

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

KATEDRA PROSTOROVÝCH VĚD



**ANALÝZA CHARAKTERISTIK JEZERA NA TIBETSKÉ
NÁHORNÍ PLOŠINĚ VE VZTAHU KE ZMĚNÁM V JEHO
PROSTŘEDÍ POMOCÍ SATELITNÍCH DAT**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vedoucí práce: Ing. David Moravec, Ph.D.

Bakalant: Hynek-Martin Krčma

2022

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Hynek-Martin Krčma

Environmentální vědy
Aplikovaná ekologie

Název práce

Analýza charakteristik jezera na Tibetské náhorní plošině ve vztahu ke změnám v jeho prostředí pomocí satelitních dat

Název anglicky

Remote sensing analysis of physical properties of lake on Tibetan Plateau and relation to changes in its environment

Cíle práce

Jezera na Tibetské náhorní plošině jsou vystavena mimořádně silnému působení klimatických změn. Jejich stav může sloužit jako vhodný indikátor následků změn klimatu. Cílem práce je charakterizovat vybrané jezero pomocí multispektrální analýzy družicových dat. Budou sledovány optické charakteristiky vodní plochy vzhledem ke klimatickým charakteristikám dané oblasti.

Metodika

Pro výpočet charakteristik bude využita platforma Google Earth Engine.

Bude sestavena časová řada družicových snímků (MODIS, VIIRS) daného jezera. Dále budou spočítány hodnoty fyzikálních proměnných (obsah chlorofylu, CDOM, turbidita). To vyústí v popis temporálních charakteristik. Následně bude analyzován vztah ke srážkám, vegetačnímu indexu a teplotám v dané oblasti.

Doporučený rozsah práce

30 stran

Klíčová slova

družicová data, kvalita vody, klimatická změna, multispektrální analýza

Doporučené zdroje informací

CHUVIECO, E. *Fundamentals of satellite remote sensing : an environmental approach*. Boca Raton: Taylor & Francis, 2016. ISBN 9781498728058.

KROPÁČEK, J. – ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE. FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ. *Analysis of environmental change on the Tibetan Plateau by remote sensing : habilitation thesis*. Disertační práce. Praha: 2019.

SCHOWENGERDT, R A. *Remote sensing : models and methods for image processing*. Amsterdam: Elsevier, 2007. ISBN 978-0-12-369407-2.

Předběžný termín obhajoby

2021/22 LS – FZP

Vedoucí práce

Ing. David Moravec, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra prostorových věd

Elektronicky schváleno dne 21. 3. 2022

doc. Ing. Petra Šímová, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 21. 3. 2022

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 27. 03. 2022

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Analýza charakteristik jezera na Tibetské náhorní plošině ve vztahu ke změnám v jeho prostředí pomocí satelitních dat“ vypracoval samostatně a citoval jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použil a které jsem rovněž uvedl na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů. Jsem si vědom, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla. Jsem si vědom, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby. Svým podpisem rovněž prohlašuji, že elektronická verze práce je totožná s verzí tištěnou a že s údaji uvedenými v práci bylo nakládáno v souvislosti s GDPR.

V Praze dne _____

Podpis: _____

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu práce, Ing. Davidu Moravcovi, Ph.D., za vedení této práce, cenné rady a vřelý přístup. Dále patří poděkování моým rodičům, моým blízkým a všem, kdo mě během psaní práce podporovali.

Abstrakt

Byla provedena analýza fyzikálních charakteristik jezera Gozha pomocí multispektrálních družicových dat a následné porovnání s vybranými přírodními podmínkami v jeho okolí. Jezero leží v severozápadní části Tibetské náhorní plošiny. Pro potřeby analýzy byly využity snímky ze sensorů MODIS a VIIRS a produkty ERA5-Land, GPM a MODIS Vegetation Indices. Jako platforma pro zpracování dat byla zvolena služba Google Earth Engine. Výstupem z analýzy jezera, která byla provedena aplikací poměrů spektrálních pásem, bylo 6 grafů popisujících vývoje koncentrace chlorofylu-a, CDOM a TSM v letech 2001-2021. Výstupem pro přírodní podmínky pro stejné období byly 3 grafy popisující vývoj průměrné roční teploty, ročního srážkového úhrnu a srpnového NDVI v povodí jezera. Tato data byla vyhodnocena a byly provedeny vzájemné korelační testy. Z těch vyšel jako statisticky významný negativní vztah koncentrace chlorofylu a TSM, ostatní vztahy nebyly významné. Byl patrný výrazný růst NDVI a o něco nižší růst průměrných ročních teplot a ročních srážkových úhrnů. Na jezeře byl zřejmý nárůst CDOM a pokles TSM, chlorofyl vzrostl nepatrně. Vztah mezi přírodními podmínkami a vlastnostmi jezera se nepodařilo prokázat. Práce poskytla aktuální informace o vývoji přírodních podmínek na Tibetské náhorní plošině a navrhla možné procesy ovlivňující charakteristiky jezera Gozha.

Klíčová slova:

družicová data, kvalita vody, klimatická změna, multispektrální analýza

Abstract

Analysis of physical properties of lake Gozha was accomplished using multispectral satellite data which were consequently compared to selected environmental conditions in surrounding area. Lake lies in north-western part of Tibetan Plateau. To carry out the analysis, images from sensors MODIS and VIIRS and products ERA5-Land, GPM and MODIS Terra Vegetation Indices were used. As a platform for data processing, Google Earth Engine was selected. Output of lake analysis, which was executed by applying spectral band ratios, were 6 graphs describing development of concentrations of chlorophyll-a, CDOM and TSM in years 2001-2021. Output for environmental conditions for the same period were 3 graphs describing development of mean annual temperature, annual rainfall and NDVI for august of each year for basin of lake Gozha. This data was evaluated and correlation tests were performed. Negative relationship of concentrations of chlorophyll and TSM came out as significant, other relationships were insignificant. Growth of NDVI was substantial, slightly milder was growth of mean annual temperatures and annual rainfalls. Lake experienced apparent rise in concentration of CDOM and decrease of TSM, chlorophyll increased only slightly. Relationship between environmental conditions and lake properties was not successfully proven. Thesis provided current data about development of conditions on Tibetan Plateau and proposed possible processes that lead to changes on lake Gozha.

Keywords:

satellite data, water quality, climate change, multispectral analysis

Obsah

1. Úvod.....	1
2. Cíle práce.....	1
3. Dálkový průzkum Země (DPZ).....	2
3.1 Charakteristika DPZ.....	2
3.2 Vlastnosti senzorů.....	2
3.2.1 MODIS.....	3
3.2.2 VIIRS.....	3
3.3 Optické vlastnosti vody.....	4
3.4 Kvalita vody v DPZ.....	5
3.4.1 Chlorofyl-a.....	5
3.4.2 Barevná rozpuštěná organická hmota (CDOM).....	6
3.4.3 Turbidita a množství ponořených sedimentů (TSM).....	7
4. Charakteristika území.....	7
4.1 Tibetská náhorní plošina.....	7
4.2 Pohoří Kunlun.....	8
4.3 Přírodní podmínky.....	9
4.4 Dlouhodobý vývoj teploty a srážek.....	10
4.5 Dlouhodobý vývoj vegetace.....	11
4.6 Jezera na Tibetské náhorní plošině.....	12
4.6.1 Jezero Gozha.....	12
4.6.2 Vývoj během holocénu.....	13
4.6.3 Dynamika v období družicového snímání.....	13
5. Metodika.....	14
5.1 Google Earth Engine (GEE).....	14

5.2 Shrnutí postupu	15
5.3 Zpracování dat o jezeře Gozha.....	15
5.3.1 MODIS.....	15
5.3.2 VIIRS	19
5.4 Zpracování dat o povodí jezera Gozha.....	20
5.4.1 ERA5-Land	20
5.4.2 GPM	22
5.4.3 MODIS Terra Vegetation Indices	23
6. Výsledky.....	24
6.1 Proměna optických vlastností jezera Gozha.....	24
6.1.1 MODIS.....	24
6.1.2 VIIRS	27
6.2 Proměna přírodních podmínek v povodí jezera Gozha	30
6.2.1 ERA5-Land	30
6.2.2 GPM	31
6.2.3 MODIS Terra Vegetation Indices	32
7. Diskuse.....	33
7.1 Vlastnosti vody.....	33
7.2 Přírodní podmínky.....	36
7.3 Porovnání vlastností vody a přírodních podmínek.....	37
8. Závěr.....	38
9. Literatura	40
10. Přílohy	47

1. Úvod

Tibetská náhorní plošina je ekologicky křehká oblast, která rychle reaguje na změny klimatu (Kuang & Jiao 2016). Nacházejí se zde tisíce jezer a 3. největší světové zásoby ledu, které poskytují vodu více než miliardě lidí v Asii (Immerzeel et al. 2010). Za několik posledních desetiletí zde došlo k rychlému oteplení a zvýšení množství srážek, což mělo důležitý dopad na koloběh vody a energie i místní ekosystémy (Yang et al. 2012). Vzhledem k nízké hustotě zalidnění nejsou zdejší jezera zásadně ovlivňována lidskou činností, díky čemuž může studium jejich charakteristik poskytnout hodnotné informace o dopadu environmentálních změn na hydrologický systém (Lei et al. 2014).

Dálkový průzkum Země (DPZ) nám dává možnost zkoumat dlouhodobé i krátkodobé změny na zemském povrchu, vodních plochách a oceánech. Analýzou multispektrálních družicových snímků jezer můžeme získat informace o jejich trofickém stavu, množství rozpuštěných sedimentů, množství organické hmoty aj. (Bakker et al. 2009). Při snaze lépe porozumět způsobům, jakým reagují jezera v extrémních podmínkách na klimatické změny, je DPZ vhodným nástrojem.

Jezero Gozha, ležící v severozápadní části Tibetské náhorní plošiny, bylo zahrnuto ve studiích zabývajících se např. změnami v rozlohách tibetských jezer (Zhang et al. 2011), obdobím jejich zamrznutí v rámci roku (Kropáček et al. 2013) či průzračností vody (Pi et al. 202). Tato práce se soustředí na komplexní analýzu jezera Gozha, ve které se pokusí najít souvislosti mezi změnami jeho fyzikálních charakteristik a změnami přírodních podmínek v jeho okolí.

2. Cíle práce

Cílem práce je sestavit časovou řadu multispektrálních družicových snímků a s jejich pomocí analyzovat vybrané optické vlastnosti jezera Gozha. Pro okolí jezera bude rovněž vytvořena časová řada vývoje vybraných přírodních charakteristik. Hlavním předmětem práce bude vyhodnocení výsledků těchto dvou analýz a pokus o nalezení vzájemných souvislostí.

3. Dálkový průzkum Země (DPZ)

3.1 Charakteristika DPZ

Dálkovým průzkumem Země se rozumí získávání informací o vlastnostech objektů na zemském povrchu bez přímého kontaktu za pomoci dat získávaných z družic a letadel (Schowengerdt 2007). Díky satelitnímu snímkování jsme schopni v pravidelných intervalech a téměř v reálném čase zkoumat krátkodobé i dlouhodobé změny na povrchu Země, což má dalekosáhlé využití v mnoha oborech. Senzory, které tato data pořizují, se dělí na dva základní typy: pasivní, které měří Zemí vyzařované či odražené sluneční záření; a aktivní, které využívají vlastního zdroje záření a měří jeho odraz od povrchu a atmosféry Země. Tato práce se soustředí na data získávána pasivními senzory.

3.2 Vlastnosti senzorů

Satelitní snímky z mnoha různých družic jsou dnes volně přístupné veřejnosti. Pro studium vybrané problematiky je zapotřebí zvolit takový senzor, který má pro námi zvolenou analýzu co nejvhodnější vlastnosti. Základní charakteristiky senzorů jsou: prostorové rozlišení (velikost pixelu v rastru); spektrální rozlišení (vlnové délky snímaných pásem a jejich počet) a časové rozlišení (frekvence přeletu nad zkoumanou lokalitou). Pro analýzu optických vlastností vodní plochy je navíc zásadní „signal-to-noise ratio“ (SNR) senzoru, které nám určuje poměr použitelné informace (signálu) a nežádoucího šumu, který při snímání vzniká nedokonalostí zařízení (Schowengerdt 2007).

Jelikož cílem práce není monitorovat detailní změnu prostorových prvků/krajinného pokryvu na povrchu Země (např. změna tvaru jezera), vysoké prostorové rozlišení není rozhodujícím faktorem. Oproti tomu je velmi důležitý parametr SNR, protože množství záření opouštějící vodní hladinu je nízké. Analýza optických vlastností vody spočívá v porovnání drobných rozdílů intenzity záření v jednotlivých úzkých pásmech. Je tedy nezbytné, aby každý pixel nesl co možná nejvyšší procento informace a nejnižší procento šumu. Pokud je SNR vyšší než 600:1 pro blízké

infračervené záření (NIR) a 400:1 pro viditelné spektrum, získané snímky by měly mít pro toto využití dostačující kvalitu (Qi et al. 2017).

Pro monitoring dlouhodobé změny je navíc žádoucí mít co možná nejdelší kontinuální období snímání s vysokou frekvencí přeletů. Pokud je časové rozlišení moc nízké, zvyšujeme pravděpodobnost, že bude na žádaných snímcích vysoká míra oblačnosti, což by mohlo ovlivnit výsledky analýzy. V případě zkoumání snímků z jiných částí roku bychom se pak vystavili riziku, že pozorované změny mohou být sezónní, nikoliv dlouhodobé (Šmejkalová 2020).

Těmto požadavkům nejvíce odpovídají senzory MODIS a VIIRS. Data z těchto zařízení budou použita pro analýzu zkoumaného jezera a navzájem porovnána.

3.2.1 MODIS

Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (zkráceně MODIS) je senzor americké vesmírné agentury NASA na palubě dvou satelitů obíhajících Zemi – Terra a Aqua. Družice Terra byla na oběžnou dráhu vypuštěna v prosinci roku 1999, Aqua pak v květnu roku 2002. MODIS snímá zemský povrch ve 36 spektrálních pásmech s vlnovými délkami od 0.412 do 14.4 μm . Různá pásma mají různé prostorové rozlišení – 250 m (2 pásma), 500 m (5 pásem) a 1 km (29 pásem). 20 z nich je pasivních, 16 aktivních (Barnes et al. 2003). Senzory MODIS nasnímají povrch téměř celé planety během necelých dvou dnů, v čemž spočívá jeho hlavní výhoda, společně s dlouhou časovou řadou snímků. Další jeho přednost je úzký záběr spektrálních pásem, díky kterému je ideální pro zkoumání drobných odchylek v odrazivosti povrchů či specifických látek ve vodním tělese. Většina pásem s vlnovými délkami vhodnými pro studium vodních ploch má prostorové rozlišení 1 km a SNR 933:1 až 1385:1, díky čemuž je MODIS pro takové aplikace zcela vhodný (Esaias et al. 1998).

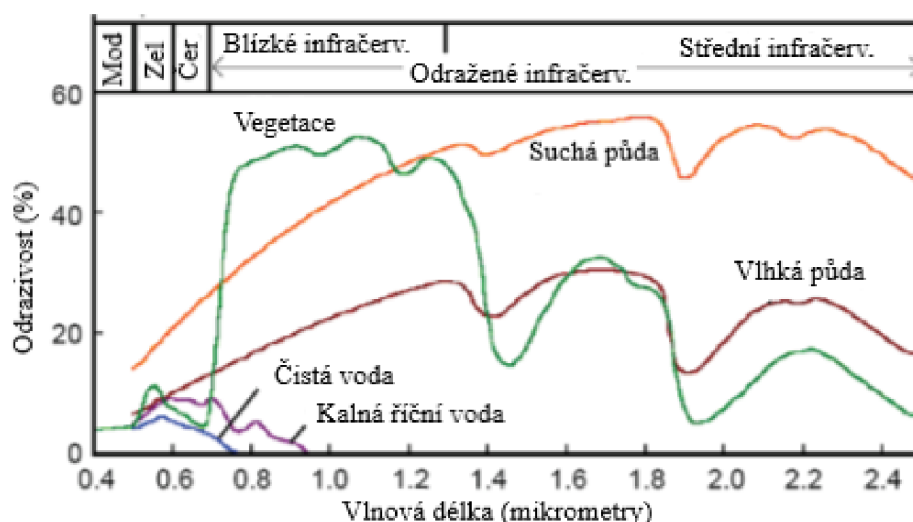
3.2.2 VIIRS

Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) je senzor na palubě amerických družic Suomi National Polar-orbiting Partnership (Suomi NPP) a NOAA-20. Suomi NPP byla vyslána na oběžnou dráhu v říjnu roku 2011, NOAA-20 v listopadu roku

2017. VIIRS získává data ve 22 úzkých spektrálních pásmech. 14 pásem zachycující viditelné, blízké infračervené a krátkovlnné infračervené záření je pasivních a zbylých 7 je aktivních. Senzor má navíc jedno panchromatické denní/noční pásmo (DNB) pro snímání ve špatných světelných podmínkách, především tedy v noci. Prostorové rozlišení pásem je 750 m (16 + DNB) a 375 m (5) (Xiong et al. 2014). Podobně jako MODIS pořizuje denně globální snímky. SNR se u pásem vhodných pro zkoumání vodní plochy pohybuje zhruba mezi 300:1 až 400:1, což jsou stále přijatelné hodnoty.

3.3 Optické vlastnosti vody

V porovnání s vegetací či holou půdou odráží voda mnohem méně elektromagnetického záření. Vegetace ho může odrážet až 50 %, kdežto voda maximálně 10 % (zpravidla však méně než 1 % (Gholamalifard et al. 2013)). Odražená energie je převážně ve viditelném spektru (s vlnovými délkami mezi 0,4-0,7 μm), částečně i v blízkém infračerveném spektru (NIR), dohromady označováno VNIR. Veškeré optické a termální záření o vlnové délce větší než 1,2 μm je vodou zcela pohlceno. Na satelitních snímcích s věrným zobrazením barev se tak vodní plochy jeví tmavé až černé. Zároveň pak záleží na dalších vlastnostech dané vodní plochy, které blíže definují odrazovou spektrální křivku (Bakker et al. 2009).



Obrázek 1: Spektrální odrazové křivky různých zemských povrchů. Převzato od Sadjadi & Chun 2004.

3.4 Kvalita vody v DPZ

Zkoumání kvality vody zahrnuje určování chemických, fyzikálních a biologických vlastností vodních ploch a identifikaci možných znečišťujících zdrojů, které by mohly kvalitu vody snížit (Gholizadeh et al. 2016). Určení biomasy fytoplanktonu (koncentrace Chlorofylu-a), množství rozpuštěných sedimentů (TSM/turbidita), množství barevné rozpuštěné organické hmoty (CDOM) nebo přítomnost makrofyt jsou zásadními parametry v optických modelech kvality vody, jenž máme možnost pozorovat použitím zobrazovacích spektrometrů. Pasivní spektrometry jsou senzory s relativně nízkým prostorovým rozlišením (na rozdíl od aktivních radiometrů), zato však s vysokým rozlišením spektrálním. Mezi hlavní využití snímání v mnoha úzkých spektrálních pásmech patří identifikace materiálu povrchů na Zemi, u vodních ploch zkoumání výše zmíněných optických vlastností (Bakker et al. 2009). Tato práce se zabývá zkoumáním koncentrace Chlorofylu-a, množství CDOM a turbidity jezera Gozha, což jsou charakteristiky, které společně dávají komplexní obraz o stavu vodní plochy.

Vnitrozemské vodní plochy se dělí na dva základní typy: Typ 1, jehož optické vlastnosti jsou určovány obsahem fytoplanktonu, a typ 2, kam spadají všechny ostatní případy (Gholizadeh et al. 2016), včetně jezera Gozha.

Pro měření jednotlivých vlastností vody je zapotřebí znát způsob, jakým se na snímcích projevují. Každý parametr pohlcuje či odráží záření jiných vlnových délek, a proto je přístup k získání dat o každém z nich specifický. Mezi základní operace patří zobrazení poměrů pásem (indexů) či zobrazení pásem samotných. Díky předchozím znalostem o optickém chování daných parametrů jsme tak schopni extrahovat informaci o zkoumané charakteristice vodní plochy (Ritchie et al. 2003).

3.4.1 Chlorofyl-a

Koncentrace chlorofylu se běžně používá pro určení trofického stavu vodního tělesa a je přímým indikátorem biomasy fytoplanktonu (Moses et al. 2009). Pro měření jeho koncentrace jsou zapotřebí úzká pásma. Hlavní rozptylové a absorpční vlastnosti

chlorofylu-a jsou: silná absorpce mezi 450-475 nm (modrá) a 670 nm (červená) a maximální odrazivost v 550 nm (zelená) a 700 nm (NIR) (Gholizadeh et al. 2016).

Volba vhodného způsobu zobrazení (poměru pásem či samotného pásma) úzce souvisí s typem vodní plochy. Např. úroveň turbidity či CDOM ovlivňuje extrakci koncentrace Chlorofylu-a ze snímků. U studia otevřeného oceánu či vnitrozemských vodních ploch 1. typu se běžně používá poměr modré/zelené pásmo, u vodních ploch 2. typu však tento přístup selhává (Carder et al. 2004). Pro omezení vlivu ostatních částic se využívá poměru červené/NIR pásmo, což ve vodách 2. typu přináší přesnější výsledky (Moses et al. 2009).

3.4.2 Barevná rozpuštěná organická hmota (CDOM)

DOM neboli rozpuštěná organická hmota (někdy uváděno přímo jako množství rozpuštěného organického uhlíku (DOC)) je důležitým zdrojem energie pro heterotrofní bakterie ve vodním tělese a ovlivňuje tak jeho potravní řetězec (Kutser et al. 2005). Hraje důležitou roli v ekologii a chemii vod a zároveň určuje, zdali je vodní zdroj vhodný pro využití lidmi (Brezonik et al. 2015). CDOM je barevná složka DOM, která ovlivňuje optické vlastnosti vody v UV a viditelné části spektra. Jelikož koncentrace DOM není přímo zachytitelná senzory, využívá se vlastností CDOM, kterou je možné pomocí DPZ zaznamenat (Tehrani et al. 2013).

Vlnové délky, jenž CDOM absorbuje, se překrývají s těmi u chlorofylu-a. CDOM může absorbovat přes 50 % záření v 443 nm, což je hodnota, kde je u vod 1. typu běžně měřená koncentrace chlorofylu-a. Vyšší koncentrace CDOM ovlivňuje odrazivost v modré a zelené části spektra a jeho schopnost absorpce se exponenciálně zvyšuje se snižující se vlnovou délkou (Gholizadeh et al. 2016). Pro odhad koncentrace CDOM se využívá několika různých poměrů pásem ve viditelném spektru. Většina z nich je založená na poměru zelené/červené pásmo, protože množství záření v modré části spektra je silně pohlcováno CDOM nebo je ovlivňováno množstvím TSM či chlorofylu (Al-Kharusi et al. 2020).

3.4.3 Turbidita a množství ponořených sedimentů (TSM)

Turbidita je optická vlastnost vody, díky které je dopadající světlo rozptýleno či pohlceno. Zjednodušeně ji můžeme chápat jako opak průzračnosti vody. Jedná se o důležitou vlastnost, jelikož ovlivňuje množství prostupujícího slunečního záření a tím i schopnost fotosyntézy a růstu řas a planktonu (biologickou produkci). Zároveň může mít negativní vliv na lidské zdraví a je tak důležitým parametrem při posuzování znečištění vodní plochy (Petus et al. 2010). Úroveň turbidity je zcela závislá na množství ponořených částic (Total Suspended Matter neboli TSM) (Gholizadeh et al. 2016). Čím více jich voda obsahuje, tím hůře jí proniká světlo a turbidita je vyšší.

U konstituentů TSM je hodně faktorů, které mohou ovlivňovat optické vlastnosti vodního tělesa, např. velikost, tvar nebo barva jednotlivých částic. To může měnit odrazivost a barvu hladiny, kvůli čemuž nejsou obecné vlastnosti TSM lineární. Ve studii (Tang et al. 2013) se v kombinaci s měřením v terénu podařilo prokázat, že je pro pozorování TSM vhodný poměr zelené/modré pásmo, pokud jsou koncentrace TSM nižší. Ve vyšších koncentracích je vhodnější použít poměr červené/zelené pásmo.

4. Charakteristika území

4.1 Tibetská náhorní plošina

Tibetská náhorní plošina má průměrnou nadmořskou výšku přes 4000 m a rozlohu zhruba 2,5 milionů km², díky čemuž se zásadně podílí na regionálním i globálním klimatu (Wu et al. 2007). Hraje důležitou roli ve tvorbě asijských monzunů a koloběhu vody a energie (Molnar et al. 2010). Rovněž má po Arktidě a Antarktidě největší množství ledové pokrývky na světě. Led a sníh odsud zásobují vodou přes 1,4 miliardy lidí v Asii a tisíce jezer zde dohromady zaujímají rozlohu přes 41 tisíc km² (Immerzeel et al. 2010). Jezera jsou významná nejen jako zdroj vody, ale i indikátory změny klimatu (Jiang et al. 2017).

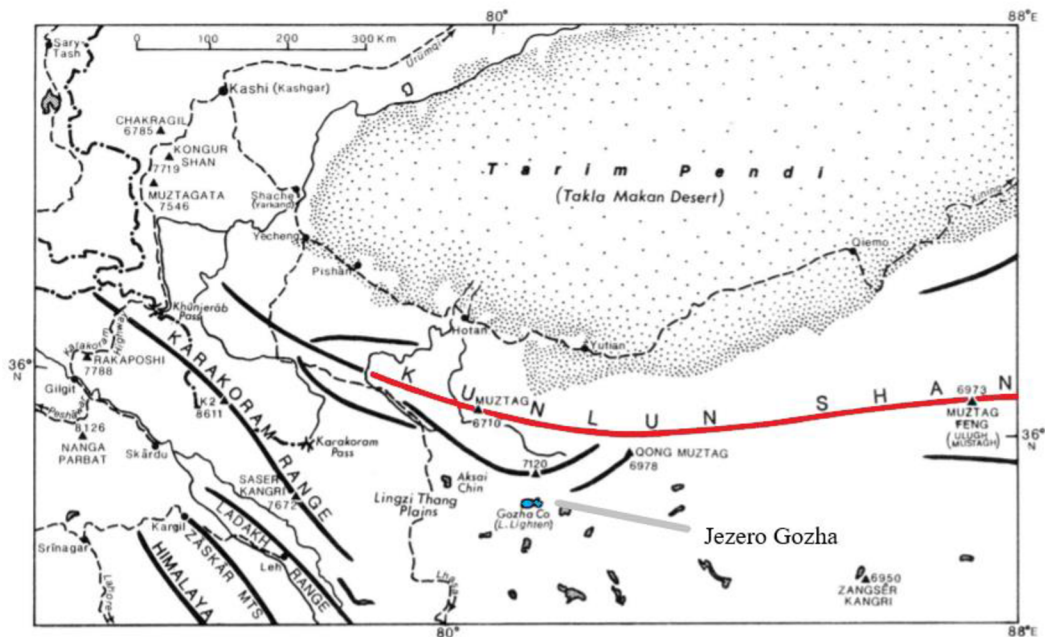
Hydrologický systém ve vysokých nadmořských výškách hraje důležitou roli v koloběhu vody pro celou náhorní plošinu. S rostoucí průměrnou teplotou vzduchu a se

změnami množství srážek a evaporace místní jezera prokazují značnou variabilitu ploch i teplot (Song et al. 2015). Ledovce, které po téměř celé náhorní plošině tají stále rychleji, dočasně zvyšují hladiny některých jezer, což způsobuje lokální povodně a ničení lučních ekosystémů. Dá se předpokládat, že zásob vody na náhorní plošině bude rapidně ubývat. To zapříčiní zmenšování plochy mokřadů a zrychlí desertifikaci (Zhang et al. 2011). Monitorovat změny v tloušťce všech ledovců na plošině by bylo nepraktické, místo toho lze však sledovat úroveň hladin a další vlastnosti místních jezer, které o těchto změnách vypovídají.

4.2 Pohoří Kunlun

Pohoří Kunlun se táhne přes jih střední Asie, s celkovou délkou okolo 2250 km. Jedná se o nejdelší a jeden z nejméně probádaných horských masivů na světě (Ward 1989). Nejvyšší hora celého pohoří se nazývá Muztag a je vysoká 7723 m. Nejvyšší hora západní části masivu, kde leží i jezero Gozha, je zvaná Keriya a dosahuje výšky 7120 m (Sinitsyn & Allan 2019).

Na západě začíná Kunlun v Tádžikistánu jako pohoří Pamír a přes sever Tibetské autonomní oblasti pokračuje až do čínské provincie Čching-chaj. Tvoří hranici mezi severozápadní částí Tibetské náhorní plošiny a jižní částí Tarimské pánve, velké bezodtoké oblasti na území čínské autonomní oblasti Sin-ťiang, kde leží poušť Taklamakan. Na většině míst šířka horského masivu nepřekračuje 200 km (Sinitsyn & Allan 2019). Jezero Gozha leží nedaleko hranice mezi Tibetem a Sin-ťiang.



Obrázek 2: Jezero Gozha (modře) ve vztahu k pohoří Kunlun (červeně). Převzato od Ward 1998.

4.3 Přírodní podmínky

Průměrné červencové teploty v oblasti kolem jezera Gozha oscilují okolo 10 °C, v lednu teplota klesá často i pod -35 °C (Sinitsyn & Allan 2019). Hluboký mráz je běžný téměř každou noc, průměrné teploty zůstávají pod bodem mrazu po dobu 9-10 měsíců v roce. Průměrná roční teplota v oblasti okolo jezera Gozha mezi lety 1979 a 2013 činí -12,9 °C (Qiao et al. 2017). Z toho důvodu je na většině území permafrost. Častý je rovněž silný a vytrvalý vítr. Pohoří Kunlun je téměř dokonale izolované od vlivů monzunů z Indického a Tichého oceánu, panuje zde výhradně kontinentální klima s velkými denními výkyvy teplot (McGinley 2014).

Roční úhrn srážek se různí dle jednotlivých oblastí; na nejsušší místa může spadnout 50 mm (především ve střední části pohoří Kunlun), na ty nejvlhčí zhruba 460 mm (Sinitsyn & Allan 2019). Průměrná hodnota v oblasti okolo jezera Gozha mezi lety 1979 a 2013 je 90 mm (Qiao et al. 2017). Jiná publikace však uvádí průměrné hodnoty pro celou oblast podél severozápadního okraje Tibetské náhorní plošiny pouze 20-50 mm

ročně (McGinley 2014). Veškeré spadlé srážky jsou ve formě sněhu, který rychle taje vlivem intenzivního slunečního záření.

Pláně pod vrcholky hor mají nadmořskou výšku vyšší než 4900 m, samotné jezero je v nadmořské výšce 5100-5200 m. Půdy zde bývají slané, mají jednoduchou strukturu a většinou jsou stepního či pouštního charakteru, množství obsažené organické hmoty je nízké. Velké denní výkyvy teplot mají za následek tvorbu značného množství zvětralin. Eolickými procesy tak vznikly velké, po krajině roztroušené písečné duny. V níže položených oblastech jsou běžné mokřady a slatiny (Sinitsyn & Allan 2019).

Vegetační pokryv je zde řídký, na většině území je to méně než 8 %, místy pak 1-2 %. Nalezneme zde společenství vysoko ležících chladných pouští s dominantní rostlinou *Ceratoides compacta* (Bělostník) z čeledi *Amaranthaceae* (McGinley 2014). Lesy zde nejsou vůbec. Velmi nízké teploty, velmi krátká nebo žádná vegetační sezóna, extrémní sucho, silný vítr a pusté, kamenité a slané půdy jsou typickými ekologickými podmínkami vysoko ležících chladných pouští (McGinley 2014).

4.4 Dlouhodobý vývoj teploty a srážek

Tibetská náhorní plošina je ekologicky křehká oblast, která je citlivá na změny klimatu. Za několik posledních desetiletí zde došlo k rychlému oteplení a zvýšení množství srážek.

Mezi lety 1979-2013 rostl poměr lokálního příspěvku srážek rychlostí 1,1-1,4 % za deset let. Vlhkost přidaná k ročnímu úhrnu srážek pochází z 69 % z pevniny v této oblasti (především ze západní a jižní části) a z 21 % z oceánu. Dva největší zdroje vlhkosti jsou indický letní monzun a východoasijský letní monzun, které zdejší tvorbu srážek výrazně podporují (Zhang et al. 2017).

Růst průměrné teploty byl nejvýraznější mezi lety 1980-2014. Roční průměr v roce 2014 byl o 1,27 °C vyšší než mezi lety 1960-1990. Rychlost růstu průměrné roční teploty na Tibetské náhorní plošině byla mezi lety 1960-2014 zhruba 0,03 °C za rok, což je o trochu více než v celé Asii a 2,2krát více než je globální průměr (Zhong et al. 2019).

Rychlost oteplování je zároveň v oblastech vyšších než 4000 m n.m. 1 - 2krát vyšší než v níže položených oblastech. Na území plošiny však bylo zaznamenáno, že trend oteplování zpomaluje (Zhong et al. 2019).

4.5 Dlouhodobý vývoj vegetace

Vzhledem k rostoucí teplotě i množství srážek za několik posledních desetiletí dochází i ke změnám ve vegetačním pokryvu. Vegetace je úzce spojena s pedosférou, atmosférou a hydrosférou a do jisté míry tak slouží jako indikátor při studiu změny klimatu (Zhong et al. 2019).

Z dat nasnímaných mezi lety 1999-2014 bylo usouzeno, že na zhruba 80 % území Tibetské náhorní plošiny došlo ke zvýšení hustoty vegetačního pokryvu (Zhong et al. 2019). Zároveň je však nutno zmínit, že v některých oblastech probíhají i několik desítek let programy na obnovu lesů. Je pravděpodobné, že tyto programy přispěly ke zvýšení hustoty vegetace především v jihovýchodní části plošiny. Nejzásadnější nárůst rozlohy jednotlivých krajinných pokryvů byl v západní a severovýchodní části zaznamenán u luk a holé půdy, což bylo zapříčiněno přírodními faktory (Zhong et al. 2019).

Pro celou Tibetskou náhorní plošinu platí, že největší nárůst byl mezi lety 1999-2014 zaznamenán u luk (40 %), pouštních luk (22 %) a smíšených lesů (10 %). Zhruba 7,63 % území vykazuje významný růst, pouze 0,03 % vykazuje významný úbytek. Většina území pokrytého vegetací (89,07 %) vykazuje nevýznamný růst a 3,27 % pak nevýznamný úbytek. V severní a východní části plošiny byla změna nejvýraznější v létě, v jihovýchodní části v zimě, na jaře a v létě (Zhong et al. 2019).

4.6 Jezera na Tibetské náhorní plošině

4.6.1 Jezero Gozha



Obrázek 3: Jezero Gozha. Zdroj: earth.google.com (snímky: Landsat/Copernicus).

Jezero Gozha, někdy uváděno jako Gozha Co či Lake Lighten (Ward 1989), leží v severozápadní části Tibetské náhorní plošiny, na území Tibetské autonomní oblasti. Nachází se v prefektuře Ngari, v okrese Rutog. Jeho přesné geografické souřadnice jsou $35^{\circ} 1' N$, $81^{\circ} 5' E$. Google Earth uvádí jeho nadmořskou výšku okolo 5100 metrů, v jiném zdroji 5200 metrů (Ward 1989).

Leží v podhůří západní části pohoří Kunlun, kde je vysoká koncentrace ledovců polárního typu (Qiao et al. 2017). Z jednoho z těchto ledovců, který najdeme ne více než 30 kilometrů severně od jezera Gozha, vyvěrají dvě ledovcové řeky, jenž jezero zásobují vodou, a to z jeho severní a východní části. Další ledovcová řeka přitéká z východu.

Většina jezer nacházejících se v této oblasti je bezodtoká. Vodní plocha jezera Gozha zaujímá 248 km^2 . Jeho průměrná hloubka je 59 metrů, přičemž nejhlubší bod se nachází 150 metrů pod hladinou. Celkem je v něm uloženo přes 14 km^3 vody (Qiao et al. 2017). Kvůli nízkým celoročním teplotám byla jezera v tomto regionu mezi lety 2001

a 2010 kompletně pokrytá ledem 149 dní v roce a 209 dní částečně pokrytá ledem (Kropáček et al. 2013).

Okolí jezera Gozha je prakticky neobydlené, nejbližší město se zhruba 20 000 obyvateli se nazývá Shiquanhe a leží cca 200 km daleko. Tím pádem není jezero zásadně ovlivňováno lidskou činností, nýbrž výhradně klimatickými změnami (Qiao et al. 2017). Z toho důvodu nám může jeho zkoumání přinést hodnotné informace při snaze porozumět přírodním procesům a důsledkům jejich změn.

4.6.2 Vývoj během holocénu

Kolem jezer na Tibetské náhorní plošině často najdeme plážové hřebeny, jež byly vytvořeny vlnami v dobách, kdy tvořily břeh jezera. Jejich datováním jsme schopni zrekonstruovat historii výkyvů hladiny a environmentálních změn. Pokud kolísání hladiny nesouvisí s tektonickými ději, lze je často přiřadit ke změnám v přírodních podmínkách nebo ke klimatickým událostem (Rades et al. 2015).

Studie zaměřená na jezero Tangra Yum, které leží v jižní části Tibetské náhorní plošiny, uvádí, že jeho nejvyšší plážové hřebeny leží zhruba 140 m nad současnou hladinou. Došli k závěru, že během posledních zhruba 6400 let hladina jezera stabilně klesala (Rades et al. 2015). To přisuzují snižujícímu se množství srážek od doby raného holocénu, způsobeném nižší monzunovou aktivitou. Vliv tektonických dějů či tání ledovců se dle autorů zdá být pro toto období zanedbatelný. Hughes et. al (2014) se zároveň domnívá, že velké množství tibetských ledovců během holocénu vůbec neustupovalo ani nerostlo, což dále podporuje toto tvrzení.

4.6.3 Dynamika v období družicového snímání

V severovýchodní části Tibetské náhorní plošiny je většina jezer zásobována především vodou z tajících ledovců či sněhu, méně pak spadlými srážkami na vodní hladinu. Evaporace je zde hlavní způsob, jakým se voda dostává pryč. Množství srážek a evaporace jsou dva nejzásadnější přírodní faktory, které přímo ovlivňují výšku hladiny (Jiang et al. 2017).

Studie vydaná v roce 2017 pomocí družicového snímání zjistila, že 7 z 9 jezer v oblasti okolo jezera Gozha mezi lety 2003-2015 zvýšilo svou hladinu. Tři jezera s největším přírůstkem (Bangdag, Memar a Xianshui Hu) rostla mezi lety 2010-2015 rychlostí 0,7 m za rok. Hladina jezera Gozha společně s tou jezera Pelrap naopak klesala o 0,09 m ročně (Jiang et al. 2017).

Pro celou Tibetskou náhorní plošinu platí, že většina jezer svůj objem zvětšuje, nejvíce v severní a severozápadní části. Ve zmíněné studii to bylo prokázáno u 48 ze 70. To se přisuzuje většímu množství srážek a menší evaporaci. Zároveň se předpokládá, že roční kolísání hladin je obecně spjato s výkyvy srážek a evaporace (Song et al. 2015). Teplota úzce souvisí s rychlostí změny výšky hladiny, stejně jako nadmořská výška. To naznačuje, že mrznutí a tání permafrostu by mohlo tyto změny ovlivňovat (Jiang et al. 2017).

5. Metodika

5.1 Google Earth Engine (GEE)

Jako platforma pro zpracování satelitních snímků byl zvolen Google Earth Engine (GEE). Jedná se o poměrně mladou službu, která, jak pro ukládání a načítání dat, tak pro samotné výpočty, využívá cloudu. Z toho pro uživatele plyne několik zásadních výhod: není limitován ukládáním dat, dostupností dat ani výpočetní kapacitou svého přístroje (Bengtsson et al. 2021).

V prostředí samotné aplikace lze procházet a získávat datasey, aplikovat metody, zobrazovat a analyzovat datové výstupy. „Application programming interface“ (prostředí aplikace pro programování) nám umožňuje používat algoritmy (psát kód) a jednoduše tak zkoumat satelitní snímky (Bengtsson et al. 2021). Další výhodou platformy je možnost analyzovat více snímků najednou se stejným algoritmem, což je zvláště vhodné pro tvorbu časových řad. GEE podporuje programovací jazyky JavaScript a Python. Kód použit v této práci byl psán jazykem JavaScript.

5.2 Shrnutí postupu

Bude sestrojen polygon jezera Gozha, na němž bude pomocí zařízení MODIS a VIIRS zkoumána přítomnost Chlorofylu-a, CDOM a TSM ve vybraném letním měsíci pro období 2001-2021, což dohromady vyústí v 6 skriptů s grafem proměny v čase jako grafickým výstupem (každý skript se soustředí na jednu charakteristiku a pracuje s daty z jednoho senzoru). Dále bude vytvořen polygon pro oblast okolo jezera a za použití produktů ERA5-Land, GPM v6 a MODIS Terra Vegetation Indices bude v tomto pořadí zkoumána průměrná roční teplota, roční úhrn srážek a NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) ve vybraném letním měsíci pro období 2001-2021. Grafickým výstupem budou 3 grafy proměny jednotlivých charakteristik v čase.

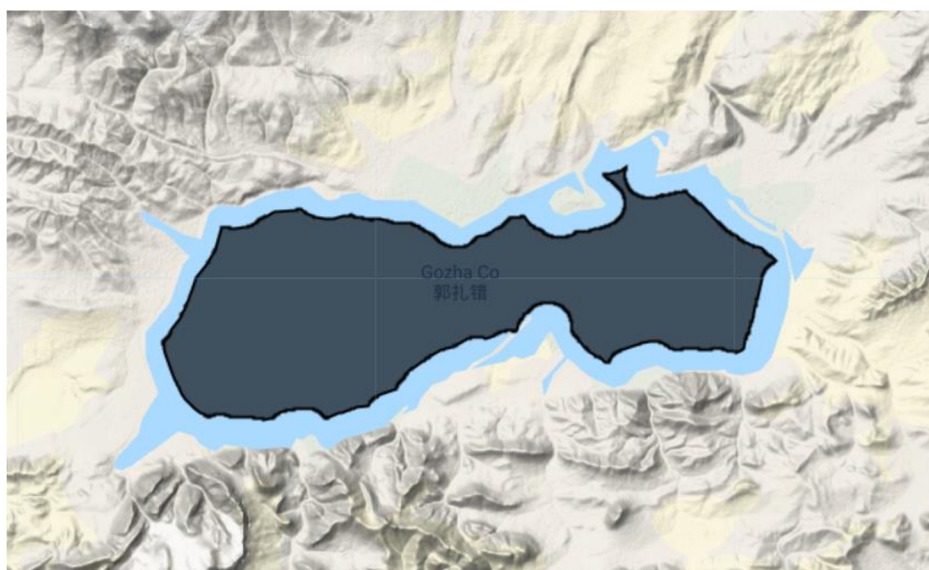
V následující kapitole bude dopodrobna popsán postup tvorby skriptu v GEE pro první senzor a první zkoumanou charakteristiku. Další charakteristiky, jak pro samotné jezero, tak pro jeho povodí, budou popsány s odkazy na tuto kapitolu pro zestručnění textu. Pokud u popisu dalších produktů nebude některý z kroků uveden, znamená to, že je totožný s prvním skriptem.

5.3 Zpracování dat o jezeře Gozha

5.3.1 MODIS

Jako první krok je zapotřebí vytvořit polygon, ve kterém bude probíhat analýza pixelů, v tomto případě vodní hladiny. Vzhledem k tomu, že většina zamýšlených produktů má prostorové rozlišení 1 km, je nezbytné ošetřit snímky tak, aby do zkoumaných pixelů nezasahovaly břehy jezera a ovlivňovaly tak výsledky. Z toho důvodu byl sestrojen polygon jezera Gozha, který byl od břehů zmenšen o 1 km.

Z volně dostupné databáze HydroLAKES spravované organizací World Wildlife Fund byly staženy polygony s plochami jezer pro celou planetu (Messenger et al. 2016). Z nich byl v programu ArcGIS izolován polygon jezera Gozha a pomocí nástroje „Buffer“ byla odebrána po okrajích jezera zóna o šířce 1 km. Výsledný polygon byl pod jménem „StudyArea“ nahrán do prostředí GEE a uložen do skriptu.



Obrázek 4: Polygon StudyArea na jezeře Gozha. Zdroj: code.earthengine.google.com (data: Messenger et al. 2016).

Do datasetu byl nahrán následující produkt: *MODOCGA.006 Terra Ocean Reflectance Daily Global 1km* (Vermote & Wolfe 2015). Obsahuje pásma 8-16 senzoru MODIS s prostorovým rozlišením 1 km a denním časovým rozlišením. V názvu stojí „odrazivost oceánu“, protože pásma obsažené v tomto produktu se většinou používají pro studium oceánů, snímky však obsahují celistvý pohled na zemský povrch, včetně souší. Jedná se o data 2. úrovně, což znamená, že snímky jsou po atmosférické korekci. Ta má za úkol odstranit vliv aerosolů, plynů a Rayleighova rozptylu. Výsledkem je tzv. „surface reflectance“ produkt (odrazivost zemského povrchu), jež by měl být věrnou reprezentací toho, co by senzor zachytil za předpokladu nulových vlivů atmosféry (Roger et al. 2015).

Díky dlouhému období snímání byla možnost sestavit rozsáhlou časovou řadu. Snímky byly vyfiltrovány pro časové okno 01.01.2001 – 31.12.2021 a omezeny na polygon jezera (StudyArea). V produktu je rovněž obsaženo pásmo pro vyhodnocení kvality („QC_b8_15_1km“), které nese množství informací o jednotlivých pixelech ve formě bitů, např. o přítomnosti mraků nebo obecné kvalitě snímku. Na základě tohoto skóre jsou do produktu zahrnuty pouze ty nejkvalitnější snímky. Manuálně byla dále sestrojena maska (cloudsBitMask), pomocí které byl ze snímků odstraněn vliv mraků, které by jinak ztěžovaly či znemožňovaly práci s daty.

Dále byla data pomocí funkce `stepList` seřazena dle roku a byla vytvořena kolekce, ve které byly snímky z každého roku vyfiltrovány pro požadovaný měsíc. Vzhledem k tomu, že jezero Gozha může být přes 200 dní v roce zamrzlé, je nezbytné zvolit takové časové okno, kde bude nejnižší pravděpodobnost ledové pokrývky. Z analýzy průměrné teploty jednotlivých letních měsíců v časovém okně 2001–2021 za pomoci produktu ERA5-Land bylo vyčteno, že měsíc s nejvyšší průměrnou teplotou pro tuto oblast je srpen, který byl tedy zvolen jako zkoumané časové okno. Zároveň je žádoucí, aby bylo sledované období v každém roce úzce vymezené, což do jisté míry omezí sezónní změny na jezeře.

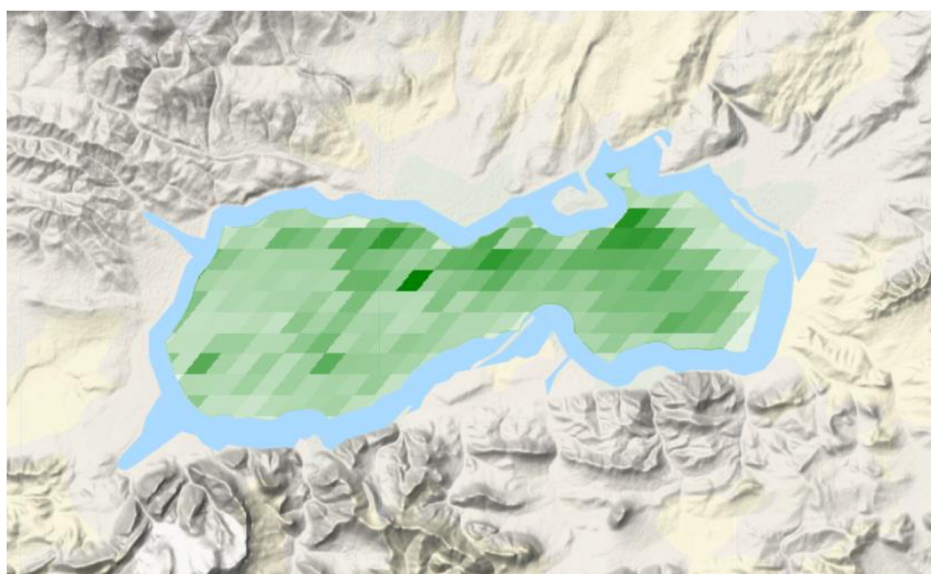
Pro srpen každého roku je díky vysoké frekvenci přeletů načteno až 30 snímků. Pro další omezení vlivu sezónních fluktuací či zbytkových vlivů mraků jsou snímky pomocí funkce „median“ sloučeny do jediné vrstvy. Pokud by ve snímcích byly mraky neošetřené bitovou maskou, hodnota těchto pixelů by se zásadně lišila od těch s informací o povrchu. Vzhledem k tomu, že medián není ovlivňován velkými výkyvy hodnot, je jeho použití oproti průměru vhodnější. Pro každý pixel v kompozitním obrazu je tak zvolena střední hodnota ze všech 30 přeletů, čímž vzniká ucelenější informace o stavu zkoumané plochy.

Obsah Chlorofylu-a

Analýza optických vlastností vody je prováděna aplikací indexů na snímky, v tomto případě jednoduchých poměrů spektrálních pásem. Dle Moses et al. (2009) a Gitelson et al. (2008) je pro zkoumání obsahu chlorofylu ve vnitrozemských vodách 2. typu ideální použít poměr červené/infračervené pásmo. Po vzoru těchto autorů byl zvolen poměr pásem B13/B15 (667 nm/748 nm) (uvedené vlnové délky jsou střední snímané hodnoty pásem).

Ze snímků byla načtena pásma „sur_refl_b13“ a „sur_refl_b15“ a vytvořena proměnná „chl“, která se sestává z jednoduchého podílu B13/B15. Tato proměnná byla následně přidána do kompozitního obrazu jako nové pásmo se jménem „CHL“. Nově vzniklá kolekce „chlCollection“ nyní obsahuje snímky pro každý rok se zvoleným pásmem „CHL“, připraveným k analýze. Pro rok 2011 se vyskytl technický problém v nahrávání dat, proto byl z analýzy odebrán.

Pro vizualizaci v prostředí GEE byl vytvořen parametr „chlParams“, který vymezuje zobrazovanou škálu hodnot a jim odpovídající barvy pixelů. Každý rok byl přidán jako samostatná mapová vrstva pro vizuální posouzení. Pro přípravu koncového výstupu byl z kolekce „chlCollection“ sestrojen časový graf, který z mediánu všech pixelů pásma „CHL“ pro polygon StudyArea každého roku vytvořil časovou řadu pro roky 2001-2021. Data grafu byla stažena ve formátu CSV a následně zpracována v programu Microsoft Excel do finální podoby.



Obrázek 5: Vizualizace pásma CHL pro rok 2009. Zdroj: code.earthengine.google.com (data: Vermote & Wolfe 2015).

Obsah CDOM

Postup při zkoumání barevné rozpuštěné organické hmoty (CDOM) byl z velké části stejný jako u analýzy chlorofylu, liší se pouze v použitých pásmech a parametru „cdomParams“ pro vizualizaci dat. Po vzoru Al-Kharusi et al. (2020) byl aplikován poměr pásem B12/B13 (549 nm/667 nm). Data byly rovněž vizualizovány v prostředí GEE (s parametrem „cdomParams“ přizpůsobeným výsledným hodnotám) a finální graf proměny hodnot pásma „CDOM“ v čase byl zpracován v Microsoft Excel.

Obsah TSM

Po vzoru autorů Feng et al. (2014) byl pro zkoumání množství ponořených částic a z něj vycházející turbidity použit poměr pásem B2/B1 (858 nm /645 nm). Vzhledem k tomu, že tato pásma však nejsou obsažena v produktu *MOD0CGA.006 Terra Ocean Reflectance Daily Global 1km*, bylo zapotřebí načíst jiné snímky ze senzoru MODIS. Do skriptu byl načten produkt *MOD09A1.006 Terra Surface Reflectance 8-Day Global 500m* (Vermote 2015). Prostorové rozlišení pásem je 500 m a snímky jsou předzpracovány z původních 30 přeletů na časové rozlišení 8 dní. Z každých 8 přeletů je zvolen nejkvalitnější snímek na základě několika parametrů, včetně nejmenšího množství oblačnosti a nejmenšího vlivu aerosolů. Ostatní specifikace produktu jsou stejné jako u toho předchozího. Samotný skript byl následně zpracován stejně jako u předešlých charakteristik, s výjimkou použitých pásem a parametru „tsmParams“.

5.3.2 VIIRS

V prostředí GEE byl načten tento produkt: *VNP09GA: VIIRS Surface Reflectance Daily 500m and 1km* (Vermote et al. 2016). Obsahuje 14 pásem senzoru VIIRS v prostorových rozlišeních 500 m a 1 km a s denním časovým rozlišením. Tato prostorová rozlišení byla získána převzorkováním původních rozlišení 375 m a 750 m. Stejně jako u předchozího senzoru se jedná o „surface reflectance“ produkt, díky čemuž máme možnost analyzovat takovou spektrální odrazivost, která by byla změřena bezprostředně nad povrchem.

Nahraná data byla vyřízena pro časové okno 01.01.2012 – 31.12.2021 (kvůli dostupnosti dat) a oříznuta na polygon StudyArea. Obdobně jako u senzoru MODIS byly pomocí skóre v pásmu „QF1“ zvoleny ty nejkvalitnější snímky a následně manuálně vymaskovány mraky (cloudsBitMask). Další průběh ve tvorbě skriptu je totožný s předchozí kapitolou.

Obsah Chlorofylu-a, CDOM a TSM

Spektrální pásma jsou pro každé zařízení specifické jak svým rozsahem a střední vlnovou délkou, tak svým označením. Je tedy nezbytné do indexů zahrnout taková pásma,

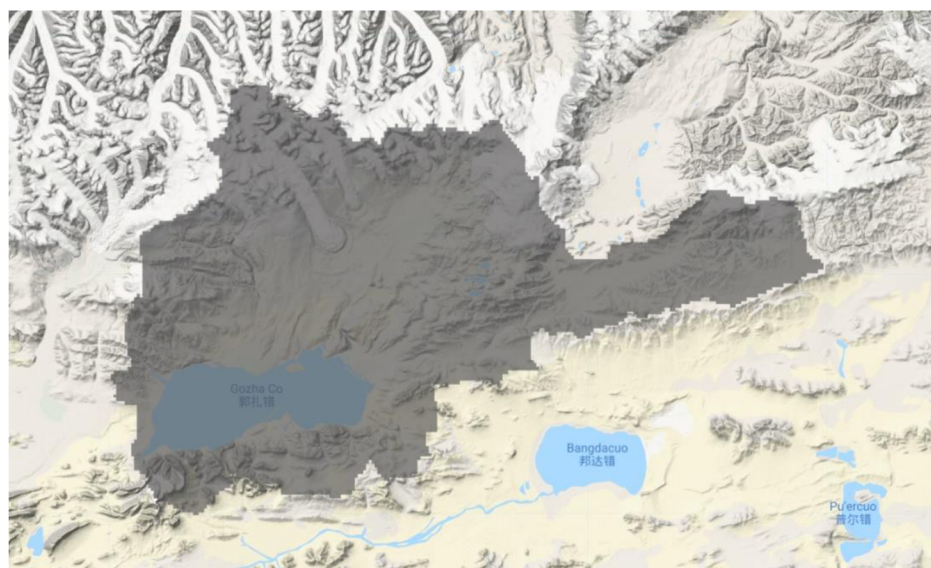
kteřá nejvíce odpovídají požadovaným hodnotám. U senzoru MODIS, který má pro zkoumání vody nejvhodnější pásma, byl pro analýzu chlorofylu použit poměr B13/B15 (667 nm/748 nm), čemuž u zařízení VIIRS nejvíce odpovídá poměr M5/M7 (672 nm/866 nm). Během zkoumání CDOM byl u MODIS aplikován index B12/B13 (549 nm/667 nm), u VIIRS pak M4/M5 (555 nm/672 nm). Odhad TSM byl u MODIS proveden přes poměr B2/B1 (858 nm /645 nm), u VIIRS M7/M5 (866 nm/672 nm). Vzhledem k tomu, že rozsahy pásem a jejich střední hodnoty se v některých případech liší, je důležité brát v potaz, že intenzity záření zachyceny každým senzorem nebudou totožná. Stále se však jedná o vlnové délky, které mají vypovídající hodnotu o daných charakteristikách. Finální grafické výstupy byly zpracovány stejným způsobem jako v předchozí kapitole.

5.4 Zpracování dat o povodí jezera Gozha

5.4.1 ERA5-Land

Dále je cílem práce vlastnosti vodní plochy porovnat se změnou přírodních podmínek v okolní oblasti. Jako vhodné území bylo zvoleno povodí jezera Gozha, jelikož je s ním hydrologicky úzce svázáno. Veškeré spadlé srážky či roztátý led a snůh stečou do jezera, čímž do něj splavují i sedimenty či organickou hmotu. Změny v přírodních podmínkách, které se odehrávají na tomto území, tak mají na stav jezera největší vliv.

Z volně přístupné databáze HydroSHEDS spravované organizací World Wildlife Fund byly staženy polygony povodí pro celou Asii (Lehner et al. 2006). Soubor byl načten do GEE a byl z něj izolován polygon povodí jezera Gozha, který byl pod jménem „GozhaBasin“ uložen do skriptu.



Obrázek 6: Polygon povodí jezera Gozha (GozhaBasin). Zdroj: code.earthengine.google.com (data: Lehner et al. 2006).

Produkt *ERA5-Land Monthly Averaged – ECMWF Climate Reanalysis* (Muñoz Sabater 2019) obsahuje širokou škálu dat o změnách na zemském povrchu až od roku 1981, s hrubým prostorovým rozlišením 9 km. Byl vytvořen opětovným přehráním informací o povrchu z analýzy ECMWF ERA5. Tato analýza kombinuje modelová data s pozorováními sbíranými po celém světě a vytváří tak celistvý globální dataset (Muñoz Sabater 2019). V produktu jsou k dispozici průměrné měsíční hodnoty veličin jako je teplota 2 metry nad povrchem, množství sněhové pokrývky nebo evaporace z holé půdy. V této práci bude použita informace o průměrné teplotě.

Po nahrání produktu do prostředí GEE byla data vyfiltrována pro časový rozsah 01.01.2001 – 31.12.2021 a omezena na polygon GozhaBasin. Zkoumané časové okno v rámci roku bylo ponecháno od 01.01. do 31.12. Důvod pro toto rozhodnutí je skutečnost, že teploty a množství spadlých srážek (analýza srážek bude zpracována v následující kapitole) obecně více kolísají v průběhu roku a jsou méně předpověditelné než např. vegetační indexy, které jsou jasně vázány na vegetační sezónu. Roční průměr teploty a roční úhrn srážek se tedy jeví jako více vypovídající veličina než stejné hodnoty pro jeden měsíc v roce. Průměrná roční teplota je rovněž hodnota, která je standardně udávána, proto bude výsledek snazší porovnat s výsledky jiných autorů.

Na rozdíl od samotných satelitních snímků jsou roční kompozitní vrstvy pro průměrnou teplotu vytvořeny příkazem „mean“, který pro každý pixel vypočítá průměrnou hodnotu ze všech snímků. Je to z toho důvodu, že produkt ERA5-Land má vyšší úroveň předzpracování než produkty „surface reflectance“ a dá se tak předpokládat, že neobsahuje výrazně odlišné hodnoty, které by vznikly např. přítomností mraků. Rovněž se jedná přímo o algoritmem spočítané hodnoty teploty, nikoliv o dále nezpracovanou intenzitu záření.

Z produktu je načteno pásmo „temperature_2m“, které obsahuje informaci o teplotě vzduchu 2 metry nad povrchem. Toto pásmo je následně zpracováno obdobně jako indexy v předchozích dvou kapitolách, tj. je vizualizováno v GEE pro jednotlivé roky jako samostatné vrstvy a je sestrojen graf jeho proměny v letech 2001–2021, který je do finální podoby doveden v programu Microsoft Excel. Původní jednotka teploty byla Kelvin (K), odečtením čísla 273,15 od hodnot na ose y byla převedena na stupeň Celsia (°C).

5.4.2 GPM

Vedena společně organizací NASA a japonskou organizací JAXA, *GPM: Global Precipitation Measurement* je mezinárodní mise poskytující informace o srážkách po celé planetě ze satelitních dat, s měřením probíhajícím každé 3 hodiny. Do GEE byl nahrán produkt se jménem *GPM: Monthly Global Precipitation Measurement (GPM) v6* (Huffman et al. 2019) s prostorovým rozlišením 9 km. Za použití algoritmu Integrated Multi-satellite Retrievals (IMERG) jsou získávána kombinovaná data o srážkách ze všech 10 dostupných senzorů v konstelaci GPM (Guoqiang et al. 2015). Výsledným produktem jsou měsíční průměrné hodnoty srážek.

Data byla vyfiltrována pro časový rozsah 01.01.2001–31.12.2021 a omezena na polygon povodí jezera Gozha (GozhaBasin). S odkazem na předchozí kapitolu bylo zkoumané časové okno ponecháno na 01.01.-31.12. Měsíční hodnoty byly sloučeny do ročních kompozitních snímků pomocí funkce „sum“, jež sčítá hodnoty pixelů. Důvodem byla snadnější interpretace a porovnání s výsledky jiných autorů – standardně se tato veličina uvádí jako roční úhrn srážek, nikoliv měsíční průměr. Finální graf byl sestrojen

stejným způsobem jako v předešlých skriptech. Jelikož byly hodnoty grafu na ose y v jednotce mm za hodinu a původní sčítaná data byly měsíční průměry, vynásobením těchto hodnot počtem hodin v měsíci (730,5) byly získány sumy ročních srážkových úhrnů v mm.

5.4.3 MODIS Terra Vegetation Indices

MOD13A1.006 Terra Vegetation Indices 16-Day Global 500m (Didan 2015) je produkt vycházející ze snímků senzoru MODIS, který poskytuje informace o dvou vegetačních indexech (NDVI a EVI) s prostorovým rozlišením 500 m a časovým rozlišením 16 dní. Snímky v produktu jsou agregovány ze všech 16 přeletů a dosazovány na základě maximální kvality. Jsou po atmosférické korekci s aplikovanými maskami pro mraky a stíny mraků, aerosoly a vodní plochy. Jelikož je místo, kde bude v této práci zkoumáno množství vegetace, stepního až pouštního charakteru, bude použit vegetační index NDVI. EVI je vhodné v případě analýzy oblasti s hustým vegetačním pokryvem (Son et al. 2014). NDVI je jednoduchý index využívající blízkého infračerveného (NIR) a červeného spektrálního pásma (Didan 2015) dle následujícího vztahu:

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{Čer}}{\text{NIR} + \text{Čer}}$$

Data byla vyfiltrována pro časový rozsah 01.01.2001 – 31.12.2021 a omezena na polygon GozhaBasin. Byla seřazena dle roku a dále vytržena pouze pro měsíc srpen, protože je pro tuto charakteristiku vhodné, aby bylo sledované časové okno stejné jako u analýzy vodní plochy (viz kapitola 5.4.1). Rovněž se dá předpokládat, že v podmínkách chladných, vysoko položených pouští bude vegetace v této době aktivní, z důvodu nejvyšší průměrné roční teploty a dostatku slunečního záření. Vrchol vegetační sezóny je na Tibetské náhorní plošině mezi červencem a zářím (Ding et al. 2007), díky čemuž se pro analýzu NDVI jeví srpen jako nejvhodnější.

Pro tvorbu kompozitních snímků pro jednotlivé roky byl použit příkaz „median“, protože typ zkoumané charakteristiky je obdobný jako u vodní plochy (index užívající dvou spektrálních pásem). Finální graf je sestaven stejným způsobem jako v předchozích

skriptech. Jednotka na ose y je dle dokumentace produktu v poměru 10 000:1, pro získání hodnot typických pro NDVI (tzn. 0-1) tak byly hodnoty vyděleny číslem 10 000.

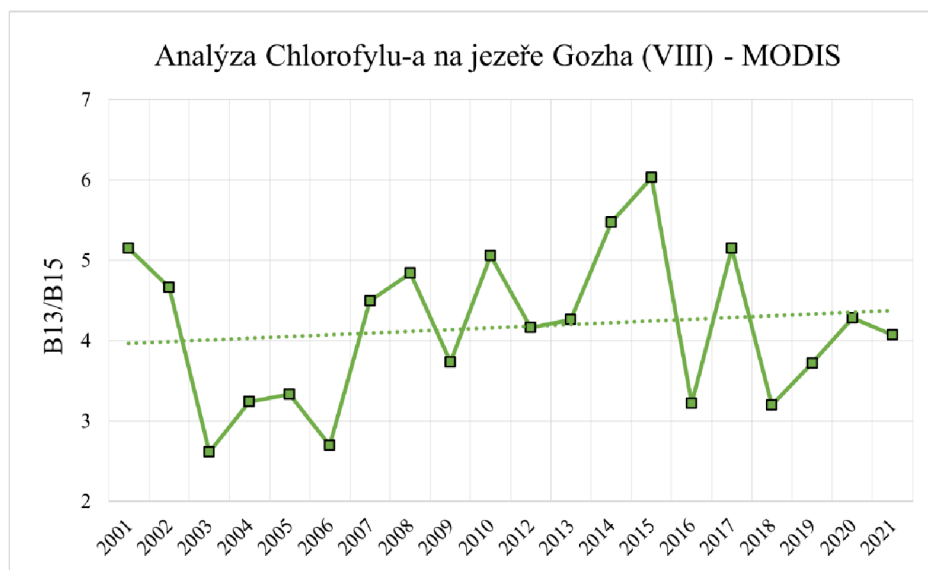
6. Výsledky

Koncovým výsledkem analýzy je 9 grafů popisujících proměny jednotlivých charakteristik v čase. U zkoumání plochy jezera senzorem MODIS a přírodních podmínek v povodí jezera je vymezeno časové rozmezí 2001-2021, u dat ze senzoru VIIRS pak z důvodu dostupnosti dat 2012-2021. Je důležité zmínit, že jednotky zobrazené na osách y pro senzory MODIS a VIIRS mají pouze relativní charakter, tj. nenesou exaktní informaci o koncentraci zkoumaných konstituentů, nýbrž pouze hodnotu poměru pásem. Pro zjištění přesných hodnot by bylo nezbytné porovnání výsledků s in-situ měřeními, jež nebylo pro tuto práci možné z praktických důvodů provést. U výstupů analýz přírodních podmínek v povodí jezera jsou na ose y uvedeny jednotky. Pro ověření možných vztahů mezi jednotlivými výstupy byly v programu RStudio provedeny korelační testy.

6.1 Proměna optických vlastností jezera Gozha

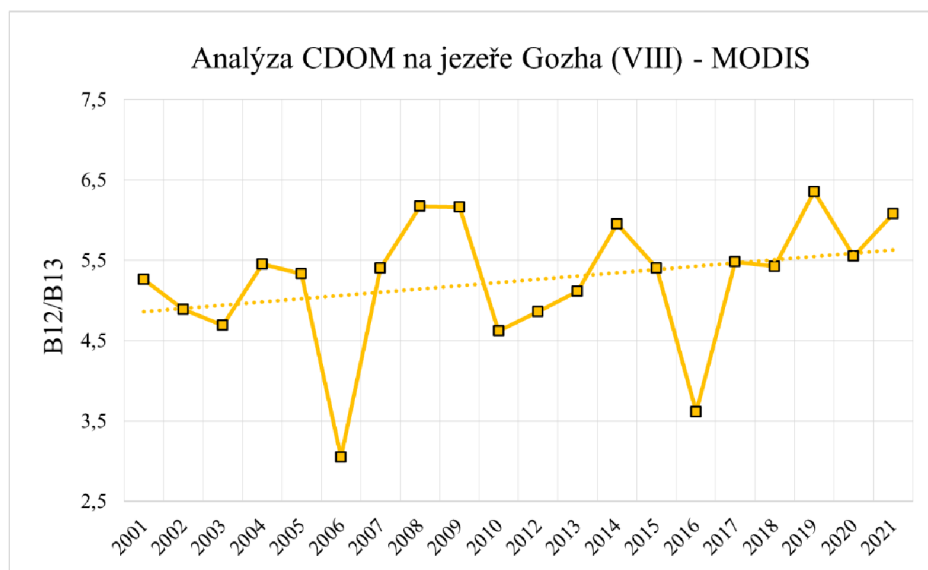
6.1.1 MODIS

Na ose y je hodnota poměru použitých pásem (např. B13/B15), na ose x roky 2001-2021 s výjimkou roku 2011, který z technických důvodů nebylo možné zpracovat. Černě ohraničené body znázorňují vypočítané hodnoty pro každý rok, tečkovaná čára pak naznačuje lineární trend dat.



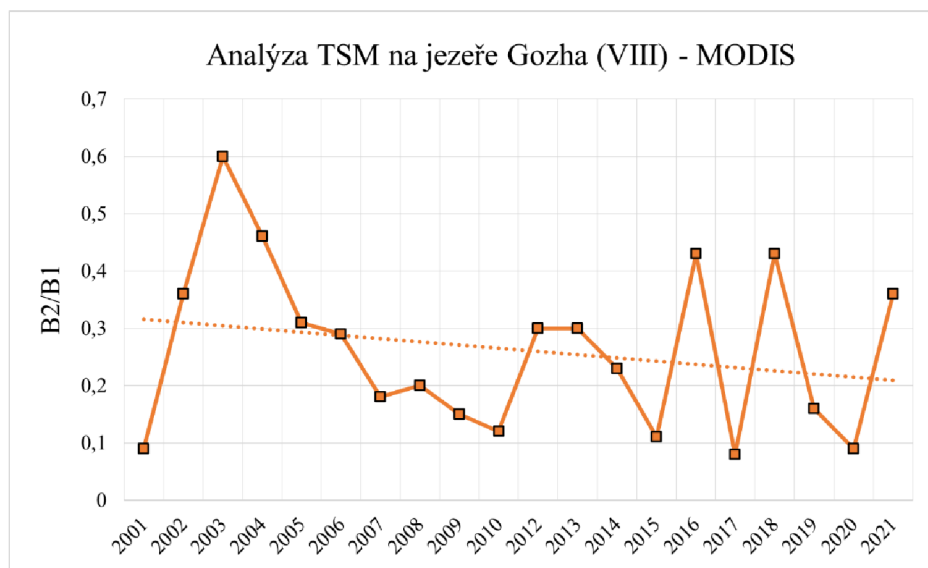
Obrázek 7: Graf vývoje srpnových koncentrací chlorofylu-a na polygonu StudyArea zpracovaný v Microsoft Excel. Data: Vermote & Wolfe 2015.

Obsah chlorofylu-a (Obrázek 7) značně kolísal. Nejnižší hodnoty byly naměřeny v letech 2003 a 2006. Od roku 2007 se obsah chlorofylu zvyšoval (s propady v letech 2009 a 2012) až do roku 2015, kdy byla naměřena vůbec nejvyšší hodnota. V letech 2016, 2018 a 2019 pak byly zaznamenány opět relativně nižší hodnoty, ke konci zobrazeného časového okna se hodnoty ustálily zhruba kolem průměru. Celkový trend naznačuje nepatrný růst koncentrace chlorofylu-a.



Obrázek 8: Graf vývoje srpnových koncentrací CDOM na polygonu StudyArea zpracovaný v Microsoft Excel. Data: Vermote & Wolfe 2015.

U grafu zabývajícího se obsahem CDOM (Obrázek 8) data rovněž silně kolísají. Na první pohled je zřejmé, že výrazné propady a zároveň nejnižší naměřené hodnoty jsou v letech 2006 a 2016. Nejvyšší hodnoty pak byly zaznamenány v letech 2008, 2009, 2019 a 2021. Přímka celkového trendu vykazuje poměrně výrazný nárůst koncentrace CDOM.



Obrázek 9: Graf vývoje srpnových koncentrací TSM na polygonu StudyArea zpracovaný v Microsoft Excel. Data: Vermote & Wolfe 2015.

Na první pohled je zřejmé, že data pro obsah TSM (Obrázek 9) vykazují záporný trend. Nejvyšší naměřená hodnota byla v roce 2003, odtud množství TSM obecně klesalo až do roku 2010. Ke konci zkoumaného období v letech 2015-2021 pak hodnoty značně kolísaly.

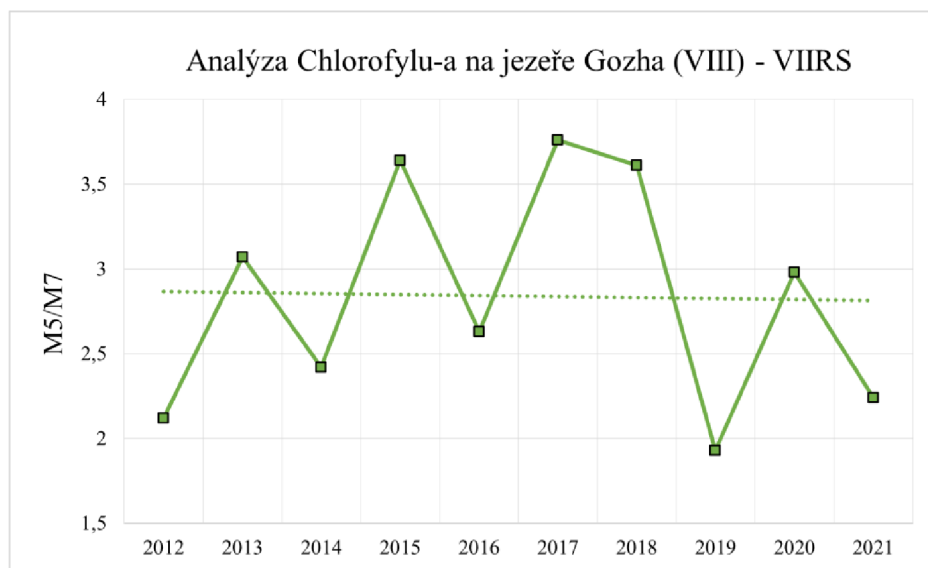
MODIS	Chlorofyl, CDOM	Chlorofyl, TSM	CDOM, TSM
p-hodnota	0,098	0,001	0,15
Korelační koeficient	0,381	-0,708	-0,334

Tabulka 1: Výsledky korelačních testů jednotlivých vlastností vodní plochy pro senzor MODIS. Zpracováno v programu RStudio, verze 4.1.2.

V programu RStudio byly provedeny jednoduché Pearsonovy korelační testy, ve kterých byla navzájem otestována data pro jednotlivé vlastnosti vodní plochy, se standardní hladinou významnosti 0,05. Z jejich výsledků pro senzor MODIS (Tabulka 1) je zřejmé, že statisticky významný vztah se prokázal pouze mezi obsahem chlorofylu a TSM ($p = 0,001$), s korelačním koeficientem -0,708.

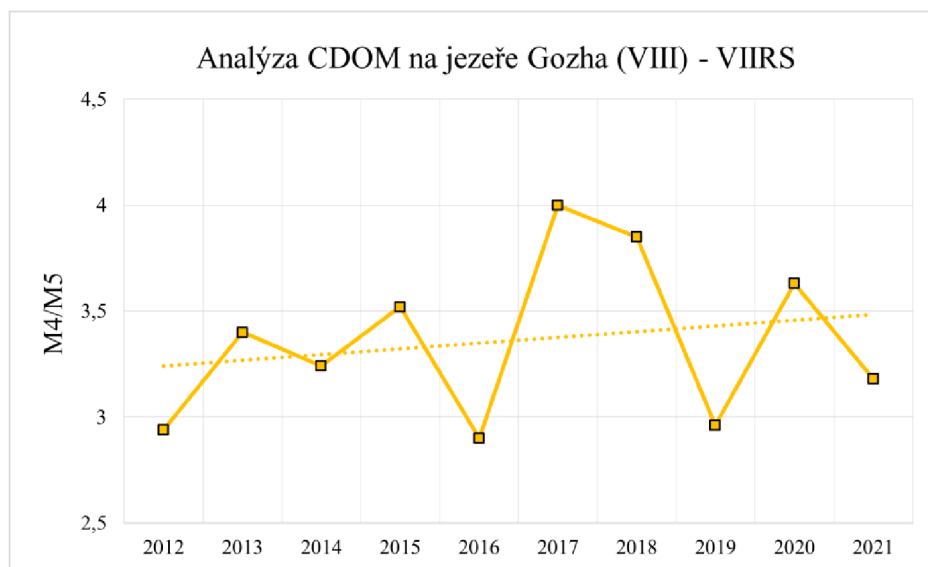
6.1.2 VIIRS

Na ose y je hodnota poměru použitých pásem (např. M5/M7), na ose x roky 2012-2021. Černě ohraničené body znázorňují vypočítané hodnoty pro každý rok, tečkovaná čára pak naznačuje lineární trend dat.



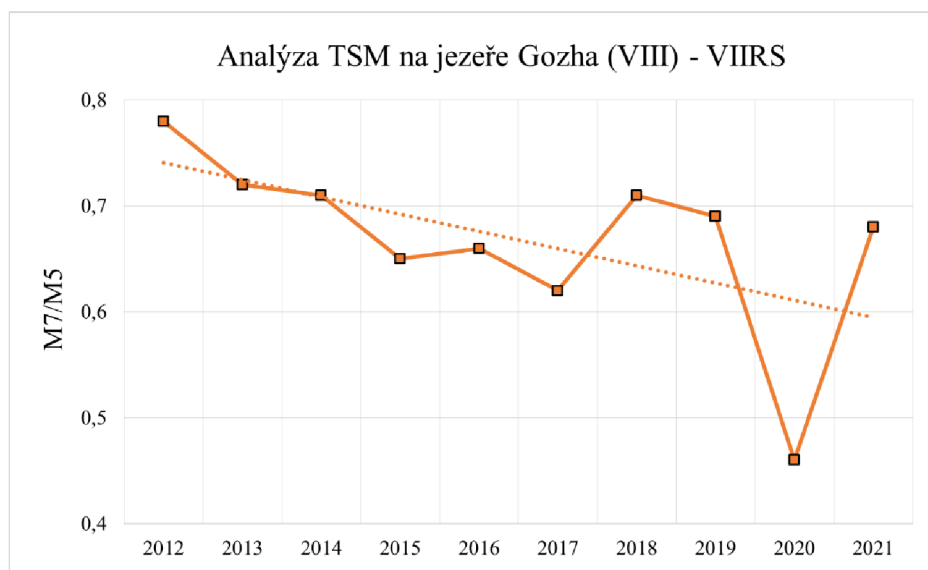
Obrázek 10: Graf vývoje srpnových koncentrací chlorofylu-a na polygonu StudyArea zpracovaný v Microsoft Excel. Data: Vermote et al. 2016.

Na grafu vývoji chlorofylu (Obrázek 10) jsou nejvyšší hodnoty v letech 2015 a 2017 a nižší v letech 2012 a 2019. Mezi lety 2012 a 2017 hodnoty obecně rostly, v období 2017-2019 pak nastal výrazný propad. Celková přímka lineárního trendu naznačuje velmi mírný pokles.



Obrázek 11: Graf vývoje srpnových koncentrací CDOM na polygonu StudyArea zpracovaný v Microsoft Excel. Data: Vermote et al. 2016.

Při prvním pohledu na graf vývoje koncentrace CDOM (Obrázek 11) jsou zřejmé nejnižší hodnoty v letech 2012, 2016 a 2019, nejvyšší pak v letech 2017 a 2018. Hodnoty relativně rovnoměrně kolísají, s nejstrmějším růstem mezi lety 2016 a 2017 a nejvýraznějším propadem mezi roky 2018 a 2019. Pro celou časovou osu vykazují data mírný nárůst.



Obrázek 12: Graf vývoje srpnových koncentrací TSM na polygonu StudyArea zpracovaný v Microsoft Excel. Data: Vermote et al. 2016.

Na grafu vývoji koncentrací TSM (Obrázek 12) naznačuje přímka trendu výrazný pokles. Hodnoty mezi lety 2012 a 2017 stabilně klesají, v roce 2018 pak hodnota stoupá. Mezi roky 2019 a 2020 dochází k velmi výraznému úpadu hodnot, v roce 2021 je naopak silný růst.

VIIRS, MODIS	Chlorofyl	CDOM	TSM
p-hodnota	0,368	0,551	0,101
Korelační koeficient	0,32	0,215	0,548

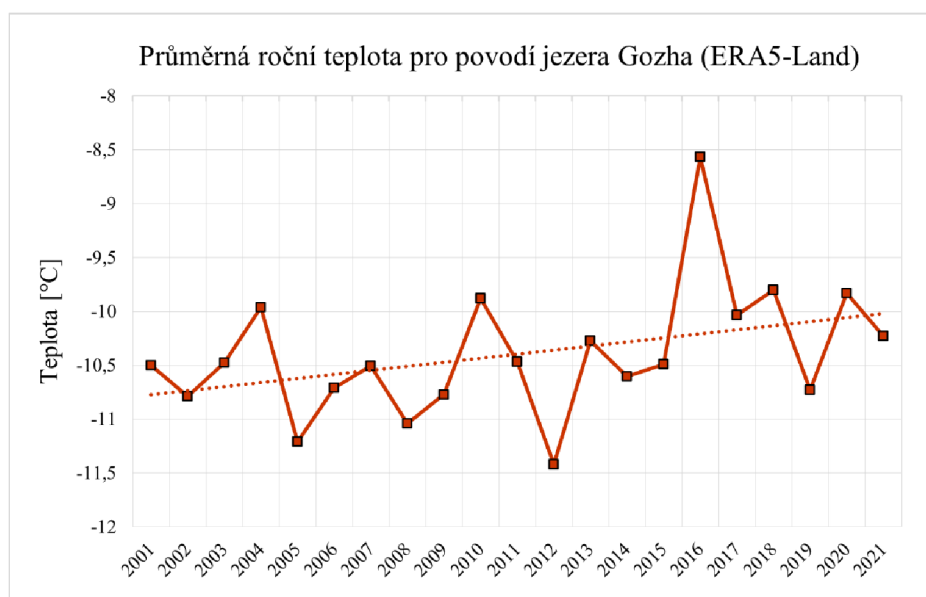
Tabulka 2: Výsledky korelačních testů vlastností vodní plochy mezi senzory MODIS a VIIRS. Zpracováno v programu RStudio, verze 4.1.2.

Pro otestování vztahu mezi daty ze senzorů MODIS a VIIRS (Tabulka 2) byla data u MODIS upravena na stejný časový rozsah, jako mají data VIIRS, tzn. byly testovány pouze roky 2012-2021. Nepodařilo se mezi nimi prokázat statisticky významný vztah ($p > 0,05$). Za zmínku stojí vysoká absolutní hodnota korelačního koeficientu parametru TSM, a to 0,548 ($p = 0,101$).

6.2 Proměna přírodních podmínek v povodí jezera Gozha

Na osách y jsou hodnoty měřených veličin s jednotkami, na ose x roky 2001-2021. Černě ohraničené body znázorňují hodnoty pro každý rok, tečkovaná čára pak naznačuje lineární trend dat.

6.2.1 ERA5-Land

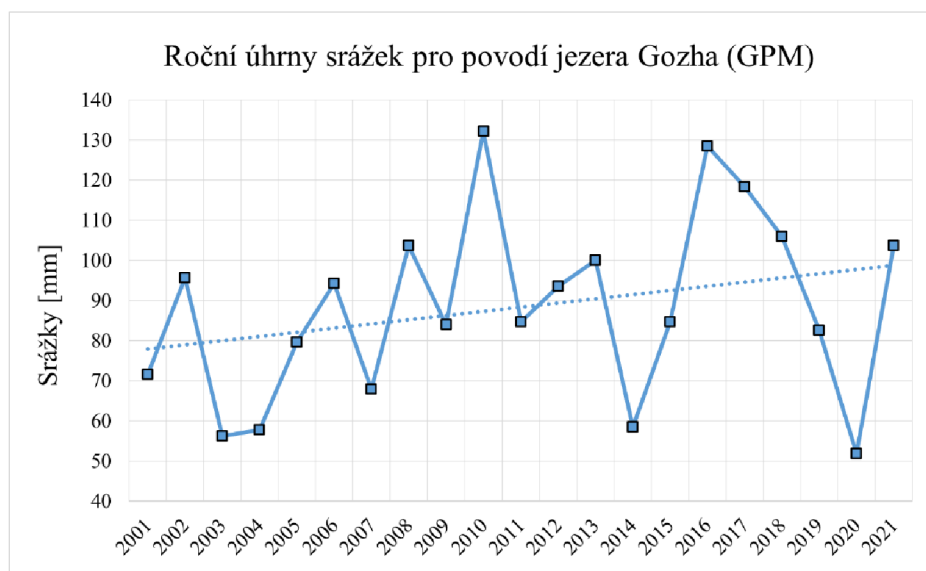


Obrázek 13: Graf vývoje průměrných ročních teplot na polygonu GozhaBasin zpracovaný v Microsoft Excel. Data: Muñoz Sabater 2019.

Průměrné roční teploty pro povodí jezera Gozha (Obrázek 13) oscilují v relativně pravidelných výkyvech mezi $-11,4$ °C a $-9,8$ °C, s výjimkou nejstrmějšího nárůstu v roce 2016, kdy byla naměřena teplota vůbec nejvyšší, a to $-8,6$ °C. V roce 2012 byla naopak zaznamenána nejmenší hodnota ($-11,4$ °C). Teplejší roky s průměrnou teplotou vyšší než

-10 °C jsou 2004, 2010, 2016, 2018 a 2020. Oproti tomu jsou chladnější roky s hodnotami pod -11 °C tyto: 2005, 2008 a 2012. Celkově hodnoty mezi lety 2001-2021 stouply zhruba o 0,75 °C.

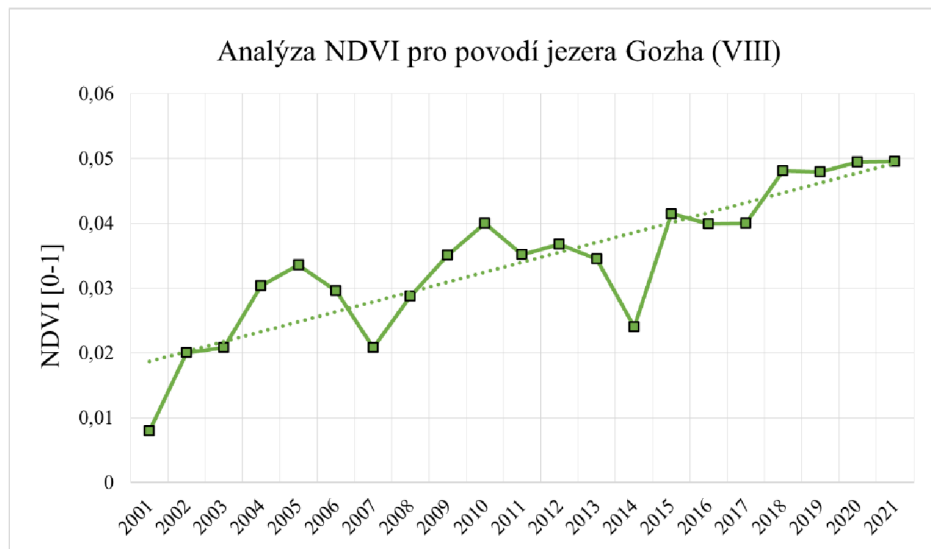
6.2.2 GPM



Obrázek 14: Graf vývoje ročních srážkových úhrnů na polygonu GozhaBasin zpracovaný v Microsoft Excel. Data: Huffman et al. 2019.

Graf ročních úhrnů srážek (Obrázek 14) vykazuje velké výkyvy, s hodnotami od 52 mm do 132 mm. Roky s nejnižšími hodnotami (pod 60 mm) jsou 2003, 2004, 2014 a 2020. Naopak ty s největším množstvím srážek (nad 100 mm) jsou 2008, 2010, 2013, 2016-2018 a 2021. Vůbec nejvíc srážek spadlo v roce 2010 (132 mm), nejméně v roce 2020 (52 mm). Za povšimnutí stojí velké rozdíly mezi některými roky (např. 2009 a 2010 nebo 2020 a 2021), nezdá se, že by se lišily o více než 40 mm. Celkově hodnoty výrazně rostou, v letech 2001-2021 se průměrně roční úhrny zvýšily o zhruba 20 mm.

6.2.3 MODIS Terra Vegetation Indices



Obrázek 15: Graf vývoje srpnových NDVI na polygonu GozhaBasin zpracovaný v Microsoft Excel. Data: Didan 2015.

Na první pohled je zřejmé, že NDVI (Obrázek 15) zaznamenalo mezi lety 2001 a 2021 mimořádně silný nárůst. Hodnoty se celkově zvyšovaly od té nejnižší v roce 2001 (0,008) až po nejvyšší v roce 2021 (0,049), s výraznějšími propady v letech 2007 a 2014. V roce 2015 byl zaznamenán oproti předchozímu roku nejrychlejší růst, a to o 0,017.

Přírodní podmínky	Teplota, srážky	Teplota, NDVI	Srážky, NDVI
p-hodnota	0,158	0,162	0,113
Korelační koeficient	0,328	0,325	0,365

Tabulka 3: Výsledky korelačních testů jednotlivých přírodních podmínek. Zpracováno v programu RStudio, verze 4.1.2.

Korelačními testy se nepodařilo prokázat statisticky významný vztah mezi daty popisující vývoj přírodních podmínek (Tabulka 3) ($p > 0,05$).

Teplota, MODIS	Teplota, chlorofyl	Teplota, CDOM	Teplota, TSM
p-hodnota	0,585	0,181	0,481
Korelační koeficient	-0,13	-0,312	0,167

Tabulka 4: Výsledky korelačních testů teploty a vlastností vodní plochy pro senzor MODIS.

Zpracováno v programu RStudio, verze 4.1.2.

Srážky, MODIS	Srážky, chlorofyl	Srážky, CDOM	Srážky, TSM
p-hodnota	0,724	0,197	0,806
Korelační koeficient	0,084	-0,301	-0,059

Tabulka 5: Výsledky korelačních testů srážek a vlastností vodní plochy pro senzor MODIS.

Zpracováno v programu RStudio, verze 4.1.2.

NDVI, MODIS	NDVI, chlorofyl	NDVI, CDOM	NDVI, TSM
p-hodnota	0,634	0,456	0,712
Korelační koeficient	-0,114	0,177	-0,088

Tabulka 6: Tabulka 6: Výsledky korelačních testů NDVI a vlastností vodní plochy pro senzor MODIS. Zpracováno v programu RStudio, verze 4.1.2.

Při testování korelace mezi jednotlivými přírodními charakteristikami a daty ze senzoru MODIS (Tabulka 4, 5 a 6) se nepodařilo prokázat žádný statisticky významný vztah ($p > 0,05$).

7. Diskuse

7.1 Vlastnosti vody

Vzhledem k tomu, že snímky ze senzoru VIIRS jsou pouze pro roky 2012-2021, byly použity především pro srovnání s výsledky ze zařízení MODIS, které je pro analýzu vodní plochy nejvhodnější. Je to z toho důvodu, že data mají delší časovou řadu, hodnota SNR senzoru je příznivější a spektrální pásma mají menší rozsahy, což znamená vyšší senzitivitu v požadovaných vlnových délkách. Je rovněž třeba podotknout, že vstupní data

korelačních testů se skládaly pouze z jedné hodnoty pro každý rok. To samé platí u analýzy přírodních podmínek ve vztazích k vlastnostem vody. Pro věrohodnější výsledky by bylo zapotřebí mít větší dataset, tzn. větší množství hodnot pro každý rok či více zkoumaných jezer.

Zdá se, že výrazné trendy byly u MODIS patrné u CDOM (nárůst) a TSM (pokles) (Obrázek 8 a 9). U chlorofylu se pak jednalo o pouze nepatrný růst (Obrázek 7). Při srovnání grafu pro chlorofyl (Obrázek 7) s grafem pro CDOM (Obrázek 8) jsou výrazné podobné propady v letech 2006 a 2016, což naznačuje možný pozitivní vztah. Roky 2012-2014 rovněž vykazují podobný trend na obou grafech, zároveň je pak však několik let, které se výrazně liší. Korelační test neodhalil statisticky významný vztah (Tabulka 1), i když p-hodnota (0,098) a korelační koeficient (0,381) naznačují určitou provázanost dat. Vzhledem k tomu, že CDOM pohlcuje záření nerovnoměrně v celé viditelné části spektra, může jezero s vysokým obsahem CDOM blokovat jeho přístup. Světlo je důležitým zdrojem pro primární producenty, bez kterého nemůže probíhat fotosyntéza (Branco & Kremer 2005). To by znamenalo, že vysoké koncentrace CDOM by mohly snižovat koncentrace chlorofylu. V takovém případě se dá očekávat, že by byl korelační koeficient záporný, což neodpovídá získaným výsledkům.

Při dalším porovnání obsahu chlorofylu (Obrázek 7), kde je patrná nejnižší hodnota v roce 2003, s grafem obsahu TSM (Obrázek 9), je u TSM naměřena naopak hodnota nejvyšší. Za zmínku pak stojí další vývoje hodnot: v letech 2003-2015 byl u chlorofylu obecně zaznamenán výrazný nárůst, u TSM naopak pokles. Hodnoty v letech 2016, 2018 a 2021 jsou pak u chlorofylu nižší, u TSM vyšší, což dále zvyšuje pravděpodobnost provázanosti těchto dvou veličin. Po otestování tohoto vztahu (Tabulka 1) se skutečně prokázala statisticky významná korelace ($p = 0,001$) s vysokou absolutní hodnotou korelačního koeficientu $-0,708$. TSM má podobný vztah ku chlorofylu jako CDOM, rovněž ovlivňuje množství dostupného světla ve vodním tělese a může svědčit o množství transportovaných sedimentů (Ebenhoeh et al. 1997, Fettweis et al. 2006). Výsledky naznačují, že vyšší koncentrace TSM mohly snižovat množství chlorofylu.

Při porovnání TSM (Obrázek 9) s grafem obsahu CDOM (Obrázek 8) se opět nabízí možnost stejného vztahu, ne však tak výrazného jako v předchozím případě.

Vysoké hodnoty CDOM v letech 2008 a 2009 by mohly souviset s nízkými hodnotami TSM ve stejných letech. Roky 2016 a 2019 jsou pak výraznými propady oproti rokům předešlým u CDOM, u TSM jsou výrazným růstem. Autorům studie Xu et al. (2018) se podařilo prokázat, že CDOM bylo v negativní korelaci s TSM. Stejný vztah se v této práci nepodařilo potvrdit (Tabulka 1).

Na grafu popisujícím koncentraci chlorofylu z dat senzoru VIIRS (Obrázek 10) vidíme podobnost s daty ze zařízení MODIS (Obrázek 7): Vysoké hodnoty v letech 2015 a 2017 a nižší v letech 2016 a 2019. Zároveň však vidíme i hodnoty zcela odlišné, především v letech 2014 a 2018. Vývoj hodnot v celém časovém okně se jeví velice podobný tomu z obrázku 7 (především obecný růst v letech 2012-2015 a hodnoty v letech 2019-2021), výrazně rozdílné hodnoty by však mohly znamenat, že senzory částečně reagují na jiné vodní konstituenty. Důvodem by mohla být odlišnost vlnových délek vybraných pásem jednotlivých zařízení, především M7 (866 nm) oproti B15 (748 nm).

Dále je v grafu CDOM senzoru MODIS (Obrázek 8) v roce 2016 propad následovaný výrazně vyšší hodnotou v roce 2017. Podobně je to u VIIRS (Obrázek 11). Hodnota v roce 2019 je u MODIS vůbec nejvyšší, zatímco u senzoru VIIRS je však mezi těmi nejnižšími. To obdobně jako v předchozím případě nabízí možnost, že jeden ze senzorů (nebo oba) neposkytuje věrohodné informace o koncentraci vodních konstituentů. V tomto případě jsou střední vlnové délky vybraných pásem u jednotlivých senzorů podstatně blíže (549 nm/667 nm MODIS; 555 nm/672 nm VIIRS), jejich rozsahy se však nepatrně liší – u VIIRS je to 20 nm, u MODIS pak 10 nm – to by mohlo ovlivňovat výsledky. Zároveň mají senzory jiné hodnoty poměru signálu a šumu (SNR), což by taktéž mohlo hýbat s výslednými hodnotami. Jako další vysvětlení se nabízí možnost, že použité masky, které měly za úkol odstranit vliv mraků, byly u každého zařízení jinak úspěšné.

Co se týče grafu zobrazující obsah TSM (VIIRS) (Obrázek 12), klesající trend v letech 2012-2015 zhruba odpovídá tomu u MODIS (Obrázek 9). Výrazným rozdílem jsou však roky 2016 a 2018, u kterých MODIS zaznamenal silný růst, u VIIRS však tato data nesouhlasí. Růst mezi lety 2020 a 2021 pak opět naznačuje růst, což je vidět u obou senzorů. Po otestování korelace se nepodařilo mezi žádnými daty MODIS a VIIRS najít

statisticky významný vztah (Tabulka 2). U TSM (Obrázek 9 a 12) byla však relativně vysoká hodnota korelačního koeficientu, a to 0,548.

7.2 Přírodní podmínky

Z grafů, které popisují vývoje průměrné roční teploty, ročního srážkového úhrnu a srpnového NDVI je patrné, že hodnoty všech těchto veličin byly v letech 2001 až 2021 na vzestupu, což odpovídá informacím z kapitol 4.4 až 4.6. Po vzájemném otestování jednotlivých přírodních charakteristik se nepodařilo prokázat statisticky významný vztah (Tabulka 3). Stojí však za zmínku, že p-hodnoty se ve všech 3 případech pohybovaly mezi 0,11 a 0,16, s korelačními koeficienty nad 0,32. To by mohlo naznačovat, že se zvyšujícími se hodnotami jedné veličiny by rostly i hodnoty ostatních. Např. při porovnání grafu teplot (Obrázek 13) s grafem srážek (Obrázek 14) jsou v obou případech výrazně vysoké hodnoty v letech 2010, 2016 a 2018, zbytek dat však nesdílí tyto podobnosti.

Při porovnání průměrných ročních teplot (Obrázek 13) s grafem srpnových NDVI (Obrázek 15) je na první pohled rovněž patrný trend růstu v obou případech. Pozitivní korelace mezi teplotou a NDVI se dle Schultz & Halpert (1993) prokázala především na Sibiři a v dalších oblastech s extrémními podmínkami na severní polokouli, kde je vegetace do značné míry teplotou limitovaná. To souhlasí s podmínkami, které panují v oblasti kolem jezera Gozha. Znamená to, že rostoucí průměrná teplota by zde mohla zvyšovat množství vegetace v letních měsících.

Autorům Ding et al. (2007) se podařilo zjistit, že srážkový úhrn má silnou korelaci s NDVI ve východní části Tibetské náhorní plošiny, v západní části (kde se nachází i jezero Gozha) byla však korelace slabá. To indikuje, že srážkový úhrn zde není hlavním faktorem ovlivňujícím hustotu vegetačního pokryvu. Při porovnání grafů srážek (Obrázek 14) a NDVI (Obrázek 15) se však zdá, že výrazné hodnoty v letech 2007, 2010 a 2014 mohou mít pozitivní vztah, což by svědčilo o opaku. S odkazem na Tabulku 3 se ale nejedná o vztah statisticky významný.

7.3 Porovnání vlastností vody a přírodních podmínek

Při porovnání průměrných ročních teplot (Obrázek 13) s obsahem chlorofylu u MODIS (Obrázek 7) se zdá, že by koncentrace chlorofylu mohla negativně reagovat na zvyšující se teplotu a vice-versa. Dle Kraemer et al. (2017) může mít teplota na koncentraci chlorofylu v jezerech silný vliv, obzvláště pak ve vyšších nadmořských výškách, kde jsou jezera silně ovlivňována změnami přírodních podmínek, např. právě oteplováním (Huber et al. 2005). Tento vztah se po otestování neukázal jako statisticky významný (Tabulka 4).

Při dalším zkoumání chlorofylu (Obrázek 7) ve vztahu ke srážkovým úhrnům (obrázek 14) se nenabízí jednoznačný vztah. Např. v letech 2003-2004 a 2009 jsou v obou grafech spíše nižší hodnoty, mnoho jiných let pak však vykazuje hodnoty zcela rozdílné. Podobně je to při srovnání chlorofylu s NDVI (Obrázek 15), kde v datech není patrná souvislost. To potvrdily korelační testy (Tabulka 6).

V tabulkách 4, 5 a 6 je na první pohled patrné, že p-hodnoty jsou u CDOM v porovnání s ostatními vlastnostmi vody výrazně nižší, a tím pádem je zde i nejvyšší absolutní hodnota korelačního koeficientu. To naznačuje, že množství CDOM by mohlo reagovat na změnu přírodních podmínek nejvíce ze 3 zkoumaných veličin. U zkoumání CDOM (Obrázek 8) a průměrné teploty (Obrázek 13) se mimo výrazné hodnoty v roce 2016 nenabízí souvislost dat. Nejnižší p-hodnota pak byla zaznamenána během testování vztahu srážek a CDOM (Tabulka 5), společně se záporným korelačním koeficientem. To by mohlo znamenat, že v letech s nízkým množstvím srážek by byly vyšší hodnoty CDOM, což skutečně vidíme v pohledu na grafy především v letech 2006, 2010, 2014 a 2016. Autoři studie Kellerman et al. (2014) však tvrdí, že u jezer, jež jsou výrazně ovlivňována změnami klimatu, by menší množství srážek znamenalo naopak méně transportu terestrického DOM do jezer a tím by se snižovala koncentrace CDOM. To výsledky v této práci nepotvrdily.

CDOM se tedy může do jezera vplavovat z jeho okolí, nebo vznikat biologickými procesy přímo v něm (Branco & Kremer 2005). Vzhledem k tomu, že NDVI v povodí jezera zaznamenalo oproti koncentraci chlorofylu (Obrázek 7) velmi silný nárůst, se nabízí

myšlenka, že organický materiál by se do jezera mohl dostávat z jeho okolí. I když se korelace těchto dvou veličin neukázala jako statisticky významná (Tabulka 6), je zřejmé, že obě veličiny zaznamenaly ve zkoumaném období růst.

Graf vývoje TSM (Obrázek 9) a graf vývoje průměrných teplot (Obrázek 13) nenaznačují, že by teplota ovlivňovala množství TSM a tím i turbiditu jezera. V letech 2010 a 2012 se zdá, že by data mohla být negativně korelována. Roky 2015 a 2016 však vykazují vztah zcela opačný, což naznačuje, že souvislost byla pravděpodobně náhodná. O tom svědčí i výsledky korelačních testů (Tabulka 4), kde nebyl zjištěn statisticky významný vztah. Stejně jako v tabulce 4 jsou v tabulkách 5 a 6 pro TSM mimořádně nízké hodnoty korelačních koeficientů. To znamená, že vztah mezi přírodními podmínkami a TSM je nepravděpodobný.

Za zmínku však stojí studie autorů Du et al. (2020), ve které autoři došli k závěru, že turbidita jezer je většinou vysoká v oblastech s řídkým vegetačním pokryvem, a že průměrná roční hodnota TSM je silně korelována s průměrnou roční hodnotou NDVI. Na obrázku s grafem TSM (Obrázek 9) je skutečně patrný záporný trend pro stejné období, kdy je zaznamenán výrazný růst NDVI (Obrázek 15). Důvod by mohl být ten, že půda pokrytá vegetací je více kompaktní a není z ní vodou odnášeno tolik materiálu jako z holé půdy. Statisticky se však tento vztah nepodařilo prokázat (Tabulka 6).

8. Závěr

V platformě Google Earth Engine byly úspěšně zpracovány a analyzovány satelitní snímky jezera Gozha pořízeny senzory MODIS a VIIRS. Rovněž byla zpracována a analyzována data o přírodních charakteristikách v povodí jezera. Po analýze optických vlastností jezera bylo patrné, že data získaná jednotlivými zařízeními se lišila. Důvodem mohly být rozdíly ve vlnových délkách a rozsazích jejich spektrálních pásem, hodnoty parametru SNR či úspěšnost aplikace masek, jež měly za úkol odstranit vliv mraků.

Při vyhodnocení výsledků ze senzoru MODIS bylo patrné, že v letech 2001-2021 došlo na jezeře k nárůstu CDOM a ke snížení turbidity (TSM), množství chlorofylu pak nepatrně vzrostlo. Zároveň se potvrdilo, že existuje negativní korelace mezi množstvím

TSM a koncentrací chlorofylu. Je možné, že důvodem bylo blokování světla TSM, což mohlo omezovat primární producenty. Dále došlo u všech 3 měřených přírodních charakteristik v povodí jezera (průměrná roční teplota, roční srážkový úhrn a srpnové NDVI) k nárůstu, nejvýrazněji pak u NDVI, které za zkoumané období vzrostlo několikanásobně. Souvislosti mezi změnami v podmínkách se nepodařilo prokázat, lze však předpokládat, že vyšší průměrné roční teploty mohly podpořit růst vegetace.

Statisticky se nepodařilo potvrdit vztah mezi vlastnostmi jezera a přírodními charakteristikami. Bylo však zřejmé, že CDOM reagovalo na tyto změny nejvíce. Zároveň bylo patrné, že množství TSM klesalo ve stejném období, kdy výrazně rostla hustota vegetačního pokryvu v oblasti. Důvodem mohl být fakt, že půda zpevněná vegetací neuvolňovala tolik sedimentů, které by následně byly vplaveny do jezera.

Jedním z přínosů práce jsou aktuální data o přírodních podmínkách na Tibetské náhorní plošině a potvrzení faktu, že se skutečně rapidně mění. Samo jezero rovněž podléhalo změnám, nepodařilo se však potvrdit, do jaké míry se jednalo o reakci na zkoumané přírodní podmínky. Další hodnotnou informací bylo zjištění, že jednotlivé senzory DPZ naměřily jiné hodnoty veličin. Pro přesnější výsledky dálkové analýzy by bylo vhodné porovnání s in-situ měřeními, které by umožnily seřadit použité indexy dle podmínek vodní plochy. Dalším faktorem byla pravděpodobně malá velikost datasetu. Větší dataset by mohl pozitivním způsobem ovlivnit věrohodnost výsledků korelačních testů.

9. Literatura

Al-Kharusi E. S., Tenenbaum D. E., Abdi A. M., Kutser T., Karlsson J., Bergström A.-K., Berggren M. (2020): Large-Scale Retrieval of Coloured Dissolved Organic Matter in Northern Lakes Using Sentinel-2 Data. *Remote Sensing*. 12(1), 157.

Bakker W. H., Feringa W., Gieske A. S. M. (2009): Principles of Remote Sensing: An introductory textbook. *ITC, Enschede*.

Barnes W. L., Xiong X., Salomonson V. V. (2003): Status of Terra MODIS and Aqua MODIS. *Advances in Space Research*. 32(11), 2099–2106.

Bengtsson Z., Beaudry B., Torres-Pérez J., McCullum A. (2021): Using Google Earth Engine for Land Monitoring Applications. *NASA Applied Remote Sensing Training Program (ARSET)* [cit. 2022.03.28], dostupné z <<https://appliedsciences.nasa.gov/join-mission/training/english/arset-using-google-earth-engine-land-monitoring-applications>>.

Branco A. B., Kremer J. N. (2005): The relative importance of chlorophyll and colored dissolved organic matter (CDOM) to the prediction of the diffuse attenuation coefficient in shallow estuaries. *Estuaries*. 28(5), 643–652.

Brezonik P. L., Olmanson L. G., Finlay J. C., Bauer M. E. (2015): Factors affecting the measurement of CDOM by remote sensing of optically complex inland waters. *Remote Sensing of Environment*. 157, 199–215.

Carder K. L., Chen F. R., Cannizzaro J. P., Campbell J. W., Mitchell B. G. (2004): Performance of the MODIS semi-analytical ocean color algorithm for chlorophyll-a. *Adv. Space Res.* 33(7), 1152–1159.

Didan K. (2015): MOD13A1 MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 500m SIN Grid V006 [Data set]. *NASA EOSDIS Land Processes DAAC* [cit. 2022.03.28], dostupné z <<https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD13A1.006>>.

Ding M., Zhang Y., Liu L., Zhang W., Wang Z., Bai W. (2007): The relationship between NDVI and precipitation on the Tibetan Plateau. *Journal of Geographical Sciences*. 17(3), 259–268.

Du Y., Song K., Liu G., Wen Z., Fang C., Shang Y., ... Zhang B. (2020): Quantifying total suspended matter (TSM) in waters using Landsat images during 1984–2018 across the Songnen Plain, Northeast China. *Journal of Environmental Management*. 262.

Ebenhoeh W., Bekker J. G. B., Baretta J. W. (1997): The primary production module in the marine ecosystem model ERSEM II, with emphasis on the light forcing. *Journal of Sea Research*. 38(3-4), 173–193.

Esaias W. E., Abbott M. R., Barton I., Brown O. B., Campbell J. W., Carder K. L., ... Minnett P. J. (1998): An overview of MODIS capabilities for ocean science observations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(4), 1250–1265.

Fettweis M., Francken F., Pison V., Eynde V. D. D. (2006): Suspended particulate matter dynamics and aggregate sizes in a high turbidity area. *Marine Geology*. 235(1-4), 63–74.

Huber U. M., Bugmann H. K. M., Reasoner M. A. (2005): Global change and mountain regions: an overview of current knowledge. Dordrecht (Netherlands). *Springer*.

Huffman G. J., Stocker E. F., Bolvin D. T., Nelkin E. J., Jackson T. (2019): GPM IMERG Final Precipitation L3 1 month 0.1 degree x 0.1 degree V06, Greenbelt, MD, Goddard. *Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC)* [cit. 2022.03.28], dostupné z <<https://doi.org/10.5067/GPM/IMERG/3B-MONTH/06>>.

Gholamalifard M., Esmaili-Sari A., Abkar A., Naimi B., Kutser T. (2013): Influence of vertical distribution of phytoplankton on remote sensing signal of Case II waters: southern Caspian Sea case study. *Journal of Applied Remote Sensing*. 7(1).

Gholizadeh M. H., Melesse A. M., Reddi L. (2016): A Comprehensive Review on Water Quality Parameters Estimation Using Remote Sensing Techniques. *Sensors* 2016. 16(8), 1298.

Gitelson A. A., Dall'Olmo G., Moses W., Rundquist D. C., Barrow T., Fisher T. R., ... Holz J. (2008): A simple semi-analytical model for remote estimation of chlorophyll-a in turbid waters: Validation. *Remote Sensing of Environment*. 112(9), 3582–3593.

Guoqiang T., Wei W., Ziyue Z., Xiaolin G., Na L., Di L., Yang H. (2015): An Overview of the Global Precipitation Measurement (GPM) Mission and It's Latest Development. *Remote Sensing Technology and Application*. 30(4), 607-615.

Immerzeel W. W., van Beek L. P. H., Bierkens M. F. P. (2010): Climate change will affect the Asian water towers. *Science*. 328(5984), 1382–1385.

Jiang L., Nielsen K., Andersen O. B., Bauer-Gottwein P. (2017): Monitoring recent lake level variations on the Tibetan Plateau using CryoSat-2 SARIn mode data. *Journal of Hydrology*. 544, 109–124.

Kellerman A. M., Dittmar T., Kothawala D. N., Tranvik L. J. (2014): Chemodiversity of dissolved organic matter in lakes driven by climate and hydrology. *Nature Communications*. 5(1).

Kraemer B. M., Mehner T., Adrian R. (2017): Reconciling the opposing effects of warming on phytoplankton biomass in 188 large lakes. *Sci Rep*. 7(1).

Kropáček J., Maussion F., Chen F., Hoerz S., Hochschild V. (2013): Analysis of ice phenology of lakes on the Tibetan Plateau from MODIS data. *The Cryosphere*. 7(1), 287–301.

Kuang X., Jiao J. J. (2016): Review on climate change on the Tibetan Plateau during the last half century. *J. Geophys. Res.-Atmos*. 121(8), 3979–4007.

Kutser T., Pierson D. C., Kallio K. Y., Reinart A., Sobek S. (2005): Mapping lake CDOM by satellite remote sensing. *Remote Sensing of Environment*. 94(4), 535–540.

Lehner B., Verdin K., Jarvis A. (2006): HydroSHEDS Technical Documentation. *World Wildlife Fund US, Washington, DC* [cit. 2022.03.28], dostupné z <<http://hydrosheds.cr.usgs.gov>>.

Lei Y., Yang K., Wang B., Sheng Y., Bird B. W., Zhang G., Tian, L. (2014): Response of inland lake dynamics over the Tibetan Plateau to climate change. *Climatic Change*. 125(2), 281–290.

McGinley M. (2014): North Tibetan Plateau-Kunlun Mountains alpine desert. *World Wildlife Fund* [cit. 2022.03.28], dostupné z <http://editors.eol.org/eoearth/wiki/North_Tibetan_Plateau-Kunlun_Mountains_alpine_desert>.

Messenger M. L., Lehner B., Grill G., Nedeva I., Schmitt O. (2016): Estimating the volume and age of water stored in global lakes using a geo-statistical approach. *Nature Communications*. 7.

Molnar P., Boos W.R., Battisti D.S. (2010): Orographic controls on climate and paleoclimate of Asia: thermal and mechanical roles for the Tibetan Plateau. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 38(1), 77–102.

Moses W. J., Gitelson A. A., Berdnikov S., Povazhnyy, V. (2009): Estimation of chlorophyll-a concentration in case II waters using MODIS and MERIS data—successes and challenges. *Environmental Research Letters*. 4(4).

Muñoz Sabater J. (2019): ERA5-Land monthly averaged data from 1981 to present. *Copernicus Climate Change Service (C3S). Climate Data Store (CDS)*.

Petus C., Chust G., Gohin F., Doxaran D., Froidefond J.-M., Sagarminaga Y. (2010): Estimating turbidity and total suspended matter in the Adour River plume (South Bay of Biscay) using MODIS 250-m imagery. *Continental Shelf Research*. 30(5), 379–392.

Pi X., Feng L., Li W., Zhao D., Kuang X., Li J. (2020): Water clarity changes in 64 large alpine lakes on the Tibetan Plateau and the potential responses to lake expansion. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 170, 192–204.

Qi L., Lee Z., Hu C., Wang M. (2017): Requirement of minimal signal-to-noise ratios of ocean color sensors and uncertainties of ocean color products, *J. Geophys. Res. Oceans*. 122(3), 2595–2611.

Qiao B., Zhu L., Wang J., Ju J., Ma Q., Liu C. (2017): Estimation of lakes water storage and their changes on the northwestern Tibetan Plateau based on bathymetric and Landsat data and driving force analyses. *Quaternary International*. 454, 56–67.

Rades E. F., Tsukamoto S., Frechen M., Xu Q., Ding L. (2015): A lake-level chronology based on feldspar luminescence dating of beach ridges at Tangra Yum Co (southern Tibet). *Quaternary Research*. 83(03), 469–478.

Ritchie J. C., Zimba P. V., Everitt J. H. (2003): Remote Sensing Techniques to Assess Water Quality. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 69(6), 695–704.

Roger J. C., Vermote E. F., Ray J. P. (2015): MODIS Surface Reflectance User's Guide: Collection 6 (version 1.4). *MODIS Land Surface Reflectance Computing Facility*.

Sadjadi F. A., Chun C. S. L. (2004): Remote sensing using passive infrared Stokes parameters. *Optical Engineering*. 43(10).

Shi Y., Mi D., Yao T., Zeng Q., Liu C. (2010): Glaciers of Asia – Glaciers of China. *U.S. Geological Survey Professional Paper*.

Schowengerdt R. A. (2007): Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing (Third Edition). *Elsevier*.

Schultz P. A., Halpert M. S. (1993): Global correlation of temperature, NDVI and precipitation. *Advances in Space Research*. 13(5), 277–280.

Sinitsyn M. V., Allan N. J. R. (2019): Kunlun Mountains. *Encyclopædia Britannica* [cit. 2022.03.28], dostupné z <<https://www.britannica.com/place/Kunlun-Mountains>>.

Son N. T., Chen C. F., Chen C. R., Minh V. Q., Trung N. H. (2014): A comparative analysis of multitemporal MODIS EVI and NDVI data for large-scale rice yield estimation. *Agricultural and Forest Meteorology*. 197, 52–64.

Song C., Huang B., Ke L. (2015): Heterogeneous change patterns of water level for inland lakes in High Mountain Asia derived from multi-mission satellite altimetry. *Hydrol. Process.* 29(12), 2769–2781.

Song C., Ye Q., Cheng X. (2015): Shifts in water-level variation of Namco in the central Tibetan Plateau from ICESat and CryoSat-2 altimetry and station observations. *Science China Press and Springer-Verlag Berlin*. 60(14), 1287-1297.

Šmejkalová T. (2020): Freshwater Quality Monitoring - Lago Trasimeno, Italy (version 1.1). *Rus Webinar* [cit. 2022.03.28], dostupné z <<https://rus-copernicus.eu/portal/the-rus-library/learn-byyourself/>>.

Tehrani N., D'Sa E., Osburn C., Bianchi T., Schaeffer B. (2013): Chromophoric Dissolved Organic Matter and Dissolved Organic Carbon from Sea-Viewing Wide Field-of-View Sensor (SeaWiFS), Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) and MERIS Sensors: Case Study for the Northern Gulf of Mexico. *Remote Sensing*. 5(3), 1439–1464.

Vermote E. (2015): MOD09A1 MODIS/Terra Surface Reflectance 8-Day L3 Global 500m SIN Grid V006 [Data set]. *NASA EOSDIS Land Processes DAAC*, dostupné z <<https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD09A1.006>>.

Vermote E., Franch B., Claverie M. (2016): VIIRS/NPP Surface Reflectance Daily L2G Global 1km and 500m SIN Grid V001 [Data set]. *NASA EOSDIS Land Processes DAAC*, dostupné z <<https://doi.org/10.5067/VIIRS/VNP09GA.001>>.

Vermote E., Wolfe R. (2015): MODOCGA MODIS/Terra Ocean Reflectance Daily L2G-Lite Global 1km SIN Grid V006 [Data set]. *NASA EOSDIS Land Processes DAAC*, dostupné z <<https://doi.org/10.5067/MODIS/MODOCGA.006>>.

Ward M. (1989-90): The Kun Lun Shan: Desert Peaks of Central Asia. *The Alpine Journal*.

Wu G., Liu Y., Zhang Q., Duan A., Wang T., Wan R., Liu X., Li W., Wang Z., Liang X. (2007): The influence of mechanical and thermal forcing by the Tibetan Plateau on Asian climate. *J. Hydrometeorol.* 8(4), 770–789.

Xiong X., Butler J., Chiang K., Efremova B., Fulbright J., Lei N., McIntire J., Oudrari H., Sun J., Wang Z., Wu A. (2014): VIIRS on-orbit calibration methodology and performance. *J. Geophys. Res. Atmos.* 119(9), 5065–5078.

Yang K., Ding B., Qin J. (2012): Can aerosol loading explain the solar dimming over the Tibetan Plateau? *Geophysical Research Letters*. 39(20).

Zhang C., Tang Q., Chen D. (2017): Recent Changes in the Moisture Source of Precipitation over the Tibetan Plateau. *Journal of Climate*. 30(5), 1807-1819.

Zhang G., Xie H., Kang S., Yi D., Ackley S. F. (2011): Monitoring lake level changes on the Tibetan Plateau using ICESat altimetry data (2003–2009). *Remote Sensing of Environment*. 115(7), 1733–1742.

Zhong L., Ma Y., Xue Y., Piao S. (2019): Climate change trends and impacts on vegetation greening over the Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research. Atmospheres*. 124.

10. Přílohy

Příloha 1: Příklad skriptu z Google Earth Engine. Skript použitý pro analýzu koncentrace chlorofylu z dat senzoru MODIS (pro zestručnění bez části, která vizualizuje mapové výstupy).

```
var StudyArea = ee.FeatureCollection("users/hmkrcma/Gozha-buffer");
var dataset = ee.ImageCollection("MODIS/006/MODOCGA")
  .filterBounds(StudyArea)
  .filterDate('2001-01-01', '2021-12-31')

// Vytvořím BitMask, pomocí které odstraním vliv mraků

function maskMODISsr(dataset) {
var cloudsBitMask1 = 15 << 20;
var cloudsBitMask2 = 15 << 21;
var cloudsBitMask3 = 15 << 22;
var cloudsBitMask4 = 15 << 23;
var cloudsBitMask5 = 15 << 28;
var cloudsBitMask6 = 15 << 29;
var cloudsBitMask7 = 15 << 30;
var cloudsBitMask8 = 15 << 31;

var qa = dataset.select('QC_b8_15_1km');

var mask = qa.bitwiseAnd(cloudsBitMask1).eq(0)
  .and(qa.bitwiseAnd(cloudsBitMask2).eq(0))
  .and(qa.bitwiseAnd(cloudsBitMask3).eq(0))
  .and(qa.bitwiseAnd(cloudsBitMask4).eq(0))
  .and(qa.bitwiseAnd(cloudsBitMask5).eq(0))
  .and(qa.bitwiseAnd(cloudsBitMask6).eq(0))
  .and(qa.bitwiseAnd(cloudsBitMask7).eq(0))
  .and(qa.bitwiseAnd(cloudsBitMask8).eq(0));

return dataset.updateMask(mask).divide(10000)
  .select('sur_refl_b08', 'sur_refl_b09', 'sur_refl_b10',
    'sur_refl_b11', 'sur_refl_b12', 'sur_refl_b13', 'sur_refl_b14',
    'sur_refl_b15', 'sur_refl_b16')
  .copyProperties(dataset, ["system:time_start"]);
}

// Vytvořím kolekci snímků z let 2001-2021, kde zvolím median
// pixelů ze všech snímků.
// Vybírám pouze srpnové snímky.
```



```

var stepList = ee.List.sequence(2001,2021)

var filterCollection = stepList.map(function(year){
var startDate = ee.Date.fromYMD(year,8,1);
var endDate = ee.Date.fromYMD(year,8,31);
var composite_i = dataset.filterDate(startDate, endDate)
.map(maskMODISsr)
.median()
.set('system:time_start',startDate);
return composite_i;
});

var yearlyComposites = ee.ImageCollection(filterCollection);
print(yearlyComposites, 'Time Series 2001-2021');

// Vytvořím funkci pro CHL, kterou přidám do kolekce.
// Vytvořím novou kolekci, kde bude CHL zahrnuto jako pásmo.

function chl(img){
var nir = img.select('sur_refl_b15');
var red = img.select('sur_refl_b13');
var chl = red.divide(nir).rename('CHL');
return img.addBands(chl);}

yearlyComposites = yearlyComposites.map(function(image)
{return chl(image)});

print(yearlyComposites, 'With CHL as band')

// Rok 2011 hlásí error, proto ho vyfiltruji z chlCollection.

var chlCollection = yearlyComposites.select('CHL')
.filter(ee.Filter.eq('system:index','10').not())

// Vytvořím graf znázorňující relativní změnu koncentrace
chlorofylu v čase

var graf = ui.Chart.image.seriesByRegion(chlCollection,
StudyArea,ee.Reducer.median(),
'CHL',30,'system:time_start').setOptions({
title:'Vývoj CHL',
yaxis: {title:'CHL'},
});
print(graf);

```