

Пассивное спутниковое зондирование земной поверхности в просветы облачных полей

М.В. Тарасенков, М.Н. Зонов, В.В. Белов, М.В. Энгель*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 23.04.2021 г.

Предложен алгоритм оценки размеров области влияния облачности на погрешность восстановления коэффициентов отражения участков земной поверхности при наблюдении их через просветы в поле облачности. В основе алгоритма – статистическое моделирование методом Монте-Карло процесса переноса излучения в разорванной стохастической облачности. Рассматриваются две стохастических модели облачных полей: 1) в форме параллелепипедов, 2) параболоидов. Метод апробируется на двух участках реального снимка MODIS. Показано, что разорванная облачность влияет на погрешность восстановления коэффициентов отражения на расстояниях от наблюдаемой точки от 5–7 до 25 км (в зависимости от рассмотренных ситуаций).

Ключевые слова: пассивное спутниковое зондирование земной поверхности, атмосферная коррекция, коэффициенты отражения земной поверхности, разорванная облачность; passive satellite sensing of the Earth's surface, atmospheric correction, Earth's surface reflection coefficients, broken cloudiness.

Введение

Пространственно-угловая структура оптического излучения, пропущенного через облака и отраженного ими, зависит не только от их вида (кучевые, кучево-дождевые, слоистые, перистые и т.д.), но и от пространственной структуры облачности (например, сплошная или разорванная). Можно предположить, что при наблюдении через разорванную облачность однородной поверхности (коэффициент отражения постоянен) интенсивность I излучения в направлении приемника, размещенного на спутнике, будет зависеть от того, через какой разрыв в облачности осуществляется наблюдение. Несложно доказать, что влияние облаков на интенсивность ΔI будет тем меньшим, чем больше площадь S разрыва, т.е. если $S \rightarrow \infty$, то $\Delta I \rightarrow 0$. Следовательно, можно найти такое значение S , начиная с которого коэффициенты отражения земной поверхности будут восстанавливаться с заданной погрешностью с помощью программно-информационных средств, созданных для обработки данных дистанционного зондирования Земли при безоблачной атмосфере.

В работах [1–6] обсуждаются варианты решения этой задачи. В [1] рассмотрено сплошное облачное поле в виде полуплоскости и доказано, что влиянием облачности на точность восстановления коэффициентов отражения r_{surf} нельзя пренебрегать на расстояниях до 5–25 км от наблюдаемой точки.

* Михаил Викторович Тарасенков (tmv@iao.ru); Матвей Никитович Зонов (mnzopov@gmail.com); Владимир Васильевич Белов (belov@iao.ru); Марина Владимировна Энгель (angel@iao.ru).

В [2] показано влияние облачного поля на погрешность восстановления коэффициентов отражения Δr_{surf} для двух частных ситуаций детерминированного разорванного облачного поля. Выяснено, что его влияние на изображения не экранированных облачностью участков земной поверхности убывает с расстоянием от наблюдаемой точки, возрастает с оптической толщиной облачности и с коэффициентом отражения земной поверхности. В видимом диапазоне длин волн с уменьшением длины волны влияние облачности на Δr_{surf} возрастает. Для рассмотренных в [2] участков большинство пикселей изображения поверхности под облачным просветом располагалось на расстоянии меньше 2 км от границ этой области.

Моделирование методом Монте-Карло процесса распространения излучения в сложной трехмерной среде (аналогичное [2]) для оперативного решения обратных задач пассивного зондирования земной поверхности из космоса из-за его трудоемкости нецелесообразно, а полученные результаты в силу их частного характера не могут в полной мере отражать все возможные ситуации. В работе [3] влияние облачного поля на спутниковые изображения земной поверхности исследуется с помощью статистического анализа снимков MODIS северной части Атлантического океана за 2000–2007 гг. Для этих снимков в каналах с центрами на длинах волн $\lambda = 0,47; 0,53; 0,68; 0,86$ и $2,13$ мкм приводятся средние по всем снимкам коэффициенты отражения земной поверхности как функции расстояния до ближайшего облачного пикселя. Показано, что облачность оказывает влияние на расстояниях в среднем до 15 км. Однако влияние об-

лачного поля может значительно меняться в зависимости от ситуации. Поэтому полученные средние оценки не всегда пригодны. Кроме того, земная поверхность не обязательно слабоотражающая.

В работе [4] рассматривается статистически однородное поле модельных стохастических облаков в виде случайно расположенных параллелепипедов одного размера и неотражающей земной поверхности. Утверждается, что в случае неотражающей поверхности результаты зондирования слабо зависят от размера облаков и существенно — от балла облачности. Оценивается среднее по реализациям влияние облачности на изображения безоблачных участков в данном поле как функция оптической толщины облачности и ее балла. В работе [5] показано, что для слабоотражающих поверхностей (при $r_{\text{surf}} \rightarrow 0$) влияние облачности на Δr_{surf} линейно меняется с ростом длины волны в видимом диапазоне, поэтому для таких ситуаций достаточно рассмотреть случай наименьшей длины волны. Демонстрируется возможность использования такого подхода для широкого набора модельных оптико-геометрических условий. Однако если поверхность не является слабоотражающей, то подходы, развиваемые в [4, 5], могут быть неприменимы.

В нашей работе [6] рассмотрена модель сплошного облачного поля с детерминированным цилиндрическим просветом и коэффициентом отражения земной поверхности от 0 до 1. Выполненные расчеты показывают, что при радиусе просвета R от 4 до 15 км в зависимости от ситуации облачность изменяет интенсивность принимаемого излучения меньше, чем на 10% от ее значения в безоблачной ситуации. Таким образом, создание алгоритма, позволяющего оценить влияние разорванной облачности на Δr_{surf} при произвольном коэффициенте отражения земной поверхности, является актуальной задачей. В данной работе она будет рассмотрена в постановке [6], но для случайного разорванного облачного поля.

При решении задачи важен выбор модели облачного поля. Потенциально могут рассматриваться модели сплошных облачных полей [1, 6], детерминированные [2, 5], гауссовские [7, 8, 10], пуассоновские модели с облаками в виде параллелепипедов [4, 9, 10] и параболоидов [7, 10], фрактальные модели разорванных облачных полей [11]. Мы будем использовать пуассоновские модели разорванной облачности.

Заметим, что пуассоновские модели хорошо подходят для моделирования переноса излучения в разорванной кучевой облачности. Мы намеренно не рассматриваем детерминированные модели облачных полей, так как в этом случае результаты будут жестко привязаны к конкретной реализации облачного поля. Модель сплошной облачности используется ниже только для тестирования алгоритмов и доказательства правильности их работы. Фрактальные модели облаков требуют значительных затрат машинного времени, поэтому мы не стали их использовать.

Чтобы решить задачу, рассмотренную в [6], но для разорванного облачного поля, потенциально могут быть применены следующие подходы. Статистический подход [3], который основан на анализе множества спутниковых изображений земной поверхности. Он позволяет не проводить моделирование процесса переноса излучения в атмосфере. Однако этот подход дает результаты, средние по большой выборке ситуаций, без учета положения солнца и приемной системы в момент съемки и параметров облачного поля. В работах [2, 3] методом Монте-Карло моделируется процесс переноса излучения в детерминированной трехмерной неоднородной среде. Моделирование переноса излучения в разорванной облачности методом Монте-Карло с осреднением результата по реализациям облачного поля выполнено в [7–9, 11, 12] и др. В [10, 13] используется метод замкнутых уравнений, при котором задача решается для такой эффективной горизонтально однородной среды, что интенсивность принимаемого излучения совпадает с принимаемым излучением, средним по реализациям облачного поля. Этот метод моделирования наиболее эффективен с точки зрения затрат машинного времени. Однако, как показывают оценки [10, 14], метод замкнутых уравнений имеет ограничения по зенитным углам направлений на солнце и направлений ориентации приемной системы. Поэтому в нашей работе мы используем метод Монте-Карло с осреднением по случайным реализациям разорванного облачного поля.

Постановка задачи и метод решения

Рассмотрим задачу в следующей постановке.

Пусть имеется плоская система «атмосфера — земная поверхность». На верхнюю границу атмосферы падает параллельный поток солнечного излучения под зенитным углом θ_{sun} . Пусть статистически однородное пуассоновское облачное поле состоит: 1) из параллелепипедов, 2) параболоидов (рис. 1). Мы использовали алгоритмы построения пуассоновских полей в форме параллелепипедов и параболоидов, описанных в [10]. Горизонтальный размер отдельных облаков случайный, но в среднем равен \bar{L} . Для облаков в форме параллелепипедов количество границ облаков по осям случайно и соответствует распределению Пуассона с математическим ожиданием, связанным со средним горизонтальным размером облаков \bar{L} . Положение границ облаков по осям случайно и соответствует равномерному распределению [10, с. 125–130]. Для облаков в форме параболоидов количество облаков случайно и соответствует распределению Пуассона с математическим ожиданием, приведенным в [10, с. 119–125]. Форма облаков подобна, а размер случаен и соответствует экспоненциальному распределению [10, с. 119–125] с математическим ожиданием, равным \bar{L} .

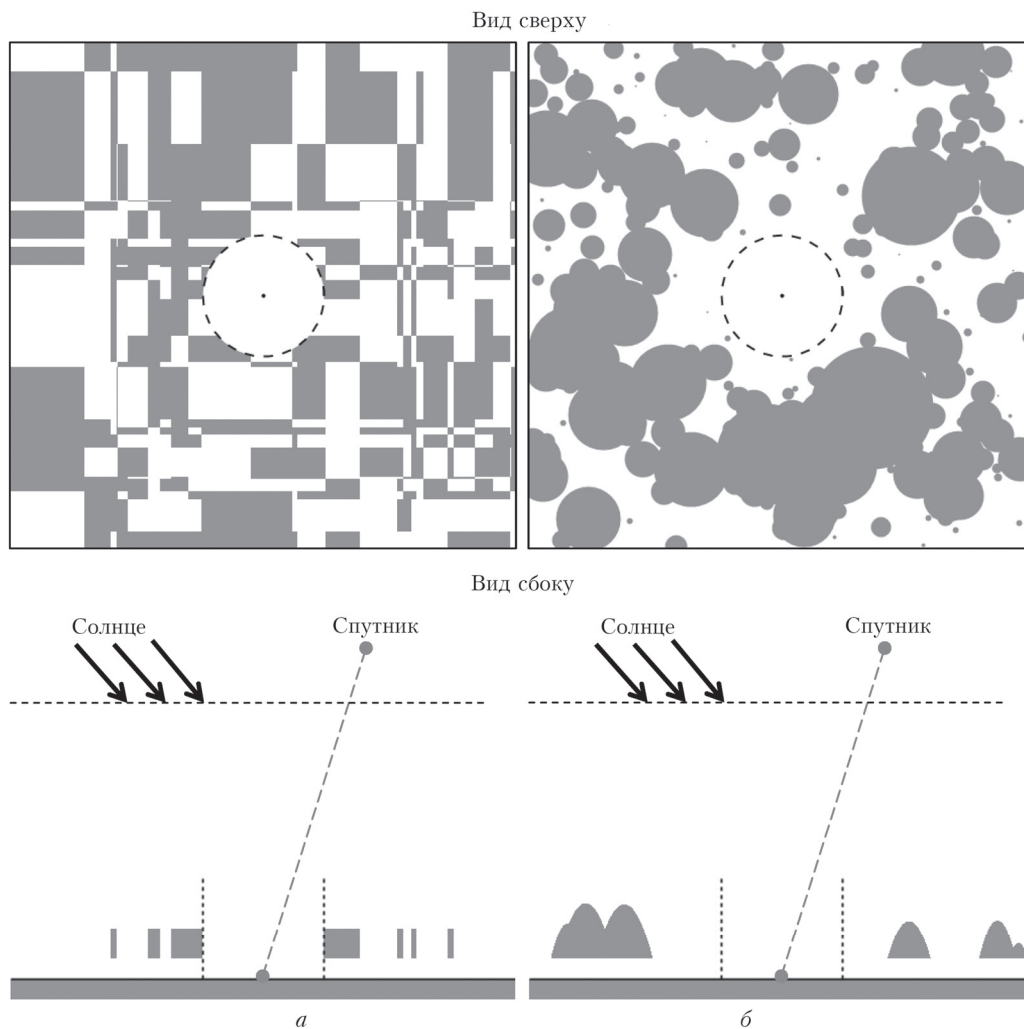


Рис. 1. Геометрическая схема постановки задачи: облака в виде параллелепипедов (*a*), параболоидов (*б*)

В облачном слое задается детерминированный цилиндрический просвет радиусом R . Нижняя граница облачности фиксируется и равна h_{\min} . Толщина облачного слоя для первой модели фиксируется и равна Δh . Для второй модели толщина отдельного облака случайна, но средняя толщина также равна Δh . Балл облачности равен δ_{cloud} . Аэрозольные оптические характеристики однородны в облачной среде и задаются коэффициентами ослабления и рассеяния и индикатрисой рассеяния.

Оптическая модель облачности строилась с использованием модели OPAC [15] для кучевой облачности. Оптические характеристики безоблачной атмосферы задаются на основе модели LOWTRAN-7 [16]. Слой атмосферы 0–100 км разделяется на 32 однородных слоя. Земная поверхность однородная ламбертовская с коэффициентом отражения r_{surf} . На высоте h_d от земной поверхности размещена спутниковая система зондирования, оптическая ось которой направлена в точку на земной поверхности в центре проекции на земную поверхность просвета в облачном поле; система принимает излучение на длине волны λ . Зенитный угол ориентации оптической оси приемной системы θ_d , а ази-

мутальный угол φ между направлениями на приемник и на солнце из наблюдаемой точки на земной поверхности.

Требуется оценить радиус просвета R^* , при котором неучет влияния облачности на результаты зондирования приведет к погрешности восстановления коэффициента отражения $\Delta r_{\text{surf}} < 0,005$ и позволит составить маску пикселей, где $\Delta r_{\text{surf}} > 0,005$.

Задача решается в несколько этапов.

1. Из данных MODIS для заданного участка снимка определяются маска облачности (данные MOD06L2), аэрозольная оптическая толщина (AOT) безоблачных участков (MOD04L2), высоты верхней границы облаков (MOD06L2), AOT облачности (MOD06L2), зенитные углы солнца θ_{sun} , ориентации приемной системы θ_d и азимут φ (MOD03L2).

2. Определяется среднее значение AOT для не экранированных облачностью пикселей.

3. Среди безоблачных моделей LOWTRAN-7 подбирается модель, наиболее близкая по AOT для рассматриваемого канала MODIS.

4. Определяется распределение коэффициентов отражения земной поверхности r_{surf} по участкам

в просветах облачности: а) по данным MOD09L2; б) r_{surf} восстанавливается из данных об интенсивности (яркости) принимаемого излучения (MOD021KM) с использованием алгоритма однородной коррекции (или в приближении независимых пикселей) [17].

5. Определяется средний коэффициент отражения по безоблачным участкам \tilde{r}_{surf} .

6. По значениям АОТ облачности и верхней границе облаков h_{max} определяется коэффициент ослабления облаков. Облачная среда считается однородной. Вероятность выживания кванта и индикатрисы рассеяния облаков берется из моделей LOWTRAN-7.

7. Молекулярное рассеяние выбирается из моделей LOWTRAN-7 лета средних широт.

8. Для заданных оптико-геометрических условий, заданного среднего коэффициента отражения r_{surf} и различных радиусов просвета R методом Монте-Карло рассчитываются средние по реализации облачного поля интенсивности излучения $I_{\text{sum, cloud}}(R)$, принимаемого спутниковой системой зондирования.

9. Оценивается, как влияет облачность на результаты восстановления коэффициентов отражения земной поверхности. Основой оценки является выражение для интенсивности суммарного принимаемого спутниковой системой излучения в безоблачном случае в предположении однородной земной поверхности (называемое также приближением независимых пикселей):

$$I_{\text{sum, clear}} = I_{\text{sun, clear}} + \frac{r_{\text{surf}} E_{0, \text{clear}}}{1 - r_{\text{surf}} \gamma_{1, \text{clear}}} \tilde{I}_{\text{surf, clear}}, \quad (1)$$

где $I_{\text{sun, clear}}$ — интенсивность излучения, рассеянного в атмосфере и не взаимодействовавшего с земной поверхностью, при безоблачной атмосфере; $E_{0, \text{clear}}$ — освещенность земной поверхности солнцем без учета отраженного излучения при безоблачной атмосфере; $\gamma_{1, \text{clear}}$ — вклад однократно отраженного излучения в освещенность земной поверхности при безоблачной атмосфере; $\tilde{I}_{\text{surf, clear}}$ — интенсивность отраженного поверхностью излучения, пришедшего в приемную систему при единичной светимости земной поверхности, при безоблачной атмосфере.

Из формулы (1) получаем выражение для определения коэффициента отражения:

$$r_{\text{surf}} = \frac{Q / E_{0, \text{clear}}}{1 + \gamma_{1, \text{clear}} Q / E_{0, \text{clear}}}, \quad (2)$$

где

$$Q = \frac{I_{\text{sum, clear}} - I_{\text{sun, clear}}}{\tilde{I}_{\text{surf, clear}}}. \quad (3)$$

Если считать, что для точки на земной поверхности в центре просвета в облачном поле радиуса R влияния облачности нет, то получим приближенное значение коэффициента отражения

$$\tilde{r}_{\text{surf}}(R) = \frac{\tilde{Q} / E_{0, \text{clear}}}{1 + \gamma_{1, \text{clear}} \tilde{Q} / E_{0, \text{clear}}}, \quad (4)$$

где

$$\tilde{Q} = \frac{I_{\text{sum, cloud}}(R) - I_{\text{sun, clear}}}{\tilde{I}_{\text{surf, clear}}}, \quad (5)$$

$I_{\text{sum, cloud}}(R)$ — суммарное принимаемое излучение при наблюдении точки, расположенной на земной поверхности в центре детерминированного разрыва радиуса R .

Тогда радиус просвета R^* , при котором неучет влияния облачности приведет к погрешности восстановления коэффициента отражения $\Delta r_{\text{surf}} < 0,005$, определяется по формуле

$$R^*: \Delta r_{\text{surf}} = |r_{\text{surf}} - \tilde{r}_{\text{surf}}(R^*)| \leq \delta = 0,005. \quad (6)$$

10. Исходя из радиусов R^* на снимке строится маска пикселей, для которых влияние облачности существенно.

Моделирование средней по реализациям облачного поля интенсивности принимаемого спутниковой системой излучения $I_{\text{sum, cloud}}(R)$ выполнялось методом Монте-Карло с использованием метода сопряженных блужданий [18]. Траектории делились на P пачек по N траекторий в каждой. Для каждой случайной реализации облачного поля моделировалось 20 траекторий ($N/20$ случайных реализаций облачного поля на одну пачку). Длина свободного пробега вне облачного слоя моделировалась стандартным алгоритмом [18, с. 11]. Для фотонных траекторий, проходящих через облачный слой [h_{min} ; $h_{\text{min}} + \Delta h$], длина свободного пробега моделировалась методом «максимального сечения» [18, с. 12]. Рассеяние и поглощение фотонов в среде моделировалось по стандартным алгоритмам [18 с. 10]. При столкновении фотона с поверхностью моделировалось отражение фотона, и его «вес» уменьшался на вероятность поглощения излучения поверхностью. В каждой точке столкновения фотонной траектории со средой и земной поверхностью выполнялась локальная оценка излучения, приходящего на верхнюю границу атмосферы в направлении солнца для атмосферы

$$I_{\text{pnk}} = S_{\lambda} q_{\text{pnk}} \times \frac{\sigma_{\text{sa, pnk}} g_{\text{a, pnk}}(\mu_{\text{pnk}}) + \sigma_{\text{sm, pnk}} g_{\text{m, pnk}}(\mu_{\text{pnk}})}{\sigma_{\text{t, pnk}}} \exp(-\tau_{\text{pnk}}), \quad (7)$$

для земной поверхности

$$I_{\text{pnk}} = S_{\lambda} q_{\text{pnk}} \frac{r_{\text{surf}}}{\pi} \exp(-\tau_{\text{pnk}}). \quad (8)$$

Здесь I_{pnk} — оценка интенсивности излучения, приходящего на верхнюю границу атмосферы из k -й точки столкновения n -й траектории из p -й пачки траекторий; q_{pnk} — энергия («вес») фотона в точке столкновения; S_{λ} — солнечная постоянная; $\sigma_{\text{sa, pnk}}$ — коэффициент аэрозольного рассеяния; $\sigma_{\text{sm, pnk}}$ — коэффициент молекулярного рассеяния; $\sigma_{\text{t, pnk}}$ — коэффициент ослабления в точке столкновения;

$g_{a, pnk}(\mu_{pnk})$ – индикатриса аэрозольного рассеяния при косинусе угла рассеяния μ_{pnk} ; $g_{m, pnk}(\mu_{pnk})$ – индикатриса молекулярного рассеяния; τ_{pnk} – оптическая толщина от точки столкновения до верхней границы атмосферы в направлении, обратном направлению падения излучения на верхнюю границу атмосферы.

Если взаимодействие фотона со средой произошло в облачном слое, то в (7), (8) в качестве аэрозольных берутся облачные оптические характеристики, если вне его, то аэрозольные для безоблачного слоя. В формулах (7), (8) определенную трудность представляет вычисление величины τ_{pnk} , так как необходимо учитывать: что точка столкновения может находиться ниже облачного слоя либо в слое выше него; возможность пересечения лучом из точки столкновения в направлении на солнце детерминированного разрыва в облачном поле; возможность пересечения границ облаков и того, что облака в виде параболоидов могут частично накладываться друг на друга.

Тогда суммарная принимаемая интенсивность излучения определяется как

$$I = \frac{1}{PN} \sum_{p=1}^P \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^{K_{pn}} I_{pnk}, \quad (9)$$

где K_{pn} – количество столкновений n -й траектории из p -й пачки.

Погрешность оценки (9) оценивается по формуле

$$\delta I = \frac{\sqrt{\frac{1}{PN} \sum_{p=1}^P \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^{K_{pn}} (I_{pnk})^2 - \left(\frac{1}{PN} \sum_{p=1}^P \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^{K_{pn}} I_{pnk} \right)^2}}{\frac{1}{PN} \sum_{p=1}^P \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^{K_{pn}} I_{pnk}}. \quad (10)$$

Тестирование алгоритма

Тестирование предлагаемого алгоритма выполнялось в несколько этапов.

На первом этапе $I_{\text{sum, cloud}}(R)$, вычисленные для облачного поля с облаками в виде параллелепипедов при доле покрытой облаками поверхности $\delta_{\text{cloud}} = 1$, сравнивались с результатами, полученными ранее в [6] для сплошного облачного поля с детерминированным разрывом. На рис. 2 приведены результаты тестовых расчетов для ситуации $\lambda = 0,55$ мкм, вертикальная оптическая толщина в просвете $\tau_0 = 0,285$; $h_{\text{min}} = 0,5$ км; $\Delta h = 1,8$ км; $\tau_{\text{cl}} = 36$; $\theta_{\text{sun}} = 40$ и 80° , $\theta_{\text{d}} = 0^\circ$. Расчеты выполнялись для $P = 30$ и $N = 10000$. Для результатов на рис. 2, *a* погрешность $\delta I \leq 0,013$, на рис. 2, *б* $\delta I \leq 0,014$. Видно, что результаты для случая $\delta_{\text{cloud}} = 1$ полностью совпадают с результатами из [6].

Для ситуации $\lambda = 0,55$ мкм; $R = 0,5$ км; $L = 1$ км; $\theta_{\text{sun}} = 0^\circ$; $\theta_{\text{d}} = 0^\circ$; 45° ; $\tau_{\text{cl}} = 20$; $\tau_0 = 0,285$; $\delta_{\text{cl}} = 0,5$;

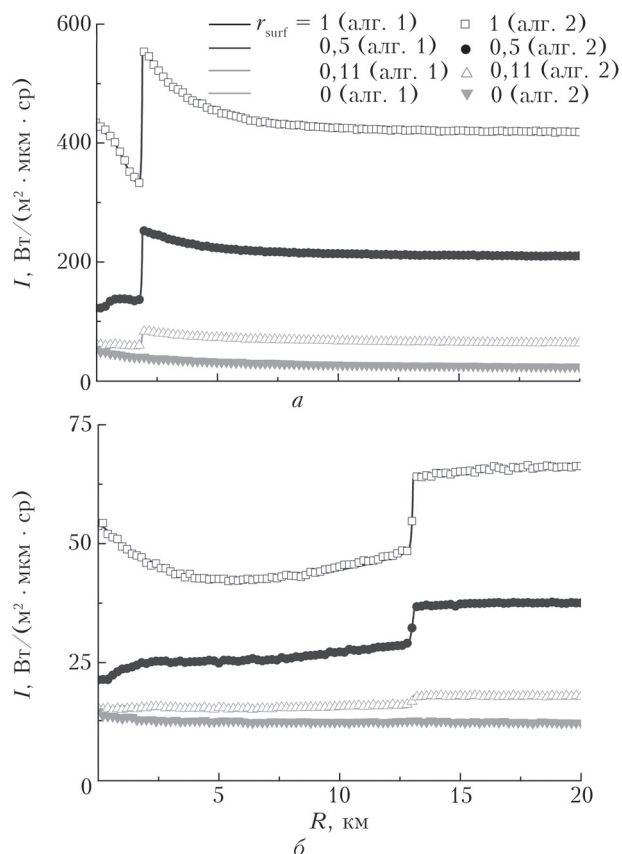


Рис. 2. Зависимости интенсивности принимаемого излучения от радиуса просвета для сплошного облачного поля с детерминированным цилиндрическим просветом, полученные в [6] (алг. 1) и в данной работе (алг. 2) при $\theta_{\text{d}} = 0^\circ$; $\theta_{\text{sun}} = 40^\circ$ (*a*) и 80° (*б*)

$h_{\text{min}} = 0$ км, $\Delta h = 4$ км выполнены расчеты $I_{\text{sum, cloud}}(0,5)$ для стохастических облаков в форме параллелепипедов и параболоидов, а также детерминированных параллелепипедов и параболоидов, равноотстоящих друг от друга (рис. 3). Расчеты выполнялись для $P = 30$, $N = 5000$. Результаты приведены на рис. 4. Погрешность $\delta I \leq 0,004$ для равноотстоящих параболоидов, $\leq 0,034$ для осреднения по случайным реализациям параболоидов, $\leq 0,067$ для равноотстоящих параллелепипедов и $\leq 0,055$ для осреднения по случайным реализациям параллелепипедов.

Сравнение показывает, что при направлениях визирования вблизи надира (рис. 4, *a*) и коэффициентах отражения r_{surf} , близких к 0, интенсивность $I_{\text{sum, cloud}}$ мало зависит от формы облаков и их расположения. Это полностью согласуется с аналогичным утверждением в работе [4]. При углах визирования, существенно отличающихся от надира, влияние формы облачности на интенсивность $I_{\text{sum, cloud}}$ намного сильнее (рис. 4, *б*). При больших коэффициентах отражения форма облаков начинает значительно влиять на принимаемую интенсивность излучения при небольших радиусах просвета R ; расположение облаков оказывает существенно меньший эффект на интенсивность излучения.

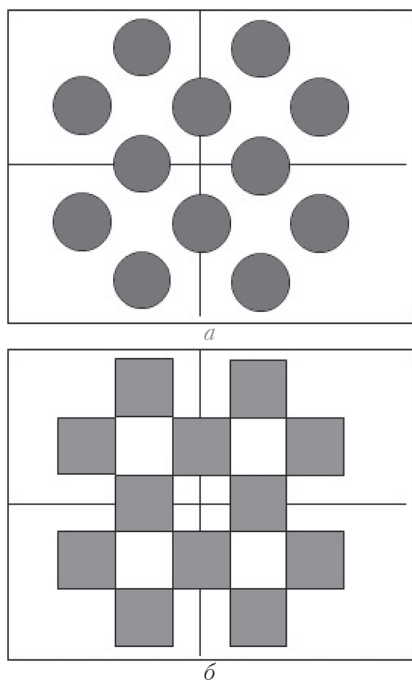


Рис. 3. Равноотстоящие друг от друга облака в форме параболоидов (а), параллелепипедов (б), для которых выполнялись тестовые расчеты

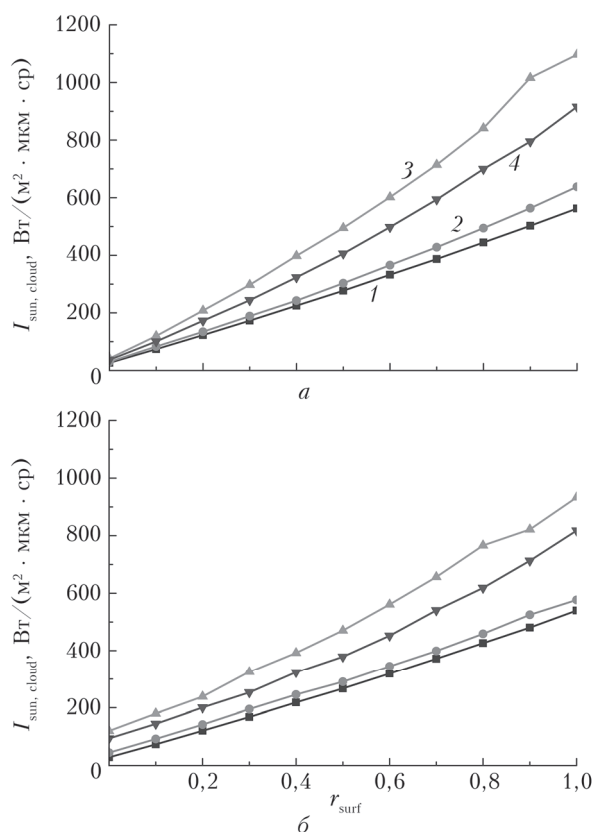


Рис. 4. Интенсивность излучения $I_{\text{sun, cloud}}$ в зависимости от коэффициента отражения для $\lambda = 0,55$ мкм, $\theta_{\text{sun}} = 0^\circ$, $\theta_{\text{d}} = 0^\circ$ (а) и $\theta_{\text{d}} = 45^\circ$ (б): 1 – равноотстоящие параболоиды (рис. 3, а); 2 – осреднение по случайным реализациям параболоидов; 3 – равноотстоящие параллелепипеды (рис. 3, б); 4 – осреднение по случайным реализациям параллелепипедов

Выполненные тесты дают основание считать полученные результаты достоверными. Из второго теста также следует, что форма облаков может сильно влиять на результаты моделирования.

Апробация метода на реальных данных MODIS

Для апробации метода рассматривались два участка снимка MODIS (MOD021KM.A2017172.0325.006.2017172133827.hdf) за 21 июня 2017 г. Расчет выполнялся для 4-го канала MODIS (центр канала $\lambda = 0,55$ мкм). Средние по участкам величины, используемые в расчетах, а также границы участков приведены в таблице. Средний размер облаков $\bar{L} = 1$ км; нижняя граница облаков $h_{\text{min}} = 1$ км; $I_{\text{sun, cloud}}(R)$, входящая в (5), рассчитывалась при $P = 300$ и $N = 5000$; $\delta I \leq 0,01$ для всех полученных результатов.

Результаты расчетов $\Delta r_{\text{surf}}(R)$ по формуле (6) приведены на рис. 5.

Границы рассматриваемых участков и средние оптико-геометрические условия по данным MODIS

Параметр	Значение	
	Участок 1 (53,4–56,4° с.ш.; 109–115° в.д.)	Участок 2 (49,0–51,0° с.ш.; 121–123° в.д.)
Балл облачности δ_{cl}	0,15	0,087
Средняя верхняя граница облачности h_{max} , км	4,1	2,6
Средняя оптическая толщина облачности τ_{cl}	30	15
Средняя АОТ безоблачных участков	1,25	0,43
Средний коэффициент отражения по данным MODIS $r_{\text{surf},1}$	0,071	0,046
Средний коэффициент отражения в приближении независимых пикселей $r_{\text{surf},2}$	0,090	0,025
Средний зенитный угол солнца θ_{sun} , град	34	27
Средний зенитный угол спутника θ_{d} , град	28	34
Средний азимут φ , град	152	166

Из полученных результатов для участка 1 (рис. 5, а) следует, что форма облаков сильно влияет на погрешность восстановления коэффициентов отражения Δr_{surf} . Расстояние R^* , на котором влияние облачности на Δr_{surf} значительно, достигает

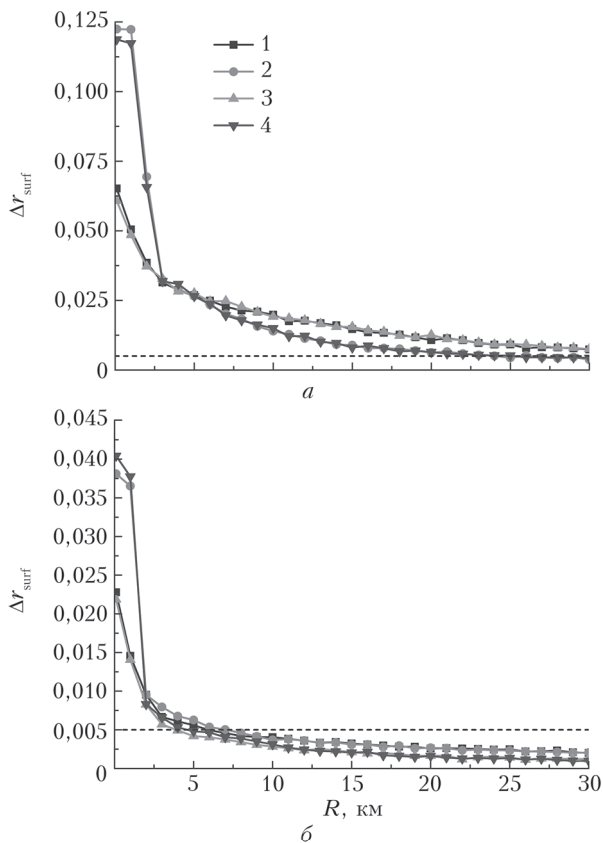


Рис. 5. Абсолютная погрешность определения коэффициента отражения земной поверхности в зависимости от радиуса просвета для участков 1 (а) и 2 (б): осреднение по реализациям параболоидов (1) и параллелепипедов (2), коэффициенты отражения найдены по алгоритму [17]; осреднение по реализациям параболоидов (3) и параллелепипедов (4), коэффициенты отражения MOD09

25 км для параллелепипедов и превышает 30 км для параболоидов. Получившаяся маска пикселей, удаленных от границ проекций облаков на земную поверхность на расстояние 25 км и меньше, приведена на рис. 6, а. Из рисунка следует, что почти весь участок снимка закрыт получившейся маской и на данном участке снимка влияние облачности на Δr_{surf} существенно.

Оценки Δr_{surf} для участка 2 (рис. 5, б) показывают, что для этой ситуации результаты не зависят от формы облаков начиная с радиуса просвета $R = 2$ км, а также что $R^* = 7$ км для коэффициентов отражения поверхности $r_{\text{surf},1} = 0,046$ (MOD09) и 5 км для $r_{\text{surf},2} = 0,025$ (приближение независимых пикселей [17]). Маска, полученная для $R^* = 7$ км, представлена на рис. 6, б, а для $R^* = 5$ км — на рис. 6, в. Из сравнения рис. 6, б и в следует, что влияние облачности незначительно для большей части участка 2 и коэффициент отражения можно восстанавливать как для безоблачных участков.

Сравнивая восстановленные r_{surf} для тестовых участков с данными других авторов, можно утверждать, что наши результаты не противоречат работам [1–6].

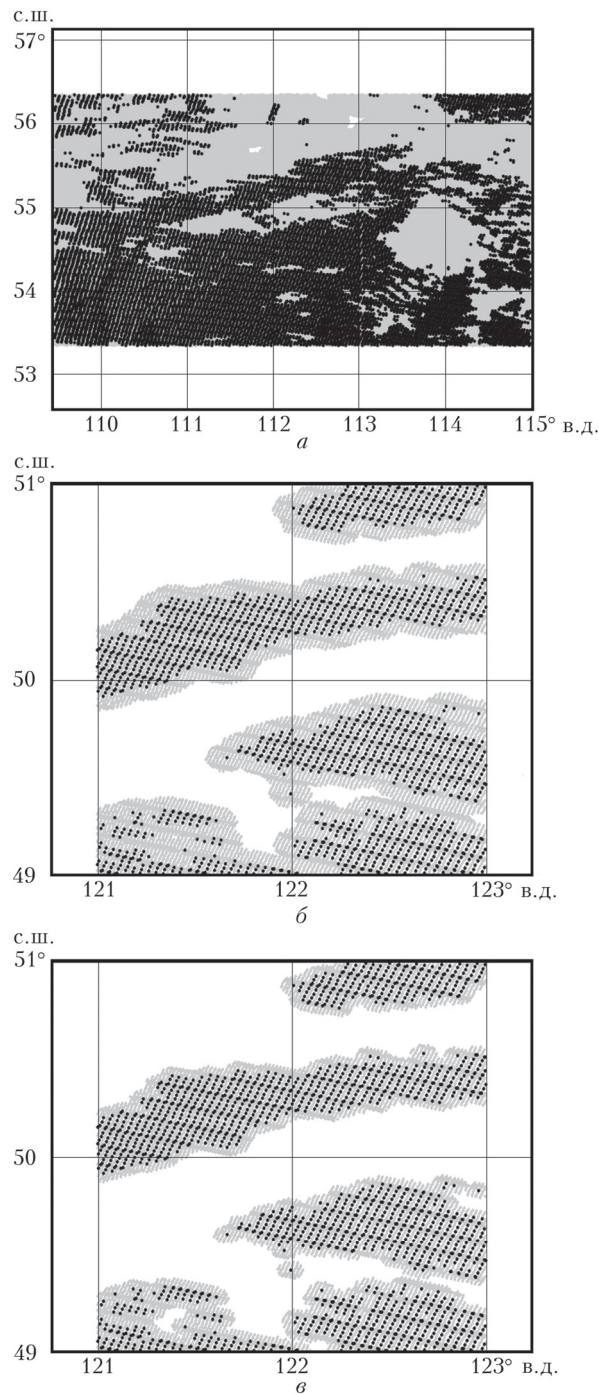


Рис. 6. Маска влияния облачности на результаты восстановления коэффициентов отражения на безоблачных участках: участок 1 (а); участок 2, $r_{\text{surf},1} = 0,046$ (б); участок 2, $r_{\text{surf},2} = 0,025$ (в); черные точки — облачные пиксели, серые точки — безоблачные пиксели с существенным влиянием облачности на Δr_{surf}

Заключение

В работе предложен алгоритм оценки влияния облачного поля на точность восстановления коэффициентов отражения на не экранированных облаками участках земной поверхности. Алгоритм

основан на расчете средней по реализациям облачного поля интенсивности излучения в центре входного зрачка приемной системы. Тестовые расчеты доказывают достоверность полученных результатов. Апробация метода проводилась для двух тестовых участков снимка MODIS (MOD021KM.A2017172.0325.006.2017172133827.hdf) для четвертого канала MODIS. Для участка 1 расстояние влияния облачности $R_* = 25$ км, а для участка 2 – 5–7 км. Причина этого в том, что средняя АОТ безоблачных участков, средняя АОТ облачности и средний коэффициент отражения поверхности r_{surf} выше для участка 1.

Преимущество предложенного подхода перед созданными ранее состоит в том, что он позволяет оценить среднее по реализациям облачного поля (расположению облаков) влияние облачности на результаты восстановления коэффициентов отражения безоблачных участков земной поверхности, предельно проанализировать широкий круг представляющих интерес оптико-геометрических условий. Использование детерминированного разрыва позволяет рассмотреть ситуации, более близкие к реальным, чем однородные облачные поля без детерминированных разрывов [4]. Наконец, предложенный подход не имеет ограничений на коэффициент отражения земной поверхности, в отличие от работ [4, 5].

Работа выполнена в рамках государственного задания ИОА СО РАН.

1. *Nikolaeva O.V., Bass L.P., Germogenova T.A., Korkhanovskiy A.A., Kuznetsov V.S., Mayer B.* The influence of neighbouring clouds on the clear sky reflectance studied with the 3-D transport code RADUGA // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2005. V. 94, N 3–4. P. 405–424. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2004.09.037.
2. *Wen G., Marshak A., Cahalan R.F., Remer L.A., Kleidman R.G.* 3-D aerosol-cloud radiative interaction observed in collocated MODIS and ASTER images of cumulus cloud fields // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. P. D13204. DOI: 10.1029/2006JD008267.
3. *Várnai T., Marshak A.* MODIS observations of enhanced clear sky reflectance near clouds // *Geophys. Res. Lett.* 2009. V. 36. P. L06807. DOI: 10.1029/2008GL037089.
4. *Marshak A., Wen G., Coakley Jr.J.A., Remer L.A., Loeb N.G., Cahalan R.F.* A simple model for the cloud adjacency effect and the apparent bluing of aerosols near clouds // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. P. D14S17. DOI: 10.1029/2007JD009196.
5. *Marshak A., Evans K.F., Várnai T., Wen G.* Extending 3D near-cloud corrections from shorter to longer wavelengths // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2014. V. 147. P. 79–85. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2014.05.022.
6. *Tarasenkov M.V., Kirnos I.V., Belov V.V.* Наблюдение земной поверхности из космоса через просвет в облачном поле // *Оптика атмосфер. и океана.* 2016.

7. *Каргин Б.А., Пригарин С.М.* Имитационное моделирование кучевой облачности для исследования процессов переноса солнечной радиации в атмосфере методом Монте-Карло // *Оптика атмосфер. и океана.* 1994. Т. 7, № 9. С. 1275–1287.
8. *Prigarin S.M., Kargin B.A., Ulrich G. Oppel.* Random fields of broken clouds and their associated direct solar radiation, scattered transmission and albedo // *Pure Appl. Opt.* 1998. V. 7. P. 1389–1402.
9. *Пригарин С.М., Журавлева Т.Б., Воликова П.В.* Пуассоновская модель многослойной разорванной облачности // *Оптика атмосфер. и океана.* 2002. Т. 15, № 10. С. 917–924.
10. *Зуев В.Е., Тутов Г.А.* Современные проблемы атмосферной оптики: Т. 9 Оптика атмосферы и климат. Томск: Спектр, 1996. 272 с.
11. *Marshak A., Davis A., Wiscombe W., Cahalan R.* Radiative smoothing in fractal clouds // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 1995. V. 100, N D12. P. 26247–26261. DOI: 10.1029/95JD02895.
12. *Журавлева Т.Б., Насртдинов И.М., Русскова Т.В.* Влияние 3D эффектов облаков на пространственно-угловые характеристики поля отраженной солнечной радиации // *Оптика атмосфер. и океана.* 2016. Т. 29, № 9. С. 758–766; *Zhuravleva T.B., Nasrtidinov I.M., Russkova T.V.* Influence of 3D cloud effects on spatial-angular characteristics of the reflected solar radiation field // *Atmos. Ocean. Opt.* 2017. V. 30, N 1. P. 103–110. DOI: 10.15372/AOO20160906.
13. *Titov G.A., Zhuravleva T.B., Zuev V.E.* Mean radiation fluxes in the near-IR spectral range: Algorithms for calculation // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 1997. V. 102, N D2. P. 1819–1832. DOI: 10.1029/96JD02218.
14. *Тутов Г.А.* Статистическое описание переноса оптического излучения в облаках: дис. ... докт. физ.-мат. наук. Томск, 1988. 361 с.
15. *Hess M., Koepke P., Schult I.* Optical Properties of Aerosols and Clouds: The Software Package OPAC // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 1998. V. 79, N 5. P. 831–844.
16. *Kneizys F.X., Shettle E.P., Anderson G.P., Abreu L.W., Chetwynd J.H., Selby J.E.A., Clough S.A., Gallery W.O.* User Guide to LOWTRAN-7. ARGL-TR-86-0177. ERP 1010. Hanscom AFB. 1988. MA 01731. 137 p.
17. *Кожевникова А.В., Тарасенков М.В., Белов В.В.* Параллельные вычисления при решении задач восстановления коэффициента отражения земной поверхности по спутниковым данным // *Оптика атмосфер. и океана.* 2013. Т. 26, № 2. С. 172–174; *Kozhevnikova A.V., Tarasenkov M.V., Belov V.V.* Parallel computations for solving problems of the reconstruction of the reflection coefficient of the earth's surface by satellite data // *Atmos. Ocean. Opt.* 2013. V. 26, N 4. P. 326–328.
18. *Марчук Г.И., Михайлов Г.А., Назарашев М.А., Дарбинян Р.А., Каргин Б.А., Елепов Б.С.* Метод Монте-Карло в атмосферной оптике. Новосибирск: Наука, 1976. 284 с.

M.V. Tarasenkov, M.N. Zonov, V.V. Belov, M.V. Engel. Passive satellite sensing of the Earth's surface through gaps in cloudy fields.

An algorithm for estimating sizes of regions affected by cloudiness on the errors of retrieval the reflection coefficients of the Earth's surface areas observed through gaps in a cloudy field is suggested. The algorithm is based on statistical simulation by the Monte-Carlo method of the process of radiation transfer through broken stochastic cloudiness. Two stochastic models of cloudy fields are considered: 1) clouds shaped as parallelepipeds and 2) clouds shaped as paraboloids. The method is tested for two fragments of actual MODIS images. It is shown that the broken cloudiness influences the error in the reflection coefficient retrieved at distances from 5–7 to 25 km from the observation point (depending on the observation conditions).