

Сравнительная оценка влияния молекулярного рассеяния и общего содержания озона в атмосфере на характеристики УФ-радиации

И.Н. Мельникова¹, Т.А. Мурина², И.А. Мазепа³, И.С. Гаранина³

¹ Научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН
197110, Санкт-Петербург, ул. Корпусная, 18

E-mail: Irina.Melnikova@pobox.spbu.ru

² Государственный политехнический университет

³ Российский государственный гидрометеорологический университет

Влияние УФ-радиации на живые организмы на поверхности земли очень важно, его воздействие, как положительное, так и отрицательное, обсуждалось многократно. Атмосфера Земли задерживает солнечную радиацию с длиной волны короче 0,28 мкм практически полностью. В качестве основного фактора в атмосфере, ослабляющего УФ-радиацию, фигурирует атмосферный озон, неравномерно распределенный по всей толще атмосферы и имеющий максимум на высоте 10-15 км. Весьма значительно ослабляет УФ-радиацию молекулярное рассеяние в атмосфере, воздействие которого оценено в работе. Для этого была рассмотрена модель однородной атмосферы для 6 длин волн: 0,28, 0,30, 0,32, 0,34, 0,36, 0,40 мкм, для 2-х значений атмосферного давления, соответствующих уровню моря и высоте 5000 м: 1000 и 500 мб, и для 3-х значений содержания озона в атмосфере: нормальное для лета и средних широт, уменьшенное на 10 и на 50%. Альbedo подстилающей поверхности принято 0 и 0,8. Расчет потоков солнечной УФ радиации и доли рассеянного света в потоке пропущенной солнечной радиации в условиях безоблачной атмосферы методом Эддингтона. Рассчитывались отраженный и пропущенный потоки солнечной УФ-радиации в зависимости от зенитного угла солнца, а также их отношение и доля рассеянной радиации в пропущенном потоке.

Введение

Влияние УФ-радиации на живые организмы на поверхности земли, как положительное, так и отрицательное, многократно обсуждалось [1-3]. Атмосфера Земли задерживает солнечную радиацию с длиной волны короче 0,28 мкм практически полностью. Наиболее биологически активной является УФ-В радиация в спектральном диапазоне 0,29-0,32 нм и поэтому зачастую радиация в этом диапазоне измеряется в эритемных единицах. В качестве основного фактора в атмосфере, ослабляющего УФ-радиацию, обычно рассматривается атмосферный озон, неравномерно распределенный по всей толще атмосферы и имеющий максимум на высоте 10-15 км. Однако, весьма значительно ослабляет УФ-радиацию также и молекулярное рассеяние в атмосфере. Данная работа посвящена оценке влияния молекулярного рассеяния на уменьшение потока пропущенной УФ-радиации у поверхности земли. Для этого была рассмотрена простейшая модель однородной атмосферы для 2-х значений атмосферного давления, соответствующих уровню моря и высоте 5000 м: 1000 и 500 мб, и 3-х значений содержания озона в атмосфере: нормальное для лета и средних широт, уменьшенное на 10 и на 50%. Напомним, что самые значительные наблюдаемые уменьшения содержания озона составляют 30%. Потоки УФ-излучения рассчитывались в ряде длин волн в диапазоне 0,28-0,40 мкм, Выбрано два значения альbedo подстилающей поверхности 0 и 0,8. Рассматриваются потоки отраженной и пропущенной радиации, поток на вертикальную поверхность и некоторые другие характеристики.

Метод расчета

Расчет потоков солнечной УФ радиации и доли рассеянного света в потоке пропущенной солнечной радиации в условиях безоблачной атмосферы методом Эддингтона [4-6]. Оптическая толщина атмосферы обозначим τ_0 . Рассчитывались отраженный и пропу-

щенный потоки солнечной УФ-радиации на горизонтальную и вертикальную поверхности в единицах потока от Солнца на верхней границе атмосферы $S_{\lambda}\mu_0$ в зависимости от зенитного угла солнца, а также их отношение и доля рассеянной радиации в пропущенном потоке.

Выражения для полусферического потока отраженной солнечной радиации на верхней границе атмосферы (плоское альbedo атмосферы) $F^{\uparrow}(0, \mu_0)$ и потока пропущенной радиации у земной поверхности (освещенность поверхности или пропускание) $F^{\downarrow}(\tau_0, \mu_0)$ получаются путем решения уравнений для полусферических потоков с граничными условиями $F^{\uparrow}(\tau_0, \mu_0) = F^{\downarrow}(0, \mu_0) = 0$, что соответствует допущению: альbedo поверхности $A=0$, где μ_0 - косинус зенитного угла Солнца и имеют вид следуя обозначениям [4,5]:

$$F^{\uparrow}(0, \mu_0) = m_6 \left[(1 - \kappa\mu_0)(a_2 + \kappa\gamma_3)e^{\kappa\tau_0} - (1 + \kappa\mu_0)(a_2 - \kappa\gamma_3)e^{-\kappa\tau_0} - 2\kappa(\gamma_3 - a_2\mu_0)e^{-\tau_0/\mu_0} \right] \quad (1)$$

$$F^{\downarrow}(\tau_0, \mu_0) = [1 - m_6(m_1 - m_2 - m_3)]e^{-\tau_0/\mu_0}$$

где введены обозначения:

$$m_1 = (1 + \kappa\mu_0)(a_1 + \kappa\gamma_4)e^{\kappa\tau}, \quad m_2 = (1 - \kappa\mu_0)(a_1 - \kappa\gamma_4)e^{-\kappa\tau},$$

$$m_3 = 2\kappa(\gamma_4 + a_1\mu_0)e^{\tau/\mu_0}, \quad m_4 = (\kappa + \gamma_1)e^{\kappa\tau} + (\kappa - \gamma_1)e^{-\kappa\tau}, \quad (2)$$

$$m_5 = 1 - \kappa^2\mu_0^2, \quad m_6 = \frac{\omega'}{m_4 m_5},$$

$$a_1 = \gamma_1\gamma_4 + \gamma_2\gamma_3, \quad a_2 = \gamma_1\gamma_3 + \gamma_2\gamma_4,$$

$$\kappa = \sqrt{\gamma_1^2 - \gamma_2^2}$$

$$\gamma_1 = \frac{1}{4}[7 - \omega'(4 + 3g')], \quad \gamma_2 = -\frac{1}{4}[1 - \omega'(4 - 3g')] \quad (3)$$

$$\gamma_3 = \frac{1}{4}(2 - 3g'\mu_0), \quad \gamma_4 = 1 - \gamma_3,$$

Здесь: g' - параметр асимметрии индикатрисы рассеяния, ω' - альbedo однократного рассеяния. Учет альbedo поверхности производился согласно известным соотношениям, приведенным, например, в [6]:

$$\bar{F}^{\uparrow}(0, \mu_0) = F^{\uparrow}(0, \mu_0) + A_s V(\tau') \bar{F}^{\downarrow}(\tau_0, \mu_0)$$

$$\bar{F}^{\downarrow}(\tau_0, \mu_0) = \frac{F^{\downarrow}(\tau_0, \mu_0)}{1 - A_s A(\tau_0)} \quad (4)$$

где $A(\tau=0)$ и $V(\tau_0)$ - сферическое альbedo и пропускание выражаются следующими интегральными соотношениями:

$$A(\tau=0) = 2 \int_0^1 F^{\uparrow}(0, \mu_0) \mu_0 d\mu_0 \quad (5)$$

$$V(\tau_0) = 2 \int_0^1 F^{\downarrow}(\tau_0, \mu_0) \mu_0 d\mu_0$$

Откуда, выполняя интегрирование, можно получить выражения для величины $A(0)$ в случае диффузной радиации, следуя [4]

$$A(0) = \frac{\gamma_2(1 - e^{-2\kappa\tau_0})}{\kappa + \gamma_1 + (\kappa - \gamma_1)e^{-2\kappa\tau_0}} \quad (6)$$

и для величины $V(\tau_0)$ согласно [4,5]:

$$V(\tau_0) = \frac{2\kappa e^{-\kappa\tau_0}}{\kappa + \gamma_1 + (\kappa - \gamma_1)e^{-2\kappa\tau_0}} \quad (7)$$

Причем, согласно [6] можно принять приближенное равенство:

$$A(0) \approx \frac{4}{4 + 3(1 - g)\tau_0}.$$

Доля рассеянного света в падающем потоке может быть вычислена по формуле

$$tt = \frac{\bar{F}^\downarrow(\tau_0, \mu_0) - \exp(-\frac{\tau_0}{\mu_0})}{\bar{F}^\downarrow(\tau_0, \mu_0)} \quad (8)$$

Для анализа характеристик радиации, выходящей из слоя, оказывается полезным исследовать отношение отраженного потока на верхней границе атмосферы к потоку, пропущенному слоем атмосферы (не путать с альбедо поверхности, где в определении стоит поток вверх, отраженный поверхностью на уровне нижней границы атмосферы):

$$rr = \frac{\bar{F}^\uparrow(\tau = 0, \mu_0)}{\bar{F}^\downarrow(\tau_0, \mu_0)}.$$

Для оценки потенциальной УФ-опасности для здоровья человека следует иметь значения потоков прямой и диффузной радиации на вертикальную поверхность (поток УФ-радиации, приходящий на кожу стоящего вертикально человека), применяя следующие соотношения для потока прямой радиации на вертикальную поверхность, ориентированную на солнце:

$$\bar{F}^\downarrow_{vert}(\tau_0, \mu_0)_{direct} = \frac{\bar{F}^\downarrow(\tau_0, \mu_0)}{2} \quad (9)$$

и для потока суммарной радиации на вертикальную поверхность, ориентированную на солнце:

$$\bar{F}^\downarrow_{vert}(\tau_0, \mu_0)_{Sum} = \frac{\bar{F}^\downarrow(\tau_0, \mu_0)}{2} + \bar{F}^\downarrow(\tau_0, \mu_0) \sin(\mu_0) \quad (10)$$

Соответственно, поток суммарной радиации на вертикальную поверхность, ориентированную от солнца выражается формулой:

$$\bar{F}^\downarrow_{vert}(\tau_0, \mu_0)_{Sum} = \bar{F}^\downarrow(\tau_0, \mu_0) \sin(\mu_0) \quad (11)$$

Для получения потоков в энергетических единицах необходимо полученные значения умножить на величину внеатмосферного значения потока и косинус зенитного угла солнца $S_0 \mu_0$.

Оптическая модель атмосферы

Для расчета радиационных характеристик необходимо задать оптическую модель атмосферы – набор оптических параметров, описывающих среду и падающее излучение. Расчет характеристик радиации проводился в 6 длинах волн: 0,28, 0,30, 0,32, 0,34, 0,36, 0,40 мкм. Будем рассматривать простейшую вертикально однородную модель атмосферы, так как согласно выводу, сделанному в [6] при определении потоков пропущенной радиации подобное приближение внесет ошибку в пределах нескольких процентов (<10%). Считаем, также, что в молекулярной атмосфере присутствуют атмосферные аэрозоли, рассеивающие и поглощающие свет. Введем следующие величины:

- оптическая толщина безоблачной атмосферы $\tau_0 = \tau_{a,p} + \tau_{a,n} + \tau_{Rel} + \tau_{oz}$,

где $\tau_{a,p}$ - оптическая толщина аэрозольного рассеяния, $\tau_{a,n}$ - оптическая толщина аэрозольного поглощения, τ_{Rel} и τ_{oz} - оптические толщины молекулярного (рэлеевского) рассеяния и поглощения озонном;

- альбедо однократного рассеяния (вероятность выживания кванта) $\omega = (\tau_{a,p} + \tau_{Rel}) / \tau_0$;

Модель атмосферы в нашем случае будем описывать следующими параметрами, значения которых выбраны согласно данным [8]:

$\tau_{\text{Rel}} 1000\text{мб}$ - оптическая толщина молекулярного рассеяния атмосферы на уровне моря;

$\tau_{\text{Rel}} 500\text{мб}$ - оптическая толщина молекулярного рассеяния атмосферы на высоте 5 км;

τ_{ap} и $\tau_{\text{ап}}$ аэрозольная оптическая толщина рассеяния и поглощения;

τ_{oz} - оптическая толщина поглощения озона для нормального содержания (I);

$0,9 \tau_{\text{oz}}$ – оптическая толщина поглощения озона для содержания, уменьшенного на 10% (II);

$0,5 \tau_{\text{oz}}$ – оптическая толщина поглощения озона для содержания, уменьшенного вдвое (III);

$\tau_{i,1000}$ и $\tau_{i,500}$ – суммарная оптическая толщина для i-той модели атмосферы на уровне моря и на высоте 5 км;

$\omega_{i,1000}$ и $\omega_{i,500}$ – альbedo однократного рассеяния для i-той модели атмосферы на уровне моря и на высоте 5 км;

S_{λ} – спектральная солнечная постоянная по данным [7];

Спектральные значения оптических параметров приведены в Табл. 1.

Таблица 1. Оптическая модель однородной безоблачной атмосферы в УФ диапазоне

| Модель | λ , мкм | 0,28 | 0,30 | 0,32 | 0,34 | 0,36 | 0,40 |
|----------------|--|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|------------------|
| | $\tau_{\text{Rel}} 1000\text{мб}$ | 1,5160 | 1,1524 | 0,8885 | 0,6974 | 0,5547 | 0,3640 |
| | $\tau_{\text{Rel}} 500\text{мб}$ | 0,7580 | 0,5762 | 0,4443 | 0,3487 | 0,2774 | 0,1820 |
| | τ_{ap} | 0,3870 | 0,3711 | 0,3550 | 0,3390 | 0,3390 | 0,2760 |
| | $\tau_{\text{ап}}$ | 0,0400 | 0,0400 | 0,0400 | 0,0400 | 0,0400 | 0,0400 |
| | $\tau_{\text{pac}} 1000\text{мб}$ 500мб | 1,9030 1,1450 | 1,5235 0,9473 | 1,2435 0,7993 | 1,0364 0,6877 | 0,8937 0,6164 | 0,6400 0,4580 |
| I II III | τ_{oz} $0,9 \tau_{\text{oz}}$ $0,5 \tau_{\text{oz}}$ | 36,140 32,431 18,070 | 3,4450 3,1001 1,7233 | 0,3061 0,2750 0,1530 | 0,0220 0,0191 0,0110 | 0,61(-3) 0,55(-3) 0,30(-3) | 0,0000 |
| I II III | $\tau_{i,1000}$ $\tau_{II,1000}$ $\tau_{III,1000}$ | 38,080 34,374 20,013 | 5,0085 4,6276 3,0068 | 1,5896 1,5585 1,4365 | 1,0984 1,0955 1,0874 | 0,9440 0,9440 0,9430 | 0,6800 |
| I II III | $\omega_{i,1000}$ $\omega_{II,1000}$ $\omega_{III,1000}$ | 0,04044 0,05934 0,10566 | 0,30418 0,32922 0,50669 | 0,78227 0,79788 0,86564 | 0,94355 0,94605 0,953099 | 0,95657 0,95657 0,95758 | 0,94118 |
| I II III | $\tau_{i,500}$ $\tau_{II,500}$ $\tau_{III,500}$ | 37,325 33,616 19,255 | 4,4670 4,1220 2,7451 | 1,1454 1,1143 0,9923 | 0,7497 0,7468 0,7387 | 0,6671 0,6665 0,6640 | 0,4980 |
| I II III | $\omega_{i,500}$ $\omega_{II,500}$ $\omega_{III,500}$ | 0,03067 0,03448 0,05946 | 0,18914 0,20471 0,31505 | 0,69784 0,71731 0,8055 | 0,91730 0,92086 0,93096 | 0,93089 0,93173 0,93524 | 0,91967 |
| | $S_{\lambda}, \text{Вт м}^{-2} \text{нм}^{-1}$ | 87,9615 | 305,720 | 793,823 | 1195,79 | 1294,811 | 1850,01 |

Альbedo подстилающей поверхности выбрано 0 и 0,8.

Принято приближение изотропного рассеяния ($g = 0$), так как в данном рассмотрении нас интересуют потоки восходящего и нисходящего излучения, а форма релеевской индикатрисы близка к изотропной и оказывает влияние только на угловое распределение интенсивности излучения. Расчет потоков выполнен для зенитных углов солнца: 0, 15, 30, 45, 60, 75 градусов.

Результирующими величинами являются:

Потоки отраженной и пропущенной радиации; отношение отраженного атмосферой потока на верхней границе к пропущенному потоку на уровне подстилающей поверхности; доля диффуз-

ной радиации в пропущенном потоке; поток на вертикальную плоскость, ориентированную к солнцу и от солнца. Все величины приводятся на рисунках для зенитного угла солнца 45°.

Результаты расчетов

На рисунках представлены рассчитанные характеристики УФ-радиации для зенитного угла солнца 45°.

На рис. 1 представлена спектральная зависимость в логарифмическом масштабе отношения отраженного атмосферой потока к пропущенному потоку, которая показывает, насколько отраженный атмосферой поток УФ радиации превосходит пропущенный к подстилающей поверхности в диапазоне 0,28 – 0,30 мкм. Видно, что если для длин волн больше 0,30 мкм разница между моделями (содержанием озона) и давлением в атмосфере практически отсутствует, то для длины волны короче 0,30 мкм содержание озона заметно влияет на рассматриваемую величину.

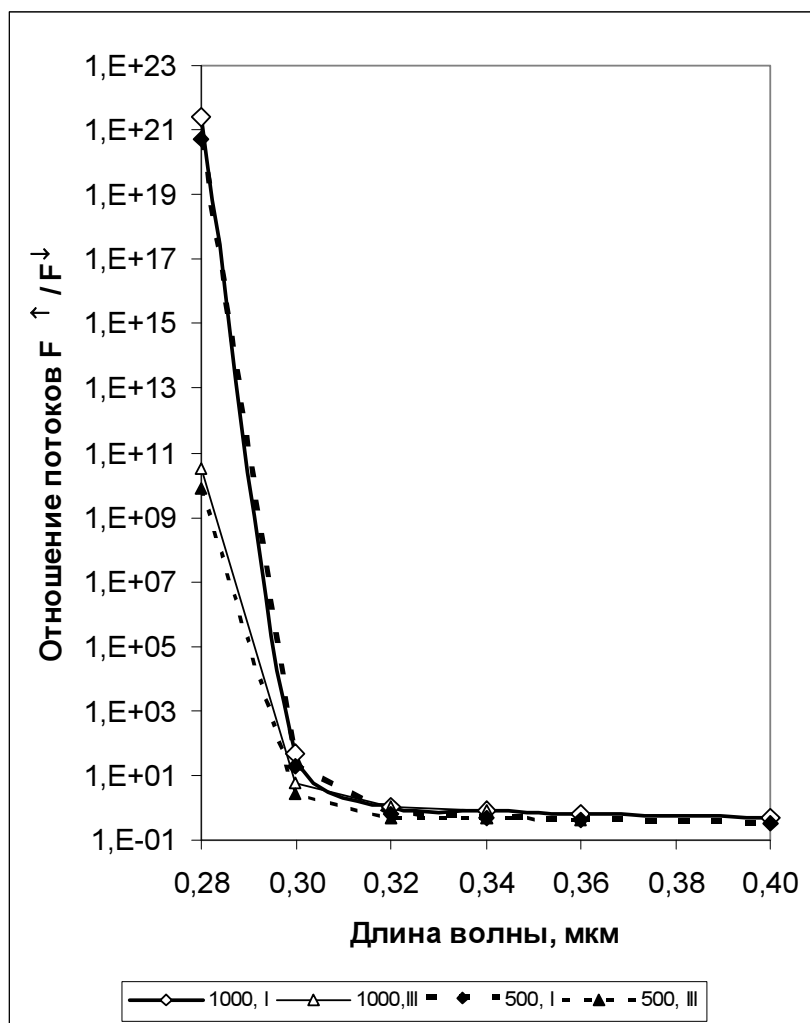


Рис.1 Отношение отраженного потока к пропущенному в зависимости от длины волны для моделей атмосферы I (отмечено ромбами) и II (отмечено треугольниками) и двух случаев атмосферного давления 500 (штриховая линия) и 1000 мб (сплошная линия)

Спектральная зависимость отраженного потока (рис. 2) формируется двумя процессами – релеевским рассеянием, определяющим возрастание в коротковолновой области и уменьшение, вызванное поглощением озоном. Альbedo поверхности очень слабо влияет на отраженный поток и на величину отношения отраженного потока, к пропущенному.

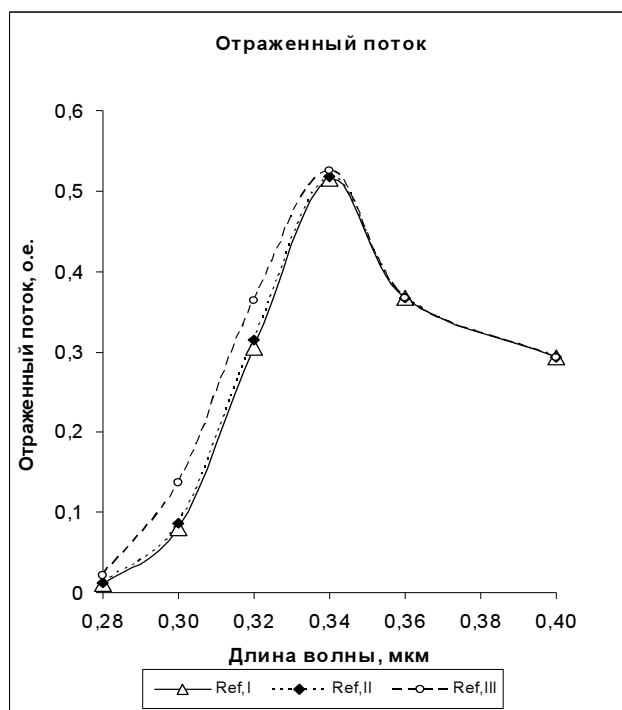


Рис. 2. Поток отраженной радиации в относительных единицах $S_{\lambda\mu_0}$

На рис. 3 представлена доля диффузной радиации в потоке на подстилающую поверхность. Видно, как меняется по спектру доля рассеянной УФ-радиации в пропущенном потоке для 2-х моделей содержания озона в атмосфере и 2-х значений альbedo подстилающей поверхности. Увеличение альbedo поверхности от 0 до 0,8 приводит к увеличению доли рассеянной радиации, причем влияние альbedo поверхности значительно для длин волн длиннее 0,3 мкм. Вполне закономерно сильное влияние величины атмосферного давления на увеличение доли диффузной радиации. Содержание озона в атмосфере выявляется в области длин волн короче 0,30 мкм.

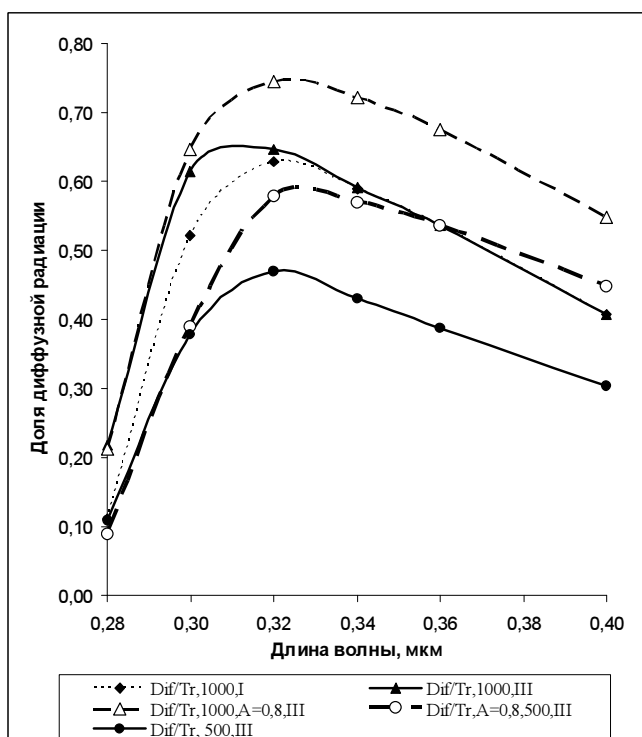


Рис. 3. Доля диффузной радиации в пропущенном потоке УФ-радиации в зависимости от длины волны

Спектральные зависимости потока, пропущенного атмосферой к подстилающей поверхности, в энергетических единицах демонстрируются на рис. 4. Увеличение альбедо поверхности до 0,8 по влиянию на поток у подстилающей поверхности равнозначно уменьшению содержания озона на 50%. Так же как и увеличение высоты над уровнем моря до 5000 м (уменьшение давления до 500 мб). Интересно, что влияние увеличения альбедо поверхности на поток УФ-радиации у поверхности оказывается значительно больше, чем уменьшение давления.

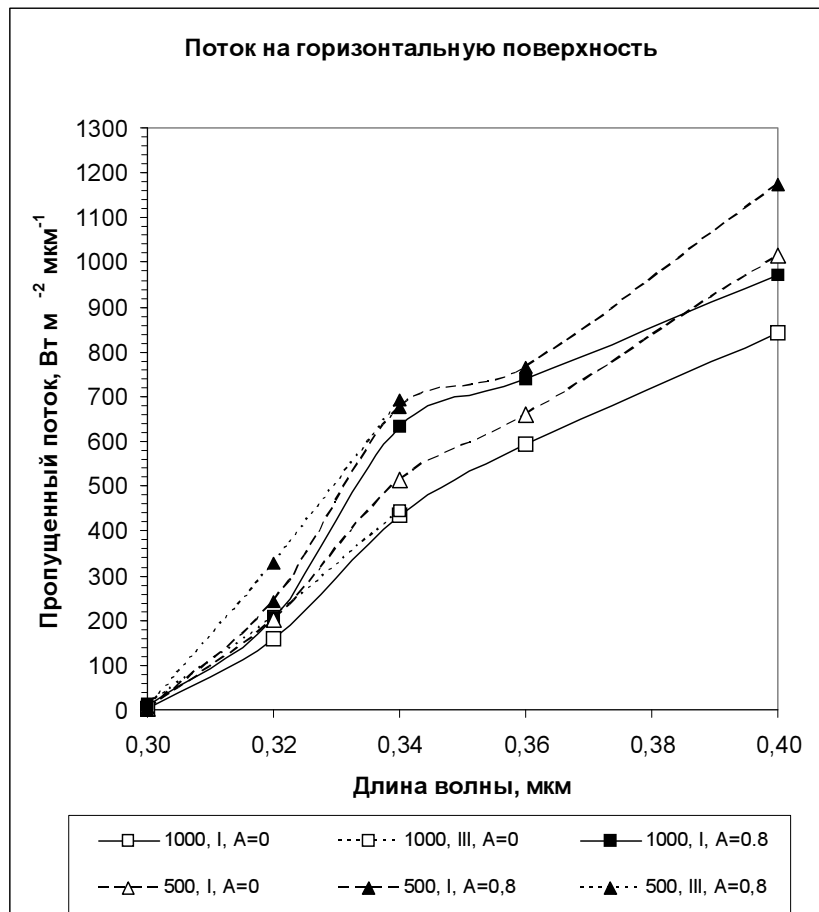


Рис. 4. Спектральные зависимости потока пропущенной УФ-радиации на горизонтальную поверхность в энергетических единицах для 2-х моделей атмосферы (I – сплошная или штриховая линии) и III – пунктирная линия), 2-х значений атмосферного давления (1000 мб – отмечено квадратами и 500 мб – треугольниками) и 2-х значений альбедо поверхности ($A=0$ – прозрачные значки на кривых и $A=0,8$ – сплошные значки)

Спектральная зависимость потока на вертикальную поверхность показаны на рис. 5, а угловые зависимости – на рис. 6. Поток на вертикальную поверхность хорошо моделирует освещение тела стоящего человека. Оказывается, что при освещении солнцем под углом 45° на вертикальную поверхность поток при нормальном содержании озона (особенно в случае альбедо поверхности $A=0,8$) равен и даже превосходит поток УФ-радиации при содержании озона, уменьшенном вдвое. Из угловой зависимости потоков на горизонтальную и вертикальную поверхности следует, что при зенитных углах освещения превышающих 30° поток на вертикальную поверхность превосходит поток на горизонтальную поверхность. Причем на длине волны 0,32 мкм и углах освещения больших 60° поток в атмосфере с нормальным содержанием озона примерно равен потоку с уменьшенным вдвое содержанием озона.

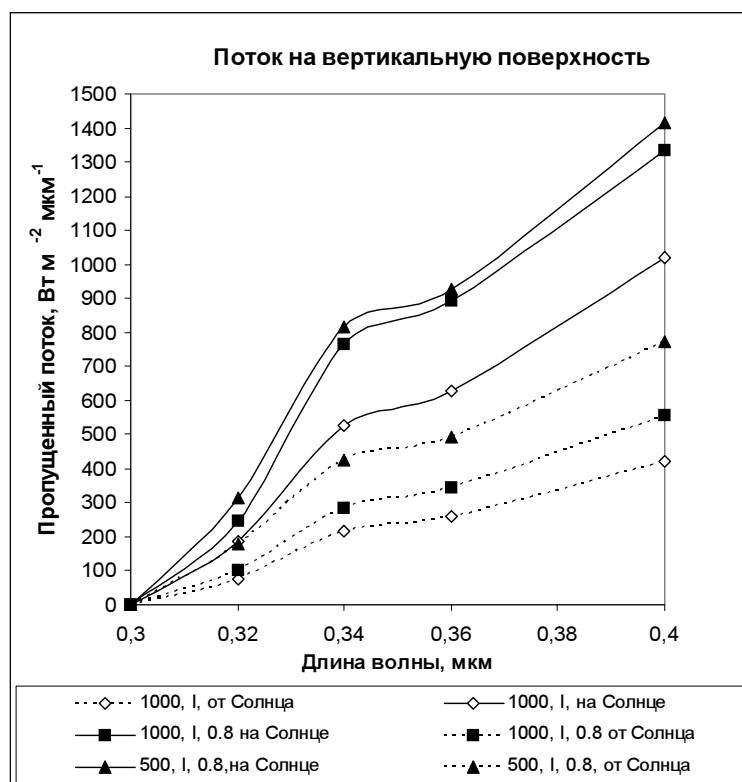


Рис. 5. Спектральные зависимости потока пропущенной УФ-радиации на вертикальную поверхность в энергетических единицах для модели атмосферы I, 2-х значений атмосферного давления (1000 мб – отмечено квадратами и 500 мб – треугольниками) и 2-х значений альбедо поверхности ($A=0$ – прозрачные значки на кривых и $A=0,8$ – сплошные значки). Вертикальная поверхность ориентирована к солнцу (сплошные линии) и от солнца (штриховые)

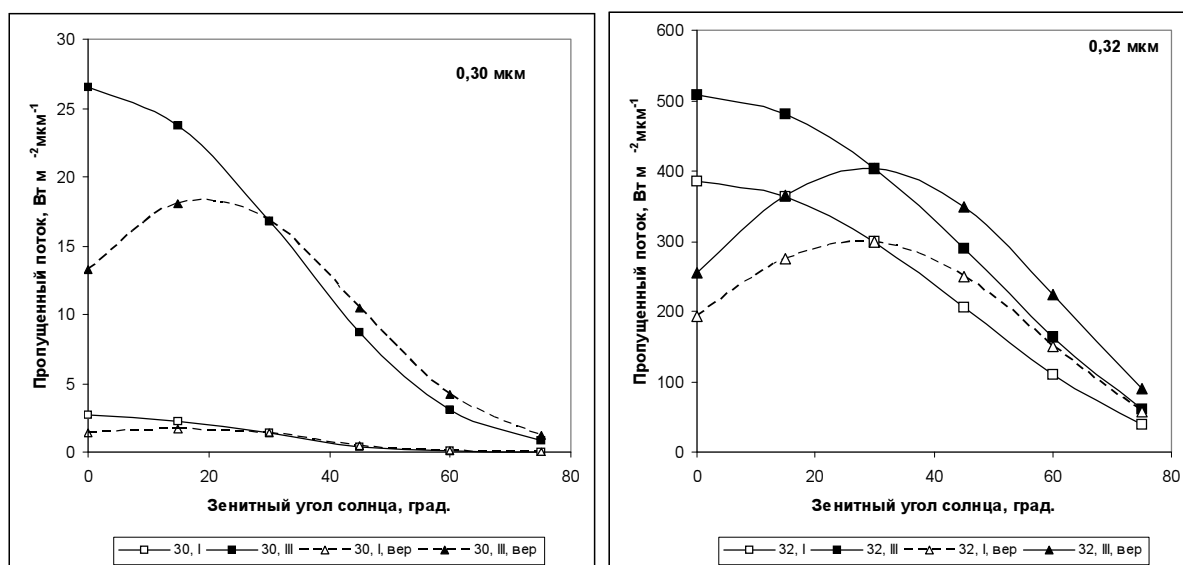


Рис. 6. Угловые зависимости потока пропущенной УФ-радиации на горизонтальную (квадраты) и вертикальную (треугольники) поверхности для длин волн 0,30 и 0,32 мкм (указано на рис.) для атмосферного давления 1000 мб и моделей атмосферы I (прозрачные значки) и II (сплошные значки)

Заключение

В качестве основного компонента в атмосфере, ослабляющего УФ-радиацию, является атмосферный озон. Однако, весьма важным ослабляющим фактором следует признать молекулярное

рассеяния в атмосфере, на что указывает сравнение результатов в случае атмосферного давления 1000 и 500 мб. Также большое влияние оказывает геометрия освещения и альbedo поверхности. Так, при рассмотренных сочетаниях указанных факторов поток УФ-радиации при нормальном содержании озона в атмосфере превосходит поток при содержании озона, уменьшенном вдвое.

Литература

1. *Kondratyev K.Y., Varotsos C.A.* Global total ozone dynamics - Impact on surface solar ultraviolet radiation variability and ecosystems // *Environmental Science and Pollution Research* 1996 V. 3 No. 4, P. 205-209.
2. *Kondratyev K.Y., Varotsos C.A.* Global total ozone dynamics - Impact on surface solar ultraviolet radiation variability and ecosystems .1. Global ozone dynamics and environmental safety // *Environmental Science and Pollution Research*, 1996, V. 3, No. 3, P. 153-157.
3. *Varotsos C., Kondratyev K.Y., Katsikis S.* On the relationship between total ozone and solar ultraviolet radiation at St Petersburg, Russia // *Geophysical Research Letters*, 1995, V. 22, No. 24, P. 3481-3484.
4. *Harshvardhan, M.D. King.* Comparative accuracy of diffuse radiative properties computed using selected multiple scattering approximations // *Journal of the Atmospheric Sciences*, V. 50, 1993, P. 247-259.
5. *King, M.D., Harshvardhan.* Comparative accuracy of the albedo, transmission, and absorption for selected multiple scattering approximations // *NASA Reference Publications*, 1160, 41 p.
6. *Минин И.Н.* Теория переноса излучения в атмосферах планет // М.: Наука, 1988. 264 с.
7. *Jacqueline Lenoble.* Laboratoire d'Optique Atmospherique\UFR de Physique Bat. P5\USTL\59655 Villeneuve d'Ascq\France\Universite des Sciences et Technologies de Lille\station name Villard_St_Pancrace // частное сообщение.
8. Радиационные характеристики атмосферы и земной поверхности, под ред. К.Я. Кондратьева // Л.: Гидрометеиздат, 1969. 564 с.