
**АТРОФ-МУҲИТ МОНИТОРИНГИ /
МОНИТОРИНГ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ /
ENVIRONMENTAL MONITORING**

УДК 551.509

ДИАГНОСТИКА ПЫЛЬНЫХ БУРЬ ПО ДАННЫМ AVHRR NOAA**М.Л. АРУШАНОВ^{1*}, Б.Э. НИШОНОВ¹, Л.Ю. ШАРДАКОВА¹**¹ Научно-исследовательский гидрометеорологический институт, mikl-arushanov@rambler.ru

Аннотация. В статье показано, что для адекватного применения индекса запылённости с использованием радиометрических данных, доставляемых с борта искусственного спутника Земли, необходимо предварительно исследовать спектральные характеристики объектов изображения с целью получения оптимальных диапазонов длин волн (каналов) данного спутника в задаче машинной диагностики пыльных бурь. Предложен алгоритм машинной диагностики пыльных бурь на спутниковом изображении.

Ключевые слова: пыльная буря, радиометрические данные, спектральные характеристики, пылевой индекс, AVHRR NOAA.

Введение. Под явлением «пыльная буря» в метеорологии понимаются атмосферные условия, когда при скорости ветра выше определенного предела переносится большое количество пыли или песка. Как правило, пыльные бури типичны для географических районов с пустынными и степными ландшафтами, крайней засушливостью и континентальным климатом. Пустынный иссушенный ландшафт, свободный от растительного покрова, является наиболее сильным источником загрязнения атмосферы. В распаханных степях пыльные бури являются причиной неурожая, выдувая верхние слои почвы вместе с семенами и молодыми растениями. Поэтому пылевая или пыльная буря классифицируется как метеорологическое явление, приводящее к стихийным бедствиям [Смирнов, 1998]. В связи с этим, соответствующие статистические организации и страховые компании на территории СНГ, отвечающие за хронологию пыльных бурь и их последствий, опираются на достаточно жесткий нижний предел регламента, принятый в документе [Наставление..., 1989]: пыльная буря – явление при скорости ветра ≥ 15 м/с и наличием в приземном воздухе пылевой фракции. В силу жесткости этого документа реальная ситуация идеализируется, а вместе с тем, искажается полная картина следствия этого явления. Ставя материальный ущерб на второй план, первостепенным следствием пыльных бурь является здоровье человека.

Ярким примером наиболее благоприятных условий возникновения и распространения пыльных бурь является территория Республики Каракалпакстан – географическая область Аральской катастрофы. Песчано-солевые бури сделали в этом регионе почти невозможным земледелие на открытом грунте. За год с высохшего дна Арала ветер поднимает около 100 млн. тонн пыли и соли и разносит ее в радиусе более 500 км. Помимо загрязнения полей, песок и соль приводят к огромной минерализации осадков, достигающей после пылевых бурь от 300 до 500 мг/л, что не идет ни в какое сравнение даже с морской водой и, как следствие, – полное вымирание растительности. Высохшее дно Аральского моря, превратившееся в пустыню Аралкум, с поверхности

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

которого ветром переносятся большие массы засоленной пыли, является вместе с пустынями Каракумы и Кызылкум природным мощным источником загрязнения атмосферы на территории Узбекистана. На рис. 1 приведены спутниковые снимки (NOAA и MODIS) пыльных бурь 3 мая 2009 года и 4-5 ноября 2021 года. Во втором случае (4-5 ноября 2021 года) уровень загрязнения атмосферного воздуха твёрдыми частицами (PM10) составил 18000 мкг/м^3 , т.е. концентрация пыли более 30 раз превышала допустимую норму. За 150 лет наблюдений это экстремальные запылённые условия. Например, 24-часовой средний предел запылённости атмосферы по данным Агентства по охране окружающей среды США составляет 150 мкг/м^3 для PM10 [<https://www.epa.gov/>]. Самые высокие почасовые концентрации были зарегистрированы в Эль-Пасо (штат Техас), которые составили 5000 мкг/м^3 , т.е. почти в четыре раза ниже, наблюдаемых в Узбекистане 4-5 ноября 2021 года.

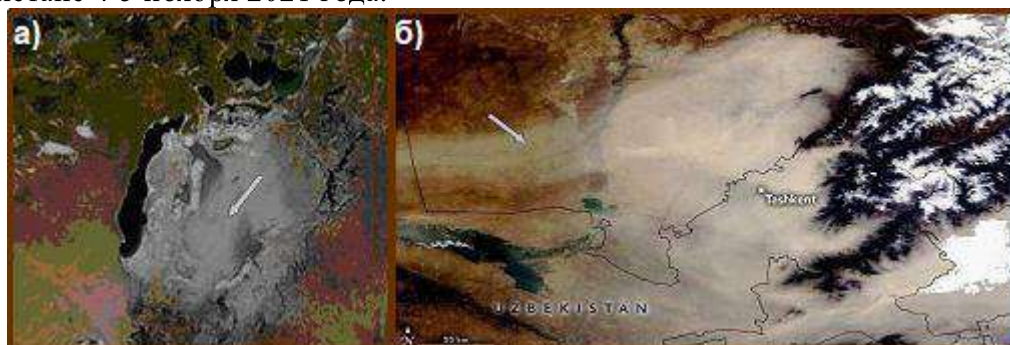


Рис. 1. Спутниковые снимки (синтезированные) пустыни Аралкум 3 мая 2009 года с пыльной бурей (а) и пыльная буря 4-5 ноября 2021 года (показаны стрелками) в восточной части Узбекистана (б)

Fig. 1. Satellite images (synthesized) of the Aralkum Desert May 3, 2009 with dust storm (a) and dust storm on November 4-5, 2021 (shown by arrows) in eastern Uzbekistan (b)

Цель работы: разработать алгоритм автоматизированного (машинного) диагноза пыльных бурь по данным радиометрических изображений *AVHRR* (*Advanced Very High Resolution Radiometer* – усовершенствованный радиометр очень высокого разрешения), передаваемых с ИСЗ серии *NOAA* (разрешение 1 км/пиксель) в 5 диапазонах длин волн (каналов). Определить наиболее информативные каналы с позиций диагностики пыльной бури для расчёта пылевого индекса *NDDI*.

Используемые данные. В работе использовалась информация, доставляемая с борта ИСЗ серии *NOAA* спектральным радиометром в 5 диапазонах длин волн. Обработки подвергались изображения, представленные в соответствующих каналах (табл. 1).

Таблица 1

Диапазоны длин волн радиометра AVHRR NOAA

Table 1

Radiometer wavelength ranges AVHRR NOAA

№ канала	Полоса захвата, км	Угол обзора, град	Длина волны, нм
1	3000	$\pm 55,4^\circ$	620-670
2	3000	$\pm 55,4^\circ$	725-1100
3	3000	$\pm 55,4^\circ$	1580-1640
4	3000	$\pm 55,4^\circ$	10300-11300
5	3000	$\pm 55,4^\circ$	11500-12500

Алгоритм диагностики пыльных бурь по данным космической съёмки. Распознавание (дешифрирование) пыльных бурь на спутниковых снимках представляет определенные трудности, связанные с возможностью ошибочной диагностики из-за геометрически похожих на пылевой шлейф изображений облаков, особенно, перистого типа. Хотя и имеются в научной литературе определенные рекомендации по выбору признаков наличия на снимке пыльной бури [Минина, 1974], тем не менее, следуя этим признакам, сам процесс дешифрирования остается субъективным, а результат зависит от опыта дешифровщика. Кроме того, субъективное дешифрирование космических снимков не может должным образом быть привязанным к автоматизированной системе диагноза и прогноза пыльных бурь. В связи с этим, для диагностики пыльных бурь на спутниковом снимке рассчитываются полевые индексы, предложенные в работе [John et al., 2006]. Нормализованный дифференциальный пылевой индекс *NDDI* (*normalized difference dust index*) определяется выражением

$$NDDI = \frac{OD_{k_1} - OD_{k_2}}{OD_{k_1} + OD_{k_2}},$$

где, *OD* – оптическая плотность (отражательная способность), *k*₁, *k*₂ – каналы спектральных измерений на соответствующих длинах волн. Например, для ИСЗ *MODIS* в работе [John et al., 2006] были получены наиболее оптимальные каналы с длинами волн *k*₁ = 2,13 μm, *k*₂ = 0,469 μm.

Поскольку в Центра гидрометеорологической службы Республики Узбекистан (Узгидромет) широко используются в оперативной работе данные, доставляемые с борта ИСЗ NOAA, то в целях их использования в задаче диагностики пыльной бури на основе *NDDI*, необходимо получить оптимальные каналы в рамках информативности последнего. Для этого был выполнен анализ спектральных характеристик различных типов объектов (рис. 2) на изображении с пыльной бурей:

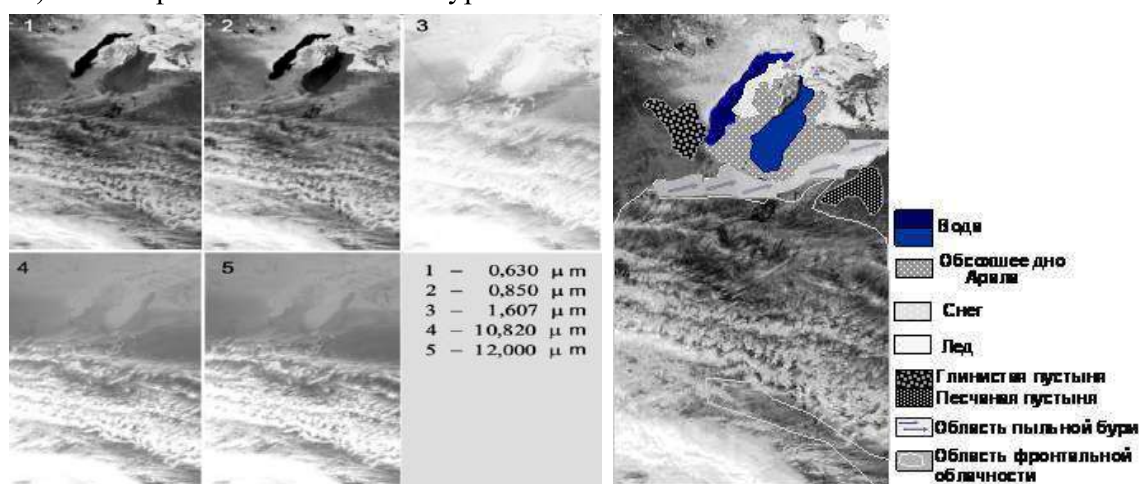


Рис. 2. Изображение пыльной бури по данным ИСЗ NOAA-18 07.03.2007г. в пяти диапазонах длин волн (левый рисунок 1-5)

Примечание: по данным наземных наблюдений пыльная буря была зарегистрирована на метеостанции Муйнак, выделенные на изображении объекты показаны схематически на правом рисунке.

Fig. 2. Image of a dust storm according to NOAA-18 satellite data on 07.03.2007 in five ranges of wavelengths (left figure 1-5)

Note: according to ground-based observations, a dust storm was registered at the Muynak meteorological station, the objects selected in the image are shown schematically in the right figure.

1. Пустыня глинистая.
2. Пустыня песчаная.
3. Облака (фронтальная облачность).
4. Снег.
5. Обсохшее дно Аральского моря.
6. Вода глубокая.
7. Вода мелкая.
8. Лед.
9. Пыльная солепесчаная буря.

На рис. 3 представлены гистограммы изображений в соответствующих диапазонах длин волн и спектральные характеристики выделенных объектов. Как видно из распределений спектральных характеристик, как функций длины волны, рассматриваемые объекты достаточно хорошо отличаются друг от друга своими отражательными свойствами.

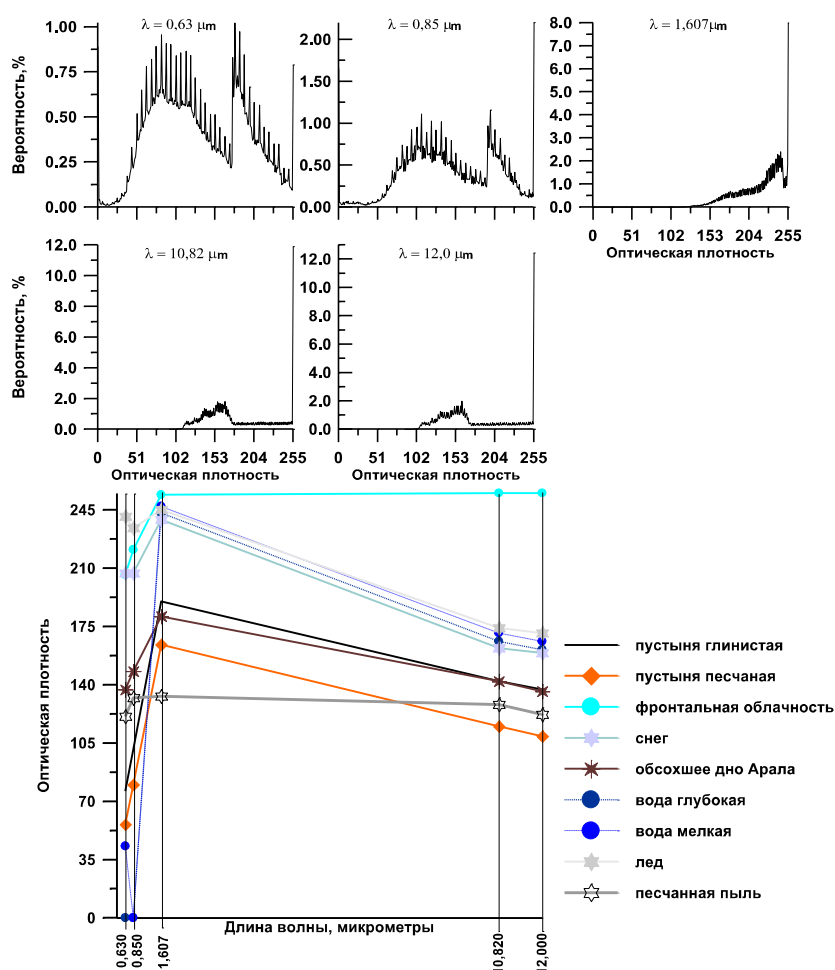


Рис. 3. Спектральные характеристики выделенных на изображении с пыльной бурей объектов (NOAA AVHRR 07.03.2007 г.)

Примечание: распределения оптической плотности, как функции длины волны (верхний рисунок), оптическая плотность типов объектов на снимки ИСЗ NOAA (нижний рисунок).

Fig. 3. Spectral characteristics of objects identified in the dust storm image (NOAA AVHRR 03.07.2007)

Note: optical density distributions as a function of wavelength (upper figure): optical density of object types on NOAA satellite images (lower figure).

Данное свойство, как следствие, находит свое отражение в пылевом индексе *NDDI*, рассчитанным для различных сочетаний спектральных каналов AVHRR (рис. 4). Анализ рисунков 3 и 4 позволяет выбрать наиболее оптимальное сочетание каналов в задаче распознавания пыльной бури на изображении по индексу *NDDI*: 1-й канал AVHRR – 0,63 мкм и 4-й канал AVHRR – 10,82 мкм.

Алгоритм распознавания пыльной солепесчаной бури на спутниковом изображении по спутниковым данным в указанных диапазонах длин волн строится по схеме, предложенной в работе [Архипкин, Сагатдинова, 2008].



Рис. 4. Значения индекса NDDI, рассчитанного для выделенных объектов (рис. 2) по различным сочетаниям каналов NOAA AVHRR

Примечание: пятый канал из-за близости его с четвертым каналом был исключен.

Fig. 4. Values of the NDDI index calculated for selected objects (Fig. 2) for various combinations of NOAA AVHRR channels.

Note: the fifth channel was excluded due to its proximity to the fourth channel.

Как видно из схемы, представленной на рис. 5, распознавание пыльной бури на снимке NOAA по данным AVHRR выполняется в два этапа: на первом этапе по индексу *NDDI* выделяются песчаные объекты на фоне всех остальных, на втором этапе выделяется взвешенная в воздухе песчаная пыль на фоне песчаной пыли подстилающей поверхности. Данная процедура физически корректна из-за разницы температур взвешенной в воздухе и лежащей на земле песчаной пыли: выделенные на первом этапе объекты с песчаной бурей подвергаются классификации по критерию теплового индекса.

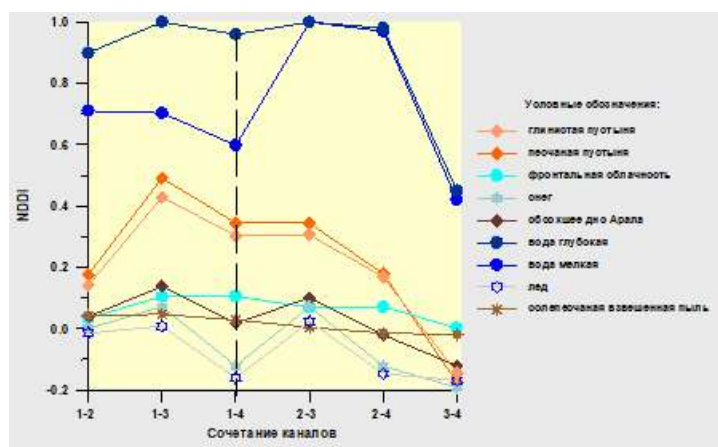


Рис. 5. Схема алгоритма машинного диагноза пыльной бури на изображении ИСЗ NOAA

Fig. 5. Scheme of the algorithm for machine diagnosis of a dust storm on the image of the NOAA satellite

Полученная на снимке область с выделенной пыльной бурей подвергается векторизации и визуализации векторного изображения. Последовательность реализации процедур в соответствии с приведенной выше схемой, промежуточными и конечными результатами, приведена на рис. 6.

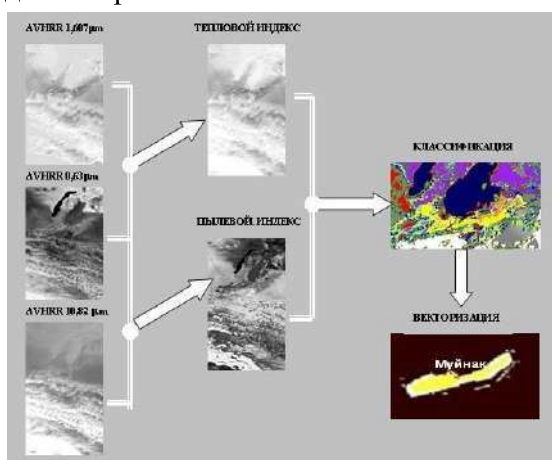


Рис. 6. Последовательность реализации алгоритма машинного диагноза солепесчаной бури по данным AVHRR NOAA 07.03.2007 г.

Fig. 6. Sequence of implementation of the algorithm of machine diagnosis of salt sand storms on the basis of 07.03.2007 AVHRR NOAA data

Заключение. Для адекватной диагностики пыльной бури на спутниковом изображении с использованием пылевого индекса *NDDI* необходимо получить спектральные характеристики объектов изображения в различных диапазонах длин волн по данным приборов, установленных на том или ином спутнике. В частности, например, для MODIS были получены наиболее оптимальные каналы [John et al., 1998] с длинами волн $k_1 = 2,13 \mu\text{m}$, $k_2 = 0,469 \mu\text{m}$. В данной работе для аппаратуры AVHRR NOAA они соответственно равны: 1-й канал AVHRR – $k_1 = 0,63 \mu\text{m}$ и 4-й канал AVHRR – $k_2 = 10,82 \mu\text{m}$.

Благодарности. Настоящее исследование выполнено в рамках совместного Узбекско-Японского прикладного проекта Научно-исследовательского гидрометеорологического института АЛ-5721122055 “Разработка технологии системы мониторинга пыльных бурь с использованием наземных и спутниковых данных”, финансируемого Министерством инновационного развития Республики Узбекистан.

Вклад авторов. **М.Л. Арушанов:** постановка задачи, разработка алгоритма. **Б.Э. Нишонов:** анализ возникновения и распространения пыльных бурь на территории Узбекистана. **Л.Ю. Шардакова:** реализация алгоритма машинного распознавания пыльных бурь. 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* / Шестая всероссийская открытая ежегодная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва: ИКИ РАН, 2008. – С. 12-19.

Минина Л.С. Практика нефанализа. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 220 с.

Наставление метеорологическим станциям и постам. – Л.: Гидрометеиздат, вып. 3, часть 1, 1989. – 164 с.

Смирнов В.В. Генезис и геофизические последствия пылевых бурь // В кн. «Вопросы физики атмосферы». – СПб.: Гидрометеиздат, 1998. – С. 171-206.

Qi J., Hao X., Kafatos M., Wang L. Asian Dust Storm Monitoring Combining Terra and Aqua MODIS SRB Measurement // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 3, no. 4, October 2006. – PP. 284-486.

Электронный ресурс:

<https://www.epa.gov/>

AVHRR NOAA MAЪЛУМОТЛАРИ АСОСИДА ЧАНГ БЎРОНЛАРИ ДИАГНОСТИКАСИ

М.Л. АРУШАНОВ¹, Б.Э. НИШОНОВ¹, Л.Ю. ШАРДАКОВА¹

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

Аннотация. Мақолада ер сунъий йўлдошидан олинган радиометрик маълумотлардан фойдаланиб чанг индексидан тўғри фойдаланиш учун чанг бўронларини компьютер ёрдамида аниқлашда ушбу сунъий йўлдошининг оптимал тўлқин узунлиги диапазонларини (каналларини) олиш мақсадида дастлаб тасвир объектларини спектрал хусусиятларини ўрганиш зарур. Сунъий йўлдош тасвиридаги чанг бўронини компьютер ёрдамида аниқлаш алгоритми таклиф этилган.

Калит сўзлар: чанг бўрони, радиометрик маълумотлар, спектрал хусусиятлар, чанг индекси, AVHRR NOAA.

DIAGNOSTICIS OF DUST STORMS ON THE BASIS OF AVHRR NOAA DATA

M.L. ARUSHANOV¹, B.E. NISHONOV¹, L.Yu. SHARDAKOVA¹

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

Abstract. The article shows that in order to adequately apply the dust index using radiometric data delivered from an artificial Earth satellite, it is necessary to first study the spectral characteristics of image objects in order to obtain the optimal wavelength ranges (channels) of this satellite in the problem of machine diagnostics of dust storms. An algorithm for machine diagnostics of dust storms on a satellite image is proposed.

Keywords: dust storm, radiometric data, spectral characteristics, dust index, AVHRR NOAA.

REFERENCES

Arhipkin O.P., Sagatdinov G.N. Kosmishtskiy monitoring pilnih bur Priaralya s pomoshuy pilevogo indeksa NDDI. [Space monitoring of dust storms in the Aral Sea region using the NDDI dust index] / Shestaya vserossiyskaya otkritiya yejegodnaya konferenciya «Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa». – Moskva: IKI RAN, 2008. – S. 12-19. (in Russian)

Minina L.S. Praktika nefanaliza. [Non-Phanalization Practice] – L.: Gidrometeoizdat, 1974. – 220 s. (in Russian)

Nastavlenie meteorologicheskim stancyam i postam. [Instructions for meteorological stations and posts] – L.: Gidrometeoizdat, vip. 3, chast 1, 1989. – 164 s. (in Russian)

Smirnov V. V. Genезis i geofizicheskie posledstviya pilevih bury. [Genesis and geophysical consequences of dust storms] // V kn. «Voprosi fiziki atmosferi. – S.-P.: Gidrometeoizdat. – 1998. – S. 171-206. (in Russian)

Electronic resours:

<https://www.epa.gov/>