

BOHUMÍR JANSKÝ

## BAJKAL – VÝVOJ RIFTOVÉ ZÓNY

B. Janský: *Bajkal – the rift zone development*. – Geografie-Sborník ČGS, 102, 2, pp. 89 – 97 (1997). – The article characterizes the formation and development of the Bajkal Lake Basin, situated in the south of Eastern Siberia. Attention is also paid to processes of tectonic development of the Bajkal region which have influenced the deepening of the Bajkal Basin. The author studies in the same time erosional-denudational processes influencing the lake basin formation.

KEY WORDS: Bajkal – rift zone – lake basin – tectonic movements – faults – volcanic activity – deepening and silting of the lake – the deepest lake in the world – cryptodepression.

### Úvod

V roce 1981 absolvoval autor článku půlroční studijní pobyt v Limnologickém institutu Akademie věd SSSR v Listvjance a na Irkutské státní univerzitě. Během něj byl zapojen do výzkumného týmu, který se zabýval jakostí vod v oblastech jezerních přítoků a studoval hydrologickou bilanci jezera. V následujících letech byly poznatky o jezeře rozšířeny do podoby monografie (Janský 1989).

### Názory na vznik jezerní pánve

Pravděpodobně první odborný názor na vznik jezerní pánve vyslovili Pallas P. S. (1776) a Georgi I. G. (1776), účastníci tzv. „Druhé kamčatské odborné expedice“ již na sklonku 18. století. Jezero podle nich vzniklo mohutným poklesem při katastrofálním zemětřesení. Sto let po nich zavrhl tuto teorii známý bajkalský badatel I. D. Čerskij (1886), přičemž vyslovil myšlenku o vrásném původu Příbajkalska. Vrásno-zlomový původ jezera podpořili v poslední době i Pavlovskij a Florensov (in: Lut 1978).

Významný ruský geolog Obručev V. A. (in: Galazij 1987) předpokládal, že na území dnešního jezera existoval v terciéru horský masiv, který byl později intenzivně rozlámán. Bajkalská pánev vznikla poté stupňovitým poklesem bloků zemské kůry podél souboru paralelních zlomů. Obručevovy závěry byly sice moderní vědou zpřesněny a dále rozvinuty, avšak základní koncepce tektonického vývoje Bajkalu se přijímá v plném rozsahu i dnes.

### Bajkalský rift

Nové vědecké teorie označují depresi jezera za centrální a zároveň nejstarší část *bajkalské riftové zóny*. Ta je však širší a podstatně hlubší než dnešní, vodou vyplněná jezerní pánev. Okrajové hlavní zlomy pronikají celou zemskou

kůrou a zasahují až do svrchního zemského pláště, tedy do hloubek 30 až 40 km.

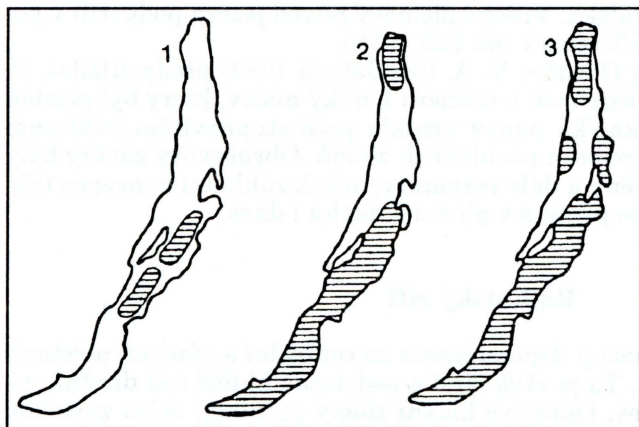
Jihozápadní větev bajkalské riftové zóny tvoří soustava depresí na středním a dolním toku řeky Irkut, z nichž nejznámější je Tunkinská dolina. Nejdále k jihu zasahuje zmíněný rift na území severního Mongolska, kde je jeho součástí kotlina jezera Chövsgöl. Na opačném severním konci pokračuje rift suchou kotlinou Tokko v jižním Jakutsku. Délka celého řetězce tektonických depresí dosahuje tak kolem 2 500 km.

### Ranně orogenní etapa geologického vývoje

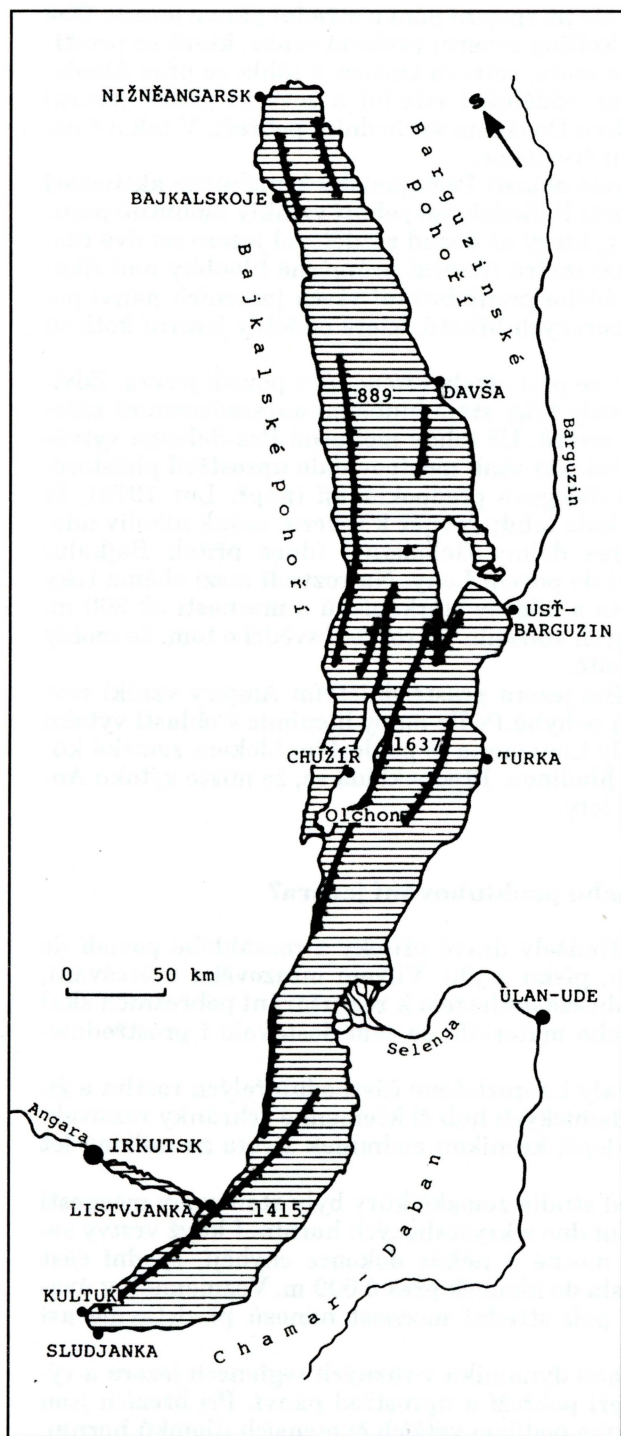
Dnes už můžeme s jistotou tvrdit, že Bajkalské jezero nevzniklo jako následek nějaké krátkodobé katastrofické události, jak se domnívali účastníci prvních výzkumných expedic. Procesům formování riftu předcházela velmi dlouhá a klidná geologická epocha. V období svrchní křídly a na počátku paleogénu, pro které je typická nízká tektonická aktivita, převládal v jižní části východní Sibíře rovinatý reliéf s pahorkatinami a vrchovinami. Teplé a vlhké klima umožňovalo intenzivní zvětrávání hornin. V širším regionu dnešního Příbajkalska se tak hromadily mocné pokryvy zvětralin s vysokým obsahem křemičitanů, které vznikaly rozpadem metamorfovaných a vyvřelých hornin. Se zvětralinami křídového a paleocenního stáří se setkáme na povrchu ostrova Olchon a na několika místech Tunkinské doliny.

Většina geologů a geomorfologů předpokládá (např. Lut 1978), že nejstarší částí jezera je jeho střední pánev. Vytvořila se před 25 až 30 milióny lety v období oligocénu. Na počátku byla pravděpodobně rozčleněna do několika menších depresí, které už tehdy vyplňovala poměrně mělká jezera s hloubkou do sta metrů (viz. obr. 1). Zbytky nánosů těchto dávných jezer objevili geofyzikové ve značných hloubkách pod úrovní dnešního dna jezera. Už v těchto raných stádiích vzniku příkopové deprese docházelo k četným sopečným výlevům čedičových láv. Nejstarší vulkanické horniny Příbajkalska pocházejí z období oligocénu, i když v Tunkinské dolině, která je rovněž součástí riftu, se poslední činné sopky projevují ještě v raném holocénu, tzn. počátkem doby kamenné, před 8 až 9 tisíci lety.

Obr. 1 – Pravděpodobná podoba Bajkalského jezera v geologické minulosti. Šrafkami jsou vyznačeny vodní plochy. 1 – na konci starších třetihor (v oligocénu) bylo vodou vyplněno několik menších kotlin na území dnešní střední pánve. 2 –



koncem mladších třetihor (v pliocénu) existovalo již spojení jižní a střední pánve Bajkalu; na území dnešního Malého moře a Akademického hřbetu (dnes v hloubkách kolem 300 m pod hladinou) byla souš. 3 – Bajkal v polovině čtvrtohor; asi před půl miliónem let došlo k poklesům podél hlubokých zlomů na sever od ostrova Olchon a celá severní pánev byla zatopena vodou; pak následovalo i spojení severní a střední pánve.



Obr. 2 – Bajkalské jezero s vyznačenými zlomy

Na území dnešní jižní pánve vznikly široké a ploché prohyby s jezery, bažinami a rozvinutou říční sítí. Z tehdejší bohaté subtropické vegetace se vytvořily uhelné sloje v oblasti dnešního Tanchoje, v Tunkinské i Barguzinské dolině. Už v období starších třetihor existovala řeka Selenga. Tato Pra-Selenga přinášela tedy do jižní kotliny Bajkalu nejen své vody, ale po milióny let rovněž množství plavenin.

Celá raně orogenní fáze geologického vývoje Přibajkalska trvala téměř 25 miliónů let a byla přípravou nadcházejících bouřlivých událostí.

### Orogeneze Přibajkalska

Na konci pliocénu, tedy asi před dvěma milióny let, značně zesílily endogenní procesy na hranici svrchního pláště a zemské kůry. Podél hranice s geologicky starým angarským štítem vznikaly hluboké tektonické poruchy zemské kůry, podle nichž poklesly celé bloky pevniny. Je pravděpodobné, že zlomy nebyly zprvu souvislé, ale že se podél jednotlivých poruch tvořily nejprve dílčí pánve, které se postupně spojily. Sledujeme-li dnešní západní pobřeží Bajkalu, zjistíme, že je poněkud lomené. Odpovídá to návaznosti dílčích poruch, které postupně vytvořily gigantickou zlomovou linii (obr. 2).

Na počátku kvartéru existovalo již spojení jižní a střední pánve jezera. Obě byly však odděleny od nevelké kotliny severní pruhem souše, která se prostírala na území dnešního Malého moře, ostrova Olchon a táhla se přes Akademický hřbet (dnes práh na dně oddělující střední a severní pánev jezera) k poloostrovu Svätý nos a k zálivu Davša na východním pobřeží. V takové podobě existoval Bajkal po většinu čtvrtohor.

Před 500 tisíci lety došlo v celé oblasti Příbajkalska k mohutné aktivizaci tektonických pohybů. V jižní části Bajkalského pohoří vznikly mohutné poruchy zemské kůry. Pruh pevniny, který až dosud rozděloval jezero na dvě části, poklesl do hloubek kolem 300 metrů (dnešní průměrné hloubky nad Akademickým hřbetem). Vedle rychlého prohlubování všech jezerních pánví pokračovalo i zdvihání okolních horských hřbetů, které oddělily jezerní kotlinu od svého okolí.

Vlivem tektonických procesů se přetvářela i *říční síť* v povodí jezera. Zdvihání horských hřbetů překonávaly řeky stále hlubšími antecedentními zářezy do hloubek i několik stovek metrů. Už tehdy mohutná Pra-Selenga vytvářela svou deltu. Uspořádání říční sítě však neodpovídalo uprostřed pleistocénu dnešním poměrům. Geomorfologové předpokládají (např. Lut 1978), že voda z Bajkalského jezera odtékala tehdy rovněž k severu, avšak nikoliv údolím dnešní Angary, nýbrž přes doliny Goločústnoj (dnes přítok Bajkalu) a Manzurky (dnes přítok Leny) do povodí Leny. Na rozvodí mezi oběma toky byla objevena stará říční koryta s nánosy štěrkopísků o mocnosti až 200 m. Rovněž dnešní morfologie suchých sníženin na rozvodí svědčí o tom, že mohly být součástí nějaké staré říční sítě.

Současný odtok z Bajkalského jezera prostřednictvím Angary vznikl rovněž jako následek tektonických pohybů. Podle mapy hloubnic v oblasti výtoku je patrné, že dno zálivu u osady Listvjanka je pokleslým blokem zemské kůry, který leží kolem 300 m pod hladinou. Předpokládá se, že místo výtoku Angary vzniklo asi před 250 tisíci lety.

### Zanášení nebo prohlubování jezera?

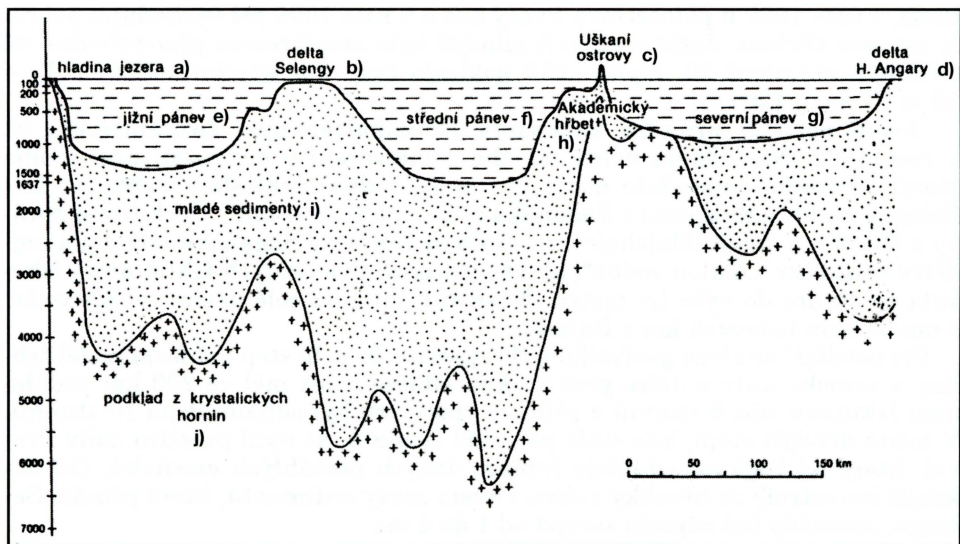
Po statisíce a milióny let přinášely dravé přítoky z rozsáhlého povodí do Bajkalu ohromné masy štěrku, písku a jílu. Vlivem mrazového zvětrávání, eolické činnosti i uplatněním abraze docházelo k rozrušování pobřežních skal a zanášení jezerní pánve. Mnoho materiálu se sem dostávalo i prostřednictvím kamenných proudů.

Masu sedimentů rozmnožovaly i nerozložené části odumřelých rostlin a živočichů, jako např. skelety endemických hub či křemenné schránky rozsivek. Vrstvy sedimentů jsou tak nejlepší kronikou podmínek života za milióny let jeho existence.

Pomocí geofyzikálních metod studia zemské kůry byly stanoveny mocnosti nánosů, které pokrývají původní dno z krystalických hornin. I když vrstvy sedimentů nejsou všude stejně mocné a někde dokonce chybějí, spodní část platformních sedimentů poklesla do hloubek přes 6 000 m. Vezmeme-li v úvahu jejich celkovou kubaturu, pak střední mocnost nánosů představuje asi 2 000 m (obr. 3).

Sedimentace má zcela odlišnou dynamiku v různých regionech jezera a výrazně odlišná je její rychlost při pobřeží a uprostřed pánví. Při březích jsou sedimenty hrubozrnné s vysokým podílem větších či menších úlomků hornin. Ty se sem dostávají hlavně řekami, sesouváním břehů při abrazní činnosti





Obr. 3 – Podélný profil kotlinou Bajkalu. Kromě současných hloubek jezera jsou naznačeny nánosy, které pokrývají krystalický podklad. Jejich mocnost byla určena pomocí vrtů i geofyzikálními metodami. Svislá osa – hloubka jezera pod hladinou (v metrech); maximální hloubka – 1 637 m.

i častými kamennými proudy. Při ústí Selengy se např. v době jarních povodní rozšiřují její kalné vody do vzdálenosti minimálně 5 km od břehů. Selenga přináší za rok do Bajkalu průměrně 2 327 tisíc tun suspendovaného materiálu, Verchnaja Angara 410, Barguzin 164, Utulik 54 a Sněžnaja 41 tisíc tun. Jednotlivé jezerní pánve jsou tak zásobovány odlišným objemem splavenin. I když je množství suspenzí dodávané řekami značné, přesto se předpokládá, že v zóně příboje se vlivem sesuvů, bahenních a kamenných proudů ukládá zhruba dvojnásobné množství sedimentů než činí přínos řekami. Kamenné proudy, tzv. *seli*, vznikají po přívalových deštích, náhlém tání sněhu a mohou být vyvolány i pádem lavin.

I když se jezero velmi intenzivně zanáší, přesto nemá sedimentace rozhodující význam pro další vývoj jezerní pánve. Silněji se uplatňuje činnost tektonická. Na některých místech dosahují pohyby podél zlomů průměrně 20 až 30 mm ročně, přičemž daleko výrazněji se uplaňují rychlé pohyby při silných zemětřeseních.

### Utváření pánve doprovází zemětřesení

Proces utváření jezerní pánve Bajkalu dále pokračuje. Svědčí o tom častá zemětřesení, jejichž epicentra leží na dně či blízko břehů jezera. Ročně zde seizmografy registrují na 2 000 otřesů půdy různé síly, přičemž přístroje umístěné v různých hloubkách jezera jich zaznamenávají mnohem více. Na základě analýzy historických dat je možno doložit, že za sto let proběhnou v bajkalské kotlině dvě až tři mohutná zemětřesení o síle 8 až 10 stupňů RichtEROVY škály.

Osmého stupně dosáhly otřesy v roce 1871 s epicentrem v deltě řeky Selengy, v roce 1903 jižně od ostrova Olchon, v roce 1931 při severovýchodním po-

břeží, v roce 1939 u poloostrova Svatý nos a v roce 1996 při východním pobřeží ostrova Olchon. Ještě o stupeň silnější bylo zemětřesení jihovýchodně od Olchonu, při němž 29. srpna 1959 poklesla část dna střední kotliny o 10 – 12 m (Galazij 1987).

Dosud největší přírodní katastrofa Přibajkalska byla zaznamenána už v roce 1862. Následkem velmi silného zemětřesení o novoroční noci (podle starého ruského kalendáře noc z 11. na 12. ledna) poklesla severně od ústí Selengy pod hladinu jezera Saganská step o ploše 200 km<sup>2</sup>. Dochované zprávy z té doby uvádějí (Melchejev, in: Galazij 1987), že Saganská step byla nejdříve zalita tzv. „malou vodou“, která vystupovala z četných trhlin a vystřikovala ze studní do výše tří metrů. Následně zatopila celé území „velká voda“ s množstvím ledových ker z Bajkalu.

Při pozdější analýze geofyziků bylo zjištěno, že celá step poklesla podél trhliny v zemské kůře o délce přes 20 km. Hlavní otřes měl ve 200 km vzdáleném Irkutsku sílu 8 stupňů a přímo v epicentru byl odhadnut na 10 stupňů. V místě dřívější stepi, kde stálo pět osad Burjatů, se nyní prostírá záliv Proval, který od Bajkalu odděluje řetězec úzkých protáhlých ostrůvků. Od někdejší katastrofy se hloubky zálivu vlivem mas sedimentů, které přináší Selenga, zmenšily (od západu stoupá od 1 do 4 m).

### Morfometrie nejhlubšího jezera na Zemi

O změření hloubek Bajkalského jezera se pokoušeli již účastníci prvních kozáckých výprav v 17. století, avšak bez úspěchu. Dna jezera nedosáhl při jeho přelouvání ani vyslanec cara Alexeje, Nikolaj Spafarij, v roce 1675.



Obr. 4 – Bajkalské jezero – výtok Angary



První hodnověrné údaje o hloubkách pocházejí až z 60. let 19. století, kdy je v jižní kotlině pořídil významný badatel polské národnosti B. I. Dybowski. Podrobnější hydrologický výzkum jezera provedla v letech 1896 – 1902 expedice F. K. Driženka. Z první mapy hloubek bylo již možno vyčíst základní črty morfologie jezerní kotliny. Největší zjištěná hloubka činila tehdy 1 522 metrů. Po dalších třiceti letech uskutečnil G. J. Vereščagin se spolupracovníky z Limnologické stanice AN SSSR na 400 nových hloubkových měření, přičemž maximální hloubku stanovil na 1 741 m.

Teprve s použitím echosondy mohly být zachyceny i nejmenší tvary jezerního dna a tisícinásobně vzrostla rychlost měření. V roce 1959 provedl systematické měření hloubek echolotem B. F. Lut s týmem z Limnologického institutu AN SSR v Listvjance. Od té doby platila nová maximální hloubka Bajkalu 1 620 m. Teprve v roce 1984 byla stanovena poslední a zatím definitivní hloubka jezera 1 637 m vědci z Tichooceánského hydrografického institutu, kteří přepočítali dřívější nepřesné údaje vzhledem k novým poznatkům o šíření zvukového signálu v podmínkách různého tlaku a teploty.

Charakteristickým rysem tvaru jezerní pánve je její nesouměrnost. Západní sklony břehů podél Přímořského a Bajkalského pohoří spadají příkře do hlubin. Linie břehové čáry je téměř přímočará a jen velmi málo rozčleněná do poloostrovů a zálivů. Naproti tomu východní pobřeží je většinou ploché a výrazně rozčleněné do zálivů, zátok a polouzavřených lagun. Zatímco západní břehy jsou převážně modelovány procesy tektonickými, východní pobřeží má převážně charakter akumulací.

Oblast největších hloubek jezera (přes 1 600 m) se nachází ve střední kotlině mezi mysy Ižimej a Chara-Chušun, asi 8 – 12 km vzdálena od východního břehu ostrova Olchon. Sklony dna podél celého východního pobřeží ostrova jsou neobyčejně strmé (od 60 do 80°).

Z údajů v tabulce 1 můžeme zjistit, jak veliký podíl na ploše zaujímá hlubokovodní oblast jezera. Přes 57 % rozlohy náleží hloubkám přes 500 m a téměř čtvrtina plochy leží hlouběji než 1 000 m. Dokonce ještě pod hloubkou



Obr. 5 – Pohled na Malé moře z ostrova Olchon

Tab. 1 – Rozloha a objem vod v různých hloubkových stupních jezera

Houbnice (m)	Plocha jezera		Objem vod	
	v km <sup>2</sup>	% z celkové plochy	v km <sup>2</sup>	% z celkového objemu
0	31 500	100,0	21 670	100,0
100	27 600	87,6	18 710	86,3
200	25 230	80,1	16 060	74,1
500	18 110	57,5	9 560	44,1
700	14 200	45,1	6 540	30,2
1 000	7 780	24,7	3 160	14,6
1 000	1 950	6,2	234	1,1

Pramen: Janský 1989

Tab. 2 – Pořadí světových jezer podle množství zadržované vody

Název	(kontinent)	Objem (km <sup>3</sup> )	Maximální hloubka (m)	Plocha hladiny (km <sup>2</sup> )
Kaspické	(Asie)	77 000	945	371 000
Bajkal	(Asie)	21 670	1637	31 500
Tanganika	(Afrika)	18 940	1 435	32 880
Hořejší	(Severní Amerika)	11 635	393	82 414
Njasa-Malawi	(Afrika)	7 000	785	28 480
Michiganské	(Severní Amerika)	5 760	281	58 016
Huronské	(Severní Amerika)	4 680	226	59 596
Viktorino-Ukerewe	(Afrika)	2 656	125	68 800
Issyk-Kul	(Asie)	1 730	702	6 280
Ontarijské	(Severní Amerika)	1 710	237	19 553

Pramen: Janský 1989

Tab. 3 – Základní morfometrické parametry pánve Bajkalského jezera

Charakteristika	Dílčí pánve jezera			Celé jezero
	severní	střední	jižní	
plocha (km <sup>2</sup> )	13 310	11 300	6 890	31 500
hloubka (m)				
– střední	527	814	792	688
– maximální	989	1 637	1 414	1 637
množství zadržované vody (km <sup>3</sup> )	7 020	9 200	5 450	21 670

Pramen: Janský 1989

1 500 m se nachází přes 6 % plochy jezerní pánve (tab. 1).

Naopak malou rozlohu mají mělkovodní oblasti, zálivy a zátoky. I když se jejich plocha po napuštění Irkutské přehrady v roce 1958 zvětšila, připadá na ně jen 8 % z celkové plochy. Největším zálivem je Barguzinský s rozlohou 720 km<sup>2</sup>, následují Čivir-

kujský (291 km<sup>2</sup>) a Proval (197 km<sup>2</sup>). Za záliv bývá pokládáno i Malé moře o ploše 901 km<sup>2</sup>.

Objemem zadržovaných vod se jezero Bajkal řadí na druhé místo mezi světovými jezery – hned za jezero Kaspické, které má však téměř dvanáctkrát větší rozlohu. Objemem vodních mas se téměř vyrovná všem pěti Kanadským jezerům a dokonce třináctkrát rozlehlejšímu Baltskému moři! Mezi všemi sladkovodními jezery vyniká Bajkal hlavně velkým podílem hlubokovodních oblastí (viz tab. 3) a výjimečnou střední hloubkou 688 m.

Bajkal je nejhlubší *kryptodepresí* na Zemi. Při úrovni hladiny 465 m nad mořem zasahuje svým dnem 1 172 m pod úroveň hladiny světového oceánu.



## Literatura:

- AFANASJEV, A. H. (1976): Vodnyje resursy i balans basejna ozera Bajkal. Nauka, Novosibirsk, s. 238.
- CERSKIJ, I. D. (1886): Otčet o geologičeskom isledovaniji beregovoj polosy ozera Bajkal. VSORGO, Irkutsk.
- GALAZIJ, G. I., VOTINCEV, K. K. (1978): Problemy Bajkala. Nauka, Novosibirsk, s. 3-124.
- GALAZIJ, G. I. (1987): Bajkal v voprosach i otvjetach. VSKI, Irkutsk, 381 s.
- JANSKY, B. (1989): Bajkal – perla Sibiře. Panorama, Praha, 184 s.
- LUT, B. F., GALAZIJ, G. I. (1970): Ekzogenyje procesy i dinamika razvitija severozapadnogo sklona Bajkalskoj vpadiny. In: Donyje otkroženija Bajkala. Nauka, Moskva, s. 43-54.
- LUT, B. F. (1978): Geomorfologija Pribajkalja i vpadiny ozera Bajkal. Nauka, Novosibirsk.
- PODRAZANSKIJ, A. M. (1982): Vižu dno Bajkala. Gidrometeoizdat, Leningrad, 150 s.

## Summary

### BAIKAL – THE RIFT ZONE DEVELOPMENT

The author introduces his article by description of his seven scientific trips to the Baikal Lake. During his six-month stay in 1981 he joined a team of hydrologists of the Institute of Limnology, Academy of Sciences of the Soviet Union, in Listvianka, studying the hydrologic balance of the Baikal Lake and the quality of water at mouthings of its most important affluents. In 1989 he published a monograph on the lake.

Due to an urgent need of landscape planning in the coastal zone of the lake, the Section of Geography, Faculty of Science, Charles University, prepares together with the Institute of Geography, Bern University, Switzerland, a cooperation with the University of Irkutsk and with the management of local national parks.

The paper analyses hypotheses on the Baikal Lake Basin formation. Attention is paid to characteristics of the Baikal rift zone, to the early orogenetic stage of its geological development, as well as to orogenesis of the Baikal region.

The work is based on the comparative analysis of silting processes, and to the lake deepening. As the lake gets always deeper in spite of a considerable thickness of sediments, a detailed attention is paid to characteristics of tectonic movement along faults which are accompanied by earthquakes. In the coastal zone of the lake, up to 2 000 earthquakes are registered every year, so that 3 to 4 mighty earthquakes of 8 to 10° on the Richter scale occur in the Baikal Basin in course of every hundred years.

Fig. 1 – Presumable shape of the Baikal Lake in geologic past. Water areas are hatched. 1 – At the end of the Lower Tertiary (in the Oligocene) several lesser basins on the territory of the present-day medium basin were filled by water. 2 – At the end of the Upper Tertiary (in the Pliocene) the southern and the medium Baikal basins were already connected. There was dry land on the territory of the Small Sea and the Academic Ridge (today situated in a depth of 300 m below the water surface). 3 – The Baikal in the middle Quaternary. Some half million years ago, the areas along deep faults northwards from the Olkhon Island got depressed and the whole northern basin was filled by water. Then the northern and the medium basins got connected.

Fig. 2 – The Baikal Lake with faults location

Fig. 3 – Lengthwise profile of the Baikal Lake Basin. Beside the present depths of the lake there are marked sediments covering the crystalline underlayer. Their thickness has been established by drills and geophysical methods. X axis – depth under the water surface; maximal depth – 1 637 m; a – lake surface; b – Selenga delta; c – Ushkanye Islands; d – Upper Angara delta; e – southern basin; f – medium basin; g – northern basin; h – Academic Ridge; i – young sediments; j – crystalline rock underlayer.

Fig. 4 – The Baikal Lake

Fig. 5. – View to the Small Sea from Olchon Island

(Pracoviště autora: katedra fyzické geografie a geoekologie Přírodovědecké fakulty UK, Albertov 6, 128 43 Praha 2.)

Do redakce došlo 14. 4. 1997

Lektorovali Jan Votýpka a Václav Příbýl