

# ОПТИМИЗАЦИЯ СЪЕМОЧНЫХ ПЛАНОВ ГРУППИРОВКИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДЗЗ С ПРИМЕНЕНИЕМ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

---

Валерий Витальевич ДАРНОПЫХ родился в 1973 г. в городе Владивостоке. Доцент МАИ. Кандидат технических наук, доцент. Основные научные интересы — в области системного анализа многоспутниковых и многоцелевых систем дистанционного зондирования Земли и связи, моделирования и оптимизации планирования процессов их целевого функционирования. Автор более 50 научных работ. E-mail: darnopykh@mail.ru

Valeriy V. DARNOPYKH, Ph.D., was born in 1973, in Vladivostok. He is an associate-professor of the System Analysis and Control Department at the MAI. His major research interests are in the system analysis of multisatellite and multifunctional observation and communication systems, modeling and optimization of operative planning of systems functioning. He has published over 50 technical papers. E-mail: darnopykh@mail.ru

---

Алексей Игоревич КАЛАШНИКОВ родился в 1982 г. в городе Свердловске Луганской области УССР. Аспирант МАИ. Ведущий инженер ФГУП «НПО им. С.А.Лавочкина». Основные научные интересы — в области системного анализа и синтеза систем дистанционного зондирования Земли, разработки прикладных программных комплексов. Автор пяти научных работ. E-mail: alex-aka@mail.ru

Alexey I. KALASHNIKOV was born in 1982, in Sverdlovsk of Lugansk region (Ukraine). He is a postgraduate student and assistant-professor at the MAI, an engineer at the Lavochkin's Enterprise. His major research interests are in the system analysis and synthesis of Earth observation systems, development of applied software. He has published 5 technical papers. E-mail: alex-aka@mail.ru

---

Вениамин Васильевич МАЛЫШЕВ родился в 1940 г. в городе Москве. Заведующий кафедрой МАИ. Доктор технических наук, профессор. Основные научные интересы — в области системного анализа и управления летательными аппаратами. Автор более 200 научных работ. E-mail: VeniaminMalyshev@yandex.ru

Veniamin V. MALYSHEV, D.Sci., was born in 1940, in Moscow. He is the Head of the System Analysis and Control Department at the MAI. His major research interests are in the system analysis and flight control. He has published over 200 technical papers. E-mail: VeniaminMalyshev@yandex.ru

---

*В статье рассматривается задача оптимизации оперативного планирования мониторинга земной поверхности (или объектов) группировкой космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), которая может состоять из различных по назначению и характеристикам бортовой целевой и служебной аппаратуры спутников. Процесс решения оптимизационной задачи представлен как порядок применения специализированного программного обеспечения (комплекса). Одним из достоинств комплекса является универсальность, т. е. возможность решения с его помощью задачи для любого так называемого «созвездия» КА на любом наперед заданном временном интервале планирования. Приводится пример решения задачи.*

*The optimization problem of operative planning for Earth observation system which orbital segment consists of several different (target functioning and parameters of special on-board equipment (devices)) spacecrafts (SC) is considered at the article. The process of the optimization is demonstrated as an order of special software application. One of the advantages of the software is the universality, i.e. possibility to solve the problem for any kind of Earth observation SC-constellation at any long-time planning interval. The example of optimization problem is given.*

**Ключевые слова:** системы ДЗЗ, орбитальные группировки, целевое функционирование, бортовая целевая аппаратура, планирование, управление, оптимизация, съемочный план, специализированное программное обеспечение (комплекс), моделирование.

**Key words:** earth observation systems, constellations, target functioning, special on-board equipment, planning, control, optimization, shooting plan, special software, modeling.

## Введение

Ценность космической информации от съемки Земли зависит от ряда факторов, таких, как оперативность получения информации на Земле, каче-

ство снимков, зависящее от параметров бортовой целевой аппаратуры и внешней среды. Для получения максимального дохода от эксплуатации систем

ДЗЗ необходимо рационально использовать ограниченный ресурс, находящийся на орбите, и ресурс, расположенный на Земле, — пункты приема и обработки информации. С ростом потребностей заказчиков в объемах информации и в оперативности ее получения необходимо рассматривать многопараметрическую задачу, в которую входят: космические аппараты (КА), объекты съемки и станции (пункты) приема информации.

Подобная задача формализована в [1, 2] как оптимизационная задача планирования целевого функционирования космической системы ДЗЗ, в [3—15] рассмотрены различные примеры ее решения в различных постановках применительно к одиночным КА и системам. В работах [16—23] развит подход к автоматизации решения подобных задач планирования с применением специализированного программного обеспечения.

Целью данной статьи является демонстрация работы прикладного программного комплекса на примере решения задачи оптимизации оперативного планирования целевого функционирования системы ДЗЗ, орбитальная группировка которой включает восемь спутников: РЕСУРС-ДК, RBVIEW3, TERRA, ALSAT, UK-DMC, NIGERIASAT, BILSAT, BEIJING. Результаты решения задачи для модельного примера приводятся в статье.

## 1. Постановка задачи

На основе формализма [1, 2] дадим постановку задачи в виде описания.

Орбитальная группировка КА описывается баллистическим построением и параметрами бортовой целевой аппаратуры: углом обзора и углом захвата съемочной аппаратуры, скоростью переориентации оптической оси, разрешением аппаратуры и спектральным диапазоном, объемом бортового запоминающего устройства (БЗУ), скоростью записи и передачи информации. Каждый объект съемки описывается следующими параметрами: географическими координатами, требуемым разрешением и спектром съемки, максимальной ценностью снимка при благоприятных условиях съемки, которые определяются освещенностью и облачностью [24]. Освещенность объекта задается в люксах или углом возвышения Солнца, а облачность — прогнозом на интервал моделирования по 10-бальной шкале (0 — ясная погода) или равномерным законом распределения облачности над поверхностью Земли. Станция приема информации описывается следующими параметрами: географическими координатами и углом места. Для решения задачи рационального

использования ресурса системы ДЗЗ и получения максимальной ценности снимков необходимо решить задачу оптимизации планирования целевого функционирования системы на заданном временном интервале.

## 2. Основные требования к разработке программного комплекса

Для решения оптимизационных задач оперативного планирования целевого функционирования систем ДЗЗ разработан специализированный компьютерный программный комплекс. Основные принципы, положенные в основу разработки комплекса, заключаются в следующем:

1. Программный код комплекса должен быть написан на современном языке программирования, поддерживающем технологии объектно-ориентированного программирования и работы с базами данных (БД).

2. Комплекс должен поддерживать операционную систему Windows XP и Windows Vista.

3. Комплекс должен обеспечивать не только решение оптимизационных задач оперативного планирования, которые являются основными, но и моделирование ряда динамических процессов [25—29], которые являются своего рода основой для планирования: движение КА, работа их бортовой целевой аппаратуры, движение наземных объектов (информационных источников, наземных станций и т.д.) в абсолютной системе координат, связанное с суточным вращением Земли, движение Земли по орбите вокруг Солнца (для правильной постройки трасс КА и отслеживания солнечной тени на Земле), состояние облачного покрова.

Комплекс должен обеспечивать решение задач планирования как для одиночных КА, так и для систем ДЗЗ с любым количественным и параметрическим составом орбитальной группировки, в том числе допускающих совмещение функциональных возможностей. Задачи планирования должны решаться в автоматизированном режиме.

Для решения упомянутых оптимизационных задач и моделирования соответствующих процессов целевого функционирования спутниковых систем разработаны следующие основные классы и методы:

а) класс Satellite — необходим для описания КА, его орбиты и бортовых систем. В этом классе присутствуют методы для моделирования движения спутника и расчет его трассы, для расчета большой полуоси орбиты, малой полуоси орбиты, среднего движения КА, эксцентриситета, фокального параметра, скорости в апогее и перигее, радиус-вектора КА, а также методы для вычисления радиальной,

трансверсальной и орбитальной скорости КА и методы для расчета ширины полосы и зоны обзора;

б) класс Sun — необходим для хранения статических методов вычисления освещенности, нахождения часового угла Солнца относительно долготы объекта, подсчета номера дня в году по заданной дате, уравнения времени, нахождения склонения Солнца, нахождения азимута Солнца, для нахождения расстояния (в а.е.) от центра Земли до центра Солнца и для нахождения прямого восхождения Солнца;

в) класс Subject — необходим для описания информационных источников и требований к процессу целевого функционирования системы. В этом классе описываются функции для проверки нахождения объекта под КА, метод проверки по требуемому углу возвышения Солнца, метод проверки принадлежности местного времени объекта наблюдения /абонента к требуемому времени съемки (наблюдения) и иные методы;

г) класс Element — необходим для описания временных интервалов служебных операций спутниковой системы и операций по обслуживанию информационных источников. В объектах данного класса хранятся, например, данные о времени начала и конца съемки наблюдаемого земного объекта с КА, о моментах времени съемки с минимальным углом отклонения от линии визирования, об интервалах радиовидимости КА и наземных абонентов, значения критерия оптимизации и иные данные;

д) класс Plan — необходим для объединения всех потенциально возможных интервалов (моментов) съемки и радиовидимости для последующей оптимизации, методы оптимизации и проверки динамических ограничений также принадлежат этому классу;

е) основной класс Program — необходим для работы основной программы и администрирования (синхронизации, упорядочивания) работы остальных методов.

Разработан также ряд вспомогательных классов: класс Const — для хранения констант, необходимых для расчета;

класс Map — для отрисовки карты Земли в проекции Меркатора и хранения массива точек береговой линии всех материков и крупных островов;

класс Rng — для хранения статических методов для моделирования псевдослучайных величин основных законов распределения;

класс Vector — для представления программных типов данных в виде вектора;

класс Matrix — для представления программных типов данных в виде матрицы.

4. Комплекс должен отвечать точностным характеристикам решения задачи, т.е. блок реализации методов (алгоритмов) оптимизации должен содержать критерий останова итерационных процедур оптимизации, что позволит получать не только оптимальные планы, но и допустимые или близкие к оптимальным.

5. Пользователь должен вводить вручную как можно меньше информации: основные характеристики спутниковой системы, информационных источников, наземных объектов и т.д. должны храниться в базе данных и при необходимости загружаться из этой базы.

6. Результаты работы комплекса должны выводиться в графическом, текстовом и табличном виде в окно программы и в текстовый файл, записываться в базу данных.

7. Комплекс должен быть снабжен подсказками к функциональным элементам и иметь интуитивно понятный интерфейс для удобства оператора; необходимо также предусмотреть перехват исключительных ситуаций при работе программы и в случае некорректного использования комплекса.

8. Комплекс должен быть снабжен инструкцией пользователя и библиотеками справочной поддержки.

С учетом перечисленных требований и велась разработка программного комплекса. В качестве языка программирования использован C++, который позволяет моделировать систему с любым количеством КА, информация по которым хранится в базе данных TLE; задавать параметры бортовой целевой аппаратуры КА, задавать объекты наблюдения, как точечные, так и площадные, описываемые широтно-долготной трапецией; задавать пункты приема информации точками с соответствующей зоной обзора, задавать наземные абоненты как географические точки. Параметры внешней среды — минимальная освещенность и облачность — являются настраиваемыми. Результатом работы программы является наглядное отображение карты мира с трассами КА, полосами обзора, зонами видимости аппаратуры мониторинга и аппаратуры связи. Оптимальный план работы космического и наземного сегмента системы, рассчитанный с помощью алгоритма Прима или Дейкстры [30] и находящий оптимальную стратегию управления бортовой целевой аппаратуры спутников системы ДЗЗ в целях максимизации эффективности с учетом ограниченного технического ресурса, отображается в виде циклограммы работы с указанием начала и конца отдельно взятого момента съемки и сеанса связи. Также комплекс позволяет в автоматизиро-

ванном режиме проводить анализ оптимального плана для системы ДЗЗ, т.е. рассчитывать количество съемок, совершенных каждым КА, среднее время между съемками, количество сеансов связи и интервалы между ними по каждому пункту приема информации, экономический доход сформированного плана и т.д.

### 3. Ввод исходных данных для решения прикладной задачи

Рассмотрим порядок работы с программным комплексом.

Комплекс запускается с помощью файла SimulatorOfSS.exe. После запуска на дисплее компьютера появляется главное рабочее окно (рис. 1).

По умолчанию в главном окне включена вкладка «Начальные условия», в которой располагаются следующие вкладки:

- 1) созвездие ИСЗ — для составления группировки КА;
- 2) объекты наблюдения — для ввода параметров объектов съемки и ограничений на съемку;
- 3) пункты приема информации (ППИ) — ввод координат и параметров наземных станций;
- 4) наземные комплексы управления (НКУ) — для ввода координат НКУ;
- 5) прогноз облачности — для ввода прогноза облачности в баллах и изменения параметров облачности при использовании стохастической модели облачности;
- 6) временной интервал съемки — для ввода ограничений на съемку по местному времени;

7) ресивер — для задания параметров наземных станций приема (приема и передачи) данных;

8) назначение КА — для задания режима целевого функционирования спутника (мониторинг, связь или транспондер, т.е. совмещение функциональных возможностей).

При вводе начальных условий в первой вкладке «Созвездие ИСЗ» пользователь может собрать из предлагаемых (существующих или проектных) спутников мониторинга/связи требуемое созвездие. Для этого напротив каждого КА оператор ставит «галочку», после чего нажимает на кнопку «Загрузить TLE» (рис. 2).

Комплекс поддерживает полуавтоматический (необходимо указать файл) ввод и обновление данных по параметрам орбит КА, представленных в формате двухстрочных элементов TLE (Two Line Element). Особое достоинство данной функции состоит в том, что на сайте [www.space-track.org](http://www.space-track.org) можно получить в этом формате данные измерений параметров орбит подавляющего большинства околоземных КА (более 9 тыс.).

Если в группировку необходимо ввести какой-нибудь другой КА, то пользователь может воспользоваться встроенной базой данных (БД) космических объектов. Для вызова БД необходимо нажать на кнопку «Загрузить ИСЗ из TLE», после этого появится структурированный список тематических файлов, которые хранят баллистические данные космических объектов сгруппированных по назначению. Также КА можно добавлять вручную, вводя все данные с клавиатуры, нажав при этом на

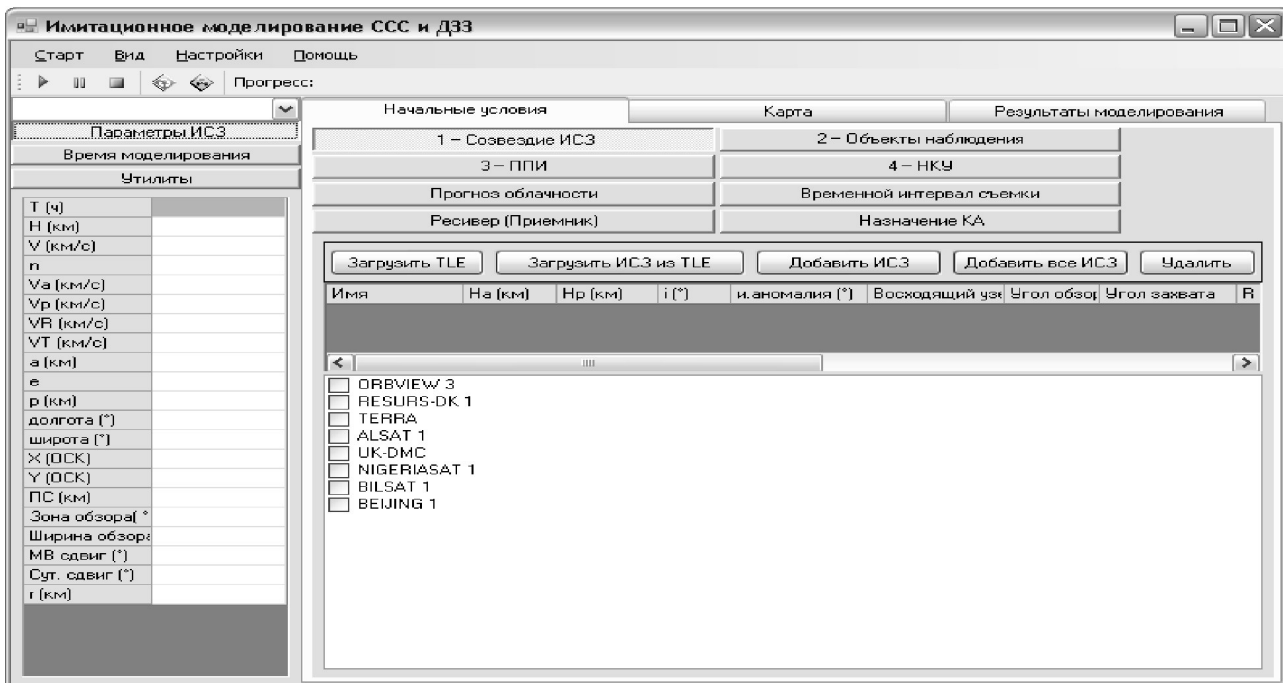


Рис. 1. Главное рабочее окно

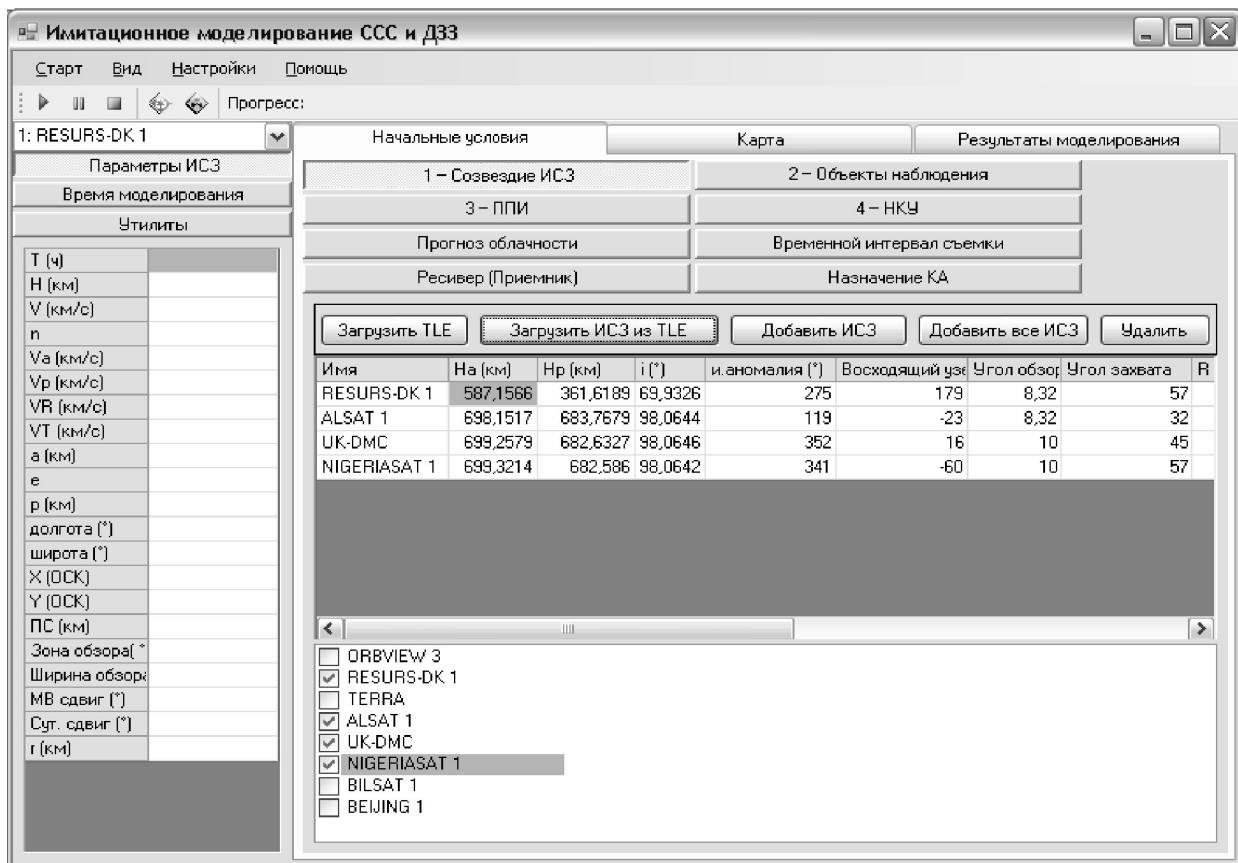


Рис. 2. Рабочее окно «Загрузить TLE»

кнопку «Добавить ИСЗ». Если необходимо удалить какой-нибудь КА из составляемого списка, то необходимо нажать на кнопку «Удалить».

При вводе КА, задаются следующие параметры:

- 1) название КА;
- 2) высота апогея над поверхностью Земли;
- 3) высота перигея;
- 4) наклонение орбиты;
- 5) угол истинной аномалии;
- 6) долгота восходящего узла;
- 7) угол захвата аппаратурой наблюдения;
- 8) раствор аппаратуры наблюдения/связи;
- 9) разрешение аппаратуры;
- 10) свободный объем БЗУ;
- 11) общий объем БЗУ;
- 12) скорость записи в БЗУ;
- 13) скорость передачи информации в линиях КА

— Земля и КА — КА (межспутниковые линии).

После ввода начальных условий для группировки КА необходимо ввести начальные условия для объектов съемки (наблюдения) или объектов связи, перейдя на вкладку «Объекты наблюдения/абоненты» (рис. 3).

В этой вкладке пользователь вводит название объекта, его координаты, требуемые параметры для съемки и параметр цены потенциально возможно-

го снимка. Для абонентов связи также задается значение угла места — необходимый угол возвышения КА над горизонтом. Можно также добавлять объекты из БД, нажав на кнопку «Загрузить объект», или добавлять объекты вручную.

Переместившись на вкладку 3 — «ППИ», пользователь вводит координаты и угол места для пунктов приема, проводя аналогичные действия во вкладке 2 — «Объекты наблюдения» (рис. 4).

При переходе на аналогичную вкладку 4 — «НКУ» пользователь добавляет пункты управления спутниковой группировкой.

В нижней части окна пользователь может задать величину вероятности появления облачности над объектом и временной интервал разыгрывания облачности (рис. 5).

Во вкладке «Временной интервал съемки», оператор задает требуемое местное время для съемки всех необходимых объектов (рис. 6). С левой стороны окна программы располагается панель управления, в ней находится вкладка «Время моделирования», в которой пользователь может задать время начала моделирования. Это может быть текущее время (это время, установленное на компьютере) или заданное время, выбираемое по появляющемуся календарю. Интервал моделирования задается с

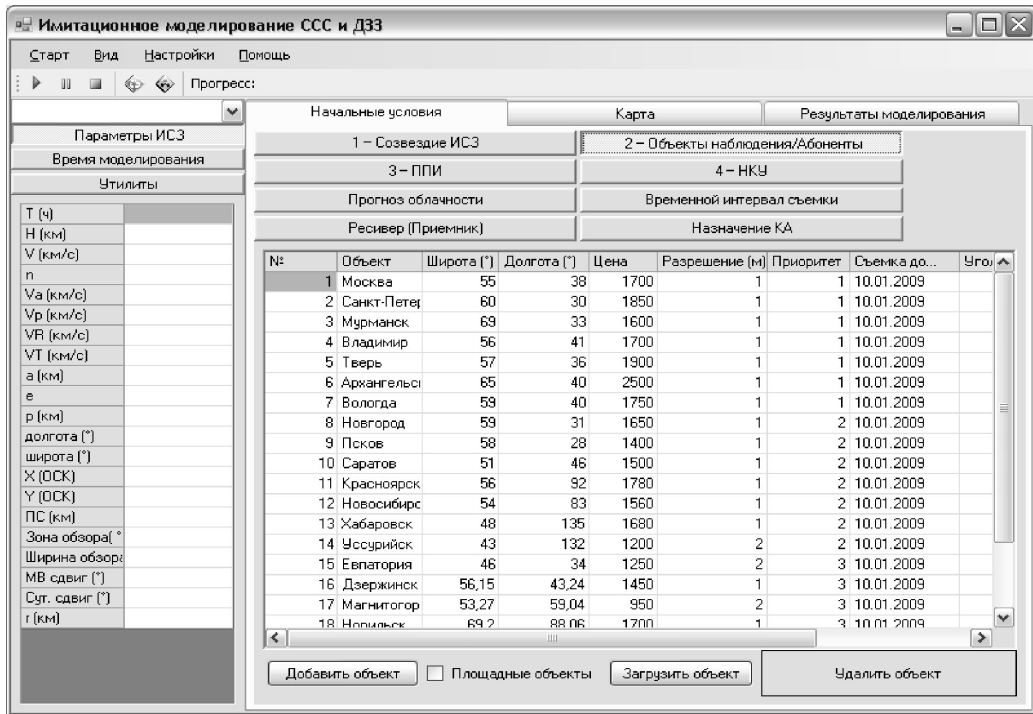


Рис. 3. Рабочее окно «Объекты наблюдения/абоненты»

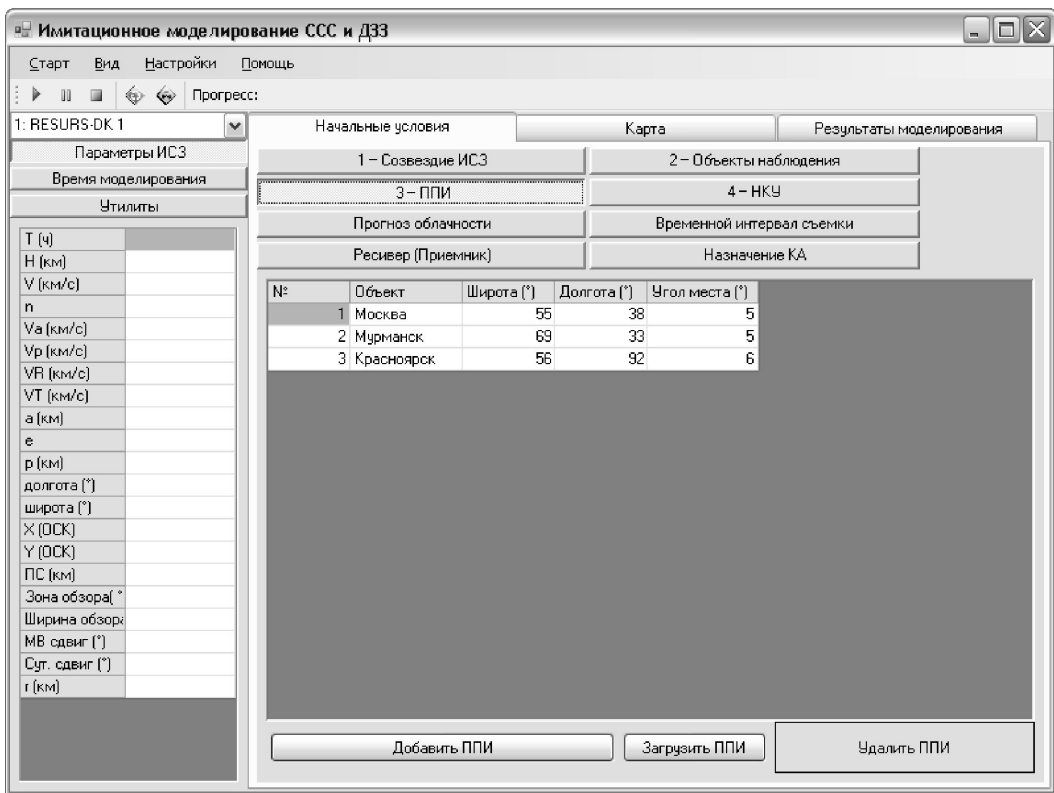


Рис. 4. Рабочее окно «ППИ»

клавиатуры, а измерение интервала выбирается из списка: период, минуты, часы, сутки, недели, месяцы.

Для моделирования систем спутниковой связи предусматривается набор наземных станций для

приема-передачи информации, которые необходимо задать через вкладку «Ресивер» (рис. 7). Пример задания параметров КА и интерпретации результатов моделирования орбитальной динамики глобальной спутниковой системы связи проекта «Iridium» представлен на рис. 8.

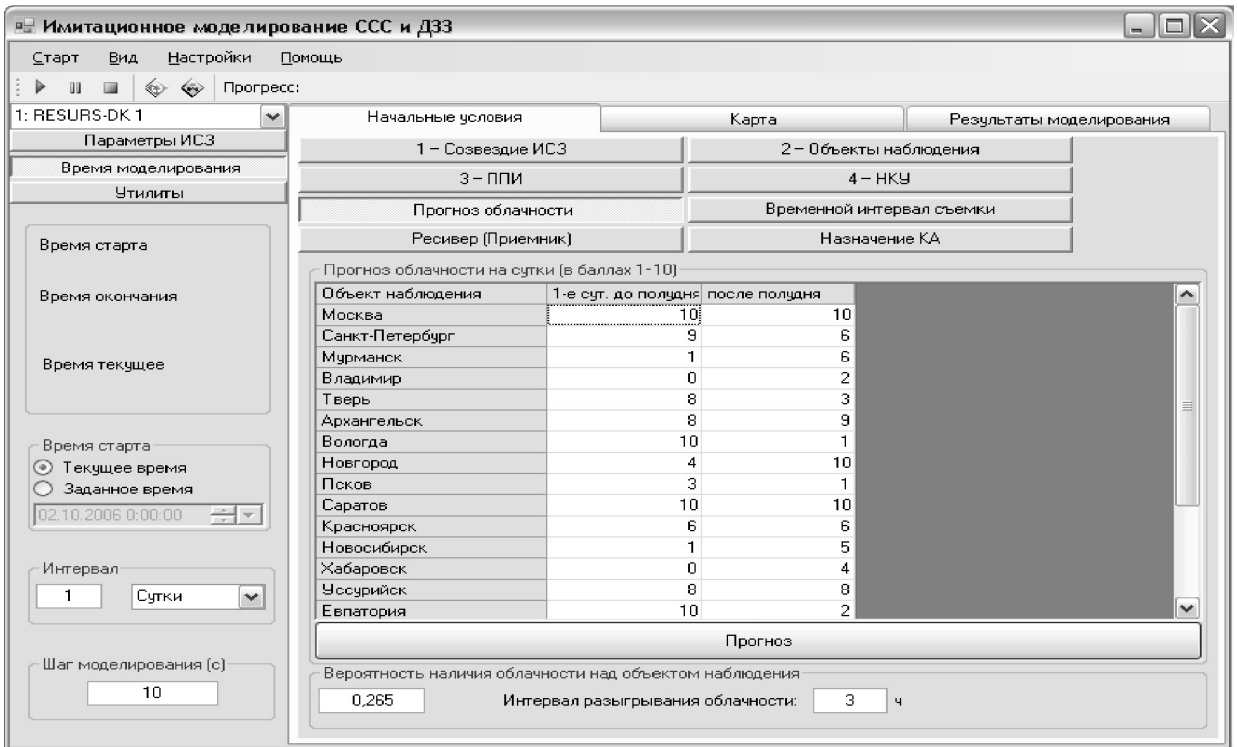


Рис. 5. Рабочее окно для прогнозирования облачного покрова

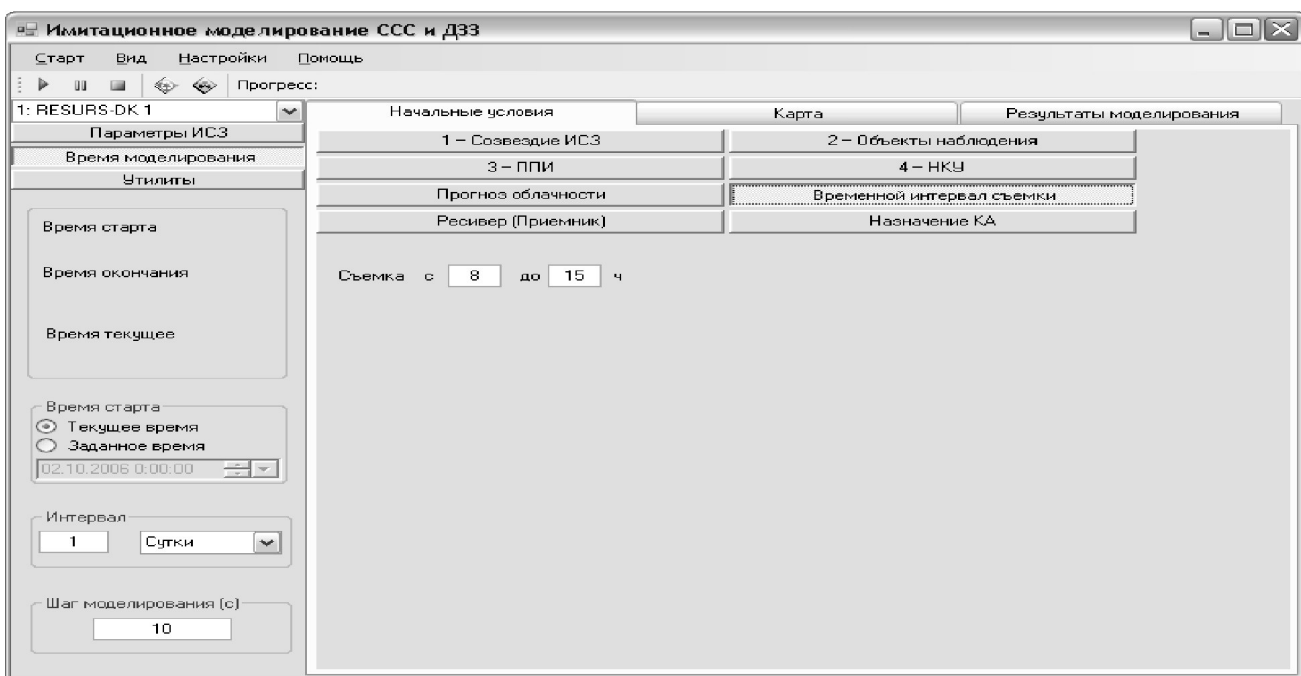


Рис. 6. Рабочие окна «Временной интервал съемки» и «Время моделирования»

Путем варьирования функционального предназначения КА можно моделировать процессы целевого функционирования следующих систем:

- систем ДЗЗ (мониторинга);
- систем ДЗЗ, работающих совместно с сетью передачи данных;
- систем связи с межспутниковыми линиями;
- систем связи без межспутниковых линий.

Назначение функциональности производится с помощью комбинации переключателей (рис.9).

На этом ввод начальных данных для моделирования заканчивается, и оператор может выбрать параметры отрисовки процесса моделирования и требуемые ограничения. На рис.10 показано меню программы «Настройки». В нем можно выбрать, показывать ли трассу КА, тень от Солнца, освещенные

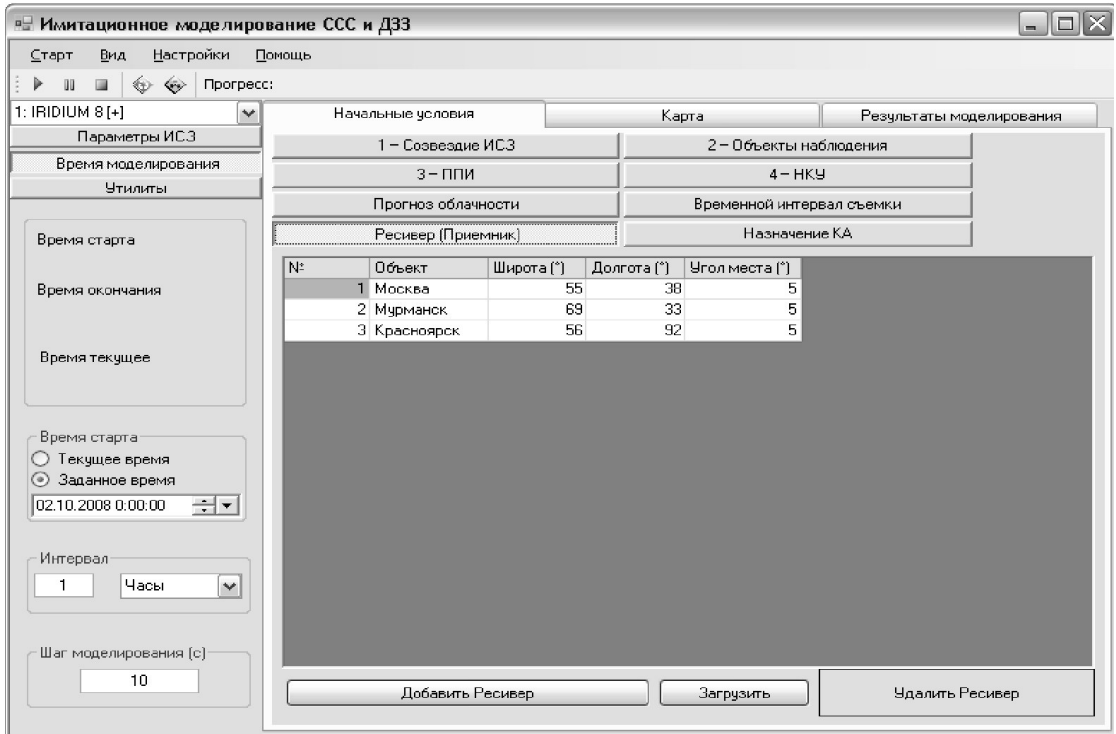


Рис. 7. Вкладка «Ресивер»

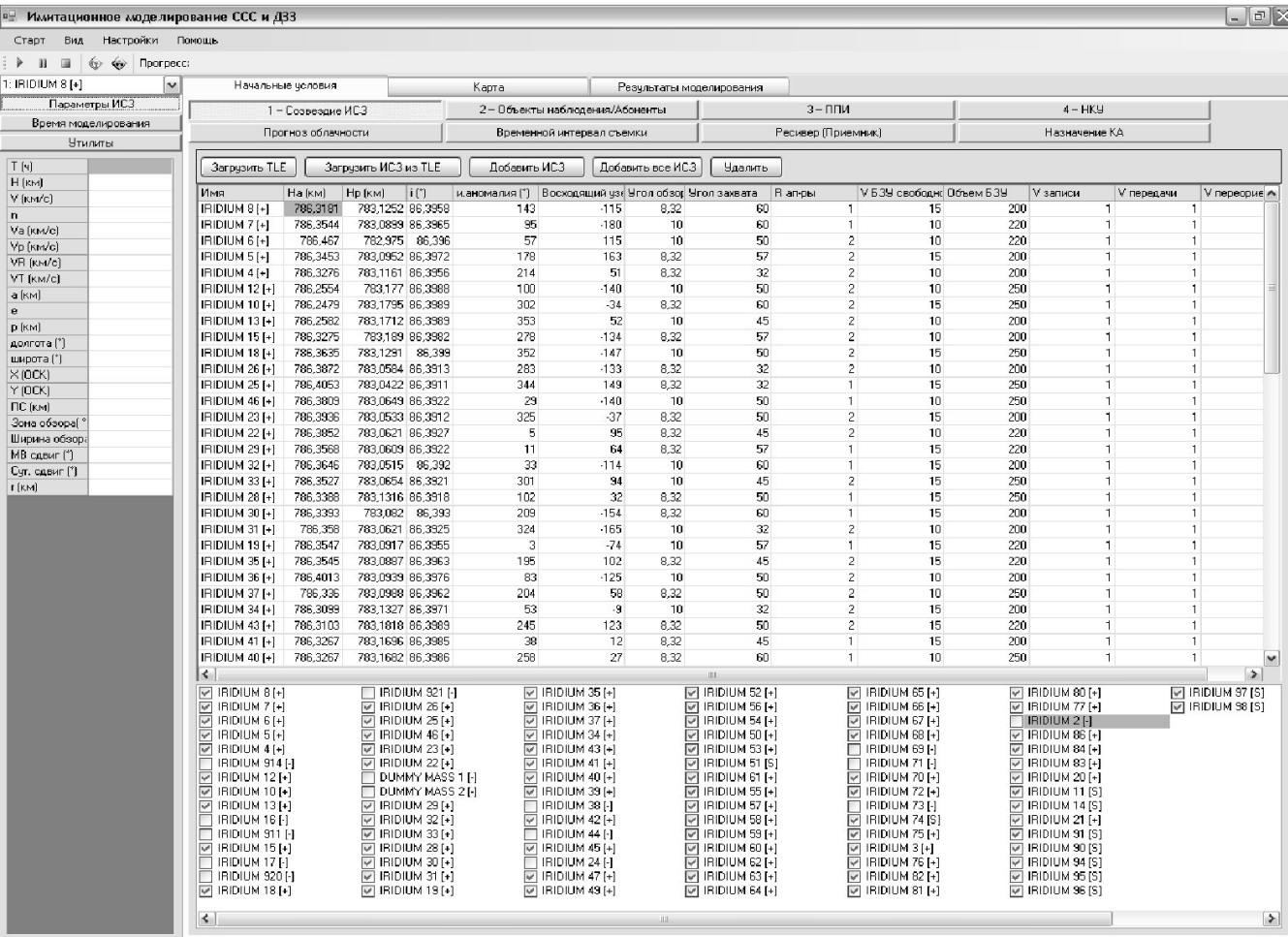


Рис. 8,а. Задание параметров системы проекта «Iridium»



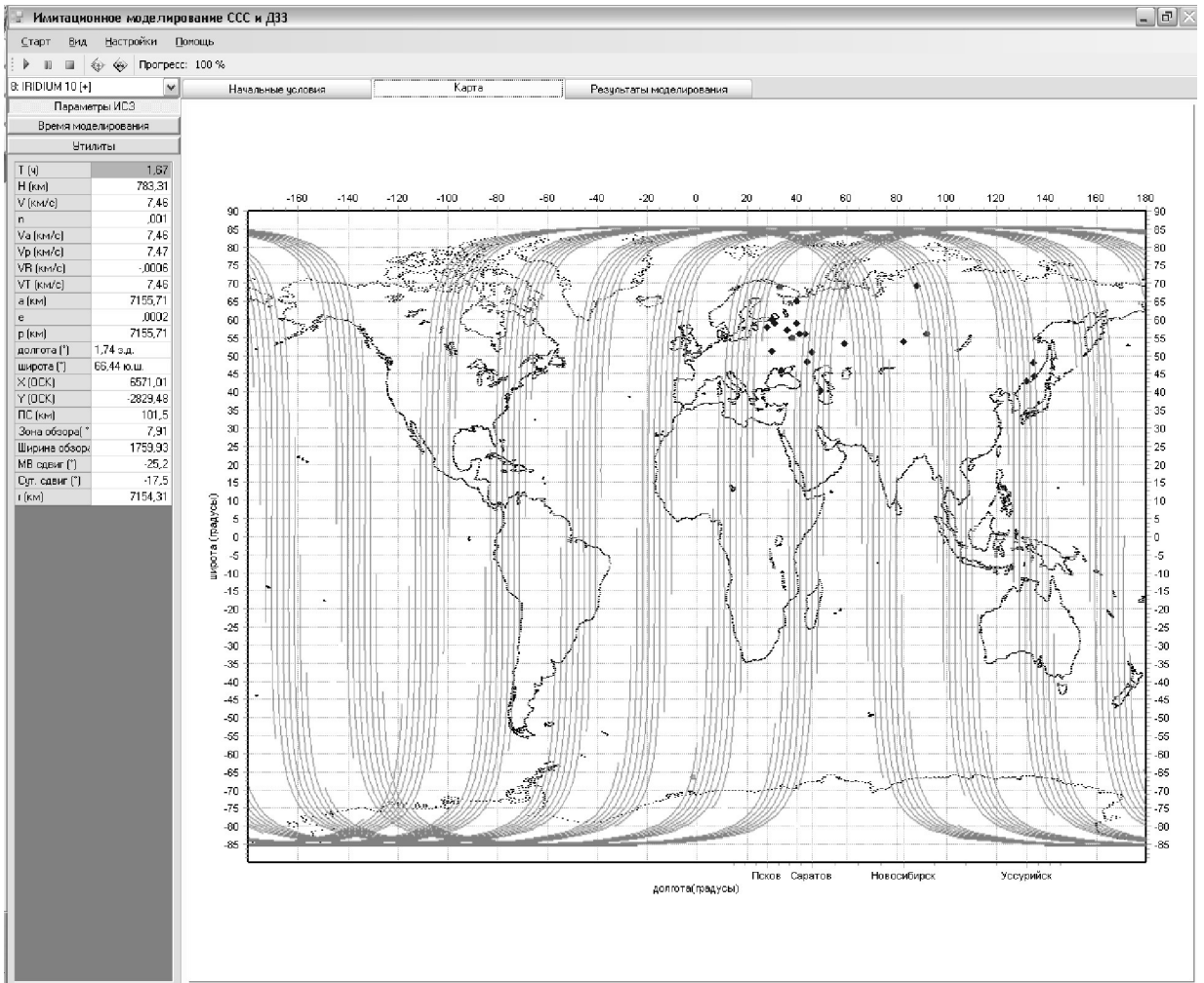


Рис.8,б. Моделирование орбитальной динамики спутников системы проекта «Iridium»

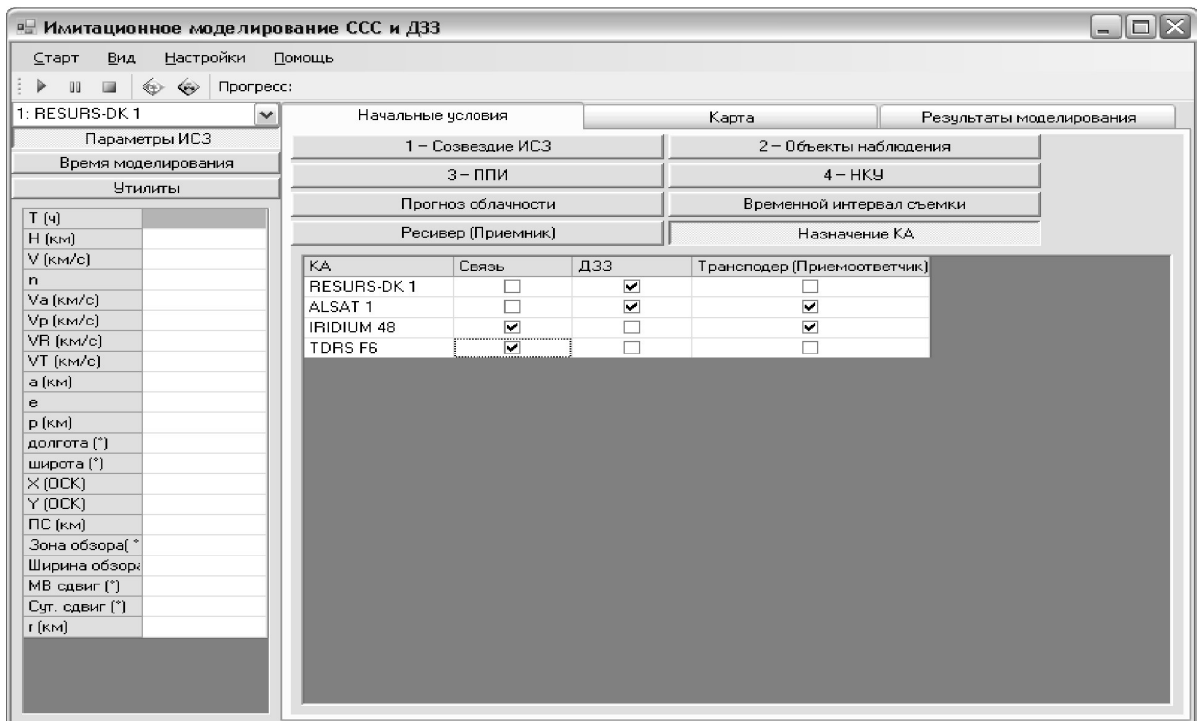


Рис. 9. Вкладка «Назначение КА»

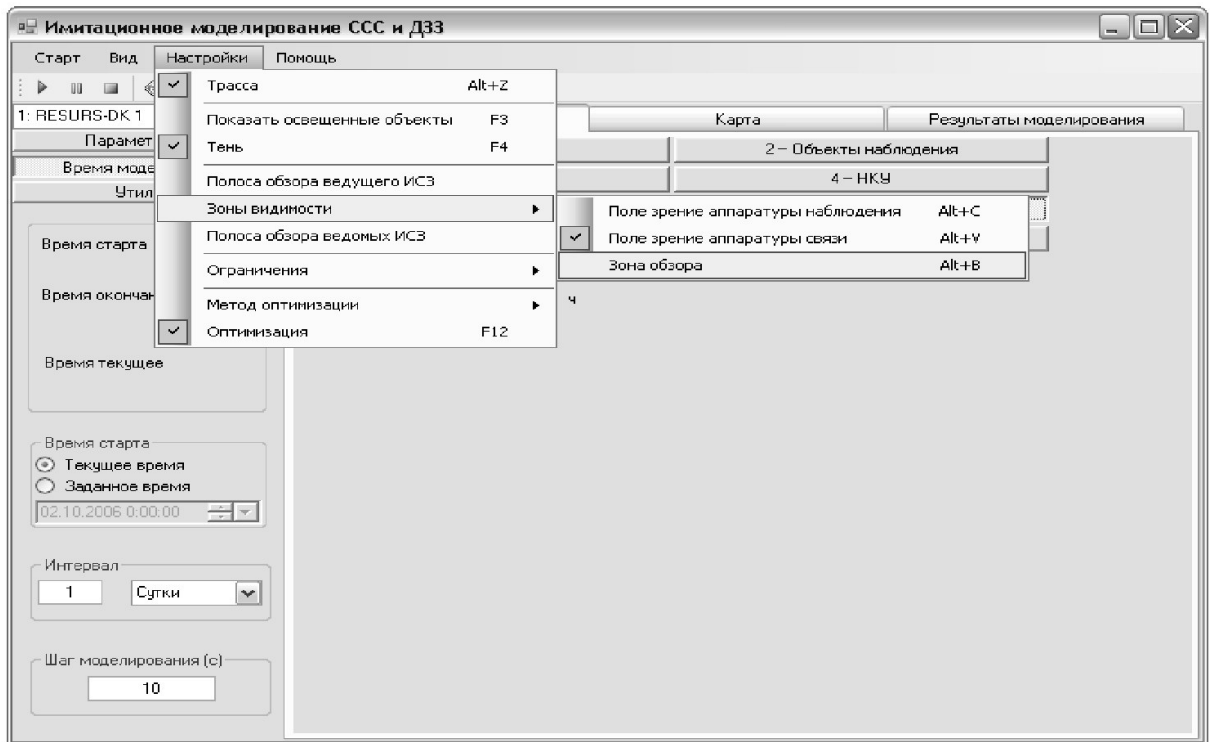


Рис. 10. Меню «Настройки»

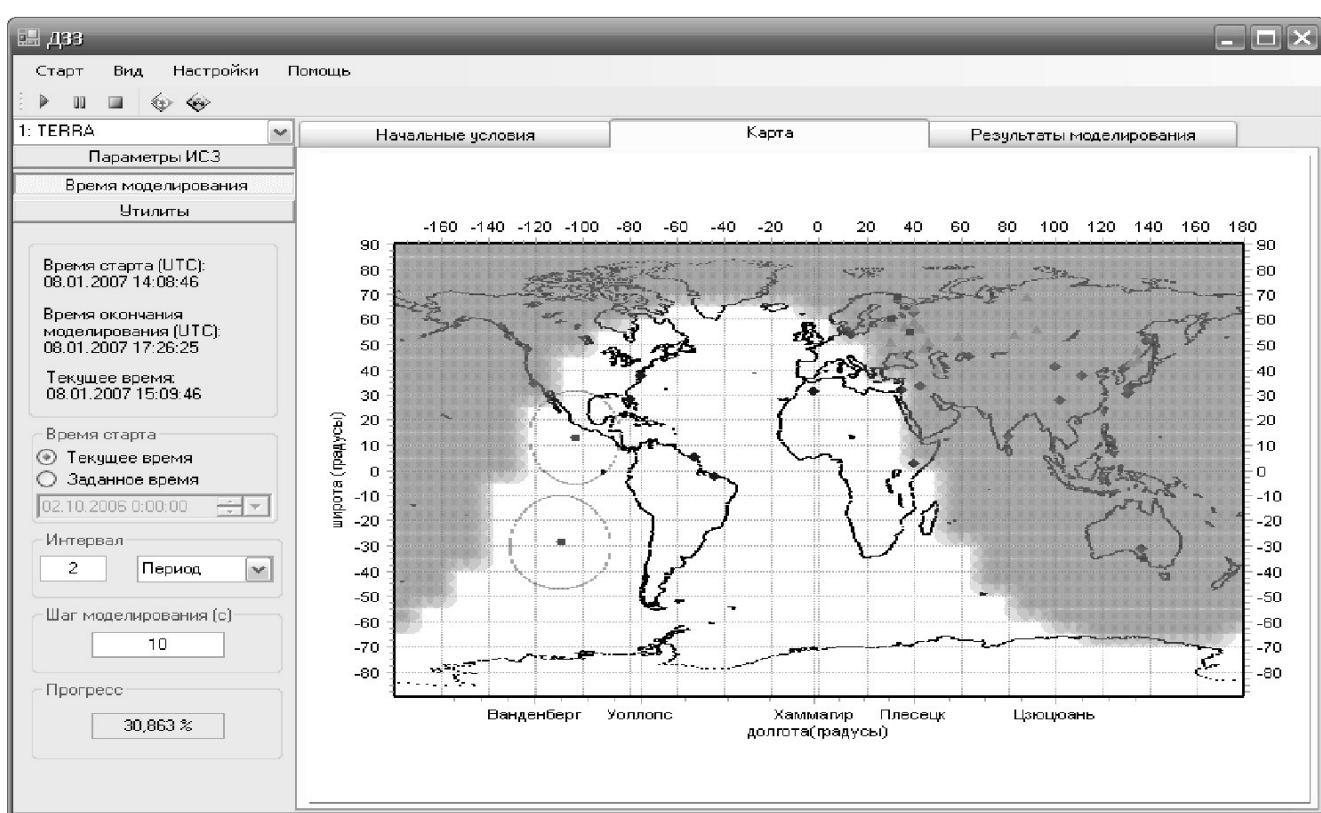


Рис. 11. Отображение освещенности Земли

объекты наблюдения, поле зрения аппаратуры наблюдения, поле зрения аппаратуры связи. Для этого необходимо нажать на требуемый элемент меню, после чего он станет активным. Отображение ос-

вещенности Земли представлено на рис.11. Также в этом меню выбираются ограничения на съемку объекта (рис.12).

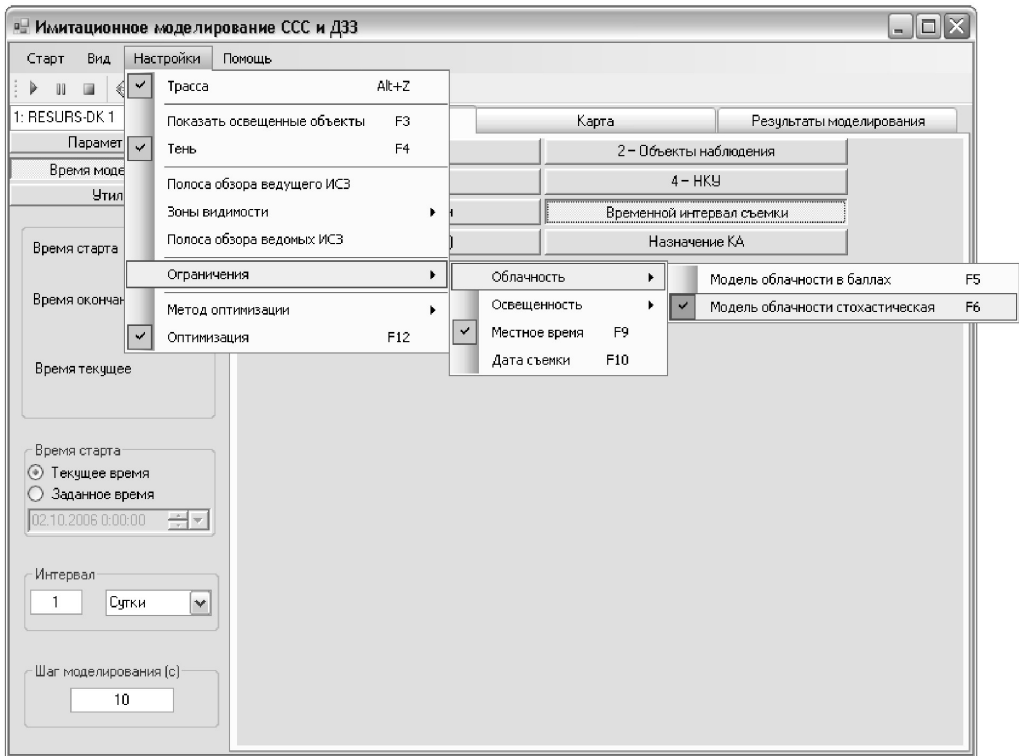


Рис. 12. Рабочее окно ограничений на съемку объектов

#### 4. Моделирование

Для систем связи и систем мониторинга может быть решена задача оптимизации плана съемок и оптимизация потоков передачи данных (доставки информации) соответственно с помощью нескольких методов, для выбора которых создана соответ-

ствующая библиотека и предусмотрено соответствующее меню (рис. 13). При этом для систем связи реализуется принцип динамической маршрутизации, а для систем с совмещенными функциональными возможностями — принцип статической маршрутизации [1, 2, 7—15, 30].

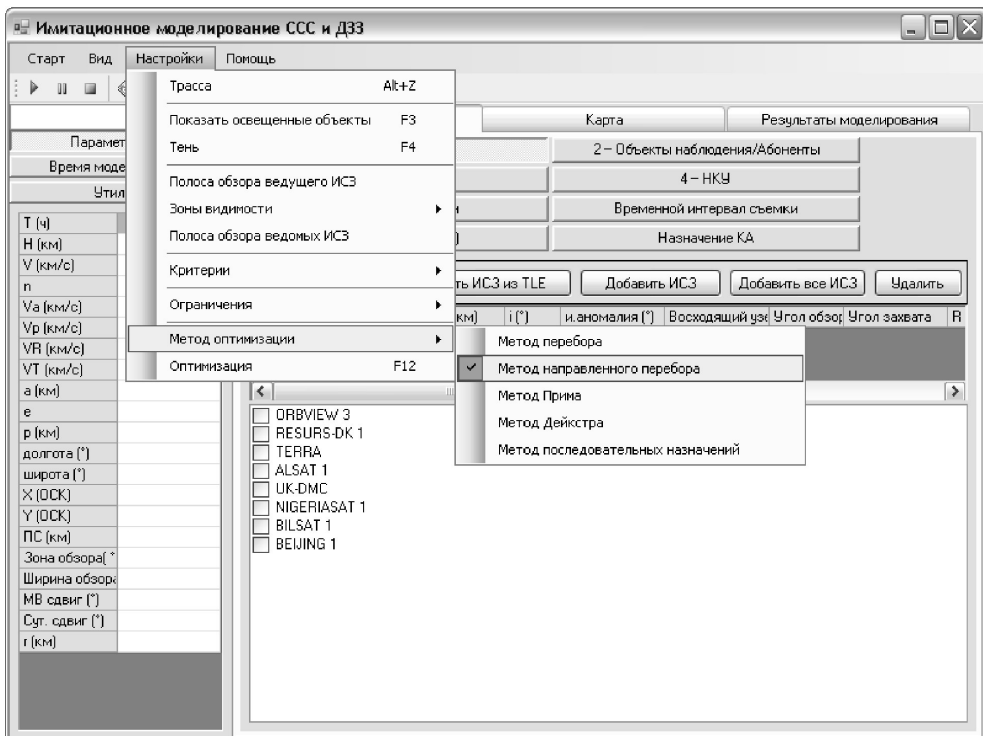


Рис. 13. Меню выбора метода решения задачи оптимизации

После этого можно приступать к моделированию работы бортового комплекса целевой аппаратуры, нажав на меню «Старт». После начала моделирования на левой панели можно перейти на вкладку «Параметры ИСЗ» и посмотреть характеристики каждого КА системы и его орбиты.

Во второй вкладке главного окна можно увидеть карту Земли, на которой расположены объекты съемки / абоненты, ППИ, НКУ и проекции орбиты КА с полем зрения съемочной аппаратуры или зоной обслуживания аппаратуры связи (рис. 14).

После завершения моделирования на экране появляется сообщение «моделирование завершено», и можно перейти в третью вкладку «Результаты моделирования». В ней можно увидеть четыре вложенные страницы: 1 — временная диаграмма полета (ВДП); 2 — протокол моделирования; 3 — результаты наблюдения; 4 — оптимальный план съемок / передачи информации.

На странице ВДП располагается графическое отображение полета КА и его текстовая интерпретация (рис. 15). Для систем спутниковой связи также создается ВДП, на которой указаны зоны видимости КА — КА и КА — Земля.

График показывает номер спутника в группировке и режим его работы на временной горизонтальной шкале. Верхняя закрашенная область показывает режим съемки, а нижняя — режим передачи информации на Землю и сеансы управления.

В протоколе моделирования выводится упрощенная таблица ВДП, в которой отображаются все

сеансы связи, управления и наблюдения, их продолжительность и количество (рис. 16).

На странице «Результаты наблюдений» отображаются данные по наблюдениям за каждым объектом/абонентом с КА в отдельности (рис. 17). В эти данные входит следующая информация:

- 1) ценность снимка объекта и требуемое разрешение;
- 2) наблюдался объект /абонент или нет;
- 3) имя (либо номер или иное условное обозначение) КА, который наблюдал объект /абонент;
- 4) время начала наблюдения;
- 5) время съемки;
- 6) время окончания наблюдения;
- 7) общее время наблюдения;
- 8) угол съемки бортовой аппаратурой КА;
- 9) значение критерия эффективности съемки объекта (для решения задачи мониторинга) [1, 2, 6, 18—21].

### 5. Оптимизация съемочного плана

Для построения оптимального плана перед началом моделирования необходимо выполнить активацию в меню «Настройки» элемента «Оптимизация» или нажать на клавишу F12. После того как моделирование завершится, на четвертой странице «Оптимальный план съемок» будет отображен съемочный план (рис. 18).

В оптимальный план съемок входит отсортированный по времени список наблюдений с указанием объекта, КА, времени съемки объекта, ценнос-

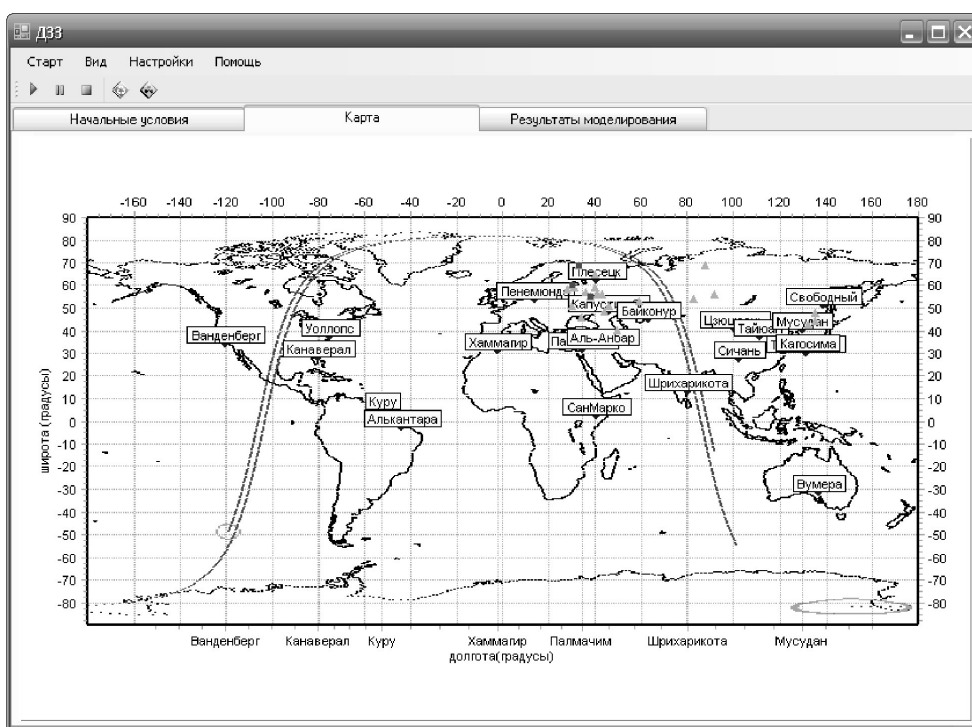


Рис. 14. Интерпретация процесса моделирования

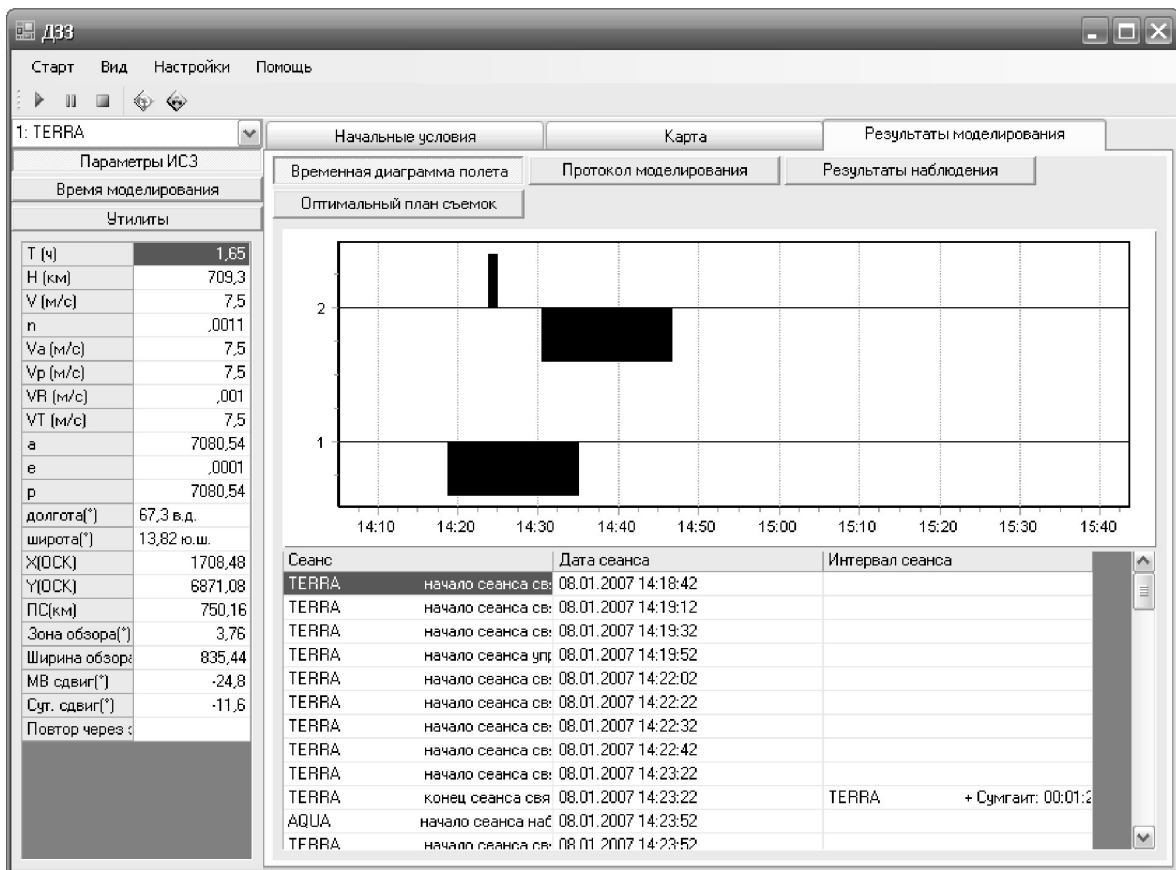


Рис. 15. Рабочее окно «Временная диаграмма полета спутника»

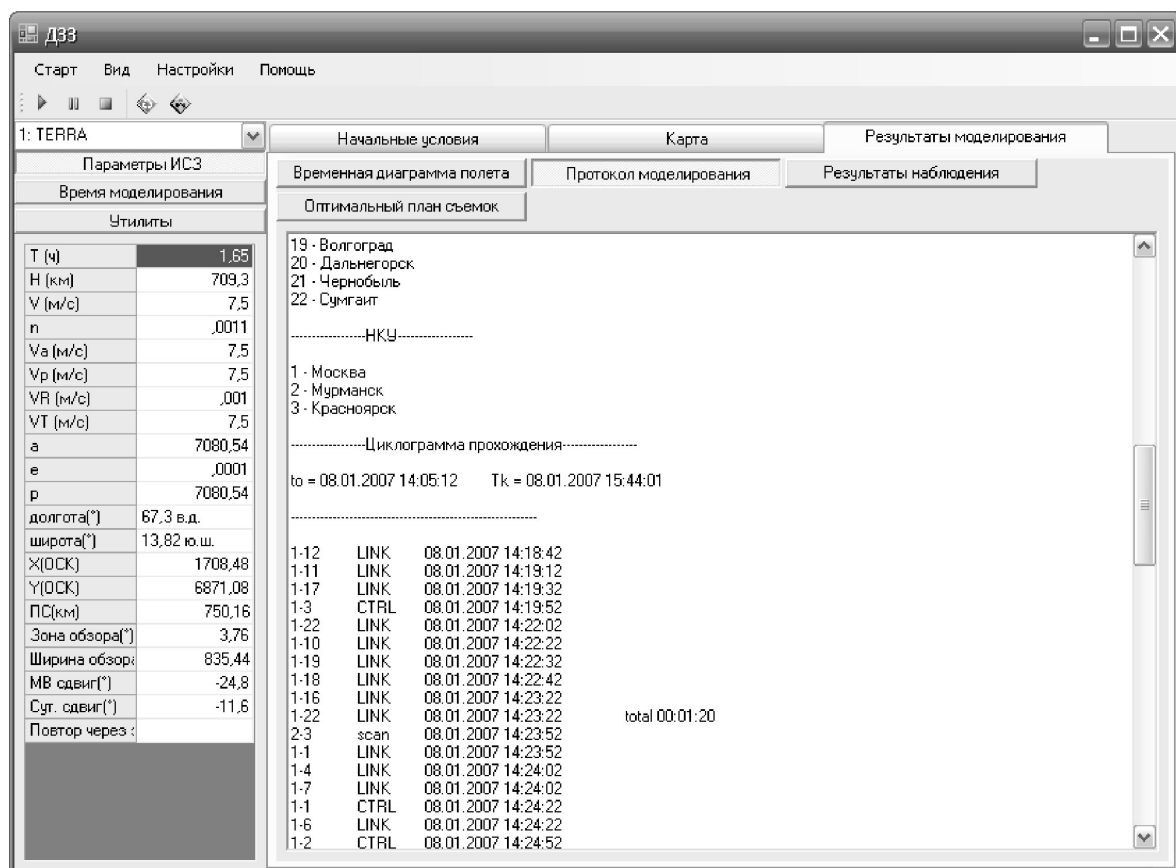


Рис. 16. Рабочее окно «Протокол моделирования»

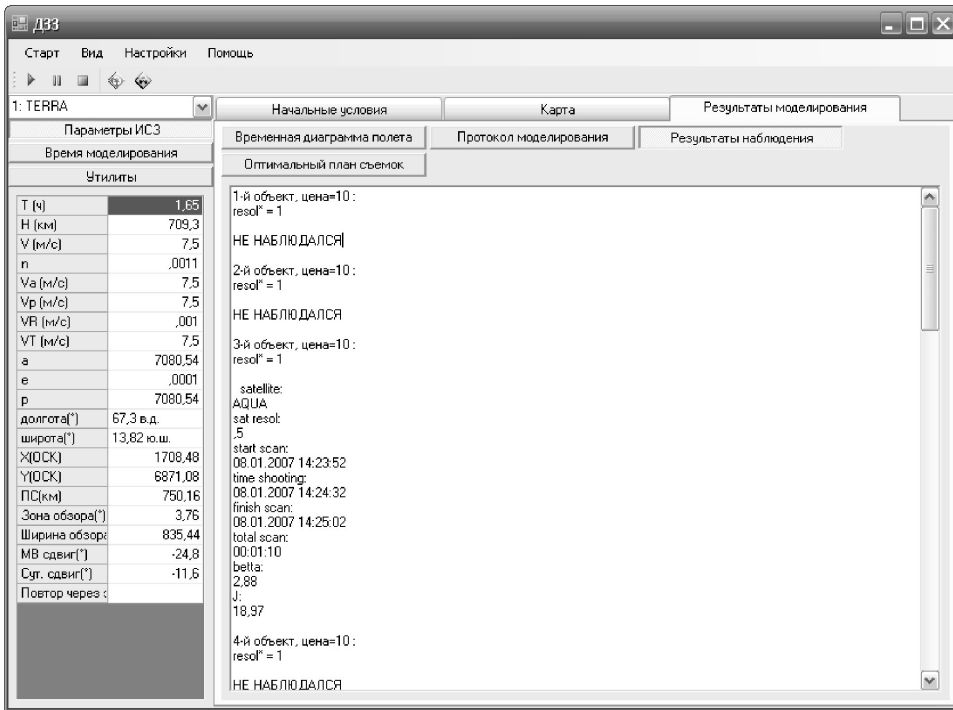


Рис. 17. Рабочее окно «Результаты наблюдения»

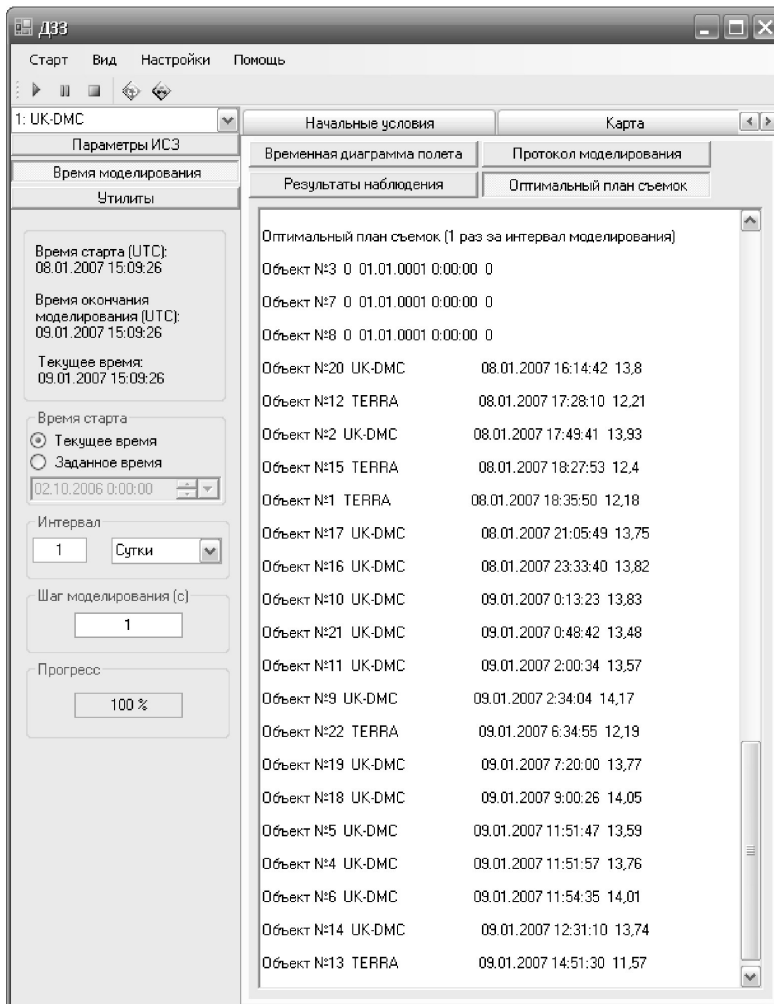


Рис. 18. Рабочее окно «Оптимальный план съемок» (пример для спутниковой системы мониторинга)

ти снимка и значения критерия эффективности за интервал планирования. В оптимальный план передачи информации через межспутниковую сеть входят пары абонентов, условные обозначения (имена, номера и т.д.) спутников-ретрансляторов и их количество.

На этом задача считается решенной, и результаты — ВДП, протокол наблюдений и оптималь-

ный план съемок сохраняются в файл на жестком диске компьютера и заносятся в базу данных.

При моделировании систем с совмещенными функциональными возможностями (мониторинг (ДЗЗ) с передачей данных через спутниковую сеть) в результате также приводится трасса потоков информации и время задержки передачи информации (сигнала) на линии КА — Земля (абонент) (рис. 19).

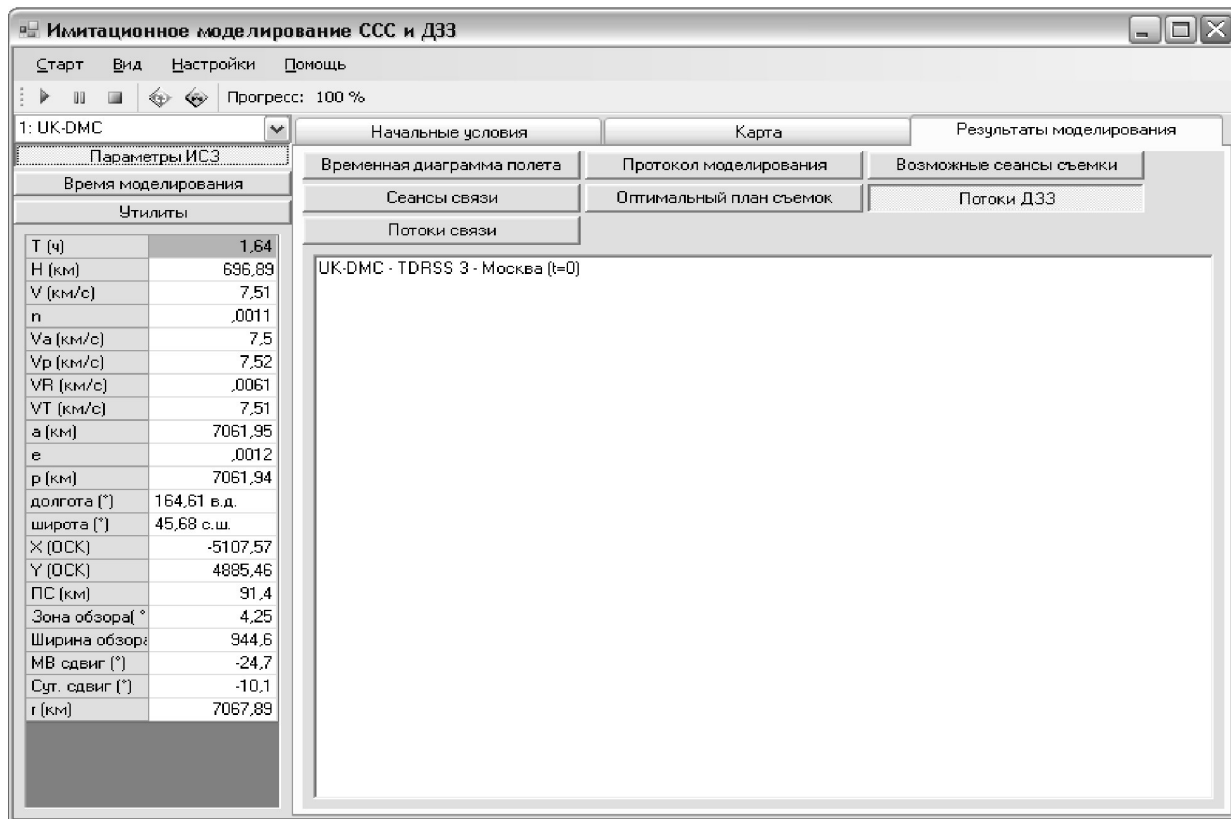


Рис. 19. Рабочее окно интерпретации трассы потоков информации и время задержки передачи информации (сигнала) на линии КА — Земля (абонент)

## 6. Пример построения циклограммы полета КА системы ДЗЗ и составления оптимального плана ее функционирования

Рассмотрим созвездие, состоящее из нескольких КА ДЗЗ: PECURP-ДК, RBVIEW3, TERRA, ALSAT, UK-DMC, NIGERIASAT, BILSAT, BEIJING.

Решим для этого созвездия оптимизационную задачу планирования при следующих начальных условиях:

-----КА с известными параметрами-----

- 1 — ORBVIEW 3
- 2 — RESURS-DK 1
- 3 — TERRA
- 4 — ALSAT 1
- 5 — UK-DMC
- 6 — NIGERIASAT 1
- 7 — BILSAT 1
- 8 — BEIJING 1

-----Объекты съемки-----

- 1 — Москва
- 2 — Санкт-Петербург
- 3 — Мурманск
- 4 — Владимир
- 5 — Тверь
- 6 — Архангельск
- 7 — Вологда
- 8 — Новгород
- 9 — Псков
- 10 — Саратов
- 11 — Красноярск
- 12 — Новосибирск
- 13 — Хабаровск
- 14 — Уссурийск
- 15 — Евпатория
- 16 — Дзержинск
- 17 — Магнитогорск
- 18 — Норильск
- 19 — Волгоград
- 20 — Дальнегорск
- 21 — Чернобыль
- 22 — Сумгаит

-----Назначение станции (ППИ)-----

- 1 — Москва
- 2 — Мурманск

-----НКУ-----

- 1 — Красноярск,

а также допущениях и ограничениях:

Случайная модель облачности

Освещенность не учитывается

Ограничение на местное время съемки не учитывается

Ограничение на дату съемки не учитывается

Оптимальный съемочный план (одна съемка каждого объекта за интервал моделирования) имеет следующий вид:

18. Норильск	NIGERIASAT 1	26.01.2009 9:05:13	-,56	1684,13
11. Красноярск	UK-DMC	26.01.2009 9:20:03	1,23	1741,51
6. Архангельск	ALSAT 1	26.01.2009 12:32:43	-,39	2483,93
10. Саратов	UK-DMC	26.01.2009 12:35:23	,43	1488,81
16. Дзержинск	UK-DMC	26.01.2009 12:36:53	,64	1433,64
4. Владимир	UK-DMC	26.01.2009 12:37:13	2,68	1620,06
7. Вологда	UK-DMC	26.01.2009 12:37:53	1,96	1689,7
3. Мурманск	UK-DMC	26.01.2009 12:40:33	-,47	1586,68
15. Евпатория	BEIJING 1	26.01.2009 13:31:33	-,09	1248,04
5. Тверь	BEIJING 1	26.01.2009 13:33:53	-6,25	1702,02
9. Псков	BEIJING 1	26.01.2009 13:35:03	-,36	1391,72
20. Дальнегорск	ORVIEW 3	26.01.2009 19:46:13	,24	845,42
17. Магнитогорск	RESURS-DK 1	26.01.2009 22:17:03	1,5	925,03
12. Новосибирск	NIGERIASAT 1	27.01.2009 0:05:13	-7,44	1366,68
22. Сумгаит	BEIJING 1	27.01.2009 1:27:23	,62	771,96



19. Волгоград	ALSAT 1	27.01.2009 1:58:03	-,32	994,75
1. Москва	BEIJING 1	27.01.2009 3:01:03	-6,05	1528,68
6. Архангельск	BEIJING 1	27.01.2009 2:58:43	-1,53	2436,2
21. Чернобыль	BEIJING 1	27.01.2009 3:02:53	-,8	887,93
2. Санкт-Петербург	NIGERIASAT 1	27.01.2009 3:21:13	-1,15	1814,53
13. Хабаровск	UK-DMC	27.01.2009 6:37:23	1,17	1645,54
14. Уссурийск	RESURS-DK 1	27.01.2009 8:55:03	-1,07	1177,47
J = 32464,41 ( J <sub>max</sub> = 32650 )				

Эффективность плана составила: 99 % от максимально возможного.

## Выводы

Разработанный программный комплекс для решения задачи оптимизация съемочных планов группировки космических аппаратов ДЗЗ позволяет находить оптимальный план (либо близкий к оптимальному) работы бортовой целевой аппаратуры ДЗЗ с учетом статических и динамических ограничений, проводить анализ включенных в оптимальный план всех моментов съемки и сеансов связи. Для получения прогнозов облачности необходимо использовать отвечающую действительности модель облачности, например прогноз облачности в баллах, что комплексом поддерживается. Представляется очевидным, что область применения данного комплекса не ограничивается приведенным в статье примером, и он имеет определенный потенциал развития, например для систем спутниковой связи и многоцелевых систем.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 07-08-00809-а, 09-08-01208-а).*

## Библиографический список

1. Дарных В.В., Малышев В.В. Планирование управления съемочной аппаратурой системы космических аппаратов // Изв. РАН. ТиСУ. 1998. № 6. С.135-149.
2. Darnoykh V., Malyshev V. Planning the Control of Survey Devices for a System of Satellites / Journal of Computer and Systems Sciences International (A Journal of Optimization and Control). — МАИК НАУКА / Interperiodica Publishing. 1998, V.37, № 6. P.957-969.
3. Малышев В.В., Дарных В.В. Оптимальное планирование работы бортовой целевой аппаратуры низкоорбитальных многоспутниковых систем // Сб. тр. II Междун. конф.-выставки «Малые спутники. Новые технологии. Миниатюризация. Области эффективного применения в XXI веке». Королев: ГОНТИ ЦНИИ МАШ, 2000. С.57-68.
4. Малышев В.В., Дарных В.В. Планирование экологического мониторинга земной поверхности системой дистанционного зондирования типа СВЕРС // Тр. XXXV научных чтений, посвящен-

ных разработке творческого наследия К.Э.Циолковского. М.: ИИЕТ РАН, 2000. С.63-64.

5. Малышев В.В., Дарных В.В. Методика планирования целевого функционирования систем спутниковой связи и мониторинга // Тез. докл. Междун. космической конф. «Космос без оружия — арена мирного сотрудничества в XXI веке». М.: МАИ, 2001. С.54.

6. Моисеев Д.В. Линейное программирование целевого функционирования ИСЗ наблюдения Земли // Авиакосмическое приборостроение. 2003. № 2. С.19-24.

7. Дарных В.В. Применение единого методического подхода к планированию целевого функционирования систем спутниковой связи и мониторинга // Тез. докл. 6-й Междун. конф. «Системный анализ и управление космическими комплексами». М.: МАИ, 2001. С.20-21.

8. Дарных В.В. Об общих принципах формализации задач планирования целевого управления системами спутниковой связи и мониторинга // Тр. XXXIX научных чтений, посвященных разработке творческого наследия К.Э.Циолковского. Калуга: Эйдос, 2004. С.92-93.

9. Дарных В.В., Малышев В.В. Унификация методик планирования целевого управления системами спутниковой связи и мониторинга // Тез. докл. 9-й Междун. конф. «Системный анализ и управление космическими комплексами». М.: МАИ, 2004. С.98-99.

10. Дарных В.В. О едином методическом подходе к формализации задач планирования целевого функционирования // Тез. докл. 3-й Междун. конф. и выставки «Авиация и космонавтика — 2004». М.: МАИ, 2004. С.65.

11. Дарных В.В. О комплексном методическом подходе к решению проблемы планирования целевого функционирования спутниковых систем мониторинга и связи // Тез. докл. 5-й Междун. конф. и выставки «Авиация и космонавтика — 2006». М.: МАИ, 2006. С.29-30.

12. Дарных В.В. Проблема оперативного планирования целевого функционирования спутнико-

вых систем мониторинга и связи и подходы к ее решению // Тез. докл. 6-й Междун. конф. «Авиация и космонавтика — 2007». М.: МАИ, 2007. С.7-8.

13. Дарных В.В. О разработке программно-математического обеспечения оперативного планирования целевого функционирования спутниковых систем мониторинга и связи // Тез. докл. 12-й Междун. научной конф. «Системный анализ, управление и навигация». М.: МАИ, 2007. С.109-110.

14. Дарных В.В. Методический подход к решению проблемы оперативного планирования функционирования многоцелевых спутниковых систем мониторинга и связи // Тез. докл. 7-й Междун. конф. «Авиация и космонавтика — 2008». М.: МАИ-ПРИНТ, 2008. С.49-50.

15. Дарных В.В. Особенности оперативного планирования функционирования многоцелевых спутниковых систем мониторинга и связи // Тез.-докл. 8-й Междун. конф. «Авиация и космонавтика — 2009». М.: МАИ-ПРИНТ, 2009. С.27-28.

16. Darnopykh V.V., Malyshev V.V. Operative planning of functional sessions for satellite observation and communication systems // Abstracts book of The 5th International Workshop of Constellations and Formation Flying. М: МАИ-ПРИНТ, 2008. С.64-65.

17. Darnopykh V.V., Malyshev V.V. Operative planning of functional sessions for multisatellite observation and communication systems // Proceedings of the 60th International Astronautical Congress, Daejeon, Republic of Korea, 2009. — Astrodynamics Symposium, Technical Session № 7 «Mission Operations». — IAC-09.C1.3.5, 13 с.

18. Дарных В.В., Калашников А.И. Автоматизация оперативного планирования наземной съемки спутниковой системой мониторинга // Тез. докл. 11-й Междун. конф. «Системный анализ, управление и навигация». М.: МАИ, 2006. С.160-161.

19. Дарных В.В., Калашников А.И. Специализированное программное обеспечение для оперативного планирования сеансов связи и наземного мониторинга системой спутников // Тез. докл. 6-й Междун. конф. «Авиация и космонавтика — 2007». М.: МАИ, 2007. С.8.

20. Дарных В.В., Калашников А.И. Автоматизация оперативного планирования сеансов связи и наземного мониторинга системой спутников с применением прикладного программного обеспечения // Тез. докл. 7-й Междун. конф. «Авиация и космонавтика — 2008». М.: МАИ-ПРИНТ, 2008. С.47-48.

21. Дарных В.В., Калашников А.И. Оперативное планирование мониторинга территории системой на базе малых многоцелевых спутников ДЗЗ // Тез. докл. 8-й Междун. Конф. «Авиация и космонавтика — 2009». М.: МАИ-ПРИНТ, 2009. С.25-26.

22. Малышев В.В., Бобронников В.Т., Дарных В.В. и др. Планирование целевого функционирования спутниковых систем мониторинга: Учебное пособие. М.: МАИ, 2002. 80 с.

23. Бобронников В.Т., Дарных В.В., Малышев В.В. и др. Автоматизация оперативного планирования и анализа эффективности целевого функционирования спутниковых систем мониторинга // Космонавтика и ракетостроение. 2003. № 4. С.47-62.

24. Чернов А.А., Чернявский Г.М. Орбиты спутников дистанционного зондирования Земли: Лекции и упражнения. — М.: Радио и связь, 2004. — 200 с.

25. Дарных В.В. Планирование целевого функционирования космических аппаратов и систем: задачи, методы и алгоритмы их решения // Интернет-журнал «Труды МАИ», 2004. Выпуск № 16. 15 с. <http://www.mai.ru>.

26. Беляев М.Ю. Научные эксперименты на космических кораблях и орбитальных станциях. — М.: Машиностроение, 1984.

27. Гарбук С.В., Гершензон В.Е. Космические системы дистанционного зондирования Земли. — М.: А и Б, 1997.

28. Малышев В.В., Красильщиков М.Н., Бобронников В.Т. и др. Спутниковые системы мониторинга. — М.: МАИ, 2000.

29. Чандра А.М., Гош С.К. Дистанционное зондирование и географические информационные системы. — М.: Техносфера, 2008.

30. Бертсекас Д., Галлагер Р. Сети передачи данных. — М.: Мир, 1989.

Моковский авиационный институт  
Статья поступила в редакцию 19.11.2009