

- В.Н.Лагуткин, А.П. Лукьянов, Е.Н. Подкорытов, Ю.В. Слынько, А.М Старостенко

Результаты моделирования пространственно-временных полей яркости ИК-фонов облачной атмосферы и поверхности Земли

Разработана компьютерная модель фона облачной атмосферы и земной поверхности. Показаны функциональные возможности модели фона в физико-математическом (автономном) и полунатурном (с использованием метеорологических данных) режимах работы. Проведено сопоставление результатов моделирования изображений фона с экспериментальными данными.

Рассматриваемая модель фона Земли является результатом развития модели, представленной в работе [1], путем введения в ее состав модулей эволюции атмосферных параметров [2], имитации рельефа и оптических характеристик земной поверхности [3], расчета атмосферного ослабления излучения на базе данных HITRAN [4].

Для представляемой компьютерной модели характерны следующие основные отличия:

- *наличие различных режимов моделирования:*
 - автономного (без использования внешних данных);
 - полунатурного (с использованием метеорологических данных о состоянии атмосферы и многоспектральных космических снимков), предназначенного для получения квазиреальных последовательностей фона;

- *моделирование процесса эволюции атмосферных параметров и ветровых переносов воздушных масс;*
- *детальное моделирование земной поверхности с использованием банка данных по рельефу и оптическим характеристикам земной поверхности с высоким разрешением,*
- *учет пространственной неоднородности полей фона;*
- *учет временной нестационарности фона;*
- *моделирование многоспектральных полей яркости фона путем расчетов*
 - *альбедо и индикатрис однократного рассеяния на частицах облаков различного микрофизического состава,*
 - *многократного рассеяния света слоистыми облаками (водяными, ледяными, смешанными);*
- *вычисление градиентов яркости фона на границах облаков с использованием специальной аппроксимации рельефа облаков;*
- *использование детального расчета атмосферного пропускания, построенного на базе данных HITRAN;*
- *моделирование одновременного наблюдения фона с нескольких позиций, обеспечиваемое*
 - *трехмерным геометрическим моделированием рельефов Земли и облаков,*
 - *учетом микрофизического состава облаков, влияющего на форму индикатрисы многократного рассеяния,*

- программой быстрой трассировки лучей, формирующих изображение фона с использованием современных методов организации хранения и доступа к данным о рельефах, и программными средствами ускорения.
- *Открытая архитектура модели, позволяющая дополнять состав моделируемых источников фона новыми объектами без существенного изменения принципов моделирования.*

Структура модели фона

Блок-схема разработанной модели фона представлена на рис.1.

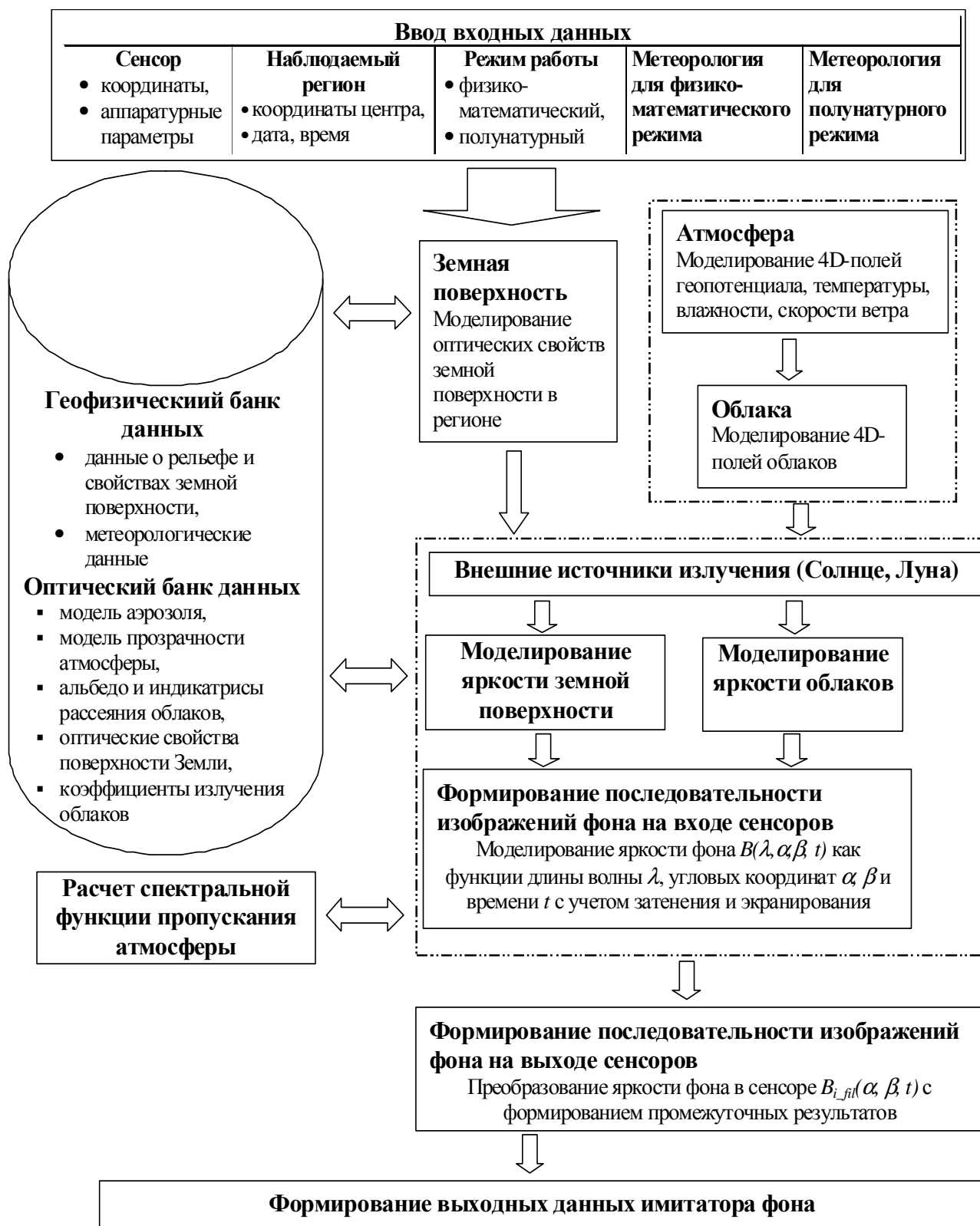


Рис.1. Блок-схема модели фона

Представленные блоки обеспечивают ввод входных данных и моделирование:

полей атмосферных параметров,
рельефа и состояния земной поверхности,
состояния и динамики облаков,
внешних источников излучения (Солнце, Луна),
излучения земной поверхности,
излучения облаков и атмосферы,
прохождения фонового излучения через атмосферу с учетом молекулярного поглощения атмосферой и рассеяния на аэрозолях,
последовательности фоновых изображений от поверхности Земли, облаков и атмосферы,
преобразования последовательности фоновых изображений в аппаратуре сенсора (сенсоров).

Банк данных модели включает: метеорологические данные, данные для модели аэрозоля, данные для модели прозрачности атмосферы, данные для вычисления альбедо и индикатрис рассеяния облаков, данные о рельефе и оптических свойствах земной поверхности.

Диапазон входных параметров модели (условий наблюдения, аппаратуры) характерен для используемых и перспективных оптических средств.

Рассмотрим математические методы, используемые при работе основных блоков модели.

Моделирование динамики атмосферы основано на численном решении системы эволюционных уравнений в квазигеострофическом приближении. Начальные условия для системы уравнений в автономном и полунатурном режимах работы модели задаются следующим образом:

- в автономном режиме – с помощью специально разработанного генератора случайных 3D-полей метеорологических параметров, учитывающего авто- и кросскорреляционные функции термодинамических параметров атмосферы, негауссовость их распределений относительно средних значений;
- в полунатурном режиме в качестве начальных условий используются данные измерений метеорологических полей, интерполированные к расчетной сетке численного метода решения уравнений.

Моделирование процесса формирования облаков осуществляется в два этапа:

- преобразование динамически изменяющегося поля влажности, получающегося в результате решения системы уравнений, в двумерные контуры облаков, которое включает
 - стратификацию поля влажности по высоте,
 - стохастическую модуляцию полей влажности каждого высотного слоя (яруса) для учета флуктуаций, масштаб которых меньше масштаба моделирования атмосферы,
 - преобразование влажности в температуру точки росы, сравнение с полем температуры, и формирование контуров облаков для каждого яруса;

- стохастическая генерация верхней границы облаков каждого яруса в пределах сформированных контуров.

Моделирование фоновых изображений проводится в лучевом приближении. Рельефы поверхности Земли и облаков аппроксимируются набором треугольных площадок в соответствии с обычно используемым подходом [5,6], оптимизированным с учетом особенностей моделирования. Вклад в изображение фона от каждой площадки вычислялся с учетом индикатрис рассеяния, поглощения в атмосфере, взаимного затенения, которое для полупрозрачных облаков может быть частичным.

Результаты моделирования, полученные в автономном режиме работы модели фона

Результаты моделирования эволюции атмосферных параметров

Для сопоставления результатов решения эволюционных уравнений с экспериментальными данными, модельное состояние атмосферы фиксировалось с интервалом поступления метеорологических данных от наземной сети (6 ч.). На рис.2 показана модельная (внизу) и реальная (вверху) динамика изменения поля геопотенциала на интервале 18 ч. Их сопоставление показывает, что развитие и перемещение центра циклона в модели соответствует эксперименту по направлению перемещения центра циклона, скорости его перемещения и характера изменения формы во времени.

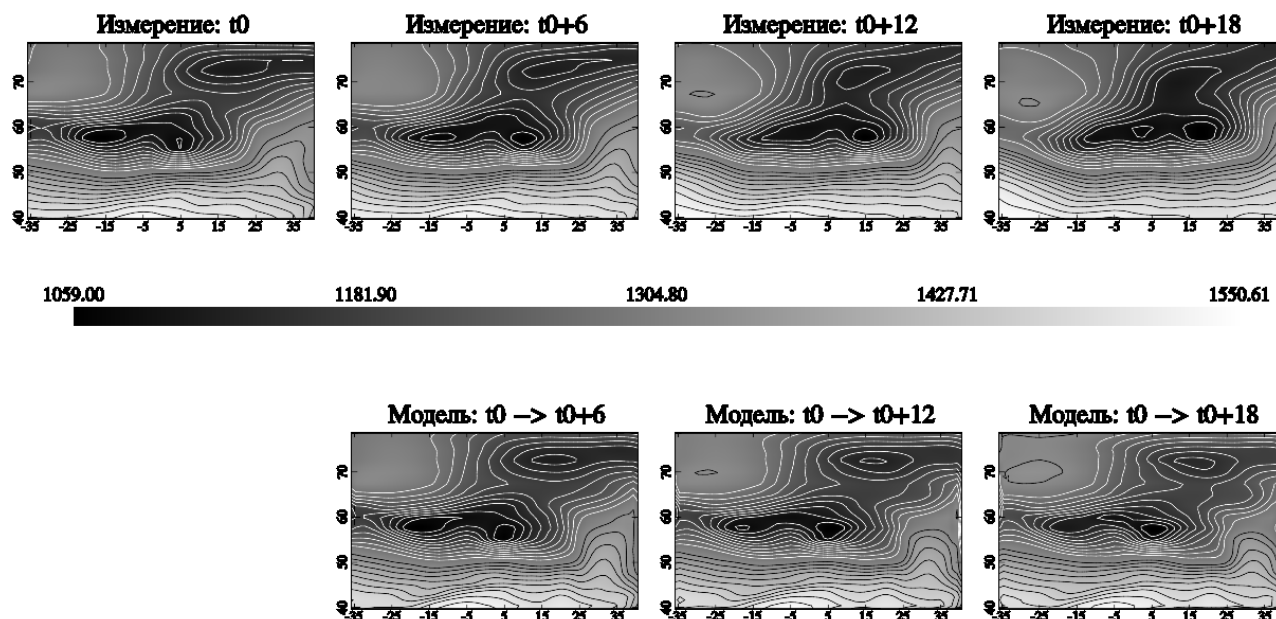


Рис.2. Сопоставление модельной динамики развития циклона с экспериментальными данными

Результаты моделирования яркости фона земной поверхности

Модельное изображение фона Земли для безоблачных условий, полученное при высокой разрешающей способности сенсора (около 100 метров) представлено на рис.3.

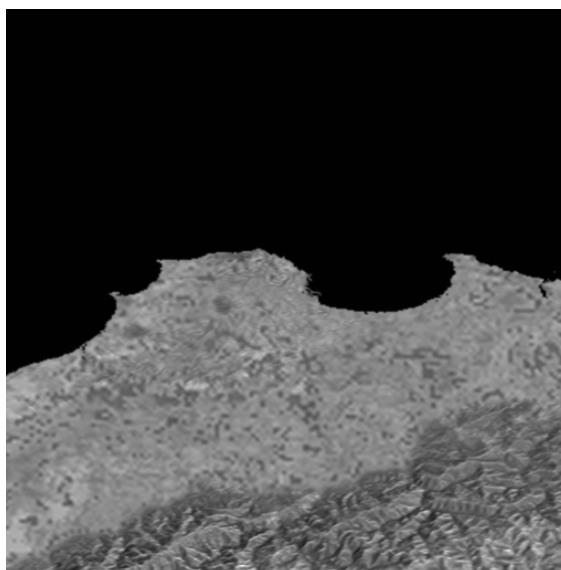


Рис 3. Фон при безоблачной атмосфере в спектральном диапазоне 2 – 2,5 мкм при наблюдении северного побережья Африки (Алжир)

На рис.4 приведены модельные и экспериментальные изображения фона Земли, полученные для побережья Мьянмы (19°N, 94°E) в спектральном диапазоне, соответствующем второму фильтру спутника NOAA (0,725 – 1,0 мкм). Разрешающая способность модели выбрана в соответствии с разрешающей способностью метеоспутника (~ 1,1 км).

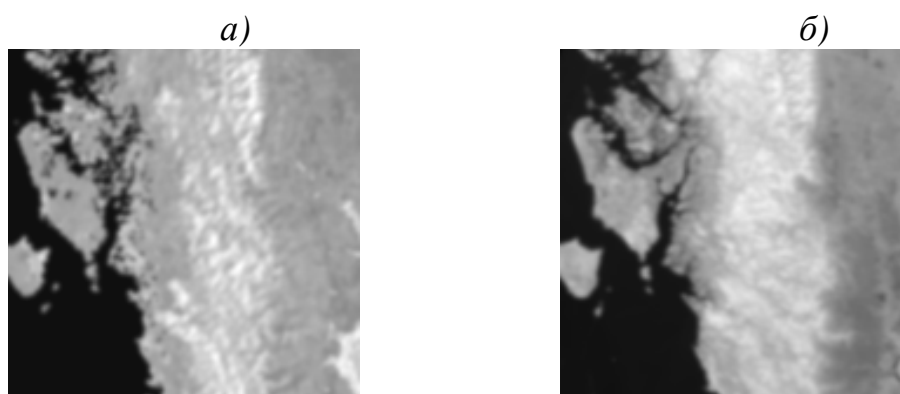


Рис.4. Модельные (а) и экспериментальные (б) изображения фрагмента безоблачной земной поверхности

Статистические параметры яркости для модельных (М) и экспериментальных (Э) данных (NOAA) представлены ниже.

	М [Вт/м ² /ср]	Э [Вт/м ² /ср]
Минимум	1,83	1,63
Максимум	31,57	30,73
Математическое ожидание	17,08	16,54
СКО	8,32	8,32

Их соответствие, как по статистическим характеристикам, так и при визуальном сопоставлении можно считать удовлетворительным.

Результаты моделирования индикатрис многократного рассеяния облаков

На рис.5 представлены расчетные индикатрисы многократного рассеяния водяных облаков на длине волны 2,8 мкм, лежащей в полосе поглощения воды. Зенитные углы падения составляют 30, 45, 60 и 85°. Ракурс представления индикатрис выбран таким образом, чтобы направление падающего излучения находилось слева. В этом направлении, как видно из рис.5, расположен достаточно узкий локальный максимум индикатрис рассеяния. С увеличением угла падения величина этого максимума (доли отраженного назад излучения) уменьшается. При очень пологом падении излучения (85°) возникает прижатый к плоскости облака лепесток рассеяния вперед, существенно превосходящий обратное рассеяние.

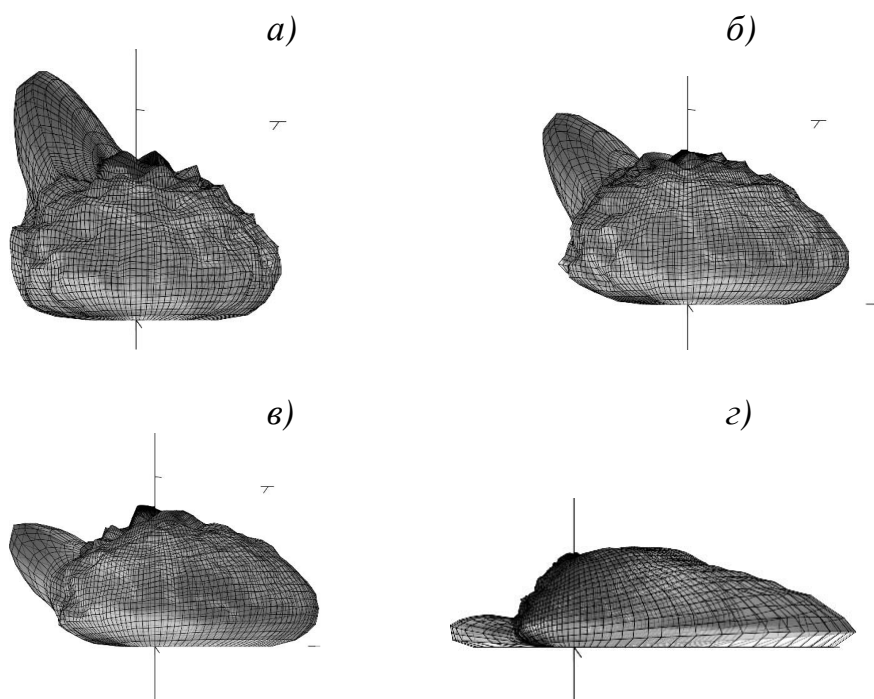


Рис.5. Индикатрисы многократного рассеяния водяного облака на длине волны 2,8 мкм при зенитных углах падения излучения 30° (а), 45° (б), 60° (в) и 85° (г)

3.1. Результаты моделирования тонкой спектральной структуры фона с использованием банка данных HITRAN

При моделировании процесса ослабления излучения в атмосфере используется максимально подробная модель расчета атмосферного пропускания, построенная на базе данных HITRAN. Она позволяет получать тонкую структуру спектров практически с любым спектральным разрешением. Модель учитывает зависимость параметров линий поглощения газов, входящих в состав атмосферы, от температуры и плотности. На рис.6, 7 приводятся примеры тонкой структуры спектров фона водяного и ледяного облаков в полосе 2,5 – 3,0 мкм. Яркость дана в дБ/(Вт/м²/ср/мкм).

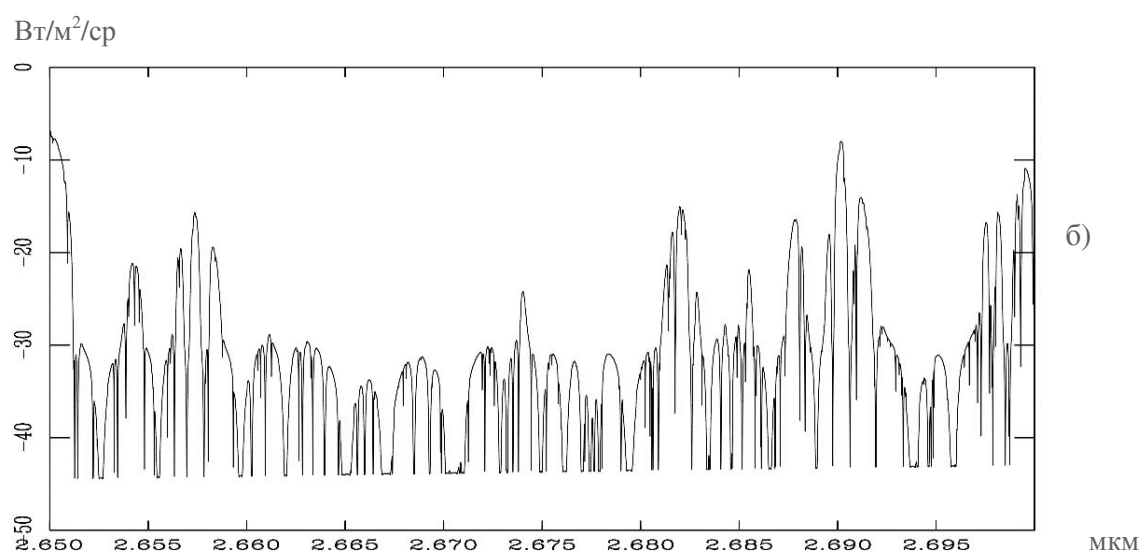
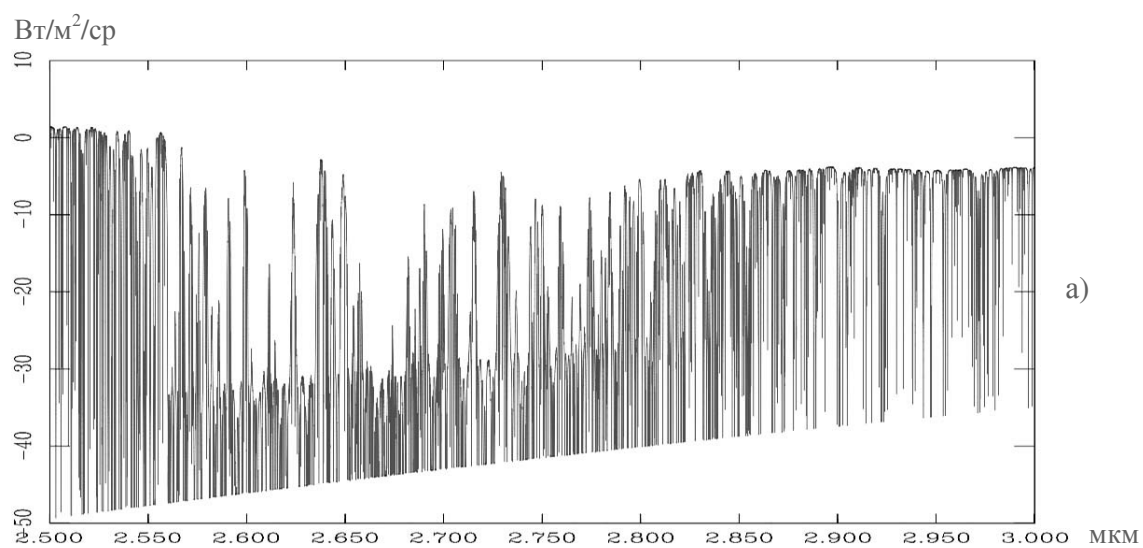


Рис.6. Тонкая структура спектра яркости водяного облака на высоте 5 км при наблюдении в надиr в полосе 2,5 – 3,0 мкм. (а). Фрагмент спектра в полосе 2,65 – 2,7 мкм (б).

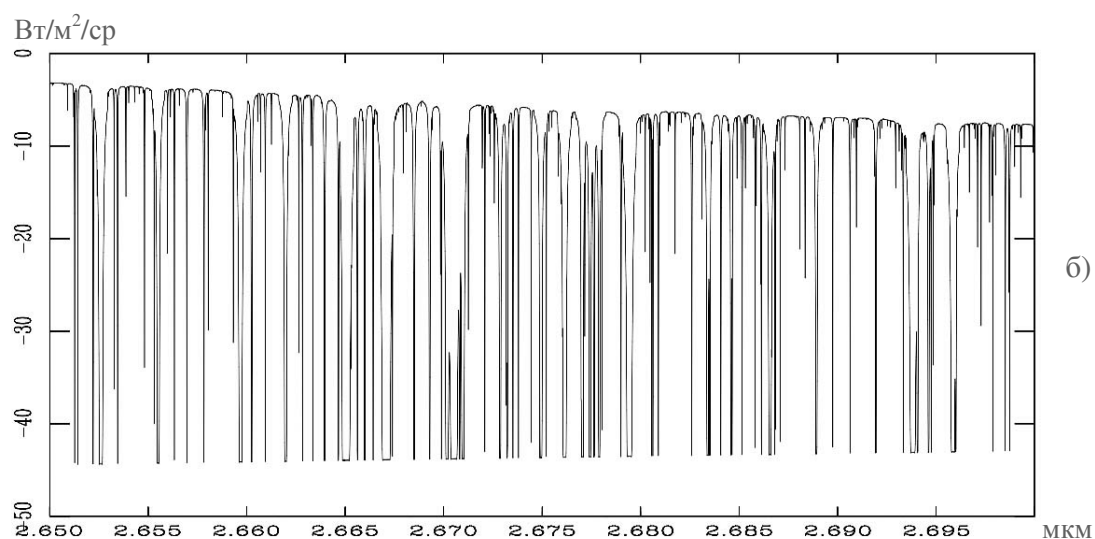
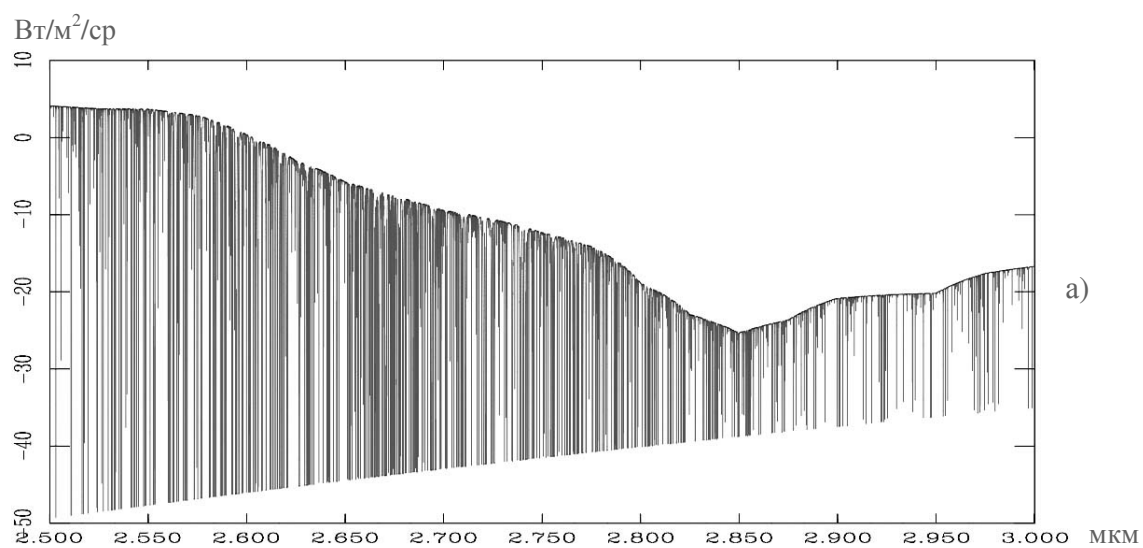


Рис.7. Тонкая структура спектра яркости ледяного облака на высоте 5 км при наблюдении в надиr в полосе 2,5 – 3,0 мкм. (а). Фрагмент спектра в полосе 2,65 – 2,7 мкм (б).

Характерная черта этих спектров (см. рис.6, 7) – их сильная изрезанность, связанная с наличием полос поглощения газов атмосферы, которая не проявляется при низком спектральном разрешении.

Результаты моделирования яркости фона на границе облака

В результате исследований процесса рассеяния света на границе облака и сопоставлений с точными расчетами был предложен и разработан алгоритм, позволяющий получать не противоречащие физическим представлениям результаты без проведения сложных электродинамических расчетов в процессе моделирования.

Суть проблемы состоит в том, что объемное рассеяние излучения облаками не сводится к суперпозиции рассеяний от плоских поверхностей, касательных к облаку. Для примера рассмотрим рис.8, на котором представлено три изображения фрагментов закругленных границ облаков, рассчитанных с одной и той же позиции наблюдателя разными способами.

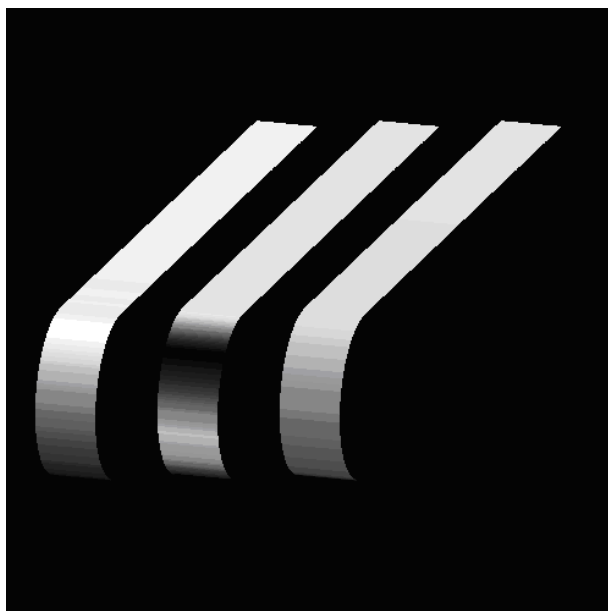


Рис.8. Слева направо представлены изображения: полученные по точному расчету, по расчету в приближении касательного слоя и по предлагаемому комплексному алгоритму.

Средний фрагмент демонстрирует важность рассматриваемой проблемы. По правому фрагменту видно, что результаты работы предложенного алгоритма близки к результатам точного расчета.

Приведем характеристику условий моделирования, при которых были получены представленные результаты. Облачный слой состоял из водяных капель. На него падало солнечное излучение под углом 45° с азимута 0° , отсчитываемого от перпендикуляра к границе, ориентированного внутрь облака. Наблюдение этого слоя велось сенсором с приблизительно встречного направления (азимут 160° , зенитный угол 70°). При таких условиях расчеты сложны, так как, очевидно, что большая часть закругления облака не освещена прямыми лучами Солнца. Однако, при этом сенсору доступно наблюдение практически всего закругленного участка облака, находящегося в тени.

Оптическая толщина облачного слоя составляет 10 длин свободного пробега фотона, что также создает трудности при моделировании, так как при такой толщине рассеяние уже не описывается в приближении однократного рассеяния, но еще далеко от предельного случая непрозрачного облака. Интегральный коэффициент прозрачности рассматриваемого облака составляет ~ 0.5 .

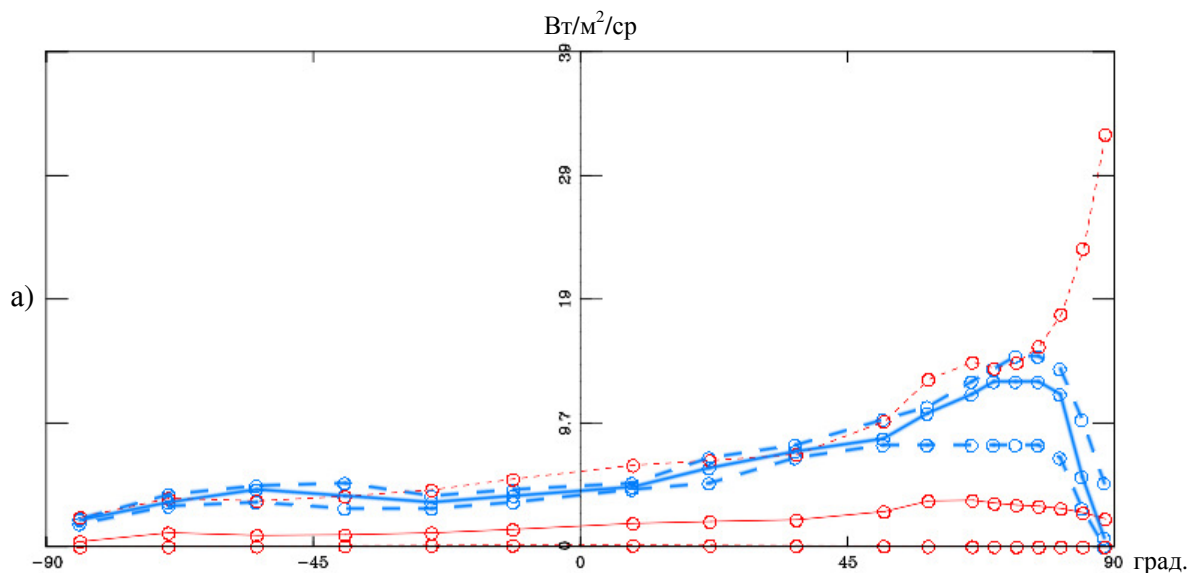
Результаты моделирования яркости фона ледяных облаков

Рассмотрим следующий вариант условий.

С помощью сенсора наблюдаются ледяные облака в фиксированном регионе, для которого зенитный угол направления на наблюдателя составляет 75° . Практически, это максимальный угол, при котором доступны экспериментальные данные от метеорологических спутников. При выборе ледяного облака вблизи экватора в условиях

равноденствия Солнце в течение 12 ч. проходит все углы рассеяния от 15 до 180°. Это соответствует изменению зенитного угла Солнца от 90° (при встречном азимуте наблюдения) до 75° (при обратном азимуте наблюдения). Для различения ситуаций встречного и попутного наблюдений будем условно считать зенитный угол Солнца при встречном наблюдении положительным (разность азимутов на наблюдателя и Солнце 180°) и отрицательным – при попутном наблюдении.

Экспериментальные и модельные зависимости яркости фона от определенного таким образом угла расположения Солнца представлены на рис.9 для двух диапазонов работы метеоспутника. При построении модельной зависимости было использовано предположение о наиболее типичном микрофизическом составе ледяных облаков с относительно небольшими характерными размерами кристаллов ~ 20 мкм. Зенитный угол сенсора - 75° (пригоризонтное наблюдение). Ледяное облако находилось на высоте 15 км.



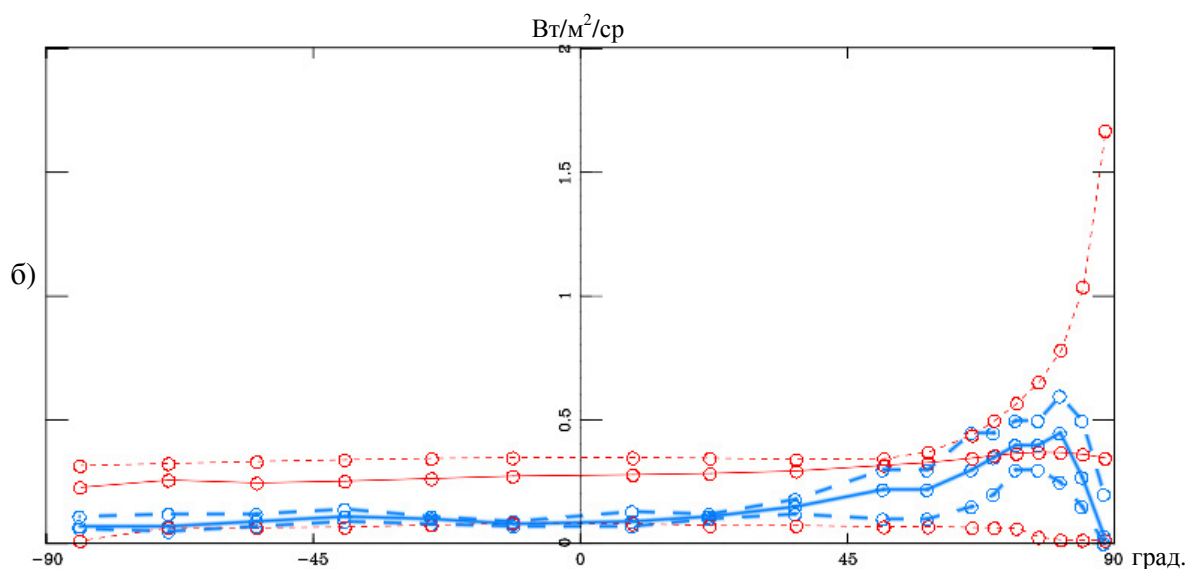


Рис.9. Экспериментальная (жирная линия о—о—о) и модельная (тонкая линия о—о—о) зависимости яркости фона от углового положения Солнца в спектральных диапазонах 1,6 (а) и 3,8 (б) мкм. Маркированные линии обозначают диапазоны среднеквадратических отклонений: о — — — о — — — о — для экспериментальных значений; о-----о-----о — для модельных значений.

Соответствие зависимостей может считаться удовлетворительным, если учитывать имеющуюся неопределенность относительно степени изрезанности рельефа верхней границы облаков, с которыми проводилось сопоставление. Необходимо отметить вполне адекватное описание явления так называемого «пригоризонтного блика», состоящего в значительном усилении яркости фона при малых углах рассеяния.

4. Результаты, полученные в полунатурном режиме работы модели фона

Моделирования фонов в полунатурном режиме работы модели позволяет подавать на ее вход как данные метеорологических наблюдений, так и спутниковые снимки. При работе модели в автономном режиме (прямое моделирование) данные этих типов

являются выходными. Их использование в полунатурном режиме требует решения обратной задачи – поиска таких входных данных модели, при которых выходные изображения фона будут близки к наблюдаемым метеорологическими спутниками, а карты атмосферных параметров – к данным метеорологической сети наблюдений.

Для сопоставления были выбраны условия среднеширотного циклона. Циклонические атмосферные явления представляют повышенный интерес при моделировании мешающего фона, поскольку в таких условиях возникает сильная облачность на разных высотах, движущаяся с большими скоростями. Кроме того, поле скоростей в пределах циклона, как известно, имеет неоднородную (вихревую) структуру, что также представляет интерес и вызывает трудности при моделировании фонов и исследовании алгоритмов их обработки.

Фрагмент циклона, взятый из данных NOAA-15, представлен на рис.10 для диапазона длин волн 0,7 – 1,0 мкм, соответствующего одному из каналов этого метеорологического спутника.

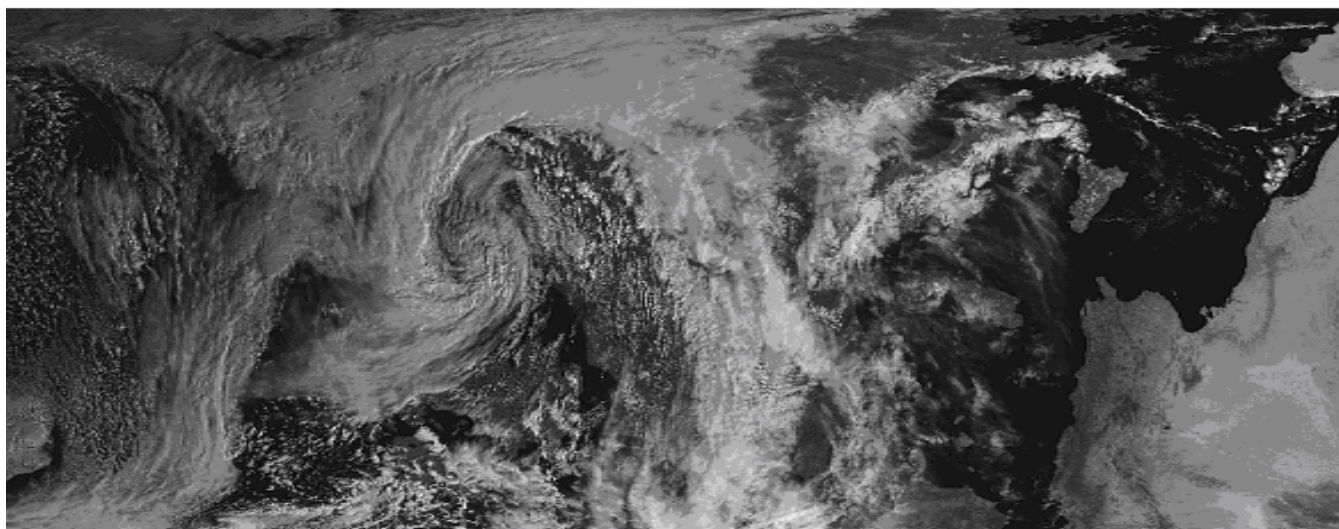


Рис.10. Фрагмент исходного изображения циклона, полученного спутником NOAA-15

Изображение того же циклона, приведенное к географической сетке координат, показано на рис.11.

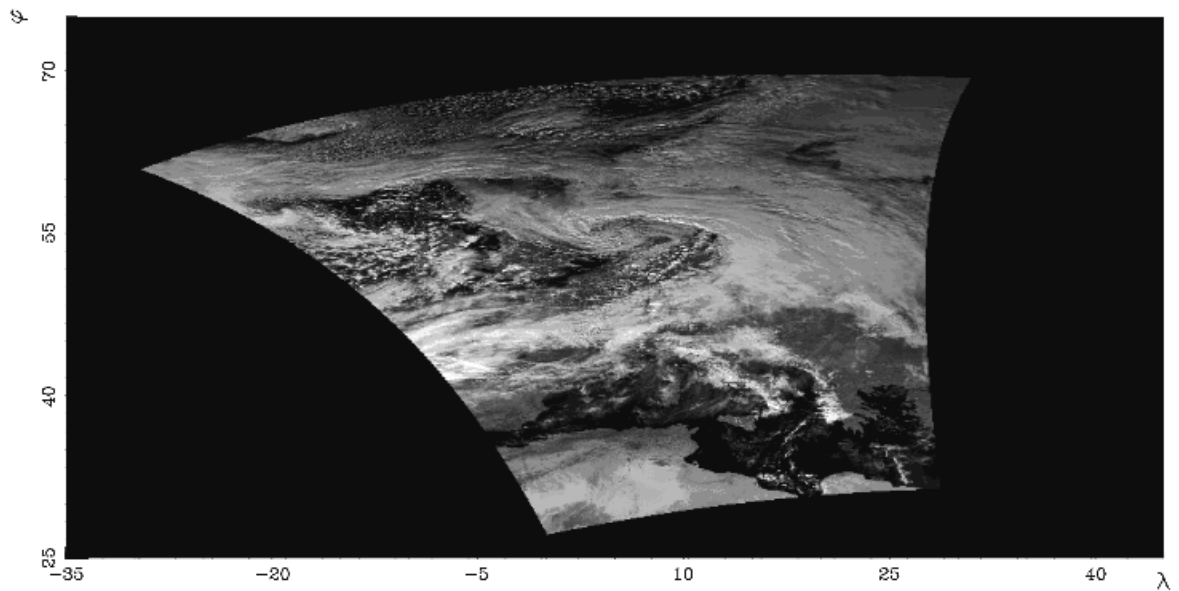


Рис.11. Изображение того же циклона в диапазоне 0.7 – 1.0 мкм после приведения к географическим координатам

В результате решения обратной задачи из спутниковых данных была восстановлена карта высот верхней границы облачности (рис.12).

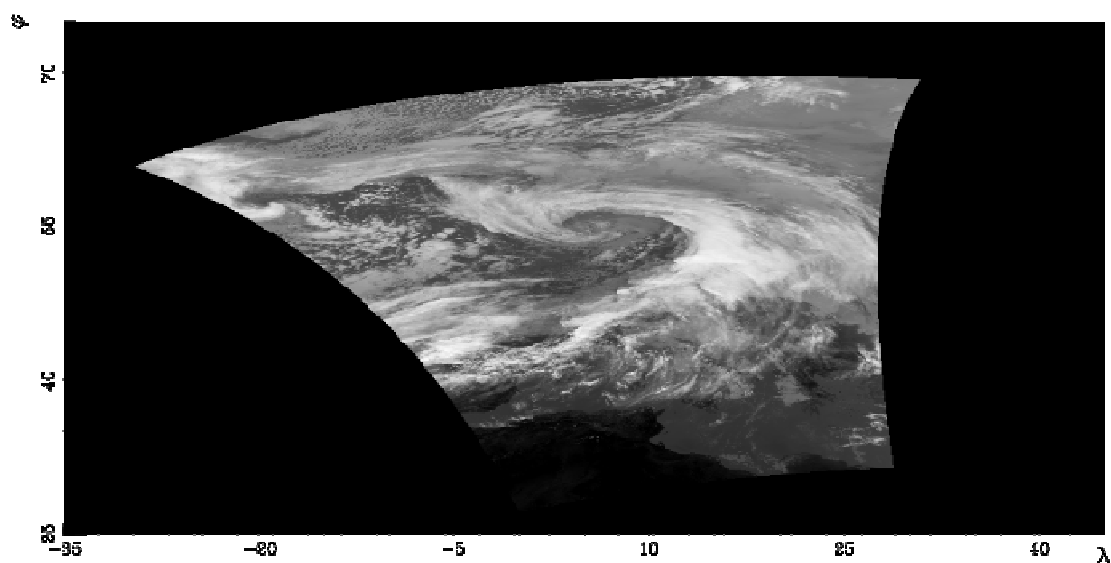


Рис.12. Рельеф верхней границы облачности, восстановленный моделью по многоспектральным спутниковым изображениям циклона

По этой карте облаков можно путем решения прямой задачи, используя автономный режим моделирования, получить изображения этого фрагмента в произвольном спектральном диапазоне.

Заключение

Разработана многофункциональная компьютерная модель фона облачной атмосферы и земной поверхности. Модель составляют следующие основные модули: атмосферных параметров, земной поверхности, облаков, прозрачности атмосферы, формирования последовательностей изображений.

Преимуществом модели является возможность ее работы в двух режимах: физико-математическом (автономном) и полунатурном (с использованием метеорологических данных). Функциональные возможности модели фона в автономном и полунатурном режимах работы дают возможность проводить не только стохастическое моделирование

и получать статистические характеристики фонов, но осуществлять детальные исследования конкретных ситуаций, представляющих практический интерес, привлекая для этого данные метеорологических спутников.

Сопоставление результатов моделирования изображений фона с экспериментальными данными показало, что результаты моделирования хорошо описывают пространственно-временные характеристики полей яркости, наблюдаемые экспериментально. Новой является возможность формирования не только статистически однородных облачных полей, но и неоднородных полей, в том числе с завихрениями циклонического типа.

Литература

1. *Лагуткин В.Н., Лукьянов А.П., Подкорытов Е.Н., Репин В.Г.* Трехмерная динамическая модель полей яркости фона, использующая расчетные индикатрисы многократного рассеяния излучения в облаках и изображения, полученные метеорологическими спутниками. // Вопросы радиоэлектроники, 2004. Сер. РЛТ. Вып. 1, с.101-117.
2. *Лагуткин В.Н., Лукьянов А.П., Репин В.Г.* Физико-статистическая модель пространственно-временных полей метеорологических параметров для имитации условий наблюдения оптических средств. // Вопросы радиоэлектроники, 2006. Сер. РЛТ. Вып. 1, с.78-88
3. *Старостенко А.М.* Модель фона земной поверхности в видимом и ИК диапазонах с использованием баз данных о рельефе, спектральных

характеристиках и температуре. // Вопросы радиоэлектроники, 2007. Сер. РЛТ. Вып. 2.

4. *L.S. Rothman et al.* The HITRAN 2004 molecular spectroscopic database. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer 96, 2005.
5. *Glassner, Andrew (Ed.).* An Introduction to Ray Tracing. Academic Press. ISBN 0-12-286160-4. 1989.
6. *Shirley, Peter and Morley Keith, R.* Realistic Ray Tracing, 2nd edition. A.K. Peters. ISBN 1-56881-198-5. 2001.