

## ПРИМЕНЕНИЕ СРЕДСТВ СРЕДЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ANYLOGIC ДЛЯ РАСЧЕТА И ФОРМИРОВАНИЯ ЗОН ПОКРЫТИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ РАЗВЕДЫВАТЕЛЬНЫМ КОСМИЧЕСКИМ АППАРАТОМ

А.П. Богомолов, Д.А. Синяткин, М.Д. Гулиев (Воронеж)

### Введение

Анализ основных руководящих документов вооруженных сил ведущих зарубежных стран показывает завершившийся перенос основных усилий вооруженной борьбы в воздушно-космическую и информационную сферы. Данное обстоятельство, наряду с быстродействием современных систем обработки и передачи информации, устанавливаемых на космических аппаратах (КА), определило возрастание роли космической разведки (совокупность мероприятий, осуществляемых по единому замыслу и плану, по добыванию разведывательных данных с использованием космических средств [1]) при подготовке и в ходе проведения военных действий. В этих условиях, разработка имитационной модели для определения возможностей группировки разведывательных космических аппаратов по вскрытию объектов на земной поверхности в реальном масштабе времени является актуальной и имеет большую практическую значимость.

Однако разработка данной имитационной модели требует преодоления ряда трудоемких и сложных задач, требующих детальной проработки механизмов функционирования и алгоритмов работы всех ключевых узлов и систем. В связи с этим целесообразно применить для их решения метод динамического программирования, декомпозируя сложную задачу в последовательность более простых подзадач, применяя при этом агентный подход к моделированию организационно-технических систем.

Одной из основных таких подзадач является разработка математической модели расчета и формирования зон покрытия земной поверхности разведывательным космическим аппаратом [2], с учетом положения космического аппарата на орбите, ориентации диаграммы направленности и мощности антенной системы. А также с дальнейшей визуализацией полученных результатов для различных типов карт местности и систем координат с использованием средств среды имитационного моделирования AnyLogic.

Реализация рассматриваемой частной задачи в виде отдельной модели также обусловлено широким спектром возможных сфер применения, как для различных задач военного, так и гражданского назначения.

Ниже приводятся описание разработанной математической (логико-алгебраической) модели расчета и формирования зон покрытия земной поверхности на примере алгоритма функционирования одного агента – разведывательного космического аппарата с приведением частей листинга и результатов моделирования.

### Описание разработанной математической модели

Интерфейс разработанной модели представлен на рисунке 1. Включает в себя два основных поля: настроек (блоки 1 - 3) и результата (блоки 4 - 6). Блоки поля настроек выполнены с использованием таких элементов как *editbox* (текстовое поле) – для ручного ввода данных, *slider* (бегунок) – для ввода данных с помощью «бегунка» (имеет пределы изменения), а также *combobox* (выпадающий список) – для выбора необходимого параметра из списка. В качестве подложки в поле результата в данном случае используется растровое изображение карты мира. Также есть возможность

использования других карт, в том числе определенного государства (материка), с жесткой привязкой к координатам. Наряду с обычными растровыми изображениями карт в разработанной модели реализована возможность работы с географической информационной системой (ГИС), применяя при этом встроенные возможности среды имитационного моделирования AnyLogic. Основной причиной использования ГИС в модели является удобство и простота в работе с масштабом карты, координатами исследуемых объектов и точек зон покрытия (отпадает необходимость пересчета в различные системы координат, что положительно влияет на быстрдействие работы модели).

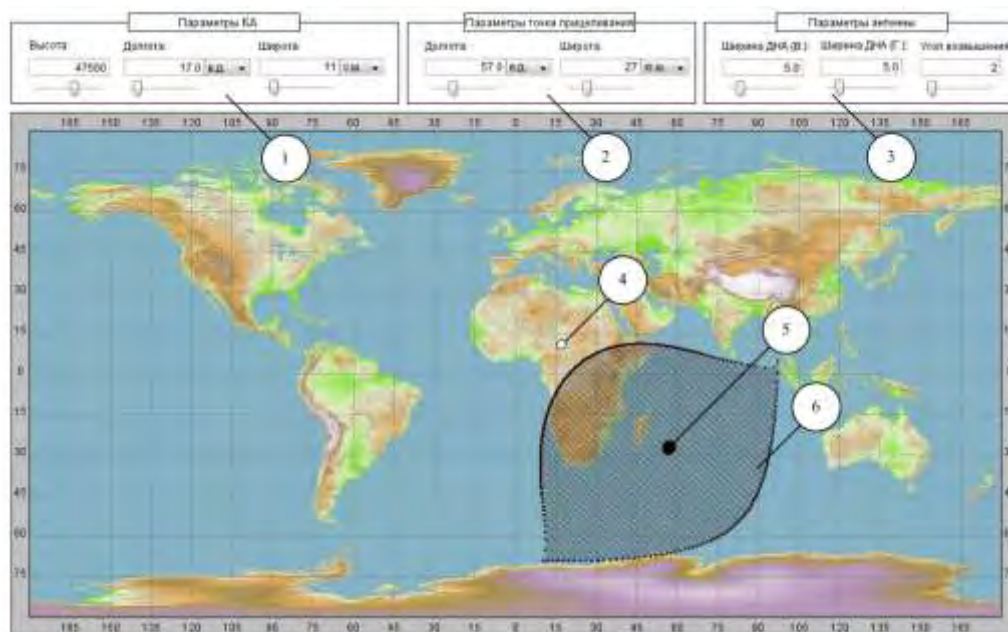


Рис. 1 – Интерфейс разработанной математической модели

1 – блок параметров КА; 2 – блок параметров точки прицеливания; 3 – блок параметров антенны; 4 – разведывательный КА; 5 – точка прицеливания; 6 – зона покрытия земной поверхности

Основным исследуемым объектом в модели является разведывательный космический аппарат. Описывается тремя основными параметрами (изменяются в блоке параметров КА): географическая долгота (западная (з.д.) или восточная (в.д.), изменяется в пределах от 0 до 180 градусов), географическая широта (северная (с.ш.) или южная (ю.ш.), изменяется в пределах от 0 до 90 градусов) и высота. Антенная система разведывательного космического аппарата настраивается в блоке параметров антенны, который включает в себя регулировку ширины диаграммы направленности в азимутальной и угломестной плоскостях, а также угла возвышения, корректирующий угол наклона антенны в угломестной плоскости.

Направление и ориентация антенны спутника зависят от параметров точки прицеливания – точки, образованной пересечением главного луча диаграммы направленности антенной системы КА с земной поверхностью. Характеризуется географической долготой и географической широтой (изменяются в блоке параметров точки прицеливания).

Зона покрытия земной поверхности - это часть поверхности земного шара, охватываемая апертурой диаграммы направленности антенны ИСЗ. Форма и размеры зоны зависят от таких параметров как позиция спутника на орбите (необязательно геостационарной), параметров точки прицеливания, диаграммы направленности и мощности антенной системы.

Алгоритм расчета зоны покрытия земной поверхности разведывательным спутником Земли представлен на рисунке 2. Он состоит из двух основных блоков.

Блок № 1 – ввод исходных данных. Основная функция блока – ввод начальных значений и последующая их проверка на возможность формирования зоны покрытия (выход точки прицеливания за горизонт видимости спутника). Проверка реализована с помощью условного оператора *if*. Если при введенных исходных данных зона формируется без ошибок, то алгоритм расчета переходит к блоку № 2, иначе алгоритм выводит сообщение: «Ошибка в исходных данных» и требует повторный ввод (коррекцию) входных параметров. Основными исходными данными модели являются:

- Rz – радиус Земли, км;
- Hk – высота КА, км;
- uh – географическая долгота КА, град;
- Tet\_h – географическая широта КА, град;
- uc – географическая долгота точки прицеливания, град;
- Tet\_c – географическая широта точки прицеливания, град;
- F0 – ширина ДНА в азимутальной плоскости, град;
- F1 – ширина ДНА в угломестной плоскости, град;
- Bg – минимальный угол возвышения КА над горизонтом, град;
- N – количество точек, формирующих зону покрытия.

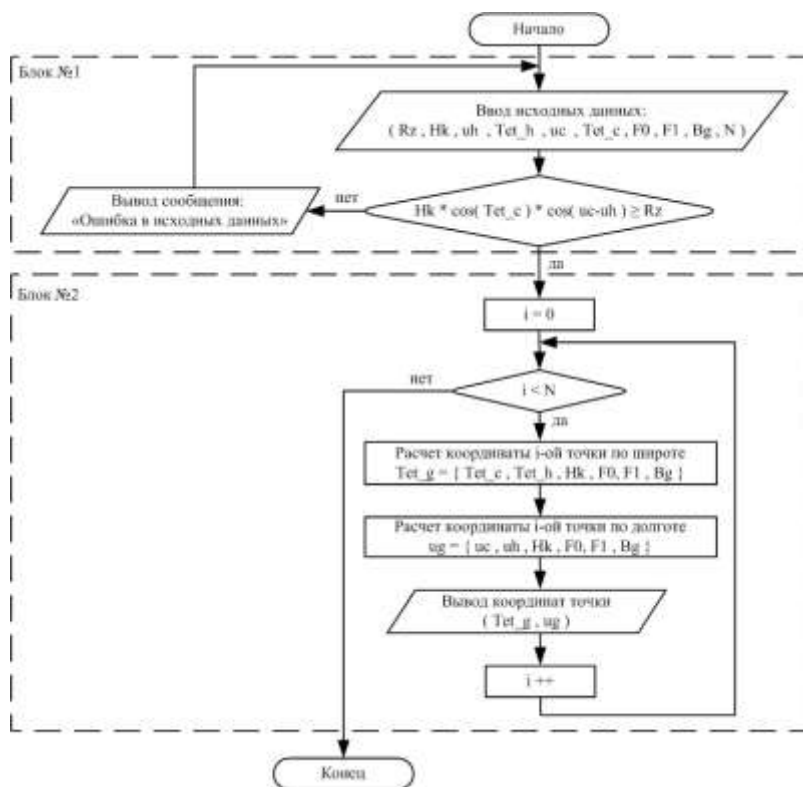


Рис.2 – Алгоритм расчета зоны покрытия земной поверхности

Блок № 2 – расчет зоны покрытия земной поверхности. Блок реализован с использованием цикла *for* (многократное исполнение набора инструкций), на каждом шаге которого для каждой формирующей зону покрытия *i*-ой точки ( $i = 0, 1, \dots, N$ ) рассчитываются географические широта и долгота с дальнейшим отображением на карте. В процессе расчета точек формируется зона покрытия земной поверхности.

В целях сокращения общего объема статьи, обусловленного большим количеством расчетных соотношений, а также для простоты использования другими

исследователями в своих моделях, приводится листинг программного кода с подробными разъяснениями. Основные расчетные соотношения приведены в [3, 4, 5].

Разработанный алгоритм модели реализован программно в виде трех функций на объектно-ориентированном языке программирования Java. Разработанные функции и их содержание, а также «глобальные» переменные модели приведены на рисунке 3.



Рис. 3 – Основные функции и переменные модели

Ввод исходных данных осуществляется в блоках поля настроек. За их последующую проверку на возможность формирования зоны покрытия отвечает разработанная функция *init\_data* (листинг программного кода приведен на рисунке 4).

```
//Вспомогательные функции:
double to_rad = PI / 180; //Перевод из градусов в радианы
double to_gr = 180 / PI; //Перевод из радиан в градусы
//Исходные данные:
double Rz = 6370; //Радиус Земли, км
double Hk = H_k; //Радиус геостационарной орбиты, км
double Sd = -20; //Диаграмма направленности
double S = pow(10, Sd/20); //антенны (по уровню Sd ДБ)
double F0 = d_DA * to_rad; //Ширина ДНА в гор. плоскости, град
double F1 = s_DA * to_rad; //Ширина ДНА в верт. плоскости, град
double Sigma = 0 * to_rad; //Угол поворота антенны, град
double Bg = Bg_g * to_rad; //Мин. угол возвышения КА, град
double uc = 0; //Долгота точки прицеливания, град
double Tet_c = 0; //Широта точки прицеливания, град
double uh = 0; //Долгота КА, град
double Tet_h = 0; //Широта КА, град
//Проверяем входные данные на принадлежность к областям:
//Заданная точка прицеливания по долготе
uc = (comboBox.getValueIndex() == 0 ? u_c : -u_c) * to_rad;
//Заданная точка прицеливания по широте
Tet_c = (comboBox1.getValueIndex() == 0 ? -Tet_c : Tet_c) * to_rad;
//Заданная Долгота КА
uh = (comboBox2.getValueIndex() == 0 ? u_h : -u_h) * to_rad;
//Заданная Широта КА
Tet_h = (comboBox3.getValueIndex() == 0 ? -Tet_h : Tet_h) * to_rad;
//Проверка на наличие ошибок в исходных данных:
//Если есть ошибки:
if ((Hk * cos(Tet_c - Tet_h) * cos(uc - uh)) < Rz) {
    getEngine().stop(); //Завершение моделирования из-за ошибки
    System.out.println("Ошибка в исходных данных!");
    getEngine().run(); //Перезапуск моделирования
}
//Если ошибок нет:
else { calc_zones(); } //Вызов функции расчета зон
```

Рис.4 – Листинг функции *init\_data*

При ошибочном вводе параметров модель выдаст сообщение об ошибке и запустит процесс с самого начала. При успешном окончании начнется выполнение функции *calc\_zones* (листинг программного кода приведен на рисунке 5).

Разработанная функция *calc\_zones* является основной функцией расчета зоны покрытия земной поверхности. Входными данными являются исходные параметры с поля настроек. Выходными параметрами являются географические широта (*Tet\_g*) и долгота (*ug*) *i*-ой точки формирующей зону покрытия.

```
//Решение:
double X1 = Rz * cos(Tet_c - Tet_h) * sin(uc - uh + 0.01);
double X2 = Hk - Rz * cos(Tet_c - Tet_h) * cos(uc - uh);
double e0 = tan(F0) / tan(F1);
double Fi_d = atan(X1 / X2);
double Fi_n = atan(Rz * sin(Tet_c - Tet_h) * cos(Fi_d) / X2);
double p0 = asin(Rz / Hk * cos(Bg));
double p1 = Bg + p0;
double p2 = Hk - Rz * sin(p1);
double y1 = p2 * tan(Fi_d);
double z1 = p2 * tan(Fi_n) / tan(Fi_d);
double p3 = pow((Rz * cos(p1)), 2) - pow(y1, 2) - pow(z1, 2);
//Инициализация матрицы и массива:
double [][] A = new double [3][3];
A[0][0] = cos(Fi_n) * cos(Fi_d);
A[0][1] = sin(Fi_n) * cos(Fi_d) * sin(Sigma) + sin(Fi_d) * cos(Sigma);
A[0][2] = sin(Fi_n) * cos(Fi_d) * cos(Sigma) - sin(Fi_d) * sin(Sigma);
A[1][0] = -cos(Fi_n) * sin(Fi_d);
A[1][1] = sin(Fi_n) * sin(Fi_d) * sin(Sigma) + cos(Fi_d) * cos(Sigma);
A[1][2] = -sin(Fi_n) * sin(Fi_d) * cos(Sigma) - cos(Fi_d) * sin(Sigma);
A[2][0] = -sin(Fi_n);
A[2][1] = cos(Fi_n) * sin(Sigma);
A[2][2] = cos(Fi_n) * cos(Sigma);
double [] Ra = new double [3];
double [] Rka = new double [3];
//Нахождение решения уравнения:
double b_a = 1.02484; //Посчитанное значение при дн S
double d_y = 2 * PI / 360;
//Нахождение точек зоны:
for (int i = 0; i < zon.size(); i++) { //Прогоняем по точкам зоны 360 шт
    double y = (i - 1) * d_y;
    double Eps = atan(tan(b_a * F0) / sqrt(pow(e0 * sin(y), 2) + pow(cos(y), 2)));
    //Заполнение одномерного массива:
    Ra[0] = -1;
    Ra[1] = tan(Eps * cos(y));
    Ra[2] = tan(Eps * sin(y));
    Rka[0] = A[0][0] * Ra[0] + A[0][1] * Ra[1] + A[0][2] * Ra[2];
    Rka[1] = A[1][0] * Ra[0] + A[1][1] * Ra[1] + A[1][2] * Ra[2];
    Rka[2] = A[2][0] * Ra[0] + A[2][1] * Ra[1] + A[2][2] * Ra[2];
    double tu = atan(Rka[1] / (-Rka[0]));
    double b = atan(Rka[2] / (-Rka[0]));
    double a0 = tan(tu);
    double b0 = tan(b);
    double y2 = p2 * a0;
    double z2 = p2 * b0;
    double fi = atan((y2 - y1) / (z2 - z1));
    double p4 = -(y1 * sin(fi) + z1 * cos(fi));
    double p5 = p4 * (1 - sqrt(1 + p3 / pow(p4, 2)));
    double tg = atan((y1 + p5 * sin(fi)) / p2);
    double bg = atan((z1 + p5 * cos(fi)) / p2);
    double p00 = atan(sqrt(pow(a0, 2) + pow(b0, 2)));
    double tu0 = (p00 <= p0 ? tu : tg);
    //Для правильного отображения зоны
    double bt0 = 0;
    if (uc < uh)
        bt0 = (p00 <= p0 ? b : -bg);
    else bt0 = (p00 <= p0 ? b : bg);
    double p_kv = 1 + pow(tan(tu0), 2) + pow(tan(bt0), 2);
    double p = sqrt(p_kv);
    double d = Hk * ((1 - sqrt(1 - p_kv * (1 - pow(Rz, 2) / pow(Hk, 2)))) / p);
    //Расчет координаты i-ой точки по широте
    double Tet_z = asin((d * tan(bt0)) / (p * Rz));
    //Проверка на выход из зоны по вертикали (широте)
    double Ct = abs(Tet_z + Tet_h);
    double Tetg = 0;
    if (Ct <= PI/2) Tetg = Tet_z + Tet_h;
    else Tetg = -(Tet_z + Tet_h) * ((2 * PI - Ct) / Ct);
    //Перевод в градусы ВЫХОДНАЯ ТОЧКА ЗОНЫ ПО ШИРОТЕ
    double Tet_g = Tetg * to_gr;
    //Расчет координаты i-ой точки по долготе
    double uz = asin((d * tan(tu0)) / (p * Rz * cos(Tet_z)));
    //Проверка на выход из зоны по горизонтали (долготе)
    double C = abs(uz + uh);
    double ug = 0;
    if (C <= PI) ug = uz + uh;
    else ug = -(uz + uh) * ((2 * PI - C) / C);
    //Перевод в градусы ВЫХОДНАЯ ТОЧКА ЗОНЫ ПО ДОЛГОТЕ
    ug = ug * to_gr;
    //Вызов функции формирования зоны покрытия
    draw_zones(Tet_g, ug);
}
```

Рис.5 – Листинг функции *calc\_zones*

Разработанная функция *draw\_zones* (листинг программного кода приведен на рисунке 6), на вход которой поступают выходные данные функции *calc\_zones*, формирует на их основе зону покрытия земной поверхности с учетом различных типов карт местности и систем координат.

```
//Отображение зоны
zon.get(i).setX(karta_KA.getX() + karta_KA.getWidth() / 2 + ug / 360 * karta_KA.getWidth());
zon.get(i).setY(karta_KA.getY() + karta_KA.getHeight() / 2 + Tet_g / 180 * karta_KA.getHeight());
zon.get(i).setVisible(true);
```

Рис.6 – Листинг функции *draw\_zones*

Ниже (рисунок 7) приводятся результаты работы математической модели расчета и формирования зон покрытия земной поверхности разведывательным спутником Земли на примере четырех разведывательных космических аппаратов с различными параметрами орбит и антенными системами (исходные данные для моделирования, соответствующие рисунку 7 (а – г) сведены в таблицу 1).

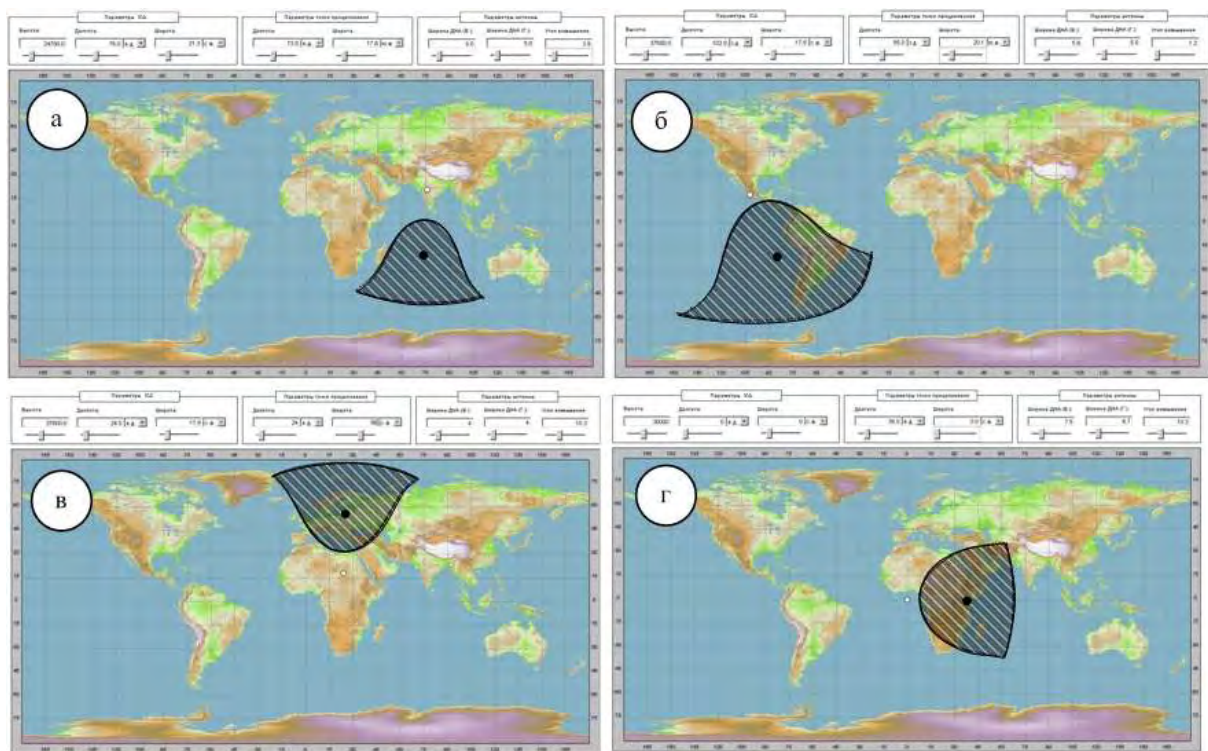


Рис.7 – Примеры результатов моделирования

Таблица 1 – Исходные данные

№ п/п	Параметры разведывательного космического аппарата			Параметры точки прицеливания		Параметры антенны		
	Высота (Hк), км	Долгота (uh), град.	Широта (Tet_h), град.	Долгота (uc), град.	Широта (Tet_c), град.	ДНА в азимутальной плоскости (F0), град.	ДНА в угломестной плоскости (F1), град.	Угол возвышения (Bg), град.
1	24700	76 в.д.	21 с.ш.	73 в.д.	17 ю.ш.	5	5	4
2	37600	102 з.д.	18 с.ш.	83 з.д.	20 ю.ш.	5.9	5	1.2
3	37600	24 в.д.	18 с.ш.	24 в.д.	56 с.ш.	4	4	10.3
4	30000	0	0	38 в.д.	0	7.5	6.7	10.3

### Заключение

Таким образом, разработанная модель расчета зон покрытия земной поверхности разведывательным космическим аппаратом, позволяющая осуществлять расчет и формирование зоны покрытия земной поверхности с учетом позиции спутника на орбите, диаграммы направленности и мощности антенной системы, позволяет оценивать пределы разведдоступности зон, а также визуализировать полученные результаты для различных типов карт местности и систем координат. Является базой для разработки целого семейства имитационных моделей, в том числе, имитационной

---

модели определения возможностей группировки разведывательных космических аппаратов по вскрытию объектов на земной поверхности в реальном масштабе времени.

### Литература

1. Космические и ракетные системы иностранных государств. – Тверь, 2009.
2. **Гулиев М.Д., Дворник А.В., Подрезов С.Н., Синяткин Д.А.** Модель расчета зон покрытия земной поверхности космическим аппаратом с узконаправленной антенной системой. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020611994 от 13.02.2020 г.
3. **Мирер С.А.** Механика космического полета. Орбитальное движение. – М: Резолит, 2007.
4. **Балк М.Б.** Элементы динамики космического полета. – М.: Наука, 1965.
5. **Аппазов Р.Ф., Сытин О.Г.** Методы проектирования траекторий носителей и спутников Земли. – М.: Наука, 1987.