

# Программный комплекс для математического моделирования летного происшествия на реконфигурируемой вычислительной системе

А.П. Коновальчик, А.А. Башкатов, Д.Н. Никольский

АО «Концерн ВКО «Алмаз-Антей»

Представлен параллельный комплекс программ для моделирования поражения цели зенитной управляемой ракетой 9М38 (9М38М1). Результаты моделирования позволяют обеспечить отстаивание интересов ОА «Концерн ВКО «Алмаз-Антей» в части расследования причин авиакатастрофы малазийского Boeing 777, произошедшей в июле 2014 г. на Украине.

*Ключевые слова:* параллельные вычисления, моделирование поражения цели зенитной управляемой ракетой, суперкомпьютерные технологии.

## 1. Введение

Авиационная катастрофа самолета Boeing 777 авиакомпании Malaysia Airlines, выполнявшего плановый рейс из Амстердама в Куала-Лумпур, произошла 17 июля 2014 года в районе вооруженного противостояния на востоке Украины. С 23 июля 2014 года расследование было передано Совету безопасности Нидерландов. Содействие расследованию осуществляли эксперты из Австралии, Франции, Германии, Индонезии, Италии, Малайзии, России (Росавиация), Межгосударственного авиационного комитета, Украины (Национальное бюро по расследованию авиационных происшествий), Великобритании, США и Европейского агентства.

Генеральным директором Концерна были поставлены следующие задачи:

1. создать точные компьютерные модели полета и взрыва боевой части зенитной управляемой ракеты (БЧ ЗУР), поверхности самолета, поражения поверхности самолета осколками БЧ для анализа всех деталей летного происшествия рейса МН-17;
2. с использованием суперкомпьютерных ресурсов обеспечить детальное и точное моделирование натуральных экспериментов, планируемых Концерном, и по их результатам выполнить калибровку модели;
3. на откалиброванной модели провести расчеты всех возможных точек старта ЗУР.

В ходе решения поставленных задач были выделены следующие вычислительно трудоемкие задачи:

1. «Поиск статики по динамике» — поиск такого статического положения БЧ ЗУР («статика»), повреждения на поверхности цели от которого наиболее всего совпадают с повреждениями на поверхности цели в динамике («динамика»), когда ЗУР и цель движутся;
2. «Поиск точек старта ЗУР» — расчет всевозможных точек старта ЗУР с целью поиска наиболее вероятной области старта ЗУР по известным углам азимута и места.

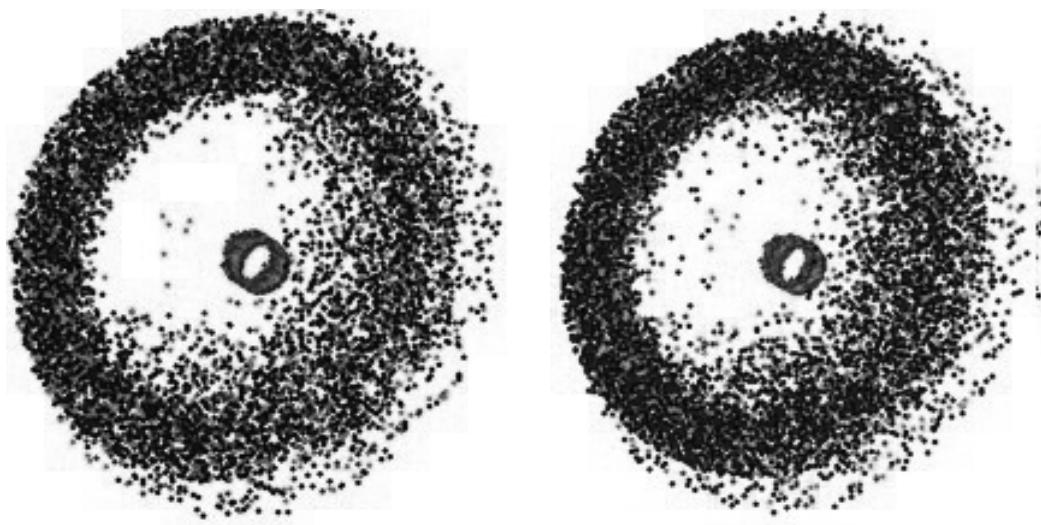
## 2. Поиск статики по динамике

### 2.1. Используемые компьютерные модели

Для решения задачи «Поиск статики по динамике» были использованы следующие компьютерные модели:

1. разлета осколков БЧ ЗУР 9М38М1 и 9М38;
2. поверхности самолетов Boeing 777 и ИЛ-86;
3. поражения поверхности цели осколками.

Рассмотрим указанные модели.



**Рис. 1.** Модели разлета осколков БЧ ЗУР 9М38 (слева) и БЧ ЗУР9М38М1 (справа).

Модель разлета осколков позволяет вычислить скорость движения и координаты каждого из осколков в любой момент времени. Каждый из осколков моделируется материальной точкой. Его движение описывается кинематическим уравнением прямолинейного равномерного движения:

$$x_i = x_{0i} + v_{xi}t, \quad y_i = y_{0i} + v_{yi}t, \quad z_i = z_{0i} + v_{zi}t, \quad i = \overline{0, N-1}. \quad (1)$$

Здесь  $(x_i, y_i, z_i)$  — координаты осколков в момент времени  $t$ ,  $(x_{0i}, y_{0i}, z_{0i})$  — координаты осколков в начальный момент времени  $t = 0$ ,  $(v_{xi}, v_{yi}, v_{zi})$  — компоненты скоростей движения осколков.

Компоненты скорости каждого из осколков определяются годографом, полученным от предприятия-изготовителя. Начальные положения осколков соответствуют координатам на поверхности БЧ, характеристики которой, также были предоставлены предприятием изготовителем. Осколочное поле представлено на рис. 1.

Поверхности самолетов Boeing 777 200 ER и ИЛ-86 представлены в виде элементарных треугольных площадок на рис. 2. Каждая площадка определяется декартовыми координатами ее вершин, последовательность хранения которых определяет нормаль к внешней поверхности по правилу правого буравчика. Модель поражения поверхности цели осколками базируется на алгоритме «Fast minimum storage ray/triangle intersection», моделирующем пересечения луча и треугольника [1]. Используя этот алгоритм для траектории движения каждого осколка БЧ и каждой треугольной площадки, составляющей поверхность цели, выполняется вычисление площадок, пораженных осколками.

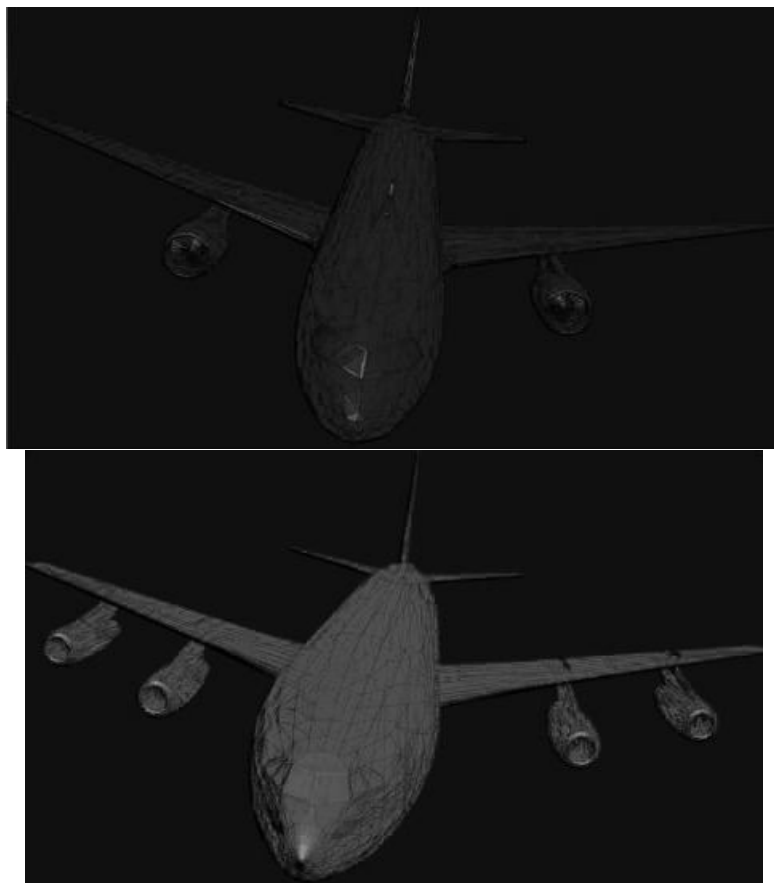


Рис. 2. Поверхности Boeing 777 200ER и ИЛ-86

## 2.2. Алгоритм

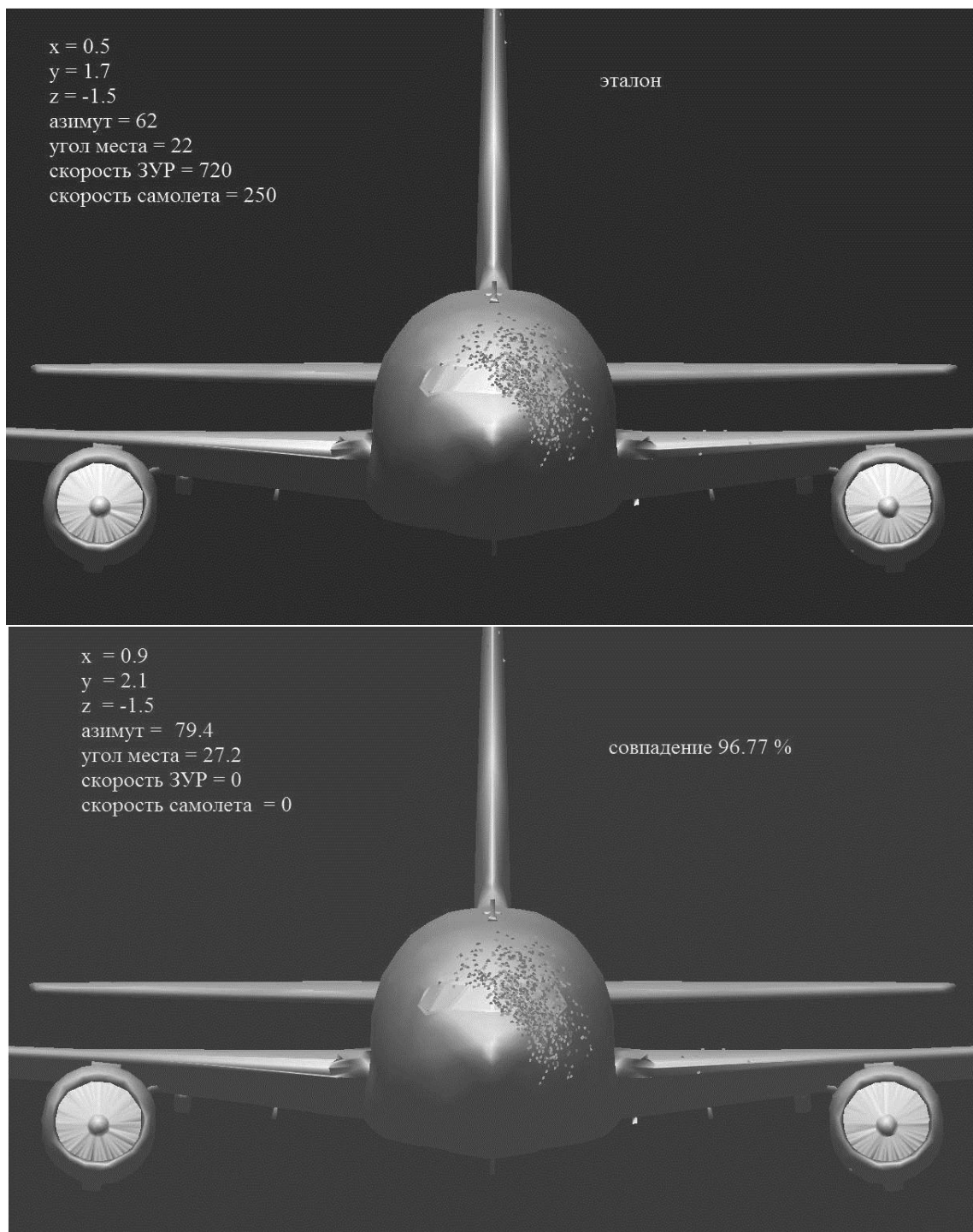
Алгоритм «Поиск статики по динамике» состоит в следующем. В некоторой области пространства выполняется подрыв БЧ ЗУР в «динамике», когда ЗУР и цель (самолет) движутся. Затем вычисляется траектория движения каждого из осколков, и находятся точки пересечения траекторий с поверхностью цели. Найденные точки пересечения сохраняются в массиве следующего формата: каждый элемент массива представляет собой число пробоин, приходящихся на площадку, номер которой соответствует индексу этого элемента. Массив, хранящий число пробоин в каждой из площадок цели для подрыва БЧ в «динамике» назовем «эталоном» и обозначим  $r = \{r_i | i = \overline{0, M-1}\}$ . Здесь  $r_i$  — элементы массива,  $M$  — число площадок, составляющих поверхность цели.

Далее, скорость цели и ЗУР обнуляются и выполняются подрывы БЧ ЗУР в различных точках пространства, с различными углами азимута и места. При каждом подрыве определяются точки пересечения траекторий осколков с поверхностью цели. Затем формируется массив, хранящий число пробоин в каждой из площадок. Такие массивы мы будем называть «аппроксимациями» и обозначать  $q = \{q_i | i = \overline{0, M-1}\}$ .

Для всех найденных «аппроксимаций» вычисляется ошибка  $E$ , количественно характеризующая различие между массивами «аппроксимации» и «эталоном». Ошибка  $E$  используется в качестве критерия отбора массива «аппроксимации», наиболее всего совпадающего с «эталоном».

В итоге, решение задачи «Поиск статики по динамике» сводится к численному решению задачи оптимизации:

$$E(\vec{p}_*) \rightarrow \min_{p \in P} E(\vec{p}) \quad (2)$$



**Рис. 3.** Поиск статического положения ЗУР для первого натурального эксперимента

где вектор  $\vec{p} \equiv (x, y, z, a, e)$  — декартовы координаты центра БЧ ЗУР,  $a$  и  $e$  азимут и угол места БЧ ЗУР,  $\vec{p}_* \equiv (x_*, y_*, z_*, a_*, e_*)$  — искомое решение, доставляющее минимум функционалу  $E(\vec{p})$ .

Численное решение задачи (2) было выполнено методом полного перебора. Для оценки достоверности результата была введена следующая величина:

$$\eta = \left| 1 - \frac{E(\vec{p}_*)}{M} \right| 100\%. \quad (3)$$

На рис. 4 представлена блок-схема алгоритма для параллельной управляющей про-

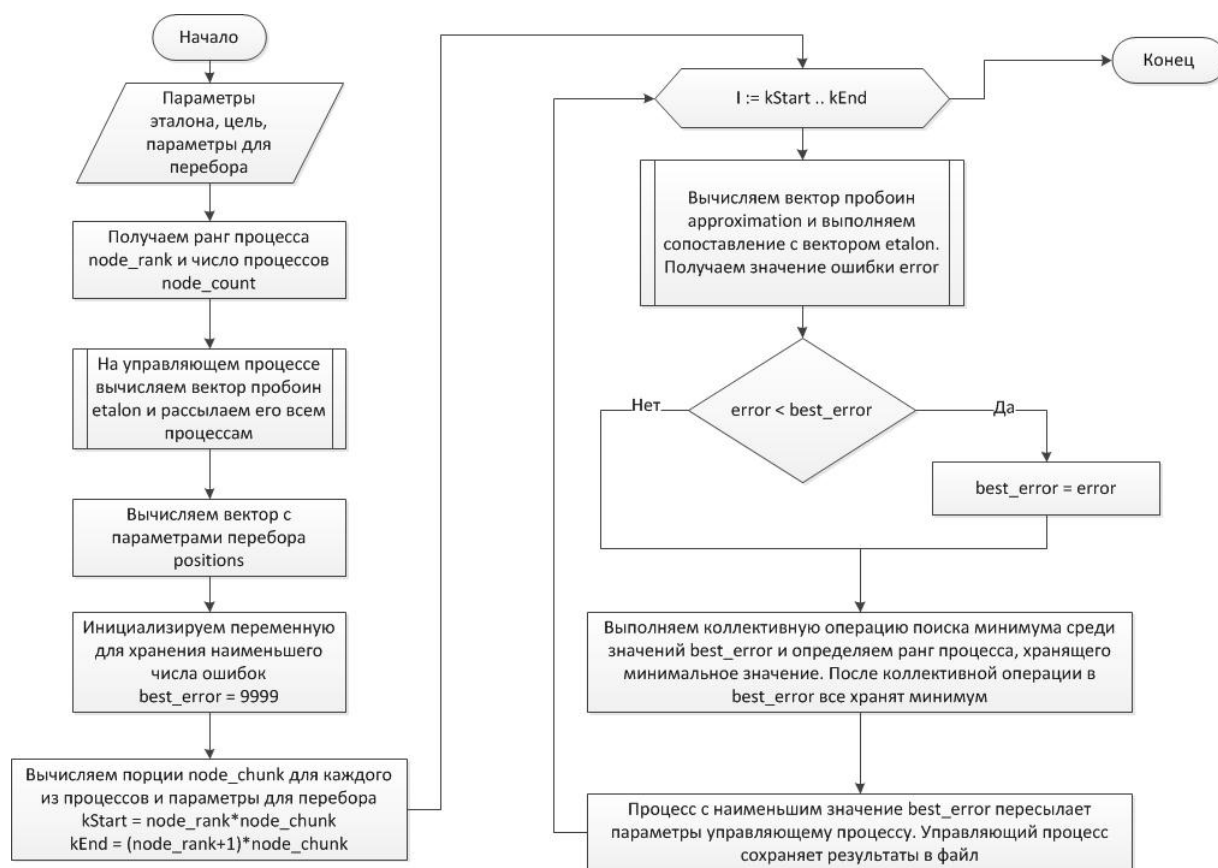


Рис. 4. Параллельный алгоритм «Поиск статики по динамике»

граммы, решающей задачу «Поиск статики по динамике». Реализация этого алгоритма выполнено с использованием стандарта MPI [2].

Однопоточный расчет пораженных площадок для одного взрыва БЧ на универсальном процессоре Intel Xeon E5620 2,4ГГц занимает приблизительно 2 секунды для случая, когда число площадок  $M$ , составляющих цель, и число осколков  $N$  БЧ ЗУР имеют порядок  $10^4$ . Значительно сократить время расчета удалось путем программирования алгоритма поиска числа пробоев, приходящихся на одну площадку, на ПЛИС. При этом, координаты площадок, составляющих поверхность цели, хранились в виде встроеного массива, а осколки подавались порциями размером в 32 осколка. Время расчета одного взрыва на ПЛИС Xilinx Virtex 6 сократилось до 0.1 с.

Для перебора всех вариантов расположения БЧ ЗУР потребовалось рассмотреть  $V_1 = \left(\frac{10m}{0.5m}\right)^3 \left(\frac{90^\circ}{1^\circ}\right)^2 = 64\,800\,000$  вариантов на «грубой» сетке и  $V_2 = \left(\frac{1.2m}{0.1m}\right)^3 \left(\frac{20^\circ}{0.1^\circ}\right)^2 = 69\,120\,000$  вариантов на «тонкой» сетке. Что соответствует  $V_1 + V_2 = 133\,920\,000$  вариантам, время расчета которых для различных платформ приведено в таблице 1.

Таблица 1. Время работы программного комплекса «Поиск статики по динамике».

Платформа	Intel Xeon E5620 2.4 ГГц 1 поток	Intel Xeon E5620 2.4 ГГц 256 потоков	Xilinx Virtex 6 256 ПЛИС
Время, дней	3 100	12,1	1

Анализируя таблицу 2 видим, что использование кластера универсальных процессоров позволило сократить время решения задачи в 256 раз, а использование кластера ПЛИС — в 3100 раз.

### 2.3. Обеспечение натуральных экспериментов

Разработанное программное обеспечение было использовано для обеспечения проведения натуральных экспериментов АО «Концерн ВКО «Алмаз-Антей» по моделированию процесса поражения цели БЧ ЗУР. Первый натуральный эксперимент проводился на цитах, моделирующих Boeing 777 200 ER. Необходимо было воспроизвести процесс подрыва положения БЧ 9Н314М ЗУР 9М38М1, которое в «динамике» характеризуется углом азимута равным  $62^\circ$  и углом места равным  $22^\circ$ . Такое положение БЧ ЗУР соответствует версии АО «Концерн ВКО «Алмаз-Антей» о событиях летной катастрофы. В ходе решения задачи (2) методом полного перебора, был использован наиболее очевидный функционал:

$$E = \sum_{i=0}^{M-1} |r_i - q_i|.$$

Используя, разработанный программный комплекс, было найдено такое положение БЧ ЗУР в «статике», которое дает повреждения на поверхности Boeing 777 200 ER наиболее всего совпадающие с повреждениями в «динамике». Так на рис. 3 представлены результаты компьютерного моделирования. Из рисунков видно, что расположение пораженных площадок в «статике» и «динамике» практически совпадает.

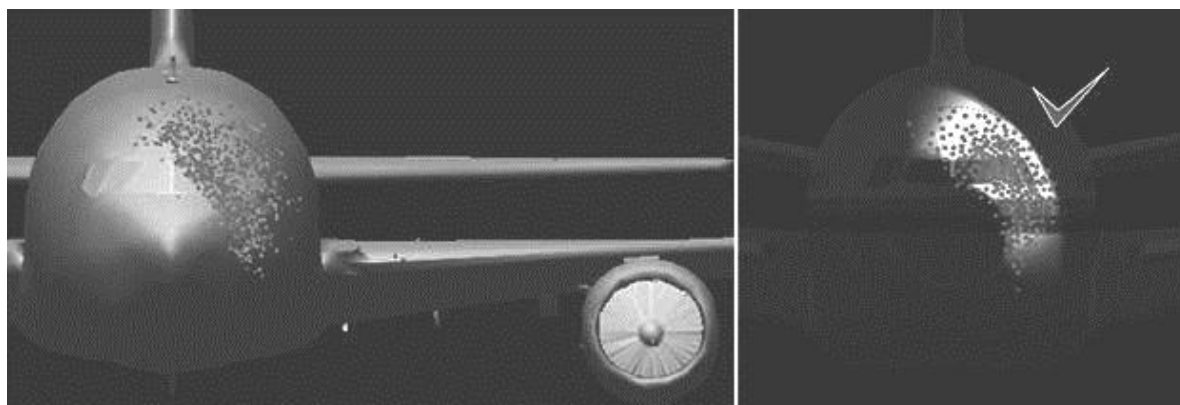


Рис. 5. Сопоставление результатов компьютерного и натурального экспериментов

Результаты суперкомпьютерного моделирования были сопоставлены с результатами натурального эксперимента. Так, на рис. 5 слева представлена картина распределения пробоев на поверхности компьютерной модели Boeing 777 200 ER, а справа картина распределения пробоев на цитах, восстановленная по результатам натурального эксперимента. Анализируя этот рисунок, видим, что результаты суперкомпьютерного моделирования и натурального эксперимента совпадают.

Во втором натурном эксперименте в качестве цели была использована кабина ИЛ-86 и углы ЗУР относительно цели в динамике — азимутальный угол  $17^\circ$  и угол места  $7^\circ$ . Такое положение БЧ ЗУР соответствует версии Международной комиссии. Для реализации алгоритма полного перебора был выбран следующий функционал:

$$E = \sum_{i=0}^{M-1} \varepsilon_i, \quad \varepsilon_i = \begin{cases} q_i, & r_i = 0 \text{ and } q_i \neq 0, \\ r_i, & q_i = 0 \text{ and } r_i \neq 0. \end{cases}$$

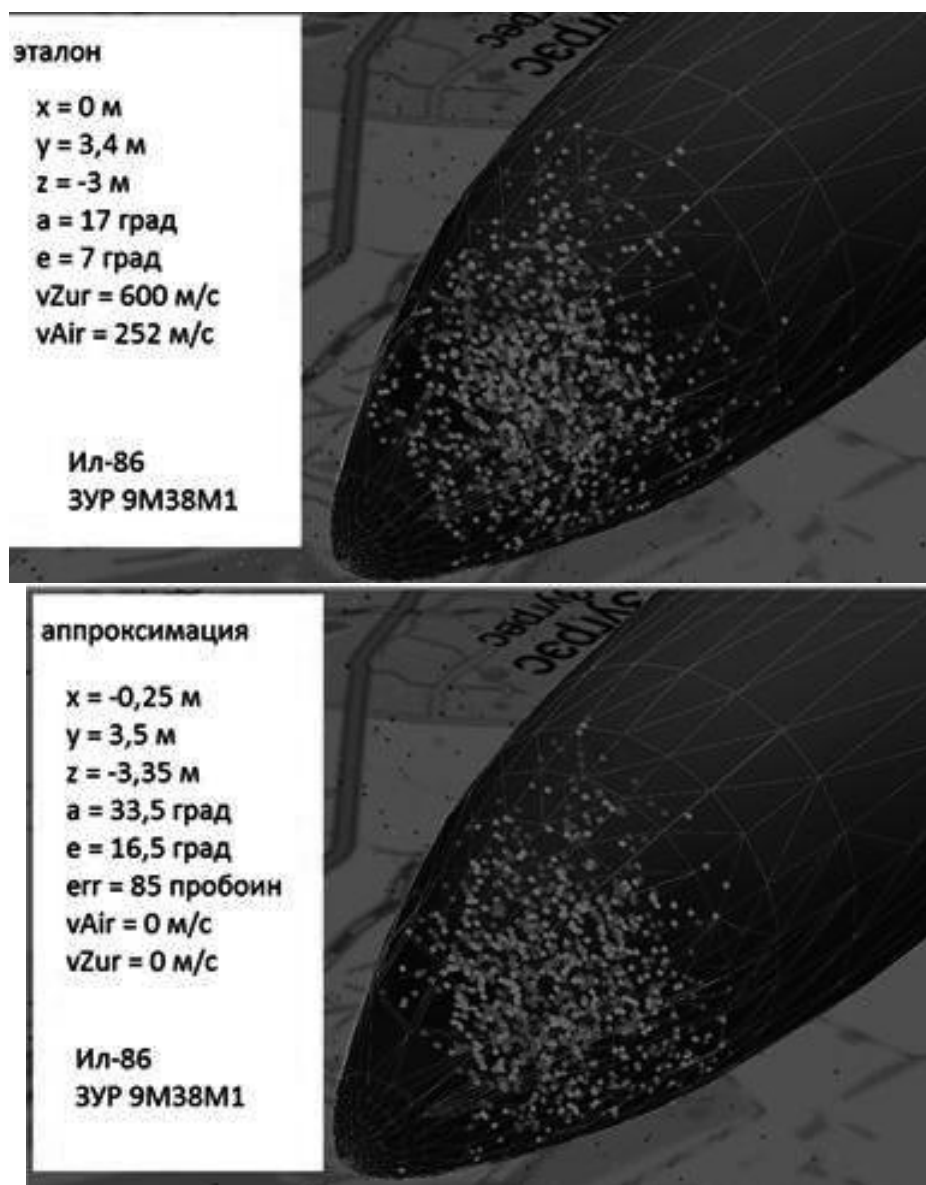


Рис. 6. Поиск статического положения ЗУР для второго натурального эксперимента



Рис. 7. Результаты второго натурального эксперимента

Картины распределения пробоин в «статике» и «динамике» представлены на рис. 9. Анализируя этот рисунок, замечаем, что визуально характер распределения пробоин совпадает. Достоверность  $\eta = 99.2\%$ . Следует отметить, о совпадении характера расположения

пробойн полученных при компьютерном эксперименте (рис. 9), с характером расположения пробойн в натурном эксперименте (рис. 7).

### 3. Поиск точек старта ЗУР

#### 3.1. Используемые компьютерные модели

Задача «Поиск точек старта ЗУР» состоит в расчете всевозможных точек старта ЗУР с целью поиска наиболее вероятной области старта ЗУР по известным углам азимута и места. Для решения задачи «Поиск точек старта ЗУР» был использован комплекс программ для моделирования полета ЗУР 9М38М1 и 9М38. Этот комплекс программ был предоставлен предприятием изготовителем АО «Долгопрудненское научно-производственное предприятие» и разработан в 80-х годах. Математические модели, лежащие в основе комплекса программ построены с учетом максимально возможных параметров, влияющих на условия встречи ЗУР с целью — подробные частные модели двигательной установки, автопилота, головки самонаведения и другие. Учитывались ЭПР и линейные размеры цели, ее скорость и другие параметры движения. Модель была откалибрована на огромном количестве натурных испытаний.

Комплекс программ для моделирования полета ЗУР 9М38М1 и 9М38 был предоставлен предприятием изготовителем в виде исходных кодов на языке Фортран. Этот комплекс программ представляет собой завершенную и хорошо протестированную работу. Предоставленный программный комплекс был использован в виде модели «черного ящика», предназначенной для однопоточного исполнения.

#### 3.2. Алгоритм

Алгоритм «Поиск точек старта» состоит в следующем. На возможную область старта ЗУР наносится прямоугольная сетка. Для каждого узла сетки выполняется запуск комплекса программ, моделирующего полет ЗУР. Характеристики ЗУР на последней точке траектории, в момент подрыва, сохраняются в специализированную БД.

На рис. 8 приведена блок-схема алгоритма для управляющей программы, решающей задачу «Поиск точек старта ЗУР». Реализация этого алгоритма выполнена на C++ с использованием библиотеки MPI [2]. Запуск программного комплекса моделирования полета ЗУР на Фортран в режиме «черного ящика» выполнялся в отдельном потоке, организованном с использованием методов [3]. Для возможности запуска программы визуализации области старта ЗУР на компьютере, не находящимся в одной сети с кластером, была использована встраиваемая реляционная база данных SQLite [4].

На рис. 8 представлена схема специализированной БД, предназначенной для хранения результатов моделирования полета ЗУР к цели. Углы азимута  $aZur$  и места  $eZur$  момента подрыва БЧ, хранимые в этой БД, позволяют определить координаты точки старта  $xStart$ ,  $yStart$  и  $zStart$ . Последнее возможно, так как в соответствии с комплексом программ от предприятия изготовителя, между углами подлета ЗУР и координатами точек старта имеет место взаимно-однозначное соответствие.

Перебор точек старта необходимо выполнять в квадрате со стороной 70 000 м. — определяется дальностью действия комплекса. Взяв за шаг сетки величину в 10 м. получим 49 000 000 вариантов точек старта ЗУР. Расчет единичного полета ЗУР приблизительно занимает около одной секунды. В таблице 2 приведено время решения задачи на различных платформах. Анализируя эту таблицу, видим, что в однопоточном режиме, 49 000 000 вариантов полета ЗУР из различных точек старта, удалось бы рассчитать приблизительно за 1.6 лет. Использование универсальных процессоров суперкомпьютера Орфей-К позволило сократить время расчета в 256 раз.



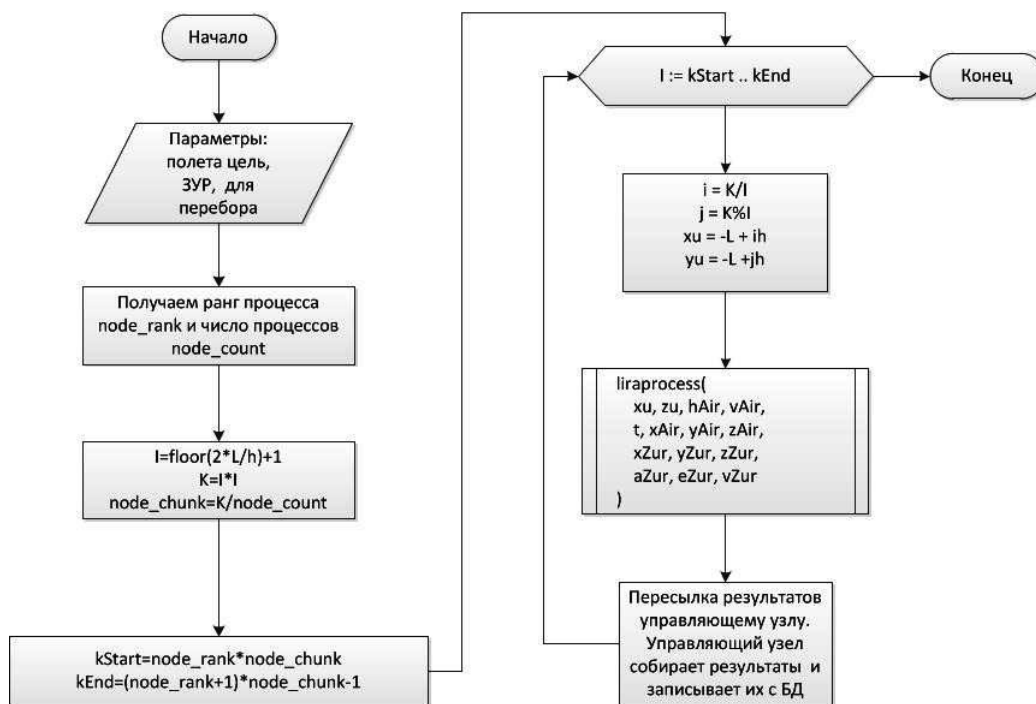


Рис. 8. Параллельный алгоритм «Поиск точек старта ЗУР»

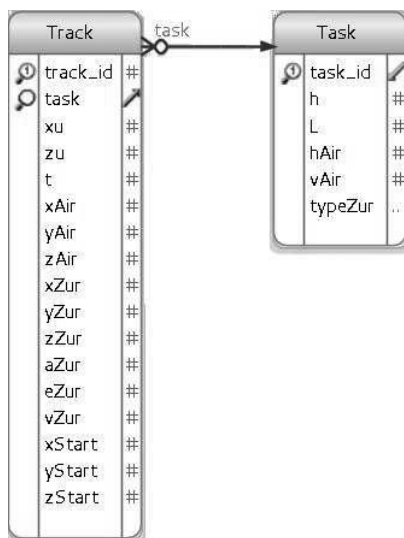


Рис. 9. Схема специализированной БД

### 3.3. Результаты моделирования

В ходе работы MPI приложения специализированная БД была заполнена, и использована для оперативного отображения областей старта ЗУР по заданным диапазонам углов полета ЗУР 9M38M1 и 9M38.

**Таблица 2.** Время работы программного комплекса «Поиск точек старта ЗУР».

Платформа	Intel Xeon E5620 2.4 ГГц 1 поток	Intel Xeon E5620 2.4 ГГц 256 потоков
Время, дней	587	2.3

## 4. Заключение

В итоге, использование разработанного программного обеспечения позволило объективно и на научной основе провести исследование причин авиакатастрофы малазийского Boeing 777 200 ER. Использование суперкомпьютерного моделирования позволило до минимума сократить число реальных подрывов БЧ и провести исследования в установленный срок. Все результаты натурных экспериментов были получены в результате единичных подрывов БЧ с параметрами, которые были вычислены в ходе суперкомпьютерных экспериментов.

## Литература

1. Moller T., Trumbore B. Fast minimum storage ray/triangle intersection// Journal of graphics tools, 1997 2(1). P.21-28.
2. Корнеев В.Д. Параллельное программирование в MPI. Новосибирск: Изд-во ИВМиМГ СО РАН, 2002. 215 с.
3. Lewine D. Posix Programmer's Guide. Writing Portable UNIX Programs with the POSIX.1 Standard. O'Reilly Media, 1991. 574 p.
4. C-language Interface Specification for SQLite// URL: <https://www.sqlite.org/capi3ref.html> (дата обращения: 10.11.2015)
5. Свидетельство №2015660533 Российская Федерация. Программа для моделирования разлета осколков боевой части ракеты/ Коновальчик А. П., Башкатов А. А., Радченко Е. Г.; заявитель и правообладатель Открытое акционерное общество «Концерн ПВО «Алмаз-Антей» – №2015617680; заявл. 20.08.2015; зарегистр. 01.10.2015. – 1 с.
6. Свидетельство №2015663030 Российская Федерация. Математическая модель области разлета осколков при взрыве боевой части ЗУР/ Малышевский М. В., Коновальчик А. П., Башкатов А. А., Плаксенко О. А.; заявитель и правообладатель Акционерное общество «Концерн воздушно-космической обороны «Алмаз-Антей» – №2015618630; заявл. 21.09.2015; зарегистр. 09.12.2015. – 1 с.
7. Свидетельство №2015663027 Российская Федерация. Поиск положения ракеты для статического взрыва, производящего повреждение наиболее приближенные к взрыву в динамике/ Малышевский М. В., Коновальчик А. П., Башкатов А. А., Никольский Д. Н.; заявитель и правообладатель Акционерное общество «Концерн воздушно-космической обороны «Алмаз-Антей» – №2015617653; заявл. 20.08.2015; зарегистр. 09.12.2015. – 1 с.
8. Свидетельство №2015663029 Российская Федерация. Программа моделирования траекторий полета зенитной управляемой ракеты/ Малышевский М. В., Коновальчик А. П., Башкатов А. А., Старухин В. Н.; заявитель и правообладатель Акционерное общество «Концерн воздушно-космической обороны «Алмаз-Антей» – №2015617839; заявл. 26.08.2015; зарегистр. 09.12.2015. – 1 с.

## Software package for mathematical modeling of flight accident on reconfigurable computing system

A.P. Konovalchik, A.A. Bashkatov, D.N. Nikolskii

«Almaz-Antey» Air and Space Defence Corporation», Joint Stock Company

Presented Parallel software package for modeling of defeats the purpose of surface-to-air missile 9M38 (9M38M1). The simulation results allow for advocacy «Almaz-Antey» Air and Space Defence Corporation» in terms of the investigation Malaysian causes of the crash the Boeing 777, which occurred in July 2014 in Ukraine.

*Keywords:* parallel computing, simulation of defeats the purpose of surface-to-air missile.

### References

1. Moller T., Trumbore B. Fast minimum storage ray/triangle intersection// Journal of graphics tools, 1997 2(1). P.21-28.
2. Korneev V.D. Parallel programming in MPI. Novosibirsk: Inst. of Comp. Math. And Math. Geop. Publ., 2002. 215 p.
3. Lewine D. Posix Programmer's Guide. Writing Portable UNIX Programs with the POSIX.1 Standard. O'Reilly Media, 1991. 574 p.
4. C-language Interface Specification for SQLite// URL: <https://www.sqlite.org/capi3ref.html> (accessed: 10.11.2015)
5. Certificate №2015660533 Russian Federation. The program for modeling separation of fragments of a missile/ Konovalchik A.P., Bashkatov A.A., Radchenko E.D.; the applicant and the right holder Open Joint Stock Company «Almaz-Antey» Air and Space Defence Corporation» - №2015617680; appl. 08/20/2015; Registered. 01/10/2015. - 1 p.
6. Certificate №2015663030 Russian Federation. Mathematical model of the area of separation of fragments in the explosion of the warhead surface-to-air missile/ Malyshevsky M.V., Konovalchik A.P., Bashkatov A.A., Plaksenko O.A.; the applicant and the right holder Joint Stock Company «Almaz-Antey» Air and Space Defence Corporation» - №2015618630; appl. 09/21/2015; Registered. 09/12/2015. - 1 p.
7. Certificate №2015663027 Russian Federation. Search for a static position of the missile explosion, producing damage to the closest to the explosion in the dynamics/ Malyshevsky M.V., Konovalchik A.P., Bashkatov A.A., Nikolskii D.N.; the applicant and the right holder Joint Stock Company «Almaz-Antey» Air and Space Defence Corporation» - №2015617653; appl. 08/20/2015; Registered. 09/12/2015. - 1 p.
8. Certificate №2015663029 Russian Federation. The simulator flight paths surface-to-air missile/ Malyshevsky M.V., Konovalchik A.P., Bashkatov A.A., Starukhin V.N.; the applicant and the right holder Joint Stock Company «Almaz-Antey» Air and Space Defence Corporation» - №2015617839; appl. 08/26/2015; Registered. 09/12/2015. - 1 p.