МАШИНОСТРОЕНИЕ И РОБОТОТЕХНИКА

Статья поступила в редакцию: 26.09.2026
Статья принята к публикации: 02.10.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 623.442.58:519.224.2

DOI: 10.32743/UniTech.2026.151.10.23525

Кучность стрельбы на дальние дистанции: влияние разброса начальной скорости и БК на примере спортивной винтовки 33ХС

Богословский Владимир Николаевич
д-р. техн. наук
Российская Федерация, г. Москва
E-mail: vnbog@mail.ru

Long-range shooting precision: effects of muzzle velocity and BC variation in a 33XC sporting rifle

Bogoslovsky Vladimir Nikolaevich
Dr. Tech. Sciences,
Russian Federation, Moscow

Аннотация

В статье исследуется влияние технической кучности спортивной винтовки калибра 33ХС, разброса начальной скорости и баллистического коэффициента (BC) пули Berger .338 300 gr на суммарную угловую кучность в диапазоне дистанций 100–2500 м. В представленных расчётных сценариях показано, что на дистанциях до 1000–1500 м винтовка 33ХС, настроенная на более высокую техническую кучность, обладает очевидным преимуществом. Однако по мере увеличения дальности возрастает вклад в угловое рассеивание разброса скорости и BC, а вклад технической кучности снижается. Нелинейный характер влияния разброса скорости и BC связан с различиями во времени полёта и интенсивности торможения пуль на одинаковых по длине участках траектории.

Основной результат исследования состоит в выявлении предельной дистанции применения данного калибра и пули в 1500–2000 м, при которой вклад технической кучности в суммарную кучность еще высок, и вклад зависящих от дальности параметров пули еще не привел к неприемлемо большому рассеиванию облака пропаданий.

Библиографическое описание: Богословский В.Н. Кучность стрельбы на дальние дистанции: влияние разброса начальной скорости и БК на примере спортивной винтовки 33ХС // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23525

Статья будет полезна разработчикам спортивных винтовок и боеприпасов к ним, спортсменам-стрелкам, охотникам, а также всем любителям высокоточной спортивной стрельбы из нарезного оружия.

Работа выполнена в интересах мирового спортивного стрелкового сообщества по инициативе авторов и на их собственные средства, с использованием открытых источников информации.

Abstract

This article investigates the effects of the intrinsic precision of a 33XC target rifle, variations in muzzle velocity, and variations in the ballistic coefficient (BC) of the Berger .338 300 gr bullet on overall angular dispersion at distances of 100–2500 m. The computational scenarios presented demonstrate that, at distances of up to 1000–1500 m, a 33XC rifle tuned for greater intrinsic precision offers a clear advantage. However, as range increases, muzzle velocity and BC variations contribute increasingly to angular dispersion, while the relative contribution of intrinsic rifle precision decreases. The nonlinear effects of muzzle velocity and BC variations are associated with differences in flight time and deceleration over trajectory segments of equal length.

The principal finding of the study is the identification of a limiting effective range of 1500–2000 m for this cartridge and bullet combination, within which intrinsic rifle precision still makes a substantial contribution to overall precision, while range-dependent effects of bullet parameter variations have not yet caused an unacceptably large spread of impact points.

The article will be useful to designers of target rifles and ammunition, competitive shooters, hunters, and all enthusiasts of precision rifle shooting.

The study was undertaken on the authors’ initiative and funded entirely by them for the benefit of the global shooting sports community, using publicly available information.

Ключевые слова: Ключевые слова: спортивная винтовка, 33XC, внешняя баллистика, кучность, угловое рассеивание, начальная скорость пули, баллистический коэффициент, G7, стандартное отклонение, экстремальный размер группы, статистическое моделирование, ELR.

Keywords: sporting rifle, 33XC, external ballistics, precision, angular dispersion, muzzle velocity, ballistic coefficient, G7, standard deviation, extreme spread, statistical modeling, ELR.

Введение

В связи с ростом популярности соревнований в классе ERL (Extra Long Range) появляются все более совершенные образцы спортивных винтовок крупного калибра. Например, в опубликованных испытаниях комплекса Specter в калибре 33XC компании BespokeGun при настройке в трех точках подряд получен размер групп из трех выстрелов 0,09, 0,26 и 0,17 MOA, средний размер — 0,173 MOA [1]. Схожие результаты получены для комплекса Monolith 33XC, у которого кучная полка включила семь посадок с шагом 0.003” со средней кучностью 0,187 MOA, что для ELR системы считается очень сильным результатом. Вместе с тем такие винтовки предназначены для стрельбы на сверхдальние дистанции. В дисциплине ELR с ними проводятся соревнования King of 1 Mile и King of 2 Miles [13]. Это

делает весьма актуальным исследование зависимости кучности спортивных винтовок в калибре 33XC от дистанции и, в частности, влияния разброса начальной скорости пули и баллистического коэффициента (BC) на изменение кучности с ростом дистанции.

Цель статьи – построить модель статистического рассеивания точек попаданий на разных дистанциях на основе уравнений внешней баллистики, провести исследование вклада технической кучности спортивной винтовки в калибре 33XC, разброса начальной скорости и баллистического коэффициента пули Berger .338 300 gr в суммарную угловую кучность в диапазоне дистанций 100–2500 метров и определить предельную дистанцию для этих калибра и пули.

Материалы и методы

В спортивных винтовках калибра 33XC чаще всего применяются матчевые пули массой 300 gr, в основном, Berger .338 300 gr Hybrid OTM Tactical и Hornady .338 300 gr A-Tip Match [1, 4, 14]. Исследование проведено для пули Berger 300 gr. Для исследований применялись модели, разработанные на основе современной теории внешней баллистики, встроенные в статистические модели.

Настройка спортивной винтовки на экстремальную кучность как правило ведётся в контролируемых условиях на дистанции 100 метров. Кучность на этой дистанции преимущественно определяется конусом разлёта пуль из ствола. Однако на дальних дистанциях дополнительно появляется целый набор факторов, главными из которых являются разброс начальной скорости и баллистического коэффициента, изменение ветра между выстрелами, мираж. Различие роли углового рассеивания и внешних условий на коротких и дальних дистанциях рассматривается, в частности, в материалах Berger [4]. Наше исследование посвящено двум управляемым факторам – скорости и баллистическому коэффициенту (BC).

Важно учитывать, что кучность изменяют случайные изменения от выстрела к выстрелу. Постоянная систематическая ошибка, одинаково смещающая все попадания, смещает СТП, но не изменяет размер группы [2, 3].

Обобщённая модель кучности

В работе в качестве основного показателя кучности использовано стандартное отклонение координат точек попадания от СТП. Для вертикали формулу кучности можно записать в виде:

$$\sigma_{\Sigma}^2(L) = \sigma_{\text{тех}}^2 + \sigma_{V0}^2(L) + \sigma_{BC}^2(L) + \sigma_{\text{ветер}}^2(L) + \sigma_{\rho}^2(L) + +\sigma_{\text{прицел}}^2(L) + \ldots$$

или в более строгом виде:

$$\sigma_{\Sigma}^2(L) = \sum_i [K_i(L)\sigma_i]^2 + 2\sum_{i<j} K_i(L)K_j(L)Cov(i,j)$$

где $K_i(L)$— чувствительность попадания к данному фактору на дистанции L. Использование коэффициентов чувствительности и учёт ковариаций соответствуют общему закону распространения неопределённости [18].

Для оценки влияния на вертикальную составляющую кучности разброса начальной скорости и баллистического коэффициента необходима модель внешней баллистики.

Полная 6DOF-модель внешней баллистики

Полная модель с шестью степенями свободы учитывает поступательное движение и изменение ориентации пули [15]. Примем систему координат: x— вперёд по линии стрельбы, y— вправо, z— вверх. Состояние пули:

$$\mathrm{X} = [\mathrm{r}, , \mathrm{v}, \ q\ \omega] ,$$

где r— координаты центра масс, v— скорость центра масс, q— кватернион ориентации пули, $\omega = (p, q_b, r_b)$— угловая скорость в связанной с пулей системе координат. Индекс q_b пишем отдельно, чтобы не путать с кватернионом q. Базовая система уравнений:

$$\dot{\mathrm{r}} = \mathrm{v}$$

$$m\dot{\mathrm{v}} = m\mathrm{g} + \mathrm{F}_A + \mathrm{F}_{Magnus} + \mathrm{F}_{wind}$$

$$\dot{q} = \frac{1}{2}\, q \otimes \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \end{bmatrix}$$

$$\mathrm{I}\dot{\omega} + \omega \times (\mathrm{I}\omega) = \mathrm{M}_A + \mathrm{M}_{Magnus} + \mathrm{M}_{roll}$$

Для осесимметричной пули:

$$\mathrm{I} = \begin{bmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_y \end{bmatrix}$$

Относительная скорость воздуха:

$$\mathrm{v}_r = \mathrm{v} - \mathrm{W}$$

$$V = \| \mathrm{v}_r \|, \ M = \frac{V}{a}, \ \bar{q} = \frac{1}{2}\rho V^2, \ S = \frac{\pi d^2}{4}$$

где W— вектор ветра, M— число Маха, a— скорость звука, $\bar{q}$— динамическое давление, S— площадь поперечного сечения пули.

Если e_x— единичный вектор продольной оси пули, полученный из кватерниона ориентации, то малый вектор угла атаки и рыскания можно записать как:

$$\alpha_v = \mathrm{e}_x - \left(\mathrm{e}_x \cdot \hat{\mathrm{v}}_r\right) \hat{\mathrm{v}}_r$$

$$\alpha \approx \| \alpha_v \|$$

Аэродинамические силы в компактной форме:

$$\mathrm{F}_D = -\bar{q} S C_D (M, \alpha) \hat{\mathrm{v}}_r$$

$$\mathrm{F}_N = \bar{q} S C_{N\alpha}(M) \alpha_v$$

$$\mathrm{F}_{Magnus} = \bar{q} S C_{Yp\alpha}(M) \frac{pd}{2V} \left(\mathrm{e}_x \times \hat{\mathrm{v}}_r \right)$$

Итого:

$$\mathrm{F}_A = \mathrm{F}_D + \mathrm{F}_N + \mathrm{F}_{Magnus}$$

Моменты:

$$\mathrm{M}_{pitch/yaw} = \bar{q} S d \left[C_{M\alpha}(M) \alpha_b + C_{Mq}(M) \frac{d}{2V} \omega_{\perp b} \right]$$

$$\mathrm{M}_{roll} = \bar{q} S d C_{Lp}(M) \frac{pd}{2V} \mathrm{e}_{x,b}$$

$$\mathrm{M}_{Magnus} = \bar{q} S d C_{Mp\alpha}(M) \frac{pd}{2V} \alpha_b$$

Здесь α_b— вектор угла атаки в связанной системе пули, $\omega_{\perp b}$— поперечная угловая скорость, p — скорость собственного вращения пули вокруг продольной оси.

Исходные данные для полной 6DOF-модели

Реальные 6DOF-решатели требуют измеренных или рассчитанных аэродинамических таблиц конкретной пули. Lapua прямо указывает, что её 6DOF-расчёт основан на таблице аэродинамических коэффициентов для каждой пули: коэффициент аэродинамического сопротивления, определённый по доплеровским измерениям; производная коэффициента нормальной силы по углу атаки; производная коэффициента момента тангажа по углу атаки; демпфирование вращения вокруг продольной оси; аэродинамические производные устойчивости; сила Магнуса и момент Магнуса [15, 16].

Таким образом, для точного расчёта ELR-траекторий необходима индивидуальная драг-функция $C_D(M)$, измеренная доплеровским радаром и заданная таблицей Mach–C_D, и точная 6DOF-модель. Однако для наших целей исследования вклада выбранных факторов в суммарное рассеивание облака попаданий достаточно менее точной, но более простой модели.

Модель типа Applied Ballistics / point-mass + G7 BC

В материалах Berger объясняется подход с использованием стандартных моделей сопротивления: при вводе G1/G7 BC стандартная кривая сопротивления масштабируется по заданному BC [6]. Брайан Литц предлагает баллистический калькулятор Applied Ballistics, основанный на point-mass и использовании баллистического коэффициента BC G1/G7 или конкретной функции сопротивления пули. Пуля представляется как материальная точка. Ориентация, прецессия, угол атаки, моментные уравнения, демпфирование вращения вокруг продольной оси и эффект Магнуса напрямую не интегрируются:

$$\dot{\mathrm{r}} = \mathrm{v}$$

$$\dot{\mathrm{v}} = \mathrm{g} - \frac{\rho}{\rho_0}\frac{f_{G7}(V)}{BC_{G7}}\hat{\mathrm{v}}_r$$

где: $\mathrm{v}_r = \mathrm{v} - \mathrm{W}$, $V = \| \mathrm{v}_r \|$, $\hat{\mathrm{v}}_r = \frac{\mathrm{v}_r}{V}$. Здесь $f_{G7}(V)$ — стандартная функция замедления G7. В практических баллистических решателях она обычно задана таблицей или кусочно-степенной аппроксимацией:

$$f_{G7}(V) = A_i V^{n_i}$$

для соответствующего диапазона скоростей. Для современных длинных пуль с хвостовым конусом G7 обычно ближе к реальному сопротивлению, чем G1 [17].

В современных баллистических калькуляторах сопротивление пули может задаваться не одним числом BC_{G1} или BC_{G7}, а собственной функцией сопротивления пули $C_D = C_D(M)$, где C_D — коэффициент лобового сопротивления, M — число Маха. Такая функция обычно задаётся таблицей. Подход Custom Drag Model (CDM) использует сопротивление конкретной пули, измеренное доплеровским радаром, без привязки к стандартным моделям G1/G7. Его преимущества особенно существенны в трансзвуковой и дозвуковой областях [6, 17]. В такой модели BC вообще не используется. Пуля сравнивается не с эталонной G7-пулей, а рассчитывается по собственной аэродинамической кривой. Однако такое использование модели сопротивления значительно усложняет анализ его влияния в зависимости от дальности. Для целей нашего исследования принята модель с баллистическим коэффициентом G7.

Исходные данные для модели point-mass + G7 BC

Примем следующие исходные данные: пуля .338 Berger Tactical / Hybrid OTM, масса пули 300 gr = 19,44 г, диаметр пули 0,869 см = 8,69 мм, длина 4,630 см = 46,30 мм, начальная скорость 920–950 м/с, дистанция обнуления 100 м, высота прицела 5,8 см, дистанция расчета до 2500 м, ветер 0 м/с, температура 15 °C, давление 1013 mbar, влажность 50 %, плотность воздуха 1,2208 кг/м3, отношение к ISA ρ/ρ0 = 0,9966, скорость звука 340,3 м/с, твист 22,86 см = 9”, начальная скорость вращения 249000 об/мин. По странице Berger для 338 Cal 300 Grain Hybrid OTM Tactical указан G7 BC 0,421, хотя у Брайана Литца есть другие значения.

Примем для нашей задачи G7 = 0,421. Для подтверждения работоспособности модели проведем расчет траектории полета пули Berger 338 Cal 300 gr Hybrid OTM Tactical на дистанцию 2000 метров (рис. 1).

На графике видно, что пуля сначала поднимается над линией прицеливания на высоту 16,101 метра примерно через 1200 метров после вылета из ствола, и далее ускоренно снижается, теряя скорость, до попадания в мишень. Скорость пули при этом в силу разного сопротивления падает нелинейно, что определяет и нелинейное время пролета одинаковых промежутков дистанции. В свою очередь, такой режим полета пули создает нелинейность точек вертикального попадания пуль в мишени на разных дистанциях. Однако в абсолютном выражении углы встречи с мишенью малы, что позволяет проекцию облака попаданий в мишень считать без искажения по вертикали.

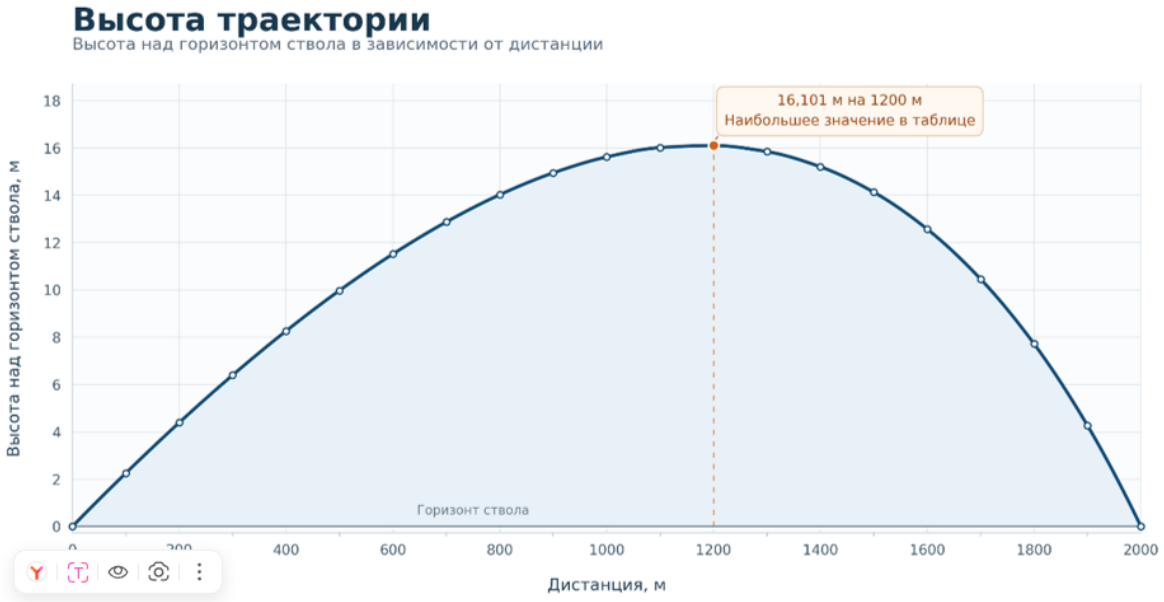

Рисунок 1. Пример расчета траектории полета пули Berger 338 Cal 300 gr Hybrid OTM Tactical на дистанцию 2000 м

Для своей задачи мы применили метод линеаризации и собственные модели внешней баллистики и статистических исследований. Основой примененного подхода стало представление координат точки попадания как функции исходных параметров внешней баллистики:

$$y = f(V_0,\ BC,\ \rho_{air},\ W,\ \alpha,\ L, \ldots)$$

где y — координаты точки попадания, V_0 — начальная скорость пули, BC— баллистический коэффициент, ρ_{air} — плотность воздуха, W— скорость ветра, α — направление ветра, L — дистанция стрельбы. В плоскости мишени, установленной на дальности L, эта зависимость может быть линеаризована: $\Delta y \approx J\Delta p$, где J — матрица чувствительности, а Δp — вектор малых изменений исходных параметров. Для вертикальной поправки это можно записать в развернутом виде:

$$\Delta E \approx \frac{\partial E}{\partial \sigma_{\text{тех}}}\Delta\sigma_{\text{тех}} + \frac{\partial E}{\partial V_0}\Delta V_0 + \frac{\partial E}{\partial BC}\Delta BC + \frac{\partial E}{\partial \rho_{air}}\Delta\rho_{air} + \frac{\partial E}{\partial W}\Delta W + \ldots$$

Такая запись дает не только итоговое облако расчетных попаданий, но и явные коэффициенты чувствительности. Например, можно непосредственно определить, насколько изменится вертикальная поправка при изменении начальной скорости на 1 м/с, баллистического коэффициента на 1%, плотности воздуха, давления, температуры или ветра. Для научного анализа это принципиально важно, поскольку позволяет объяснить результат, а не только получить численное значение вероятности попадания. Дополнительным преимуществом линеаризации является возможность разложить суммарную неопределенность облака попаданий на отдельные составляющие:

$$u_E^2 = (u_{\text{тех}})^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial V_0} u_{V_0}\right)^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial BC} u_{BC}\right)^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial P} u_P\right)^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial T} u_T\right)^2 + \dots$$

В такой форме сразу видно, какой фактор является доминирующим источником ошибки: техническая кучность винтовки, скорость пули, баллистический коэффициент, сила и направление ветра, плотность воздуха, давление, температура, ошибка прицела, ошибка обнуления, округление кликов или другие факторы. Это делает модель удобной не только для расчета, но и для диагностики. Отличие нашего подхода от стандартного метода Монте-Карло состоит не в отказе от вероятностного анализа, который мы сами часто применяем, а в выборе более аналитической и диагностической формы этого анализа, которая позволяет ответить на вопросы, почему разброс именно такой, и какой фактор вносит главный вклад.

Статистическая модель технической кучности винтовки

Модель простая, но дает базовые опорные точки для всех последующих расчетов, поскольку рассматривается предельная кучность, которая могла бы реализоваться, если бы она определялась только начальным направлением разлета пуль (конусом линейного рассеивания). Добавление любых факторов нелинейного влияния на кучность только увеличивает рассеивание облака попаданий. Рассматривается идеализированный случай, когда все источники разброса, кроме разброса направления вылета пули из ствола $\sigma_{\text{тех}}$, отсутствуют: $\sigma_{V0} = 0$, $\sigma_{BC} = 0$, $\sigma_{\text{проч}} = 0$. Тогда кучность на любой дистанции определяется только случайными отклонениями направления вылета пуль из ствола. Это означает, что проекции облака попадания на мишени, расположенные на равных отрезках дистанции, образуют линейный конус разлёта. Пули движутся по криволинейным траекториям (рис. 1), но углы кривизны малы, что позволяет не учитывать угол проекции облака попаданий на мишень и считать, что на всех дистанциях пули заходят в мишени перпендикулярно их плоскости. Пусть угловые отклонения по двум осям независимы и нормально распределены: $\theta_x \sim N\left(0, \sigma_\theta^2\right)$, $\theta_y \sim N\left(0, \sigma_\theta^2\right)$, где σ_θ— техническая угловая кучность в MOA, θ_x, θ_y— угловые отклонения в горизонтальной и вертикальной плоскостях. На дистанции L линейные координаты точки попадания равны $x(L) = L \tan\theta_x$, $y(L) = L \tan\theta_y$. Углы, на которых пуля входит в мишень, достаточно малые, и поэтому можно принять $\tan\theta \approx \theta$, тогда $\sigma_x(L) \approx L\,\sigma_\theta$, $\sigma_y(L) \approx L\,\sigma_\theta$. Если σ_θ задана в MOA, то линейный размер на мишени в сантиметрах равен $S(L, \alpha) = 100\ L\ \tan(\alpha \cdot MOA_{rad})$, где MOA_{rad} = π/180/60. Именно поэтому на графике рис. 2 все линии кучности — прямые, выходящие из начала координат: при постоянной угловой кучности линейный размер группы растёт линейно с дистанцией.

В этой идеализированной модели вероятность попадания в гонг диаметром 1 MOA (размер выделен жирной синей линией) не зависит от дистанции, поскольку мы приняли, что техническая кучность постоянна в MOA, и размер гонга тоже постоянен в MOA. То есть, гонг 1 MOA на 100 м и гонг 1 MOA на 2500 м в угловом смысле одинаковы, поэтому и группа, и гонг масштабируются с расстоянием одинаково.

На рис. 2 слева приведены зависимости линейных размеров групп от дистанции при разной технической кучности винтовки. Синяя жирная линия соответствует размеру гонга в 1 MOA. На рис. 2 справа представлен график вероятности попадания в гонг 1 MOA при разной технической кучности винтовки. Этот простейший случай интересен тем, что лучше, чем эта техническая кучность винтовки $\sigma_{тех}$, у нас уже не будет практически ни на какой дистанции. И если даже с ней вероятность попадания в цель будет невысока, то с добавлением возмущений от других факторов она снизится до значений, когда стрельба по этой цели потеряет смысл из-за низкой вероятности попаданий.

Вероятности попадания в гонг 1 MOA равны: $ES5 = 0.2$ MOA $\rightarrow$ $P \approx 100.0\%$, $ES5 = 0.3$ MOA $\rightarrow$ $P \approx 99.9998\%$, $ES5 = 0.5$ MOA $\rightarrow$ $P \approx 99.09\%$, $ES5 = 0.75$ MOA $\rightarrow$ $P \approx 87.64\%$, $ES5 = 1.0$ MOA $\rightarrow$ $P \approx 69.15\%$, $ES5 = 1.5$ MOA $\rightarrow$ $P \approx 40.71\%$. Эта вероятность рассчитана для идеального совпадения СТП с центром прицеливания. Но даже в этом случае при размере группы 1 MOA каждая третья пуля проходит мимо, а при размере 1,5 MOA почти две из трех, в то время как при размере 0,2 MOA группа из 20 выстрелов попадает в мишень с очень большим запасом.

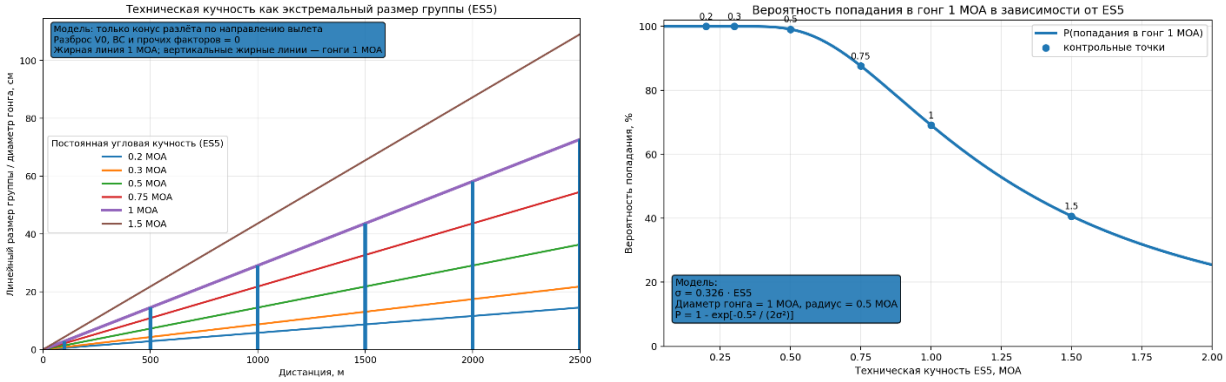

Рисунок 2. Проекции облака попаданий на мишень размером 1 MOA при разной дистанции; вероятность попадания в гонг диаметром 1 MOA в зависимости от кучности винтовки

На рис. 3 изображена сравнительная картина стрельбы по гонгу размером 1 MOA на дистанции 1000 метров при технической кучности винтовки (размере групп) 0,2 MOA и 2 MOA.

Наглядно видно, что при размере группы 0,2 MOA попадание в мишень практически гарантировано, тогда как стрельба с размером группы 2 MOA превращается в лотерею: из 20 выстрелов в мишень попало только 7. Любое отклонение СТП от центра гонга еще больше уменьшает вероятность попадания в него. Любой дополнительный фактор (разброс скорости, баллистического коэффициента, влияние ветра и миража, и т. д.) еще больше уменьшает вероятность попадания в гонг.

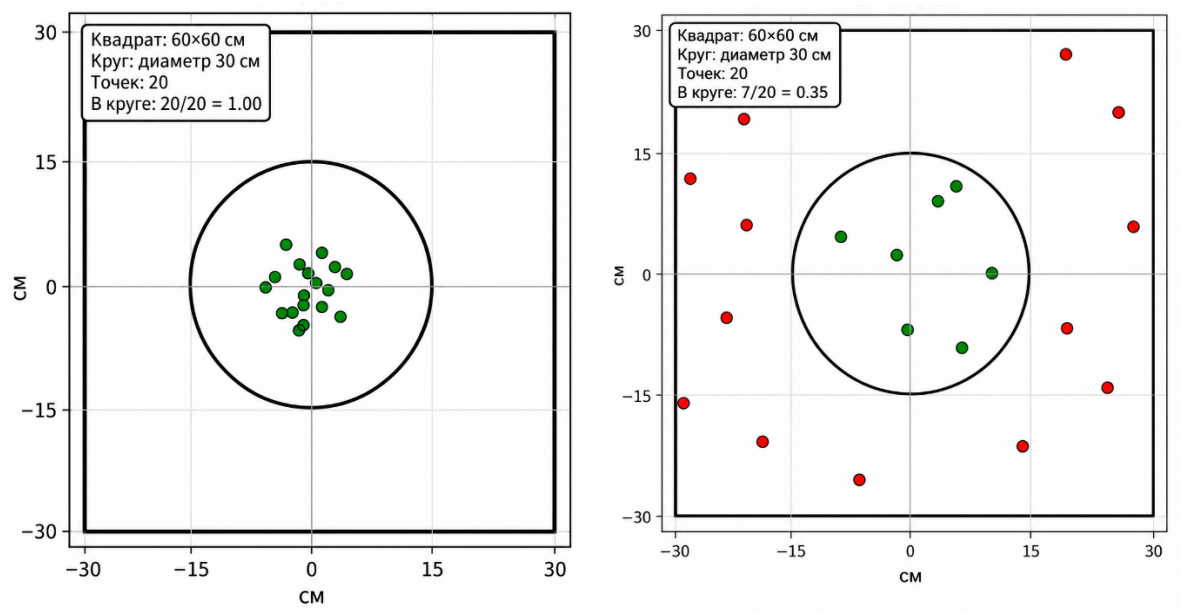

Рисунок 3. Картина на мишени при стрельбе по гонгу размером 1 MOA на дистанции 1000 м при кучности винтовки 0,2 MOA и 2 MOA

Статистическая модель влияния разброса скорости

Перейдем в оценке кучности от экстремального размера группы ES_n к среднему квадратическому отклонению конуса рассеивания $\sigma_{тех}$ и разброса скорости σ_{V0}. Известно соотношение $\sigma = 0{,}326\ ES_5$ [3], где ES_5 - экстремальный размер группы из 5 выстрелов. Пусть средняя начальная скорость будет, например, $\bar{V}_0 = 920$ м/с, а случайное отклонение скорости отдельного выстрела $\delta V_0 = V_0 - \bar{V}_0$, $\delta V_0 \sim N\left(0, \sigma_{V0}^2\right)$, где, например, $\sigma_{V0} = 2$ м/с. Прицел считается обнулённым по средней траектории: $V_0 = \bar{V}_0 = 920$ м/с. То есть пуля со средней скоростью попадает в центр мишени на каждой рассматриваемой дистанции, которую мы введем дискретно как 100, 500, 1000, 1500, 2000, 2500 метров. Общий механизм влияния вариации скорости между выстрелами на вертикальное рассеивание рассмотрен Б. Литцем [17]. Вертикальная ошибка в точке попадания пули от скорости на дистанции L равна:

$$\Delta Z_V\,(L, V_0) = Z\,(L, V_0) - Z\left(L, \bar{V}_0\right)$$

Для малых отклонений скорости эту зависимость можно линеаризовать:

$$\Delta Z_V\,(L, V_0) \approx \frac{\partial Z}{\partial V_0}\delta V_0$$

Тогда среднеквадратическое вертикальное отклонение от разброса скорости:

$$\sigma_{Z,V}(L) = \left|\frac{\partial Z}{\partial V_0}\right| \sigma_{V0}$$

В угловой мере, в MOA:

$$\sigma_{V,\mathrm{MOA}}(L) = \frac{\sigma_{Z,V}(L)}{L\tan(1\ \mathrm{MOA})}$$

Итоговая вертикальная кучность с учётом технической кучности $\sigma_{тех}$ равна:

$$\sigma_{\Sigma}(L) = \sqrt{\sigma_{\text{тех}}^2 + \sigma_{V,\mathrm{MOA}}^2(L)}$$

где $\sigma_{\text{тех}} = 0,1$ MOA —постоянная начальная угловая техническая кучность, а разброс скорости даёт дополнительную зависимую от дальности вертикальную составляющую. Кучность $\sigma_{\text{тех}} = 0,1$ MOA эквивалентна размеру группы из 3 выстрелов ES_3 = 0,24 MOA и из 5 выстрелов ES_5 = 0,31 MOA, что вполне реально для лучших спортивных винтовок крупного калибра. Применение линейного приближения и сложение дисперсий при отсутствии корреляции соответствуют общему статистическому подходу [15].

Почему угловая кучность от разброса скорости меняется с дистанцией

Техническая кучность, связанная с разбросом начального направления пуль (конусом рассеивания), в первом приближении даёт постоянную угловую величину на всех дистанциях: $\sigma_{\text{тех}}(L) = \text{const}$. Если пули вылетели под углом $0,1$ MOA, то считается, что эта угловая ошибка остаётся на 100, 500, 1000, 1500, 2000, 2500 м. Есть, конечно, нюансы, особенно для дальних дистанций, которые мы опустим в данном исследовании. Но разброс скорости работает с ростом дистанции иначе. Он влияет не как начальный угол, а через время полёта и падение. При полете пули в вакууме действуют соотношения:

$$Y \approx \tfrac{1}{2}gt^2, t \approx \tfrac{L}{V_0}, Y \approx \tfrac{1}{2}g\left(\tfrac{L}{V_0}\right)^2.$$

Тогда чувствительность падения траектории к скорости определяется как:

$$\frac{\partial Y}{\partial V_0} \approx -g\frac{L^2}{V_0^3}$$

То есть линейная вертикальная ошибка от разброса скорости растёт примерно, как L^2, а угловая ошибка растёт примерно, как L, потому что реализуется соотношение ΔY/L. В реальной атмосфере сопротивление воздуха усиливает нелинейность, особенно на больших дистанциях и в трансзвуковой области. Поэтому угловой вертикальный вклад разброса скорости возрастает с дистанцией [17].

$$v(x) = V_0 e^{-cx}$$

Тогда гравитационное падение можно записать как:

$$D(L, V_0) = \frac{g}{V_0^2}\left[\frac{e^{2cL} - 1}{(2c)^2} - \frac{L}{2c}\right]$$

Пристрелка по средней скорости означает, что для $\bar{V}_0 = 920$ м/с угол вылета выбран так, чтобы пуля пришла в центр. Для другой скорости вертикальное смещение равно разности падений. Чувствительность к скорости считается центральной разностью:

$$K_V(L) = \frac{1}{L\tan(1\text{MOA})} \left| \frac{D\left(L, \bar{V}_0 + 1\right) - D\left(L, \bar{V}_0 - 1\right)}{2} \right|$$

где $K_V(L)$ имеет размерность MOA на 1 м/с. $\sigma_{V,\text{MOA}}(L) = K_V(L)\sigma_{V0}$ и

$$\sigma_\Sigma(L) = \sqrt{\sigma_{\text{тех}}{}^2 + \sigma^2_{V,\text{MOA}}(L)}$$

Статистическая модель влияния разброса BC

Теперь рассмотрим модель влияния разброса баллистического коэффициента BC при исходных данных $\overline{V}_0 = 920$ м/с, $\bar{BC}_{G7} = 0,421$, $\sigma_{\text{тех}} = 0,1$ MOA, и на тех же дистанциях 100, 500, 1000, 1500, 2000, 2500 метров. Разброс БС примем как $\sigma_{BC} = 0,001$. Баллистический коэффициент BC характеризует, насколько быстро пуля теряет скорость из-за сопротивления воздуха. Если у отдельных пуль в группе или в партии в целом реальный BC немного отличается, то при одинаковой начальной скорости они начинают по-разному тормозиться. Если $BC_i < \bar{BC}$, то пуля имеет большее сопротивление, быстрее теряет скорость, летит дольше и приходит ниже средней траектории. Если $BC_i > \bar{BC}$, то пуля тормозится меньше, летит быстрее и приходит выше средней траектории [17, 7]. Поэтому разброс BC превращается в вертикальный разброс попаданий через цепочку: $\delta BC \Rightarrow \delta C_D \Rightarrow \delta V(x) \Rightarrow \delta TOF \Rightarrow \delta Drop \Rightarrow \delta Z$. На малых дистанциях этот эффект почти не успевает накопиться. Но на больших дистанциях, особенно после 1000–1500 м, даже маленькое отличие BC уже даёт заметную разницу во времени полёта и падении.

Пусть $BC = \bar{BC} + \delta BC$, $\delta BC \sim N\left(0, \sigma^2_{BC}\right)$, где $\bar{BC} = 0,421$, $\sigma_{BC} = 0,001$. Такое консервативно низкое значение σ_{BC} мы взяли не потому, что оно в среднем такое (оно в среднем заметно больше), а потому, что для пули Berger 300 gr о нем нам пока вообще мало что известно, и чтобы брать большее значение σ_{BC}, нужна хорошая доказательная база. Прицел обнулён по средней траектории: $BC = \bar{BC}$. Вертикальное отклонение отдельной пули на дистанции L определяется формулой: $\Delta Z_{BC}(L, BC) = Z(L, BC) - Z\left(L, \bar{BC}\right)$. Для малых отклонений BC аналогично скорости используем линейное приближение:

$$\Delta Z_{BC}(L, BC) \approx \frac{\partial Z}{\partial BC}\delta BC$$

Тогда среднеквадратическое линейное отклонение будет равно:

$$\sigma_{Z,BC}(L) = \left| \frac{\partial Z}{\partial BC} \right| \sigma_{BC}$$

В угловых единицах:

$$\sigma_{BC,\mathrm{MOA}}(L) = \frac{\sigma_{Z,BC}(L)}{L\tan(1\ \mathrm{MOA})}$$

Суммарная вертикальная угловая кучность с учётом технической кучности будет равна:

$$\sigma_{\Sigma}(L) = \sqrt{\sigma_{\text{тех}}^2 + \sigma_{BC,\mathrm{MOA}}^2(L)}$$

Где примем $\sigma_{\text{тех}} = 0,1$ MOA.

Почему угловой разброс от BC меняется с дистанцией. Как и в случае со скоростью, угловая техническая кучность, связанная с разбросом направления вылета, в первом приближении в MOA постоянна: $\sigma_{\text{тех}}(L) = \text{const}$. Пуля, вылетевшая на $0,1$ MOA выше, в принятых приближениях сохранит этот угловой вклад и на 100 м, и на 1000 м. Но BC, как и скорость, влияет иначе. Он меняет всю историю торможения пули. Чем дальше летит пуля, тем больше накапливается разница $\Delta V(x)$, ΔTOF, $\Delta Drop$. Поэтому линейная ошибка падения растёт быстрее, чем просто пропорционально дистанции, и угловая ошибка $\Delta Z/L$ тоже начинает расти с дистанцией. Именно поэтому на 100–500 м разброс BC, как и разброс скорости, практически невидим, а на 1500–2500 м он становится важным фактором вертикального рассеивания. Общая тенденция согласуется с опубликованным анализом влияния вариации BC между выстрелами [17; 7].

Расчётная модель. Для построения зависимости использована гладкая внешнебаллистическая аппроксимация:

$$v(x) = V_0 e^{-c(BC)x}$$

где коэффициент торможения зависит от BC:

$$c(BC) = c_0 \left(\frac{\bar{BC}}{BC} \right)^{\alpha}$$

Модель откалибрована так, чтобы чувствительность к BC совпадала с расчетами по точной модели:

$$D\,(L, V_0, BC) = \frac{g}{V_0^2}\left[\frac{e^{2cL} - 1}{(2c)^2} - \frac{L}{2c}\right]$$

Чувствительность к BC считалась центральной разностью:

$$K_{BC}(L) = \frac{1}{L\tan(1\mathrm{MOA})}\left| \frac{D\,(L, BC + 0,001) - D\,(L, BC - 0,001)}{2} \right|$$

где $K_{BC}(L)$ имеет размерность MOA на $0,001$ BC.

$$\sigma_{BC,\mathrm{MOA}}(L) = K_{BC}(L)\frac{\sigma_{BC}}{0,001}$$

Так как в задаче $\sigma_{BC} = 0,001$, то $\sigma_{BC,\text{MOA}}(L) = K_{BC}(L)$

9. Данные о технической кучности и разбросах скоростей и БК

Техническая кучность в условиях стрельбы с прочного бетонного стола и в закрытом тире у винтовок крупного калибра проверяется редко, поэтому статистики по ней немного. Тем не менее известно, что стабильный Extreme Spread 0,2 MOA из 5 выстрелов для крупного ELR-калибра следует считать исключительно высоким результатом. В этой связи обратим внимание, что по 3 группам из трех выстрелов для винтовки Specter 33XC и по 7 группам для винтовки Monolith 33XC при настройке мы получили средний размер групп 0,173 [1] и 0,187 MOA, то есть меньше, чем 0,2 MOA, а в пересчете на группы из 5 выстрелов 0,22–0,24 MOA. С другой стороны, на соревнованиях встречаются винтовки с технической кучностью хуже 1 MOA. Поэтому диапазон ES_5 = 0,2–1,5 MOA можно считать реалистичным.

Исходя из представленных данных, и с учетом соотношения σ = 0,326 ES_5 рабочим диапазоном технической кучности винтовки крупного калибра для проверки влияния разброса скорости и БС можно принять $\sigma_{\text{тех}} = (0,1 - 0,3)$ MOA, что примерно соответствует экстремальному размеру группы из 5 выстрелов ES_5 = (0,3–1) MOA.

Разброс начальной скорости в одной партии патронов принято задавать как σ_{V0}, то есть как стандартное отклонение начальной скорости в м/с или fps. Второй показатель — ES, extreme spread, то есть разность между самой быстрой и самой медленной пулей в данной серии, $ES = V_{\max} - V_{\min}$ [19]. Без указания числа выстрелов он почти бесполезен, потому что ES растёт с числом выстрелов в группе [2, 3, 20]. Запишем формулы для оценки σ_{V0}. И ES_n. Пусть в серии n выстрелов измерены скорости: $V_1, V_2, \ldots, V_n$. Средняя скорость и ее выборочное стандартное отклонение и размах определяются по известным формулам [3, 19]:

$$\overline{V}_0 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} V_i,\ s_{V0} = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(V_i - \overline{V}_0)^2},\ ES_n = V_{\max} - V_{\min}.$$

Precision Rifle Blog, пересказывая Bryan Litz, приводит пример: если средняя скорость 3000 fps, а SD равен 10 fps, то около 68 % выстрелов будут между 2990 и 3010 fps, а около 95 % — между 2980 и 3020 fps. Для нашей модели $\overline{V}_0 = 920$ м/с, $\sigma_{V0} = 2$ м/с. Тогда 68 % это 918–922 м/с, 95 %–916–924 м/с, 99,7 %–914–926 м/с. В fps 920 м/с ≈ 3018 fps, $\sigma_{V0} = 2$ м/с ≈ 6,6 fps.

ES очень зависит от числа выстрелов, полностью зависит от двух крайних выстрелов и игнорирует все остальные, тогда как SD использует отклонения всех наблюдений [3, 19, 20]. Один и тот же патрон с одной и той же реальной σ даст разные ES в сериях из 5 и 20 выстрелов. С учетом сказанного в нашей работе мы используем записи: $\overline{V}_0 = 920$ м/с, $\sigma_{V0} = 2$ м/с, а не $ES = 5$ м/с.

В пересказе Bryan Litz на Precision Rifle Blog приведены ориентиры SD 20, 15, 10 fps и ниже [23]. Можно предложить условную шкалу: плохая стабильность, массовый заводской уровень — 6,1 м/с; лучше среднего заводского, но не уровень хорошего патрона — 4,6 м/с; цель большинства опытных релоадеров — меньше 3,0 м/с. Очень хороший уровень, сильный

результат — 1,5–2,4 м/с; труднодостижимый и требующий строгой методики, исключительный уровень — 0,9–1,5 м/с. Пример SD около 3 fps в сериях из 10 выстрелов приведён автором блога C. Zant как его личное наблюдение [23].

Для релоадера самая большая статистическая ловушка — делать выводы по 3–5 выстрелам. Если вы отстреляли 5 выстрелов и получили $SD = 2$ м/с, это не значит, что вся партия имеет $\sigma = 2$ м/с. При оценке стандартного отклонения из малой выборки возникает значительная статистическая неопределённость; малые выборки могут существенно искажать SD и ES, и поэтому вывод о параметре генеральной совокупности следует сопровождать доверительным интервалом [3, 21, 22].

Физическая цепочка влияния скорости на точку попадания такая: $\delta V_0 \Rightarrow \delta TOF \Rightarrow \delta Drop \Rightarrow \delta Z$. Более медленная пуля летит дольше и падает ниже. Более быстрая — летит меньше времени и приходит выше [17]. Berger в статье о SD и «bell curve» также приводит пример значительной разницы падения на 1500 ярдах; в опубликованном примере сравниваются скорости 2980 и 3020 fps, то есть разность составляет 40 fps [8]. В анализе PRB по матчу PRS пример с 6.5 Creedmoor на 1033 ярда показал, что SD 20 fps давал около 70 % вероятности попадания в модельных условиях, а SD 5 fps — около 87 %; при этом автор подчёркивает, что другие факторы, включая ветер, дальность и механическую кучность, тоже входят в общую неопределённость [24].

В научном исследовании целесообразно использовать несколько сценариев разброса скорости, например, исключительно высокий уровень σ_{V0} = 1 м/с, очень хороший ERL/F-class уровень 1,5 м/с, реалистичный для точного релоадинга уровень 2 м/с, хороший практический уровень 3 м/с, средний 5 м/с, слабый для ERL выше 6 м/с. Можно также оперировать обобщенными и относительными величинами, уменьшая число переменных в формуле суммарного разброса кучности. Но у каждого исследования есть цель, и для нашего мы остановились на двух значениях разброса скорости – 1 м/с и 2 м/с.

По разбросу BC гораздо меньше объем достоверных данных. Одна и та же фраза «разброс BC 1 %» может означать разные вещи, например σ_{BC} = 1 % от среднего BC или ES = 1% от среднего BC или BC лежит в пределах $\pm 1\%$. Это три разные величины. В статье Bryan Litz, перепечатанной Shooting Sports USA, используется термин SD of BC, то есть стандартное отклонение баллистического коэффициента. Там сказано, что Doppler radar позволяет измерить BC каждого отдельного выстрела и определить SD of BC. В той же статье приведена важная шкала: очень качественные пули могут иметь BC SD около 0,4–0,6 %, типичные — около 0,8–1,2 %, а отдельные проблемные пули — 1,5–2,0 % и более. Там же пример: измеренное $SD_{BC} = 0,00111$ при среднем BC 0,368 интерпретируется как 0,3 %. Это однозначно показывает, что проценты считаются как $\sigma_{BC}/\bar{BC} \cdot 100\%$, то есть это относительное СКО, а не размах и не ± [17]. Berger рассматривает геометрическую неоднородность и нарушения устойчивости как разные причины вариации BC между выстрелами [9]. Для Long Range Hybrid Target с Meplat Reduction Technology измерялись BC SD порядка 0,5 % и 0,3 %, а у некоторых длинных тяжёлых пуль других производителей встречались BC SD 2–3 % и более. В статье Berger Shot-to-Shot Consistency приведён пример большого разброса: средний G7 BC, определённый на интервале от 0 до 1700 ярдов, около 0,290; в серии из 10 выстрелов максимум 0,301, минимум 0,283; SD равен 0,006, а ES — 0,018 [7]. Относительно среднего 0,290 это 2,1 % BC SD, а полный размах 6,2 %. В той же

статье приведён хороший пример: Berger 6.5 mm 140 gr Hybrid Target со средним BC 0,316, ES 0,006 и SD 0,002. Это 0,63 % SD и 1,9 % ES. Эти примеры хорошо показывают, что SD = 0,5 % от номинала – это уже близко к предельному значению, и также показывают, почему нельзя смешивать SD и ES: в одном и том же наборе данных ES в несколько раз больше SD. Отметим, что данные о других моделях пуль не должны автоматически распространяться на Berger 300 gr Hybrid OTM Tactical.

Все это означает, что если в материалах Bryan Litz / Applied Ballistics / Berger встречается фраза вроде “BC SD = 1 %”, то это, как правило, $\sigma_{BC}/BC \cdot 100\% = 1\%$. То есть это относительное стандартное отклонение BC, а не «плюс-минус 1 %» и не полный размах от минимального до максимального BC. Поэтому для оценки разброса BC между выстрелами удобнее опираться на данные Applied Ballistics/Berger, где прямо используется понятие SD_{BC} [17; 7].

Форумные обсуждения BC полезны как практический фон, но редко дают строгую величину σ_{BC}. Обычно там смешиваются четыре разных вопроса: отличие заявленного BC от реального; отличие среднего BC одной партии от другой партии; изменение BC с дальностью или скоростью; разброс BC от пули к пуле внутри одной партии. Чаще всего встречаются обсуждения геометрии пуль. Это полезно для оценки геометрической стабильности, но это не прямое измерение BC SD. Связь есть: разница в геометрии влияет на разницу в сопротивлении [9; 11], но перевести «тысячные дюйма по оживалу» в σ_{BC} без независимых аэробаллистических измерений нельзя. Возможности измерения BC по скорости, времени полёта и доплеровским данным рассмотрены в [12].

Для нашей модели с $BC_{G7} = 0,421$ можно было бы использовать такую шкалу, которая согласуется с формулировками Shooting Sports USA / Bryan Litz и Berger: 0,4–0,6 % — очень качественные пули с подрезанным (выровненным) и ужатым носиком (меплатом); 0,5–1 % - высококачественные матчевые пули из коробки; 0,8–1,2 % — типично хорошие пули; 1,5–2,0 % — проблемные, как правило, длинные, чрезмерно высокий разброс; 2–3 % - очень некачественные пули. Berger также говорит о стандарте SD ниже 1 % и о случаях 0,5 % и 0,3 %.

Для нашей пули $\bar{BC}_{G7} = 0,421,$ и если $CV_{BC} = 1\%$, то $\sigma_{BC} = 0,421 \cdot 0,01 = 0,00421$. Это в 4 раза больше взятого σ_{BC} в наших расчетах. Если считать распределение примерно нормальным, то около 68 % пуль будут находиться в пределах $\bar{BC} \pm 1\sigma,$ то есть $0,421 \pm 0,0042$. Около 95 % пуль будут в пределах примерно $\bar{BC} \pm 2\sigma$ то есть $0,421 \pm 0,0084$. Если брать модель для хороших матчевых пуль, нужно считать несколько сценариев: $\sigma_{BC} = 0,001$ — уникальный очень оптимистичный случай с сортировкой и доработкой пуль, около 0,24 % SD; $\sigma_{BC} = 0,002$ — реалистично очень хороший случай, около 0,48 % SD; σ_{BC} = 0,004–0,008 — около 2 % SD, проблемный случай для ELR. Для пули $BC_{G7} = 0,421$ в основной модели будем использовать σ_{BC} = 0,001 как предельный случай, $\sigma_{BC} = 0,002$ как разумный рабочий вариант для очень качественных матчевых пуль, а $\sigma_{BC} = 0,0042$ как сценарий «1 % BC SD», то есть более распространенный среди спортсменов случай.

Исходя из проведенного анализа, $\sigma_{BC} = 0,001$ при $BC = 0,421$ соответствует исключительно малому относительному BC SD = 0,237 %. Это очень оптимистичный уникальный разброс, значительно лучше, чем многие приведённые публичные примеры [17; 7]. Но у нас пока нет надежных данных о разбросе пули Berger 300 gr Hybrid OTM (Tactical)

из коробки, и тем более нет данных, какой разброс мы получим после сортировки пуль, подрезки и ужатия носика, поэтому исследуем влияние разброса BC при предельно высоком значении $\sigma_{BC} = 0,001$, но также проведем расчеты и при значении $\sigma_{BC} = 0,0025$ и $0,00421$ [21; 20].

Результаты и обсуждение

Влияние разброса скорости и BC на кучность

Результаты расчета влияния разброса начальной скорости на суммарную угловую кучность приведены на рис. 2а, а на линейный размер облака попаданий на рис. 2б. Исходные данные для расчета: V_0 = 920 м/с, σ_{V0} = 2 м/с, $\sigma_{тех}$ = 0,1 и 0,2 MOA. Техническая кучность винтовки в MOA в нашей модели вносит постоянный вклад в суммарную кучность, потому что она задаётся угловым конусом вылета пуль. Но ошибка от разброса скорости не является постоянной угловой величиной. Она накапливается через время полёта и гравитационное падение. Поэтому на малых дистанциях 100–500 м разброс скорости почти не снижает угловую кучность. На 1000 м разброс скорости уже становится сопоставимым с технической кучностью, а на 1500–2500 м становится одним из главных факторов вертикального рассеивания.

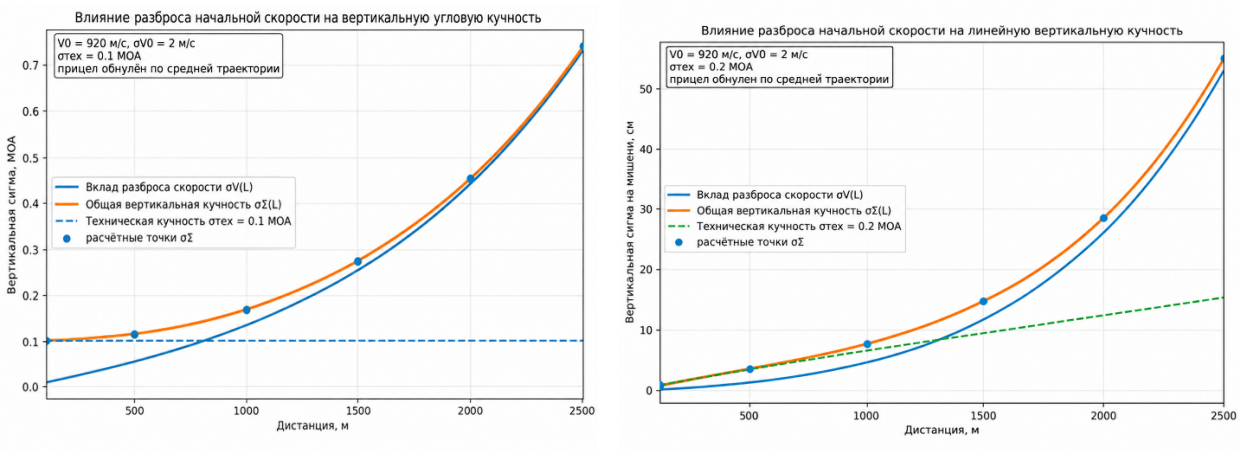

Рисунок 4. Зависимость кучности в MOA и в см от дистанции

На 2000 м даже при отличной технической кучности $0,1$ MOA разброс скорости 2 м/с увеличивает вертикальную сигму до $\sigma_\Sigma(2000) \approx 0,452$ MOA.

На 2500 м модель дает уже $\sigma_\Sigma(2500) \approx 0,740$ MOA, увеличение размера облака попаданий в 7 раз.

На правом графике рис. 4 принят угловой размер технической кучности $\sigma_{тех}$ = 0,2 MOA, в два раза больше, чем на левом графике, поэтому вклад разброса скорости незаметен до 1000–1200 м, после чего линейный размер облака попаданий на мишени начинает быстро увеличиваться, и при начальном размере σ_Σ = 0,58 см σ_Σ увеличивается до 55,3 см на дистанции в 2500 м, то есть, почти в 100 раз. При этом размер облака попаданий только от технической кучности составил 14,54 см, линейно увеличившись со 100 до 2500 м в 25 раз.

Результаты расчета влияния ВС на суммарную угловую кучность приведены на рис. 3а, а на линейный размер облака попаданий в σ на рис. 3б. Исходные данные для расчета: V_0 = 920 м/с, σ_{V0} = 2 м/с, $\sigma_{тех}$ = 0,1 и 0,2 МОА, σ_{BC} = 0,001. На 100 м влияние разброса BC почти также, как и скорости - практически равно нулю: $\sigma_{BC}(100) \approx 0,00014$ МОА, и общая кучность равна технической: $\sigma_{\Sigma}(100) \approx 0,1$ МОА. Нелинейное влияние ВС на суммарную кучность начинается позже, чем у скорости, но темпы роста влияния с дистанцией по сравнению со скоростью выше. На 1500 м вклад становится сопоставимым с технической кучностью: $\sigma_{BC}(1500) \approx 0,079$ МОА. На 2000 м разброс $BC = 0,001$ уже доминирует над технической кучностью: $\sigma_{BC}(2000) \approx 0,198$ МОА, $\sigma_{\Sigma}(2000) \approx 0,221$ МОА. На 2500 м модель даёт уже очень сильный рост: $\sigma_{BC}(2500) \approx 0,443$ МОА, $\sigma_{\Sigma}(2500) \approx 0,454$ МОА.

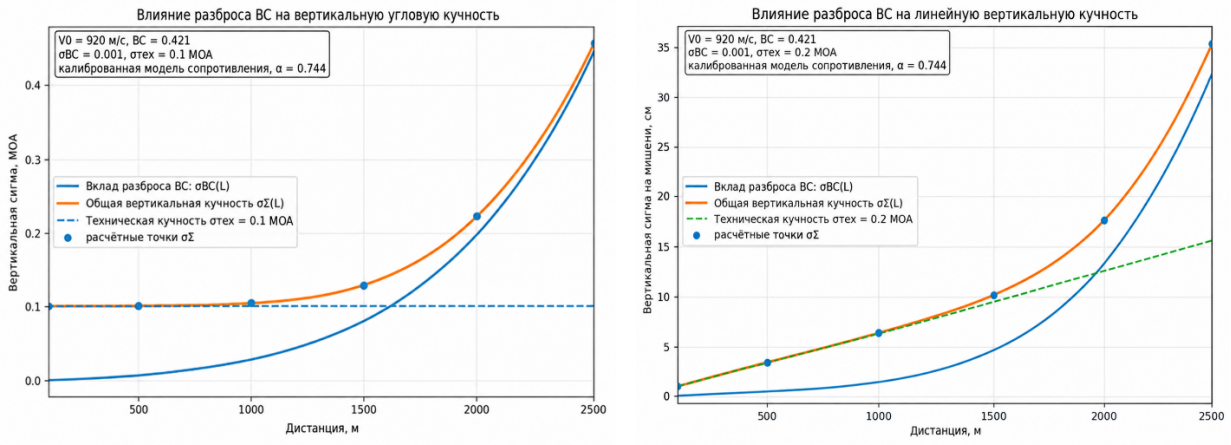

Рисунок 5. Зависимость кучности в МОА и в см от дистанции

Если представить те же результаты в сантиметрах (рис. 5 справа), то на дистанциях 100, 500, 1000, 1500, 2000, 2500 метров вертикальное среднее квадратическое отклонение точки попадания $Б_{\sum}$ равно 0,29, 1,46, 3, 5,55, 12,88, 33,05 см. Линейный размер облака попаданий на дистанциях 100 и 2500 м различается в 114 раз. Если взять классический интервал $3Б\sum$, то отклонения точек попадания на дистанции 2000 м с вероятностью примерно 99,73 % будет по 39 см в обе стороны от точки прицеливания, а на дистанции 2500 м уже по 100 см в обе стороны от точки прицеливания. Таких больших отклонений стрелки часто не видят только потому, что количество выстрелов у них как правило ограничено. Если стрелять много, такие разбросы проявятся.

Совместная модель влияния разброса начальной скорости и БК на суммарную кучность в зависимости от дистанции имеет вид:

$$\sigma_{\Sigma}(L) = \sqrt{\sigma_{\text{тех}}^2 + \sigma_V^2(L) + \sigma_{BC}^2(L)}$$

где $\sigma_{\text{тех}} = 0,1$ МОА, $\sigma_V(L) = K_V(L)\sigma_{V0}$, $\sigma_{BC}(L) = K_{BC}(L)\frac{\sigma_{BC,\text{исх}}}{0,001}$. Исходные данные: $\overline{V}_0 = 920$ м/с, $\sigma_{V0} = 2$ м/с, $\bar{BC}_{G7} = 0,421$, $\sigma_{BC,\text{исх}} = 0,001$.

Графики совместного влияния скорости и ВС для угловой и линейной кучности приведены на рис. 4. На 500 м разброс скорости уже даёт заметную, но еще небольшую добавку: $\sigma_{\Sigma}(500) \approx 0,113$ МОА. На 1000 м скорость становится главным фактором вертикали: $\sigma_{\Sigma}(1000) \approx 0,168$ МОА. На 2000 м суммарная вертикальная сигма возрастает почти до

$0,5$ MOA. При этом вклад BC уже превышает вклад технической кучности: $\sigma_V(2000) = 0,441$ MOA, $\sigma_{BC}(2000) = 0,198$ MOA. На 2500 м модель показывает резкий рост: $\sigma_\Sigma(2500) \approx 0,863$ MOA.

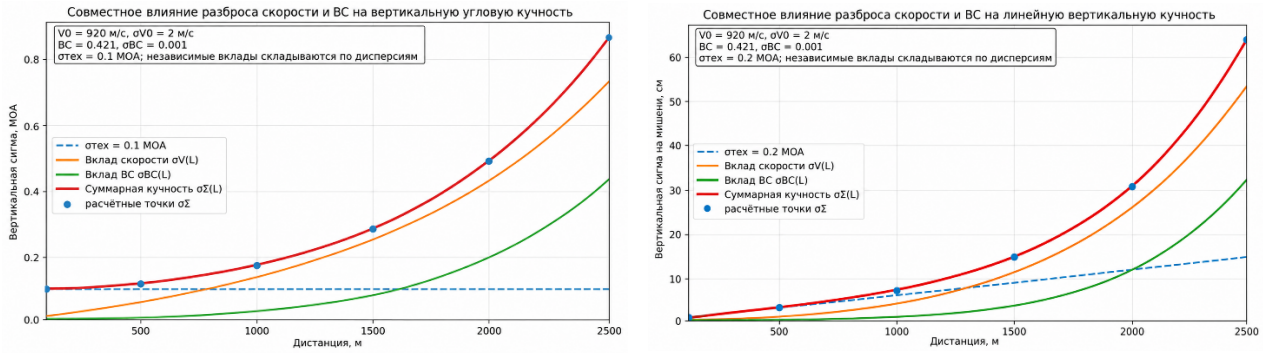

Рисунок 6. Зависимость суммарной кучности в MOA от дистанции

На рис. 6б приведены зависимости размеров облака попаданий в см при действии сразу двух факторов. Видно, что линейный размер облака рассеивания при действии всех трех факторов, выраженный в σ_Σ, вырос до 65 см, то есть, увеличился в 112 раз. То есть, с вероятностью 95 % интервал суммарного разброса может составить более 250 см.

Мы брали в расчетах в основном техническую кучность 0,1 MOA, среднее квадратическое отклонение скорости 2 м/с и предельно низкий разброс BC 0,001. При изменении этих данных соответственно будет меняться доля кучности, зависящая от дистанции, вклад каждой составляющей и предельная дистанция, на которой влияние разброса скорости или BC становится критичным. Чем меньше разброс BC, тем больше вклад разброса скорости. Однако даже при предельно низком разбросе BC его вклад, начиная от 1000–1500 метров, составляет значительную часть от суммарной кучности. Поэтому мы провели еще расчеты для другого крайнего, но реалистичного значения разброса BC. При средней скорости V0 = 920 м/с, разбросе скорости σ_{V0} = 1 м/с и 2 м/с, технической кучности $\sigma_{тех}$ = 0,1 MOA, среднем значении BC = 0,421 мы взяли разброс σ_{BC} = 0,00421, или 1 % от среднего значения. Результаты расчетов представлены на рис. 5. На графиках видно, что в этом примере разброс BC начал доминировать намного раньше. При переходе от $\sigma_{BC} = 0,001$ к $\sigma_{BC} = 0,00421$ вклад разброса BC резко возрастает и уже на дистанциях больше 1200 м становится доминирующим. Снижение разброса скорости с 2 до 1 м/с помогает немного снизить общий разброс, но при таком большом σ_{BC} главный рост вертикальной кучности уже определяется именно BC.

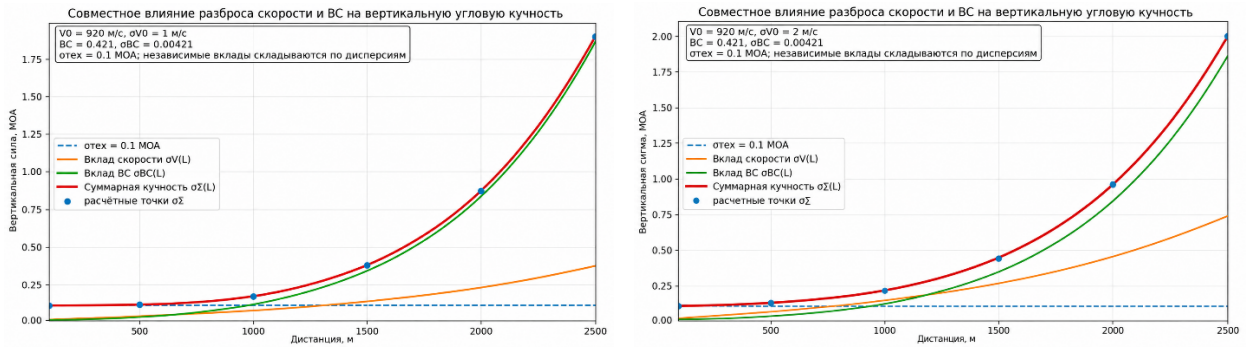

Рисунок 7. Зависимость суммарной кучности в MOA от дистанции

Также было проверено влияние увеличения разброса скорости до 3 м/с и 5 м/с (рис. 7). До 500 м влияние ещё умеренное. На 750 метрах влияние уже значительное, а на 1000 м суммарная сигма уже в 2,5 раза больше технической. На 2000 м она становится более 1 MOA. В этом сценарии на средних дальностях основной рост создаёт скорость, но к 2000–2500 м вклад BC становится сопоставимым и затем доминирует. При $\sigma_{V0} = 5$ м/с скорость становится очень сильным источником вертикали уже с 600 м. На 1500 м общая угловая кучность превышает техническую более чем в 7 раз, а на 2000 м — почти в 14 раз.

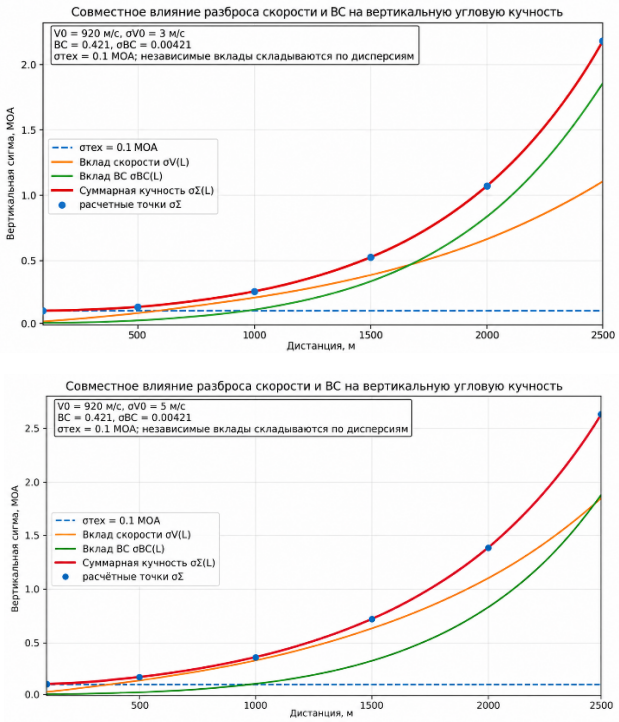

Рисунок 8. Зависимость суммарной кучности в MOA от дистанции

Кривая технической кучности $\sigma_{\text{тех}} = 0,1$ MOA остаётся горизонтальной линией. Кривая скорости $\sigma_V(L)$ растёт быстрее в диапазоне 500-1500 м, но потом уступает влиянию BC. Кривая BC $\sigma_{BC}(L)$ на малых дистанциях почти прижата к нулю, но затем резко поднимается, потому что различие в сопротивлении накапливается по мере полёта.

При большом $\sigma_{BC} = 0,00421$ и малом разбросе скорости BC начинает доминировать и давать сильную вертикаль. При $\sigma_{V0} = 3$ м/с на 2500 м вклад BC уже больше вклада скорости. При $\sigma_{V0} = 5$ м/с на 2500 м вклад скорости и BC становятся почти равными.

Практический вывод. Если техническая кучность винтовки $\sigma_{\text{тех}} = 0,1$ MOA, то суммарная кучность остается относительно неизменной только на дистанциях до 500 метров и только при очень малых разбросах скорости. При $\sigma_{V0} = 3$–5 м/с и $\sigma_{BC} = 0,00421$ на дистанциях 1500–2500 м вертикальная кучность уже почти целиком определяется не технической кучностью винтовки, а качеством патрона и пули. $\sigma_{V0} = 3$ м/с уже заметно ухудшает вертикаль после 1000 м, а $\sigma_{V0} = 5$ м/с становится недопустимо большим для точной ELR стрельбы. Для дистанций 1500–2500 м такая комбинация даёт уже не «тонкую поправку», а кратное увеличение вертикального размера группы.

Сравним теперь влияние разброса скорости и BC при высокой $\sigma_{\text{тех}} = 0.07$ MOA и низкой технической кучности $\sigma_{\text{тех}}$ = 0,5 MOA (рис.7, табл.1).

Из графика и таблицы хорошо видно, что при сверхвысокой технической кучности $\sigma_{\text{тех}} = 0.07$ MOA абсолютный суммарный на этом уровне до 500 м, а дальше он нелинейно растет.

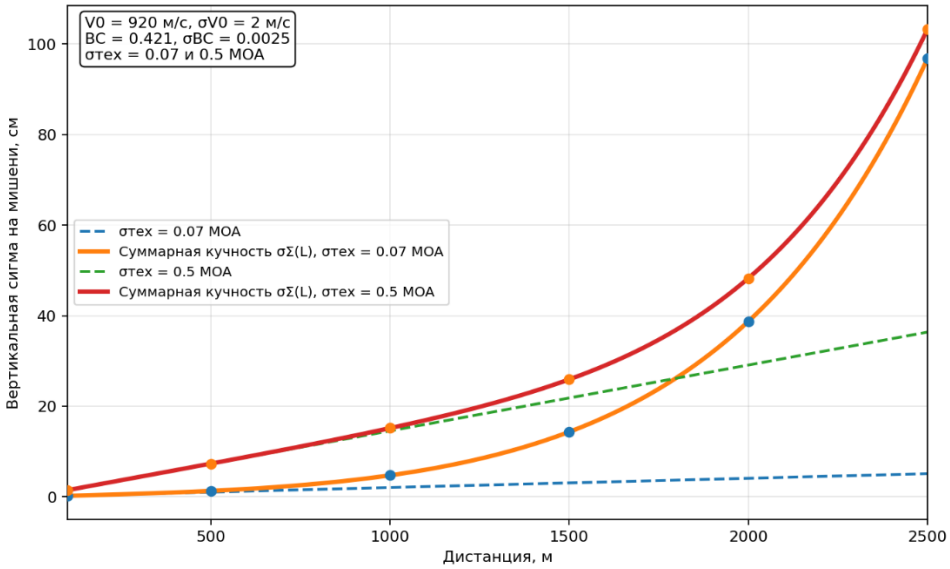

Рисунок 9. Зависимость суммарной кучности в см от дистанции при высокой и низкой технической кучности

Таблица 1. Сравнительная таблица технической и суммарной кучности

Сравнительная таблица технической и суммарной кучности

Дистанция, м	σтех, см при 0,07 MOA	σΣ, см при 0,07 MOA	σтех, см при 0,5 MOA	σΣ, см при 0,5 MOA
100	0,20	0,21	1,45	1,45
500	1,02	1,29	7,27	7,31
1000	2,04	4,73	14,54	15,16
1500	3,05	14,33	21,82	25,92
2000	4,07	38,73	29,09	48,27
2500	5,09	96,81	36,36	103,29

При $\sigma_{тех} = 0.5$ MOA на дистанциях до 1000 м наблюдаемая угловая кучность определяется в основном технической кучностью системы. Поэтому разница между винтовкой с $\sigma_{тех} = 0.07$ MOA и винтовкой с $\sigma_{тех} = 0.5$ MOA проявляется очень резко. Предельная дистанция, на которой баллистические факторы в относительном влиянии начинают доминировать и преимущества высокой технической кучности значительно утрачиваются, для $\sigma_{тех} = 0.07$ MOA начинается примерно с 1000 м, а при 2100 м доля вклада $\sigma_{тех}$ в суммарную кучность уже не превышает 10 %.

На дистанции 2500 м вклад $\sigma_{тех}$ в $\sigma_{\sum}$ составляет около 5 %. При $\sigma_{тех}$ = 0.5 MOA на ближних и средних дистанциях техническая кучность сама по себе уже велика, поэтому вклад скорости и BC менее заметен, а выигрыш к суммарной кучности велик. На дистанции до 1500 м преимущество высокой технической кучности неоспоримо. Однако к 2000–2500 м суммарная кучность в обоих случаях начинает доминировать над технической, и различие между двумя системами уменьшается. Например: на 1000 м 0.07 MOA 4.73 см, 0.5 MOA 15.16 см; на 2500 м 0.07 MOA 96.81 см, 0.5 MOA 103.29 см. То есть на очень больших дистанциях преимущество сверхмалой технической кучности заметно уменьшается, поскольку основную роль начинают играть разброс скорости и разброс BC. Это, конечно, не говорит о том, что при стрельбе на сверхдальние дистанции высокая техническая кучность не нужна. Стрелок с винтовкой лучшей кучности имеет преимущества на всех дистанциях, а на дистанциях до 1000–1500 м преимущество сверхвысокой технической кучности проявляется очень убедительно, и сохраняется дальше, если одновременно обеспечены малые σ_{V0} и σ_{BC}. Но с ростом дистанции вклад разброса начальной скорости и баллистического коэффициента нелинейно растёт. Чем выше кучность, тем меньше дистанция, на которой влияние разброса скорости и BC становится доминирующим.

Мы провели анализ зависимости кучности от дистанции по вертикали. А если речь о полной группе по мишени, то главный дополнительный фактор — это, конечно, случайный профиль бокового ветра по траектории. Анализу влияния случайного профиля ветра по

траектории мы посвятим следующее наше исследование. Пока примем одинаковый разброс по вертикали и горизонтали и представим, какой может быть реалистичный вид мишеней на различных дистанциях. На рис. 10 представлено 6 мишеней, точки попадания на которых рассчитаны с одинаковыми условиями: среднее значение V0 = 920 м/с, разброс скорости σ_{V0} = 2 м/с, среднее значения BC = 0,421, разброс σ_{BC} = 0,0025, техническая кучность $\sigma_{хтех} = \sigma_{утех}$ = 0,1 MOA (ES_5 = 0,3 MOA). Угловой размер облака попаданий на этих мишенях при одной и той же технической кучности винтовки растет, и на дистанциях 100, 500, 1000, 1500, 2000, 2500 м σ_{Σ} = 0,1, 0,114, 0,177, 0,336, 0,669, 1,333 MOA. Если перевести кучность в более привычный стрелкам размер групп, то на дистанции 100 м размер групп ES_5 = 0,3 MOA, а на дистанции 2500 м мы получили размер групп уже ES_5 = 4 MOA, или почти в 14 раз хуже технической кучности.

Угловой размер мишеней. Нужно обратить внимание, что на мишенях рис. 8 принят именно угловой размер в MOA. То есть, все мишени имеют одинаковый размер в MOA, а их реальный линейный размер на местности с ростом дистанции увеличивается пропорционально дистанции. В последнем варианте для дистанции 2500 м было принято поле мишени 5 x 5 MOA, то есть от -2.5 MOA до $+2.5$ MOA по горизонтали и вертикали.

Если все мишени сделать одинакового физического размера, например, 2x2 м, тогда визуальное сравнение будет уже другим: физически одинаковая мишень на дальних дистанциях займет всё меньший угловой размер. Как известно, линейный размер 1 MOA на дистанции L равен 1 MOA = 2,9089 · L/100 м. Тогда 1 MOA на дистанциях 100, 500, 1000, 1500, 2000, 2500 м равен 2,91, 14,54, 29,09, 43,63, 58,18, 72,72 см. Поэтому линейные размеры мишеней на этих дистанциях равны 5 x 5 MOA или соответственно 14.54 × 14.54, 72.72 × 72.72, 1.45 × 1.45, 2.18 × 2.18, 2.91 × 2.91, 3.64 × 3.64 см. То есть, на 100 м поле мишени вместе с подложкой получилось около 14.5 см, а на 2500 м — уже около 3.64 м.

Концентрические круги через 0,5 MOA означают, что радиусы кругов идут с шагом 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5 MOA. Например, центральный круг радиусом 0.5 MOA имеет диаметр 1 MOA. На 2500 м $1\ \text{MOA} = 72.72$ см, поэтому диаметр круга 1 MOA на такой дистанции 72.72 см, а всё поле 5 MOA3.64 м.

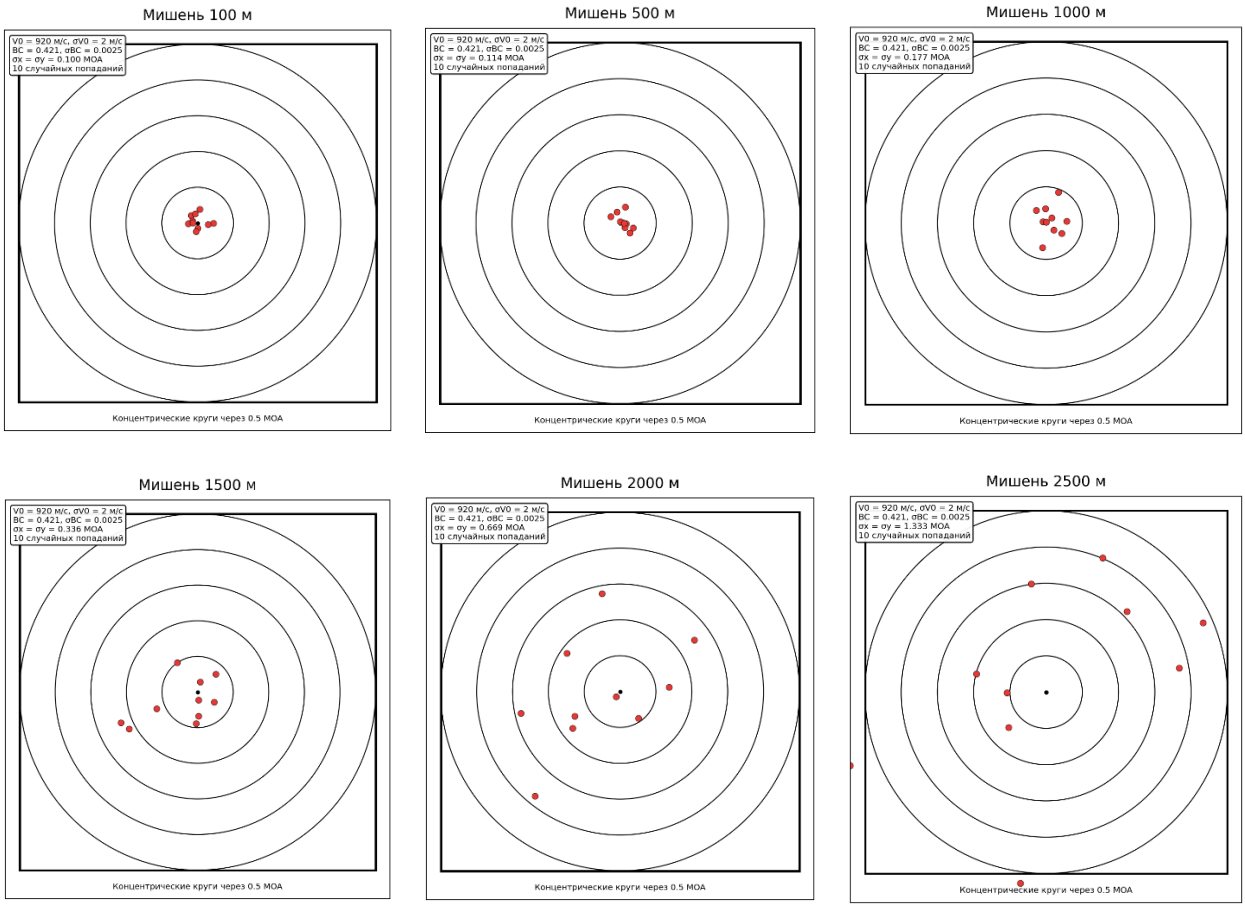

Рисунок 10. Имитация точек попаданий в мишень с одинаковым угловым размером при стрельбе на разные дистанции группами по 10 выстрелов

Для шести мишеней рис. 10 рассчитаем вероятность попадания в центральный круг диаметром $D = 1$ MOA. Радиус круга $R = 0,5$ MOA. На мишенях было принято двумерное нормальное распределение с одинаковыми отклонениями по горизонтали и вертикали: $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_\Sigma(L)$. Из табл. 2 следует, что до 1000 м вероятность попадания в центральный круг диаметром 1 MOA остаётся очень высокой. После 1500 м вероятность резко падает. На 2000 м она равна 24%, а на 2500 м всего 6,8. То есть, по принятой модели при $V_0 = 920$ м/с, $\sigma_{V0} = 2$ м/с, $BC = 0,421$, $\sigma_{BC} = 0,0025$, $\sigma_{\text{тех}} = 0,1$ MOA центральный круг 1 MOA уверенно поражается до 1000 м, но на 1500–2500 м вероятность быстро падает из-за снижения суммарной угловой кучности от разброса скорости и BC.

При несовпадении СТП с центром мишени или влиянии ветра и миража вероятность попасть в круг диаметром 1 MOA на дистанции 2500 м при использованных данных мала. Это можно понимать так, что пуля 300 gr с BC = 0,421, и соответственно, калибр 33XC могут уверенно поражать мишени до дистанций 1500 – 2000 м, но являются недостаточными для надежного поражения мишеней на дистанциях выше 2000 м.

Таблица 2. Расчет вероятности попадания в центральный круг 1 MOA

Дистанция, м	σΣ, MOA	Вероятность попадания	Вероятность, %	Ожидаемо попаданий из 10
100	0,100	0,999996	**99,9996%**	10,00
500	0,114	0,999936	**99,9936%**	10,00
1000	0,177	0,981129	**98,11%**	9,81
1500	0,336	0,669596	**66,96%**	6,70
2000	0,669	0,243376	**24,34%**	2,43
2500	1,333	0,067938	**6,79%**	0,68

Проведенные исследования показывают, что обеспечение прежде всего экстремальной технической кучности $Б_{тех} \leq 0{,}1$ MOA ($ES_5 \leq 0{,}25$ MOA), и затем минимального разброса скорости и BC $Б_{V0} \leq 1$ м/с и $Б_{BC} \leq 0{,}3–0{,}5$ % от номинала являются целевыми задачами спортсмена, рассчитывающего на победу в высокоранговых соревнованиях ERL. Мишени на 2000 и 2500 м показывают, что 1500–2000 м – это уже предел эффективного применения пули Berger 300 gr и винтовки в калибре 33XC. Эти дистанции требуют применения винтовок больших калибров с более тяжелыми пулями с более высоким BC.

Заключение

В статье исследуется влияние технической кучности спортивной винтовки калибра 33XC, разброса начальной скорости и баллистического коэффициента (BC) пули Berger .338 300 gr на суммарную угловую кучность в диапазоне дистанций 100–2500 м. В представленных расчётных сценариях показано, что на дистанциях до 1000–1500 м винтовка 33XC, настроенная на более высокую техническую кучность, обладает очевидным преимуществом. Во всем диапазоне исследованных дистанций стрелок с максимальной кучностью винтовки также получает преимущество перед другими. Однако по мере увеличения дальности возрастает вклад в угловое рассеивание разброса скорости и BC, а вклад технической кучности снижается.

Основной результат исследования состоит в выявлении предельной дистанции применения винтовки данного калибра и пули в 1500–2000 м, при которой вклад технической кучности в суммарную кучность еще высок, и вклад зависящих от дальности параметров пули еще не привел к неприемлемо большому рассеиванию облака пропаданий. Также не только выявлено, что для стрельбы на дальние дистанции одинаково важным является настройка винтовки на экстремальную кучность, обеспечение минимального разброса скорости и BC, но и получены целевые значения этих параметров.

Дальнейшая проверка выводов предполагает сопоставление расчётов с результатами натурных испытаний и отдельный анализ случайного ветрового воздействия.

Список литературы

1. Богословский В.Н., Жуков И.Г. Новый проект спортивной винтовки в калибре 33XC // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. – 2026. – Ч. 7, № 7 (148). – С. 4–21. – DOI: 10.32743/UniTech.2026.148.7.23194. URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23194 (дата обращения: 29.09.2026).
2. Богословский В.Н., Кадомкин В.В., Жуков И.Г. Показатели кучности спортивной и охотничьей винтовки. Аналитический обзор // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. – 2024. – Ч. 3, № 4 (121). – С. 29–44. – DOI: 10.32743/UniTech.2024.121.4.17376. URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/17376 (дата обращения: 29.09.2026).
3. Богословский В.Н. Оценка кучности спортивной винтовки по экстремальному размеру группы // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. – 2026. – Ч. 1, № 8 (149). – С. 4–30. – DOI: 10.32743/UniTech.2026.149.8.23285. URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23285 (дата обращения: 29.09.2026).
4. Berger Bullets. 338 Caliber 300 Grain Hybrid OTM Tactical Rifle Bullet [Электронный ресурс]. – [Б. г.]. URL: https://bergerbullets.com/product/338-caliber-300-grain-hybrid-otm-tactical/ (дата обращения: 29.09.2026).
5. Berger Bullets. BC Effect on Precision [Электронный ресурс]. // No BS BC. URL: https://bergerbullets.com/nobsbc/bc-effect-on-precision/ (дата обращения: 29.09.2026).
6. Berger Bullets. Custom Drag Models for Extreme Long Range [Электронный ресурс]. // No BS BC. URL: https://bergerbullets.com/nobsbc/custom-drag-models-for-extreme-long-range/ (дата обращения: 29.09.2026).
7. Berger Bullets. Shot-to-Shot Consistency [Электронный ресурс]. // No BS BC. URL: https://bergerbullets.com/nobsbc/shot-to-shot-consistency/ (дата обращения: 29.09.2026).
8. Berger Bullets. Standard Deviation of BC – The Bell Curve [Электронный ресурс]. // No BS BC. URL: https://bergerbullets.com/nobsbc/standard-deviation-of-bc-the-bell-curve/ (дата обращения: 29.09.2026).
9. Berger Bullets. Sources of BC Inconsistency [Электронный ресурс]. // No BS BC. URL: https://bergerbullets.com/nobsbc/sources-of-bc-inconsistency/ (дата обращения: 29.09.2026).
10. Berger Bullets. BC Consistency [Электронный ресурс]. // No BS BC. URL: https://bergerbullets.com/nobsbc/bc-consistency/ (дата обращения: 29.09.2026).
11. Berger Bullets. Manufacturing Effects on BC [Электронный ресурс]. // No BS BC. URL: https://bergerbullets.com/nobsbc/manufacturing-effects-on-bc/ (дата обращения: 29.09.2026).
12. Berger Bullets. Measuring BCs [Электронный ресурс]. // No BS BC. URL: https://bergerbullets.com/nobsbc/measuring-bcs/ (дата обращения: 29.09.2026).
13. CSA Tir Canjuers. 2026 KO2M/KO1M Rules and Procedures [Электронный ресурс]. URL: https://www.csatircanjuers.fr/en/general-rules/ (дата обращения: 29.09.2026).
14. Hornady Manufacturing. 338 Cal.338 300 gr A-Tip Match [Электронный ресурс]. – [Б. г.]. URL: https://www.hornady.com/bullets/rifle/338-cal-.338-300-gr-a-tip-match (дата обращения: 29.09.2026).

15. Lapua. Lapua Ballistics tips: The benefits of 6DOF [Электронный ресурс]. – 30.09. – 2020. URL: https://www.lapua.com/lapua-ballistics-tips-benefits-of-6dof/ (дата обращения: 29.09.2026).
16. Lapua. Lapua Ballistics App [Электронный ресурс]. – [Б. г.]. URL: https://www.lapua.com/support/lapua-ballistics-app-2/ (дата обращения: 29.09.2026).
17. Litz B. Shot-to-Shot Variation in Muzzle Velocity and Ballistic Coefficient [Электронный ресурс] / B. Litz. // Shooting Sports USA. – 2020. URL: https://www.ssusa.org/content/shot-to-shot-variation-in-muzzle-velocity-and-ballistic-coefficient/ (дата обращения: 29.09.2026).
18. National Institute of Standards and Technology. Combining uncertainty components [Электронный ресурс]. // NIST Reference on Constants, Units, and Uncertainty. URL: https://physics.nist.gov/cuu/Uncertainty/combination.html (дата обращения: 29.09.2026).
19. NIST/SEMATECH. Measures of Scale [Электронный ресурс]. // e-Handbook of Statistical Methods. URL: https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section3/eda356.htm (дата обращения: 29.09.2026).
20. NIST/SEMATECH. Shewhart X-bar and R and S Control Charts [Электронный ресурс]. // e-Handbook of Statistical Methods. URL: https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/pmc/section3/pmc321.htm (дата обращения: 29.09.2026).
21. NIST/SEMATECH. Normal Distribution [Электронный ресурс]. // e-Handbook of Statistical Methods. URL: https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section3/eda3661.htm (дата обращения: 29.09.2026).
22. NIST/SEMATECH. Chi-Square Test for the Variance [Электронный ресурс]. // e-Handbook of Statistical Methods. URL: https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section3/eda358.htm (дата обращения: 29.09.2026).
23. Zant C. How Much Does SD Matter? [Электронный ресурс] / C. Zant. // Precision Rifle Blog. – 2015. URL: https://precisionrifleblog.com/2015/04/18/how-much-does-sd-matter/ (дата обращения: 29.09.2026).

References

1. Bogoslovskii V.N., Zhukov I.G. Novyj proekt sportivnoj vintovki v kalibre 33KhS [New project of a sporting rifle in caliber 33XC]. Universum: Technical Sciences, part 7. Available at: [Электронный ресурс]. – 2026. – No. 7 (148). – P. 4–21. – DOI: 10.32743/UniTech.2026.148.7.23194. – URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23194 (accessed: 29.09.2026). (In Russ.).
2. Bogoslovskii V.N., Kadomkin V.V., Zhukov I.G. Pokazateli kuchnosti sportivnoj i okhotnich'ej vintovki. Analiticheskij obzor [Accuracy indicators of sports and hunting rifles. Analytical review]. Universum: Technical Sciences, part 3. Available at: [Электронный ресурс]. – 2024. – No. 4 (121). – P. 29–44. – DOI: 10.32743/UniTech.2024.121.4.17376. – URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/17376 (accessed: 29.09.2026). (In Russ.).

3. Bogoslovskii V.N. Otsenka kuchnosti sportivnoj vintovki po ekstremal'nomu razmeru gruppy [Assessment of competition rifle precision using shot-group extreme spread]. Universum: Technical Sciences, part 1. Available at: [Электронный ресурс]. – 2026. – No. 8 (149). – P. 4–30. – DOI: 10.32743/UniTech.2026.149.8.23285. – URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23285 (accessed: 29.09.2026). (In Russ.).
4. Berger Bullets. 338 Caliber 300 Grain Hybrid OTM Tactical Rifle Bullet. No date. Available at: [Электронный ресурс]. – URL: https://bergerbullets.com/product/338-caliber-300-grain-hybrid-otm-tactical/ (accessed: 29.09.2026).
5. Berger Bullets. BC Effect on Precision. No BS BC. No date. Available at: [Электронный ресурс]. – URL: https://bergerbullets.com/nobsbc/bc-effect-on-precision/ (accessed: 29.09.2026).
6. Berger Bullets. Custom Drag Models for Extreme Long Range. No BS BC. No date. Available at: [Электронный ресурс]. – URL: https://bergerbullets.com/nobsbc/custom-drag-models-for-extreme-long-range/ (accessed: 29.09.2026).
7. Berger Bullets. Shot-to-Shot Consistency. No BS BC. No date. Available at: [Электронный ресурс]. – URL: https://bergerbullets.com/nobsbc/shot-to-shot-consistency/ (accessed: 29.09.2026).
8. Berger Bullets. Standard Deviation of BC – The Bell Curve. No BS BC. No date. Available at: [Электронный ресурс]. – URL: https://bergerbullets.com/nobsbc/standard-deviation-of-bc-the-bell-curve/ (accessed: 29.09.2026).
9. Berger Bullets. Sources of BC Inconsistency. No BS BC. No date. Available at: [Электронный ресурс]. – URL: https://bergerbullets.com/nobsbc/sources-of-bc-inconsistency/ (accessed: 29.09.2026).
10. Berger Bullets. BC Consistency. No BS BC. No date. Available at: [Электронный ресурс]. – URL: https://bergerbullets.com/nobsbc/bc-consistency/ (accessed: 29.09.2026).
11. Berger Bullets. Manufacturing Effects on BC. No BS BC. No date. Available at: [Электронный ресурс]. – URL: https://bergerbullets.com/nobsbc/manufacturing-effects-on-bc/ (accessed: 29.09.2026).
12. Berger Bullets. Measuring BCs. No BS BC. No date. Available at: [Электронный ресурс]. – URL: https://bergerbullets.com/nobsbc/measuring-bcs/ (accessed: 29.09.2026).
13. CSA Tir Canjuers. 2026 KO2M/KO1M Rules and Procedures. 2026. Available at: [Электронный ресурс]. – URL: https://www.csatircanjuers.fr/en/general-rules/ (accessed: 29.09.2026).
14. Hornady Manufacturing. 338 Cal.338 300 gr A-Tip Match. No date. Available at: [Электронный ресурс]. – URL: https://www.hornady.com/bullets/rifle/338-cal-.338-300-gr-a-tip-match (accessed: 29.09.2026).
15. Lapua. Lapua Ballistics tips: The benefits of 6DOF. September 30, 2020. Available at: [Электронный ресурс]. – URL: https://www.lapua.com/lapua-ballistics-tips-benefits-of-6dof/ (accessed: 29.09.2026).

16. Lapua. Lapua Ballistics App. No date. Available at: [Электронный ресурс]. – URL: https://www.lapua.com/support/lapua-ballistics-app-2/ (accessed: 29.09.2026).
17. Litz B. Shot-to-Shot Variation in Muzzle Velocity and Ballistic Coefficient. Shooting Sports USA, 2020. Available at: [Электронный ресурс]. – URL: https://www.ssusa.org/content/shot-to-shot-variation-in-muzzle-velocity-and-ballistic-coefficient/ (accessed: 29.09.2026).
18. National Institute of Standards and Technology. Combining uncertainty components. NIST Reference on Constants, Units, and Uncertainty. No date. Available at: [Электронный ресурс]. – URL: https://physics.nist.gov/cuu/Uncertainty/combination.html (accessed: 29.09.2026).
19. NIST/SEMATECH. Measures of Scale. e-Handbook of Statistical Methods. No date. Available at: [Электронный ресурс]. – URL: https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section3/eda356.htm (accessed: 29.09.2026).
20. NIST/SEMATECH. Shewhart X-bar and R and S Control Charts. e-Handbook of Statistical Methods. No date. Available at: [Электронный ресурс]. – URL: https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/pmc/section3/pmc321.htm (accessed: 29.09.2026).
21. NIST/SEMATECH. Normal Distribution. e-Handbook of Statistical Methods. No date. Available at: [Электронный ресурс]. – URL: https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section3/eda3661.htm (accessed: 29.09.2026).
22. NIST/SEMATECH. Chi-Square Test for the Variance. e-Handbook of Statistical Methods. No date. Available at: [Электронный ресурс]. – URL: https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section3/eda358.htm (accessed: 29.09.2026).
23. Zant C. How Much Does SD Matter? Precision Rifle Blog, 2015. Available at: [Электронный ресурс]. – URL: https://precisionrifleblog.com/2015/04/18/how-much-does-sd-matter/ (accessed: 29.09.2026).