

**В.Ф.Фатеев, В.Н.Лагуткин, А.П.Лукьянов, Е.Н. Подкорытов,
Ю.В.Слынько, А.М.Старостенко**

**Моделирование фоновых условий при наблюдении Земли с малых
космических аппаратов**

Аннотация

Рассмотрена задача моделирования процесса наблюдения Земли системой малых космических аппаратов (МКА), оснащенных многоспектральной оптической аппаратурой. Разработана подробная модель формирования входной информации оптической аппаратуры МКА при наблюдении природных объектов, учитывающая динамику атмосферных процессов и орбитального движения МКА, оптические свойства облаков различного микрофизического состава, земной поверхности, аэрозолей, ослабление излучения в атмосфере. Представлены примеры результатов моделирования участков земной поверхности с различных позиций в существенно различающихся спектральных диапазонах. Даны предложения по направлению работы по моделированию оптических наблюдений с МКА в интересах мониторинга различных естественных и искусственных явлений.

Ключевые слова

Математическое моделирование, динамика атмосферных процессов, оптическое наблюдение Земли, малые космические аппараты, многоспектральные наблюдения.

**V.F.Fateev, V.N.Lagutkin, A.P.Lukyanov, E.N.Podkorytov, U.V.Slynko,
A.M.Starostenko**

Background simulation of Earth observation from small satellites

Annotation

Task of simulation of Earth observation process by a system of small satellites equipped with multispectral optical instruments is considered. Detailed model of forming input information for optical instrument of small satellites at observation of natural objects is designed. The model takes into account dynamics of atmospheric processes and orbital movement of satellites, optical characteristics of clouds with various microphysical compositions, of Earth surface, aerosols and radiation attenuation in atmosphere. Examples of Earth simulation results from various positions in principally different spectral bands are presented. Proposals on directions of works on simulation of optical observations from small satellites for monitoring of various natural and artificial phenomena.

Key words

Mathematical simulation, Dynamics of atmospheric processes, Earth optical observation, small satellites, multispectral observations.

Введение

Существует концепция создания целого ряда малых космических аппаратов (МКА), предназначенных для решения разнообразных задач [1-3]. В данной статье мы ограничимся рассмотрением МКА с аппаратурой, предназначенной для наблюдения Земли в оптическом диапазоне [4]. Система таких МКА на низких орбитах способна получать изображения поверхности Земли и облачного покрова с высоким пространственным и спектральным разрешением [5].

В концептуальном плане использование МКА не подразумевает замену традиционных космических систем мониторинга, а должно дополнить и уточнить их информацию там, где это практически необходимо.

Для извлечения необходимой информации о состоянии поверхности Земли и облачной атмосферы из многоспектральных и стереоскопических изображений требуется разработка достаточно сложных алгоритмов обработки. Методы, лежащие в основе этих алгоритмов, основываются на решении обратных задач восстановления параметров по известным закономерностям их влияния на получаемые изображения. Для разработки и тестирования таких алгоритмов необходимо иметь модельное обеспечение, адекватно описывающее входную информацию оптической аппаратуры и ее изменения в зависимости от географического района, времени суток, сезона.

Структура модели и принципы ее работы рассматриваются ниже.

Структура и принципы работы модели мониторинга атмосферы и земной поверхности с МКА

Моделирование работы систем мониторинга состояния атмосферы и земной поверхности с МКА является необходимым этапом проектирования. Можно трактовать моделирование как решение прямой задачи формирования изображений при известном состоянии наблюдаемой сцены – атмосферы и земной поверхности. Очевидно, что основная задача мониторинга является обратной задачей по отношению к моделированию. Она состоит в восстановлении параметров наблюдаемой сцены – геометрии и физических свойств по изображениям из космоса, не может быть успешно решена без решения прямой задачи. Взаимосвязь прямой и обратной задач моделирования иллюстрируется схемой рис.1.

Коротко сформулируем основные требования к модели мониторинга Земли, вытекающие из решаемой конечной задачи.

- трехмерность, то есть подробность описания пространственных форм облаков и земной поверхности.
- динамичность, то есть учет изменений во времени расположения и формы облаков.
- многоспектральность, то есть возможность получения одновременных изображений наблюдаемой сцены в разных спектральных диапазонах
- многопозиционность, то есть получение стереоизображений

В соответствии с этими требованиями модель должна включать модули, представленные на укрупненной структурной схеме рис.2. Физико-математические принципы работы модели опубликованы в [6-7].

Принципиальными моментами использованного в модели подхода к формированию изображений Земли из космоса являются:

- использование подробной карты рельефа и оптических свойств земной поверхности
- трехмерное моделирование эволюции атмосферных термодинамических параметров и поля ветров в квазигеострофическом приближении, описывающем основные атмосферные процессы и не требующем значительных затрат вычислительных ресурсов
- трехмерное моделирование процесса формирования и развития состояния облачного покрова
- моделирование оптических свойств облаков различного микрофизического состава в произвольных спектральных диапазонах видимого и ИК спектров: модель позволяет получать гиперспектральное разрешение
- учет эффектов ослабления излучения в атмосфере, взаимного затенения облаков и земной поверхности при формировании изображений
- моделирование основных преобразований изображения в аппаратуре сенсора – дифракции в оптической системе, фотоэлектронного преобразования в матрице фотоприемника с учетом квантовой природы шумов

Примеры результатов работы модели мониторинга атмосферы и земной поверхности с МКА

В качестве иллюстраций работы модели на рис.3 представлены результаты, полученные при моделировании последовательности многоспектральных наблюдений, которые могут быть получены с низкоорбитального МКА. Спектральные диапазоны

работы аппаратуры МКА выбраны в принципиально различных областях инфракрасного спектра. Первый спектральный диапазон – в районе 1.6 мкм, соответствует полосе пропускания атмосферы. Второй диапазон – 2.5 мкм, находится вблизи полосы сильного поглощения атмосферы. В первом и втором диапазонах основной вклад в получаемые изображения вносит рассеянное облаками и земной поверхностью излучение Солнца. В третьем диапазоне – 5.5 мкм, солнечное излучение незначительно по сравнению с собственным тепловым излучением Земли.

Сравнение изображений разных спектральных диапазонов показывает их основные особенности. Изображение в диапазоне прозрачности атмосферы напоминает привычные изображения видимого диапазона. При переходе в диапазон поглощения атмосферы проявляется сильное ослабление излучения земной поверхности (за исключением горных вершин) относительно ослабления излучения облаков. Облака становятся самыми яркими излучающими объектами. В тепловом диапазоне мы наблюдаем, фактически, температурную карту Земли. Облака и горные вершины, как более холодные объекты излучают меньше и выглядят относительно темными.

Геометрические трансформации изображений в целом достаточно очевидны. Из подробностей здесь можно отметить эффект параллакса, особенно хорошо заметный при рассмотрении кажущихся смещений облаков, находящихся над береговой линией.

На рис.4,5 представлены результаты моделирования изображений одного и того же района с различных позиций и соответствующие им фрагменты изображения метеорологического спутника NOAA. Рис.4 соответствует наблюдению района практически в вертикальном направлении (под собой), а рис.5 – наклонному наблюдению с зенитным углом около 55°.

Сравнение модельных изображений с полученными метеоспутником показывает их близость в части, касающейся деталей изображения земной поверхности. В части изображений облаков детальное сходство при статистическом моделировании не может быть достигнуто. Его можно рассматривать только как похожесть в целом по статистическому ансамблю. Не прибегая к строгим критериям похожести, выработать которые весьма сложно, ограничимся констатацией схожести модельных и реальных изображений облаков при их визуальном анализе.

Пути возможного совершенствования модели и ее применения при разработке алгоритмов мониторинга Земли

Разработанная модель позволяет формировать изображения постоянно существующих, либо регулярно возникающих природных объектов. К перспективным направлениям работ по развитию модели можно отнести включение в ее состав объектов,

возникающих при чрезвычайных и аномальных ситуациях на поверхности Земли и в атмосфере.

В части практического использования модели можно отметить такое перспективное направление исследований как решение задачи разработки алгоритмов обнаружения и классификации естественных и искусственных объектов в атмосфере и на земной поверхности на базе многоспектральных многопозиционных снимков с МКА. Наличие подробной модели формирования входных изображений позволит получить оценки потенциальной чувствительности разрабатываемых алгоритмов обнаружения различных объектов и точности восстановления их параметров.

Выводы

1. Отмечена практическая значимость и сложность задачи мониторинга Земли, в частности, состояния атмосферы и облаков.
2. Показана роль подробного моделирования наблюдения Земли из космоса с помощью перспективных МКА при решении задач восстановления состояния атмосферы и земной поверхности по спутниковым данным.
3. Разработана модель получения многоспектральных многопозиционных изображений земной поверхности и облаков орбитальной группировкой МКА.
4. Представлен ряд примеров результатов моделирования на разработанной модели.
5. Намечены пути возможного совершенствования модели для учета дополнительных объектов и явлений, имеющих место в атмосфере, и разработки алгоритмов их обнаружения и классификации.

Литература

1. А.А.Ардашов. Основные тенденции в конструировании МКА. Изв. ВУЗОВ. Приборостроение, 2004, Т.47, №3, с.9 – 15.
2. В.Ф.Фатеев. Концепция создания орбитальных группировок сверхмалых космических аппаратов в интересах информационного обеспечения северных территорий России. Изв. ВУЗОВ. Приборостроение, 2004, Т.47, №3, с.5 – 9.
3. И.Е.Зайцев, А.Г.Сайбель, В.Ф.Фатеев. Система контроля наземных объектов с использованием перспективных МКА. Изв. ВУЗОВ. Приборостроение, 2004, Т.47, №3, с.22 – 27.

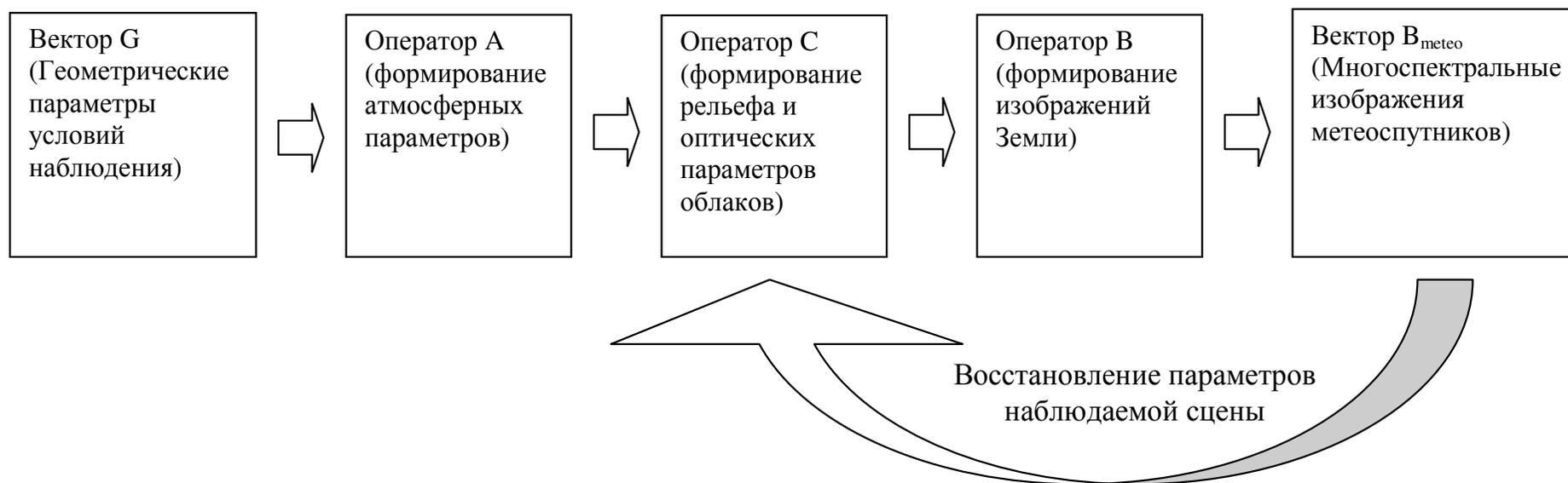


Рис.1. Постановка прямой и обратной задач моделирования мониторинга Земли с МКА.

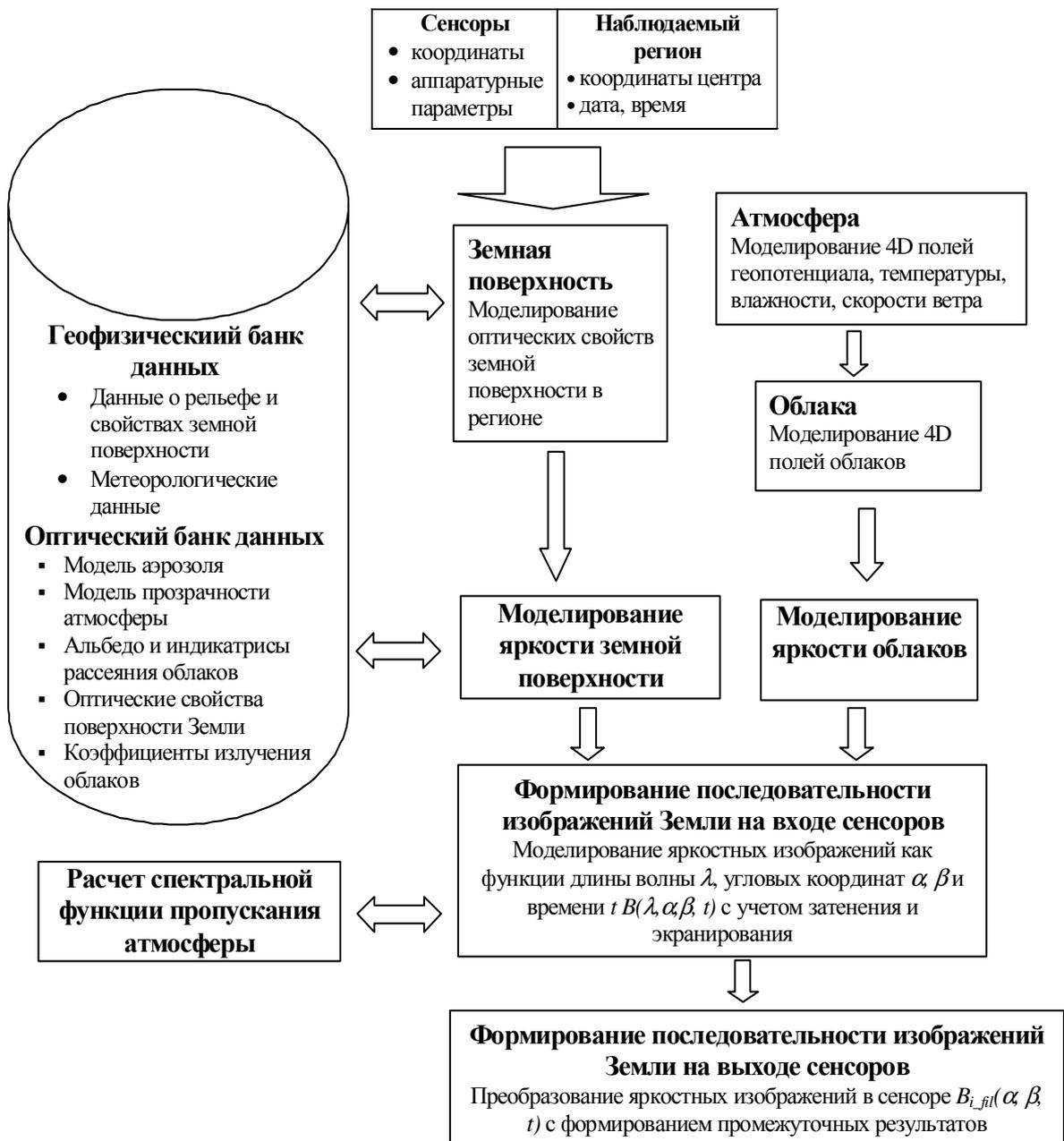


Рис.2. Блок-схема модели системы мониторинга Земли.

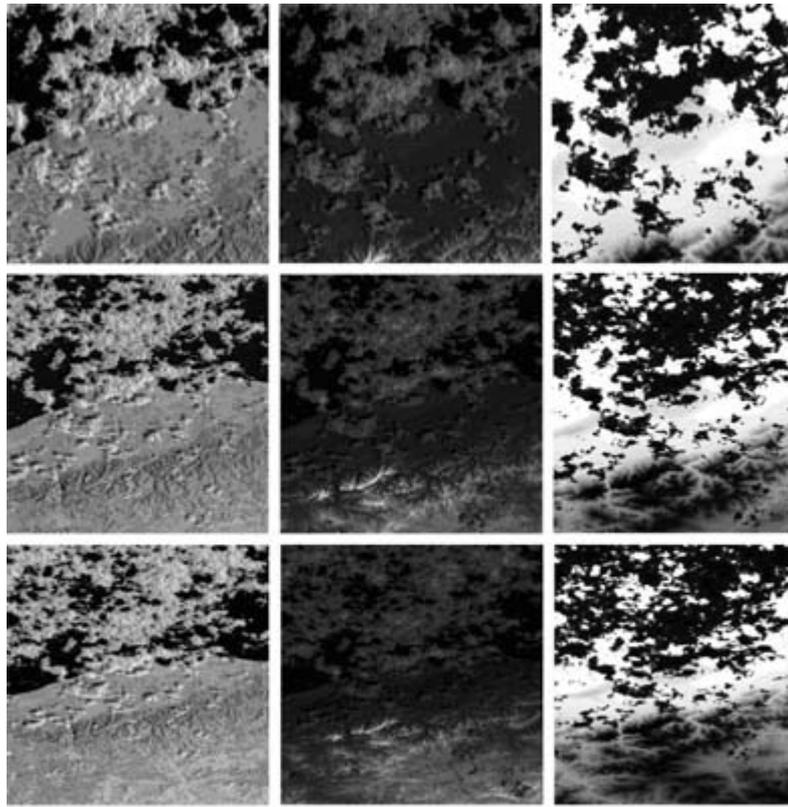


Рис.3. Модельная последовательность изображений Земли при движении МКА на восходящей ветви орбиты (ряды сверху вниз – зенитные углы наблюдения $19^\circ, 48^\circ, 57^\circ$) в трех диапазонах длин волн (столбцы слева направо – 1.6 мкм, 2.5 мкм, 5.5 мкм).

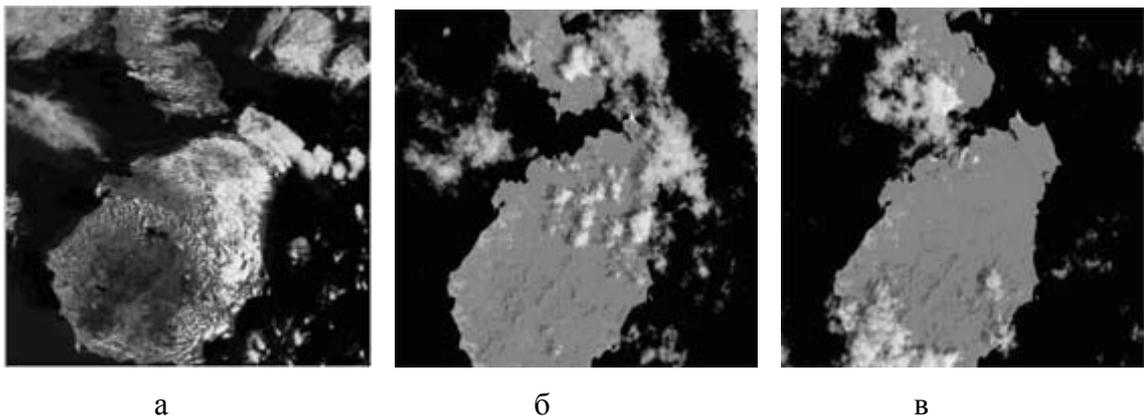


Рис.4. Изображение района в диапазоне 1.6 мкм, полученное метеоспутником (а), модельные изображения района (б, в).

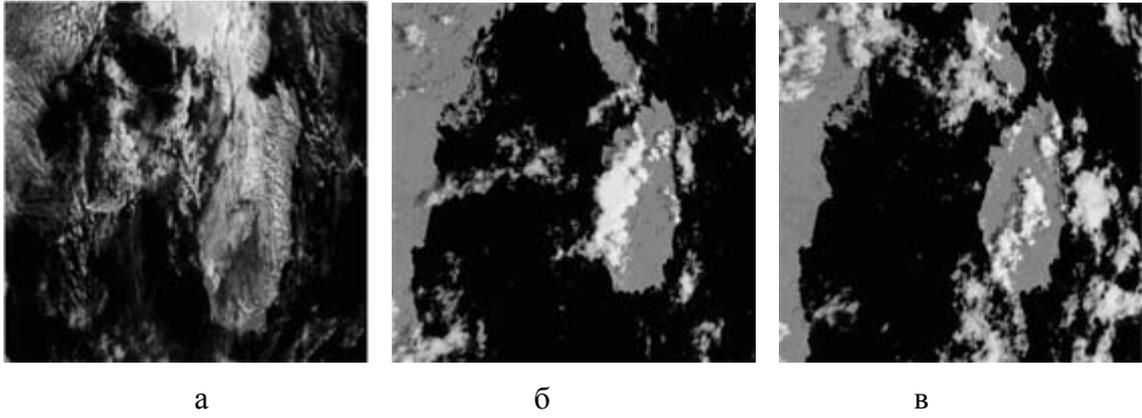


Рис.5. Изображение района в диапазоне 1.6 мкм, полученное метеоспутником (а), модельные изображения района (б, в).