

1. Pevnost Toprak Kala bývala v 1. tisíciletí centrem Chórezmské říše, kde sídlil šáh. Zasolená půda se dnes vyskytuje všude v blízkosti zavlažovacích kanálů. Všechny snímky na s. 220–226  
© Lukáš Synek, není-li uvedeno jinak.

ANNA PÍŠKOVÁ  
TOMÁŠ MATYS GRYGAR

# Aralské jezero

*3. Jak se proměňovalo  
v posledních tisíciletích*

**A**ralské jezero bylo před padesáti lety čtvrtým největším jezerem světa. Jednotlivá vodní plocha vyplňující území o rozloze téměř celé České republiky se postupným snižováním hladiny rozdělila na několik menších vodních ploch. Je možné v hlubší minulosti jezera najít stopy objasňující příčiny současné ekologické katastrofy?

### Za všechno člověk nemůže

Vysychání Aralského jezera představuje pro mnohé typický příklad člověkem způsobené ekologické katastrofy. Bylo proto docela překvapivé, když nedávno obnažené břehy mizějícího jezera začaly vydávat svědectví o bývalém středověkém osídlení. Jak je možné, že byla hladina před několika staletími tak nízko jako dnes? Změny v Aralském jezeře za posledních 50 let jsou dobře prostudované a známé i široké veřejnosti (viz předchozí díly, Vesmír 90, 82, 2011/2 a 90, 148, 2011/3). Jak se ale změnila tvář Aralského jezera v průběhu posledních tisíciletí? Díky intenzivní vědecké práci už víme, že Aralské jezero v minulosti vysychalo dokonce opakovaně. Logicky se tak nabízí otázka, nakolik jsou změny v jezeře opravdu zaviněné člověkem. Klimatické a antropogenní vlivy se v tomto případě odlišují podobně nesporně jako příčiny současného globálního oteplování.

### Vodní bilancování

Aralské jezero je bezodtoké tektonické jezero ležící v oblasti se semiaridním až aridním klimatem, trpí tedy nízkými srážkami a vysokým výparem. Už z toho je zřejmé, že jeho hladina nebude v čase stálá. Pro bezodtoká jezera je charakteristické kolísání hladiny jako výsledek jemného vyvážení výparu na straně jedné a srážek a přítoků na straně druhé. Jezera v závislosti na klimatických podmínkách zcela přirozeně vznikají a zanikají: nejběžnějším příkladem mohou být četná ledovcová jezera nebo solná příbřežní jezera. U Aralu je však potřeba pracovat s větší měřítky. Povodí dvou nejvýznamnějších přítoků, Amudarji a Syrdarji, zaujímá velmi rozsáhlé území, jehož vodní režim ovlivňují složité klimatické systémy: indické monzony a sibiřská tlaková výše. Situace v Aralském jezeře je tedy odrazem stavu širšího regionu. Pokud by se jezero ukázalo jako dobrý klimatický archiv, bylo by možné studiem jeho minulého vodního režimu významnou měrou přispět k naší představě o vývoji klimatu přinejmenším ve Střední Asii.

Zásadní otázka je, zda hladina Aralského jezera při dlouhodobém zvýšení teplo-



2. *Agama* stepní *Trapelus sanguinolentus*.

ty klesala, nebo se naopak oteplením zvedala. Vzrostle-li teplota, v oblastech pramenů obou přítoků masivně odtávají ledovce, ale zároveň vzrůstá odpar v celém povodí včetně jezerní plochy. Naopak v chladnějším období narůstají ledovcové masy a zadržují tavnou ledovcovou vodu potenciálně tekoucí do Aralského jezera a odpar je zase nižší. Která strana bilance převažovala? Odpověď lze nalézt například v sedimentárním záznamu nebo v jiných „hmotných“ archivech.

### Různé přístupy ke studiu historie jezera

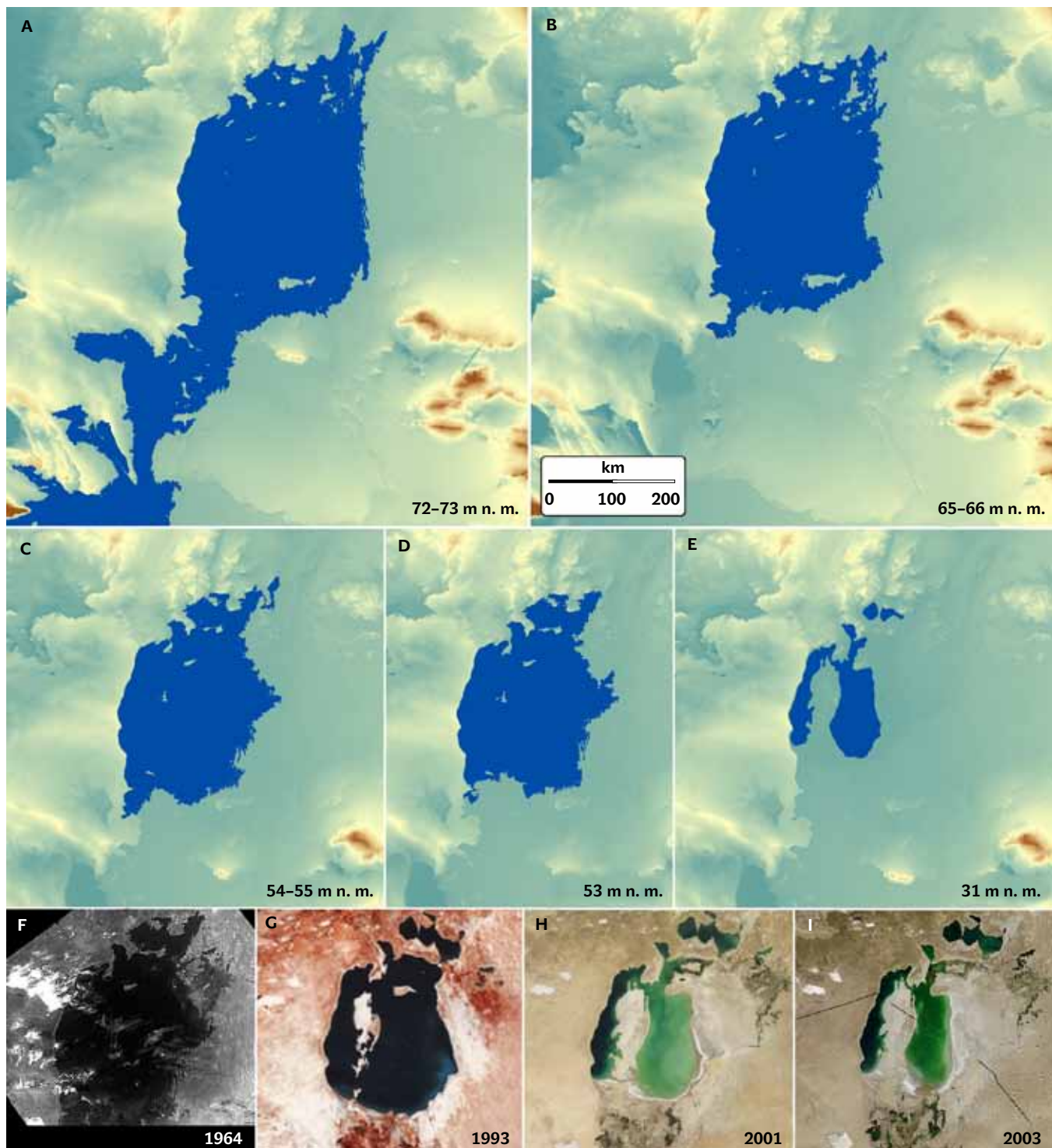
Naše znalosti o proměnách Aralského jezera se opírají zejména o tři typy studií: archeologické, geomorfologické a (paleo)klimatologické. Každý z uvedených oborů využívá jiný studijní materiál a odlišné metody. Z archeologických průzkumů a historických pramenů vyplývá, že lidé žijí v oblasti nepřetržitě už nejméně osm tisíc let. Nejstarší doložené zavlažovací systémy pocházejí z druhého tisíciletí před Kristem. Nelze tedy dát do přímé souvislosti zjištěné snížení hladiny Aral-

3. Pískomil druhu *Rhombomys opimus*.



Mgr. Anna Pišková, Ph.D., viz Vesmír 90, 82, 2011/2.

RNDr. Tomáš Matys Grygar, CSc., (\*1964) studoval analytickou chemii na Přírodovědecké fakultě UK v Praze. Pracuje v Analytické laboratoři oddělení Ústavu anorganické chemie AV ČR, v. v. i., v Řeži u Prahy. Vědeckou práci začal elektrochemickou analýzou oxidů železitých. V posledních deseti letech vyvíjí i další metody analýzy pevných látek včetně jemných nezapevněných sedimentů, jejichž studium je součástí paleoenvironmentálních rekonstrukcí.

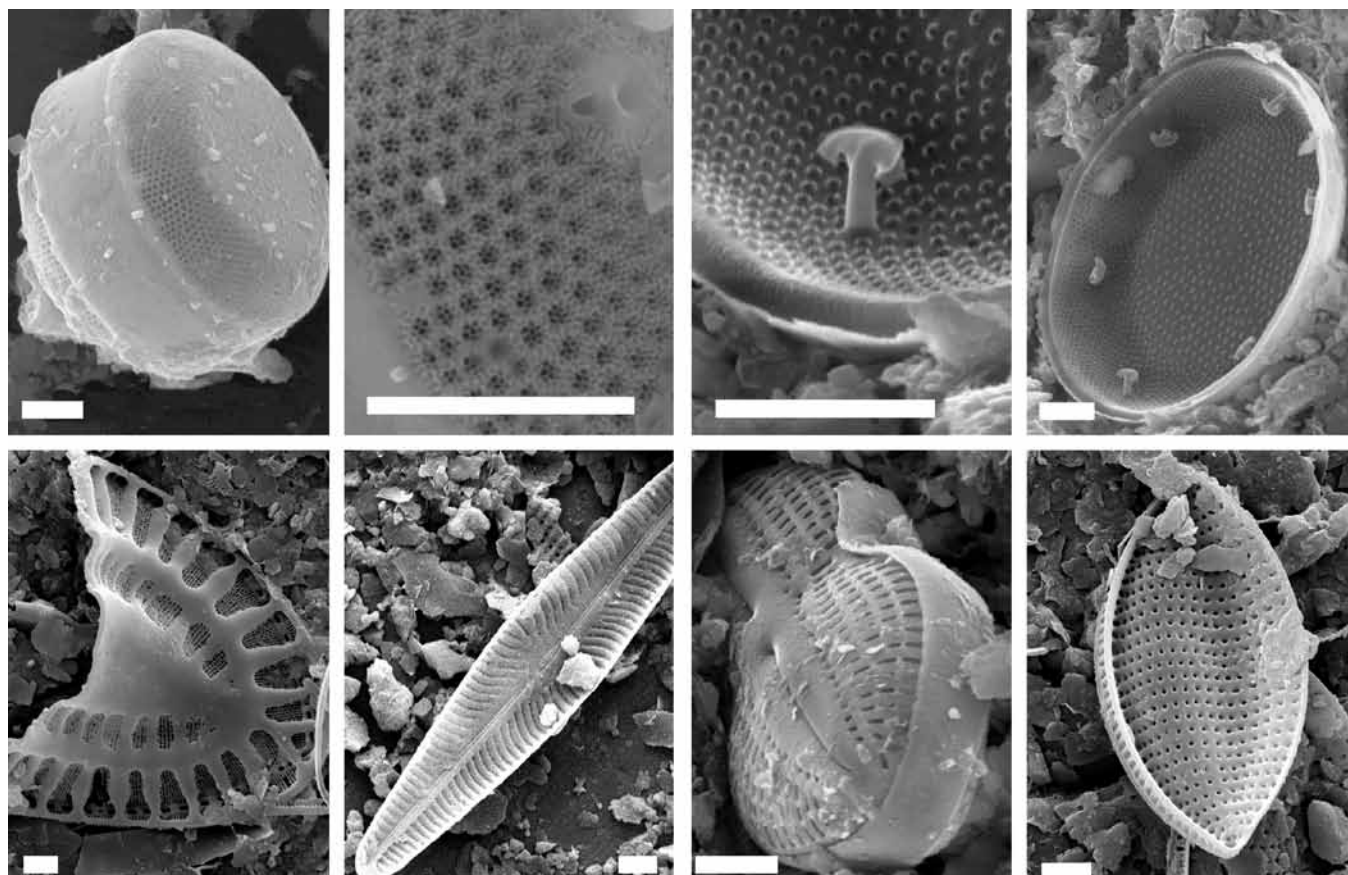


4. A-E - modely hladiny Aralského jezera z geomorfologické studie: A - terasa I, B - nejvyšší možná hladina podle geomorfologů, C - terasa III, D - terasa IV, E - terasa VIII. Zdroj: Boomer et al. (2009). F-I - satelitní snímky aralské oblasti z let 1964-2003, měřítko pouze přibližné kvůli rozdílnému úhlu snímání. Snímky NASA - MODIS.

ského jezera za posledních několik tisíc let pouze s klimatem. Podrobným studiem a datování nalezišť starých sídel obnažených ustupující vodou archeologové vytvořili ucelený přehled poklesů hladiny v minulosti (obr. 6). Geomorfologové vyřešili stejný problém pospojováním zbytků sedimentů a teras nalezených v terénu (rovněž obr. 6), které po sobě v minulosti zanechalo jezerní pobřeží a přítoky, ale čitelnost terénu komplikuje tektonická aktivita území.

Sedimentární záznamy umožňují rekonstrukci hlubší minulosti. Vždy je však na místě dát nalezené informace do souvislosti s dalšími klimatickými archivy. Tento postup jsme zvolili i pro naši několikaletou studii, prováděnou v Ústavu anorganické

chemie AV ČR, v. v. i., v Řeži, která vznikla díky spolupráci s GeoForschungsZentrum v Postupimi u Berlína. Studovali jsme sedimentární jádro, pocházející ze severní části Západní pánve Aralského jezera, které bylo na první pohled velmi atraktivní, tedy alespoň pro přírodovědce – krásný šedý až namodralý jííl, místy tmavší, místy s bělavými, hrubšími vrstvami a s několika horizonty bohatými na mušle. Co všechno se dá z takového sedimentu vyčíst? Pokud si člověk dá tu práci a chodí se svým „bahýnkem“ od přístroje k přístroji, vyesedává týdny u mikroskopu nebo spektrometru, dostane řadu různých grafů a hodnot, z nichž se dá vyčíst minerální nebo prvkové složení a také zástupné (proxy) hodnoty, odpovídající celkové biolo-



gické produktivitě jezera (například koncentrace chlorofylu).

Pro stanovení poklesu jezerní hladiny mají velký význam polohy a druh vysrážených solí, protože je podle nich možné odhadnout salinitu. Uložení solí v sedimentu, který jsme studovali, neodpovídá předpokládané učebnicové sekvenci uhličitany – sírany – chloridy, jež je typická pro většinu přirozeně vysychajících vodních ploch. Jako ukazatele nízké hladiny nám tak posloužily vrstvy sedimentu s vysráženým sádrovcem. Tyto intervaly jsme doplnili výsledky z interpretací ostatních metod, zejména rozsvíkové analýzy (viz rámeček na této straně), a vytvořili nezávislý model pohybů jezerní hladiny. Právě rozsvíková analýza je dnes při rekonstrukci vývoje prostředí a klimatu v historické minulosti velkým hitem a neselhala ani v případě Aralského jezera.

Měli jsme tedy minimálně tři nezávislá řešení stejného problému. Nejprve jsme se nechali svést na scesti použitím dnes populárního přístupu „automatického“ přepočtu složení rozsvíkových společenstev na salinitu, ale výsledky nebyly uspokojivé. Proto jsme nakonec přijali holističtější přístup, při kterém do sebe musejí zapadnout všechny informace a interpretace jako v tradiční detektivce Agathy Christie.

#### Jak velké bylo největší Aralské jezero?

Podobně jako bylo území dnešní Sahary ještě před 8500 lety zelené a změnilo se v poušť vlivem klimatických a dalších změn (Vesmír 88, 166, 2009/3), tak i oblast Aralského jezera byla v době holocénního klimatického optima jiná. Při trojnásobně intenzivních sráž-

5. Fotografie křemitých schránek aralských rozsvíků z elektronového mikroskopu. Schránku (frustulu) obvykle tvoří dvě do sebe zapadající misky, její rozmanitá struktura nese druhové znaky. Měřítko 10 mikrometrů. Snímek © Anna Píšková.

kách pozbývalo území dnešní nehostinnosti a není divu, že oblast byla již v té době hojně osídlená. Před 7500 lety hovoříme o tzv. období Velkého Aralu, ale jeho tehdejší velikost je dnes předmětem živých sporů. Pře se vede zejména o případnou existenci terasy I v úrovni 72 m n. m. (obr. 4A), což je nad současným stavem více než o 45 výškových

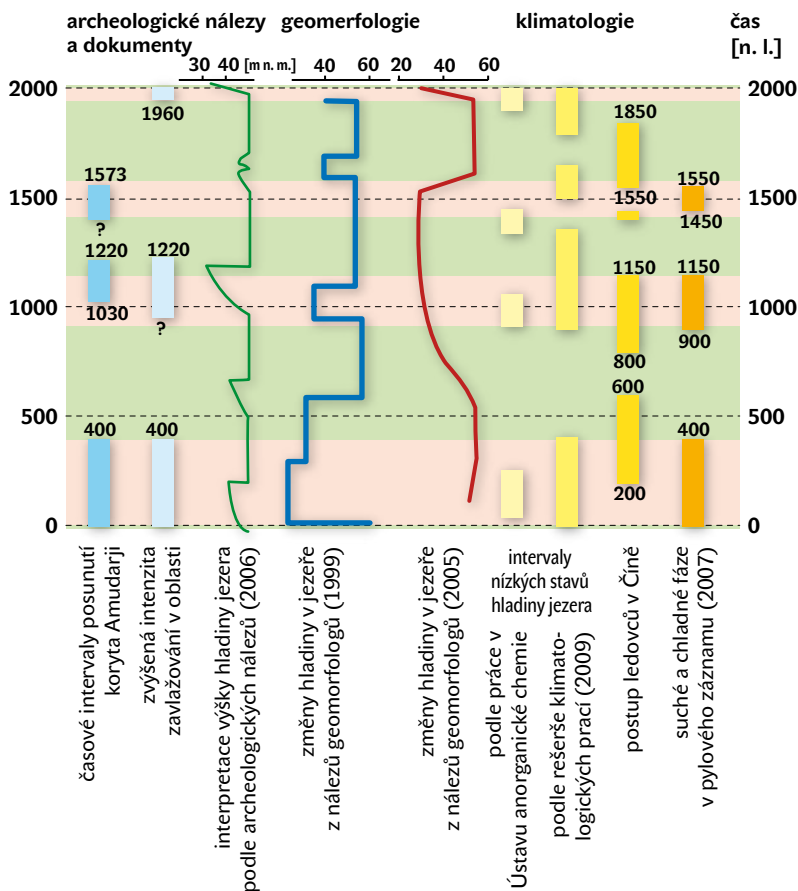
#### ROZSVÍKOVÁ ANALÝZA

Jde o metodu, při které se ze vzorku sedimentu připraví tenký film na mikroskopickém podložním sklíčku a ten se pozoruje optickým mikroskopem nejčastěji při zvětšení 1000×. Určuje se četnost a druhové zařazení rozsvíků podle jejich dochovaných, poměrně odolných křemitých schránek. Rozsvíková analýza se nejčastěji používá v současných ekologických studiích ze vzorků vod i mladých dnových sedimentů. Při studiu starších sedimentů s fosilními rozsvíkovými schránkami, tedy při paleoekologických studiích se odvozují životní podmínky nalezených fosilních společenstev na principu aktualismu, tedy na základě současných ekologických studií. Změny společenstev nebo rozdílů ve výskytu určitých druhů pozorovaných v rámci sedimentárního záznamu nám napovědí, kdy pravděpodobně nastaly změny prostředí. Rozsvíky jsou výbornými paleoindikátory prostředí zejména díky své všudypřítomnosti, druhově specifickým ekologickým nárokům a mnohdy velmi dobrému zachování křemitých schránek v sedimentech. Problémem u rozsvíkové analýzy bývá někdy určování druhů – velké množství z nich lze spolehlivě odlišit jen při zvětšení přesahujícím možnosti optické mikroskopie. Ještě základnější může být interpretace, protože informace o nárocích jednotlivých druhů chybějí, nebo o nich v literatuře najdeme protichůdné údaje. Aralské jezero a jeho vzorky jsou pro českého badatele tvrdý oříšek už proto, že se v něm vyskytuje málo kosmopolitních druhů, většina jich je slanomilných a endemických, tedy hůře určitelných a méně poznaných, pokud jde o jejich nároky. Nám se podařilo z více než stovky určených druhů vysledovat významný trend hojně se vyskytující mořské rozsvíky *Actinocyclus octonarius*, jejíž maxima střídá *Tryblionella compressa* (obr. 5). Tyto rozsvíky jsou citlivé na výšku vodního sloupce, pod kterým žijí. Jejich sukcese má tedy prokazatelný vztah k změnám hladiny v jezeře.

## NEJISTOTY V DATOVÁNÍ

K datování aralských sedimentů se nejčastěji používá radiouhlíková metoda založená na obsahu radioaktivního izotopu uhlíku  $^{14}\text{C}$ . S její pomocí lze zjistit stáří různých typů vzorků s obsahem organického materiálu (např. řas, schránek vodních živočichů, kmenů stromů). Aralské sedimenty jsou bohužel chudé na výskyt datovatelného materiálu, takže v nich je možné datovat jen některé polohy bohaté na zbytky řas a na schránky měkkýšů. Obsah  $^{14}\text{C}$  v atmosféře, přesněji poměr stabilních izotopů ( $^{12}\text{C}$  a  $^{13}\text{C}$ ) k nestabilnímu  $^{14}\text{C}$ , je sice poněkud proměnlivý, ale v posledních tisíciletích existuje dostatek referenčních křivek vývoje tohoto poměru hodnot. Obvykle tedy stačí naměřené hodnoty obsahu  $^{14}\text{C}$  v celkovém C v datovaném vzorku proložit jednou z takových kalibračních křivek a odečíst jeho skutečné, tzv. kalendářní stáří. Bohužel v některých případech není hodnota na křivce matematicky jednoznačná, takže datum nelze s jistotou určit, ale výsledkem je několik možných intervalů stáří. Tato nejednoznačnost je typická pro období posledních 350 let, kdy podstatně kolísala sluneční aktivita, a tedy i tvorba  $^{14}\text{C}$  v atmosféře, což výrazně snižuje přesnost metody právě z doby, která nás dnes zajímá skoro nejvíce. Dalším problémem při datování materiálu z Aralského jezera je tzv. rezervoárový efekt, tedy situace, kdy uhlík v jezerní vodě (obecně v rezervoárech) už není v termodynamické rovnováze mezi rozpuštěnými uhličitany a oxidem uhličitým v rezervoáru a oxidem uhličitým v atmosféře, takže se v rezervoáru hromadí „starý uhlík“ s podstatně menším obsahem  $^{14}\text{C}$ , než odpovídá rychlosti jeho rozkladu na stabilní izotop. Pokud si organismy, jejichž materiál chceme datovat, budoují svá těla z takového staršího uhlíku, dává jejich datování hodnoty starší, než opravdu byly. Pro Aralské jezero byla hodnota tohoto efektu při vysokém stavu jezera odhadnuta na 140 let – pro srovnání rezervoárový efekt v mnohem objemnějších oceánech se počítá v řádu tisíců let. Potíž je v tom, že hodnota tohoto efektu je proměnlivá zejména v závislosti na výšce jezerní hladiny (mineralizaci vody). Dostáváme se tak do kruhu, v němž na jedné straně chceme znát stáří sedimentů, abychom časově určili jednotlivé jezerní fáze, a na straně druhé bychom potřebovali znát, jak vysoko byla kdy hladina, a tedy jaký mohl být příslušný rezervoárový efekt, abychom správně sestavili datovací model. Výsledné nejistoty v datování jednotlivých studií tak dosahují neuspokojivých  $\pm 100$  i více let. Tato nejistota zřejmě vysvětluje neshodu datování předposledního velkého poklesu hladiny jezera.

6. Vývoj různých parametrů vztahujících se k Aralskému jezeru za poslední dva tisíce let. Barevně jsou zvýrazněna pravděpodobná období jezerních regresí. Podle různých zdrojů.



metrů. Nejnovější geomorfologické modely existenci terasy I popírají s vysvětlením, že by se voda přelila do Kaspického moře, a nabízejí střídmejší hypoteticky možnou maximální hladinu 65 m n. m. (obr. 4B), nebo se dokonce přiklánějí k maximu na pouhých 55 m (obr. 4C), což je jen o 2 metry výše než r. 1960 (obr. 4D). Tyto změny jsou dosti podstatné, protože každý výškový metr znamená v některých částech jezera rozliv hladiny o kilometry. Naše výsledky rozsivkové analýzy by terasu I spíše podpořily, protože jsme našli druhy zaznamenané pod překvapivě vysokým vodním sloupcem. Vysvětlení nabízí tektonický výzdvih celého území, který mohl být za poslední dva tisíce let až o 20 m. Díky výzdvihu tedy mohla být hladina na dnešních 72 m n. m., aniž by došlo k přelití vody do Kaspického moře.

## Co se dělo v posledních tisíciletích?

Na poslední dva tisíce let, které nás asi nejvíce zajímají, se zaměřuje několik nedávných studií. Vynořuje se již poměrně podrobný obraz. Téměř všichni se shodnou na čtyřech významných úbytcích objemu jezerní vody (obr. 6). Bohužel mezi jednotlivými autory není shoda v datování, délce trvání ani v intenzitě jednotlivých epizod. K nesrovnalostem velkou měrou přispívá nejistota v datování (viz rámeček na této straně).

Největší shoda panuje u nejstaršího dobře doloženého ústupu jezerní hladiny, které se odehrálo na počátku našeho letopočtu (asi 0–400). Jezero tehdy mělo hladinu stejně nízko jako dnes. Příčiny jsou zřejmě dvojí – dlouhodobě sušší a chladnější klima, ale také využívání vody z přítoků Peršany, jimiž byla Amudarja zcela odkloněna a do jezera

**Abstract: Aral Sea – All appearances of Aral Sea lake by Anna Pišková and Tomáš Matys Grygar.** The lake level fall of Aral Sea during the last fifty years was not the only dramatic low-stand in its history. In last two thousand years four major regressions have been recognized. During one of these regressions (at ~0–400 AD) lake level was probably lower than in the last decade. This knowledge has opened the theme of the rate of anthropogenic and natural influences to the lake level fall. Despite that people has influenced the area for several thousand years the leading factor causing Aral Sea desiccation was probably climate. People has “only” reacted to the climatic worsening and caused acceleration of the natural processes.

## K DALŠÍMU ČTENÍ

- Boomer I., Wünnemann B., Mackay A. W., Austin P., Sorrel P., Reinhardt Ch., Keyser D., Guichard F., Fontugne M.: Advances in understanding the late Holocene history of Aral Sea region. *Quaternary International* 194 (1–2), 79–90, 2009
- Boroffka N. G. O.: Archaeology and Its Relevance to Climate and Water Level Changes: A Review. in Kostianoy A. G. and Kosarev A. N. (eds.): *The Aral Sea Environment*, Hdb Env. Chem. 7, 283–303, 2010
- Létolle R., Mainguet M.: *Aral*. Springer-Verlag, Paris 1993
- Oberhansli H., Zavalov P. (eds.): Special Issue Aral Sea Basin Hydrological, Chemical and Biological Today Compared with Trends of the Past 50 Years. *Journal of Marine Systems* 3 (70), 2009
- Pišková A., Grygar T., Veselá J., Oberhansli H.: Diatom assemblage variations in the Aral Sea core C2/2004 over the past two millennia. *Foteta* 9(2), 333–342, 2009



nevtékala. Podobně jako dnes není jasné, jakou poměrnou roli hrálo zavlažování a jakou dobové klimatické změny.

Podruhé významně poklesla hladina v období 900 až 1350 po Kr. (datování se liší podle různých autorů). Pylové záznamy hovoří o vysychání okolí Aralu mezi lety 900–1200. Ve 12. století opět zasahuje do vodní bilance člověk, a to převedením toku Amudarji do jezera Sarykamyš jižně od Aralského jezera. Aral tehdy znovu sytil pouze jeden přítok. V historických pramenech lze dále nalézt dvě významné události datované k roku 1220 a spojené s opětovným napojením Amudarji do Aralského jezera: zneškodnění zavlažovacích systémů při invazi Mongolů a velké zemětřesení. Nicméně Kerderská civilizace, která po sobě zanechala stopy na úrovni 32 m n. m. (stav srovnatelný s rokem 2001), ve 13. století poničené hráze a zavlažovací systémy ještě obnovila. Na nízký stav jezerní

hladiny v 15. století lze usuzovat například z map z r. 1490 používaných Kryštofem Kolumbem, kde je Kaspické moře detailně zakresleno, ale Aralské jezero chybí. Záznam z roku 1415 hovoří o spojení velké části Syrdarji s Amudarjou. Severní přítok tehdy obtékal jezero po jeho jihovýchodním okraji, a řeky pak společně ústily do Kaspického moře. Ať už byly příčiny změn koryt přirozené nebo umělé, je jisté, že významným způsobem ovlivňovaly hydrologický režim jezera a jejich vzájemné působení ztěžuje odhalení příčin kolísání jezerní hladiny.

Nejvíce se odhady liší v časovém období třetího nízkého stavu jezera. Zatímco data z naší laboratoře omezují jeho trvání jen na 15. století, ostatní autoři stanovují začátek na pozdější dobu a trvání prodlužují dokonce až do poloviny 19. století. To ovšem hrubě nesouhlasí s mapou z r. 1853, v níž je Aralské jezero detailně zakresleno s vysokou hladinou.

**7. Poušť Kyzylkum je místy řídké porostlá statnou miříkovitou rostlinou *Ferula assafoetida* (česky ločidlo nebo též čertovo lejno), která zde v dubnu kvete.**



**8. Rybolov a rybářské lodě nezachránil ani pokus o prokopání kanálu ke vzdalujícímu se pobřeží jezera (2006).**

Po skončení regresní fáze byla tvář Aralu prokazatelně velmi podobná té, kterou známe z první poloviny minulého století (obr. 4D).

Vliv člověka na Aralské jezero je složité odlišit od přirozených procesů v povodí. Předpokládáme, že při zhoršení klimatických podmínek v okolní pouštní krajině má člověk

pochopitelnou snahu zvýšit rozsah zavlažování, a tudíž urychluje přírodou nastartované procesy. Rovnováha mezi srážkami a odparem by se pravděpodobně posouvala na stranu odparu i bez intenzivního sovětského zavlažování, neboť průměrná teplota povrchu planety v posledních 60 letech stále roste. Kromě toho všechny současné klimatické modely předvídají pokračující vysychání rozsáhlých oblastí Asie, ohrožených suchem už dnes.

Studium Aralských sedimentů nám umožnilo datovat období poklesu hladiny za poslední dvě tisíciletí, ale neuměli jsme rozlišit vlivy tektonické aktivity, lidských zásahů a regionálních nebo globálních klimatických změn. Jsme přesvědčeni, že ani vývoj prostředí, ve kterém budeme žít ve 21. století, nebude řízen rovnicí o jedné neznámé a že přinese další překvapení. Do budoucna si tedy můžeme být jisti, že se tvář Aralu bude dále podstatně měnit. ∩

***Poděkování:** Děkujeme Kateřině Novotné za její práci na analýze aralských jezerních sedimentů v GFŽ v Potsdamu, kterou nám umožnila přístup k tak zajímavému studijnímu materiálu.*



**AOPK ČR**



Informační systém ochrany přírody (ISOP) umožňuje spravovat a zveřejňovat odborná data ochrany přírody a krajiny<sup>1)</sup>.

V roce 2010 vydala Agentura ochrany přírody a krajiny ČR publikaci, která přibližuje historii vzniku informačního systému, nabízí jeho celkový popis a souhrn návodu k používání jednotlivých aplikací. Pro lepší pochopení funkcí aplikací a jejich vzájemných vazeb je u každé z nich uvedena také tabulka systémových informací a zjednodušené datové schéma.

<sup>1)</sup> Viz *Vesmír* 88, 668, 2009/10

**Agentura ochrany přírody a krajiny České republiky**

Nuselská 39, Praha 4, 140 00, telefon 241 082 219, fax 241 082 999, e-mail: aopkcr@nature.cz, www.nature.cz

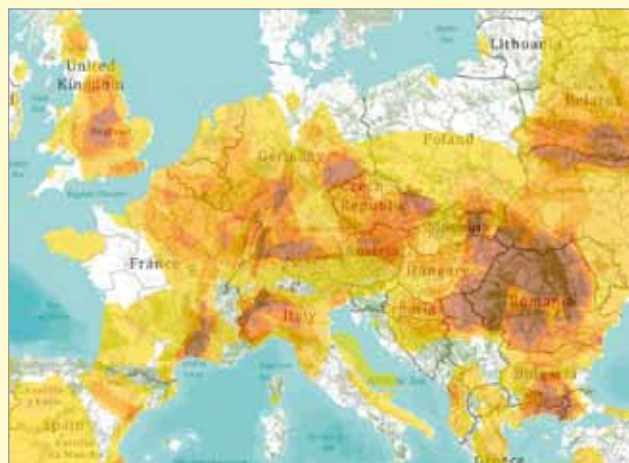
**ARCDATA PRAHA**



## Životní prostředí Evropy v GIS

Evropská agentura pro životní prostředí (EEA) a společnost Esri dlouhodobě spolupracují na publikaci geografických dat pro odbornou veřejnost. Nejnovějším výsledkem jejich spolupráce je zpřístupnění desítek datových sad prostřednictvím portálu ArcGIS.com. Ty svojí tematikou sahají od dat CORINE, přehledu měření kvality koupací vody a sledování změn klimatu až po předpověď změny atraktivit turistických oblastí v závislosti na probíhajícím oteplování.

Publikované mapy je možné na portálu ArcGIS.com prohlížet prostřednictvím webového browseru. Uživatelé geografického informačního systému ArcGIS je mohou navíc bezplatně využít v rámci svých projektů.



Výskyt velkých povodní v Evropě v letech 1998–2008, vyjádřený barvou od žluté (jedna povodeň) po hnědou (šest a více).

ARCDATA PRAHA, s. r. o., je firma plně specializovaná na technologie a služby v oblasti geografických informačních systémů. Poskytuje kompletní nabídku software a služeb včetně dat dálkového průzkumu Země. Je autorizovaným distributorem firmy Esri, Inc., největšího světového výrobce GIS, dále systémů firem ITT VIS (software ENVI), Telvent Miner & Miner a kompresních programů firmy Lizardtech, Inc., v České republice. Bližší informace: tel.: 224 190 511, e-mail: office@arcdata.cz nebo internet: www.arcdata.cz.