

Mineralogické zloženie aerosólu a komplexný index lomu vybraných minerálov

Jaromír Petržala, Ústav stavebníctva a architektúry SAV, Dúbravská cesta 9, 845 03 Bratislava, email: usarjape@savba.sk

1. Mineralogické zloženie aerosólu

V ultrajemnom móde (častice menšie ako 0,5 mikrometra), ktorý tvorí z hľadiska početnosti prevažnú časť aerosólu, prevládajú rôzne sírany (najmä amónny) a uhlíkaté častice vznikajúce pri spaľovaní fosílnych palív. No v niektorých regiónoch môžu mať významné zastúpenie aj častice bohaté na železo (Afganistan), vápnik (juh Arabského polostrova), a pod. (viď Engelbrecht et al. 2009).

Minerálny aerosól možno z geologického hľadiska rozdeliť na dve veľkostné frakcie:

- ílovitá – častice s charakteristickým rozmerom menším ako 2 mikrometre
- prachová – častice s charakteristickým rozmerom od 2 do 63 mikrometrov.

V ílovitej frakcii, ako napovedá jej názov, prevládajú ílovité minerály – typicky illit, kaolinit a montmorillonit. V prachovej frakcii dominujú kryštáliky kremeňa či kalcitu a ďalších minerálov typických pre danú oblasť.

Hoci sa pomerné zastúpenie dominantných minerálov v ílovitej frakcii regionálne mení, ich fyzikálne vlastnosti sú si dosť podobné (viď kapitolu 2), a teda môžeme pre túto frakciu uvažovať priemerné zloženie (Journet et al. 2014):

minerál	hmotnostný podiel (%)
kaolinit	26
illit	26
montmorillonit	16
kalcit	9
sľudy	6
kremeň	5
chlorit	5
živce	4
goethit	2
hematit	1

V nasledujúcich tabuľkách sú uvedené typické zloženia prachovej frakcie aerosólu pre zvolené štáty či regióny, hoci niektoré vzorky slúžiace ako zdroj údajov obsahovali aj ílovité častice. Íl uvedený v niektorých tabuľkách možno považovať zmes kaolinitu, illitu a montmorillonitu v rovnakom pomere.

1.1 Afganistan

Chemickú analýzu prachových častíc získaných v Afganistane možno nájsť v práci Engelbrecht et al. 2009, no z nej priamo nevyplýva ich mineralogické zloženie. Ako príklad zloženia afganského prachu však možno použiť dáta získané z meraní v susednom Tadžikistáne a publikované v práci Andronova et al. 1993, kde poukazujú na pravdepodobný afganský pôvod týchto častíc.

minerál	hmotnostný podiel (%)
kremeň	58
kalcit	20
kyanit + pyroxén	14
akermanit	7
spinel	1

V prípade kyanitu a akermanitu sa neuvádza index lomu v mikrovlnnej oblasti. Akermanit má podobné zloženie a fyzikálne vlastnosti ako diopsid patriaci do skupiny pyroxénu.

1.2 Irak

Zloženie prachu v Iraku pochádza zo vzoriek získaných počas prachových búrok. Zdroj: Al-Dabbas et al. 2012.

minerál	hmotnostný podiel (%)
kremeň	59
kalcit	15
živce	17
sadrovec	6
íl	3

1.3 Kuvajt

Hlavným zdrojom prachových častíc v Kuvajte sú rôzne regióny v Iraku. Údaje v tabuľke sú spriemerované hodnoty z rôznych staníc na území Kuvajtu (Al-Dousari et al. 2012).

minerál	hmotnostný podiel (%)
kremeň	35
kalcit	29
dolomit	11
živce	12
íl	5
ostatné	8

Medzi ostatné minerály patrí najmä sadrovec, no na morskom pobreží by sa mohlo jednať aj o malé množstvo halitu.

1.4 Izrael

Vzorky získané takisto počas prachových búrok. Pozoruhodné je, že aj v ílovitej frakcii prevládajú kalcit, dolomit a kremeň. Ílové minerály v nej boli zastúpené len asi na 13-40% (Ganor and Foner 1996).

minerál	hmotnostný podiel (%)
kremeň	23
kalcit	59
dolomit	11
živce	5
halit	2

1.5 Jordánsko

Zdroj: Al-Dousari et al. 2012.

minerál	hmotnostný podiel (%)
kremeň	21
kalcit	52
dolomit	16
živce	4
ostatné	7

Ostatné minerály môžu byť sadrovec, anhydrit a podobne.

Zloženie prachu z Jordánska je veľmi podobné tomu z Izraela. Zrejme ho možno aplikovať aj na juh Sýrie.

1.6 Líbya

Zdroj: O'Hara et al. 2006.

minerál	hmotnostný podiel (%)
kremeň	44
kalcit	23
halit	11
íl	7
živce	6
sadrovec	4
dolomit	3
chlorit	2

Väčšina meracích staníc sa nachádzala na severozápade krajiny v blízkosti mora, preto zrejme taký vysoký podiel halitu.

1.7 Eritrea a Somálsko

Pre tento región je typický transport prachu zo Sudánu a Etiópie na východ, až na juh Arabského polostrova (Al-Dousari et al. 2013). Preto možno predpokladať, že vzorky získané v tejto oblasti spádu sa zložením príliš nelíšia od prachových častíc rozptýlených v ovzduší nad Somálskom a Eritreou. Zdroj: Al-Dousari et al. 2013.

minerál	hmotnostný podiel (%)
kremeň	44
kalcit	26
dolomit	10
živce	13
ostatné	7

Ostatné môže opäť reprezentovať najmä sadrovec. No keďže sú to prímorské krajiny, mohol by sa tam vyskytovať aj halit.

1.8 Cyprus

V prípade Cypru existuje pomerne dosť publikácií ohľadom aerosólu, no v publikovaných dátach sú značné rozdiely. Za rozumné možno považovať podiel morskej soli a minerálneho prachu v hrubom móde aerosólu v pomere 44/38, hoci tento pomer sa môže výrazne zmeniť v prospech prachu počas prachových udalostí (Abdelkader et al. 2015).

Nie je známa priama mineralogická analýza prachových vzoriek získaných nad Cyprom. Avšak vzhľadom na to, že prach je tam najmä počas uvedených prachových udalostí transportovaný z Egypta, Izraela, Jordánska a Sýrie (viď napr. Abdelkader et al. 2015), možno predpokladať zloženie hrubej frakcie podobné zloženiu z Jordánska.

2 Komplexný index lomu vybraných minerálov

Symboly použité v nasledujúcom texte:

n – reálna časť komplexného indexu lomu

k – imaginárna časť komplexného indexu lomu

λ – vlnová dĺžka žiarenia

f – frekvencia žiarenia

2.1 Mikrovlnná oblasť spektra

Nižšie je uvedených niekoľko reprezentatívnych hodnôt indexov lomu pre mikrovlnnú oblasť.

Ílové minerály

Pre tri zvolené ílové minerály sú známe hodnoty indexu lomu len vo vzdialenej infračervenej oblasti spektra. Zdroj: Query 1987.

minerál	λ (mm)	f (GHz)	n	k
kaolinit	0,2	1500	2,237	0,067
illit	0,2	1500	2,188	0,066
montmorillonit	0,2	1500	2,172	0,100

Možno predpokladať, že imaginárna zložka pôjde v mikrovlnnej oblasti k nule a reálna zložka len mierne poklesne.

Kremeň

Zdroj: Palik 1998. Uvedené hodnoty zodpovedajú ordinárnemu lúču.

$$\lambda = 1 \text{ mm}; f = 300 \text{ GHz}; n = 2,1063; k = 7,96 \times 10^{-4}$$

Zdroj: Jones 1976.

$$\lambda = 8,57 \text{ mm}; f = 35 \text{ GHz}; n = 2,105$$

Kalcit

Zdroj: Palik 1998.

λ (mm)	f (GHz)	n	k
1	300	2,945	0,004
30	10	2,946	0
∞		2,94	0

V prípade potreby možno vypočítať ďalšie hodnoty na základe meraní Long et al. 1993.

NaCl (halit)

Zdroj: Palik 1998.

$$\lambda = 30,59 \text{ mm}; f = 9,81 \text{ GHz}; n = 2,43; k = 2,5 \times 10^{-4}$$

Dolomit

Zdroj: Takubo et al. 1953.

$$\lambda = 101,43 \text{ cm}; f = 0,296 \text{ GHz}; n = 2,74; k \cong 0$$

Sadrovec

Zdroj: Long et al. 1993. Hodnoty sú získané pre stlačené peletky, čiže sa stredujú anizotrópne vlastnosti kryštálov.

$$\lambda = 30 \text{ mm}; f = 10 \text{ GHz}; n = 2,42; k = 2,4 \times 10^{-4}$$

Spinel

Zdroj: Palik 1998.

λ (mm)	f (GHz)	n	k
1	300	2,88	0,0018
∞		2,89	0

Apatit

Zdroj: Takubo et al. 1953.

$$\lambda = 101,43 \text{ cm}; f = 0,296 \text{ GHz}; n = 3,08; k \cong 0$$

Živec (labradorit)

Zdroj: Nelson et al. 1989.

λ (mm)	f (GHz)	n	k
300	1	2,46	0,02
122,4	2,45	2,45	0,02
54,5	5,5	2,45	0,01
25,6	11,7	2,43	0,01
13,6	22	2,38	0,01

Sľuda (muskovit)

Zdroj: Nelson et al. 1989.

λ (mm)	f (GHz)	n	k
300	1	2,97	0,02
122,4	2,45	2,95	0,015
54,5	5,5	2,91	0,018
25,6	11,7	2,91	0,011
13,6	22	2,88	0,016

Hematit

Zdroj: Nelson et al. 1989.

λ (mm)	f (GHz)	n	k
300	1	4,36	0,33
122,4	2,45	4,29	0,26
54,5	5,5	4,15	0,2
25,6	11,7	3,8	0,15
13,6	22	3,3	0,08

Goethit

Zdroj: Nelson et al. 1989.

λ (mm)	f (GHz)	n	k
300	1	3,69	0,05
122,4	2,45	3,69	0,05
54,5	5,5	3,69	0,04
25,6	11,7	3,69	0,04
13,6	22	3,69	0,05

Chlorit (klinochlor)

Zdroj: Nelson et al. 1989.

λ (mm)	f (GHz)	n	k
300	1	2,68	0,02
122,4	2,45	2,66	0,03
54,5	5,5	2,65	0,02
25,6	11,7	2,64	0,02
13,6	22	2,63	0,03

Pyroxén (salit)

Zdroj: Nelson et al. 1989.

λ (mm)	f (GHz)	n	k
300	1	2,68	0,04
122,4	2,45	2,68	0,04
54,5	5,5	2,68	0,04
25,6	11,7	2,68	0,04
13,6	22	2,68	0,04

2.2 Vizualna oblasť spektra

U minerálov, kde bol k dispozícii dostatok dát, sú hodnoty indexu lomu interpolované na pevne zvolenú sadu vlnových dĺžok v rozmedzí od 380 do 780 nm. U ostatných sú uvedené dáta pre viditeľnú časť spektra.

Ílové minerály

Zdroj: Egan and Hilgeman 1979.

λ (nm)	illit		kaolinit		montmorillonit	
	n	k	n	k	n	k
380	1,4177	0,00121	1,4967	2,52E-04	1,5393	0,00353
400	1,423	0,00117	1,49	2,04E-04	1,54	0,00316
420	1,4212	0,00111	1,4906	1,68E-04	1,5376	0,00277
440	1,4196	0,00107	1,4912	1,40E-04	1,5352	0,00245
460	1,4184	0,00107	1,4918	1,27E-04	1,5327	0,00229
480	1,4168	0,00105	1,4924	1,12E-04	1,5308	0,00205
500	1,415	0,00102	1,493	9,55E-05	1,529	0,00178
520	1,4144	9,07E-04	1,493	6,94E-05	1,5266	0,00145
540	1,4136	8,05E-04	1,493	4,96E-05	1,5239	0,00115
560	1,4124	7,30E-04	1,493	4,14E-05	1,5209	9,20E-04
580	1,4116	7,08E-04	1,493	3,85E-05	1,52	8,13E-04
600	1,411	7,08E-04	1,493	3,80E-05	1,52	7,59E-04
620	1,4086	6,98E-04	1,4936	4,02E-05	1,5188	7,48E-04
640	1,4062	7,89E-04	1,4944	5,26E-05	1,5172	7,41E-04
660	1,4037	0,00107	1,4956	8,39E-05	1,5147	7,41E-04
680	1,4014	0,00117	1,4964	9,61E-05	1,5148	7,48E-04
700	1,399	0,0012	1,497	1,00E-04	1,516	7,59E-04
720	1,3983	0,00121	1,4973	1,05E-04	1,515	7,65E-04
740	1,3976	0,00121	1,4977	1,10E-04	1,5143	7,71E-04
760	1,397	0,00122	1,498	1,15E-04	1,5134	7,77E-04
780	1,3963	0,00122	1,4984	1,20E-04	1,5126	7,83E-04

Kremeň a kalcit

Zdroj: Palik 1998. V prípade kremeňa uvedené hodnoty zodpovedajú ordinárnemu lúču, pre extraordinárny sú dosť podobné. V prípade kalcitu index „o“ označuje ordinárny lúč a index „e“ extraordinárny.

λ (nm)	kremeň		kalcit			
	n	k	n_o	k_o	n_e	k_e
380	1,5606	0	1,688	0	1,4999	0
400	1,5577	0	1,6824	0	1,4974	0
420	1,5555	0	1,6782	0	1,4955	0
440	1,5534	0	1,6745	0	1,4939	0
460	1,5517	0	1,6714	0	1,4925	0
480	1,5501	0	1,6687	0	1,4911	0
500	1,5488	0	1,6663	0	1,49	0
520	1,5476	0	1,6641	0	1,489	0
540	1,5465	0	1,6623	0	1,4884	0
560	1,5455	0	1,6605	0	1,4874	0
580	1,5446	0	1,6591	0	1,4868	0
600	1,5439	0	1,6577	0	1,4861	0
620	1,5431	0	1,6564	0	1,4855	0
640	1,5424	0	1,6553	0	1,485	0
660	1,5418	0	1,6542	0	1,4845	0
680	1,5412	0	1,6533	0	1,4841	0
700	1,5407	0	1,6524	0	1,4837	0
720	1,5402	0	1,6515	0	1,4834	0
740	1,5397	0	1,6508	0	1,483	0
760	1,5392	0	1,65	0	1,4827	0
780	1,5388	0	1,6494	0	1,4824	0

NaCl, pyroxén, hematit

Zdroj: NaCl – Palik 1998; pyroxén (enstatit) – Egan and Hilgeman 1979; hematit – Longtin et al. 1988.

λ (nm)	NaCl		pyroxén		hematit	
	n	k	n	k	n	k
380	1,5725	0	1,6397	5,51E-05	2,5965	0,703
400	1,5675	0	1,631	4,47E-05	2,674	0,523
420	1,5632	0	1,6286	4,41E-05	2,7649	0,45186
440	1,5597	0	1,6262	4,32E-05	2,8558	0,38073
460	1,5566	0	1,6237	4,20E-05	2,9467	0,30959
480	1,5539	0	1,623	4,13E-05	3,0376	0,23845
500	1,5516	0	1,623	4,07E-05	3,0873	0,18689
520	1,5495	0	1,6224	3,76E-05	3,1037	0,14864
540	1,5477	0	1,6216	3,48E-05	3,1026	0,11121
560	1,5461	0	1,6204	3,29E-05	3,0906	0,08253
580	1,5447	0	1,6184	3,18E-05	3,0677	0,06259
600	1,5434	0	1,616	3,09E-05	3,0448	0,04264
620	1,5423	0	1,616	2,89E-05	3,0219	0,0227
640	1,5412	0	1,6164	2,68E-05	2,9970	0,00874
660	1,5403	0	1,6176	2,46E-05	2,9685	0,00587
680	1,5394	0	1,618	2,31E-05	2,94	0,00301
700	1,5387	0	1,618	2,19E-05	2,9131	0,00111
720	1,5379	0	1,618	4,12E-05	2,8902	0,00147
740	1,5373	0	1,618	6,05E-05	2,8674	0,00183
760	1,5367	0	1,618	7,98E-05	2,8445	0,00219
780	1,5361	0	1,618	9,92E-05	2,8216	0,00255

Ostatné minerály

U nasledujúcich minerálov uvádzame niektoré vybrané dáta. Čať minerálov tvorí uniaxiálne kryštály, a u týchto sú uvedené dva údaje pre reálnu časť komplexného indexu lomu. V prípade biaxiálnych kryštálov sú tri hodnoty. Imaginárnu zložku indexu lomu pre viditeľné svetlo možno u týchto minerálov považovať za zanedbateľnú.

dolomit (mindat.org): $n_o = 1,68; n_e = 1,5015$

sadrovec (mindat.org): $n_a = 1,52; n_b = 1,5225; n_c = 1,5295$

sfuda (mindat.org): $n_a = 1,549; n_b = 1,5985; n_c = 1,6025$

apatit (mindat.org): $n_o = 1,651; n_e = 1,644$

goethit (mindat.org): $n_a = 2,2675; n_b = 2,401; n_c = 2,401$

spinel (Palik 1998): $n = 1,796$

Uhlíkatý materiál a síran amónny

Pre výpočet vizuálnej dohľadnosti sú dôležité aj indexy lomu uhlíkatého materiálu a síranu amónneho, ktoré tvoria podstatnú časť ultrajemnej frakcie aerosólu. Zdroj: Longtin et al. 1988.

λ (nm)	uhlík		síran amónny	
	n	k	n	k
380	1,75	0,46317	1,54	1,00E-07
400	1,75	0,46	1,54	1,00E-07
420	1,75	0,45773	1,54	1,00E-07
440	1,75	0,45545	1,54	1,00E-07
460	1,75	0,45318	1,54	1,00E-07
480	1,75	0,45091	1,54	1,00E-07
500	1,75	0,45	1,536	1,00E-07
520	1,75	0,44857	1,53	1,00E-07
540	1,75	0,44286	1,53	1,00E-07
560	1,75	0,4388	1,529	1,00E-07
580	1,75	0,43639	1,526	1,00E-07
600	1,75	0,43398	1,524	1,00E-07
620	1,75	0,43157	1,522	1,00E-07
640	1,75	0,43	1,52	1,00E-07
660	1,75	0,43	1,52	1,00E-07
680	1,75	0,43	1,52	1,00E-07
700	1,75	0,43	1,52	1,00E-07
720	1,75	0,43	1,52	1,00E-07
740	1,75	0,43	1,52	1,00E-07
760	1,75	0,43	1,52	1,00E-07
780	1,75	0,43	1,52	1,00E-07

Podakovanie

Tento dokument bol vypracovaný s podporou Ministerstva obrany Slovenskej republiky (SEM0D-74-2/2019).

Literatúra:

Abdelkader, M., Metzger, S., Mamouri, R. E., Astitha, M., Barrie, L., Levin, Z., and Lelieveld, J.: Dust-air pollution dynamics over the eastern Mediterranean, *Atmos. Chem. Phys.*, 15, pp. 9173-9189, 2015.

Andronova, A. V., Gomes, L., Smirnov, V. V., Ivanov, A. V., and Shukurova, L. M.: Physico-chemical characteristics of dust aerosols deposited during the soviet-american experiment (Tadzhikistan, 1989), *Atmos. Environ.*, vol. 27A, no. 16, pp. 2487-2493, 1993.

Al-Dabbas, M. A., Abbas, M. A., Al-Khafaji, R. M.: Dust storms loads analyses – Iraq, *Arab. J. Geosci.*, 5, pp. 121-131, 2012.

Al-Dousari, A. M., and Al-Awadhi, J.: Dust fallout in northern Kuwait, major sources and characteristics, *Kuwait J. Sci.*, 39(2A), pp. 171-187, 2012.

Egan, G. E., Hilgeman, T. W.: *Optical Properties of Inhomogeneous Materials – Applications to Geology, Astronomy, Chemistry, and Engineering*, Academic Press, 1979.

Engelbrecht, J.P., McDonald, E.V., Gillies, J.A., Jayanty, R.K., Cassuccio, G., Gertler, A.W.: Characterizing mineral dusts and other aerosols from the Middle East – part 1: ambient sampling, *Inhalation Toxicology*, 21, pp. 297-326, 2009.

Jones, R. G.: The measurement of dielectric anisotropy using a microwave open resonator, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 9, pp. 819-827, 1976.

Journet, E., Balkanski, Y., and Harrison, S. P.: A new data set of soil mineralogy for dust-cycle modeling, *Atmos. Chem. Phys.*, 14, pp. 3801-3816, 2014.

Long, L. L., Querry, M. R., Bell, R. J., and Alexander, R. W.: Optical properties of calcite and gypsum in crystalline and powdered form in the infrared and far-infrared, *Infrared Phys.*, vol. 34, no. 2, pp. 191-201, 1993.

Longtin, D. R., Shettle, E. P., Hummel, J. R. and Pryce, J. D., *A Wind Dependent Desert Aerosol Model: Radiative Properties*, AFGL-TR-88-0112, Air Force Geophysics Laboratory, Hanscom AFB, MA, April 1988.

Nelson, S. O., Lindroth, D. P., Blake, R. L.: Dielectric properties of selected minerals at 1 to 22 GHz, *Geophysics*, vol. 54, no. 10, 1989.

O'Hara, S., Clarke, L., Elatrash, S.: Field measurements of desert dust deposition in Libya, *Atmos. Environ.*, 40, pp. 3881-3897, 2006.

Palik, E.: *Handbook of Optical Constants of Solids*, Academic Press, 1998.

Querry, M. R., *Optical constants of minerals and other materials from the millimeter to the ultraviolet*, Report CRDEC-CR-88009, U.S. Army, Aberdeen, 1987.

Takubo, J., Ukai, Y., Kakitani, S.: On the dielectric constants of minerals, *Mineralogical Journal*, vol. 1, no. 1, pp. 3-24, 1953.

<https://www.mindat.org/>