

УДК 004.928+004.421

DOI:10.22213/2410-9304-2023-1-102-114

## Стрелковый тренажер «Ингибитор»: математическое обеспечение рельефа стрельбища и экранирования

С. Ф. Егоров, кандидат технических наук, доцент,  
Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Ижевск, Россия

*Описывается математическое обеспечение построения рельефа стрельбища по изображению с поддержкой высоты и дальности каждой точки и с учетом экранирования мишеней складками местности для тренажера тактического оптико-электронного стрелкового оружия «Ингибитор», разработанного в Институте механики УдмФИЦ УрО РАН и на кафедре «Вычислительная техника» ИжГТУ имени М. Т. Калашникова совместно с АО «Концерн «Калашников».*

*Приводится тактико-техническое задание на функциональные возможности реализации рельефа стрельбища: холмы, овраги, горы на расстоянии до 2 км в секторе до 60°, экранирование мишеней и местных предметов складками местности. Предложена модель рельефа в виде билинейно интерполированной матрицы высот с шагом 10 м и разработан редактор, позволяющий на изображении стрельбища интерактивно задавать рубежи дальности и высоту местности по фронту. Экранирование видимости мишеней складками местности реализовано с помощью центральной проекции всех рельефных профилей для единого рабочего места стрелков, а для реализации окопов предложен механизм высоты мишени над поверхностью стрельбища, что оптимизирует отношение «качество-быстродействие». Проведенные исследования системы «проектор-экран-наблюдатель» показали наличие факторов погрешностей виртуального стрельбища, некоторые из которых носят принципиальный характер, а остальные удается компенсировать за счет регрессионной модели регистратора точки прицеливания и учета ее совокупной погрешности за счет уменьшения табличного баллистического рассеивания моделируемых выстрелов.*

*Исходя из перспективности дальнейших исследований и разработки электронных стрелковых тренажеров и благодаря совершенствованию вычислительных средств и развитию программных графических библиотек, необходимо расширять функциональные возможности тренажеров и снижать себестоимость, а значит, повышать конкурентоспособность, например улучшая реалистичность имитации рельефа стрельбища с экранированием мишеней складками местности.*

**Ключевые слова:** стрелковый тренажер, система координат, математическая модель рельефа, центральная проекция, экранирование.

### Введение

Разработка электронных стрелковых тренажеров (т. е. для ручного оружия и не использующих боеприпасы) с реалистичной мишенной обстановкой [1–8] и поддержкой как упражнений Курса стрельб, так и самостоятельно созданных, является важной задачей, т. к. производство любого вида стрелкового вооружения, согласно нормативным документам, требует и производства тренажера для привития навыков прицеливания и стрельбы. Тренажер может быть просто механической насадкой на боевое изделие (например, командирский ящик КЯ-83 или ПУС-7), но электронные тренажеры или боевые мишени, безусловно, обладают большими функциональными возможностями.

Стрелковый тренажер «Ингибитор» разрабатывался и модифицировался в Институте механики УдмФИЦ УрО РАН и на кафедре «Вычислительная техника» ИжГТУ имени М. Т. Калашникова совместно с АО «Концерн «Калашников»

и принят на вооружение под индексом 1У33 [9–12]. Нарботки в настоящее время используются для следующего семейства тренажеров.

Актуальность дальнейшего исследования и разработки электронных стрелковых тренажеров основана на высокой эффективности тренажеров и мультимедийных тиров особенно на первоначальном этапе обучения стрельбе для постановки правильной стойки, хвата, дыхания, удержания оружия, прицеливания, производства плавного спуска курка и отражена в работах [13–23]. Кроме этого, тренажеры отличаются безопасностью тренировок и быстрой окупаемостью по сравнению с войсковыми стрельбищами и боевыми тирами.

Целью статьи является разработка и исследование алгоритмов и структур данных моделей представления рельефа стрельбища с привязкой к изображению и с возможностями экранирования мишенной обстановки складками местности при центральной проекции для тактического оп-

тико-электронного тренажера стрелкового оружия «Ингибитор».

#### Тактико-техническое задание

Требования ТТЗ [24] к моделированию рельефа стрельбища сводятся к следующему.

1. Ведение имитированной стрельбы из различных положений (лежа, с колен, стоя) по мишенной обстановке (неподвижным, появляющимся и движущимся целям) согласно упражнениям Курса стрельб. Выполнение упражнений

в секторе не менее  $60^\circ \times 12^\circ$  с одинаковым видом мишенной обстановки и местности для различных положений стрельбы (экран для 3 проекторов на расстоянии  $5,5 \text{ м} \pm 0,5 \text{ м}$  и размером  $6,4 \times 2,2 \text{ м}$ ). Для ведения обучения в горной местности огневые позиции и имитатор мишенной обстановки должны быть установлены на двух уровнях в секторе не менее  $20^\circ \times 36^\circ$  (экран до  $2,2 \times 6,4 \text{ м}$ ,  $20^\circ \times 45^\circ$ , рис. 1).

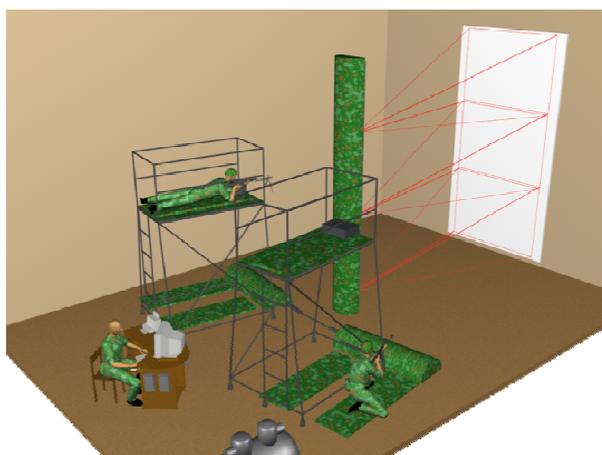
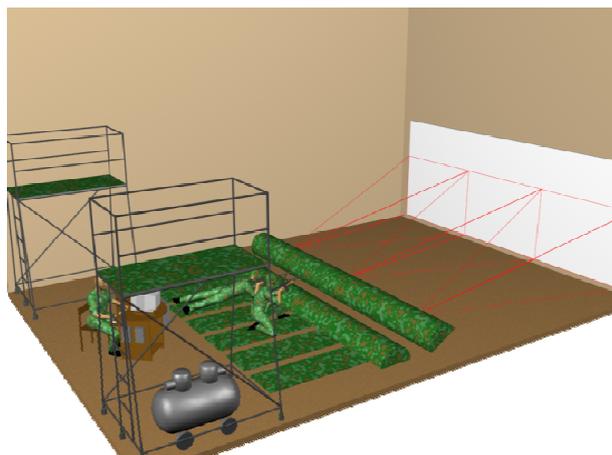


Рис. 1. Равнинный и горный варианты развертывания тренажера

Fig. 1. Flat and mountain versions of simulator deployment

2. В качестве укрытия могут быть складки местности, окопы, здания и сооружения, выведенная из строя боевая техника. Демаскирующими признаками в этом случае является частичное наблюдение цели или ее периодическое появление.

3. Движение целей на фоне отснятой местности должно осуществляться с учетом ее рельефа и находящихся на ней местных предметов. Последние должны экранировать цели при их скрытии за ними. Частичное или полное маскирование целей должно осуществляться также и складками местности...

Таким образом, основными задачами разработки математического обеспечения рельефа стрельбища (МОРС) является выбор систем координат, эффективного внутреннего представления рельефа, редактора форматов графических файлов, реализации поддержки экранирования мишенной обстановки складками местности.

#### Математическая модель рельефа стрельбища

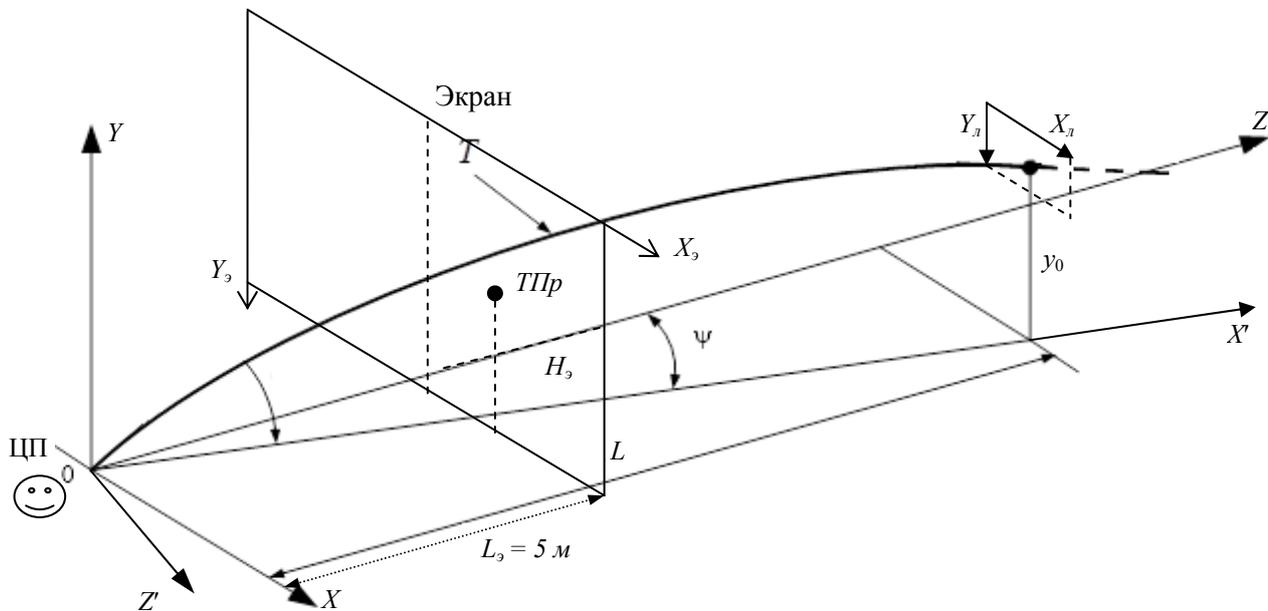
Согласно упражнениям для стрелкового оружия из Курса стрельб необходимо моделировать в тренажере стрельбища с углом обзора по горизонтали не менее  $60^\circ$  и глубиной до

2 км, что и отражено в ТТЗ. Остротой зрения среднестатистического человека считается примерно  $1' = 0,0167^\circ$ . И значит, при расстоянии от проекционного экрана мишенной обстановки с рабочей шириной 6,6 м (на 8 рабочих мест) до глаза стрелка в  $5,5 \pm 0,5 \text{ м}$  (которое считается минимальным для привития навыков прицеливания, когда глаз фокусируется на цели, а мушка и прицел реалистично расфокусированы [25]) получается  $\approx 62^\circ$ . Линейный размер точки изображения должен быть не больше 1,6 мм и, соответственно, желательное разрешение экрана по горизонтали не менее 4125 пикселей. В тренажере «Ингибитор» в качестве разумного упрощения остановились на 3072 пикселях (с размером точки на экране  $D_s = 2,15 \text{ мм}$  и разрешающей способностью  $1,34' = 0,0224^\circ$ ), для поддержки которых потребовалось 3 проектора  $1024 \times 768$  точек (сейчас же лучше использовать 3 HD-проектора  $1280 \times 720$  или 2 FHD-проектора  $1920 \times 1080$  – они лучше соответствуют идеальным требованиям, но подходят только для равнинного варианта развертывания).

В ПО тренажера используется четыре системы координат (СК, рис. 2). Это связанные 3D-СК-стрельбища (СКС, XYZ) и баллистики (СКБ, X'YZ') с единими началами координат (в  $L = 5 \text{ м}$

от экрана), но с обменом осей  $X$  и  $Z$  (традиционно для баллистики ось  $X$  идет вдаль, СКБ поворачивается вокруг  $Y$  на угол курса  $\psi$ , для СКС традиционно вдаль идет ось  $Z$ , для совместимости координаты СКБ просто меняются местами  $Z'YX'$ ). Для описания мишеней и отметки попаданий используется перемещаемая локальная система координат СКЛ  $X_L Y_L$ . СКС, СКБ и СКЛ

имеют единый масштаб и легко преобразуются друг в друга, а точнее, СКБ поворотом вокруг  $Y$  и заменой координат  $X \leftrightarrow Z$  в СКС и СКЛ переносом в СКС. Кроме них есть 2D-СК экрана (СКЭ,  $X_s Y_s$ ) с началом координат в верхнем левом углу проекционного экрана и осью  $Y$ , традиционно идущей вниз с целочисленными координатами (рис. 2).



Траектория пули  $T$ , проходящая через  $y_0$  в СКБ на  $L$ -дальности

Рис. 2. Системы координат и баллистическая траектория

Fig. 2. Coordinate Systems and Ballistic Trajectory

За начало координат СКС (и СКБ) выбрана точка пересечения линии прицеливания имитатора оружия («целик»-«мушка», дает ТПр – точку прицеливания на экране) и дульного среза в положении лежа напротив горизонтального центра экрана, и оно не изменяется от реального положения стрельбы (стоя или с колена, но большинство упражнений Курса стрельб все же для положения лежа) и от реального расположения стрелка на рабочем месте (а их 8 с шагом 0,8 м и даже есть верхний ярус на 2 м в горном варианте, рис. 1). Такое упрощение является вполне приемлемым, т. к. изображение на экране едино для стрелков всех рабочих мест, а типичное минимальное расстояние до мишеней в 100 м много больше размеров рабочей зоны тренажера. Переход в СКЭ получается методом центрального проецирования СКС (вместе с СКБ после выстрела и СКЛ всех мишеней в текущих позициях) из точки центральной проекции (ЦП) в начале координат с реалистичны-

ми перспективными искажениями и экранированием мишенной обстановки складками местности (рельефа).

Таким образом, начало координат  $(0,0,0)$  в сантиметрах выше дульного среза на высоту мушки имитатора оружия в положении лежа и находится напротив нижней средней точки экрана на расстоянии  $L_s=500$  см (или 2325,6 pix) и в 40 см над полом (принято, что стрельба на 100 м на большинстве стрельбищ без угла места цели, далее стандартные стрельбища возвышаются примерно на  $5^\circ$ , рис. 3). Конструктивно экран натянут на установленную на полу раму и низ изображения выше пола на 15 см, а линия глаз стрелка считается в 40 см над полом, тогда начало координат находится в  $H_s=(40-15)=25$  см = 116,3 pix над нижним краем экрана для нижнего яруса стрелков. Для верхнего яруса горного варианта, где глаз стрелка в положении лежа в 2 м над полом,  $H_s^B=200$  см –  $(40-H_s)=175$  см = 814 pix.



Рис. 3. Равнинный вариант развертывания тренажера с изображением стрельбища

Fig. 3. Flat version of simulator deployment with shooting range image

Моделирование рельефа стрельбища является важным фактором реалистичности мишенной обстановки, а значит, и всей тренировки при использовании стрелкового тренажера. Если можно использовать специфику рельефа при создании сценариев боевых действий, например прокладывая траекторию движения цели по складкам местности, то можно заставить мишень исчезнуть из поля зрения и затем появиться в другом месте, хотя упражнения Курса стрельб такого и не предусматривают. Таким образом, необходимо обеспечить возможность задания, хранения и обработки информации о рельефе (а конкретнее о высоте в каждой точке поверхности для отображения мишеней на ней), позволяющей определять все три координаты каждой точки стрельбища и впоследствии

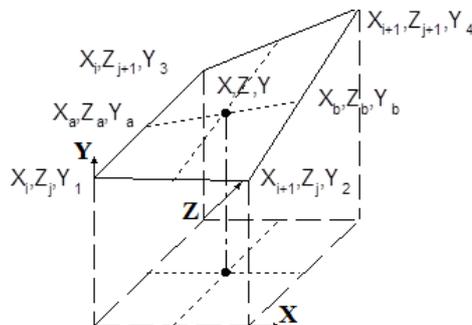
находить точку пересечения с поверхностью траектории движения боеприпаса. При этом высокой точности описания высоты реального рельефа не требуется (достаточно  $\pm 0,3$  м и даже более), а высокое быстродействие определения пересечения имеет первостепенное значение.

Исходя из анализа основных методов описания рельефа из [26], объединенных по рейтингу в таблицу, оптимальной моделью рельефа по соотношению «скорость+память/точность» можно считать метод 4: задание высот точек поверхности с равномерным шагом (например, 10 м) по осям  $X$  и  $Z$  в пространстве стрельбища СКС (рис. 4) с расчетом промежуточных значений высоты билинейной интерполяцией  $Y = BL(X, Z)$ . При этом поверхность между высотами получается «седловидной».

#### Анализ способов расчета высоты рельефа $4 \text{ км}^2$ с шагом 10 м

#### Analysis of methods of $4 \text{ км}^2$ relief height calculation in 10 m increments

№	Метод	Память	Скорость	Погрешность	Трудоемкость
1	Уравнения поверхности (бикубические поверхности Безье)	3	4	<b>1</b>	4
2	Полигональная сетка триангуляции	2	<b>1</b>	4	2
3	Массив вокселей	4	3	2	3
4	<b>Билинейная интерполяция регулярной сетки</b>	<b>1</b>	2	3	<b>1</b>



$$Y_a = Y_1 + \frac{(Y_3 - Y_1)(Z_a - Z_j)}{(Z_{j+1} - Z_j)}$$

$$Y_b = Y_2 + \frac{(Y_4 - Y_2)(Z_b - Z_j)}{(Z_{j+1} - Z_j)}$$

$$Y = Y_a + \frac{(Y_b - Y_a)(X - X_i)}{(X_{i+1} - X_i)}$$

Рис. 4. Равномерная сетка высоты рельефа

Fig. 4. Coordinate Systems and Ballistic Trajectory

Таким образом, высоты стрельбища между узлами равномерной решетки матрицы высот вычисляется по формуле билинейной интерполяции:

$$Y = BL(X, Y) = Y_{i,j} + \frac{(Y_{i,j+1} - Y_{i,j})(Z - Z_j)}{(Z_{j+1} - Z_j)} + \frac{(Y_{i+1,j} - Y_{i,j})(X - X_i)}{(X_{i+1} - X_i)} + \frac{(Z - Z_j)(X - X_i)(Y_{i,j} - Y_{i+1,j} - Y_{i,j+1} + Y_{i+1,j+1})}{(X_{i+1} - X_i)(Z_{j+1} - Z_j)}, \quad (1)$$

где  $(Z_{j+1} - Z_j) = \Delta Z$  и  $(X_{i+1} - X_i) = \Delta X$  – шаг решетки и равен 1000 см по  $i$  и  $j$ , а  $I = X \text{ div } 1000$ ,  $j = Z \text{ div } 1000$  – индексы матрицы высот  $YY$   $[-100...100, 0...200]$ .

### Алгоритм описания рельефа по изображению

Подготовка изображений стрельбищ включает фотосъемку панорамы стрельбищ с места стрельбы днем (стандартные стрельбища имеют вначале небольшой спуск и далее небольшой подъем  $\approx 5^\circ$  для видимости всех рубежей стрельбы и мишенной обстановки) и корректировку в графическом редакторе (кадрирование, масштабирование, удаление лишних объектов, коррекцию освещенности, тумана и т. п.). Далее необходимо задать информацию о рельефе каждого стрельбища, привязав точки изображения визуально к дальности (например, ориентируясь на топокарты или проведенные замеры у ориентиров, высокой точности для реалистичности не требуется).

Для реализации этих задач разработан специализированный редактор рельефа, поддерживающий графические файлы формата BMP (24 бита RGB на цвет без сжатия) и размером  $3072 \times 768$  точек для равнинного варианта и  $1024 \times 2304$  для горного.

Хотя файл фона стрельбища все же предпочтительнее заранее приготовить во внешнем графическом редакторе, но можно обойтись и тремя встроенными функциями редактора рельефа: вырезать окно, изменить размер окна и «ретушь» – закрашивание дефектов изображения соседними областями с полупрозрачностью.

После «Выбрать файл фона», «Задать параметры фона» (горный/зимний/туманный) и «Задать описание фона» – комментарий, надо «Ввести рельеф», когда «мышкой» с шагом 100 м (шаг выбирается сверху окна, но меньше нет смысла) изменяем высоты узлов рельефных линий (рис. 5), прорисованных по рубежам через 100 м, подгоняя их под визуальную картин-

ку. После редактирования рельеф сохраняется в файле (\*.REL), а промежуточные значения высот до шага  $10 \times 10$  м вычисляются линейной интерполяцией, на рубеже 0 м высота считается  $-1$  м. Кроме этого, редактор позволяет задать границу «неба» (как правило, граница лес-небо, иначе она вычисляется автоматически по разности цветовой палитры, необходимо для преобразования в ночное стрельбище) и, при необходимости, добавить на стрельбище «туман».

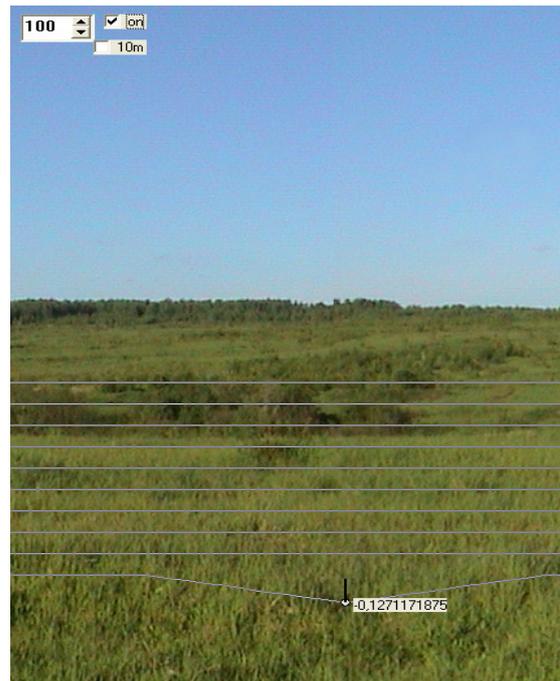


Рис. 5. Окно редактирования рельефа

Fig. 5. Relief Edit Window

### Математическая модель центральной проекции и экранирования рельефом

Для основного положения тренировок, которое и выбрано как основа математической модели – лежа внизу по фронту с 8 рабочих мест стрелкового отделения (через  $\approx 80$  см), – получаются углы прицеливания от  $\approx 0^\circ$  до  $+15^\circ$  (реально до  $8^\circ$ , больше только для упражнений «по парашютному десанту» и «по вертолету»). На рис. 6 представлена геометрия получения изображения на экране в СКЭ при центральной проекции СКС для равнинного варианта с примером экранирования видимости нижней части мишени на рубеже 300 м складками местности (что не мешает ее поразить как по навесным баллистическим траекториям, так и даже по настильным: для АК-74 превышение траектории на 160 м будет 20 см).

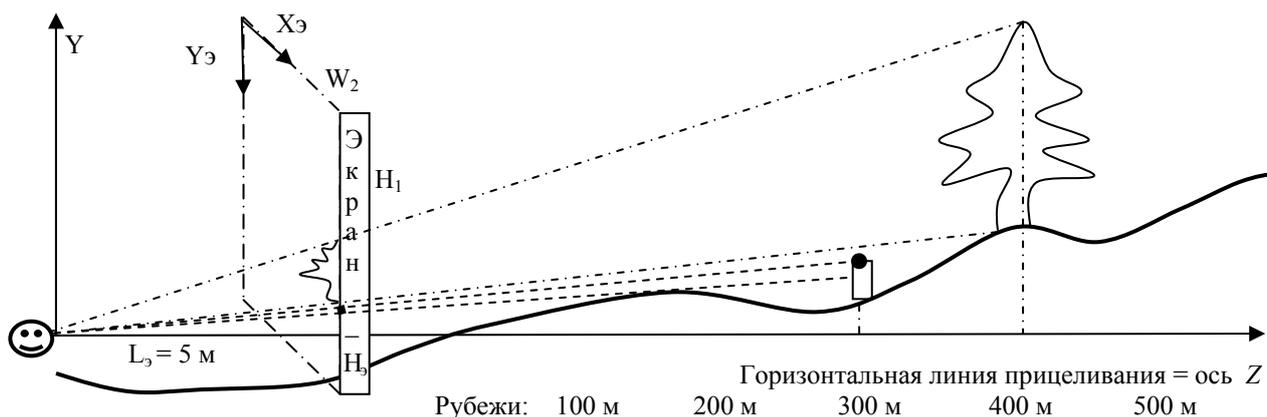


Рис. 6. Проекция мишенной обстановки на экран

Fig. 6. Projection of the target environment on the screen

При этом координаты мишеней на поверхности стрельбища с координатами  $(X, Z)$  и  $Y = BL(X, Z)$  по (1) при пересчете из СКЗ в СКЭ будут вычисляться по формулам центральной проекции из подобия треугольников:

$$X_3 = W_2 + L_3 \frac{10}{D_3} \frac{X}{Z},$$

$$Y_3 = H_1 - (L_3 \frac{10}{D_3} \frac{BL(X, Z)}{Z} + H_3),$$

где  $10/D_3 = 4,65$  pix/cm – количество пикселей экрана в сантиметре;  $W_2 = 1536$  pix – горизонтальная середина экрана,  $H_1 = 768$  pix – высота равнинного экрана в пикселях;  $H_3 = 116,3$  pix – расстояние от края экрана до оси  $Z$  в пикселях;  $L_3 = 500$  см ( $L_3 * 10/D_3 = 2325,6$  pix) – расстояние до проекционного экрана.

Из-за одинаковости изображения мишенной обстановки для всех стрелковых мест и позиций стрельбы при просчете баллистической кривой выстрела приоритетным является угол прицеливания, а модель проекционного экрана получается цилиндрической, а не плоской, т. е. с равным расстоянием до всех точек экрана ( $L_3$ ) от центра координат.

Таким образом, подсистема отображения рельефа местности и мишенной обстановки определяет качество подготовки обучаемых и призвана максимально повысить реалистичность тренировки. Для этого нужно подменить смоделированным изображением информацию о целях, воспринимаемую человеком через органы зрения в процессе реальной тренировки с оружием. От степени реалистичности подобного моделирования зависит степень соответствия полученных навыков реальным навыкам прицелива-

ния и стрельбы. И одним из факторов является центральная проекция.

Для создания реалистичной картины стрельбища с местными объектами и мишенями также необходимо учесть, что ближние объекты, в том числе складки местности, должны экранировать (заслонять) дальние объекты при пересечении их проекций на экранную плоскость. Следовательно, перед выводом каждого нового изображения объекта необходимо определить, какая часть его будет видна наблюдателю.

Для каждого объекта размером  $X \times Y$  и с координатами на стрельбище  $(X_o, Z_o)$  заводится бинарная матрица видимости  $M[X \times Y]$ , в которой 1 изначально соответствует видимому пикселю изображения (а невидимыми пикселями в системе  $RGB$  считаются  $(R > 250) \& (G > 250) \& (B > 250)$ ) и фиксируется высота основания объекта  $Y_o = BL(X_o, Z_o)$ .

По матрице высот рельефа  $YY$  от  $Z_o$  объекта движемся к наблюдателю (координата  $(0, 0, 0)$ ) и на каждом рубеже  $Z_p$  с шагом 10 м вычисляем линии рельефа рубежа по  $X$  пересекаемых ячеек матрицы (как правило, не более 3 ячеек соседних по горизонтали, т. е. 3 высоты по фронту 20 м) и накладываем их в виде ломаной с двумя отрезками на матрицу видимости объекта  $M$  (рис. 7) с учетом  $Y_o$ , заполняя вертикальными линиями 0-й до текущей высоты рельефа по каждой  $X$  матрицы от  $X_l$  до  $X_n$  как «тени» от «срезов» рельефа.

При этом два соседних среза рельефа дают все максимальные высоты поверхности внутри ячейки (из определения билинейной интерполяции).

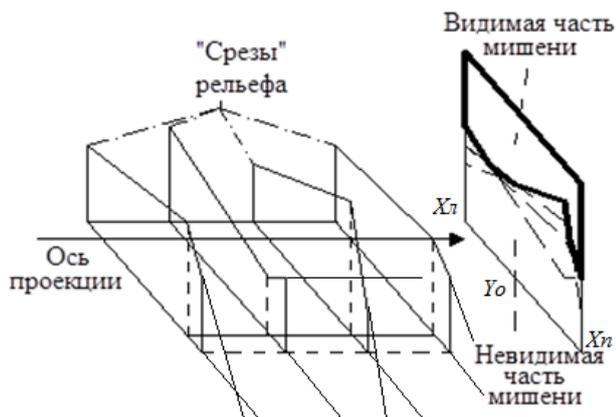


Рис. 7. Матрица видимости по срезам рельефа

Fig. 7. Visibility matrix by relief slices

Для повышения реалистичности «тени» ( $M = 0$ ) должны формироваться с использованием

уравнений центральной проекции рельефа на плоскость мишени, где центром проекции является точка наблюдения  $(0,0,0)$  по формулам:

$$X = \left[ \frac{X_{л}}{Z_o} Z_p \dots \frac{X_{п}}{Z_o} Z_p \right],$$

$$M \left[ X_{л} \dots X_{п}, 0 \dots \left( \frac{BL[X, Z_p]}{Z_p} Z_o - Y_o \right) \right] = 0.$$

Далее, при выводе на проекционный экран таких объектов используются только пиксели с  $M[] = 1$ . Для ускорения, чтобы постоянно не вызывать  $BL(X, Z)$ , можно рассчитать только узлы отрезков «теней» и соединить их прямой, например по методу растровой развертки отрезка Брезенхема, и «затенить» ( $M[] = 0$ ) все, что ниже (рис. 8).

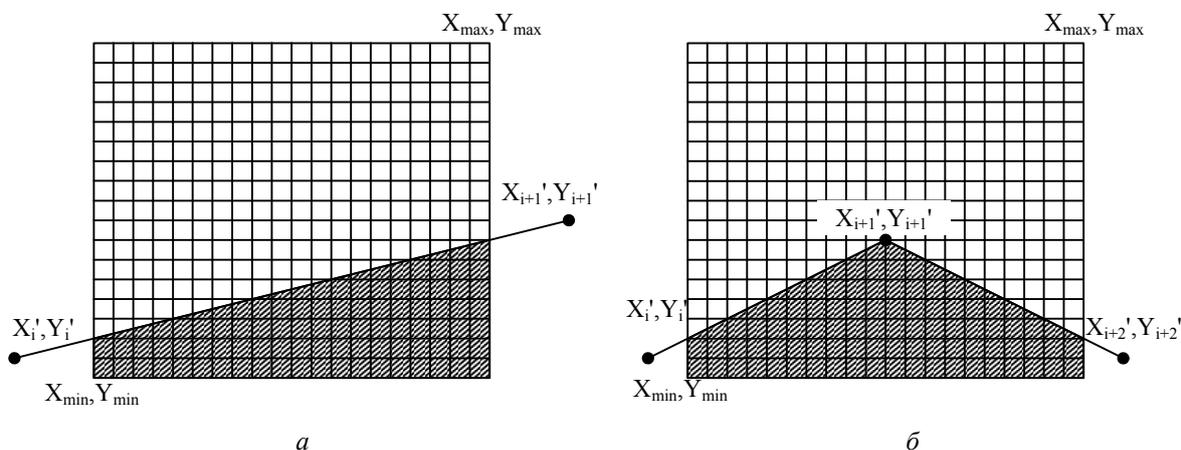


Рис. 8. «Затенение» матрицы видимости рельефом: а – по двум вершинам матрицы высот; б – по трем вершинам

Fig. 8. "Shading" the visibility matrix with relief: a) on two vertices of the height matrix b) on three vertices

Таким образом, в реализованном методе видимости мишени обстановки ведется трассировка «теней» рельефа на объекты. Это связано с малым размером суммарной площади объектов по сравнению с фоновым изображением стрельбища, что повышает скорость синтеза виртуального стрельбища.

**Исследование системы «проектор-экран-наблюдатель»**

Проекционным экраном является матовая ровная поверхность, вертикально натянутая на жесткую раму, при размерах 6,6×2,2 м она отличается некоторой парусностью, но ее игнорируем. На раме есть механические регуляторы натяжения экрана и до 10° вертикальности с отвесами на регулируемых опорах, но процедура трудоемка. Проведены исследования [27] для выбора материала экрана, кроме прочности

и эластичности, обеспечивающего максимальное отражение ИК-лазера точки прицеливания имитатора оружия. Наилучшим оказался матовый белый материал для натяжных потолков фирмы Extenzo, но по соотношению цены к качеству была выбрана матовая баннерная ткань. Таким образом, анализ конструкции экрана выявляет множество моментов погрешностей, такие как не «идеальные» плоскость экрана, вертикальность стоек, расстояние до рабочих мест по нормали и т. п.

Проектор должен находиться строго напротив экрана (оптическая ось каждого из трех проекторов упирается в центр своей части экрана по нормали), при этом оптика проектора конструктивно обеспечивает пропорциональное изображение на плоском экране без геометрических искажений. Но проектор чаще всего не

может технически быть размещен напротив центра экрана, экран все же ориентирован на комфорт смотрящих, поэтому в проекторах есть система цифровой коррекции «трапцевидных» искажений изображений (keystone, рис. 9) по вертикали, но все же требующая строгого размещения проектора напротив горизонтальной середины экрана (под потолком или на столе-полу, в нашем случае в ферме на полу, рис. 1). Существуют проекторы с гибкой системой оптической подстройки геометрии изображения и даже автоматической по встроенной камере обратной связи, но такие проекторы малодос-

тупны и все равно не обеспечивают автоматическую состыковку изображений соседних проекторов. Верхние пиксели на строго вертикальном экране должны превращаться в нашем случае в вертикальные прямоугольники из-за большего расстояния до верхней кромки по сравнению с нижней (рис. 9), до +8 % высоты пикселя к ширине. Таким образом, анализ показал, что сам проектор можно считать «идеальным», без собственных оптических геометрических погрешностей изображения на экране после настройки, но система «проектор-экран» принципиально дает геометрические искажения.

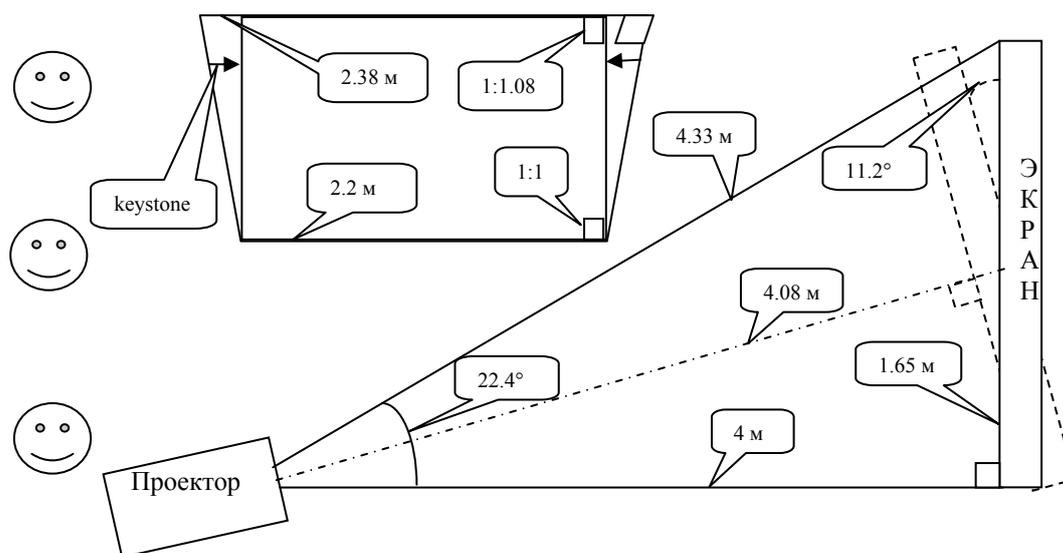


Рис. 9. Геометрические искажения «проектор-экран»

Fig. 9. «Projector-screen» geometric distortion

Для некоторой компенсации геометрических погрешностей системы «проектор-экран» в нашем случае можно наклонить экран вперед на  $11,2^\circ$  для положения тренировок лежа, но для усреднения с положениями с колена и стоя рекомендуется наклонять лишь на  $\approx 5^\circ$  (рис. 9). В горном варианте развертывания тренажера (рис. 1) проекторы находятся напротив середины своей части экрана и не вносят геометрических искажений системы «проектор-экран».

Наблюдатель может размещаться перед экраном в широком диапазоне рабочих мест по всему фронту 6,6 м на расстоянии 5...6 м, и это приводит к видимым искажениям изображения мишенной обстановки. Расстояния до краев плоского экрана в любом случае больше, чем по нормали, в худшем случае, когда наблюдатель на расстоянии 5 м от экрана у левой границы смотрит на мишень у правой границы экрана в 6 м (рис. 10), расстояние увеличивается до 7,81 м и мишень шириной  $1^\circ$  (8,73 см  $\approx 40,6$  то-

чек) и высотой  $3^\circ$  будет казаться из-за разворота плоскости отображения как  $\approx 0,42^\circ$  ( $\approx 5,67$  см) шириной и как  $\approx 1,92^\circ$  высотой. То есть из-за увеличения расстояния до мишени на плоском экране по диагонали в дальнем углу она кажется визуально ниже более чем в полтора раза и уже более чем в два раза по сравнению с истинными угловыми размерами. Такие искажения не позволяют тренируемым определять корректно расстояния до объектов по их угловым размерам, но не мешают прицеливаться и попадать, т. к. позиция стрелка в математической модели тренажера считается всегда постоянной в положении лежа напротив горизонтальной середины экрана. Данные принципиальные искажения приходится игнорировать исходя из того, что мишени в подавляющем большинстве упражнений располагаются напротив стрелка, а разведка местности и действия отделения в обороне по всему экрану осуществляются относительно местных ориентиров и по командам руководи-

теля (более идеальным экраном для одного рабочего места был бы сферический или хотя бы

цилиндрический, что и наблюдается в некоторых индивидуальных стрелковых тренажерах).

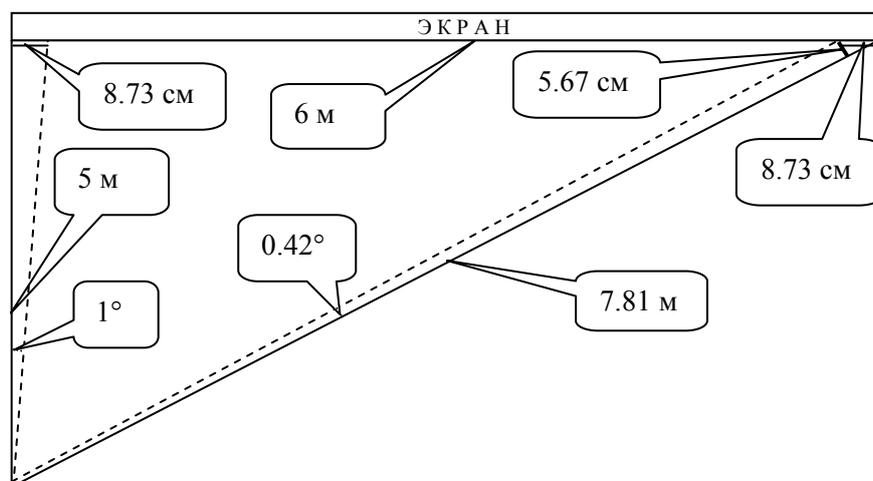


Рис. 10. Геометрические искажения «наблюдатель-экран»

Fig. 10. «Observer-screen» geometric distortion

Таким образом, все допущения (упрощения) визуальных математических моделей тренажера связаны с принципиальной невозможностью корректно реализовать полноценную математическую модель «проектор-экран-наблюдатель» одновременно для 8 разнесенных рабочих мест и для трех положений стрельбы (лежа, стоя, с колена), но самое главное – в этом нет необходимости, ведь многие искажения системы «проектор-экран» можно компенсировать регрессионной математической моделью при тарировке системы регистрации точки прицеливания и учесть оставшиеся погрешности в моделируемом табличном баллистическом рассеивании боеприпасов при выстреле (путем его геометрического уменьшения) (см. работы С. Ф. Егорова и др. по теме «Ингибитор» в этом журнале за 2020–2022 гг.).

По результатам исследований выработана методика настройки системы «проектор-экран», которую рекомендуется проводить еженедельно:

1. Проверка и настройка рамы с экраном по угловому отвесу и нивелиру.

2. Проверка и настройка ферма с проекторами с помощью рулетки и нивелира.

3. Проверка и настройка проекторов в ферме по уровню горизонта нивелира и по углам тестового прямоугольника на экране командами с пульта (keystone).

4. Проверка и настройка всех проекторов на единый масштаб и состыковку соседних по тестовым изображениям командами с пульта.

Пункт 4 рекомендуется проверять ежедневно.

## Выводы

Анализ МО рельефа стрельбища с экранированием мишеней показал:

1. МОРС хранит информацию о рельефе в виде матрицы высот с шагом 10 м с билинейной интерполяцией значений между узлами, что позволяет передать крупные складки местности: холмы, овраги, окопы для бронетехники; для реализации же ям или индивидуальных окопов введена отрицательная высота мишени над поверхностью рельефа, что повышает реалистичность при высоком быстродействии и с минимальными затратами памяти. Для связи ВМР-изображения реального стрельбища с рельефом разработан интерактивный редактор.

2. МОРС использует экранирование складками рельефа видимости мишенной обстановки путем их центральной проекции на плоскость мишени, что повышает реалистичность отображения, но сохраняет возможность поражения мишеней навесными траекториями в невидимую часть.

3. Исследование на точность системы «проектор-экран-наблюдатель» показало наличие факторов погрешностей и пути их устранения, что позволяет в процессе тарировки системы регистрации точки прицеливания автоматически учесть многие погрешности и геометрически вычесть их из баллистического рассеивания используемых имитаторов оружия.

Таким образом, исходя из актуальности использования электронных стрелковых тренажеров, предлагается базироваться в дальнейших исследованиях и разработках на предложенные

и испытанные математические модели представления рельефа с экранированием мишенной обстановки, особенно благодаря высокой гибкости программного обеспечения, позволяющего в реальном времени реалистично отображать стрелковые упражнения.

### Библиографические ссылки

1. *Muñoz J.E., Pope A.T., Velez L.E.* Integrating Biocybernetic Adaptation in Virtual Reality Training Concentration and Calmness in Target Shooting. // *Physiological Computing Systems. Lecture Notes in Computer Science*, vol 10057. 2019. Springer, Cham. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-27950-9\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-030-27950-9_12).
2. *Lábr M., Hagara L.* Using open source on multi-parametric measuring system of shooting // *ICMT 2019 - 7th International Conference on Military Technologies*. DOI: 10.1109/MILTECHS.2019.8870093.
3. *Fan YC., Wen CY.* A Virtual Reality Soldier Simulator with Body Area Networks for Team Training // *SENSORS*. 2019, vol. 19, no. 451. DOI: 10.3390/s19030451.
4. *de Armas C., Tori R., Netto A. V.* Use of virtual reality simulators for training programs in the areas of security and defense: a systematic review // *Multimed Tools Appl*. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11042-019-08141-8>.
5. *Fedaravičius A., Pilkauskas K., Slizys E., Survila A.* Research and development of training pistols for laser shooting simulation system // *Defence Technology*. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2019.06.018>.
6. *Maciejewski M., Piszczek M., Pomianek M., Palka N.* Optoelectronic tracking system for shooting simulator - tests in a virtual reality application // *PHOTONICS LETTERS OF POLAND*. 2020, vol. 12, no. 2, pp. 61-63. DOI: 10.4302/plp.v12i2.1025.
7. *Taylor P.* Dispatch Priming and the Police Decision to Use Deadly Force // *POLICE QUARTERLY*. 2020, vol. 23, no. 3, pp. 311-332. DOI: 10.1177/1098611119896653.
8. *Maciejewski M., Piszczek M., Pomianek M., Palka N.* Design and Evaluation of a SteamVR Tracker for Training Applications – Simulations and Measurements // *METROLOGY AND MEASUREMENT SYSTEMS*. 2020, vol. 27, no. 4, pp. 601-614. DOI: 10.24425/mms.2020.134841.
9. *Корнилов И. Г., Афанасьева Н. Ю., Веркиенко Ю. В.* Обратная модель системы «проектор – экран – опико-электронный преобразователь» стрелкового тренажера // *Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова*. 2007. № 1. С. 63–65.
10. *Корнилов И. Г.* Измерительно-вычислительная система определения точки попадания в стрелковом тренажере коллективного боя // *Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова*. 2012. № 2. С. 110–113.
11. *Егоров С. Ф.* Информационные потоки в электронном стрелковом тренажере // *Интеллектуальные системы в производстве*. 2010. № 2 (16). С. 132–134.
12. *Егоров С. Ф., Казаков В. С.* История создания опико-электронного стрелкового тренажера «Ингибитор» // *Информационные технологии в науке, промышленности и образовании : сб-к трудов регион. науч.-техн. очно-заочной конф. / науч. ред. В. А. Куликов. Ижевск, 2016. С. 134–142.*
13. *Прекина Т. А., Гвоздев А. К., Мудрик И. А.* Освоение огневой подготовки курсантами МВД в современном мире с применением инновационных технологий // *Эпоха науки*. 2020. № 23. С. 79–82.
14. *Таков А. З., Курманова М. К.* Применение современных технологий в обучении стрельбе из боевого оружия // *Современные наукоемкие технологии*. 2020. № 11-2. С. 412–416. DOI: 10.17513/snt.38398.
15. *Никифоров П. В., Музафин Р. Р.* Использование стрелковых тренажеров в подготовке сотрудников ОВД // *Евразийский юридический журнал*. 2020. № 3 (142). С. 275–276.
16. *Ермоленко С. А., Клименко С. С., Курза А. В.* Особенности использования стрелкового тренажера СКАТТ на занятиях по огневой подготовке // *Эпоха науки*. 2020. № 22. С. 47–49.
17. *Жемчужников А. В.* Современное состояние и перспективы технического развития электронных стрелковых комплексов // *Альманах Пермского военного института войск национальной гвардии*. 2021. № 4 (4). С. 116–119.
18. *Коряковцев Д. А., Плешков А. В., Гурылев В. И.* Использование стрелковых тренажеров на занятиях по огневой подготовке в образовательных организациях МВД России // *Эпоха науки*. 2021. № 25. С. 96–98. DOI: 10.24412/2409-3203-2021-25-96-98.
19. *Синютин Ю. В., Цуканов А. С.* Перспективы использования электронных стрелковых систем в учебном процессе по огневой подготовке сотрудников правоохранительных органов // *Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму*. 2021. № 3-4 (153-154). С. 147–154.
20. *Першин А. Т., Большакова В. А., Гусевская К. С.* Использование стрелковых тренажеров «Рубин» в профессиональной подготовке сотрудников полиции // *Символ науки: международный научный журнал*. 2021. № 4. С. 101–103.
21. *Юрков М. Н.* Применение современных стрелковых тренажеров при проведении занятий по огневой подготовки курсантов образовательных учреждений ФСИН России // *Молодой ученый*. 2021. № 5 (347). С. 374–375.
22. *Огрыза А. В., Ульрих С. А., Таран А. Н.* Практическая значимость использования электронных тренажеров на занятиях по огневой подготовке // *Евразийский юридический журнал*. 2022. № 1 (164). С. 419–420.
23. *Иньшин Ю. Ю., Липаткин А. В.* Стрелять хорошо и много инновационные подходы в обучении курсантов стрельбе с использованием боевого лазерного интерактивного высокоточного комплекса «БЛИК-ВТ» // *Вестник военного образования*. 2022. № 3 (36). С. 28-33.
24. *Егоров С. Ф.* Стрелковый тренажер «Ингибитор»: функциональная схема программного обеспечения // *Интеллектуальные системы в производстве*.

2019. Т. 17, № 2. С. 19–29. DOI: 10.22213/2410-9304-2019-2-19-29.

25. Оптико-электронные стрелковые тренажеры. Теория и практика / В. С. Казаков, Ю. В. Веркиенко, В. В. Коробейников, Н. Ю. Афанасьева. Ижевск : ИПМ УрО РАН, 2007. 260 с.

26. Смирнов А. А. Разработка методики и алгоритмов имитации местности и мишенной обстановки в стрелковых тренажерах : дис. ... канд. техн. наук. – Ижевск, 2001. 148 с.

27. Корнилов И. Г. Подсистема визуализации целей, имитации выстрела и определения точки попадания в стрелковом тренажере : дис. ... канд. техн. наук. Ижевск, 2006. 128 с.

### References

1. Muñoz J.E., Pope A.T., Velez L.E. Integrating Biocybernetic Adaptation in Virtual Reality Training Concentration and Calmness in Target Shooting. Physiological Computing Systems. Lecture Notes in Computer Science, vol 10057. 2019. Springer, Cham. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-27950-9\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-030-27950-9_12).

2. Lábr M., Hagara L. Using open source on multi-parametric measuring system of shooting. ICMT 2019 - 7th International Conference on Military Technologies. DOI: 10.1109/MILTECHS.2019.8870093.

3. Fan YC., Wen CY. A Virtual Reality Soldier Simulator with Body Area Networks for Team Training. SENSORS. 2019, vol. 19, no. 451. DOI: 10.3390/s19030451.

4. de Armas C., Tori R., Netto A. V. Use of virtual reality simulators for training programs in the areas of security and defense: a systematic review. Multimed Tools Appl. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11042-019-08141-8>.

5. Fedaravičius A., Pilkauskas K., Slizys E., Survila A. Research and development of training pistols for laser shooting simulation system. Defence Technology. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2019.06.018>.

6. Maciejewski M., Piszczek M., Pomianek M., Palka N. Optoelectronic tracking system for shooting simulator – tests in a virtual reality application. PHOTONICS LETTERS OF POLAND. 2020, vol. 12, no. 2, pp. 61-63. DOI: 10.4302/plp.v12i2.1025.

7. Taylor P. Dispatch Priming and the Police Decision to Use Deadly Force. POLICE QUARTERLY. 2020, vol. 23, no. 3, pp. 311-332 (1098611119896653). DOI: 10.1177/1098611119896653.

8. Maciejewski M., Piszczek M., Pomianek M., Palka N. Design and Evaluation of a SteamVR Tracker for Training Applications – Simulations and Measurements. METROLOGY AND MEASUREMENT SYSTEMS. 2020, vol. 27, no. 4, pp. 601-614. DOI: 10.24425/mms.2020.134841.

9. Kornilov I.G., Afanas'eva N.Yu., Verkienko Yu.V. Obratnaya model' sistemy «proektor – ekran – optiko-elektronnyi preobrazovatel'» strelkovogo trenazhera [Reverse model of the system "projector - screen - optoelectronic converter" shooting simulator]. Vestnik

IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova, 2007, no. 1, pp. 63-65 (in Russ.).

10. Kornilov I.G. Izmeritel'no-vychislitel'naya sistema opredeleniya tochki popadaniya v strelko-vom trenazhere kollektivnogo boya [Measuring and computational system for determining the point of hit in the collective combat shooter]. Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova, 2012, no. 2, pp. 110-113 (in Russ.).

11. Egorov S.F. Informatsionnye potoki v elektronnom strelkovom trenazhere [Information flows in the electronic shooting exercise machine]. Intellektual'nye sistemy v proizvodstve, 2010, no. 2, pp. 132-134 (in Russ.).

12. Egorov S.F., Kazakov V.S. Istoriya sozdaniya optiko-elektronnogo strelkovogo trenazhera «Ingibitor» [History of creation of the optical-electronic shooting "Inhibitor" exercise machine]. Informatsionnye tekhnologii v nauke, promyshlennosti i obrazovanii. Sbornik trudov reg-oi nauchno-tekhnicheskoi ochnozaochnoi konf. [Information technologies in science, the industry and education. Collection of works regional scientific and technical intramural and extramural conf.] (ed. Kulikov V.A.). Izhevsk, 2016, pp. 134-142 (in Russ.).

13. Prekina T.A., Gvozdev A.K., Mudrik I.A. Osvoenie ognevoi podgotovki kursantami MVD v sovremennom mire s primeneniem innovatsionnykh tekhnologii [Development of fire training by students of the MIAffairs in the modern world using innovative technologies]. Epokha nauki, 2020, no. 23, pp. 79-82 (in Russ.).

14. Takov A.Z., Kurmanova M.K. Primenenie sovremennykh tekhnologii v obuchenii strel'be iz boevogo oruzhiya [Application of modern technologies in training in firing from combat weapons]. Sovremennye naukoemkie tekhnologii, 2020, no. 11-2, pp. 412-416 (in Russ.). DOI: 10.17513/snt.38398.

15. Nikiforov P.V., Muzafin R.R. Ispol'zovanie strelkovykh trenazherov v podgotovke sotrudnikov OVD [Use of shooting simulators in training of IAO]. Evraziiskii yuridicheskii zhurnal, 2020, no. 3 (142), pp. 275-276 (in Russ.).

16. Ermolenko S.A., Klimenko S.S., Kirza A.V. Osobennosti ispol'zovaniya strelkovogo trenazhera SKATT na zanyatiyakh po ognevoi podgotovke [Peculiarities of SCATT shooting simulator use in fire training classes]. Epokha nauki, 2020, no. 22, pp. 47-49 (in Russ.).

17. Zhemchuzhnikov A.V. Sovremennoe sostoyanie i perspektivy tekhnicheskogo razvitiya elektronnykh strelkovykh kompleksov [The current state and prospects for the technical development of electronic rifle complexes] Al'manakh Permskogo voennogo instituta voisk natsional'noi gvardii. 2021, no. 4 (4), pp. 116-119 (in Russ.).

18. Koryakovtsev D.A., Pleshkov A.V., Gurylev V.I. Ispol'zovanie strelkovykh trenazherov na zanyatiyakh po ognevoi podgotovke v obrazovatel'nykh organizatsiyakh MVD Rossii [The use of shooting simulators in fire training classes in educational organizations of the MIA of Russia] Epokha nauki. 2021, no. 25, pp. 96-98 (in Russ.) DOI: 10.24412/2409-3203-2021-25-96-98.

19. Sinyutin Yu.V., Tsukanov A.S. Perspektivy ispol'zovaniya elektronnykh strelkovykh sistem v uchebnom

*protsesse po ognevoi podgotovke sotrudnikov pravookhranitel'nykh organov* [Prospects for the use of electronic rifle systems in the training process for the fire training of law enforcement officers] *Voprosy oboronnoi tekhniki. Seriya 16: Tekhnicheskie sredstva protivodeistviya terrorizmu*. 2021, 3-4 (153-154), pp. 147-154 (in Russ.).

20. Pershin A.T., Bol'shakova V.A., Gusevskaya K.S. *Ispol'zovanie strelkovykh trenazherov «Rubin» v professional'noi podgotovke sotrudnikov politzii* [The use of «Rubin» rifle simulators in the professional training of police officers] *Simvol nauki: mezhdunarodnyi nauchnyi zhurnal*. 2021, no. № 4, pp. 101-103 (in Russ.).

21. Yurkov M.N. *Primenenie sovremennykh strelkovykh trenazherov pri provedenii zanyatii po ognevoi podgotovki kursantov obrazovatel'nykh uchrezhdenii FSIN Rossii* [The use of modern shooting simulators when conducting fire training classes for cadets of educational institutions of the FPS of Russia] *Molodoi uchenyi*. 2021, no. № 5 (347), pp. 374-375 (in Russ.).

22. Ogryza A.V., Ul'rikh S.A., Taran A.N. *Prakticheskaya znachimost' ispol'zovaniya elek-tronnykh trenazherov na zanyatiyakh po ognevoi podgotovke* [Practical significance of using electronic simulators in fire training classes] *Evraziiskii yuridicheskii zhurnal*. 2022, no. № 1 (164). pp. 419-420 (in Russ.).

23. In'shin Yu.Yu., Lipatkin A.V. *Strelyat' khorosho i mnogo innovatsionnye podkhody v obuchenii kursantov strel'be s ispol'zovaniem boevogo lazernogo interaktivnogo vy-sokotochnogo kompleksa «BLIK-VT»* [Shoot

well and many innovative approaches in training cadets in shooting using the combat laser interactive high-precision complex "BLIK-VT"] *Vestnik voennogo obrazovaniya*. 2022, no. 3 (36). pp. 28-33 (in Russ.).

24. Egorov S.F. *Strelkovyi trenazher «Ingibitor»: funktsional'naya skhema programmnoho obespecheniya* [Shooting simulator «Inhibitor»: functional diagram of the software]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, 2019, vol. 17, no. 2, pp. 19-29 (in Russ.). DOI: 10.22213/2410-9304-2019-2-19-29.

25. Kazakov V.S., Verkienko Yu.V., Korobeinikov V.V., Afanas'eva N.Yu. *Optiko-elektronnye strelkovye trenazhery. Teoriya i praktika* [Optical-electronic shooting exercise machines. Theory and practice]. Izhevsk, Institute of mechanics UB RAS, 2007, 260 p. (in Russ.).

26. Smirnov A.A. *Razrabotka metodiki i algoritmov imitatsii mestnosti i mishennoi obstanovki v strelkovykh trenazherakh* [Development of a technique and algorithms of imitation of the area and target situation in shooting exercise machines]: PhD thesis. Izhevsk, 2001, 148 p. (in Russ.).

27. Kornilov I.G. *Podсистема vizualizatsii tselei, imitatsii vystrela i opredeleniya tochki popadaniya v strelkovom trenazhere* [The subsystem of visualization is more whole, imitations of a shot and definition of a point of hit in the shooting exercise machine]: PhD thesis. Izhevsk, 2006, 128 p. (in Russ.).

\*\*\*

### Shooting Simulator «Inhibitor»: Mathematical Support of Fire Range and Shielding

S. F. Egorov, PhD in Engineering, Associate Professor, Senior Scientific Associate, Udmurt Federal Research Center UB RAS, Izhevsk, Russia

*Mathematical support for constructing the relief of a shooting range from an image with support for the height and range of each point and taking into account the screening of targets by folds terrain for tactical optical-electronic simulator of the small arms "Inhibitor" developed at Institute of mechanics UdmFRC UB RAS and at Computer facilities department of Kalashnikov ISTU jointly with JSC «Kalashnikov Concern» was described.*

*The tactical and technical task for the functional capabilities of implementing the relief of the shooting range is given: hills, ravines, mountains at a distance of up to 2 km in the sector up to 60°, shielding targets with folds of the area. A relief model is proposed in the form of a bilinear interpolated matrix of heights with a pitch of 10 m, and an editor is developed that allows interactively specifying range boundaries and terrain height along the front on the image of the shooting range. Screening the visibility of targets by folds of the terrain is implemented using the central projection of all relief profiles for a single workplace of shooters, and for the implementation of trenches, a mechanism for the height of the target above the surface of the shooting range is proposed, which optimizes the "quality-speed" ratio. Studies of the «projector-screen-observer» system showed the presence of factors of errors in the virtual shooting range, some of which are of a fundamental nature, and the rest can be compensated for by the regression model of the target point recorder and taking into account its cumulative error by reducing the tabular ballistic dispersion of simulated shots.*

*Based on the prospects for further research and development of electronic shooting simulators and thanks to the improvement of computing tools and the development of software graphics libraries, it is necessary to expand the functionality of the simulators and reduce the cost, which means to increase competitiveness, for example, improving the realism of simulating the terrain of the shooting range with screening of targets by folds of the terrain.*

**Keywords:** shooting simulator, coordinate system, mathematical relief model, central projection, shielding.

Получено: 14.02.23

**Образец цитирования**

*Егоров С. Ф.* Стрелковый тренажер «Ингибитор»: математическое обеспечение рельефа стрельбища и экранирования // Интеллектуальные системы в производстве. 2023. Т. 21, № 1. С. 102–114. DOI: 10.22213/2410-9304-2023-1-102-114.

**For Citation**

Egorov S.F. [Shooting simulator «Inhibitor»: mathematical support of fire range and shielding]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2023, vol. 21, no. 1, pp. 102-114 (in Russ.). DOI: 10.22213/2410-9304-2023-1-102-114.