

ОПТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И БАЗЫ ДАННЫХ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ
ОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

УДК 553.361 + 551.501

М.В. Винарский, В.В. Белов

**Сравнение эффективности алгоритмов прямого моделирования
и метода локального счета в схеме сопряженных блужданий
для оценки УФ-потоков на поверхности Земли**

*Институт оптического мониторинга СО РАН,
Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск*

Поступила в редакцию 5.07.2001 г.

Проводится сравнительный анализ двух алгоритмов Монте-Карло для расчета интенсивности потоков солнечного УФ-излучения на поверхности Земли: метода прямого моделирования и метода локальной оценки в схеме сопряженных блужданий. Расчет интенсивности потоков проводился для различных оптико-геометрических условий наблюдения. При расчетах оценивалась трудоемкость каждого алгоритма. Результаты сравнения алгоритмов показывают, что для оценки потоков УФ-излучения на поверхности Земли целесообразнее применять метод сопряженных блужданий.

Введение

Проблеме исследования закономерностей распространения УФ-излучения через земную атмосферу посвящено значительное число работ [1 – 11]. В большинстве из них изложены результаты экспериментальных исследований. В них описан широкий спектр условий наблюдений: оценка освещенности УФ-излучением поверхности Земли со спутников [4, 5], измерения интенсивности УФ-излучения с помощью спектральных приборов [6, 7], интегральные измерения (области А и В, эритемная освещенность и т.д.) [8 – 10], измерение в малом телесном угле [11], измерение потока, приходящего со всей верхней полусферы, и т.д. Результаты теоретических исследований описаны, например, в [1].

Относительно малая часть работ совмещает результаты теоретических исследований и их сравнение с данными экспериментальных измерений. Кроме того, измерения нередко выполняются различными приборами, а приводимые в работах их характеристики не всегда позволяют корректно сравнивать получаемые с их помощью данные [3]. Для интерпретации результатов часто используют либо ранее полученные эмпирические зависимости [1, 13], либо приближенные теоретические оценки, точность которых не всегда известна или приемлема для описания конкретных ситуаций [12].

Цель данной работы состояла в выборе метода решения уравнения переноса излучения, в изучении его эффективности для интерпретации с его помощью экспериментальных исследований, проводимых в Институте оптического мониторинга СО РАН, связанных с измерениями УФ-потоков излучения, достигающих земной поверхности.

1. Постановка задачи

В приближении лучевой оптики, стационарности среды и постоянства источников излучения процесс переноса излучения описывается интегродифференциальным уравнением [15]:

$$(\omega, \text{grad} I(\lambda, r, \omega)) = -\sigma(\lambda, r) I(\lambda, r, \omega) + \frac{\sigma_s(\lambda, r)}{4\pi} \int_{\Omega} I(\lambda, r, \omega') g(\lambda, r, \omega', \omega) d\omega' + \Phi_0(\lambda, r, \omega) \quad (1)$$

с граничным условием $I(\lambda, r, \omega) = 0$, если $r \in \Gamma$ и $(\omega, n_r) < 0$. Здесь $\sigma(\lambda, r)$ и $\sigma_s(\lambda, r)$ – спектральные объемные коэффициенты ослабления и рассеяния соответственно; $x = (r, \omega)$ – точка фазового пространства $X = R \times \Omega$ координат $r \in R$ и направлений $\omega \in \Omega$; $g(\lambda, r, \omega', \omega)$ – нормированная индикатриса рассеяния; $\Phi_0(\lambda, r, \omega)$ – плотность распределения источников; n_r – внешняя нормаль к поверхности среды Γ в точке r .

Пусть земная поверхность – это сфера радиуса R_0 (рис. 1). Атмосфера – сферический слой радиуса $R_1 > R_0$. На поверхность атмосферы падает параллельный поток солнечного излучения в направлении $\omega^{(C)} = (0, 0, -\theta)$. Точка наблюдения находится на поверхности Земли в точке $r^* = (0, 0, R_0)$. Телесный угол наблюдения определяется заданием направления визирования $\omega^* = (\theta, \varphi)$ и апертурным углом 2γ , $0 \leq \gamma \leq \pi/2$; γ отсчитывается относительно ω^* – оси апертурного угла.

Для задания параметров модели атмосферы разобьем ее на слои $h_{i-1} \leq h \leq h_i$, $i = 1, \dots, M$, где h – высота над поверхностью планеты. Значения коэффициентов аэрозольного σ_a и молекулярного σ_m рассеяния и коэффициентов поглощения σ_c будем считать

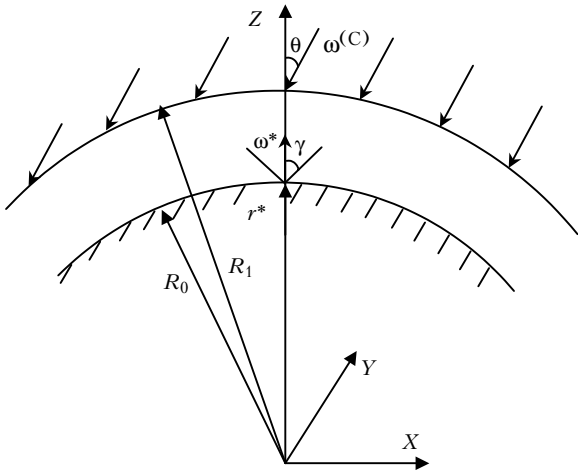


Рис. 1. Геометрическая схема наблюдения излучения в сферической атмосфере

постоянными для каждого из слоев $[h_{i-1}, h_i]$ и равными $\sigma_{a_i}(\lambda)$, $\sigma_{m_i}(\lambda)$ и $\sigma_{c_i}(\lambda)$ соответственно. Каждому слою разбиения соответствует своя индикатриса аэрозольного рассеяния $g_a(\lambda, \mu)$, а в интервалах $[\mu_{i-1}, \mu_i]$, $i = 1, \dots, n$; $\mu_0 = 1$, $\mu_n = -1$ значения $g_a(\lambda, \mu)$ предполагаются линейными. Индикатриса рассеяния воздухом для каждого слоя определяется как средневзвешенное индикатрис молекулярного и аэрозольного рассеяния в этом слое:

$$g(\lambda, \mu) = \frac{g_a(\lambda, \mu) \sigma_a(\lambda) + g_m(\lambda, \mu) \sigma_m(\lambda)}{\sigma_a(\lambda) + \sigma_m(\lambda)},$$

причем $\int_{-1}^1 g(\lambda, \mu) d\mu = 1$ для каждого слоя. Отражение

излучения от подстилающей поверхности определяется законом отражения $p(\mu, \varphi)$ и альбедо A поверхности.

2. Алгоритмы метода Монте-Карло на прямых и сопряженных траекториях

Приближенные методы решения уравнения переноса излучения, основанные на некоторых упрощающих предположениях либо об оптических характеристиках всей исследуемой среды, либо об элементарных процессах, сопровождающих распространение излучения через нее, часто позволяют в явной и компактной форме описывать закономерности переноса световых потоков в атмосфере. Однако каждый из них имеет ограниченную область применения, которая, как правило, не всегда строго определена [14].

Особое место в теории переноса излучения занимает метод статистических испытаний, или метод Монте-Карло. В нем практически отсутствуют ограничения на геометрию среды, на состав и пространственное распределение ее рассеивающих и поглощающих свойств, на условия ее освещения и регистрации световых потоков. Основным недостатком метода Монте-Карло, как и любого численного эксперимента, является частный характер решений. Этот недос-

таток компенсируется перечисленными достоинствами и возможностью получения решений в узловых точках для построения аналитических аппроксимаций.

Процесс моделирования распространения оптического излучения в дисперсных средах методом Монте-Карло достаточно подробно описан в [15]. Необходимо отметить, что в любом алгоритме метода Монте-Карло, имитирующем процесс переноса излучения в атмосфере, основой является схема моделирования траекторий блуждания фотонов. Разнообразие модификаций схем моделирования и специальных оценок позволяет существенно повышать эффективность метода Монте-Карло. Выбор соответствующего алгоритма метода Монте-Карло определяется геометрией задачи.

В данной статье рассматриваются два алгоритма метода Монте-Карло: алгоритм прямого моделирования и алгоритм локальной оценки в схеме сопряженных блужданий. Эти два варианта выбраны, исходя из предшествующего опыта решения прямых задач атмосферной оптики [17] и рекомендаций к выбору модификаций метода Монте-Карло в [16] для оценок характеристик световых потоков при освещении среды пространственно протяженным источником излучения. Алгоритм прямого моделирования выбран в качестве эталонного для контроля оценок, получаемых при локальном счете на сопряженных траекториях.

2.1. Алгоритм моделирования на прямых траекториях

Наиболее просто алгоритм оценки световых потоков, достигающих земной поверхности в заданном телесном угле, при освещении атмосферы солнечным излучением реализуется для плоскопараллельной модели атмосферы (рис. 2). В этом случае для горизонтально

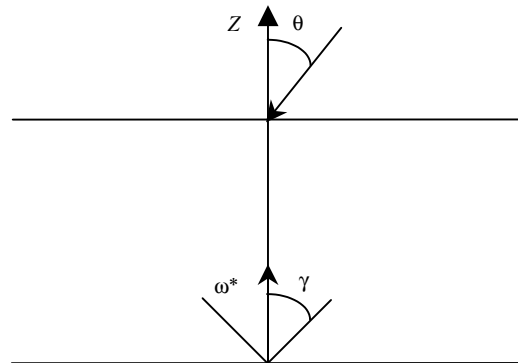


Рис. 2. Геометрия наблюдения в случае плоскопараллельной атмосферы

однородных рассеивающих и поглощающих сред можно заменить пространственно протяженный источник на мононаправленный, расположенный на верхней границе атмосферы в точке r_0 и ориентированный параллельно направлению солнечного светового потока. Тогда искомая оценка

$$P(r^*, \Omega) = P(\Omega) = \sum_i p(r_i, \Omega), \quad (2)$$

где r^* – точка, в которой ищется решение; $p(r_i, \Omega)$ – поток излучения, создаваемый в точке r_i земной поверхности мононаправленным источником в точке r_0 . Таким образом, алгоритм оценки потоков на прямых траекториях сводится к моделированию траекторий блуждания фотонов в среде и подсчету количества траекторий, пересекающих земную поверхность в пределах телесного угла Ω .

Данный алгоритм можно использовать для одновременной оценки потоков в пределах набора из N телесных углов Ω_j ($j = 1, \dots, N$). Очевидно, что точность оценок в этом случае будет возрастать с увеличением телесного угла Ω_j . Обратим внимание на то, что одновременная оценка потоков для других направлений ω_0 падения солнечных лучей на верхнюю границу атмосферы невозможна.

Перейдем к сферической модели атмосферы. Очевидно, что в этом случае невозможно воспользоваться условием горизонтальной однородности среды для замены протяженного источника мононаправленным. Это обусловлено тем, что даже в условиях однородности оптических свойств среды сферичность атмосферы и земной поверхности приводит к неоднородной освещенности последней (т.е. равенство $p(r_i, \Omega) = p(r_j, \Omega)$ строго выполняется только при $i = j$) и к невозможности применения (2) для оценки $P(r^*, \Omega)$ в (2). Поэтому применение алгоритма метода Монте-Карло, основанного на идее прямого моделирования, с заменой протяженного на моноэмиттерный источник излучения приведет к смещенной оценке потоков $P(r^*, \Omega)$.

2.2. Алгоритм локальной оценки на сопряженных траекториях

Идея алгоритмов метода Монте-Карло, построенных на сопряженных блужданиях, основана на теореме оптической взаимности [15] и состоит в следующем. Начальная точка каждой траектории блуждания фотонов разыгрывается из области расположения приемника в прямой постановке задачи. Далее, по тем же правилам, что и в схеме прямого моделирования, осуществляется расчет длины свободного пробега фотона, разыгрывается (или учитывается через весовой коэффициент) вероятность его поглощения элементами среды, пересчитываются направляющие косинусы нового направления движения и т.д. Для оценки искомого потока $P(r^*, \Omega)$ осуществляется расчет вероятности вылета фотона из среды через очередную точку рассеяния в направлении, противоположном $\omega^{(C)}$:

$$\psi_n = \frac{e^{-\tau(r_n)} g(-\omega^{(C)}) \omega_n q(r_n)}{2\pi} |\Omega|, \quad (3)$$

где n – порядковый номер «столкновения»; $\tau(r_n)$ – оптическая длина отрезка от точки r_n до границы атмосферы в направлении $-\omega^{(C)}$ (направление на Солнце); ω_n – направление движения частицы перед «столкновением» в точке r_n ; $q(r) = \frac{\sigma_s(r)}{\sigma(r)}$, $\sigma(r)$ и $\sigma_s(r)$

– объемные коэффициенты ослабления и рассеяния излучения в атмосфере; $g(\mu)$ – нормированная атмосферная индикатриса рассеяния; $|\Omega|$ – величина телесного угла наблюдения. Тогда оценкой интегральной интенсивности многократно рассеянного солнечного излучения является

$$I = M\xi, \quad \xi = \sum_{n=1}^N \psi_n,$$

где N – количество «столкновений» на траектории.

Алгоритм локальных оценок в схеме сопряженных блужданий имеет ряд достоинств. Он сравнительно легко реализуется на ЭВМ, оценка (3) имеет конечную дисперсию. В отличие от рассмотренного выше алгоритма с его помощью можно для одного апертурного угла и направления визирования одновременно получать решения для набора значений $\omega^{(C)}$. Несложно показать, что при всех прочих равных условиях точность оценок потоков $P(r^*, \Omega)$ данным методом возрастает с уменьшением $|\Omega|$.

3. Сравнение трудоемкости алгоритмов прямого моделирования и локального счета в схеме сопряженных блужданий

Несмотря на перечисленные достоинства и недостатки каждого метода, выбор какого-либо из них для расчетов не столь очевиден. Сравнительный анализ алгоритма локальной оценки в схеме сопряженных блужданий с другими алгоритмами метода Монте-Карло [16] доказал его эффективность при решении различных задач. Тем не менее эффективность применения того или иного метода для решения конкретной задачи необходимо оценивать в тестовых численных экспериментах и уже на их основании выбирать алгоритм расчета. Критерием эффективности принято считать трудоемкость алгоритма $S = Dt$, где t – время счета; D – осредненное значение относительной среднеквадратической погрешности результатов, %.

Учитывая сделанные выше замечания относительно возможности применения обсуждаемых алгоритмов для проведения численных экспериментов в условиях сферичности системы «атмосфера – земная поверхность», сравнение результатов расчетов (считая эталонными те, что получены методом прямого моделирования) и оценок трудоемкости алгоритмов выполнено нами для упрощенной геометрии задачи (см. рис. 2). При моделировании для сферической геометрии данная схема имитировалась устремлением радиуса кривизны поверхности Земли в бесконечность. Было проведено 160 численных экспериментов при $R_0 = 10^9 R_3$. Результаты, полученные обоими алгоритмами, сошлись асимптотически при увеличении количества моделируемых траекторий.

Расчет интенсивности потоков проводился в зависимости от угла поля зрения приемника γ (5, 10, 45, 90°) и для набора углов падения солнечных лучей на верхнюю границу атмосферы (0, 20, 40, 60, 80°).

Вычисления осуществлялись для упрощенной модели рассеивающей среды с оптическими характеристиками, близкими к радиационному туману. Среда задавалась однородной, расчет проводился в относительных единицах (значение внеатмосферной солнечной постоянной равнялось единице) для оптических толщ 0,5; 1; 2 и 4. При расчете контролировались точность полученных решений и время счета. Трудоемкость алгоритмов определялась из результатов расчета интенсивности для одного угла приема и одного угла направления на Солнце. При моделировании осуществлялся контроль закона сохранения энергии: количество фотонов, поступивших в атмосферу, должно равняться сумме фотонов, вылетевших из нее и поглотившихся в ней. Моделирование проводилось по пачкам, случайным i -м решением задачи являлось решение, оцененное как среднее значение для i -й пачки. Для всех условий моделирования количество траекторий в пачках равнялось 2000, а количество пачек 50. Расчет проводился на процессоре Pentium III 530 MHz.

Результаты расчетов показывают хорошую согласованность методов прямого моделирования и сопряженных блужданий (рис. 3). Анализ полученных

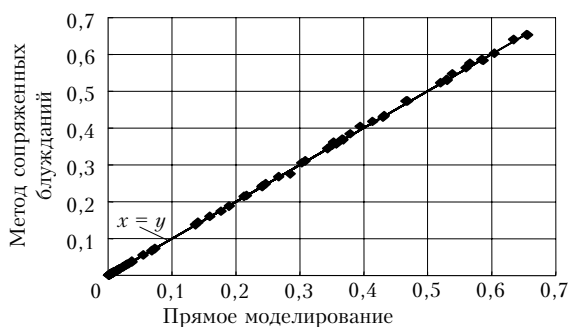


Рис. 3. Сравнение результатов расчетов

результатов (таблица) показывает, что алгоритм сопряженных блужданий эффективнее алгоритма прямого моделирования для малых телесных углов наблюдений (5, 10°). При увеличении телесного угла наблюдения эффективность алгоритма прямого моделирования возрастает, а эффективность алгоритма сопряженных блужданий немного уменьшается из-за увеличения времени счета и дисперсии результатов. Увеличение зенитного угла Солнца приводит к увеличению времени счета и незначительно увеличивает дисперсию результатов для метода прямого моделирования, в то время как для метода сопряженных блужданий при больших зенитных углах Солнца происходит заметное увеличение разброса результатов при практически неизменном времени счета. Этот факт можно учитывать при использовании алгоритма сопряженных блужданий в расчете интенсивности для нескольких зенитных углов Солнца. В этом случае точность результатов можно контролировать лишь для максимального зенитного угла Солнца (для всех остальных высот Солнца дисперсия результатов будет меньше). Увеличение оптической толщи рассеяния в атмосфере слабо влияет на дисперсию, но приводит к увеличению времени счета в обоих алгоритмах, что связано с увеличением актов рассеяния в каждой моделируемой траектории.

При интерпретации результатов измерений интенсивности потоков УФ-излучения часто возникает задача оценить поток для нескольких высот Солнца и неизменного телесного угла наблюдения или для различных направлений визирования при малой угловой апертуре детектора. Так как метод сопряженных блужданий эффективен для малых телесных углов наблюдения и позволяет вычислять оценки потока одновременно для нескольких зенитных углов, то в данных

Сравнение трудоемкости методов прямого моделирования и сопряженных блужданий ($\tau = 2$)

$\gamma/2$	θ	Прямое моделирование				Сопряженные блуждания			
		Среднее	$D, \%$	t, c	S	Среднее	$D, \%$	t, c	S
5	0	3,25E-02	12,24	1,32	16,16	3,22E-02	2,58	2,2	5,67
5	20	7,07E-03	29,32	1,43	41,93	7,20E-03	4,55	2,25	10,23
5	40	4,39E-03	28,01	1,54	43,13	4,55E-03	4,96	2,25	11,16
5	60	3,63E-03	39,15	1,76	68,90	3,52E-03	8,19	2,31	18,91
5	80	2,61E-03	46,69	1,7	79,38	2,59E-03	18,44	2,31	42,59
10	0	6,85E-02	7,98	1,32	10,54	6,74E-02	2,46	2,25	5,52
10	20	2,81E-02	11,53	1,43	16,49	2,87E-02	4,37	2,26	9,87
10	40	1,78E-02	17,46	1,54	26,89	1,83E-02	5,39	2,25	12,13
10	60	1,40E-02	19,68	1,76	34,64	1,39E-02	7,01	2,3	16,11
10	80	1,01E-02	25,25	1,71	43,18	1,03E-02	16,43	2,31	37,95
45	0	4,30E-01	2,39	1,37	3,28	4,30E-01	3,34	2,36	7,88
45	20	4,14E-01	2,70	1,43	3,86	4,18E-01	3,74	2,42	9,05
45	40	3,52E-01	3,42	1,54	5,27	3,61E-01	5,99	2,42	14,49
45	60	2,67E-01	3,47	1,76	6,11	2,68E-01	6,48	2,42	15,69
45	80	1,90E-01	4,21	1,76	7,42	1,88E-01	14,64	2,47	36,16
90	0	6,56E-01	1,51	1,37	2,06	6,52E-01	4,49	2,63	11,80
90	20	6,55E-01	1,72	1,43	2,46	6,53E-01	4,50	2,69	12,09
90	40	6,34E-01	1,90	1,54	2,92	6,40E-01	4,96	2,69	13,33
90	60	5,60E-01	2,05	1,76	3,60	5,64E-01	7,67	2,69	20,63
90	80	3,79E-01	2,52	1,7	4,28	3,85E-01	13,27	2,74	36,37

случаях алгоритм сопряженных блужданий будет эффективнее прямого моделирования.

Таким образом, учитывая результаты проведенного сравнения алгоритмов и тот факт, что метод прямого моделирования приводит к смещенной оценке в случае использования сферической геометрии, можно сделать вывод, что для оценки потоков УФ-излучения на поверхности Земли целесообразнее применять метод сопряженных блужданий.

1. *Ультрафиолетовая радиация Солнца и неба* / В.А. Белинский, М.П. Гараджа, Л.М. Меженная, Е.И. Незваль. М.: Изд-во МГУ, 1968. 228 с.
2. *Гараджа М.П.* Исследование ультрафиолетовой радиации в Москве: Дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 1974. 211 с.
3. *Madronich S., McCenzie R.L., Caldwell M.M., Bjorn L.O.* Changes in Ultraviolet Radiation Reaching // *Ambio*. 1995. V. 24. № 3. P. 143–150.
4. *Soulen P.F., and Frederick J.E.* Estimating biologically active UV irradiance from satellite radiance measurements: A sensitivity study // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. P. 4117–4126.
5. *Herman J.R., Krotkov N., Celatier E., Larko D., and Labow G.* Distribution of UV radiation at the Earth's surface from TOMS-measured UV-backscattered radiances // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. P. 12059–12076.
6. *Correl D.L., Clark C.O., Goldberg B., Goodrich V.R., Hayes D.R., jr., Klein W.H.* Spectral ultraviolet-B radiation fluxes at the earth's surface: long-time variations // *J. Geophys. Res.* 1992. V. 97. P. 7579–7591.
7. *Красковский А.Н., Турьшев Л.Н., Еланский Н.Ф.* Универсальный бортовой спектро радиометр для исследования уровней УФ-радиации в атмосфере // Атмосферный озон: Труды VI Всесоюзного симпозиума. Л.: Гидрометеоздат, 1987. С. 59–62.
8. *Елисеев А.А., Итолитов И.И., Кабанов М.В., Колесник А.Г., Раводина О.В., Редькина Н.В., Теодорович З.С.* Исследования ультрафиолетовой радиации на поверхности Земли // *Оптика атмосф. и океана*. 1994. Т. 7. № 5. С. 8–12.
9. *Лазарев Д.Н., Деметьева Т.Н.* Интегральные измерения естественной ультрафиолетовой радиации // *Радиационные процессы в атмосфере и на земной поверхности*. Л.: Гидрометеоздат, 1974. С. 250–254.
10. *Blumthaler M., Ambach W., Silbembag R. and Staehelin J.* Erythematous UV-B irradiance (Robertson-Berger sunburn meter data) under ozone deficiencies in winter/spring 1993. *Photochem. Photobiol.* 1994. № 59. P. 657–659.
11. *Павлов В.Е.* Поле нисходящей ультрафиолетовой радиации в безоблачной атмосфере: Автореф. дис. ... докт. физ.-мат. наук. Томск, 1983. 32 с.
12. *Кабанов М.В.* Формулы для потоков прямого и рассеянного солнечного излучения в безоблачной атмосфере // *Оптика атмосф. и океана*. 1999. Т. 12. № 4. С. 303–308.
13. *Белинский В.А., Андриенко Л.М.* Упрощенная радиационная модель атмосферы в ультрафиолетовой области спектра // *Радиационные процессы в атмосфере и на земной поверхности*. Л.: Гидрометеоздат, 1974. С. 273–276.
14. *Перенос радиации в рассеивающих и поглощающих атмосферах* / Под. ред. Ж. Ленобль. Л.: Гидрометеоздат, 1990. 264 с.
15. *Метод Монте-Карло в атмосферной оптике* / Под общей ред. акад. Г.И. Марчука. Новосибирск: Наука, 1976. 216 с.
16. *Назаралиев М.А.* Статистическое моделирование радиационных процессов в атмосфере. Новосибирск: Наука, 1990. 227 с.
17. *Зуев В.Е., Белов В.В., Веретенников В.В.* Теория систем в оптике дисперсных сред. Томск: изд-во «Спектр» ИОА СО РАН, 1997. 402 с.

M.V. Vinarskii, V.V. Belov. **Comparison of efficiencies of the methods of direct simulation and local estimation in the inverse scheme for UV radiation streams to the Earth surface.**

Comparative analysis of two Monte-Carlo algorithms for calculation of solar UV stream intensity on the Earth surface was carried out: the method of direct simulation and the method of a local estimation in the inverse scheme. The account of stream intensity was carried out for various optical and geometrical conditions of observation. The efficiency of each algorithm was estimated. The results of comparison show, that the calculations of solar UV stream intensity on the Earth surface are more expedient with the help of method of a local estimation in the inverse scheme.