

**В.Н. Воронков, В.А. Зайцева, С.И. Кононович,
С.Б. Костюкевич, Л.П. Ловчикова, В.Е. Плюта**

АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УГЛОВЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ОТРАЖЕННОЙ РАДИАЦИИ ОТ ВОДНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ В ВИДИМОМ ДИАПАЗОНЕ СПЕКТРА

Описываются результаты самолетных и космических измерений уходящего излучения в области спектра 0,4–0,8 мкм. Получены спектральная яркость и степень поляризации излучения системы «океан–атмосфера» с высот 1,3 и 6 км в зависимости от угла визирования в диапазоне 0–50°. Анализируется зависимость спектральной яркости системы «океан–атмосфера» с высоты 350 км от угла визирования 106°±0°±46° и зенитного угла Солнца в области 5–90°.

Анизотропия рассеяния света при дистанционных исследованиях водных поверхностей затрудняет интерпретацию экспериментального материала, традиционно основанную на сопоставлении теоретических и наблюдаемых значений яркости. Особенно сложным является теоретический анализ переноса поляризованного излучения в системе «океан–атмосфера». Поэтому экспериментальные данные по угловой, спектральной и поляризационной структуре поля излучения водных поверхностей на разных высотах в атмосфере и за ее пределами представляют несомненный интерес. В настоящей работе рассмотрены результаты самолетных и космических экспериментов, выполненных с помощью трассового спектрометра МСС–2МВ [1] и спектрополяриметра МСС–2П [2] в интервале длин волн 0,4–0,8 мкм. Эксперименты были поставлены так, чтобы исследовать угловые зависимости интенсивности света, а также изменения степени и азимута поляризации, которые являются дополнительными дешифровочными признаками состояния водных поверхностей.

Рассмотрим сначала результаты самолетных экспериментов, а затем проанализируем трансформацию этих данных при съемке с пилотируемых орбитальных станций за счет атмосферных искажений. Исследования спектрополяризационных характеристик проводились с самолета–лаборатории Ту-134 над акваториями Каспийского моря с высот 1, 3, 6 км. Азимут визирования φ , отсчитываемый относительно плоскости солнечного вертикала, изменялся от 0 до 360° с шагом 45° для высоты $H = 1$ км и с шагом 90° для $H > 1$ км. Угол визирования Θ выбирался в диапазоне 0–50°, а зенитный угол Солнца оставался приблизительно постоянным и составлял 54–56°.

В табл. 1 представлена угловая зависимость отраженной радиации, нормированной на значения яркости при $\Theta = 0^\circ$ в плоскости солнечного вертикала (азимут $\varphi = 0^\circ$ соответствует положению Солнца) на длинах волн 0,45 и 0,60 мкм. Анализ данных показывает, что вне области зеркального блеска ($215^\circ < \varphi < 150^\circ$) отраженное от поверхности моря излучение на всех высотах практически изотропно, что согласуется с данными работы [3]. С увеличением высоты съемки и с уменьшением длины волны максимум зеркального отражения сглаживается.

Оценка вклада яркости атмосферной дымки в регистрируемое излучение проводилась по приближенной методике [4] с использованием многокомпонентной оптической модели морской воды [5] и модели атмосферы [6], задаваемой горизонтальной дальностью видимости S_0 и вертикальной оптической толщиной атмосферы τ .

Численные расчеты, проведенные для $\Theta_0 = 60^\circ$, $\tau = 0,3$, $S_0 = 20$ км показали, что при высотах более 1 км вне области зеркального блеска вклад яркости излучения атмосферной дымки составляет более 80%, следовательно, угловой ход яркости излучения системы «океан–атмосфера» в этой области определяется индикатрисой рассеяния атмосферы. В области зеркального блеска $\varphi = 180^\circ$ вклад яркости атмосферной дымки составляет на высоте $H = 1$ км 40% для $\lambda = 0,6$ мкм и 45% для $\lambda = 0,45$ мкм и растет до 72 и 83% соответственно при $H = 6$ км.

Результаты измерения степени поляризации излучения, отраженного морской поверхностью, с различных высот представлены в табл. 2. Из анализа данных следует, что при $\varphi = 0^\circ$ наблюдается рост степени поляризации с увеличением высоты съемки и уменьшением длины волны. При $\varphi = 180^\circ$ степень поляризации с ростом высоты сначала уменьшается, а затем увеличивается.

Влияние каждой компоненты на степень поляризации можно качественно оценить по формуле [7]:

$$P = \sum_{i=1}^4 P_i L_i / \sum_{i=1}^4 L_i,$$

где P_i, L_i — степень поляризации и интенсивность: $i = 1$ — вышедшего из воды излучения; $i = 2, 3$ — диффузно и зеркально отраженного от водной поверхности солнечного света; $i = 4$ — рассеянного в атмосфере солнечного излучения. Обычно L_1 составляет не более 5–10% от суммарной яркости, поэтому вклад этого излучения в регистрируемую степень поляризации пренебрежимо мал, независимо от значения P_1 . При $\varphi = 180^\circ$ и $H = 1$ км яркость зеркально отраженного солнечного излучения $L_3 \approx L_4$ и существенно больше, чем $L_2, P_3 > P_4$ [8], поэтому результирующая степень поляризации приблизительно равна P_3 .

С увеличением высоты съемки от 1 до 3 км L_3 убывает за счет процессов поглощения и рассеяния в атмосфере, а яркость атмосферной дымки L_4 растет, что приводит к деполяризации регистрируемого излучения, наиболее значимой в коротковолновой области спектра (см. табл. 2). Дальнейшее увеличение высоты съемки до 6 км приводит к росту яркости и степени поляризации атмосферной дымки, что, по-видимому, объясняет возрастание наблюдаемой на этой высоте степени поляризации.

При $\varphi = 0^\circ, L_3 = 0$, а яркость атмосферной дымки и ее поляризация выше, чем у излучения неба, зеркально отраженного от поверхности моря [8, 9]. В этом случае степень поляризации регистрируемого излучения определяется степенью поляризации атмосферной дымки, для которой характерно увеличение значений с ростом высоты съемки и уменьшением длины волны. При азимутах визирования вне плоскости солнечного вертикала оценить влияние зеркальной компоненты отраженной радиации на степень поляризации сложно, поскольку она может попадать в поле зрения прибора частично, в зависимости от степени взволнованности водной поверхности.

Изучение зависимости степени и азимута поляризации излучения водной поверхности от азимута визирования φ проводилось на высоте $H = 5700$ м при фиксированном угле визирования $\Theta = 32^\circ$ и зенитном угле Солнца $\Theta_0 = 41^\circ$. Изменение азимута осуществлялось за счет кругового разворота самолета. Азимут поляризации ψ приведенный на рис. 1, определялся относительно плоскости наблюдения и согласно работе [10] ориентирован перпендикулярно плоскости рассеяния. Максимальная степень поляризации наблюдается при $\varphi = 180^\circ$ (при этом $\psi = 90^\circ$, т.к. плоскость наблюдения в этом случае совпадает с плоскостью рассеяния). По сравнению с вычисленными в работе [11] значениями степени поляризации излучения, отраженного от взволнованной поверхности, экспериментальные значения меньше и возрастают с ростом длины волны (рис. 1).

Вне области зеркального блеска степень поляризации вышедшего из воды излучения обычно меньше степени поляризации излучения других компонент, что позволяет выбрать такие условия измерений, где различия P_1 и P_i ($i = 2, 3, 4$) будут максимальны. Съемка при этих условиях наблюдения через поляризатор, ориентированный параллельно плоскости рассеяния, позволяет отсеять поляризованную компоненту регистрируемого излучения и увеличить вклад диффузной составляющей. В результате за счет съемки в поляризованном свете (в зависимости от состояния атмосферы и типа вод) можно увеличить отношение $L_1 / \sum_{i=1}^4 L_i$ от 5 до 50% по сравнению с обычной съемкой [12].

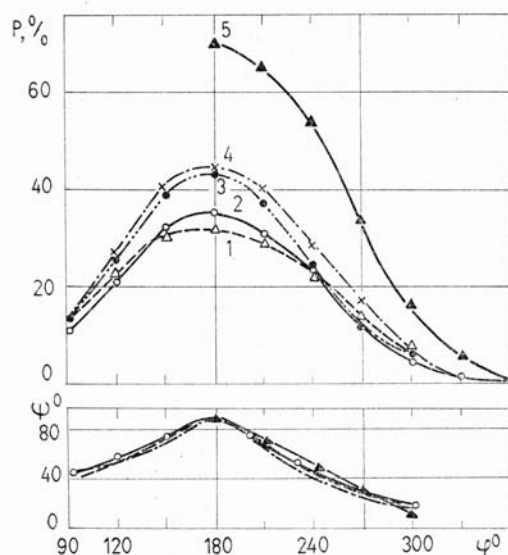


Рис. 1. Зависимость степени и азимута поляризации излучения от азимута визирования. $H = 5700$ м; облачность 2–3 бал.; $\theta = 32^\circ$; $\theta = 41^\circ$, 1–4 — $\lambda = 0,42$; 0,54; 0,65; 0,71 мкм соответственно; 5 — расчетные значения [11]

Таблица 1

Θ, град	H=1 км, Θ ₀ =54—56°															
	λ=0,45 мкм								λ=0,60 мкм							
	φ, град															
	0	45	90	130	180	220	270	315	0	45	90	130	180	220	270	315
20	1,1	1,0	0,98	1,40	1,55	0,95	1,05	1,14	1,0	0,76	1,08	1,87	1,95	1,20	0,94	0,95
35	1,45	1,05	1,01	1,42	2,48	1,22	1,10	1,20	1,20	0,90	1,23	1,90	4,40	1,46	0,94	1,05
50	1,70	1,17	1,28	1,79	7,38	1,47	1,29	1,56	1,38	0,90	1,37	2,41	17,8	1,80	0,70	1,33

Θ, град	H=3 км, Θ ₀ =54—56°								H=6 км, Θ ₀ =54—56°							
	λ=0,45 мкм				λ=0,60 мкм				λ=0,45 мкм				λ=0,60 мкм			
	φ, град															
	0	90	180	270	0	90	180	270	0	90	180	270	0	90	180	270
20	1,20	1,08	1,20	1,17	0,98	0,94	1,50	1,04	1,00	1,03	1,20	1,0	1,0	1,1	1,25	1,0
35	1,27	1,20	1,88	1,32	0,98	1,14	2,40	1,15	1,13	1,23	1,50	1,13	1,20	1,24	1,60	1,20
50	1,41	1,59	3,88	1,64	1,19	1,30	5,40	1,32	1,18	1,66	2,20	1,18	1,35	1,68	2,50	1,35

Степень поляризации P морской поверхности с различных высот в плоскости солнечного вертикала

H, км	λ , мкм				
	0,44	0,54	0,65	0,71	0,74
1	—	$\frac{0,06}{0,87}$	$\frac{0,06}{0,92}$	$\frac{0,00}{0,93}$	$\frac{0,00}{0,95}$
3	$\frac{0,17}{0,38}$	$\frac{0,17}{0,48}$	$\frac{0,13}{0,60}$	$\frac{0,11}{0,63}$	—
6	$\frac{0,20}{0,41}$	$\frac{0,19}{0,63}$	$\frac{0,18}{0,74}$	$\frac{0,17}{0,76}$	—

Примечание. В числителе приведены значения для $\varphi = 0^\circ$, в знаменателе — для $\varphi = 180^\circ$; обл. 0 бал., $\theta_0 = 54-59^\circ$, $\theta = 49^\circ$.

С увеличением высоты съемки от 1 до 3 км L_3 убывает за счет процессов поглощения и рассеяния в атмосфере, а яркость атмосферной дымки L_4 растет, что приводит к деполяризации регистрируемого излучения, наиболее значимой в коротковолновой области спектра (см. табл. 2). Дальнейшее увеличение высоты съемки до 6 км приводит к росту яркости и степени поляризации атмосферной дымки, что, по-видимому, объясняет возрастание наблюдаемой на этой высоте степени поляризации.

При $\varphi = 0^\circ$, $L_3 = 0$, а яркость атмосферной дымки и ее поляризация выше, чем у излучения неба, зеркально отраженного от поверхности моря [8, 9]. В этом случае степень поляризации регистрируемого излучения определяется степенью поляризации атмосферной дымки, для которой характерно увеличение значений с ростом высоты съемки и уменьшением длины волны. При азимутах визирования вне плоскости солнечного вертикала оценить влияние зеркальной компоненты отраженной радиации на степень поляризации сложно, поскольку она может попадать в поле зрения прибора частично, в зависимости от степени взволнованности водной поверхности.

На орбитальной станции «Салют-6» летчики-космонавты Ю.В. Романенко, Г.М. Гречко, В.В. Коваленок, А.С. Иванченков, В.В. Рюмин, В.А. Ляхов, В.П. Савиных прибором МСС-2МВ проводили надирные измерения яркости отраженной радиации над открытыми акваториями Тихого и Атлантического океанов в диапазоне зенитных углов Солнца $5-90^\circ$. По фотоснимкам камер КАТЭ-140 и МКФ-6, которые ориентировались соосно со спектрометром, оценивалось состояние облачности на трассе спектрометрирования и формировались квазиоднородные по условиям наблюдения и освещения выборки, минимальный объем которых составлял не менее 30 спектров.

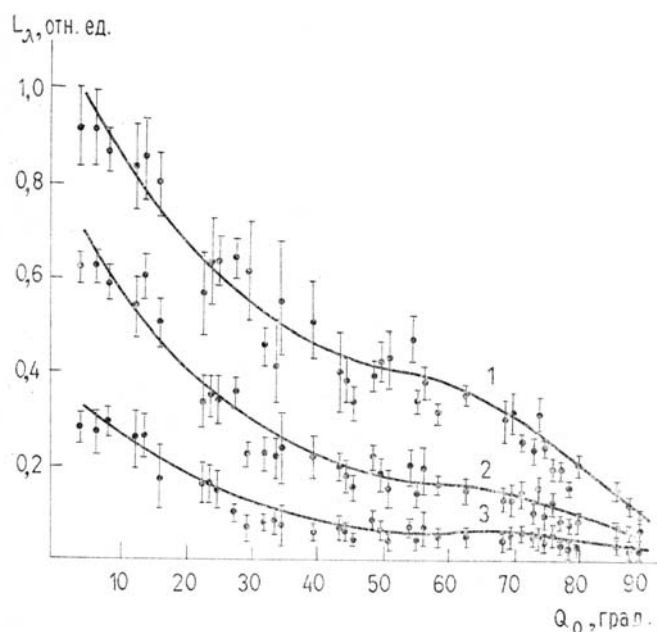


Рис. 2. Зависимость нормированной спектральной яркости системы «океан-атмосфера» от зенитного угла Солнца. 1-3 — $\lambda = 0,40; 0,50; 0,60$ мкм соответственно. Сплошные линии — регрессионные зависимости, точки — экспериментальные значения, вертикальные отрезки — среднеквадратичные отклонения

Для оценки влияния условий освещения на регистрируемые яркости при надирных измерениях строились параболические уравнения регрессии. Объем используемых при этом спектрограмм составил более 1500. На рис. 2 приведены экспериментальные значения яркости системы «океан – атмосфера» с соответствующими дисперсиями и регрессионные зависимости.

При $35^\circ \leq \Theta_0 \leq 75^\circ$ яркость системы «океан – атмосфера» линейно зависит от косинуса зенитного угла Солнца и основной вклад в регистрируемый сигнал при этом вносит яркость атмосферной дымки [13]. При $\Theta_0 < 35^\circ$ регистрируемая яркость складывается преимущественно из яркости атмосферной дымки и зеркально отраженного излучения, так как при наблюдении в надир остальные составляющие малы. Экстраполируя значения яркости в интервале углов $35-75^\circ$ на диапазон $\Theta_0 < 35^\circ$ и вычитая их из регистрируемой яркости, можно определить вклад зеркальной компоненты и, следовательно, скорость ветра вблизи поверхности воды. Для этого были выполнены расчеты яркости зеркально отраженной компоненты на верхней границе атмосферы при зенитных углах Солнца $0-35^\circ$, угле визирования $\Theta = 0^\circ$ и функции распределения микроплощадок взволнованной водной поверхности $f(\xi, \eta)$ в виде [14]

$$f(\xi, \eta) = (2\pi\sigma_x\sigma_y)^{-1} \exp\left[-\frac{1}{2}(\xi^2 + \eta^2)\right], \quad (1)$$

где $\xi = \sigma_x^{-1} \sin(\varphi_p - \varphi_v) \operatorname{tg} \theta_p$;

$\eta = \sigma_y^{-1} \cos(\varphi_p - \varphi_v) \operatorname{tg} \theta_p$,

φ_v – азимут ветра; $l_p = \{\Theta_p, \varphi_v\}$ – координаты единичного вектора нормали к микроплощадке; σ_x^2 ; σ_y^2 – дисперсии функции распределения; $\sigma_x^2 = (1,74 + 1,57 \cdot v) \cdot 10^{-3}$, $\sigma_y^2 = (1,34 + 1,2 \cdot v) \cdot 10^{-3}$; v – скорость ветра в м/с. Сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными показало, что угловая зависимость зеркальной компоненты для данной геометрии эксперимента соответствует функции распределения микроплощадок взволнованной поверхности при скорости ветра порядка 10 м/с. Это значение скорости ветра и было использовано при анализе результатов с ОНС «Салют-7».

Эксперимент по наблюдению участка поверхности Индийского океана спектрометром МСС-2П был выполнен на орбитальной станции «Салют-7» летчиками-космонавтами А.П. Березовым и В.В. Лебедевым. Спектрометрирование осуществлялось за счет изменения ориентации станции. Эксперимент начался над районом экватора в Атлантическом океане. Далее траектория станции проходила через южную оконечность Африки. Окончился эксперимент над Индийским океаном в районе островов Крозе. Продолжительность его составила 17 минут. По мере движения станции угол визирования в участка водной поверхности размером $20 \times 4,5 \text{ км}^2$ в надире изменялся от 106° (линия визирования направлена в горизонт по вектору скорости станции) до 0° (линия визирования направлена в надир), а затем от 0 до 46° (линия визирования направлена против вектора скорости). Наблюдение осуществлялось в азимутальной плоскости $\varphi = 75^\circ$ и 255° относительно плоскости солнечного вертикала при зенитном угле Солнца $\Theta_0 = 41^\circ$.

На рис. 3 приведена угловая зависимость отраженной радиации на длинах волн 0,47 и 0,68 мкм, нормированной на значения яркости при $\Theta = 0^\circ$, полученной по результатам эксперимента на орбитальной станции «Салют-7». Объем выборки составил 450 спектрограмм. Как и в табл. 1, асимметрия кривых относительно наблюдения в надир тем выше, чем больше длина волны излучения. Однако она оказалась значительно больше, чем при самолетных измерениях в азимутальных плоскостях $\varphi = 90^\circ$; 270° . Большой разброс яркостей для углов визирования $15-20^\circ$ и азимуте $\varphi=75^\circ$, а также при $\Theta = 74-106^\circ$, $\varphi = 255^\circ$ связан с попаданием в поле зрения прибора разрывной области. Дополнительное увеличение вариаций яркости при $\varphi = 255^\circ$ связано с частичным выходом поля зрения прибора в открытый космос.

Для выяснения факторов, влияющих на яркость системы «океан – атмосфера», выполнены расчеты угловой зависимости нормированной яркости атмосферной дымки по методике, описанной в работе [15]. В расчетах использовалась индикатриса рассеяния (Астрофизический институт АН КазССР [16]), средняя для длины волны 0,55 мкм, и оптическая толщина слоя атмосферы $\tau = 0,3$. Функция распределения микроплощадок вычислялась по формуле (1) при скорости ветра 1 м/с и азимуте ветра 37° . Результаты расчетов представлены на рис. 3 (кривые 3 и 4). Из рисунка видно, что при азимуте визирования $\varphi = 255^\circ$ и $\Theta > 50^\circ$ увеличение яркости связано с возрастанием вклада яркости атмосферной дымки в регистрируемый сигнал. В азимутальной полуплоскости $\varphi = 75^\circ$ при угле визирования $0-40^\circ$ рост яркости обусловлен зеркальной компонентой отраженного излучения.

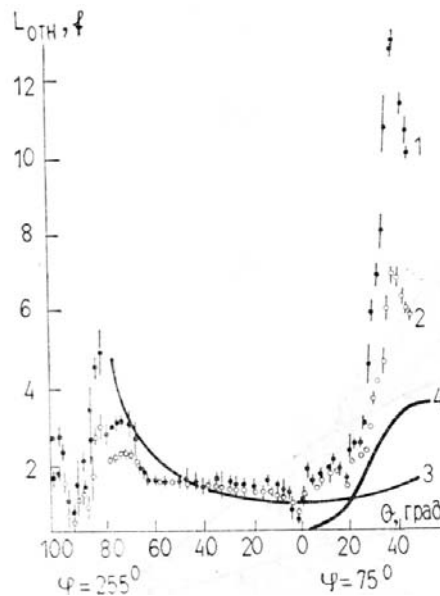


Рис. 3. Угловая зависимость нормированной яркости. 1, 2 — экспериментальные значения на длинах волн 0,47 и 0,68 мкм; 3 — расчетные яркости атмосферной дымки; 4 — функция распределения микроплощадок при $v = 10$ м/с, $\varphi_v = 37^\circ$, $\theta_0 = 40^\circ$. Вертикальные отрезки — среднеквадратичные отклонения

Полученные результаты могут быть использованы для выработки рекомендаций по наиболее оптимальным условиям дистанционного определения содержания растворенных и взвешенных веществ в поверхностном слое воды, а также для оценки скорости и направления приповерхностного ветра.

В заключение авторы выражают благодарность летчикам—космонавтам, принимавшим участие в проведении экспериментов на научных орбитальных станциях.

1. Беляев Б. П., Киселевский Л. И., Плюта В. Е., Сметанин Е. А. — ЖПС, 1978, т. 29, с. 1070.
2. Беляев Б. И., Зайцева В. А., Плюта В. Е. и др. — Приборы и техника эксперимента, 1985, № 1, с. 243.
3. Альbedo и угловые характеристики отражения подстилающей поверхности и облаков/Под ред. К. Я. Кондратьева. — Л.: Гидрометеиздат, 1981.
4. Буренков В. П., Гуревич И. Я., Копелевич О. В., Шифрин К. С. — В сб.: Оптические методы изучения океанов и внутренних водоемов. — Новосибирск: Наука, 1979, с. 41.
5. Науменко Е. К. — ЖПС, 1987, т. 46, с. 80.
6. Шифрин К. С., Минин И. Н. — Труды ГГО, 1957, в. 68, с. 5.
7. Коулсон К. П. — Изв. АН СССР, ФАО, 1974, т. 10, № 3, с. 236.
8. Розенберг Г. В. — УФН, 1968, т. 95, № 1, с. 145.
9. Яркость и поляризация безоблачной атмосферы. — Алма-Ата: Наука, 1979.
10. Егоров В. В., Жуков Б. С. — В кн.: Многозональные аэрокосмические съемки Земли. — М.: Наука, 1981, с. 203.
11. Мулламаа Ю. А. Р. Атлас оптических характеристик взволнованной поверхности моря. — Тарту: АН ЭССР, 1964.
12. Чайковская Л. И. — Изв. АН СССР, ФАО, 1984, т. 20, № 7, с. 589.
13. Беляев Б. И., Ковалев А. А., Кононович С. И. и др. — Исследование Земли из космоса, 1983, № 3, с. 62.
14. Пелевин В. Н., Буруев Ю. Г. — В кн.: Оптические исследования в океане и в атмосфере над океаном. — М.: ИО АН СССР, 1975, с. 202.
15. Сушкевич Т. А. Об учете сильной анизотропии рассеяния в задачах распространения излучения с мопонаправленным источником. М., 1979, № 132. (Препринт/ИИПМ АН СССР).
16. Тарасова Т. А., Фейгельсон Е. И. — Изв. АН СССР, ФАО, 1981, т. 17, № 1, с. 18.

Институт физики АН БССР,
Минск

Поступила в редакцию
18 ноября 1987 г.

V. N. Voronkov, V. A. Zaitseva, S. I. Kononovich, S. B. Kostyukevich, L. P. Lovchikova, V. E. Plyuta. **Aerospace-borne Sounding of Angular Dependence of Reflected Radiation Backscattered by Water Surfaces in the Visible.**

Airborne and space-borne measurements of outgoing radiation in the 0.4–0.8 μm spectral range are discussed. Spectral radiance and degree of polarization of the ocean — atmosphere radiation system as a function of visual angles (0 – 50°) were derived for altitudes of 1,3 and 6 km. Variation of spectral brightness emitted by the atmosphere — ocean system with visual (160 – 0 – 46°) and zenith (5 – 90°) angles is examined.