

УДК 528.8: 629.78, 535.361

Наблюдение земной поверхности из космоса через просвет в облачном поле

М.В. Тарасенков^{1,2}, И.В. Кирнос^{1,2}, В.В. Белов^{1,2*}

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

²Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

Поступила в редакцию 24.05.2016 г.

Для целей атмосферной коррекции спутниковых изображений ставится задача оценить, на каком расстоянии от центра облачного просвета влиянием облачности на спутниковое изображение можно пренебречь. Используется метод Монте-Карло с сопряженной схемой моделирования. Получено значение радиуса просвета в сплошном облачном поле, при котором влияние облаков изменяет интенсивность принимаемого излучения на 10%. Получены и объяснены зависимости принимаемой интенсивности от радиуса просвета.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, метод Монте-Карло, атмосферная коррекция, облачное поле; remote sensing, Monte Carlo method, atmosphere correction, cloud field.

Наблюдение земной поверхности из космоса является в настоящее время чрезвычайно важной составляющей наблюдений за состоянием и составом земной поверхности, сельскохозяйственных угодий и пастбищ [1, 2], исследований влажности почв [3, 4] и изменений их характера, оползневых процессов и деформаций ландшафта [5, 6], распознавания лесных экосистем [7], лесных пожаров [8], обнаружения экологических изменений [9, 10] и изменений ледового и снежного покровов [11, 12]. Особое значение в этой связи приобретает изучение отражательных свойств земной поверхности [13–15].

При этом во всех случаях следует иметь в виду, что наблюдения проводятся сквозь толщу атмосферы, трансформирующей первоначальный сигнал, особенно при наличии значительного аэрозольного загрязнения или облачности. Поэтому оценка влияния состояния атмосферы, в частности наличия облачности, на принимаемый сигнал приобретает большое значение.

При сплошной облачности задача атмосферной коррекции состоит в удалении соответствующих областей из рассмотрения – построении облачной маски [16], при полупрозрачной или разорванной облачности – в учете ее влияния на изображения наблюдаемых объектов. В ряде работ, например [17–23], разработаны методы статистического моделирования процесса распространения излучения в подобных средах. При наблюдении безоблачных участков вблизи облачных полей и просветов между

облаками облачное поле оказывает влияние на изображение безоблачного участка [24–30].

Последней задаче и посвящена настоящая статья, причем мы сосредоточиваемся на вопросе о том, на каком расстоянии от центра просвета влиянием облачности на спутниковое изображение объекта можно пренебречь.

Рассмотрим следующую постановку задачи (рис. 1). Над плоской поверхностью Земли в диапазоне высот от h_{\min} до h_{\max} располагается однородный облачный слой. В облачном слое имеется просвет цилиндрической формы. Через просвет под зенитным углом $\theta_{\text{пр}}$ к вертикали наблюдается элемент земной поверхности, находящийся под центром просвета радиуса r . На верхнюю границу атмосферы падает параллельный поток солнечных лучей на длине волны λ под зенитным углом θ_c и азимутальным углом φ между направлениями падения лучей и осью ориентации спутниковой приемной оптической системы. Земная поверхность считается однородной и отражающей свет по закону Ламберта с заданным коэффициентом отражения $k_{\text{отр}}$ (под коэффициентом отражения $k_{\text{отр}}$ здесь и далее понимается отношение светимости поверхности отраженным излучением к ее освещенности падающим излучением). Требуется оценить интенсивность I излучения, приходящего на приемник из центра проекции просвета на земной поверхности.

Задача решается методом Монте-Карло с сопряженной схемой моделирования, с методом максимального сечения для моделирования длины свободного пробега. Данный способ моделирования основан на работе [31] и строится исходя из принципа оптической взаимности. Вертикальные границы

* Михаил Викторович Тарасенков (tmv@iao.ru);
Илья Васильевич Кирнос (ikirnos@sibmail.com);
Владимир Васильевич Белов (belov@iao.ru).

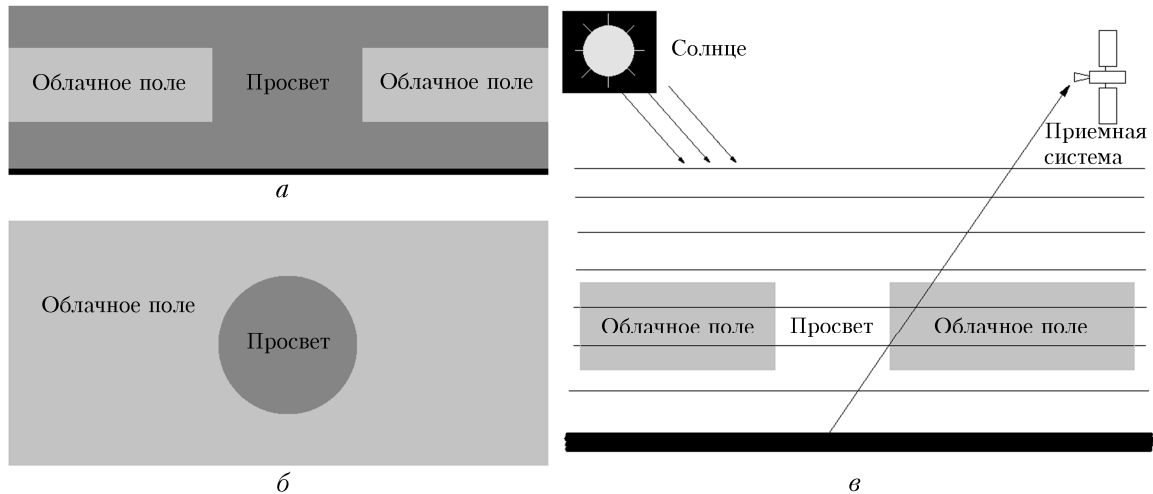


Рис. 1. Вид просвета: *a* – в разрезе; *б* – сверху; *в* – геометрия наблюдения

облачного слоя 0,5 и 2,3 км, оптические параметры облачности задаются генератором оптических моделей на основе LOWTRAN-7 [32] (модель кучевого облака C01, оптическая толщина облачного слоя $\tau_{\text{обл}} = 36$, длина волны $\lambda = 0,55$ мкм), параметры неоднородной по вертикали безоблачной атмосферы соответствуют метеорологической дальности видимости $S_M = 50$ км, ее оптическая толщина $\tau = 0,285$. Рассмотренная оптическая модель далеко не исчер-

пывает всех возможных ситуаций, но оптическая толщина облачных полей > 20 весьма типична.

На рис. 2, *a* представлен пример зависимости искомой интенсивности I от радиуса просвета R при $\theta_c = 40^\circ$, $\theta_{\text{пр}} = 0^\circ$ и различных $k_{\text{отр}}$. Здесь и далее минимальный радиус просвета $R = 10$ м. Зависимость (кривая 1) имеет довольно сложный немонотонный вид. Разложив суммарную интенсивность для $k_{\text{отр}} = 1$ на рассеянную и нерассеянную

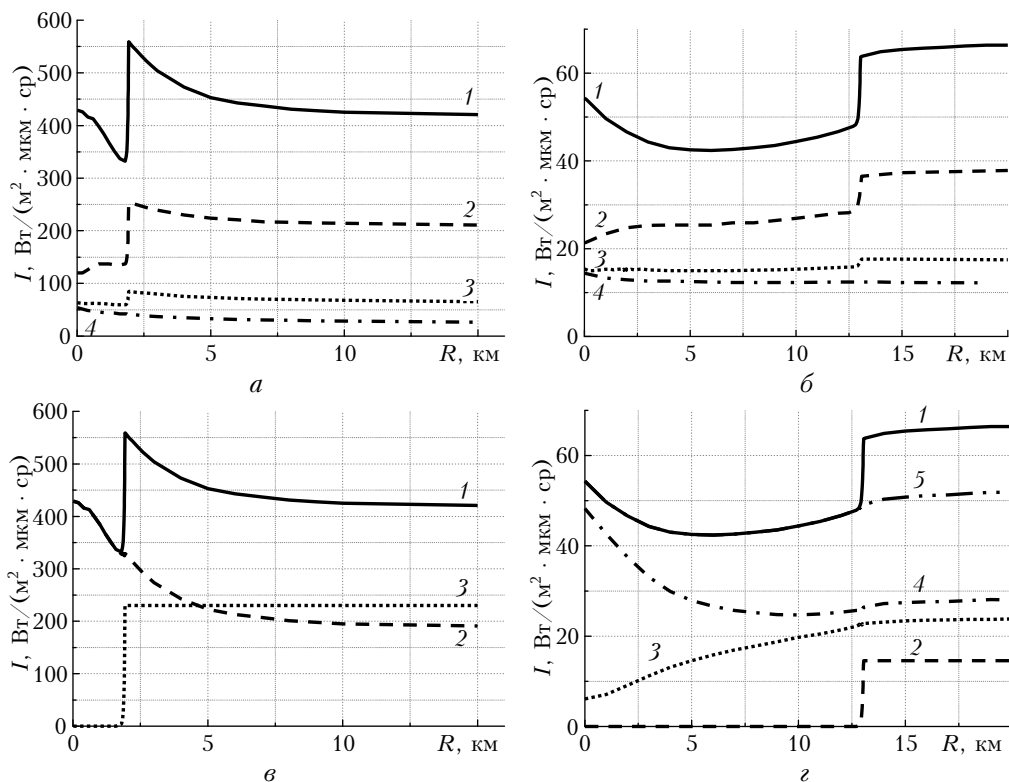


Рис. 2. Зависимость принимаемой интенсивности I от радиуса просвета R при $\theta_c = 40^\circ$ и 80° , $\theta_{\text{пр}} = 0^\circ$: *a*, *б* – полная интенсивность $I = I(R)$ при $k_{\text{отр}} = 1$ (1), $k_{\text{отр}} = 0,5$ (2), $k_{\text{отр}} = 0,11$ (коэффициент отражения для травы [33] при $\lambda = 0,55$ мкм, 3), $k_{\text{отр}} = 0$ (кривая 4); *в*, *г* – разложение полной интенсивности $I(R)$ по кратностям рассеяния (при $k_{\text{отр}} = 1$): *в* – полная интенсивность (1), рассеянное излучение (2), нерассеянное излучение (3); *г* – полная интенсивность (1), нерассеянное излучение (2), однократно рассеянное (3), многократно рассеянное (4), полное рассеянное излучение (5). $\theta_c = 40^\circ$, $\theta_{\text{пр}} = 0^\circ$ (*a*, *в*); $\theta_c = 80^\circ$, $\theta_{\text{пр}} = 0^\circ$ (*б*, *г*). Относительная погрешность вычислений не превышает 1%

(претерпевшую только отражение от Земли) компоненты, видим, что эти компоненты ведут себя физически ожидаемо (рис. 2, в): рассеянная компонента монотонно убывает (что естественно объяснить удалением облаков от линии визирования), нерассеянная же при малых R близка к нулю, затем растет (резкий рост наблюдается, начиная с оптической длины пути «Солнце — точка на земной поверхности — приемник» $\tau \sim 4$) и в условиях прямой видимости на линии «Солнце — точка на земной поверхности — приемник» достигает своего наибольшего значения. Такое поведение в сумме и дает сложную немонотонную зависимость. При отсутствии отражения от земной поверхности принимаемая интенсивность монотонно убывает (рис. 2, а, кривая 4). Для $k_{\text{отр}} = 0,5$ поведение $I(R)$ при малых R несколько отличается от случая $k_{\text{отр}} = 1$: наблюдается рост, которого нет при $k_{\text{отр}} = 1$. Можно предположить, что различие в поведении обусловлено нелинейностью, вызванной многократным отражением в системе «облачный слой — подстилающая поверхность». Проверка этого предположения предполагается в дальнейшем.

В случае большого θ_c (80°) зависимость интенсивности I от радиуса просвета выглядит несколько иначе (рис. 2, б). Резкий подъем при значениях $R \sim 13$ км объясняется таким же, как и в предыдущем случае, поведением нерассеянной компоненты. Однако при $k_{\text{отр}} = 1$ и $R \sim 5$ км наблюдается

локальный минимум, который формируется рассеянным излучением. Рассмотрим отдельно однократно рассеянное (здесь и далее под кратностью рассеяния подразумевается кратность рассеяния в атмосфере без учета кратности отражения от земной поверхности) излучение (рис. 2, г, кривая 3). Его интенсивность монотонно возрастает, в то время как поведение интенсивности многократно рассеянного излучения (рис. 2, г, кривая 4) близко к монотонному убыванию, а тогда наличие минимума объясняется главным образом изменением скорости этого убывания. При отсутствии отражения от земной поверхности (рис. 2, б, кривая 4) интенсивность излучения монотонно убывает с ростом R . Для промежуточных $k_{\text{отр}}$ аналогично случаю $\theta_c = 40^\circ$ поведение интенсивности при малых R также отличается от поведения при $k_{\text{отр}} = 1$.

Если углы θ_c , $\theta_{\text{пр}}$ велики, то существенное влияние на интенсивность I оказывает азимутальный угол φ . На рис. 3, а, б представлены ее зависимости от радиуса просвета при азимутальных углах 0° и 180° .

Из рис. 3, а, б видно, что зависимости $I(R)$ при $\varphi = 0^\circ$ и 180° различны. Однако для случаев с высоким отражением (кривые 1, 2) наблюдается резкий рост I при $R \approx 4$ км, вызванный ростом нерассеянного излучения. Чтобы найти причину различий в поведении I при $R < 4$ км, проведем разложение интенсивности по кратностям рассеяния для

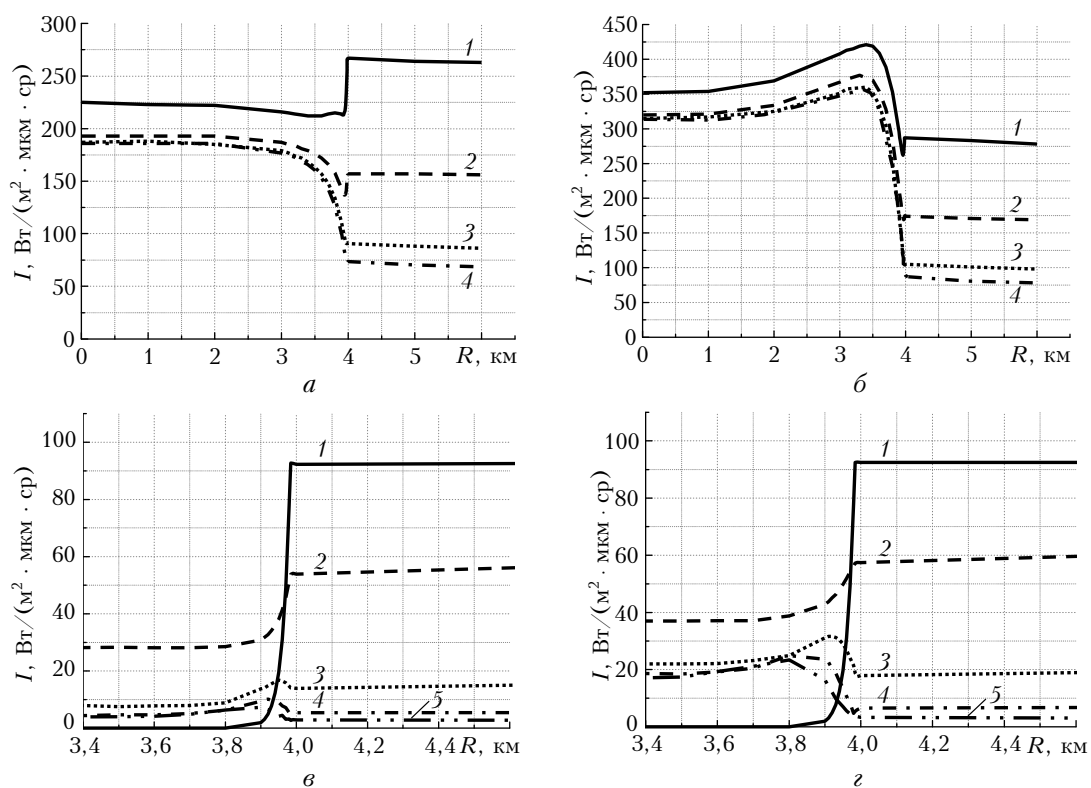


Рис. 3. Зависимость принимаемой интенсивности I от радиуса просвета R при $\theta_c = 60^\circ, \theta_{\text{пр}} = 60^\circ, \varphi = 0^\circ$ и 180° : а, б — полная интенсивность $I = I(R)$ при $k_{\text{отр}} = 1$ (1), $k_{\text{отр}} = 0,5$ (2), $k_{\text{отр}} = 0,11$ (3), $k_{\text{отр}} = 0$ (4); в, г — разложение полной интенсивности по кратностям рассеяния (при $k_{\text{отр}} = 1$): 1 — нерассеянное излучение, 2 — однократно рассеянное, 3 — двукратно, 4 — трехкратно, 5 — четырехкратно. $\theta_c = 60^\circ, \theta_{\text{пр}} = 60^\circ, \varphi = 0^\circ$ (а, в); $\varphi = 180^\circ$ (б, г). Относительная погрешность вычислений не превышает 0,7%

$k_{отр} = 1$ (рис. 3, в, з). Можно видеть, что поведение для каждой кратности в отдельности мало зависит от азимута. Нерассеянное излучение характеризуют постоянство, затем резкий рост и насыщение; первую кратность — постоянство, рост, насыщение; каждую из высших кратностей — почти постоянство, максимум, насыщение. Разница, однако, в том, что при большом азимуте вклад высших кратностей существенно больше, а их значения до области максимума выше, чем значения после нее. Поэтому можно предполагать, что различие в поведении интенсивности при различных φ вызвано главным образом индикатрисным эффектом, который приводит к различиям в соотношении кратностей рассеяния.

Отметим, что радиус просвета, при котором влияние облаков изменяет принимаемую интенсивность на 10% от ее значений при безоблачном небе, составляет, в различных рассмотренных нами случаях, от 4 до 15 км.

Оценка области влияния облачных полей на изображение земной поверхности позволит в дальнейшем разделить спутниковое изображение земной поверхности на безоблачные участки со слабым влиянием облачности, где можно использовать алгоритмы, подобные [34], безоблачные участки со значительным влиянием облачности, облачные участки с полупрозрачной облачностью и облачные участки с плотной сплошной облачностью.

В реальных ситуациях облачные поля могут располагаться в других диапазонах высот, оптические параметры облачности и безоблачной атмосферы могут значительно отличаться от рассмотренных значений. Однако следует ожидать, что характер зависимостей в реальных ситуациях в целом схож с рассмотренными, а радиусы просветов, при которых облачное поле оказывает слабое влияние на интенсивность применяемого излучения, будут близки по порядку величин.

Отметим, что в большинстве реальных ситуаций наблюдается разорванное облачное поле, для которого рассматриваемые зависимости могут заметно отличаться от сплошного облачного поля с одиночным просветом. В дальнейшем планируется использование моделей полей разорванной облачности, предложенных в работах [17–19], и методов расчета потоков солнечной радиации, описанных в работах [20–23] для оценки влияния разорванного облачного поля на излучение от безоблачного участка в разрыве облачного поля.

Выполненный анализ зависимости принимаемой спутниковой системой интенсивности излучения от радиуса просвета в сплошном облачном поле показывает, что при наличии значительного отражения зависимость интенсивности от радиуса R носит сложный немонотонный характер. При отсутствии отражения зависимость преимущественно монотонная. При оптических толщинах трассы «приемник — наблюдаемая точка — Солнце» $\tau \sim 4$ наблюдается резкий рост интенсивности, вызванный ростом нерассеянного излучения. Этот рост прекращается, когда наблюдаемый элемент поверхности становится виден вдоль линии визирования,

не пересекающей облачный слой. При больших зенитных углах Солнца и приемника наблюдается сильная азимутальная зависимость, приводящая к изменению функциональной зависимости интенсивности принимаемого излучения от радиуса просвета. Из анализа приведенных зависимостей следует, что характер изменения интенсивности нерассеянного, однократно рассеянного и многократно рассеянного излучения в этих случаях аналогичен. Выполненные расчеты показывают, что радиус просвета, при котором влияние облачности изменяет интенсивность принимаемого излучения на 10%, меняется в зависимости от схемы наблюдения от 4 до 15 км. Следует ожидать, что в аналогичных реальных ситуациях радиус просвета будет близок к рассчитанным значениям по порядку величин.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ № 15-01-00783-А, 15-07-06811-А, 16-31-00033-мол_а, программы в рамках Программы «Научный фонд им. Д.И. Менделеева Томского государственного университета» в 2015 г. № 8.1.27.2015, Программы повышения международной конкурентоспособности Томского государственного университета на 2013–2020 гг.

1. Толтин В.А., Лупян Е.А., Барталев С.А., Плотников Д.Е., Матвеев А.М. Возможности анализа состояния сельскохозяйственной растительности с использованием спутникового сервиса «ВЕГА» // Оптика атмосф. и океана. 2014. Т. 27, № 7. С. 581–586.
2. Малахов Д.В., Исламгулова А.Ф. Параметрическое дешифрирование изображений пастбищ: опыт применения данных дистанционного зондирования низкого и среднего разрешения // Оптика атмосф. и океана. 2014. Т. 27, № 7. С. 587–592.
3. Дагуров П.Н., Дмитриев А.В., Дымбрылов Ж.Б., Раднаева С.Б. Радиояркостьная температура земных покровов, измеренная микроволновым радиометром SMOS, и задача восстановления влажности почвы // Оптика атмосф. и океана. 2014. Т. 27, № 7. С. 605–609.
4. Черникова Е.А., Попова Е.А. Динамика почвенного увлажнения весной и летом 2010 г. на европейской территории России на основе анализа данных дистанционного зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12, № 4. С. 119–130.
5. Чимитдоржиев Т.Н., Кирбижекова И.И., Быков М.Е. Исследование оползневых процессов и деформаций ландшафта полуострова Ямал методами радарной интерферометрии и текстурного анализа // Оптика атмосф. и океана. 2014. Т. 27, № 7. С. 610–614.
6. Виноградова В.В., Титкова Т.Б., Белоновская Е.А., Грачева Р.Г. Воздействие изменения климата на горные ландшафты Северного Кавказа // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12, № 6. С. 35–47.
7. Козодеров В.В., Дмитриев Е.В., Каменцев В.П. Когнитивные технологии обработки оптических изображений высокого пространственного и спектрального разрешения // Оптика атмосф. и океана. 2014. Т. 27, № 7. С. 593–600; Kozoderov V.V., Dmitriev E.V., Kamentsev V.P. Technologies for Processing Optical Images of High Spatial and Spectral Resolution // Atmos. Ocean. Opt. 2014. V. 27, N 6. P. 558–565.
8. Томшин О.А., Соловьев В.С. Исследование вариаций характеристик атмосферного аэрозоля, вызванных крупномасштабными лесными пожарами в Централь-

- ной Якутии (2002 г.) // Оптика атмосф. и океана. 2014. Т. 27, № 7. С. 634–639; *Tomshin O.A., Solovyov V.S.* Study of Variations in Parameters of Atmospheric Aerosol due to Large-Scale Forest Fires in Central Yakutia // Atmos. Ocean. Opt. 2015. V. 28, N 1. P. 95–99.
9. *Козодеров В.В.* Применение данных оптического дистанционного зондирования для изучения природно-климатических процессов // Климат и природа. 2012. Т. 3, № 2. С. 3–16.
 10. *Катаев М.Ю., Бекеров А.А.* Обнаружение экологических изменений природной среды по данным спутниковых измерений // Оптика атмосф. и океана. 2014. Т. 27, № 7. С. 652–656.
 11. *Митник Л.М., Хазанова Е.С.* Динамика ледяного покрова в морях Восточно-Сибирском и Лаптевых по данным спутникового микроволнового зондирования во второй половине октября 2014 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12, № 2. С. 100–113.
 12. *Каузаев А.М., Дара А.С., Батырбаева М.Ж., Витковская И.С., Муратова Н.Р., Сальников В.Г., Турулина Г.К., Полякова С.Е., Спивак Л.Ф., Тюрбаева С.И.* Исследование динамики дат схода снежного покрова в Северном Казахстане // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13, № 1. С. 161–168.
 13. *Завалишин Н.Н.* О проблеме реконструкции среднегодовых значений альbedo Земли // Оптика атмосф. и океана. 2014. Т. 27, № 1. С. 53–58; *Zavalishin N.N.* Reconstruction of the Annual Average Values of the Earth's Albedo // Atmos. Ocean. Opt. 2014. V. 27, N 6. P. 493–498.
 14. *Зимовая А.В., Тарасенков М.В., Белов В.В.* Учет поляризации при пассивном зондировании из космоса отражательных свойств земной поверхности // Оптика атмосф. и океана. 2015. Т. 28, № 12. С. 1085–1089; *Zimovaya A.V., Tarasenkov M.V., Belov V.V.* Allowance for Polarization in Passive Space Sounding of Reflective Properties of the Earth's Surface // Atmos. Ocean. Opt. 2016. V. 29, N 2. P. 171–174.
 15. *Николаева О.В.* Новый алгоритм восстановления альbedo поверхности по данным спутникового зондирования // Оптика атмосф. и океана. 2016. Т. 29, № 3. С. 204–209; *Nikolaeva O.V.* A Nev Algorithm of Retrieving the Surface Albedo by Satellite Remote Sensing Data // Atmos. Ocean. Opt. 2016. V. 29, N 4. P. 342–347.
 16. *Соломатов Д.В., Афонин С.В., Белов В.В.* Построение облачной маски и удаление полупрозрачной облачности на спутниковых снимках ETM+/Landsat-7 // Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 9. С. 798–803.
 17. *Каргин Б.А., Пригарин С.М.* Имитационное моделирование кучевой облачности для исследования процессов переноса солнечной радиации в атмосфере методом Монте-Карло // Оптика атмосф. и океана. 1994. Т. 7, № 9. С. 1275–1287.
 18. *Зуев В.Е., Титов Г.А.* Оптика атмосферы и климат. Томск: Спектр, 1996. 272 с.
 19. *Пригарин С.М., Журавлева Т.Б., Воликова П.В.* Пуассоновская модель многослойной разорванной облачности // Оптика атмосф. и океана. 2002. Т. 15, № 10. С. 917–924.
 20. *Журавлева Т.Б., Фирсов К.М.* Алгоритмы расчетов спектральных потоков солнечной радиации в облачной и безоблачной атмосфере // Оптика атмосф. и океана. 2004. Т. 17, № 11. С. 903–911.
 21. *Журавлева Т.Б.* Моделирование переноса солнечного излучения в различных атмосферных условиях. Часть II: Стохастическая облачность // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21, № 3. С. 189–202.
 22. *Titov G.A., Zhuravleva T.B., Zuev V.E.* Mean radiation fluxes in the near-IR spectral range: Algorithms for calculation // J. Geophys. Res. D. 1997. V. 102, N 2. P. 1819–1832.
 23. *Prigarin S.M., Kargin B.A., Oppel U.G.* Random fields of broken clouds and their associated direct solar radiation, scattered transmission and albedo // Pure Appl. Opt. 1998. V. 7, N 6. P. 1389–1402.
 24. *Nikolaeva O.V., Bass L.P., Germogenova T.A., Kokhanovskiy A.A., Kuznetsov V.S., Mayer B.* The influence of neighbouring clouds on the clean sky reflectance studied with the 3-D transport code RADUGA // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2005. V. 24, N 3–4. P. 405–424.
 25. *Marshak A., Davis A., Wiscombe W., Cahalan R.* Radiative smoothing in fractal clouds // J. Geophys. Res. D. 1995. V. 100, N 12. P. 26247–26261.
 26. *Marshak A., Wen G., Coakley 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. D14S17 (7 p.).
 27. *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.
 28. *Wen G., Marshak A., Remer L., Levy R., Loeb N., Várnai T., Cahalan R.F.* Correction of MODIS Aerosol Retrieval for 3D Radiative Effects in Broken Cloud Fields // Radiation Processes in the Atmosphere and Ocean (IRS2012). 2013. AIP Conf. Proc. V. 1531. P. 280–283.
 29. *Wen G., Marshak A., Levy R., Remer L.A., Loeb N.G., Várnai T., Cahalan R.F.* Improvement of MODIS aerosol retrievals near clouds // J. Geophys. Res. Atmos. 2013. V. 118. P. 9168–9181.
 30. *Várnai T., Marshak A.* Effect of Cloud Fraction on Near-Cloud Aerosol Behavior in the MODIS Atmospheric Correction Ocean Color Product // Remote Sens. 2015. V. 7, N 5. P. 5283–5299.
 31. *Марчук Г.И., Михайлов Г.А., Назаров М.А., Дарбинян Р.А., Каргин Б.А., Елепов Б.С.* Метод Монте-Карло в атмосферной оптике. Новосибирск: Наука, Сибирское отд-е, 1976. 284 с.
 32. *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 2010 / Hansom AFB. MA 01731. 137 p.
 33. *Кринов Е.Л.* Спектральная отражательная способность природных образований. М.: Изд-во АН СССР, 1947. 271 с.
 34. *Тарасенков М.В., Белов В.В.* Комплекс программ восстановления отражательных свойств земной поверхности в видимом и УФ-диапазонах // Оптика атмосф. и океана. 2014. Т. 27, № 7. С. 622–627; *Tarasenkov M.V., Belov V.V.* Software Package for Reconstruction Reflective Properties of the Earth's Surface in the Visible and UV ranges // Atmos. Ocean. Opt. 2015. V. 28, N 1. P. 89–94.

M.V. Tarasenkov, I.V. Kirnos, V.V. Belov. **Observation of the ground surface from space through a gap in the cloud field.**

For the purposes of atmospheric correction of satellite images the task of estimation of the distance from the center of a cloud gap is considered, at which the effect of clouds is negligible. The Monte Carlo method with backward scheme is used. The value of the gap radius is found, at which the effect of clouds changes the received radiance by 10%. Dependences of received radiance on the gap radius are found and explained.