

## RELATIVNÍ RADIOMETRICKÁ NORMALIZACE PRO MONITORING CHLOROFYLU-a VE VODÁCH POMOCÍ DRUŽICE SENTINEL-2

TOMÁŠ BRUNCLÍK a KWASI ASARE  
BAFFOUR DANQUAH

Ústav chemického a environmentálního inženýrství, Fakulta chemicko-technologická, Univerzita Pardubice, Studentská 573, 532 10 Pardubice  
tomas.brunclik@upce.cz

Došlo 6.8.18, přijato 2.9.18.

**Rukopis byl zařazen k tisku v rámci placené služby urychleného publikování.**

**Klíčová slova:** monitoring, chlorofyl-a, vodní plochy, dálkový průzkum Země, družice, Sentinel-2, atmosférická korekce, relativní radiometrická normalizace

### Úvod

Monitoring kvality vody je součástí sledování životního prostředí. Obsah chlorofylu-a (chl-a) je indikátorem rozvoje fytoplanktonu ve vodách, nepřímo též nadměrného výskytu sinic<sup>1</sup>. Stanovení chl-a se provádí obvykle spektrofotometricky a je časově náročné<sup>2</sup>. Není možné z finančních a kapacitních důvodů sledovat všechny využívané vodní plochy – celostátní seznam přírodních koupacích vod<sup>3</sup> obsahuje jen několik desítek položek. Byla proto vyvinuta řada modelů určujících parametry kvality vody včetně chl-a ze satelitních snímků<sup>4-7</sup>. Nové evropské družice Sentinel-2A a Sentinel-2B mají vyšší spektrální, temporální i prostorové rozlišení, než dosud využívané družice Landsat. To umožňuje dostatečnou frekvenci monitoringu i zpřesnění modelů chl-a (cit.<sup>8,9</sup>).

K vytvoření modelu, který umožní trvalé sledování určité oblasti, je nutná kvalitní atmosférická korekce snímků. Atmosférickou korekcí snímků poměrně nových družic Sentinel-2 se zabývá řada publikací<sup>10-12</sup>. První pokusy o vytvoření modelů se snímků korigovanými staršími verzemi programu Sen2Cor (cit.<sup>13</sup>) autory této práce selhaly. S posledními verzemi programu Sen2Cor se úspěšně daří modely vytvořit. Problémem tedy zřejmě byla atmosférická korekce, která patrně stále ještě není optimální.

Cílem této práce bylo vyvinout postup vedoucí k potlačení vlivů atmosféry pomocí vlastní varianty relativní radiometrické normalizace (RRN) aplikované na snímky již korigované programem Sen2Cor. Metoda RRN je založená na transformaci hodnot pixelů jednoho snímku na základě jiného, referenčního snímku<sup>14,15</sup>. Pro povrchy, jejichž reflektance se nezměnila v době mezi pořízením

obou snímků, tzv. pseudo-invariantní (PI) povrchy, existuje mezi hodnotami pixelů těchto povrchů závislost:

$$Y = a \cdot X + b \quad (1)$$

kde  $Y$  jsou hodnoty referenčního snímku,  $X$  hodnoty snímku ke korekci,  $a$  je multiplikační koeficient,  $b$  aditivní koeficient. Koeficienty lze získat regresní analýzou z rovnice (1). Korekce snímku se pak provede lineární transformací jeho hodnot na základě vztahu:

$$X' = a \cdot X + b \quad (2)$$

kde  $X'$  jsou hodnoty snímku po korekci RRN. K nalezení (PI) povrchů se využívají metody analýzy změn<sup>16</sup>.

### Experimentální část

Zájmová oblast, odběr a analýza vzorků

Pro vytvoření modelů chl-a byly odebírány vzorky v okolí měst Pardubice a Hradec Králové s výskytem umělých jezer – písniček a rybníků. Část těchto vodních ploch je využívána ke koupání a rybolovu. Vzorky (celkem 23) byly odebírány z lodi v den přeletu družice +/- 1 den v období od května do září z vodních ploch o rozloze 7 až 88 ha v těchto datech: 10.7.2015, 11.8.2015, 24.8.2016, 13.9.2016, 11.5.2017 a 31.5.2018. Místa odběru byla zaznamenána pomocí GPS. Vzorky byly odebírány z hloubky asi 10 cm pod hladinou, zpracovány do 24 h a do doby zpracování uchovány v plastových lahvích v temnu a v chladu. Spektrofotometrická analýza chl-a proběhla podle normy ČSN ISO 260 (cit.<sup>2</sup>) s využitím skleněných filtrů Fisher F263 a Mancherey-Nagel MN GF-1 a UV-VIS spektrometru Biochrom Libra S22.

Načtení a vizuální posouzení družicových snímků

Družicové snímky byly staženy z Copernicus Open Access Hub (<https://scihub.copernicus.eu/>). Pokud byly dostupné, byly staženy již atmosféricky korigované. Jinak byly korigovány programem Sen2Cor ve verzi 2.5.5 autory práce, zčásti vzdáleně na gridové infrastruktuře Metacentrum Cesnet (<https://www.metacentrum.cz/>). Další zpracování probíhalo v geografickém informačním systému GRASS GIS 7.2.2 (<http://grass.osgeo.org>) (dále jen GIS). Do GIS byly načteny výřezy snímků s rozlišením 20 m a GPS souřadnice míst odběru vzorků. Některé snímky vizuálně vykazovaly známky nedokonalé atmosférické korekce (viz obr. 1 dále). Odběrové body v místech ovlivněných na snímku blízkou oblačností, stínem mraků, či jejich viditelným odrazem na hladině byly ze zpracování vyřazeny (celkem 4).

Dodatečná korekce družicových snímků

Reziduální vlivy atmosféry byly potlačeny vlastní variantou metody RRN provedenou v GIS. Použitá metoda analýzy změn k nalezení PI povrchů pro RRN byla vyvinuta na základě tří požadavků: (a) citlivost na změny typu

povrchu (např. vlivem výstavby či zemědělské činnosti); (b) citlivost na změny odrazivosti stejného typu povrchu (např. vlivem změny jeho vlhkosti, kondice vegetace a pod.); (c) necitlivost k vlivům atmosféry. Byla použita kombinace post-klasifikační analýzy změn typu povrchu (z klasifikace programem Sen2Cor) a změn v hodnotách indexu Normalized Difference Moisture Index (NDMI)<sup>17</sup>. Index NDMI je citlivý ke změnám vlhkosti vegetace i dalších povrchů. Zároveň je málo citlivý k vlivům atmosféry. Doplněním byla maska oblačnosti založená opět na klasifikaci programu Sen2Cor.

Dalším specifickým zde použitého postupu je prostorově variabilní RRN, použitá proto, že vliv atmosféry nebývá homogenní v ploše. Toho bylo dosaženo výpočtem koeficientů  $a$  a  $b$  rovnice (1) po dlaždicích, na které byl snímek rozdělen. Vypočtené parametry  $a$  a  $b$  ve středech dlaždic byly následně interpolovány jako rastry koeficientů  $a$  a  $b$  v ploše snímku. Velikost dlaždic při výpočtu byla zvolena  $6000 \times 6000$  m. Jako referenční byl vybrán snímek z 11.7.2015.

#### Vytvoření modelů chorofylu-a

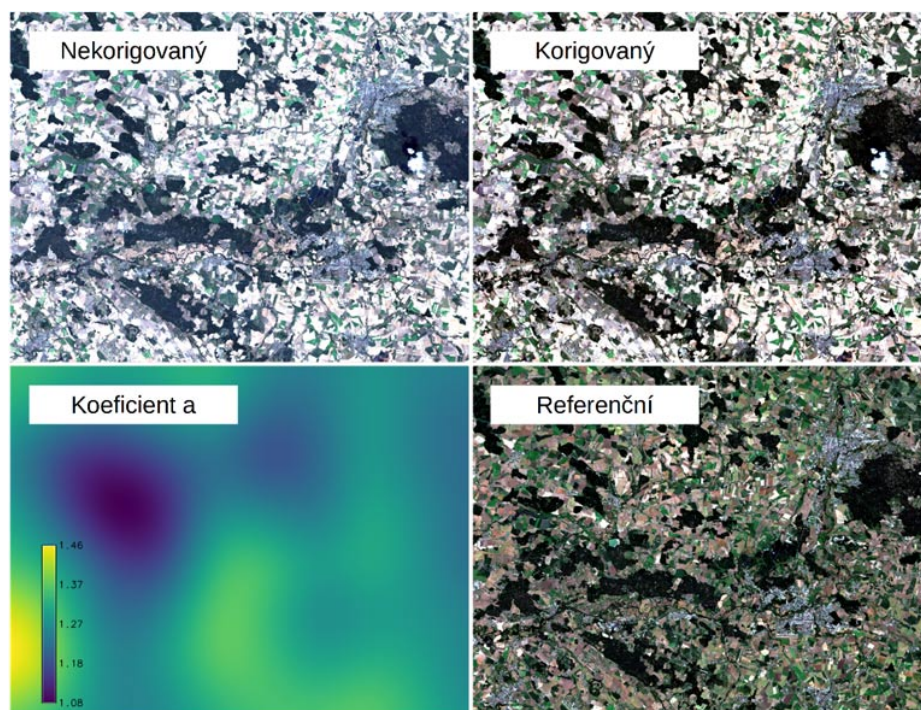
Ze snímků nekorigovaných i korigovaných RRN byly v GIS načteny hodnoty kanálů 2–7 v odběrových bodech a ty byly exportovány z GIS jako tabulky. V tabulkovém procesoru byla hledána korelace mezi hodnotami kanálů a jejich poměry a naměřenými hodnotami chl-a. U kombinací s lineárními korelacemi  $r^2$  nejméně 0,7 byly konstruo-

vány grafy závislosti koncentrace chl-a vs. kombinace kanálů a hledáno nejlepší proložení takové závislosti. Rovnici tohoto proložení je možné použít jako model pro výpočet chl-a. Pro posouzení kvality modelu byly dále vytvořeny grafy závislosti modelem vypočtených vs. naměřených hodnot chl-a a vypočteny parametry koeficient determinace  $r^2$ , střední kvadratická odchylka  $RMSE$  a normalizovaná střední kvadratická odchylka  $NRMSE$  těchto dvou datových sad.

#### Výsledky a diskuse

##### Vizuální zhodnocení vlivu RRN na snímky

Vizuálně byl vliv RRN na jednotlivé snímky různý, od výrazné změny až po téměř nepozorovatelný rozdíl. Ukázka srovnání a vzhledu rastru koeficientu  $a$  rovnice (2) je na obr. 1. Snímek z tohoto data se jevil jako před korekcí nejvíce postižený reziduálními atmosférickými vlivy. Z relativně stabilních ploch ve snímku je vidět (tmavé jehličnaté lesy a světlá města), že byla korekce zřejmě úspěšná. Odstranila zesvětlení v oblasti lesů, které na korigovaném snímku vypadají podobně, jako na snímku referenčním. Na prostorovém rozložení koeficientu  $a$  je vidět, jak se měnil v rozsahu od 1,08 až 1,46. Průběh aditivního koeficientu  $b$  byl obdobný, ale jeho hodnoty se měnily inverzně k hodnotám koeficientu  $a$  v rozsahu  $-555$  až  $-259$ .



Obr. 1 Srovnání vzhledu referenčního snímku, snímku před a po RRN a rastr koeficientu  $a$  pro kanál S02. Korigovaný snímek z 10.8.2015, referenční z 11.7.2015. Zobrazena je pouze část snímků pokrývající oblast zájmu a blízké okolí

### Model chlorofylu-a ze satelitních dat nekorigovaných RRN

Nejlepší lineární korelaci jednoho kanálu s hodnotami chl-a  $r^2 = 0,76$  měl kanál S05 (705 nm). Z poměrů kanálů měl nejlepší  $r^2 = 0,92$  poměr S05/S04. To je v souladu se zjištěními z dalších prací<sup>8,9</sup>. Rovnice modelu pro výpočet koncentrace chl-a ve vodních plochách z hodnot kanálů S04 a S05 snímků družice Sentinel-2:

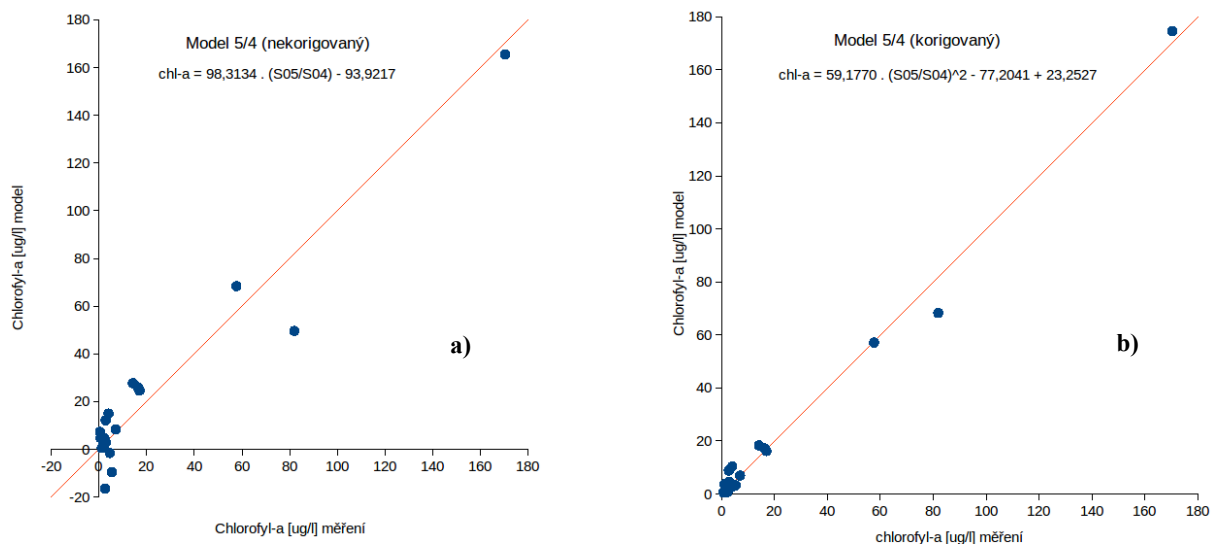
$$\text{Chl-a} = 98,3134 \cdot (\text{S05/S04}) - 93,9217 \quad (3)$$

Graf srovnání naměřených a modelem vypočtených hodnot chl-a je na obr. 2a. Tento lineární model charakterizuje korelace mezi naměřenými a vypočtenými hodnotami  $r^2 = 0,92$ ,  $RMSE = 11,3 \mu\text{g l}^{-1}$  a  $NRMSE = 6,6 \%$ . V porovnání s předchozími výsledky s daty Landsat<sup>7</sup> jsou to velmi dobré parametry, nicméně problematická je oblast nízkých koncentrací s poměrně velkým relativním rozptylem, díky kterému je část modelem vypočtených koncentrací v záporných číslech.

### Model chlorofylu-a ze satelitních dat korigovaných RRN

Nejlepší lineární korelace byly dosaženy pro stejné kanály jako u nekorigovaných satelitních dat. Korelace pro kanál S05 se zvýšila na  $r^2 = 0,86$  a pro poměr kanálů S05/S04 došlo k mírnému poklesu na  $r^2 = 0,89$ . Graf závislosti chl-a vs. kombinace kanálů S05/S04 nicméně ukázal, že body závislosti se z původně poměrně rozptýleného uspořádání posunuly do zřetelně nelineárního uspořádání, které lze velmi dobře proložit polynomem 2. stupně s těsností  $r^2 = 0,99$ . Rovnice modelu:

$$\text{Chl-a} = 59,1770 \cdot (\text{S05/S04})^2 - 77,2041 \cdot (\text{S05/S04}) + 23,2527 \quad (4)$$



Obr. 2 Grafické srovnání naměřených a modelem vypočtených hodnot. a) (vlevo) satelitní data nekorigována RRN, b) (vpravo) korigována RRN

Graf vypočtených vs. naměřených hodnot (obr. 2b) ukazuje, že tento nelineární model výrazně lépe předpovídá nejen nízké koncentrace chl-a. To potvrzují i vyšší  $r^2 = 0,99$  a nižší  $RMSE = 4,3 \mu\text{g l}^{-1}$  a  $NRMSE = 2,5 \%$ . Rozsah naměřených koncentrací chl-a použitých ke konstrukci modelu byl  $0,3\text{--}170,3 \mu\text{g l}^{-1}$  a počet v modelu použitých měření je  $n = 19$ , stejně jako u předchozího. Zlepšení  $r^2$ ,  $RMSE$  a  $NRMSE$  potvrzuje domněnku na základě prvních testů na datech Landsat<sup>18</sup>, že dodatečná RRN by mohla zvýšit přesnost modelů parametrů kvality vody na základě družicových snímků. Míra zlepšení v této práci je ještě výraznější, což vypovídá pravděpodobně o nižší kvalitě původní atmosférické korekce. Zároveň velmi dobré hodnoty parametrů  $r^2$  a  $NRMSE$  naznačují, že u parametru chl-a lze s použitím dat z družice Sentinel-2 dosáhnout výrazně vyšší přesnosti modelů, než tomu bylo u družice Landsat. To bude nutné ještě potvrdit po rozšíření datové základny modelů zejména v oblasti vyšších koncentrací chl-a a validací modelů s využitím měření nepoužitých ke konstrukci modelu.

### Závěr

Použití dodatečné prostorově variabilní RRN vedlo k modelu s vyšší korelací a méně než poloviční RMSE oproti modelu před normalizací. Lze konstatovat, že navržený postup RRN je vhodný pro danou aplikaci. Uvedené velmi dobré parametry modelů potvrzují použitelnost senzoru MSI družice Sentinel-2 pro měření chl-a ve vodách naznačenou i v dalších pracích.

Internetová verze této práce obsahuje navíc doplňující část.

*Poděkování za finanční podporu Univerzity Pardubice (projekt č. SGSFChT\_2018\_003). Autoři dále děkují za možnost přístupu na zařízení Národní gridové infrastruktury MetaCentrum poskytované díky projektu CESNET LM2015042.*

## LITERATURA

- Langhammer J.: *Kvalita povrchových vod a jejich ochrana*. UK Praha, Praha 2009.
- ČSN ISO 10260: *Jakost vod. Měření biochemických ukazatelů. Spektrofotometrické stanovení koncentrace chlorofylu-a*. (únor 1996).
- Ministerstvo zemědělství: *Seznam přírodních koupališť na povrchových vodách, ve kterých nabízí službu koupání provozovatel a dalších povrchových vod ke koupání pro rok 2018* (2018).
- Kloiber S. M., Brezonik P. L., Olmanson L. G., Bauer M. E.: *Remote Sens. Environ.* 82, 38 (2002).
- Beck R. a 22 spoluautorů: *Remote Sens. Environ.* 178, 15 (2016).
- Olmanson L. G., Brezonik P. L., Finlay J. C., Bauer M. E.: *Remote Sens. Environ.* 185, 119 (2016).
- Brunclík T., Danquah K. A. B., v knize: *Advances in Remote Sensing, Finite Differences and Information Security* (Scutelnicu E., Lazic L., Arroyabe P. F., ed.), str. 115. WSEAS Press, Praha 2012.
- Toming K., Kutser T., Laas A., Sepp M., Paavel B., Nõges T.: *Remote Sens.* 8, 640 (2016).
- Lins R. C., Martinez J.-M., Motta Marques D. da, Cirilo J. A., Fragozo C. R.: *Remote Sens.* 9, 516 (2017).
- Keukelaere L. D. a 10 spoluautorů: *Eur. J. Remote Sens.* 51, 525 (2018).
- Roy D. P., Li J., Zhang H. K., Yan L., Huang H., Li Z.: *Remote Sens. Environ.* 199, 25 (2017).
- Martins V. S., Barbosa C. C. F., de Carvalho L. A. S., Jorge D. S. F., Lobo F. L., Novo E. M. L. M.: *Remote Sens.* 9, 322 (2017).
- Mueller-Wilm U., Devignot O., Pessiot L.: *Sen2Cor Configuration and User Manual*. European Space Agency, 2018.
- Schott J. R., Salvaggio C., Volchok W. J.: *Remote Sens. Environ.* 26, 1 (1988).
- Yuan D., Elvidge C. D.: *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 51, 126 (1996).
- Lu D., Mausel P., Brondizio E., Moran E.: *Int. J. Remote Sens.* 25, 2401 (2004).
- Jin S., Sader S. A.: *Remote Sens. Environ.* 94, 372 (2005).
- Horáková M.: *Diplomová práce*. Univerzita Pardubice, Pardubice 2016.

**T. Brunclík and K. A. B. Danquah** (*Institute of Environmental and Chemical Engineering, Faculty of Chemical Technology, University of Pardubice, Pardubice*): **Relative Radiometric Normalization for Chlorophyll-a Monitoring in Water Using Sentinel-2 Satellite**

It was the objective of this work to develop a procedure for the relative radiometric normalization of Sentinel-2 images and to verify its applicability in the modeling of chlorophyll-a concentration based on satellite data. A process of analyzing changes for the selection of pseudo-invariant surfaces has been proposed. These pseudo-invariant surfaces were used in a newly developed spatially variable variant of relative radiometric normalization. The satellite data already corrected by the Sen2Cor program were additionally corrected by the proposed procedure. Models were developed to calculate the concentration of chlorophyll-a from Sentinel-2 satellite imagery. Models based on unmodified and radiometrically normalized satellite data were compared. The positive effect of the proposed procedure on the chlorophyll-a model was proven.

**Keywords:** monitoring, chlorophyll-a, water bodies, remote sensing, satellite, Sentinel-2, atmospheric correction, relative radiometric normalization

## DOPLNĚK

Tabulka I  
Seznam odebraných vzorků a naměřených hodnot chlorofylu-a

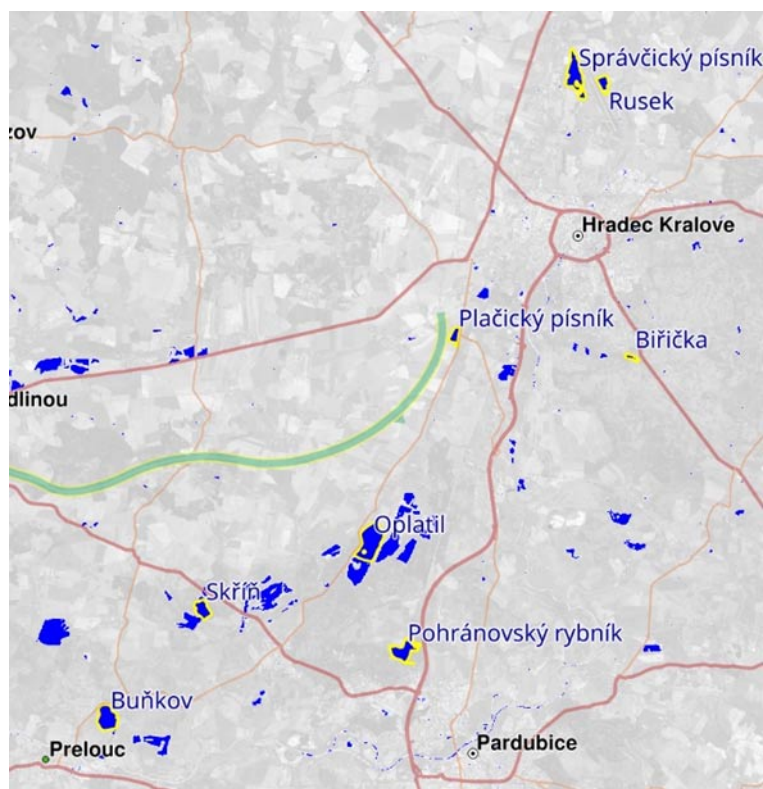
Vzorkování	Název bodu	GPS souřadnice		Vodní plocha	Typ	Chl-a [ $\mu\text{g l}^{-1}$ ]
20150710	AV1	50,1780850	15,7707664	Plačický písňík	p	1,2
20150710	AV2	50,1083117	15,7224964	Oplatil	p	4,5
20150710	AV3	50,0723611	15,7378056	Pohránovský rybník	r	57,6
20150811	AV1	50,0723611	15,7376667	Pohránovský rybník	r	81,9
20150811	AV2	50,1068599	15,7202581	Oplatil	p	0,7
20150811	AV3	50,1092015	15,7260416	Oplatil	p	2,3
20150811	AV4	50,2585556	15,8286389	Správčický písňík	p	0,4
20150811	AV5	50,2641111	15,8311944	Správčický písňík	p	1,6
20160824	AV1	50,1063630	15,7197199	Oplatil	p	5,7
20160824	AV2	50,1087348	15,7260647	Oplatil	p	0,1
20160824	AV3	50,1763315	15,7693398	Plačický písňík	p	5,3
20160824	AV4	50,1696845	15,8589816	Bířička	r	6,6
20160913	AV1	50,1098638	15,7254893	Oplatil	p	2,8
20160913	AV2	50,1064415	15,7198732	Oplatil	p	2,1
20170511	s1	50,0729070	15,7369936	Pohránovský rybník	r	4,0
20170511	s2	50,0738974	15,7410615	Pohránovský rybník	r	2,8
20170511	s3	50,1082334	15,7230331	Oplatil	p	2,6
20170511	s4	50,0568077	15,5907181	Buňkov	r	16,4
20170511	s5	50,0556311	15,5903963	Buňkov	r	14,2
20170602	s4	50,0858682	15,6414256	Skříň	r	170,3
20180531	s1	50,0730756	15,7373455	Pohránovský rybník	r	17,0
20180531	s2	50,1759788	15,7701588	Plačický písňík	p	7,0
20180531	s3	50,2603181	15,8471653	Rusek	p	1,9

Typ: p – písňík, r – rybník.

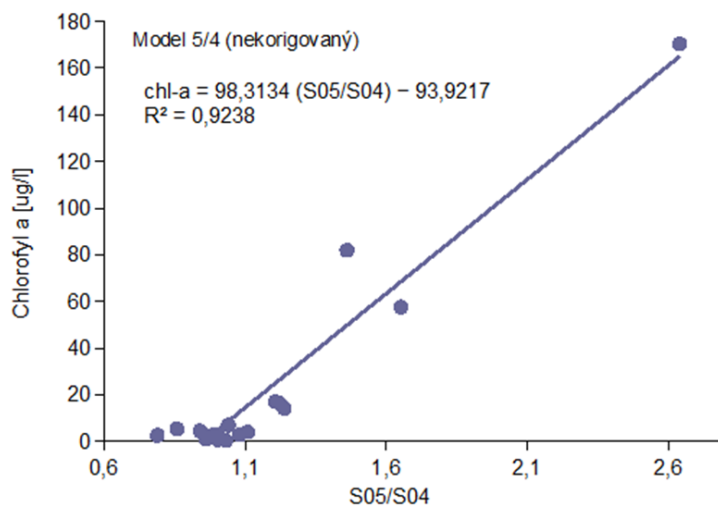
Vzorkovací body v řádcích zvýrazněných kurzívou nebyly použity v modelu kvůli oblačnosti, odrazu od hladiny apod.

Tabulka II  
Data snímání a použité družicové snímky

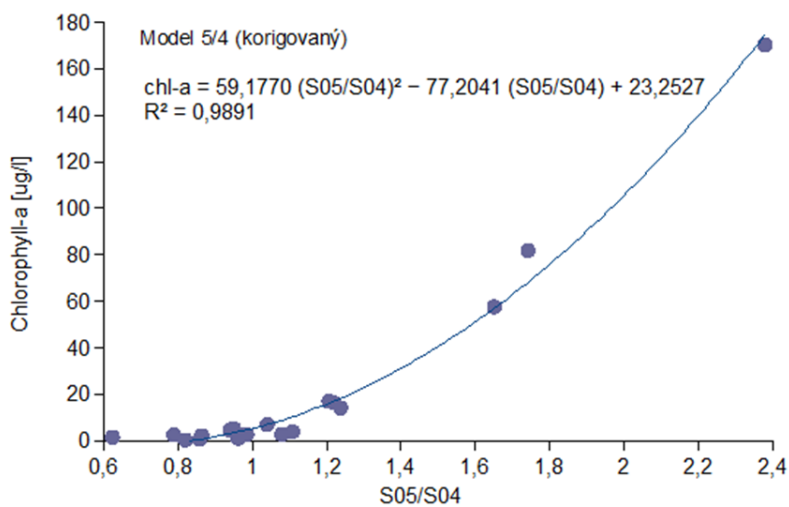
Datum snímku	Identifikátor souboru snímku
20150711	S2A_USER_PRD_MSIL2A_PDMC_20160812T055659_ R122_V20150711T100006_20150711T100008.SAFE
20150810	S2A_USER_PRD_MSIL2A_PDMC_20160914T033904_ R122_V20150810T100016_20150810T100010.SAFE
20160824	S2A_USER_PRD_MSIL2A_PDMC_20160825T193805_ R122_V20160824T100032_20160824T100607.SAFE
20160913	S2A_USER_PRD_MSIL2A_PDMC_20160915T151344_ R122_V20160913T100022_20160913T100504.SAFE
20170511	S2A_MSIL2A_20170511T100031_N0205_ R122_T33UWR_20170511T100539.SAFE
20170603	S2A_MSIL2A_20170603T101031_N0205_ R022_T33UWR_20170603T101026.SAFE
20180531	S2B_MSIL2A_20180531T100029_N0208_ R122_T33UWR_20180531T125926.SAFE



Obr. 1 Mapa oblasti vzorkování. Vzorkované vodní plochy žlutě zvýrazněny a opatřeny názvy



Obr. 2 Graf nejlepšího modelu ze satelitních dat nekorigovaných RRN



Obr. 3 Graf nejlepšího modelu ze satelitních dat korigovaných RRN