

ISSN 1816-0301 (print)
УДК 623.764

Поступила в редакцию 14.11.2017
Received 14.11.2017

И. В. Филипченко¹, И. Л. Лапицкий², О. В. Воронин²

¹*Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь*

²*Военная академия Республики Беларусь, Минск, Республика Беларусь*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИИ ПОЛЕТА ОПЕРАТИВНО-ТАКТИЧЕСКИХ БАЛЛИСТИЧЕСКИХ РАКЕТ

Аннотация. Предлагаются основные подходы к совершенствованию систем моделирования боевых действий в части имитации ракетного удара противника с учетом возможного осуществления маневра оперативно-тактической (тактической) баллистической ракеты в полете. Приводятся результаты моделирования боевых действий формирования тактической противоракетной обороны.

Ключевые слова: моделирование, боевые действия, тактическая противоракетная оборона, ракетный удар, баллистическая ракета, зенитный ракетный комплекс, зона поражения

Для цитирования. Филипченко, И. В. Моделирование траектории полета оперативно-тактических баллистических ракет / И. В. Филипченко, И. Л. Лапицкий, О. В. Воронин // Информатика. – 2018. – Т. 15, № 1. – С. 51–59.

I. V. Filipchenko, I. L. Lapitsky, O. V. Voronin

¹*The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

²*Military Academy of the Republic of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

MODELING THE FLIGHT TRAJECTORY OF OPERATIONAL-TACTICAL BALLISTIC MISSILES

Abstract. The article gives the basic approaches to updating the systems of combat operations modeling in the part of enemy missile attack simulation taking into account the possibility of tactical ballistic missile maneuvering during the flight. The results of simulation of combat tactical missile defense operations are given.

Keywords: modeling, combat operations, tactical missile defense, missile strike, ballistic missiles, anti-aircraft missile system, the affected area

For citation. Filipchenko I. V., Lapitsky I. L., Voronin O. V. Modeling the Flight Trajectory of Operational-Tactical Ballistic Missiles. *Informatics*, 2018, vol. 15, no. 1, pp. 51–59 (in Russian).

Введение. Опыт локальных войн и вооруженных конфликтов последних десятилетий (Ирак, Югославия, Афганистан, Ливия, Сирия) свидетельствует о массовом применении высокоточных средств поражения. Среди них наиболее предпочтительным оружием продолжают оставаться управляемые авиационные бомбы и крылатые ракеты, вместе с тем отмечено применение оперативно-тактических баллистических ракет (ОТБР) и тактических баллистических ракет (ТБР) (1991 и 2003 гг. – Ирак, 2001 г. – Афганистан) [1].

Существенными преимуществами баллистических ракет (БР) в сравнении с другими средствами воздушного нападения (СВН) являются возможности ОТБР (ТБР) по преодолению оборонительных систем противника, затрудняющие процессы обнаружения и уничтожения БР в полете. Этому способствуют баллистические траектории и высокие скорости полета, малые эффективные отражающие поверхности ракет. Современные ОТБР (ТБР) могут совершать полет по так называемой «полубаллистической» траектории, включающей чередующиеся участки, характерные для баллистической цели (БЦ) и аэродинамической. Вследствие этого существенно снижаются возможности формирования тактической противоракетной обороны (ПРО) по поражению БЦ.

Система защиты объектов (войск) от ударов противника ОТБР (ТБР), под которой, как правило, понимается тактическая ПРО, является дорогостоящей, что обуславливает необходимость всесторонней оценки ее эффективности.

Проведение натурных испытаний системы тактической ПРО в ходе полномасштабных учений с боевой стрельбой затруднено. Наряду с высокой стоимостью проведения таких учений в настоящее время отсутствуют ракеты-мишени, позволяющие по своим пространственно-временным характеристикам создать боевую обстановку, схожую с реальными боевыми действиями (БД). Характеристики используемых ракет-мишеней не в полной мере соответствуют современным ОТБР (ТБР), что не позволяет оценить боевые возможности формирования тактической ПРО.

В настоящее время широкое распространение получило применение систем поддержки решения командира с использованием моделирования БД, позволяющих имитировать процесс ведения БД формированием тактической ПРО и оперативно получать результаты (рекомендации) [2]. Важную роль в моделировании БД формирования тактической ПРО занимает модель ракетного удара противника, что предопределяется существенной зависимостью процессов обнаружения и поражения ракеты зенитной ракетной системой (ЗРС) от характеристик полета БЦ.

Существующий математический аппарат определения значений пространственно-временных параметров траектории полета БР [3–5] в целом позволяет смоделировать полет ракеты по баллистической траектории. Однако в настоящее время возможности ее полета по «полубаллистической» траектории в состоящих на вооружении системах (комплексах) моделирования БД (СМБД) не учитываются, что затрудняет получение адекватных результатов ведения БД формированием тактической ПРО. Таким образом, существует необходимость совершенствования СМБД в части придания возможности моделирования ракетного удара противника ОТБР (ТБР), соответствующего реальному.

Моделирование полета оперативно-тактической (тактической) баллистической ракеты. При проведении расчетов в единой системе показателей и координат целесообразно применять географическую систему координат (ГСК) или местную земную систему координат (МЗСК).

ГСК координат позволяет использовать карту местности, в том числе и цифровую, а МЗСК – снижать количество проводимых вычислений при использовании специализированных программ для математических расчетов и исследовать влияние частных показателей.

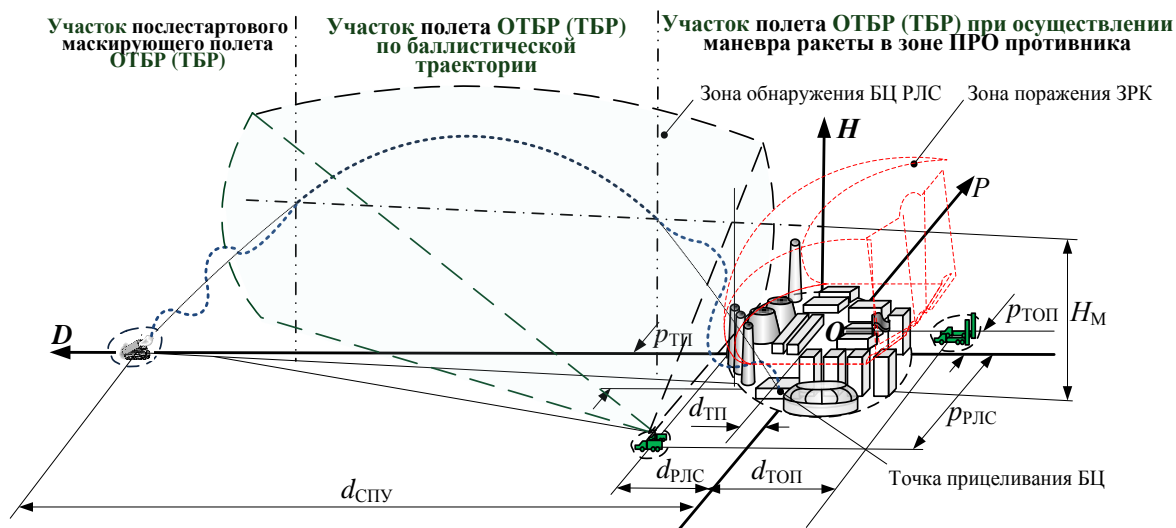


Рис. 1. Вариант формализованного представления тактической обстановки

За начало координат МЗСК принят центр объекта обороны (рис. 1). При известном местоположении стартовой пусковой установки (СПУ) ОТБР (ТБР) ось OD направлена на центр позиции СПУ ОТ и ТБР противника с координатами $(d_{\text{СПУ БР}}, p_{\text{СПУ БР}})$, ось OH направлена вертикально вверх, а ось OP перпендикулярна оси OD . При расположении СПУ ОТБР (ТБР) противника на нескольких позициях или при неизвестном местоположении СПУ ОТ и ТБР осью OD является биссектриса ракетоопасного сектора ($\beta_{\text{РОС}}$), предопределяемого усредненными радиусами позиций СПУ ОТБР (ТБР) и направлениями на их крайние позиции относительно центра объекта обороны [6].

Преобразование координат любой k -й точки на поверхности Земли, выраженных в местных координатах (d_k, p_k) , в географические (x_k, y_k) позволяют осуществить выражения [7]

$$x_k = (d_k \cos \beta_k - p_k \sin \beta_k) - X_{\text{об}}, y_k = (d_k \sin \beta_k + p_k \cos \beta_k) - Y_{\text{об}}$$

при

$$\beta_k = \beta_{\text{СПУ БР}} + \Delta \beta_k, \beta_{\text{СПУ БР}} = \text{arcctg}(\Delta x_{\text{СПУ БР}} / \Delta y_{\text{СПУ БР}});$$

$$\Delta x_{\text{СПУ БР}} = X_{\text{СПУ БР}} - X_{\text{об}}, \Delta y_{\text{СПУ БР}} = Y_{\text{СПУ БР}} - Y_{\text{об}},$$

где β_k – направление на k -ю точку от центра объекта обороны в ГСК;

$\beta_{\text{СПУ БР}}$ – географический азимут местоположения усредненного центра позиции СПУ ОТБР (ТБР) (середины ракетоопасного сектора) относительно приведенного объекта обороны;

$\Delta \beta_k$ – азимут k -й точки в МЗСК относительно центра приведенного объекта обороны;

$\Delta x_{\text{СПУ БР}}$ и $\Delta y_{\text{СПУ БР}}$ – величины проекции отрезка, проведенного из центра объекта обороны к центру позиции СПУ ОТБР (ТБР), на оси OX и OY соответственно.

При использовании специализированных математических программ для расчета или отображения координат следует учесть, что в них, как правило, используется правая декартова прямоугольная система координат, которая в отличие от ГСК имеет иное расположение и направление осей OX и OY , а также направление отсчета углов.

Траектория движения БЦ условно разбивается на три участка: первый – участок после-стартового маскирующего полета баллистической ракеты для контрбатарейной борьбы, применяемый в целях затруднения (исключения) осуществления противостоящей стороной ответного удара по СПУ ракетными войсками или дальнобойной артиллерией; второй – участок полета ракеты по баллистической траектории; третий – участок маневра ракеты в зоне ПРО противника, затрудняющий обнаружение и поражение БЦ противоракетными системами.

Разделение на участки полета БЦ с маневром по углу места (кабрирование, пикирование) определяется следующими условиями:

$$H_{\text{БЦ } t} \leq H_{\text{М}} - \text{полет БЦ с маневром по углу места};$$

$$H_{\text{БЦ } t} > H_{\text{М}} - \text{полет БЦ по баллистической траектории},$$

где $H_{\text{БЦ } t}$ – высота БЦ в t -й момент времени;

$H_{\text{М}}$ – высота окончания (начала) маневра (например, граничная высота плотного слоя атмосферы).

Расчет пространственно-временных параметров полета ОТБР (ТБР) в точку прицеливания может быть осуществлен по известным методикам [3–5]. Выбор методики зависит от требуемой точности получаемых значений. Характеристиками движущейся БЦ, которые требуется определять в интересах моделирования БД, являются координаты цели, их первые и вторые производные. В упрощенном виде система уравнений, описывающих движение ракеты по баллистике, в t -й момент времени полета имеет вид [5]

$$\begin{cases} m \frac{dV_{\text{БЦ}}}{dt} = P_{\text{уд}}(H_{\text{БЦ}}) - Q(V_{\text{БЦ}}, H_{\text{БЦ}}) - mg(H_{\text{БЦ}}) \sin \theta; \\ \frac{dH_{\text{БЦ}}}{dt} = V_{\text{БЦ}} \sin \theta; \\ \frac{dD_{\text{БЦ}}}{dt} = V_{\text{БЦ}} \cos \theta; \\ \Delta\theta = 2 \arcsin(n_y / 2V_{\text{БЦ}}), \end{cases}$$

где m – масса ракеты;

$P_{\text{уд}}(H_{\text{БЦ}})$ – сила тяги ракеты на активном участке траектории полета в зависимости от высоты ее полета ($H_{\text{БЦ}}$);

$Q(V_{\text{БЦ}}, H_{\text{БЦ}})$ – сила лобового сопротивления в зависимости от текущей скорости ($V_{\text{БЦ}}$) и высоты полета БЦ;

θ – угол наклона траектории полета ракеты к горизонту;

$g(H_{\text{БЦ}})$ – ускорение свободного падения, характерное для высоты полета БЦ;

$D_{\text{БЦ}}$ – горизонтальная дальность полета БЦ от места ее старта;

n_y – нормальная перегрузка ракеты.

Для расчета силы лобового сопротивления используются геометрические параметры корпуса БЦ и характеристики стандартной атмосферы:

$$Q(V_{\text{БЦ}}, H_{\text{БЦ}}) = \frac{\rho(H_{\text{БЦ}}) V_{\text{БЦ}}^2}{2} S C_{\text{ха}}(V_{\text{БЦ}}, H_{\text{БЦ}}),$$

где $\rho(H_{\text{БЦ}})$ – плотность атмосферы в зависимости от высоты БЦ;

S – площадь миделя;

$C_{\text{ха}}(V_{\text{БЦ}}, H_{\text{БЦ}})$ – значение аэродинамического коэффициента (определяется числом Маха).

Значения $\rho(H_{\text{БЦ}})$, $C_{\text{ха}}(V_{\text{БЦ}}, H_{\text{БЦ}})$ представлены в [7] для соответствующих скоростей и высот.

При воссоздании траектории и характеристик полета БЦ на участке маневрирования применен метод требуемых ускорений [5]. Закон маневрирования (зависимость нормальной перегрузки от времени) соответствует тактико-техническим характеристикам (ТТХ) данного типа ракет. Для повышения степени достоверности летных характеристик (выполнения условия непрерывности координат и их производных низших порядков) заданы законы изменения первой производной нормальной перегрузки:

$$\frac{dn_y(t)}{dt} = \begin{cases} 0, & t < T_1; \\ f_1(t), & T_1 \leq t < T_2; \\ f_2(t), & T_2 \leq t < T_3; \\ \vdots \\ f_K(t), & T_{K-1} \leq t < T_K, \end{cases}$$

где n – количество участков маневрирования;

T_i – время начала i -го участка маневрирования;

$f_i(t)$ – функциональная зависимость, определяющая вид и интенсивность маневра на i -м участке маневрирования.

Расчет характеристик движущейся БЦ выполняется дискретно с интервалом по времени Δt , достаточным для тактических расчетов.

Работоспособность представленного математического аппарата проверена с помощью специализированной программы, исполненной в среде математического проектирования MathCAD. Основные зависимости пространственно-временных характеристик участка маневрирования на примере ОТБР АТАКМС-1А «Юнитари», состоящей на вооружении в странах НАТО и способной совершать маневр по углу места до 9° , представлены на рис. 2.

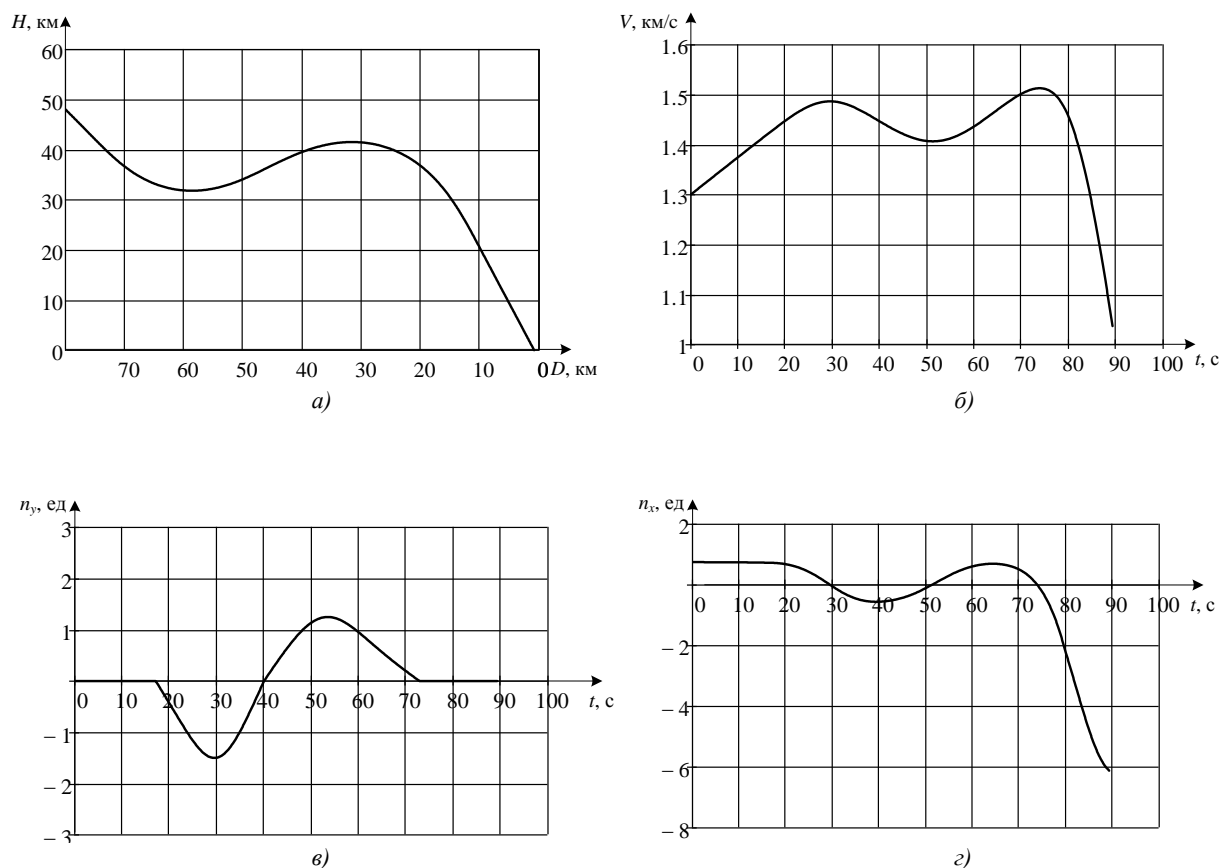


Рис. 2. Графики зависимости пространственно-временных характеристик: а) высоты от дальности полета ракеты; б) скорости от времени полета ракеты; в) нормальной перегрузки n_y от времени полета ракеты; г) продольной перегрузки n_x от времени полета ракеты

Результаты моделирования боевых действий формирования тактической ПРО в условиях применения противником маневрирующих ОТБР (ТБР). Обобщенным пространственно-временным показателем боевых возможностей тактико-огневого подразделения формирования тактической ПРО (зенитного ракетного дивизиона, зенитной ракетной батареи) является зона обороны ЗРК. Размеры, конфигурация и положение границ зоны обороны зависят от количества и взаимного расположения ЗРК, параметров их зон поражения, диапазона возможных направлений полета и углов падения БЦ, а также от требуемой вероятности их поражения [8]. Влияние параметров зоны поражения ЗРК, диапазона углов падения БЦ и вида огня зенитной управляемой ракеты (ЗУР) на положение границ зоны обороны при фиксированном направлении удара показано на рис. 3.

Площадь зоны обороны ЗРК вычисляют интегрированием функций, определяющих ее границы в пределах допустимого параметра (от $-P_{пр}$ до $P_{пр}$) [8]:

$$S_{\text{ЗО ЗРК}} = \int_{-P_{пр}}^{P_{пр}} |d_{п} - d_{т}| \partial P,$$

где $P_{пр}$ – предельный параметр обстреливаемой БЦ (удаление фланговых границ зоны обороны ЗРК от оси OD);

$d_{п}$ и $d_{т}$ – удаления передней и тыльной границ зоны обороны ЗРК соответственно от оси OP , определяемые по выражениям [8]

$$d_{\text{п}}(P) = \sqrt{d_{\text{д}}^2 - P^2} - H_{\text{вх}} \operatorname{ctg}(\theta_{\text{мин}});$$

$$d_{\text{т}}(P) = \begin{cases} \sqrt{d_{\text{б}}^2 - P^2} - H_{\text{вых}} \operatorname{ctg}(\theta_{\text{макс}}) & \text{при } P \leq d_{\text{б}} \sin(q_{\text{макс}}), \\ \operatorname{ctg} q_{\text{макс}} - H_{\text{вых}} \operatorname{ctg}(\theta_{\text{макс}}) & \text{при } P > d_{\text{б}} \sin(q_{\text{макс}}). \end{cases}$$

Здесь $d_{\text{д}}$ и $d_{\text{б}}$ – горизонтальные дальности до дальней и ближней границ зоны поражения от позиции ЗРК;

$H_{\text{вх}}$ и $H_{\text{вых}}$ – высоты входа БЦ в зону поражения ЗРК и выхода ее из зоны при стрельбе очередью ЗУР, при которых обеспечивается обстрел цели;

$\theta_{\text{мин}}$ и $\theta_{\text{макс}}$ – минимальный и максимальный углы падения БЦ;

$q_{\text{макс}}$ – максимальный курсовой угол обстреливаемой БЦ.

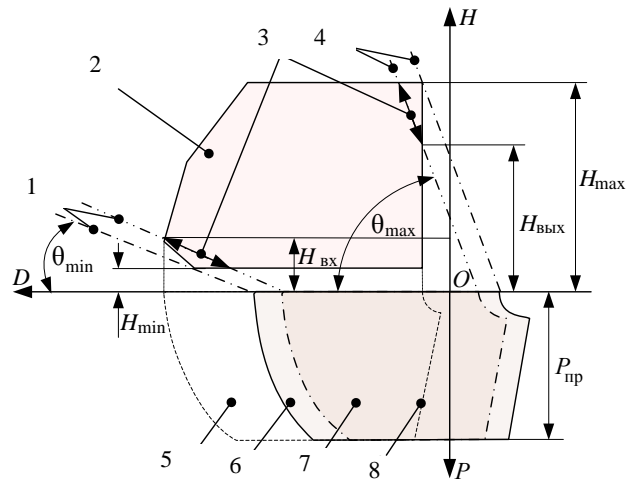


Рис. 3. Влияние параметров зоны поражения и диапазона углов падения БР на положение границ зоны обороны ЗРК: 1 – настильная траектория полета БР; 2 – вертикальное сечение зоны поражения ЗРК при стрельбе по БЦ; 3 – минимальное расстояние, проходимое БЦ через зону поражения ЗРК при стрельбе очередью ЗУР; 4 – навесная траектория полета БР; 5 – тыльная граница зоны обороны ЗРК при полете БЦ с углом падения на конечном участке траектории полета ракеты 72° и стрельбе по БЦ одиночной ЗУР или залпом; 6 – тыльная граница зоны обороны ЗРК при стрельбе по БЦ очередью ЗУР; 7 – тыльная граница зоны обороны ЗРК при полете БЦ с углом падения на конечном участке траектории полета ракеты 90° ; 8 – зона обороны ЗРК при стрельбе по БЦ

Минимальную высоту входа БЦ в зону поражения ЗРК и максимальную высоту ее выхода из зоны определяют при помощи выражений [8]

$$H_{\text{вх}} = H_{\text{мин}} + \Delta L \sin(\theta_{\text{мин}}),$$

$$H_{\text{вых}} = H_{\text{макс}} - \Delta L \sin(\theta_{\text{макс}}),$$

где $H_{\text{мин}}$ и $H_{\text{макс}}$ – минимальная и максимальная высоты зоны поражения ЗРК при стрельбе ЗРК по БЦ;

ΔL – расстояние, учитывающее изменение размеров зоны поражения ЗРК при стрельбе очередью ЗУР и определяемое по формуле

$$\Delta L = \frac{(n_0 - 1) \Delta \tau_{\text{п}} V_{\text{БЦ ср}} V_{\text{ЗУР ср}}}{V_{\text{БЦ ср}} + V_{\text{ЗУР ср}}}.$$

Здесь n_0 – количество ЗУР в очереди при стрельбе по БЦ;

$\Delta \tau_{\text{п}}$ – временной интервал между пусками ЗУР при стрельбе ЗРК очередью;

$V_{\text{БЦ ср}}$ и $V_{\text{ЗУР ср}}$ – средние скорости полета БЦ на конечном участке ее траектории и ЗУР.

На рис. 4 представлены расчеты площади зоны обороны ($S_{\text{ЗО ЗРК}}$) ЗРК С-300В и модификаций ОТБР АТАКМС (при полете по баллистической траектории – ОТБР АТАКМС-1А и по аэробаллистической – АТАКМС-1А «Юнитари») в зависимости от местоположения СПУ ОТ и ТБР противника от объекта поражения (размеров ракетаопасного сектора).

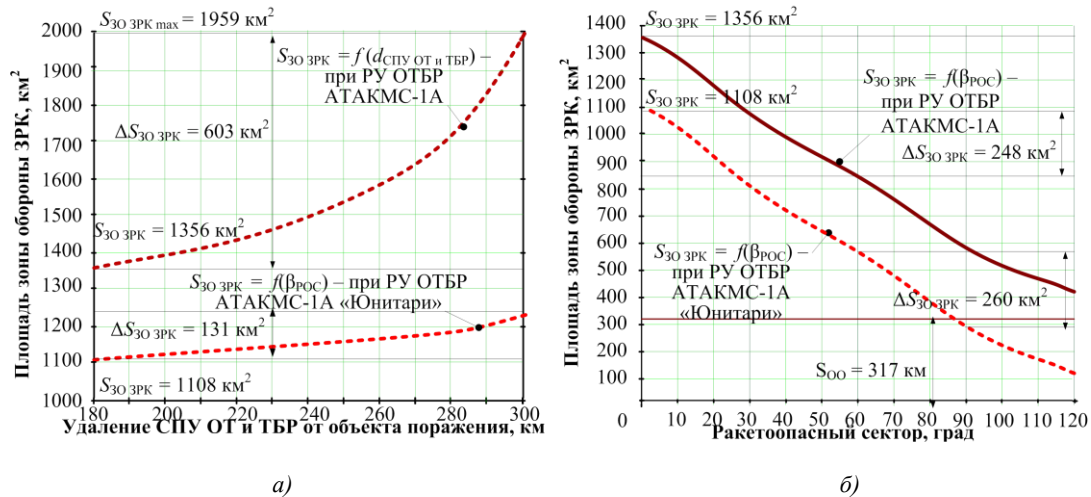


Рис. 4. Графики зависимости: а) прикрываемой площади ЗРК от удаления СПУ ОТБР (ТБР) от объекта поражения и углов падения; б) прикрываемых площадей ЗРК С-300В от величины ракетаопасного сектора

Результаты расчетов показывают, что при пуске ОТБР (ТБР) с углами падения на конечном участке траектории полета ракеты, близкими к 90° , площадь зоны обороны, а следовательно, и прикрываемая ЗРК территория уменьшаются приблизительно в два раза по сравнению с площадью зоны обороны при полете цели по баллистической траектории с предельным углом падения в 72° (по максимально крутой баллистической траектории полета БР). Увеличение размеров ракетаопасного сектора на 30° уменьшает прикрываемую площадь ЗРК в среднем на 30% , а при большом его размере может и не прикрывать всю территорию объекта обороны (к примеру, при 90° применительно к объекту радиусом в 10 км, площадь которого составляет 317 км^2).

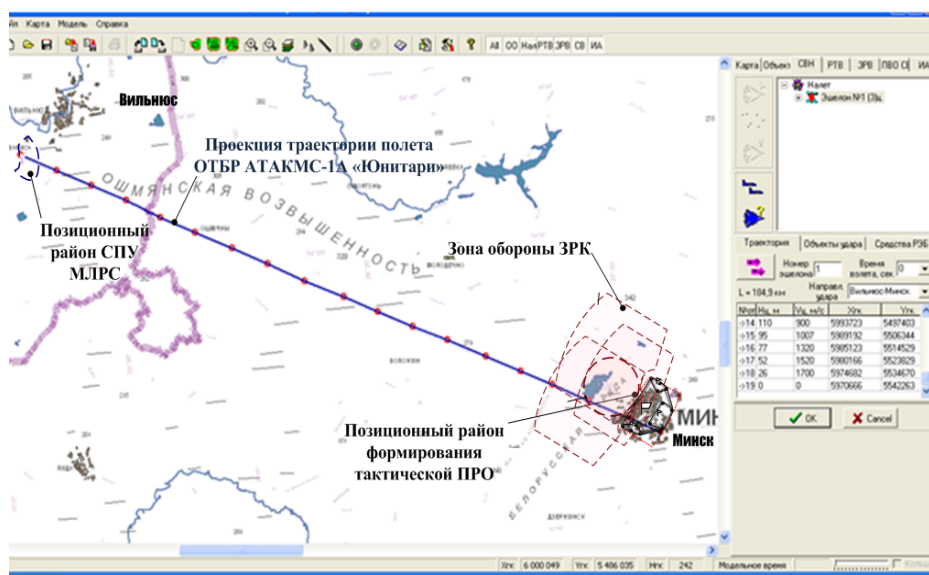


Рис. 5. Вариант отображения проекции траектории полета ОТБР АТАКМС-1А с характеристиками контрольных точек

Имитация ракетного удара с учетом маневрирования ОТБР (ТБР) противника может быть реализована в существующих СМБД в модели полета СВН, адаптированной для решения задач тактической ПРО. Вариант такого моделирования на примере ЗРК С-300В и ОТБР АТАКМС-1А «Юнитари» представлен на основе СМБД «Свислочь», принятой на вооружение в военно-воздушных силах и войсках противовоздушной обороны. Заранее полученные по предложенному математическому аппарату значения пространственно-временных параметров траектории полета БЦ введены в таблицу контрольных точек (рис. 5).

Результаты моделирования БД формированием тактической ПРО для указанного варианта при ракетном ударе противника 18 ОТБР по крупному административно-промышленному центру представлены на рис. 6.

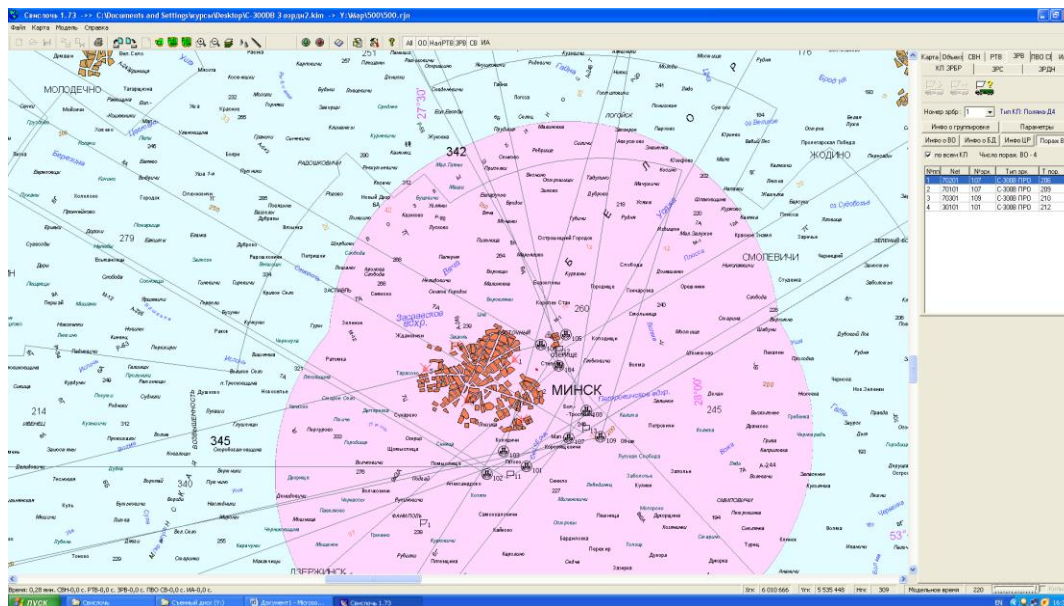


Рис. 6. Отображение результатов варианта ведения боевых действий формированием тактической ПРО

Заключение. Моделирование БД формирования тактической ПРО на основе СМБД «Свислочь» подтверждает существенное влияние маневра БЦ на реализацию боевых возможностей ЗРК и в конечном итоге – на эффективность ведения БД формированием тактической ПРО. Моделирование ракетного удара противника с учетом маневра ОТБР (ТБР) в существующих СМБД позволит повысить обоснованность принимаемых решений по организации тактической ПРО объектов (войск), в первую очередь при выборе варианта боевого порядка формирования тактической ПРО, от построения которого в значительной степени зависит результат выполнения поставленной боевой задачи [6].

Внедрение предложенных подходов в СМБД при моделировании удара ОТБР (ТБР) с учетом маневра повышает адекватность модели СВН, оперативность введения исходных данных моделирования БД группировки противовоздушной обороны и обработки полученных результатов для выработки рекомендаций.

Список использованных источников

1. Воронин, О. В. О возможных ударах баллистическими ракетами по крупным объектам / О. В. Воронин, И. Г. Денисенко // Наука и военная безопасность. – 2014. – № 2. – С. 57–60.
2. Булойчик, В. М. Военно-прикладные вопросы математического моделирования. Основы теории математического моделирования боя и боевых действий / В. М. Булойчик. – Минск: ВА РБ, 2005. – 250 с.
3. Дмитриевский, А. А. Внешняя баллистика : учеб. для вузов / А. А. Дмитриевский, Л.Н. Лысенко. – М.: Машиностроение, 2005. – 608 с.
4. Павлюк, Ю. С. Баллистическое проектирование ракет : учеб. пособие для вузов / Ю. С. Павлюк. – Челябинск: ЧГТУ, 1996. – 92 с.

5. Лысенко, Л. Н. Наведение и навигация баллистических ракет : учеб. пособие / Л. Н. Лысенко. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. – 672 с.
6. Воронин, О. В. Выбор рационального варианта построения боевого порядка формирования тактической противоракетной обороны методом итераций / О. В. Воронин // Сб. науч. статей Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2017. – № 32. – С. 30–38.
7. Атмосфера стандартная. Параметры: ГОСТ 4401–81. – Введ. 01.07.82. – М.: Изд-во стандартов, 2004. – 180 с.
8. Воронин, О. В. Определение местоположения зенитных ракетных подразделений при организации тактической противоракетной обороны крупного административно-промышленного центра / О. В. Воронин // Вестник Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2011. – № 4(26). – С. 32–42.

Информация об авторах

Филипченко Игорь Викторович – кандидат технических наук, главный инженер, Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси (ул. Сурганова, 6, Минск, Республика Беларусь). E-mail: filipchenko@newman.bas-net.by

Лапицкий Иван Леонидович – старший преподаватель кафедры тактики и вооружения зенитных ракетных войск, Военная академия Республики Беларусь (пр. Независимости, 220, Минск, Республика Беларусь). E-mail: Ivan_La-pi@mail.ru

Воронин Олег Викторович – научный сотрудник научно-исследовательской части, Военная академия Республики Беларусь (пр. Независимости, 220, Минск, Республика Беларусь). E-mail: Aleh31@mail.ru

Information about the authors

Igor V. Filipchenko – Ph. D. (Engineering), Chief Engineer, The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus (6, Sursganova Str., Minsk, Republic of Belarus). E-mail: filipchenko@newman.bas-net.by

Ivan L. Lapitsky – Senior Lecturer of the Department of Tactics and Weapons Anti-Aircraft Missile Troops, Military Academy of the Republic of Belarus (220, Independence Av., Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Ivan_Lapi@mail.ru

Oleg V. Voronin – Researcher of the Scientific-Research Part, Military Academy of the Republic of Belarus (220, Independence Av., Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Aleh31@mail.ru