, 1994. – 212 с.
9. Нифонтов, Б.В. Воздушная взрывная травма / Б.В. Нифонтов. – М.: Медицина, 1957. – 166 с.
10. Покровский, Г.И. Взрыв и его применение / Г.И. Покровский. – М.: Воениздат, 1960. – 67 с.
11. Покровский, Г.И. Взрыв. Изд. 4-е, перераб. и доп. / Г.И. Покровский. – М.: Недра, 1980. – 190 с.
12. Усик, С.В. Гомоэнергетическая характеристика физических нагрузок различного характера / С.В. Усик, Р.И. Ленкова // Физиол. журн. СССР. – 1981. – Т. 67, № 9. – С. 1370–1374.
13. Характер возможных поражений и особенности организации медико-профилактических мероприятий при террористических актах на объектах железнодорожного транспорта / В.В. Романов [и др.]. // Медицина катастроф. – 2010. – № 1. – С. 15–18.
14. Шаповалов, В.М. Взрывные поражения при техногенных катастрофах и террористических актах / В.М. Шаповалов, И.М. Самохвалов // Воен.- мед. журн.. – 2012. – № 1. – С. 25–33.
15. Шаповалов, В.М. Поражающие факторы, механо- и патогенез, клинические проявления взрывных повреждений мирного времени / В.М. Шаповалов, И.М. Самохвалов, С.А. Лытаев // Менеджмент качества в сфере здравоохранения и социального развития. – 2012. – № 3. – С. 46–51.
16. Яковлев, Н. Н. Биохимия спорта / Н.Н. Яковлев. – М.: Фис, 1974. – 278 с.
17. Clemedson, C.J. Experimental study on air blast injury / C.J. Clemedson. – Acta physiol scand., 1946. – Vol. 82. – P. 206.
18. Fisher, H. Zur lokalisationen von kriegsverletzungen / H. Fisher // Wermed. monatschr., 1976. – № 7. – P. 206.
19. Owen-Smith, M.S. Explosive blast injury / M.S. Owen-Smith. // Rev. int. serv. saute armee, 1979. – Vol. 52, № 6. – P. 515–520.

A.S. Kriuchkova, L.G. Arzhavkina, A.N. Zhekalov, O.V. Protasov, E.A. Chernyavskiy

### Influence of blast wind injury of minor and medium severity on physical efficiency and behavioral reactions in animals

**Abstract.** The results of study on dynamics of physical efficiency and behavioral response of albino rats after getting blast injury wound of different severity at different time of the first 24 hours are presented. Physical efficiency was estimated in a fixed period of 30 minutes, 3 and 24 hours after explosion, the behavioral response was estimated in the same way with additional measurements on the second and the third day. The distances from the explosion epicenter were 5 and 7 meters, that corresponded to the injuries of minor and medium severity. It was stated that there was significant decrease in physical efficiency in animals suffered from blast wind injury of medium severity, which were situated at the distance of 5 meters from the explosion epicenter in 30 minutes after exposure. The animals of the same group showed significant abnormalities of behavioral response. Minor injured animals, which were situated at the distance of 7 meters from the explosion epicenter, showed stable physical efficiency but with abnormalities of behavioral response. It was revealed, that the overwhelming majority of animals, being injured, showed rapid decrease in physical efficiency and exacerbation in abnormalities of passive-avoidance conditioned response in 3 hours after getting injury. By the end of the first experimental day of exposure, there was partly resuscitation of post-traumatic stability, but abnormalities in behavioral response were retained. We believe that in the victims of the explosion after the defeat of the air shock wave of minor and medium severity loss of employment and combat capability will be short, no more than a day, with the mental capacity, apparently, will have greater extent and recover more slowly.

**Key words:** blast wind, contused wound, physical efficiency, the severity of injury, behavioral response, investigating behavior, passive-avoidance conditioned response, conditioned reflex.

Контактный телефон: 8-921-971-92-96; e-mail: vanadzor\_@rambler.ru