

- Bogatkin O.G.* Osnovy aviatsionnoy meteorologii [Fundamentals of aviation meteorology]. – SPb., RGGMU. 2009. – 340 s. (in Russian)
- Klimat Tashkenta [Climate of Tashkent]. L.: Gidrometeoizdat. 1982. – 200 s. (in Russian)
- Nauchno-prikladnoy spravochnik po klimatu SSSR [Scientific and applied reference book on the climate of the USSR]. Vyp. 19. – L.: Gidrometeoizdat, 1989. – 304 s. (in Russian)
- Nastavleniye gidrometeorologicheskim stantsiyam i postam [Instructions for hydrometeorological stations and posts]. Vyp. 3. CH. 1. – L.: Gidrometeoizdat, 1969. – 306 s. (in Russian)
- RD 52.21.692-2007. Trebovaniya k sostavleniyu klimaticheskogo opisaniya aerodrome [Requirements for compiling a climatic description of an aerodrome]. – M.: Rosgidromet. 2007. – 42 s. (in Russian)
- Smirnova Ye.N., Chanysheva S.G.* Opasnyye meteorologicheskiye yavleniya v Uzbekistane [Dangerous meteorological phenomena in Uzbekistan]. – Tashkent: NIGMI, 2007. – 158 s. (in Russian)
- Chanysheva S.G., Smirnova Ye.N.* Klimaticheskoye opisaniye Tashkentskogo viloyata [Climatic description of the Tashkent region]. – Tashkent: NIGMI, 2011. – 161 s. (in Russian)
- Electronic resources:*
- Passajiropotok aeroporta «Tashkent» s nachala goda viros na 39% [Tashkent Airport passenger traffic has increased by 39% since the beginning of the year]. URL: <https://darakchi.uz/ru/170931>
- Prezident poruchil «ochen seryozno i kriticheski» peresmotret proyekt aeroporta «Tashkent-Vostochniy» [The President ordered a “very serious and critical” review of the Tashkent-Vostochny airport project]. URL: <https://www.gazeta.uz/ru/2023/07/21/airport/>

УДК 551.501:551.508.91:551.507.362

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА АЭРОЗОЛЬНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ТОЛЩИНЫ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ ЯРКОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

М.Л. АРУШАНОВ^{1*}, Х.У. УМЕРОВ¹, Л.Ю. ШАРДАКОВА¹

¹Научно-исследовательский гидрометеорологический институт, mikl-arushanov@rambler.ru

Аннотация. Рассмотрена возможность диагноза пыльной бури на спутниковом снимке на основе алгоритма количественной оценки содержания атмосферного аэрозоля с использованием полуэмпирических и эмпирических корреляционных связей с учётом решения обратных задач атмосферной оптики.

Установленная Ян Джун Хау и Джоном Цюем высокая корреляция между оптической толщиной аэрозоля (АОТ) и яркостной температурой на спутниковом снимке на длине волны 0,55 мкм позволяет подойти к распознаванию на спутниковом изображении пыльной бури с позиций статистической интерпретации спутникового изображения, выявить и классифицировать различные типы очагов мощных пылевых выносов в атмосферу и их пространственного переноса на значительные расстояния.

В статье рассматриваются данные со спутника NOAA/AVHRR, предварительно по ранее разработанному алгоритму, прошедшие первичную обработку (геометрическая коррекция, трансформация в заданную картографическую проекцию, географическая привязка снимка). Приводится пример диагноза пыльной бури на территории Каракалпакстана и пространственного распределения оптической аэрозольной толщины, генерируемое этой пыльной бурей.

Ключевые слова: пыльная буря, аэрозольная оптическая толщина, диапазоны длин волн, законы атмосферной оптики, спутниковые снимки.

* Ответственный автор: mikl-arushanov@rambler.ru, тел.: +998 90 997-61-46

Введение. Пыльные бури представляют опасное метеорологическое явление, оказывающее влияние с обратной связью на климатический режим как в локальном, так и в глобальном масштабе, ибо являются мощным генератором аэрозольного загрязнения атмосферы, носящий трансграничный характер [Архипкин, 2007]. Поэтому диагноз источника и переноса аэрозолей на огромные расстояния возможен только с использованием данных спутниковой информации. Это использование предполагает разработку специальных алгоритмов тематической обработки спутниковых снимков, в основе которых лежат яркостные характеристики, зависящие от степени загрязнения атмосферы аэрозолями, описываемые законами атмосферной оптики [Кондратьев и др., 1973, 1983].

Цель работы. Получение аналитического выражения зависимости аэрозольной оптической толщины (АОТ) от яркостной температуры T_y по данным спутниковых снимков NOAA/AVHRR.

Постановка задачи. Ослабление параллельного пучка лучей радиации при прохождении ею мутной поглощающей и/или рассеивающей среды, описывается законом Ламберта-Бугера [Бугера-Ламберта-Бера закон, 1983]:

$$I = I_0 \exp\left(-\int_0^{\infty} \alpha \rho ds\right) = I_0 \exp(-am), \quad (1)$$

где I, I_0 – интенсивность (плотность потока) радиации на заданном уровне атмосферы (в частности, у земной поверхности), I_0 – на границе атмосферы (солнечная постоянная), соответственно; α – массовый коэффициент ослабления; ρ – плотность воздуха; ds – элемент пути луча сквозь атмосферу; a – объёмный коэффициент ослабления; $m = \int_0^{\infty} \alpha \rho ds$ – оптическая толщина атмосферы. Полученная Юнгом зависимость распределения частиц по размерам $f(r)$ описывается выражением [Кондратьев и др., 1983]:

$$f(r) = \frac{(1-\beta) \left(\frac{r}{r_m}\right)^\beta}{r_m} \quad (r \geq r_m) \quad (2)$$

где r – радиус частицы, r_m – минимальный радиус частицы, β – эмпирический коэффициент.

Закон рассеяния радиации сферическими частицами, размеры которых превышают длины волн радиации, известный как закон Ми, выражается формулой [Кондратьев и др., 1983]:

$$\varepsilon_\lambda = a\lambda^{-\alpha}, \quad (3)$$

где параметр $\alpha = 0\vee1\vee2\vee3\vee4$ (\vee – знак дизъюнкции «или»), а коэффициент α пропорционален количеству взвешенных частиц λ .

Принимая во внимание соотношения (1) – (3), а также, используя уравнение переноса излучения [Кондратьев и др, 1973]:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial I_\lambda}{\partial s} = k_\lambda B_\lambda(M) - (k_\lambda + \sigma_\lambda) I_\lambda + \frac{\sigma_\lambda}{4\pi} \int_{\Omega} I_\lambda(M, r') f_\lambda(M, r, r') d\Omega, \quad (4)$$

существует принципиальная возможность получить статистическим методом устойчивую зависимость между яркостной температурой и аэрозольной оптической толщиной по данным спутниковой информации.

В (4) $B_{\lambda}(M)$ – значения функции Планка, $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{ср}^{-1}$ в точке M среды, k_{λ} – массовый коэффициент поглощения среды, σ_{λ} – массовый коэффициент рассеяния, I_{λ} – интенсивность излучения ($\text{Вт}/\text{м}^2$), f_{λ} – индикатриса рассеяния, r – радиус вектор луча, Ω – элемент среды в виде цилиндра единичного сечения.

Используемые данные. Данные наземных наблюдений за концентрацией аэрозоля доставляются благодаря аэрозольной сети планеты AERONET (*Aerosol Robotic NETwork*) – объединение наземных сетей дистанционного зондирования аэрозолей, имеющиеся в свободном доступе на сайте «AERONET» [<https://aeronet.gsfc.nasa.gov>]. К сожалению, до сегодняшнего дня Узбекистан не входит в эту сеть. Ближайшая к Узбекистану станция AERONET находится в г. Душанбе. В силу сказанного данные АОТ по территории Узбекистана отсутствуют. Поэтому данные АОТ (рис. 1) на длине волны $0,5 \mu\text{m}$ были взяты по территории Сахары – территории пустыни по своим физико-географическим условиям схожей с пустынями Узбекистана и, что очень важно, входящая в зону радиовидимости, т.е. спутникового захвата, с центром в г. Ташкенте (рис. 2). Данные АОТ выбирались с сайта AERONET по датам спутниковых снимков, захватывающих территорию Сахары согласно зоне радиовидимости, с центром в г. Ташкенте. На этой территории расположены три станции AERONET (рис. 2).

Метод исследования. Основываясь на численном моделировании, выполненного с учетом многократного рассеяния и поглощения озоном, зависимость яркости I_{λ} , полученной по данным ИСЗ над водной поверхностью, от аэрозольной оптической толщины τ , с удовлетворительной точностью описывается линейной функцией [Кондратьев и др., 1973, 1983]:

$$I_{\lambda} = \xi_1 + \xi_2 \tau. \quad (5)$$

В работе [Mecler et al., 1977] получено важное для практического применения соотношение между оптической толщиной и содержанием аэрозоля в столбе атмосферы при условии, что плотность аэрозольных частиц, их распределение по размерам и другие свойства близки в точках A и B :

$$\frac{M_A}{M_B} = \frac{AOT_A}{AOT_B}, \quad (6)$$

где M_A , M_B – масса аэрозоля в вертикальном столбе атмосферы, AOT_A , AOT_B – аэрозольная оптическая толщина.

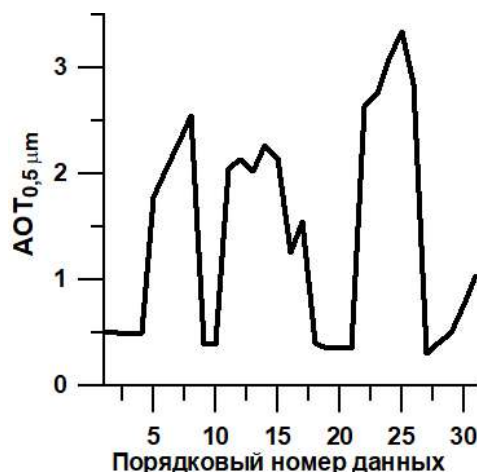


Рис. 1. Временной ход АОТ на длине волны $0,5 \mu\text{m}$ по исходной выборке

Fig. 1. Time course of AOT at a wavelength of $0,5 \mu\text{m}$ according to the original

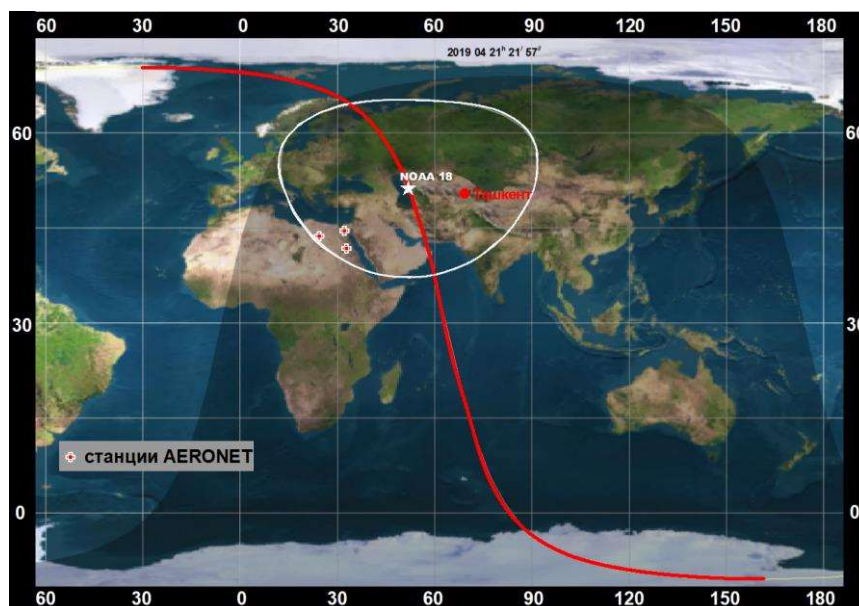


Рис. 2. Зона радиовидимости с центром в г. Ташкенте и аэрозольные станции сети AERONET на территории пустыни Сахара

Fig. 2. Radio visibility zone with a center in Tashkent and aerosol stations of the AERONET network in the territory of Sahara

На основе экспериментальных данных и теоретических результатов относительно рассеяния на аэрозольных частицах в работе [Борен, Хафмен, 1986] получена зависимость между массой аэрозоля в единице объема M_V и объемным коэффициентом рассеяния b_M на частицах M_i^* :

$$M_V = 0,42b_M. \quad (7)$$

В (7) M_V выражено в $г/м^3$. Объемный коэффициент рассеяния b_M в формуле закона Ламберта, если ее записать в виде $dI_\lambda = -b_M I_\lambda dv$, имеет размерность $1/м$.

Формула (7) получена для аэрозоля, распределенного по размерам по закону Юнге (показатель степени $\nu=4$), в интервале радиусов от 0,1 до 20 μm с показателем преломления $n = 1,486$. Это выражение позволяет определить локальное содержание аэрозоля в атмосфере, а также найти связь между массой M аэрозоля в вертикальном столбе атмосферы и аэрозольной оптической толщиной АОТ:

$$M = 0,42AOT, \quad (8)$$

где M , $г/м^3$ – масса, а τ определяется для длин волн в диапазоне $\lambda = 0,58-0,66 \mu m$.

На основе приведенных зависимостей можно восстановить содержание аэрозоля в атмосфере по данным информации с ИСЗ, используя данные измерений в соответствующих диапазонах длин волн. В работе [Нао, Qu, 2007] установлено, что АОТ на длине волны 0,550 μm проявляет высокую корреляцию с яркостной температурой. Точнее говоря, корреляция обнаруживается для разности яркостных температур на длине волны 11 и 12 μm . Получив статистическим методом аналитическую зависимость между

* Сферические частицы, размеры которых превышают длины волн радиации. Коэффициент рассеяния выражается формулой $e_\lambda = a\lambda^{-\nu}$, где ν изменяется от 0 до 4, коэффициент a пропорционален количеству взвешенных частиц.

АОТ и яркостной температурой, используя (8), можно по спутниковому снимку получить оценку интегральной характеристики массы аэрозоля. Поэтому, имеет несомненный практический интерес представить связь между АОТ и разностью яркостных температур $\Delta T_{11-12 \mu\text{m}}$ на длине волны 11 и 12 μm в аналитическом виде.

Регрессионное уравнение $\text{АОТ} = f(T_{\text{я}})$. Были использованы данные АОТ (31 измерение) и спутниковые снимки NOAA/AVHRR (соответственно 31 снимок), описанные выше. Первые разбиты на две выборки: выборка с данными, удовлетворяющая условию $\Delta T_{11-12} < 0$ и вторая выборка – удовлетворяющая условию $\Delta T_{11-12} > 0$. В результате, методом наименьших квадратов, получены аналитические зависимости в виде регрессионных уравнений (9) и (10) полиномиального типа (рис. 3) различных порядков:

$$\text{АОТ} = -3099,327 - 9610,315\Delta - 12853,619\Delta^2 - 9704,908\Delta^3 - 4531,097\Delta^4 - 1341,189\Delta^5 - 246,032\Delta^6 - 25,595\Delta^7 - 1,157\Delta^8 \text{ для } \Delta T_{11-12} < 0; \quad (9)$$

$$\text{АОТ} = 1,324 + 9,262\Delta - 108,337\Delta^2 + 595,533\Delta^3 - 1634,628\Delta^4 + 2541,785\Delta^5 - 2381,614\Delta^6 + 1370,407\Delta^7 - 473,887\Delta^8 + 90,397\Delta^9 - 7,313\Delta^{10} \text{ для } \Delta T_{11-12} > 0, \quad (10)$$

Точность аппроксимации (9) и (10) эмпирических зависимостей оказалась очень высокой с коэффициентами детерминации $R^2 = 0,985$ и $R^2 = 0,988$ соответственно, что позволяет полученные аналитические зависимости использовать в практической работе.

Численные расчёты. На рис. 4 приведено рассчитанное пространственное распределение и концентрация аэрозоля по данным космической съёмки, выполненной с борта ИСЗ NOAA-19 27.05.2018, как результат соляно-пылевой бури. Для сравнения с загрязнением атмосферы аэрозолем окрестностей г. Кунград в отсутствие пыльной бури на рис. 5 представлены результаты расчёта аналогичных распределений. Как видно из представленных рисунков, при соляно-пылевой бури загрязнение аэрозолем атмосферы на порядок выше индустриального загрязнения.

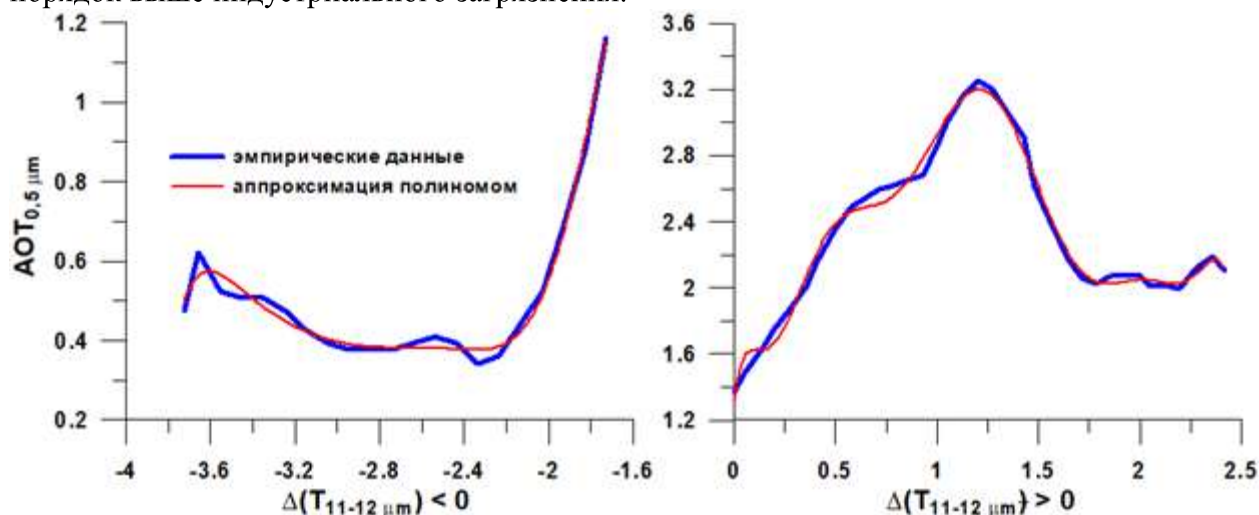


Рис. 3. Зависимость АОТ на длине волны 0,5 μm от разности яркостных температур на длинах волн 11 и 12 μm

Fig. 3. Dependence of AOT at a wavelength of 0,5 μm on the difference brightness temperatures at wavelengths 11 and 12 μm

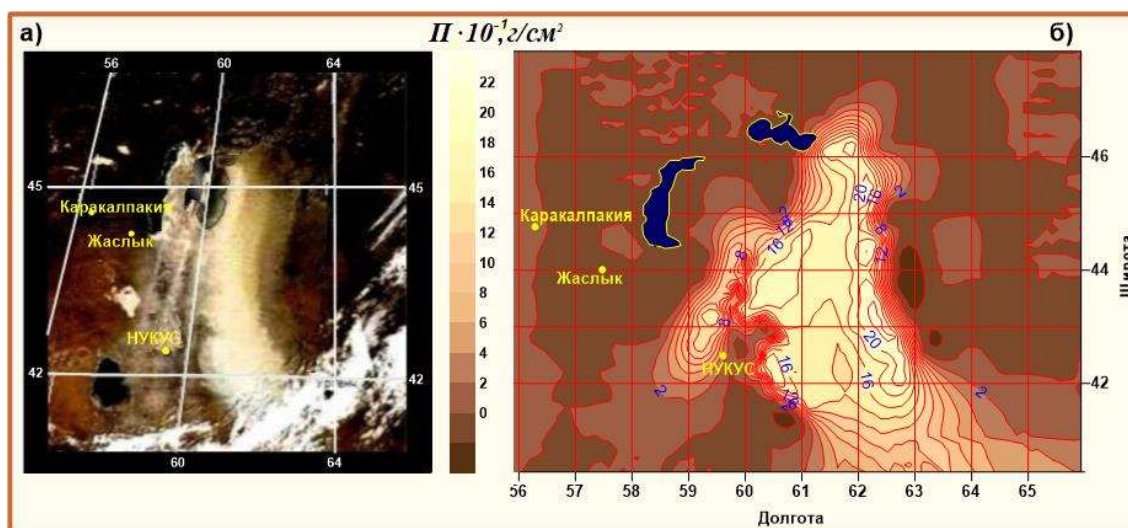


Рис. 4. Соляно-пылевая буря над территорией Каракалпакстана 27.05.2018 г. на снимке ИСЗ NOAA (а) и вызванное ей загрязнение атмосферы аэрозолями (б)

Fig. 4. Salt-dust storm over the territory of Karakalpakstan on 27.05.2018 in NOAA satellite image (a) and the pollution of atmosphere with aerosol caused by it (b)

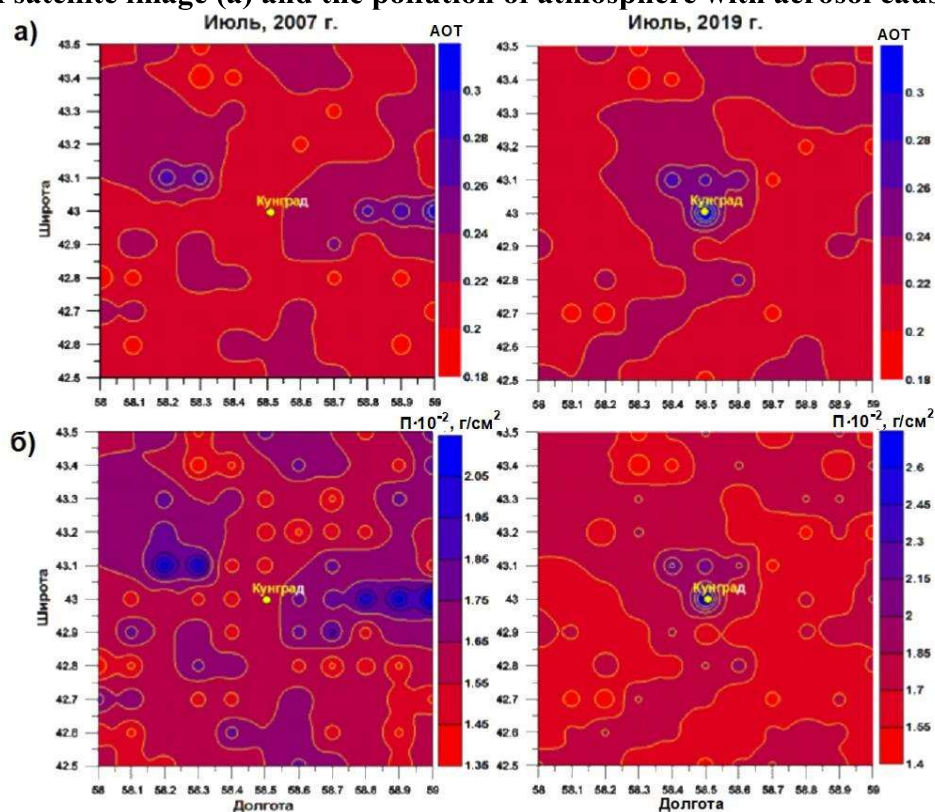


Рис. 5. Пространственное распределение АОТ (а) и концентрации аэрозоля P (б) в окрестностях города Кунград

Fig. 5. Spatial distribution of AOT (a) and aerosol concentration P (b) in the vicinity of the Kungrad city

*Примечание: 2007 год – до запуска содового завода; 2019 – после запуска содового завода.
 Note: 2007 – before the launch of the soda plant; 2019 – after the launch of the soda plant.*

Выводы. Разработана методика полуэмпирического количественного диагноза атмосферного аэрозоля по яркостным данным системы подстилающая поверхность – атмосфера. Получены зависимости аэрозольной оптической толщины по данным дистанционного зондирования атмосферы с помощью радиометра высокого разрешения AVHRR, установленного на ИСЗ серии NOAA.

На основании современных мировых исследований и собственных исследований авторов в области методов интерпретации данных дистанционного зондирования разработана теоретическая и практическая основа количественной оценки содержания аэрозоля в атмосфере, являющаяся базисом для разработки технологии (оперативного программного комплекса) диагноза пыльных бурь по данным спутниковой информации на территории Узбекистана.

Вклад авторов. **М.Л. Арушанов:** постановка задачи, разработка теоретической части. **Х.У. Умеров:** разработка программного комплекса расчёта АОТ и графического представления результатов. **Л.Ю. Шардакова:** подготовка базы данных АОТ и спутниковых снимков. Все авторы прочитали и согласны с подготовленной к публикации версией рукописи.

ЛИТЕРАТУРА

Архипкин О.П., Сагатдинова Г.Н. Космический мониторинг пыльных бурь Приаралья с помощью пылевого индекса NDDI // Институт космических исследований, МОН Республики Казахстан. – 2007. – С. 407-410.

Борен К., Хафмен Д. Поглощения и рассеяния света малыми частицами. – М.: Мир, 1986. – 664 с.

Бугера-Ламберта-Бера закон. Физический энциклопедический словарь / Под. ред. А.М. Прохорова. – М.: Советская энциклопедия, 1983. Т.1. – С. 343.

Гинзбург А.С., Соколик И.П. Пропускание и отражения света атмосферным слоем поглощающего аэрозоля // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1989. Т.25. №9. – С. 954-959.

Кондратьев К.Я., Васильев О.Б., Ивлев Л.С., и др. Влияния аэрозоля на перенос излучения: возможные климатические последствия. – Л.: Изд - во ЛГУ. 1973. – 266 с.

Кондратьев К.Я., Григорьев А.А., Покровский О.М., Шалина Е.В. Космическое зондирование атмосферного аэрозоля – Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 214 с.

Hao X., Qu J.J. Saharan dust storm detection using moderate resolution imaging spectroradiometer thermal infrared bands // Journal of Applied Remote Sensing, Vol. 1. – 2007. – P. 1-9.

Mecler Yu., Quenzel H.G. Ohring Marcus I. Relative atmospheric aerosol content from EPTS observations // J. Geophys. Res., Vol. 82. No. 6. – 1977. – P. 967-970.

СУНЬИЙ ЙЎЛДОШ ТАСВИРЛАРИ ЁРҚИНЛИК ҲАРОРАТИ МАЪЛУМОТЛАРИ АСОСИДА АЭРОЗОЛ ОПТИК ҚАЛИНЛИКНИ МИҚДОРИЙ БАҲОЛАШ

М.Л. АРУШАНОВ¹, Х.У. УМЕРОВ¹, Л.Ю. ШАРДАКОВА¹

¹ Гидрометеорология илмий-тадқиқот институти, mikl-arushanov@rambler.ru

Аннотация. Атмосфера оптик асининг тескари масаласини ҳал қилишни ҳисобга олган ҳолда ярим эмпирик ва эмпирик корреляцион боғланишлардан фойдаланган ҳолда атмосфера аэрозолининг таркибини миқдорий баҳолаш алгоритми асосида сунъий йўлдош тасвирида чанг бўрони диагнози имконияти кўриб чиқилган.

Ян Жун Хау ва Жон Цю томонидан 0,55 μm тўлқин узунлигидаги сунъий йўлдош тасвиридаги аэрозол оптик қалинлик (АОҚ) ва ёрқинлик ҳарорати ўртасида аниқланган юқори корреляция сунъий йўлдош тасвирида чанг бўронини таниб олишда сунъий йўлдош тасвирини статистик нуқтаи назаридан талқин қилиш, атмосферага кучли чанг чиқарувчи манбаларнинг турларини аниқлаш ва таснифлаш ҳамда уларнинг катта масофаларга кўчишини аниқлашга имкон беради.

Мақолада NOAA/AVHRR сунъий йўлдошидан олинган, аввал ишлаб чиқилган алгоритм бўйича бирламчи ишловдан ўтган (геометрик тузатиш, берилган карта проекциясига ўтказиш, тасвирни геореференциялаш) маълумотлари кўриб чиқилган. Қорақалпоғистон ҳудудидаги чанг бўрони диагностикаси ва унинг натижасида ҳосил бўлган оптик аэрозол қалинлигининг фазовий тақсимланиши мисоли келтирилган.

Калит сўзлар: чанг бўрони, аэрозол оптик қалинлик, тўлқин узунлиги диапазонлари, атмосфера оптикиси қонунлари, сунъий йўлдош тасвирлари.

QUANTITATIVE ASSESSMENT OF AEROSOL OPTICAL THICKNESS ACCORDING TO SATELLITE IMAGES BRIGHTNESS TEMPERATURE

M.L. ARUSHANOV¹, Kh.U. UMEROV¹, L.YU. SHARDAKOVA¹

¹ Hydrometeorological Research Institute, mikl-arushanov@rambler.ru

Abstract. *The possibility of diagnosing a dust storm on a satellite image is considered based on an algorithm for quantitative assessment of the atmospheric aerosol content using semi-empirical and empirical correlations, taking into account the solution of inverse problems of atmospheric optics.*

The high correlation established between the aerosol optical depth (AOD) and the brightness temperature in a satellite image at a wavelength of 0.55 μm , established by Yang Jun Hau and John Qu, makes it possible to approach the recognition of a dust storm in a satellite image from the standpoint of statistical interpretation of the satellite image, to identify and classify various types of sources of powerful dust emissions into the atmosphere and their spatial transport over significant distances.

The article examines data from the NOAA/AVHRR satellite, previously developed according to a previously developed algorithm, which has undergone primary processing (geometric correction, transformation into a given map projection, georeferencing of the image). An example of the diagnosis of a dust storm on the territory of Karakalpakstan and the spatial distribution of the optical aerosol thickness generated by this dust storm is given.

Keywords: *dust storm, aerosol optical depth, wavelength ranges, laws of atmospheric optics, satellite images.*

REFERENCES

Arkhipkin O.P., Sagatdinova G.N. Kosmicheskiy monitoring pylnyh bur Priaralya s pomochchuy pilevogo indeksa NDDI [Space monitoring of dust storms in the Aral Sea region using the NDDI dust index] // Istitut kosmicheskikh issledovani, MON Respubliki Kazahstan. – 2007. – S. 407– 410. (in Russian)

Boren K, Huffman D. Poglosheniya i rasseyaniya sveta malimy chasticami [Absorption and scattering of light by small particles] – M. Mir, 1986. – 664 s.

Bugera – Lamberta – Beera zakon [Bouguer – Lambert – Beer law] Fizicheski enciklopedicheski slovar. / Pod. Redak. A. M. Prohorova. – M.: Sovetskaya Encyclopediya. – 1983. T.1. – S. 343. (in Russian)

Ginzburg A.S., Sokolik I.P. Propuskanie i otrajeniya sveta atmosfernim sloem pogloshauyshegosya aerezolya [Transmission and reflection of light by an atmospheric layer of