

**Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta  
Katedra fyzické geografie a geoekologie**

**Charles University, Faculty of Science  
Department of physical geography and geoecology**

Doktorský studijní program: Fyzická geografie  
Doctoral study programme: Physical geography

Autoreferát disertační práce  
Summary of the doctoral thesis



Dynamics of glacial lakes and hydrological conditions of a glacial-morainic complex (Adygine, northern Tien Shan)

Dynamika ledovcových jezer a hydrologické poměry glaciálně-morénového komplexu  
(Adygine, severní Tien Shan)

**RNDr. Kristýna Falátková**

Školitel/Supervisor: Prof. RNDr. Bohumír Janský, CSc.

Školitel-konzultant/Supervisor-consultant: RNDr. Miroslav Šobr, PhD.

Praha, 11.3. 2019



## **Abstract**

The thesis deals with hydrological conditions in a proglacial environment, focusing on the development of glacial lakes and the assessment of their susceptibility to outburst. The study site is the Adygine glacier-moraine complex located in the north-facing valley of the northern Tien Shan, Kyrgyzstan, at an altitude of 3400-4200 m a.s.l. In the past 50 years, the receding glacier allowed formation of several lakes, which form a three-level cascade and are fed by glacier meltwater. Below the glacier, there is a complex of several generations of moraines, through which the glacier meltwater is routed downstream. The aims of the work were to evaluate the development of individual lakes, their susceptibility to sudden outburst and possible triggers, to determine the probable development of the site in the future, to analyse the hydrological regime of the lakes and to obtain basic information on the subsurface flow of water from the site to the stream. For the purposes of assessing the development of the lakes, the data obtained in the field (geodetic surveying of a shore line, bathymetric measurements), as well as satellite and aerial images were used. Fluctuation of lake water level was monitored by pressure sensors and the processing of this data allowed to analyse the hydrological regime of these lakes on a daily, seasonal, and annual scale. For the purposes of assessing the susceptibility of lakes to outburst, a regionally-based approach, using field data and observation together with digital map data, have been developed. The probable further development of the site (glacier retreat, formation of new lakes) was introduced using GERM model outputs. Lastly, the passage of meltwater through subsurface routes in the morainic complex was investigated - the connection between the lower lake and the stream was tested with dye tracing method. Thanks to the observed dye concentrations in the stream it was possible to determine the duration of the water passage as well as significant dilution of the traced water in the drainage system. The connection of small tarns found in the morainic complex to melt water was found by analysing the isotopic composition of their water. Some of the tarns actually had a very similar water composition to the large lakes fed by glacier meltwater, others showed only partial or very little influence of meltwater on their hydrological balance.

Key words: Glacial lake, Proglacial area, Lake outburst, Hydrological regime, Glacial meltwater

## **Abstrakt**

Práce se zabývá hydrologickými poměry v proglaciálním prostředí, se zaměřením na vývoj ledovcových jezer a zhodnocení jejich náchylnosti k průvalu. Studovanou lokalitou je ledovcovo-morénový komplex Adyginé, nacházející se v severně orientovaném údolí v pohoří severní Tien Shan, Kyrgyzstán, v nadmořské výšce 3400-4200 m n. m. Ustupující ledovec podmínil za posledních 50 let vznik několika jezer, jež leží ve třech výškových úrovních a mají hydrologické propojení s ledovcem. Pod čelem ledovce se nachází komplex několika generací morén, jímž je tavná voda z ledovce odváděna z lokality. Cíli práce bylo vyhodnotit dosavadní vývoj jednotlivých jezer, jejich náchylnost k náhlému vyprázdnění a možné příčiny, zjistit pravděpodobný vývoj lokality v budoucnu, analyzovat hydrologický režim jezer a získat bližší informace o podpovrchovém proudění vody z lokality do toku. Pro účely vyhodnocení vývoje jezer byla použita data získaná v terénu (geodetické zaměřování břehové linie, batymetrická měření), ale i satelitní a letecké snímky. Kolísání hladiny jezer bylo sledováno pomocí tlakových čidel a zpracování těchto dat umožnilo analyzovat hydrologický režim těchto jezer v denním, sezónním a ročním měřítku. Pro účely zhodnocení náchylnosti jezer k průvalu byl vytvořen regionálně zaměřený postup využívající data a pozorování z terénu i digitální mapové podklady. Pravděpodobný další vývoj lokality (ústup ledovce, vznik nových jezer) byl představen pomocí výstupů z modelu GERM. Na závěr byl zkoumán průchod tavné vody podpovrchovými cestami v morénovém komplexu - spojení mezi spodním jezerem a stálým ledovcovým tokem bylo testováno pomocí stopovacího barviva. Podle zjištěných koncentrací barviva v toku bylo možné určit dobu průchodu vody i silné naředení označené vody v systému. Napojení malých termokrasových jezírek nacházejících se v morénovém komplexu na tavnou vodu z ledovce bylo zjištěno pomocí analýzy izotopového složení jejich vody. Některá jezírka skutečně vykazovala velmi podobné složení vody jako velká jezera napájená vodou z ledovce, u jiných se prokázal jen částečný nebo velmi malý vliv tavné vody na jejich hydrologickou bilanci.

**Klíčová slova:** Ledovcové jezero, Proglaciální prostředí, Průval jezera, Hydrologický režim, Ledovcová tavná voda

## **1. Introduction**

In the new millennium, the pronounced retreat of mountain glaciers in high-altitude regions of the world (Barry, 2006; Radić et al., 2014; Zemp et al., 2015) and its consequences have been a ubiquitous topic at geoscientific meetings and conferences, countless scientific papers addressing various aspects of the problematics have been published. One of the implications of glacier recession are changes in proglacial hydrological conditions (Yao et al., 2007; Moore et al., 2009; Huss et al., 2010; Bliss et al., 2014) that result from varying meltwater supply and geomorphological changes of the environment. Glacier meltwater is an important component of runoff in glaciated basins, supplying the stream in a summer season it is an indispensable water source in many regions (Bradley et al., 2006; Akhtar et al., 2008; Sorg et al., 2012). Besides the benefits it brings in terms of fresh water source (agriculture, power generation), the meltwater accumulated in depressions forming glacial lakes can pose a threat to downstream settlements and infrastructure. Proglacial area is a zone in front of the glacier terminus, formed after glacier tongue receded to higher altitude and left behind accumulations of debris. Its dynamics is connected to presence of permafrost and its degradation, exposure and melting of glacier ice remnants and buried ice, and the effect (erosional, thermal) of water flowing through this environment. As this specific hydrological environment controls meltwater passage from glacier to a stream and thus has potential to alter the basin runoff, deepening the knowledge of hydrological functioning of proglacial areas is essential.

## **2. Aims of the study**

The aim of the thesis was to investigate the proglacial lakes dynamics and water flow from glacier to a stream. The individual objectives were the following:

- To evaluate formation and development of glacial lakes in relation to glacier retreat;
- To monitor and assess hydrological regime of proglacial lakes;
- To construct a region-specified assessment of lake outburst susceptibility;
- To summarize circumstances of GLOF cases in high-mountain Asia;
- To investigate subsurface water passage through a glacio-morainic complex to a stream.

## **3. Material and methods**

The study site is the Adygin glacial-morainic complex, a north-facing valley of the Kyrgyz Ridge, northern Tien Shan, Kyrgyzstan, at an altitude of 3400-4200 m a.s.l. (Fig. 1).

### **3.1 Development of the lakes**

The gradual glacier terminus retreat and resulting formation of lakes was analysed based on the historical aerial and satellite imagery. The oldest aerial images of the site date back to 1962 (scale of the survey: 1:38 600, image resolution: 1 m). The satellite imagery includes freely available Landsat data accessible via USGS portal, but also a purchased VHR image from WorldView-2. The lakes' spatial development and further terminus retreat has been observed in detail since 2007 by means of geodetic surveying. The total station Leica TCR 705

with a reflective prism was used, accuracy of the measurement is 0.005 m. Since 2008, the lake basins have been surveyed repeatedly with an echosounder (Garmin Fishfinder). The method of bathymetric measurement is described in detail by Šobr and Česák (2005).

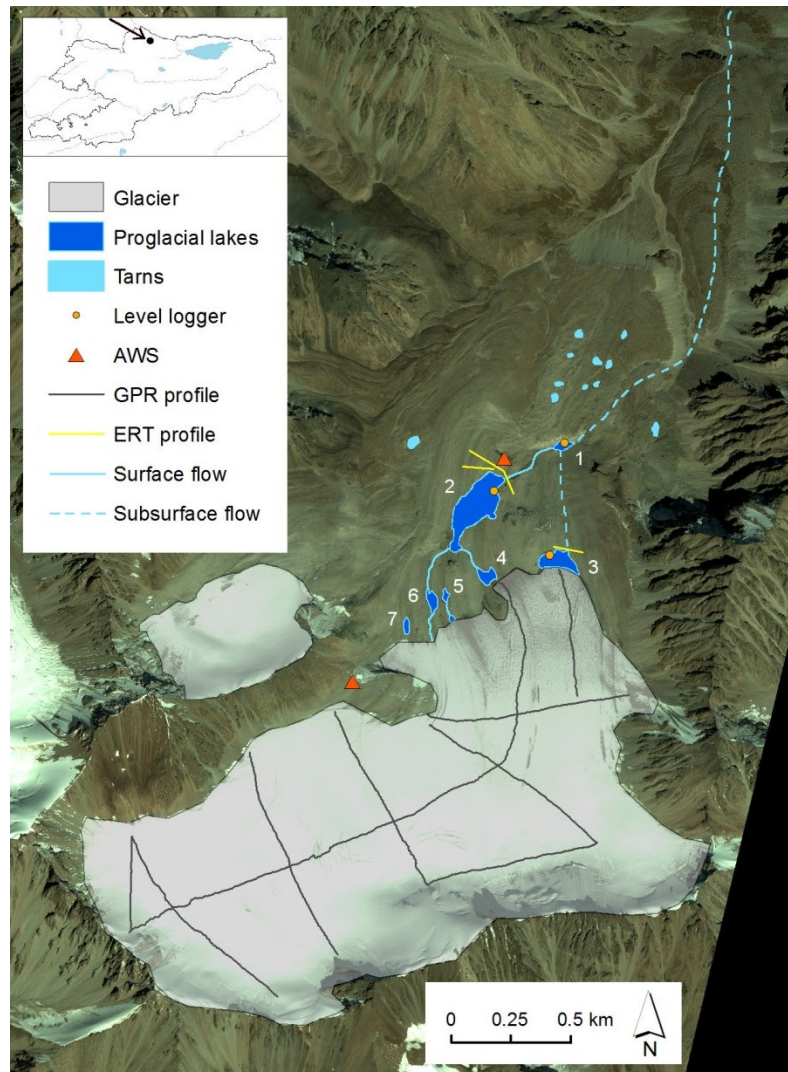


Figure 1. The study site Adygyne in the Kyrgyz Ridge, northern Tien Shan. The numbers 1-7 refer to studied proglacial lakes. The site's position marked with an arrow on the map of Kyrgyzstan, upper left corner.

### 3.2 Hydrology of the site

In order to determine and monitor hydrological regime of the site, pressure sensors (Levellogger M5, Solinst) were installed in the main three lakes which are fed by glacier meltwater. The lake water level is recorded in 30-minute steps with accuracy of 0.006 m. The longest data series is available for Lake 2 (2007–2017), the other two lakes (Lake 1 and 3) were monitored in the period of 2012–2015. The lake level fluctuation data were supplemented with meteorological data from automated weather stations installed at the site at the altitude of 3550 m and 3700 m a.s.l. At the outflow from Lake 2, we measured the flow rate (3–5 August 2012) with a hydraulic propeller (OTT C2) in accordance with ČSN ISO 748. A rating curve was established based on the measured flow rates and the respective water level values.

Besides the main lakes, small tarns situated on the glacio-morainic landform were studied in terms of their possible linkage to meltwater. Water from the tarns was sampled (25 July 2017) in order to have it analysed for ratio of stable isotopes of  $^{18}\text{O}$  and  $^2\text{H}$ . The analysis was carried out in the Isotopic laboratory in Ceske Budejovice, Academy of Sciences of the Czech Republic.

At last, to examine the underground meltwater passage through the morainic landform to a stream, a dye tracer test was carried out (22–24 July 2017). A fluorescent dye called uranine (Fluorescein Sodium salt) was selected for this purpose as it is non-toxic, readily soluble in water, and it is detectable even at very low concentration ( $10^{-12}$  g ml $^{-1}$ ). An amount of 3000 g of uranine was injected to Lake 1. The water samples were collected in 1-hour intervals from a stream, 3100 m downstream from the injection spot. The samples were analysed in a fluorometer (LS55, Perkin Elmer) with an excitation wavelength of 492 nm, the uranine emission peak was observed at the intensity of 512 nm. The height of the resulting peak was compared to the standard concentrations of  $10^{-10}$ – $10^{-12}$  g ml $^{-1}$ , and a breakthrough curve was plotted.

### 3.3 Lake outburst susceptibility

In order to assess the possible triggers of lake outburst at the site, a combination of repeated field mapping, analysis of DEM and satellite images was applied. The global 1-arcsecond SRTM DEM (resolution of  $\sim 30$  m) served to assess steepness of slopes (surrounding the lakes) that could be a spot of initiation of a gravitational process such as rock fall, landslide, or snow/ice avalanche. A geophysical survey was carried out in 2008 by a company G Impuls Praha spol. s r.o. Methods of electrical resistivity tomography and spontaneous polarisation were used to investigate presence (and depth) of buried ice and seepage routes leading through the dam.

The parameters characterizing lake's susceptibility to burst and cause flooding were selected according to the regional characteristics and based on knowledge of previous outburst cases in the region. The qualitative assessment scheme of the outburst hazard draws also from several published assessment procedures (Ives et al., 2010; Allen et al., 2016; Frey et al., 2010; and Huggel et al., 2004). The total hazard is introduced as a combination of a lake's inner susceptibility to burst and presence of possible triggers that have capacity to cause outburst. Future development of the site is built upon results of glacier evolution model (GERM, Huss et al., 2008). The glacier ice thickness values were obtained from a GPR (ground penetrating radar) survey carried out in 2012 by Dr. Z. Engel. With the known exposed topography, potential spots for formation of new lakes were identified (detection of overdeepenings in ArcMap, ESRI).

## 4. Results and discussion

The problematics of glacial lake development and hydrological conditions of a proglacial area was addressed within four scientific papers. Here is the summary of results and linkage of the individual findings:

- Lake development (Fig. 2) is strongly influenced by the contact with a glacier and presence of buried ice (ice-rich debris) in basin bottom and sides. Lakes in intramorainic depression thus have their development linked to buried glacier remnants, ice blocks and lenses within debris accumulations.

- The most common type of glacial lake and also an outburst trigger (mechanism) varies across mountain areas. In the studied region, the typical lake is formed in an intramorainic depression and its sudden drainage is often caused by subsurface channel opening. In relation to that, an assessment procedure adapted to regional conditions is used to evaluate lake outburst susceptibility.

- Change of outburst susceptibility in future will be linked to permafrost degradation (slope failures), buried ice exposure and melting, formation of new lakes in overdeepenings of the exposed glacier bed, and also change in glacier runoff regime. The ablation season is expected to last longer, snow melting to occur earlier and shift exposure and melting of glacier ice to earlier time of a year. Lake stability may be influenced by varied meltwater inflow and temporal distribution of outburst cases will likely change its pattern.

- As the lakes are fed by glacier meltwater, monitoring of lake water level fluctuations provided useful information on daily and seasonal variations of glacier meltwater runoff. The proglacial lakes showed a typical glacial regime – during an ablation season, there was a distinct evolution of several water level fluctuation characteristics, namely daily amplitude, timing of daily peak, and time lag of daily peak after air temperature maximum. Water level fluctuation during a cold season, when inflow from glacier is very low, revealed properties of lakes' subsurface drainage system (changes in drainage channels capacity, their depth below surface).

- A dye tracer test helped to describe characteristics of water passage through the proglacial environment. According to the observed dye concentrations in the stream, the morainic landform involves a dual system – small part of incoming water is routed efficiently to the stream, larger part is delayed in the system. This system was also described in some moraine complexes and rock glaciers. By comparing the water isotopic composition of individual lakes, the influence of meltwater on a lake's balance was determined. Similarity of isotopic composition between several tarns in the moraine complex and glacier-fed lakes suggest that the tarns have subsurface connection to the meltwater.

There are several thematic areas that were not addressed thoroughly in this thesis, either due to the lack of data, time, resources, or due to the relatively wide thematic scope of this work. One of them is the role of permafrost in the proglacial lake development, their outburst susceptibility, and subsurface water routing. According to the scientific literature and the mean annual air temperature of the site, the upper part of the study site is very likely within the continual permafrost zone, the lower part (morainic complex at ~3500 m a.s.l.) is within the discontinual permafrost zone. However, to describe, for example, the role of permafrost in subsurface drainage system of the lower parts in more detail, precise borehole or geophysical data would be necessary.

Also, proper hydrological balance of the main lakes could not be determined as most of the lakes' inflow and outflow is below the surface and thus hard to quantify. Besides that, measurement of precipitation totals at this exposed site was rather unsuccessful. The summer inflow rates of Lake 2 were estimated based on the discharge measurements of the lake's



surface outflow and approximate capacity of the subsurface drainage channels (based on the cold season water level decline). However, without further knowledge of the lake's watershed (englacial meltwater routing), the share of glacial meltwater passing through this lake (and also the total glacier runoff) cannot be determined.

The comparison of stable water isotopes share in individual water bodies yielded certain results, showing distinctive differences among the tarns. These first-step findings could be build upon with further analyses of stable water isotopic changes within an ablation season and over the course of several years. The data could indicate possible changes in the drainage system of the moraine complex resulting from melting of buried ice or permafrost degradation.

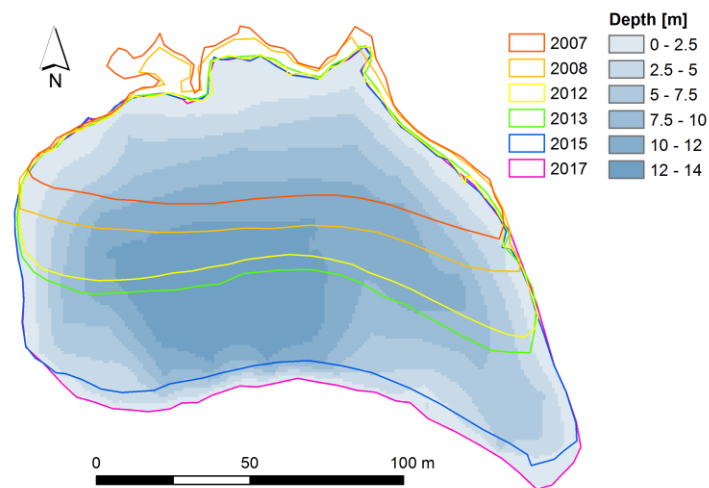


Figure 2. Bathymetric map and area changes of Lake 3 between 2007 and 2017.

## 5. Conclusions

Development of lakes in proglacial area can be, besides contact with a glacier terminus, linked to melting of buried ice blocks and lenses; in that case, the position of 0°C isotherm plays a major role. Mechanism and trigger of lake outburst differs from region to region and thus the susceptibility assessment should be adjusted to local environment. In our case, an important factor is lake's drainage system, which can represent a weak point. Proglacial lakes are the obvious hydrological features of glacier forefield, however, large volume of water can be stored in proglacial landforms (moraine complexes, rock glaciers), which have potential to balance out variations in glacier runoff.



## 1. Úvod

V novém tisíciletí se výrazný ústup ledovců ve vysokohorských oblastech světa (Barry, 2006, Radić a kol., 2014, Zemp a kol., 2015) a jeho důsledky staly všudypřítomným tématem na geovědních setkáních a konferencích, bylo publikováno nespočet vědeckých prací zaměřených na různé aspekty této problematiky. Jedním z důsledků ústupu ledovců jsou změny v hydrologických podmínkách proglaciálního prostředí (Yao et al., 2007; Moore et al., 2009; Huss et al., 2010; Bliss et al., 2014), které jsou výsledkem měnícího se přítoku tavné vody a geomorfologických změn prostředí. Tavná voda z ledovce je důležitou složkou odtoku v ledovcových povodích, zásobuje tok především v letní sezóně a je nepostradatelným zdrojem vody v mnoha oblastech (Bradley et al., 2006, Yao et al., 2007, Akhtar et al., 2008; Sorg et al., 2012). Vedle přínosů, které přináší jako zdroj vody pro zemědělství či výrobu energie, tavná voda nahromaděná v depresích tvořící ledovcová jezera může představovat hrozbu pro níže ležící sídla a infrastrukturu. Proglaciální prostředí je oblast před ledovcovým čelem, která vznikla poté, co ledovec ustoupil do vyšší nadmořské výšky a zanechal za sebou morénové akumulace. Jeho dynamika souvisí také s přítomností permafrostu a jeho degradací, odhalováním a táním pohřbeného ledu a účinkem (erozní, tepelný) vody protékající tímto prostředím. Vzhledem k tomu, že toto specifické hydrologické prostředí kontroluje průchod vody z ledovce do toku a má tak potenciál změnit odtok z povodí, je důležité prohlubovat znalosti o jeho hydrologickém fungování.

## 2. Cíle práce

Cílem práce bylo analyzovat dynamiku proglaciálních jezer a průchod vody z ledovce do toku. Jednotlivé cíle byly následující:

- Vyhodnotit vznik a vývoj ledovcových jezer v souvislosti s ústupem ledovce;
- Monitorovat a vyhodnotit hydrologický režim proglaciálních jezer;
- Shrnout okolnosti případů průvalů jezer ve vysokohorské Asii;
- Vytvořit regionální postup zhodnocení náchylnosti jezer k průvalu;
- Prozkoumat průchod vody skrze morénový komplex do toku.

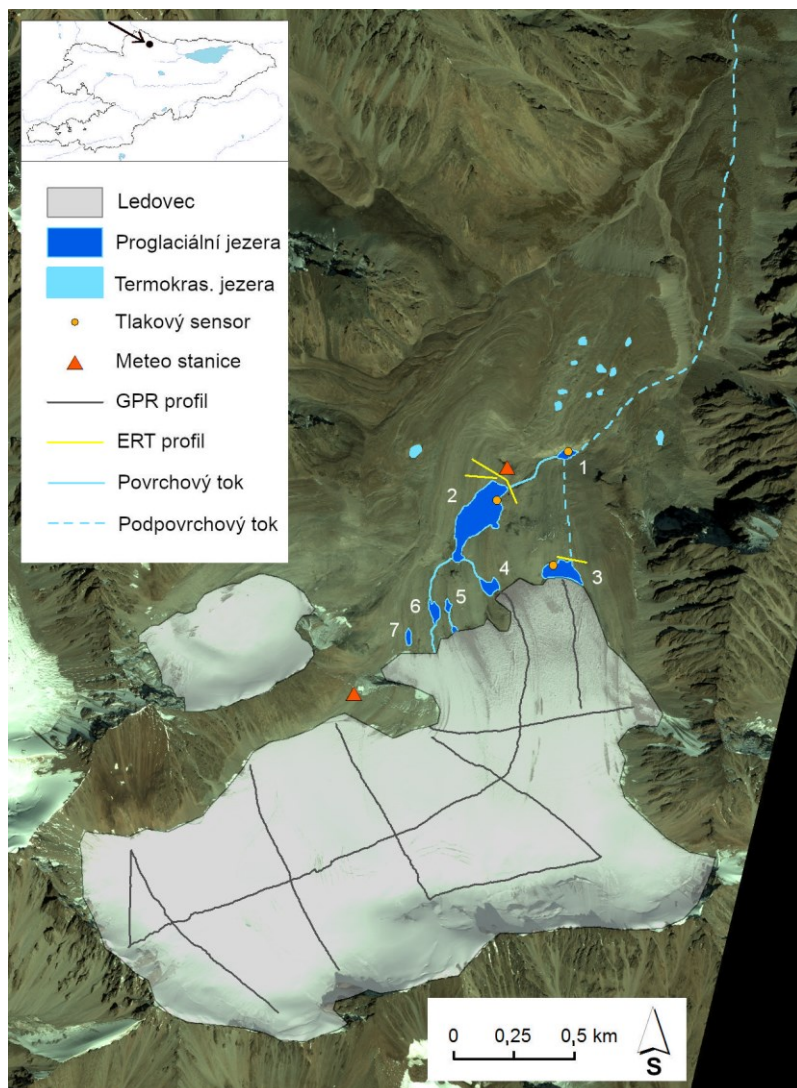
## 3. Materiál a metodika

Studovanou lokalitou je ledovcovo-morénový komplex Adygine, nacházející se v severně orientovaném údolí Kyrgyzského hřbetu, severní Tien Shan, Kyrgyzstán, v nadmořské výšce 3400-4200 m a.s. (Obr. 1).

### 3.1 Vývoj jezer

Postupný ústup ledovcového čela a vznik jezer byl analyzován na základě historických leteckých a satelitních snímků. Nejstarší letecké snímky tohoto místa pocházejí z roku 1962 (měřítko: 1:38 600, rozlišení: 1 m). Dále byly použity satelitní snímky - volně dostupná data Landsat přístupná přes portál USGS a snímek s velmi vysokým rozlišením WorldView-2

z roku 2011. Změny v rozloze jezer jsou od roku 2007 zaznamenávány pomocí geodetických měření. Byla použita totální stanice Leica TCR 705 s reflexním hranolem, přesnost měření je 0,005 m. Od roku 2008 byla také opakovaně měřena hloubka jezer pomocí sonaru (Garmin Fishfinder); metoda batymetrického měření je podrobně popsána v práci Šobr a Česák (2005).



Obrázek 1. Studovaná lokalita Adygine v Kyrgyzském hřbetu, severní Tien Shan. Čísla 1-7 odpovídají proglaciálním jezerům. Poloha lokality označena šipkou na mapě Kyrgyzstánu, levý horní roh.

### 3.2 Hydrologické poměry lokality

Za účelem monitorování hydrologického režimu byly ve třech hlavních jezerech, která jsou napájena ledovcovou tavnou vodou, instalovány snímače tlaku (Levellogger M5, Solinst). Hladina vody v jezeře byla zaznamenávána v 30-ti minutových intervalech s přesností 0,006 m. Nejdelší datová řada je dostupná pro Jezero 2 (2007-2017), další dvě jezera (Jezero 1 a 3) byla sledována v období 2012-2015. Údaje o kolísání hladiny jezer byly doplněny meteorologickými daty z automatických meteorologických stanic instalovaných v nadmořské výšce 3550 m a 3700 m n.m. Při odtoku z Jezera 2 byl změřen průtok (3.-5. srpna 2012)

pomocí hydraulické vrtule (OTT C2) v souladu s ČSN ISO 748. Měrná křivka průtoků byla vytvořena na základě naměřených průtoků a příslušných hodnot výšky hladiny.

Vedle hlavních jezer byla studována také malá termokrasová jezírka, která se nacházejí v morénovém komplexu; zkoumáno bylo jejich možné napojení na podpovrchový odtok tavné vody z lokality. Voda z těchto jezer byla odebrána (25.7. 2017) kvůli analýze poměru stabilních izotopů  $^{18}\text{O}$  a  $^2\text{H}$ . Analýza byla provedena v izotopové laboratoři v Českých Budějovicích, Akademie věd České republiky.

K prozkoumání podpovrchového toku tavné vody morénou byla provedena stopovací zkouška (22.-24.7. 2017). Pro tento účel bylo vybráno fluorescenční barvivo nazvané uranin (sodná sůl fluoresceinu), protože je netoxické, snadno rozpustné ve vodě a je detekovatelné i při velmi nízké koncentraci ( $10^{-12}$  g ml $^{-1}$ ). Do Jezera 1 bylo injektováno 3000 g uraninu. Vzorky vody byly odebírány z toku v hodinových intervalech, v místě vzdáleném 3100 m od místa injektace. Vzorky byly analyzovány ve fluorometru (LS55, Perkin Elmer) s excitační vlnovou délkou 492 nm, vrchol emise uranu byl pozorován při intenzitě 512 nm. Výška výsledného vrcholu byla srovnávána se standardními koncentracemi  $10^{-10}$  -  $10^{-12}$  g ml $^{-1}$ .

### 3.3 Náchylnost jezer k průvalu

Za účelem posouzení možných spouštěčů průvalu jezer byla použita kombinace mapování v terénu, analýzy DEM a satelitních snímků. Digitální model terénu SRTM (rozlišení ~30 m) sloužil k posouzení sklonitosti svahů v okolí jezer, které by mohly být místem zahájení gravitačního procesu, jako je skalní řízení, sesuv nebo lavina. Geofyzikální průzkum provedený v roce 2008 společností G Impuls Praha spol. s r.o. (metoda elektrické odporové tomografie) sloužil ke zjištění přítomnosti pohřbeného ledu a průsakových cest skrz hráz jezer.

Parametry charakterizující náchylnost jezera k průvalu a vzniku povodně byly vybrány podle regionálních charakteristik a založené na znalostech z předchozích případů průvalů v regionu. Schéma kvalitativního posouzení náchylnosti k průvalu čerpá také z několika publikovaných postupů hodnocení (Ives et al., 2010, Allen a kol., 2016, Frey et al., 2010 a Huggel a kol., 2004). Celkové nebezpečí je představeno jako kombinace náchylnosti samotného jezera a přítomnosti možných spouštěčů, které mohou průval vyvolat. Odhad budoucího vývoje lokality je založen na výsledcích modelu GERM (Huss et al., 2008). Na části reliéfu, kde se kolem roku 2050 předpokládá úplné zmizení ledovce, byla identifikována potenciální místa pro vznik nových jezer. Hodnoty mocnosti ledu byly získány z průzkumu pomocí georadaru, který v roce 2012 provedl Doc. Z. Engel.

## 4. Výsledky a diskuse

Problematika vývoje ledovcových jezer a hydrologických podmínek proglaciální oblasti byla řešena v rámci čtyř odborných článků. Zde je shrnutí výsledků a propojení jednotlivých zjištění:

- Vývoj jezer (Obr. 2) je silně ovlivněn kontaktem s ledovcem a přítomností pohřbeného ledu a promrzlého materiálu tvořícího jezerní pánev. Jezera ve vnitromorénové depresi tak mají svůj vývoj spojený především s pozůstatky ledovce a ledových čoček v morénových akumulacích.

- Nejběžnější typ ledovcového jezera a také spouštěcí mechanismus průvalu se v horských oblastech liší. Ve studované oblasti se jezera nejčastěji vytváří ve vnitromorénové depresi a jejich náhlé vyprázdnění je často umožněno podpovrchovými odtokovými cestami. V souvislosti s tím se k vyhodnocení náchylnosti jezer k průvalu používá postup hodnocení přizpůsobený místním podmínkám.

- Změna náchylnosti k průvalu bude v budoucnu pravděpodobně spojena s degradací permafrostu (poruchy stability svahu), s obnažením a táním pohřbeného ledu, vznikem nových jezer v odledněných částech terénu a také se změnou režimu ledovcového odtoku. Očekává se, že ablační sezóna bude oproti současnosti delší, tání sněhu začne dříve a tím dojde i k dřívějšímu počátku tání ledovcového ledu. Stabilita jezera může být ovlivněna změnami v režimu přitékající tavné vody a načasování průvalů jezer se pravděpodobně změní.

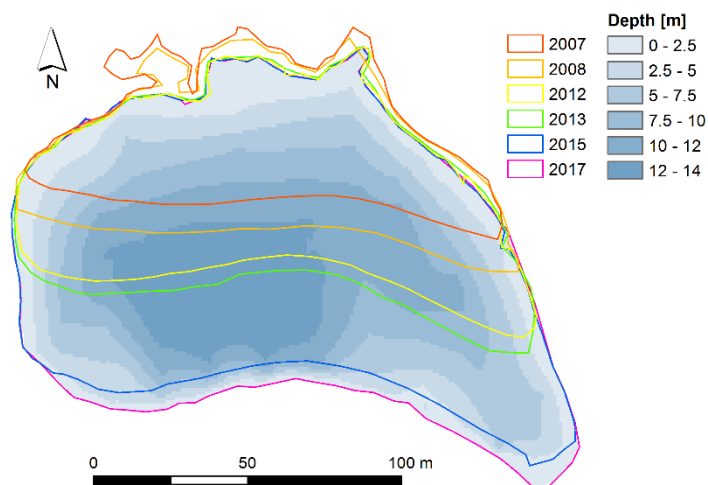
- Jelikož jsou jezera napájena tavnou vodou z ledovce, sledování kolísání hladiny v jezeře poskytlo užitečné informace o denních a sezónních změnách odtoku z ledovce. Proglaciální jezera vykazují typický ledovcový režim - během ablačního období dochází k vývoji několika charakteristik kolísání hladiny, jmenovitě denní amplitudy, načasování denního maxima a časového zpoždění denního maxima za maximální teplotou vzduchu. Kolísání hladiny vody v chladné sezóně, kdy je přítok z ledovce minimální, odhalilo více o vlastnostech podzemního odvodňovacího systému jezer (změny kapacity odvodňovacích kanálů, jejich hloubka pod povrchem).

- Stopovací zkouška pomohla popsat parametry průchodu vody proglaciálním prostředím. Podle zjištěných koncentrací barviva v toku se zdá, že v rámci morénového komplexu se vyvinul dvojitý systém odtoku - malá část příchozí vody je efektivně odváděna do toku, větší část je zpožděna v systému. Porovnáním izotopového složení vody jednotlivých jezer se určil vliv tavné vody na jejich hydrologickou bilanci. Podobnost izotopového složení několika jezírek v morénovém komplexu s ledovcem napájenými jezery naznačuje jejich podpovrchové spojení s odtokovým systémem.

Existuje několik tematických okruhů, které nebyly v této práci řešeny do hloubky, ať již kvůli nedostatku dat, času, zdrojů nebo kvůli relativně širokému tematickému záběru této práce. Jedním z nich je role permafrostu ve vývoji proglaciálních jezer, jejich náchylnosti k průvalu a v podpovrchovém proudění vody. Na základě odborné literatury a průměrné roční teploty vzduchu v lokalitě je horní část lokality velmi pravděpodobně v souvislé zóně permafrostu, dolní část (morénový komplex ve výšce přibližně 3500 m n.m.) se nachází v nesouvislé zóně permafrostu. Nicméně pro podrobnější popis například role permafrostu v podpovrchovém odtokovém systému morénového komplexu by byla nezbytná přesná data z vrtů nebo geofyzikálních měření.

Rovněž nebylo možné určit hydrologickou bilanci hlavních studovaných jezer, protože většina přítoků a odtoků je vedena pod povrchem a je tak obtížné je kvantifikovat. Mimo to se dlouhodobě nedařilo zajistit spolehlivé měření srážkových úhrnů na této lokalitě. Přítok do Jezera 2 byl odhadnut na základě měření průtoku povrchového odtoku z jezera a přibližné kapacity jeho podpovrchových odtokových kanálů (na základě poklesu hladiny v chladném období). Nicméně bez znalosti rozsahu povodí tohoto jezera (rozmístění vnitroledovcových odtokových kanálů) nebylo možné určit podíl ledovcové tavné vody procházející tímto jezerem ani celkový odtok z ledovce.

Porovnání podílu stabilních izotopů vody v jednotlivých jezerech přineslo určité výsledky, které poukázaly na výrazné rozdíly mezi jezírky v morénovém komplexu. Na těchto prvních výsledcích by bylo dobré stavět další analýzy a sledovat změny stabilních izotopů vody v průběhu ablačního období a během několika let. Dlouhodobější data by mohla přinést informace o možných změnách v odtokovém systému morénového komplexu.



Obrázek 2. Batymetrická mapa a změny rozlohy Jezera 3 mezi roky 2007 a 2017.

## 5. Závěry

Vývoj jezer v proglaciální oblasti může být, kromě kontaktu s ledovcem, spojen s táním pohřbených ledovcových bloků a čoček; v tomto případě hraje významnou roli poloha nulové izotermy. Mechanismus a spouštění průvalu jezera se liší od regionu k regionu, proto by i posouzení náchylnosti k průvalu by mělo být přizpůsobeno danému prostředí. V našem případě je důležitým faktorem podpovrchový systém odtoku z jezera. Proglaciální jezera jsou zjevnými hydrologickými prvky ledovcového předpolí, avšak velké množství vody může být tako zadrženo v proglaciálních akumulacích jako jsou morénové komplexy či skalní ledovce.

## References

- Akhtar, M., Ahmad, N., & Booij, M. J. (2008). The impact of climate change on the water resources of Hindukush–Karakorum–Himalaya region under different glacier coverage scenarios. *Journal of hydrology*, 355(1-4), 148-163. doi: 10.1016/j.jhydrol.2008.03.015
- Allen, S. K., Linsbauer, A., Randhawa, S. S., Huggel, C., Rana, P., & Kumari, A. (2016). Glacial lake outburst flood risk in Himachal Pradesh, India: an integrative and anticipatory approach considering current and future threats. *Natural Hazards*, 84(3), 1741-1763. doi: 10.1007/s11069-016-2511-x
- Barry, R. G. (2006). The status of research on glaciers and global glacier recession: a review. *Progress in Physical geography*, 30(3), 285-306. doi: 10.1191/0309133306pp478ra
- Bliss, A., Hock, R., & Radić, V. (2014). Global response of glacier runoff to twenty-first century climate change. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 119(4), 717-730. doi: 10.1002/2013jf002931
- Bradley, R. S., Vuille, M., Diaz, H. F., & Vergara, W. (2006). Threats to water supplies in the tropical Andes. *Science*, 312(5781), 1755-1756. doi: 10.1126/science.1128087
- Frey, H., Haeberli, W., Linsbauer, A., Huggel, C., & Paul, F. (2010). A multi-level strategy for anticipating future glacier lake formation and associated hazard potentials. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10(2), 339-352. doi: 10.5194/nhess-10-339-2010
- Huggel, C., Haeberli, W., Kääh, A., Bieri, D., & Richardson, S. D. (2004). An assessment procedure for glacial hazards in the Swiss Alps. *Canadian Geotechnical Journal*, 41, 1068-1083. doi: 10.1139/t04-053
- Huss, M., Juvet, G., Farinotti, D., & Bauder, A. (2010). Future high-mountain hydrology: a new parameterization of glacier retreat. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(5), 815-829. doi: 10.5194/hessd-7-345-2010
- Huss, M., Farinotti, D., Bauder, A., & Funk, M. (2008). Modelling runoff from highly glacierized alpine drainage basins in a changing climate. *Hydrological processes*, 22(19), 3888-3902. doi: 10.1002/hyp.7055
- Ives, J. D., Shrestha, R. B., & Mool, P. K. (2010). Formation of glacial lakes in the Hindu Kush-Himalayas and GLOF risk assessment. Kathmandu: ICIMOD.
- Moore, R. D., Fleming, S. W., Menounos, B., Wheate, R., Fountain, A., Stahl, K., Holm, K., & Jakob, M. (2009). Glacier change in western North America: influences on hydrology, geomorphic hazards and water quality. *Hydrological Processes*, 23, 42-61. doi: 10.1002/hyp.7162
- Radić, V., Bliss, A., Beedlow, A. C., Hock, R., Miles, E., & Cogley, J. G. (2014). Regional and global projections of twenty-first century glacier mass changes in response to climate scenarios from global climate models. *Climate Dynamics*, 42(1-2), 37-58. doi: 10.1007/s00382-013-1719-7
- Sorg, A., Bolch, T., Stoffel, M., Solomina, O., & Beniston, M. (2012). Climate change impacts on glaciers and runoff in Tien Shan (Central Asia). *Nature Climate Change*, 2(10), 725. doi: 10.1038/nclimate1592
- Šobr, M. and Česák, J. (2005). Metody batymetrického mapování českých jezer. *Geografie*, 110, 141-151.
- Yao, T., Pu, J., Lu, A., Wang, Y., & Yu, W. (2007). Recent glacial retreat and its impact on hydrological processes on the Tibetan Plateau, China, and surrounding regions. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 39(4), 642-650. doi: 10.1657/1523-0430(07-510)[yao]2.0.co;2
- Zemp, M., Frey, H., Gärtner-Roer, I., Nussbaumer, S. U., Hoelzle, M., Paul, F., ... & Bajracharya, S. (2015). Historically unprecedented global glacier decline in the early 21st century. *Journal of Glaciology*, 61(228), 745-762. doi: doi.org/10.3189/2015jog15j017



# Curriculum Vitae

## RNDr. Kristýna FALÁTKOVÁ

Born: 20. 9. 1988, Hradec Králové, Czechia

Email: kristyna.falatkova@natur.cuni.cz

### Education

- **2014 –** Doctor study program: Physical Geography and Geoecology, Faculty of Science, Charles University, Czechia  
Thesis: Dynamics of glacial lakes and hydrological conditions of a glacial-morainic complex (Adygine, northern Tien Shan)
- **2011 – 2014** Master study program: Physical Geography and Geoecology, Faculty of Science, Charles University, Czechia  
Thesis: Glacial outburst lakes in Kyrgyzstan (Case study: glacier complex Adygine)
- **2008 – 2011** Bachelor study program: Geography and Cartography, Faculty of Science, Charles University, Czechia  
Thesis: Risk analysis methods of natural catastrophic processes in high mountain areas

### Research and Academic Experience

- **2018** Active participation at Swiss Geosciences Meeting, Bern, Switzerland
- **2014–2017** Active participation at EGU conferences in Vienna, Austria
- **2017** Active participation at Alpine Glaciology Meeting, Zürich, Switzerland
  
- **2018** Short-term research stay at Glaciology and Geomorphodynamics Group, University of Zürich, Switzerland
- **2016–2017** Research stay at CC-MoRe (Climate Change in Mountain Regions) group, University of Graz, Austria
- **2014** Participation at 17th European Seminar on Geography of Water, Padua (Italy)
- **2013** Short-term research stay at Glaciology and Geomorphodynamics Group, University of Zürich, Switzerland
  
- **2012–2017** Research campaigns in Tien Shan Mts, Kyrgyzstan, research team member - department of physical geography and geoecology, Charles University
  
- **2012–13** Principal investigator of a GA UK grant project no. 619112: “Risk Analysis of Glacial Outburst Lakes at Adygine, Tien Shan Mts, Kyrgyzstan”

## Language skills

- **English** advanced (C1)
- **French** intermediate (B1)
- **Italian** pre-intermediate (A2)

## List of publications

- **Falátková, K., Šobr, M., Kocum, J., Janský, B.** (2014): Hydrological Regime of Lake Adygine, Tien Shan, Kyrgyzstan. *Geografie*, 119, No. 4, pp. 320-341
- **Falátková, K.** (2016). Temporal analysis of GLOFs in high-mountain regions of Asia and assessment of their causes. *AUC Geographica*, 51(2), 145-154.
- Vlček, L., **Falátková, K.**, Schneider, P. (2017). Identification of runoff formation with two dyes in a mid-latitude mountain headwater. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(6), 3025.
- Zaginaev, V., **Falatkova, K.**, Jansky, B., Sobr, M., Erokhin, S. (2019). Development of a Potentially Hazardous Pro-Glacial Lake in Aksay Valley, Kyrgyz Range, Northern Tien Shan. *Hydrology*, 6(1), 3.
- **Falatkova, K.**, Šobr, M., Neureiter, A., Schöner, W., Janský, B., Häusler, H., Engel, Z., Beneš, V. (2019). Development of proglacial lakes and evaluation of related outburst susceptibility at Adygine ice-debris complex, northern Tien Shan. *Earth Surface Dynamics* (in press).
- **Falatkova, K.**, Šobr, M., Slavík, M., Bruthans, J., Janský, B. (2019). Hydrological and isotopic characterisation of proglacial lakes and their connectivity, Adygine glacier-moraine complex, northern Tien Shan. *Hydrological Sciences Journal* (in review).

