

GEOLOGIE A PALEONTOLOGIE / GEOLOGY AND PALEONTOLOGY

Nový barrandienský stratotyp v historických souvislostech

A new stratotype in the Barrandian area in a historical context

Jakub Vodička¹

Abstract

Knowledge of Earth's history relies on our ability to navigate the vast depths of prehistoric time. This knowledge has evolved significantly from a relatively simple comparison of the superposition and fossil contents of individual beds and formations to the progressive development of a unified, internationally accepted, and widely applicable classification of rock units based on their succession and time of origin. A key achievement of these efforts was the establishment of a network of international boundary stratotypes, defined as Global Stratotype Sections and Points (GSSP), for each internationally recognized period of Earth's geological history. However, the definition of these GSSPs did not halt the advancement of geological knowledge. The concept of international GSSPs has itself become subject to continuous development. Some of the earliest stratotypes defined before 1990 must be replaced due to their major inadequacies in the light of modern requirements for high-resolution stratigraphic correlation. This ongoing evolution is exemplified by the new GSSP stratotype, defined near Hlásná Třebaň in 2024, which replaces the previous, inadequate stratotype in central Wales. The boundary stratotype of the lower Silurian Aeronian Stage at Hlásná Třebaň is the fourth GSSP established within the Paleozoic of the Barrandian area of central Bohemia. This new stratotype promises long-term functionality and stability as it combines traditional approaches, tested over decades, with modern methods and concepts. Furthermore, the stratotype underscores the international significance of the Lower Paleozoic formations of central Bohemia as well as the high esteem enjoyed by the Czech stratigraphic school in the global community of Earth scientists.

1. Úvod

Začátkem roku 2024 byl na území Českého krasu Mezinárodní unií geologických věd (IUGS) schválen nový stratotyp na vrchu nad Berounkou u Hlásné Třebaně. Nový mezinárodní stratotyp definuje bázi stupně aeron, druhý stupeň oddělení llandovery, které je bazálním oddělením siluru. Stratotyp u Hlásné Třebaně se stal již čtvrtým mezinárodním stratotypem na území Barrandienu a Barrandien samotný se tím pádem zařadil mezi několik málo území s velmi vysokou hustotou stratotypů na světě. Obsahuje také vůbec první formálně definovaný mezinárodní stratotyp, který se nachází na vrchu Klonk u obce Suchomasty a ratifikován byl v roce 1977. Cesta, která vedla k výběru a stanovení stratotypu na Klonku, přes zpracování a stanovení stratotypů dalších geologických období až ke stratotypu u Hlásné Třebaně, byla dlouhá a obtížná. Mezinárodní úsilí v časovém členění minulosti Země má tedy výraznou českou stopu.

2. Historie použití stratotypů

Existence a hloubka prehistorického času zůstávaly dlouho zahaleny předivem náboženských dogmat. Teprve jejich postupné nahrazení exaktními vědeckými metodami pomohlo odkrýt těžko představitel-

né hlubiny času, které od té doby nepřestávají lidstvo fascinovat. Do dávné geologické minulosti se lidstvo dívá skrze horniny, které jsou přírodním archivem procesů odehrávajících se na naší planetě Zemi téměř od jejího vzniku až do současnosti. Zásadní význam pro studium geologického času mají horniny usazené. Tyto horniny se obvykle usazují ve vrstvách. Na neporušené vrstevní sledy lze aplikovat princip superpozice, který definoval v 17. století Dán Niels Stensen, známý též v latinské verzi jako Nicolaus Steno. Tento princip tvrdí, že vrstvy, které se nachází ve vrstevním sledu níže, vznikly dříve a jsou tedy starší než vrstvy, které leží ve vrstevním sledu výše; ty představují vrstvy mladší. Tímto principem můžeme srovnat stáří vrstev v rámci jednoho vrstevního sledu. Ale jak srovnávat stáří vrstev z vrstevních celků na různých místech širší oblasti, nebo celé Země? Nejvíce rozšířenou, tradiční metodou je srovnání stáří hornin pomocí zkamenělin. Tato metoda se nazývá biostratigrafie a jejím základem je předpoklad, který formuloval počátkem 19. století William Smith: objevíme-li stejné zkameněliny ve dvou různých, i vzdálených, horninových celcích, jsou tyto celky stejně staré.

2.1. Slavná geologická kontroverze

Pomocí této metody začali lidé rozdělovat vrstevnaté horninové celky podle obsahu zkamenělin. Zpočátku se jednalo pouze o poměrně hrubé srovnání, které lze dobře ilustrovat na slavné britské kontroverzi z první poloviny 19. století mezi sirem Roderickem Murchisonem a profesorem Adamem Sedgwickem. Oba dva se věnovali zkoumání fosilního obsahu hornin Velké Británie; zatímco Murchison postupoval od jihu, tedy od hornin relativně mladších, Sedgwick postupoval od severu, tedy od hornin relativně starších (obr. 1). Sedgwick popsal horniny jižního Skotska a severního Walesu a v některých z nich našel i zkameněliny. Tyto horniny nazval kambriem (z angl. Cambrian, což je odvozeno od latinského názvu pro Wales – Cambria, který je odvozen od velšského názvu pro Wales – Cymru). Murchison popsal horniny jižního Walesu a hranice Walesu s Anglií (the Borders), našel v nich hojně zkameněliny a nazval tyto horniny silurem. Tento název odvodil od britského kmene Silurů z dob Římského impéria.

¹Muzeum Českého krasu, p. o., Husovo náměstí 87, 266 01 Beroun; geolog1@muzeum-beroun.cz, psoqvl@gmail.com

Poděkování: Autor děkuje Muzeu Českého krasu v Berouně za podporu při výzkumu stratigrafie spodního siluru na profilu GSSP stratotypu u Hlásné Třebaně. Autor dále děkuje RNDr. Petru Štorchovi, DrSc., za velkorysé konzultace a poskytnutí obrazových materiálů. V neposlední řadě autor děkuje i prof. RNDr. Michalu Merglovi, CSc. a RNDr. Štěpánu Mandovi, Ph.D. za podnětné recenze, editorovi RNDr. Karlu Žákovi, CSc., za přínosné komentáře k rukopisu a za jazykovou kontrolu Mgr. Kláře Jůzlové. *Český kras (Beroun), 50 (2024), 5–18, 11 obr.*

© Muzeum Českého krasu, p. o., Beroun

ISSN 1211-1643

ISBN 978-80-87708-20-0

Pro Rodericka Murchisona představovaly horniny Walesu typovou oblast, se kterou začal korelovat všechny v té době známé staropaleozoické sledy nejprve v Británii, později i mimo ni. Murchison cestoval po Evropě a všude, kde našel stejné nebo podobné zkameněliny, nazýval dané horniny silurem (THACKRAY 1976). Tímto způsobem ovlivnil i Joachima Barranda, který, v návaznosti na Murchisonovo dílo, nazval všechny staropaleozoické sledy středních a západních Čech silurem a dále je dělil na takzvané etáže označené písmeny A až H, tedy dnešní neoproterozoikum (A–B), kambrium (C), ordovik (D), silur (E) a devon (F–H; PROKOP 1989). Postupem času se ale ukázalo, že v oblasti Walesu pokračují Murchisonovy horniny siluru postupně až do Sedgwickových hornin kambriických. Murchison postupoval přirozeně tak, jak byl dosud zvyklý, a protože i podložní horniny nesly některé z „jeho“ zkamenělin, nazval silurem i podložní část, tedy původní Sedgwickovo kambrium. Sedgwick ale bránil svůj název z hlediska priority a odlišnosti sledů a mezi oběma geology se

rozhořel spor, který i po smrti obou hlavních aktérů rozděloval geologickou veřejnost nejen ve Velké Británii ještě několik desítek let.

Spor vyřešil až ke konci 19. století Charles Lapworth. Ten ve sporném pásu vymezil samostatný oddíl, který nazval ordovikem. Ve výsledku tak zůstaly zachovány názvy kambrium i silur a mezi nimi vložený ordovik (FORTEY 1993). Nicméně přesné hranice mezi těmito celky byly stanoveny až mnohem později, a to již pomocí stratotypů. Zajímavostí je, že odlišnosti ordovických faun od podložních kambriických i nadložních silurských byly v té době již výborně rozpoznány Barrandem, který studoval oblast středních Čech. Protože Barrande byl pod vlivem Murchisonova díla, označoval dnešní ordovik pouze jako „Etáž D“ a nepřiradil těmto faunám místně odvozený stratigrafický název, který by se, z hlediska časové priority názvů, nejspíše propal do mezinárodní chronostratigrafické škály na místo pozdějšího Lapworthova názvu ordovik (O. Fatka, osobní sdělení).

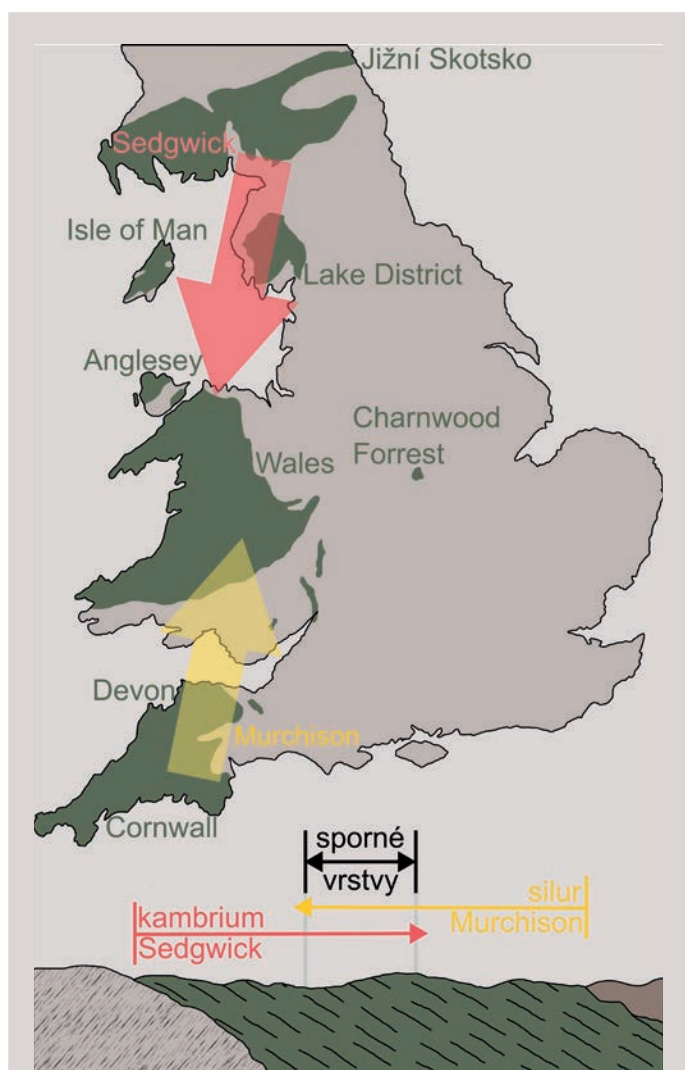
2.2. Přesnost korelace roste

Slavný spor Murchisona a Sedgwicka odhalil nedostatečnost chápání stratigrafických jednotek jako horninových celků s podobnou fosilní faunou. Navíc průmyslová revoluce, rozkvět stavební a těžební činnosti a s ní spojené systematické geologické mapování podstatně zvýšily nároky na přesnost stratigrafické korelace (WALSH, GRADSTEIN a OGG 2004). Snaha exaktněji definovat stratigrafické jednotky vedla ke stanovení takzvaného typického profilu. Jednalo se o vrstevní sled, který představoval typický horninový vývoj a zkameněliny dané jednotky. Vznikl předobraz dnešní litostratigrafické jednotky. Takto definovaná jednotka měla na jednom typovém vrstevním sledu (stratotypu jednotky) definovanou svoji bázi i strop (obr. 2). V rámci regionálních korelací fungují takto definované sledy poměrně dobře, ale v rámci mezikontinentálních korelací vykazují spoustu problémů, zejména při definici hranic jednotlivých stratigrafických jednotek (STÖRMER 1966; HEDBERG 1972; obr. 2). Dnes se tento typ stratotypu jednotky používá v regionálním měřítku, zejména při definici již zmíněných litostratigrafických jednotek.

Další metodou, jak korelovat horniny a stanovovat hranice v globálním měřítku, bylo použití významných zkamenělin. Pro tyto účely byly obvykle vybírány mořské, pelagické zkameněliny. Takové mají široké geografické rozšíření a bývají též hojné. Výborné vlastnosti pelagických zkamenělin objevil již Charles Lapworth, který pro odlišení ordoviku od podložního kambria a nadložního siluru použil zkameněliny graptolitů (FORTEY 1993). Rozdělení vrstevnatých hornin podle různých zkamenělin bylo do značné míry funkční, ale vedlo k nekonečným diskuzím, zda právě jeden daný druh graptolita znamená začátek období, nebo zda je důležitější jiný druh, či docela jiná zkamenělina (WALSH, GRADSTEIN a OGG 2004).

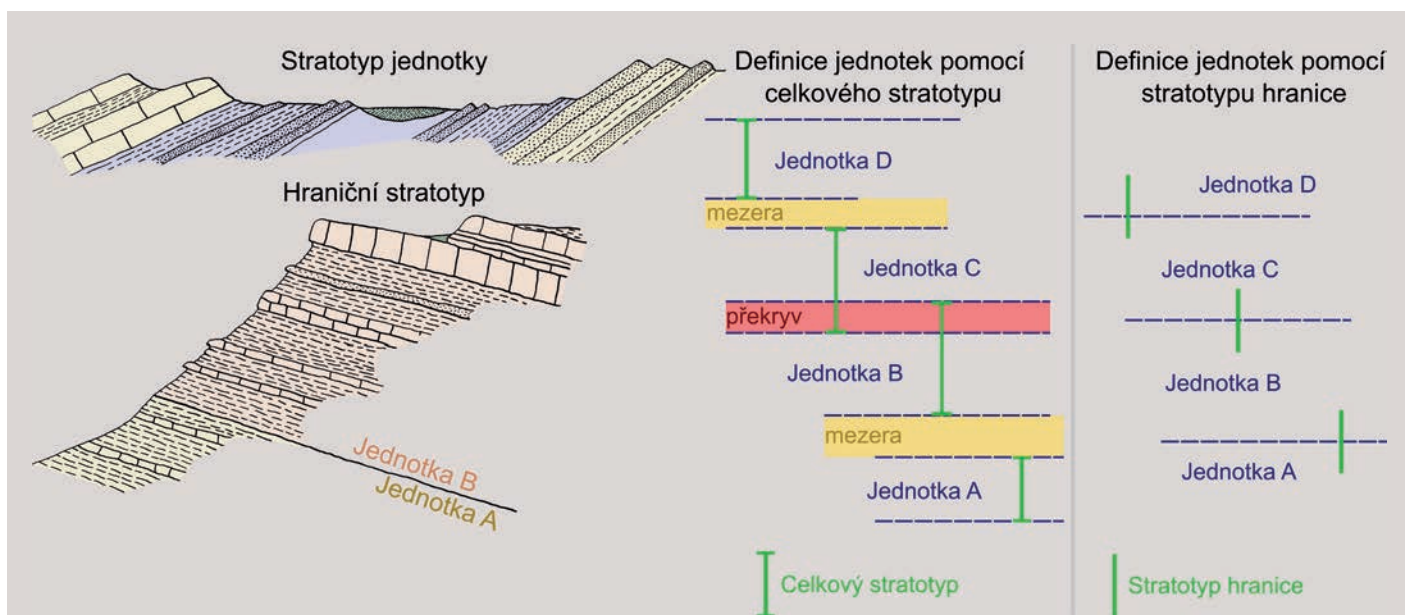
2.3. Vznik stratigrafické rukověti

S postupnou globalizací a nutností mezikontinentální korelace stratigrafických jednotek a jejich hranic byla taková situace neudržitelná a do období po druhé světové válce lze počítat začátky snahy o sjednocení stratigrafické terminologie a založení Mezinárodní subkomise pro stratigrafickou terminologii (ISST – International Subcommission on Stratigraphic Terminology) pod záštitou Mezinárodní geologické unie (IUGS – International Union of Geological Sciences). Z ISST se v roce 1962 stává Mezinárodní subkomise pro stratigrafickou klasifikaci (ISSC – International Subcommission for Stratigraphic Classification). Vůdčí osobností celého procesu byl americký paleontolog a stratigraf Holliis Dow Hedberg, který v 50. a 60. letech inicioval mezinárodní diskuzi nad stratigrafickou nomenklaturou a publikoval řadu článků, kde shrnuje a tříbí rozdílné názory světové



Obr. 1. Mapa části Velké Británie s vyznačenými oblastmi výskytu staropaleozoických hornin (tmavě zelenou barvou). Šipky ukazují směr postupu jednotlivých badatelů, sira Rodericka Murchisona od jihu a Adama Sedgwicka od severu. Upraveno podle SECORDA (1990) a WICANDERA a MONROE (2016).

Fig. 1. A map of a part of Great Britain with outcrops of Lower Paleozoic strata marked in dark green color. Arrows indicate the general progress direction of each Victorian geologist; Sir Roderick Murchison from the south and Adam Sedgwick from the north. Modified after SECORD (1990) and WICANDER and MONROE (2016).



Obr. 2. Rozdíl mezi stratotypem jednotky a hraničním stratotypem. Vlevo schematizované výchozy vrstevnatých hornin: vlevo nahoře je jednotka definovaná stratotypem modře, tedy stratotyp definuje i horninovou náplň jednotky, vlevo dole definuje stratotyp pouze hranici mezi jednotkou A a B a nikoliv horninovou náplň. Vpravo potom schéma rozsahu těchto dvou typů stratotypů, svislá osa představuje čas. Upraveno podle HEDBERGA (1976).
Fig. 2. The difference between a unit stratotype and a boundary stratotype. Schematic view of an outcrop of stratified rocks (left). In the unit stratotype (top left), the stratotype defines not only the extent of the unit (in blue) but also its lithology. In contrast, the boundary stratotype (bottom left) defines only the boundary between units A and B, not their lithology. The ranges of these two types of stratotypes are schematically indicated on the right, with time being represented by the vertical axis. Modified after HEDBERG (1976).

odborné veřejnosti na stratigrafickou praxi. Důležitou součástí byla i diskuze nad tím, jak definovat hranice mezi stratigrafickými celky a jak vytvořit celosvětově platnou chronostratigrafickou škálu, která by pokrývala celou historii Země. V této diskuzi začalo krystalizovat použití typových vrstevních sledů, které se stanou standardem pro danou hranici, tedy stratotypů pro hraniční intervaly. Celá tato snaha kulminuje v 70. letech 20. století dvěma významnými událostmi. Jsou jimi stanovení vůbec prvního mezinárodního stratotypu na světě a vydání Mezinárodní stratigrafické rukověti (International stratigraphic guide; HEDBERG, 1976). Tato publikace sjednocuje stratigrafickou terminologii. Rozděluje jednotlivé oblasti stratigrafie na tři hlavní větve a definuje jejich náplň:

- 1) litostratigrafie (rozděluje vrstevní sledy podle jejich litologie, tedy horninového složení),
- 2) biostratigrafie (rozděluje vrstevní sledy podle jejich fosilního obsahu) a
- 3) chronostratigrafie (rozděluje vrstevní sledy podle vzájemného srovnání času jejich vzniku).

Právě chronostratigrafické členění bylo nejdůležitější pro sestavení globální, jednotné stratigrafické škály, protože jak litologie, tak obsah zkamenělin vykazují výrazné regionální variace. Čas, na jehož bázi jsou definovány chronostratigrafické jednotky, je univerzální pro celou Zemi (HEDBERG 1976). Základní chronostratigrafickou jednotkou se stal stupeň. V hierarchii je vyšší jednotkou oddělení a na oddělení navazuje útvar, erátém a eonotém. Stupeň byl v této době chápán především jako soubor biozón (HOLLAND 1984). Biozóny jsou úseky horninového sledu definované určitou zkamenělinou, nebo posloupností zkamenělin. Zkamenělina, která definuje biozónu, se nazývá vůdčí zkamenělina, nebo vůdčí druh, a biozóny mohou být různých typů. Důležité jsou hranice biozón – nejčastěji se k jejich definici používá takzvaná událost (event). Událostí může být první objevení druhu, nebo také poslední objevení druhu. Předpokládáme,

že nově vzniklý druh je skvěle přizpůsobený podmínkám, při kterých vznikl a rychle se šíří – je proto vhodný ke korelaci. Poslední objevení, nebo také vymizení či vymření druhu může být k definici biozóny také použito, ale v takovém případě si nemůžeme být tolik jistí, jakou rychlostí probíhalo. Druhy často mizí pomalu a jen na určitých místech, zatímco na jiných místech mohou ještě dlouhou dobu přežívat v tzv. refugii.

Zároveň Mezinárodní stratigrafická rukověť stanovila, jak definovat hranice stupňů, pro které zavádí použití hraničních, resp. bazálních stratotypů. Stratotypy by ní měly být definovány v pokud možno mořském nepřerušném vrstevním sledu s dobře rozpoznatelnými a srovnatelnými korelačními horizonty. Takovými horizonty jsou v tomto pojetí zejména hranice biozón. To znamená, že první nebo poslední objevení se vybrané zkameněliny ve vrstevním sledu stratotypu stanovuje samotnou hranici. HEDBERG (1976) také uvádí jako potřebné podpořit srovnatelnost (korelovatelnost) hranice tím, že kromě vůdčí zkameněliny budou na stratotypu stanoveny další korelační horizonty. Těch by mělo být stanoveno co nejvíce, tedy tolik, kolik jen stratotypový vrstevní sled umožňuje. Jako ideální způsob je zmíněno použití více různých zkamenělin z různých skupin fosilní fauny, tedy různých, paralelně stanovených biozón. Důležité je věnovat výběru stratotypu pro hranice stupňů velkou pozornost, mimo jiné proto, že hranice řady stupňů jsou automaticky i hranicemi hierarchicky vyšších chronostratigrafických jednotek. Pokud je v nepřerušovaném vrstevním sledu možné identifikovat významné změny ve vývoji Země, je žádoucí tyto použít jako stratotypové hranice pro bázi stupňů (HEDBERG 1976). Tento požadavek odkazuje na předpoklad, že v historii Země se nachází přirozené hranice jednotlivých období, podle kterých lze historii Země členit, a tyto hranice musí stratigraf nalézt a nikoliv stanovit. Toto pojetí je v pozdějších publikacích postupně opuštěno a bude diskutováno níže (non-eventy a katastrofismus). V souhrnu je pro stanovení chronostratigrafických

jednotek nutné splnit řadu podmínek sledovaných ostatními stratigrafickými obory: z litostratigrafie co nejméně proměnlivé usazeniny, které svědčí o souvislém vrstevním sledu bez přerušení ukládání sedimentu. Pro stanovení samotné hranice stratotypu pak v rámci vrstevního sledu vybrat z biostratigrafie události naopak náhlé, jako jsou hranice biozón. Tyto jsou definované nejstaršími (ve vrstevním sledu nejnižší nalezenými) výskyty určité, takzvané vůdčí, zkameněliny, které se svým vývojem co nejvíce podobají isochronám.

2.4. První mezinárodní stratotyp

Vydání Mezinárodní stratigrafické rukověti završilo dlouhou diskuzi a dalo vědecké komunitě do rukou pravidla, podle kterých je nutno při studiu historie Země postupovat. Ve stejné době, kdy se vyjednávalo o definitivním znění rukověti, zároveň probíhala příprava a výběr vůbec prvního mezinárodního stratotypu, již podle pravidel později uvedených v rukověti. Je skvělým výsledkem české geologické školy, že jako vůbec první mezinárodní stratotyp byl vybrán vrch Klonk u obce Suchomasty v Českém krasu (CHLUPÁČ a KUKAL 1977), na kterém je definována hranice mezi silurským a devonským útvarem. Spodní hranici devonu určuje svým prvním výskytem graptolit *Uncinograptus uniformis* a globální korelaci dále zpřesňují indikativní výskyty další fauny. Kromě několika dalších druhů graptolitů to je například řada druhů konodontů (mikroskopických kousacích aparátů patřících patrně drobným, mihulovitým strunatcům), trilobiti *Prionopeltis klonk*, *Warburgella rugulosa rugulosa*, ramenonožec *Dayia bohémica* nebo lilijice *Scyphocrinites elegans* (CHLUPÁČ a VACEK 2003). Na rozdíl od řady jiných, i později definovaných stratotypů, které se dnes ukazují jako nevyhovující a potřebují revizi hranice nebo výběr nového stratotypu, je stratotyp na Klonku u Suchomast dodnes považován za příklad výborně definovaného stratotypu.

2.5. Pojetí stratotypu dál zraje

V dalších dvou dekáдах pokračovala vědecká komunita v definování stratotypů po celém světě a postupně jimi zaplňovala stratigrafickou tabulku celého fanerozoika, tedy od báze paleozoika až po dnešek (<https://stratigraphy.org>). V Českém krasu byly stanoveny další dva stratotypy, a to pro bázi posledního oddělení siluru – přídolí, v lomu Požáry u Prahy-Řeporyj (KŘÍŽ et al. 1986), a pro bázi druhého devonského stupně devonu – pragu, v lomu Homolka v Praze-Chuchli (CHLUPÁČ a OLIVER 1989).

Souběžně pokračovala odborná diskuze nad pojetím a použitím konceptu mezinárodních stratotypů. Zároveň se v této době začíná operovat s pojmem „zlatý hřeb“ (golden spike, tedy pevně fixovaný bod ve vrstevním sledu). Pomyslné zatlučení zlatého hřebu na stratotypovém sledu do hraniční vrstvy představuje symbol stanovení hranice, bod, ke kterému se tato hranice vztahuje.

HOLLAND (1984) ve svém komentáři k probíhajícímu stratigrafickému rozdělení siluru poznamenal: „stratotypy nepředstavují linie vedené v čase, ale v horninách. Tyto linie se snažíme při vši své nejlepší odborné vědomosti a schopnosti a za použití nejlepších nám dostupných nástrojů ke korelaci co nejvíce přiblížit synchronnosti. Jak se nám to daří ale z podstaty věci nemůžeme vědět... zlatý hřeb tedy netlučeme do času, ale do horniny představující čas.“

O dva roky později vydává Mezinárodní stratigrafická komise Pokyny k hraničním stratotypům (COWIE et al. 1986). V této práci upřesňují definici stratotypu a zavádějí pojem GSSP (Global Stratotype Section and Point – Globální stratotypový profil a bod), která klade důraz také na přesnou geografickou pozici stratotypu, oproti dřívějšímu důrazu pouze na stratigrafickou pozici. Stratotyp se tak stává, jako bod (GSSP), lépe ukotveným v čase a prostoru. Takováto

definice hranice, je-li tato hranice dobře vybrána, vytváří unikátní bod ve vrstevním sledu, který představuje jedinečný okamžik času a tím vytváří standard, se kterým mohou být ostatní vrstevní sledy korelovány. Od vybraného bodu, kde je zatlučen pomyslný „zlatý hřeb“ se laterálně odvíjí horizont, nebo pomyslná plocha korelace daného okamžiku v čase. Protože korelační nástroje, které používáme, nejsou dokonale přesné, může být tato plocha lehce zvlněná v čase a mírně se od daného časového okamžiku definovaného GSSP bodem odchýlovat. V každém případě je potřeba, aby byla tato plocha široce sledovatelná, tedy mezinárodně a globálně rozpoznatelná. A to nejlépe hlavním korelačním horizontem, nebo některým z přidružených, pomocných horizontů (metod). Z toho vyplývá důležitý předpoklad, že má při výběru stratotypu korelace (hranice) předcházet definici (stratotypu). Jinými slovy, při práci na výběru stratotypu se nelze soustředit pouze na vrstevní sled samotného uvažovaného stratotypu, ale je nutné také vědět, zda jsou horizonty z tohoto profilu zjistitelné i jinde. Zda například fosilní druhy, které nacházíme ve vrstvách stratotypu, můžeme najít i na jiných lokalitách po světě, včetně vzdálených oblastí. Jen v takovém případě můžeme prostřednictvím těchto zkamenělin hranici definovanou stratotypem korelovat. Tento předpoklad je dnes chápán jako zcela zásadní při výběru GSSP stratotypu (SALVADOR a MURPHY 1999; WALSH, GRADSTEIN a OGG 2004). COWIE et al. (1986) se v Pokynech k hraničním stratotypům dále věnují vlastnostem profilu, kde je značný důraz kladen na jednodušnost a neporušenost vrstevního sledu. Doporučují také využití instrumentálních metod, jejichž rozvoj v blízké budoucnosti předpokládají a tento předpoklad se nyní ukazuje jako velmi prozíravý.

2.6. Rozvoj instrumentálních metod

S vývojem vědeckého poznání roste přesnost stratigrafické korelace, objevují se nové metody a ty dříve používané se vyvíjejí. V posledních desetiletích prošly velkým rozvojem některé instrumentální stratigrafické metody, jako je magnetostratigrafie, cyklostratigrafie a zejména chemostratigrafie. Magnetostratigrafie (viz LANGEREIS et al. 2010) zkoumá orientaci pólů planety Země, která se epizodicky přepólovává, kdy si jižní a severní pól vymění znaménko. Měřením orientace magnetismu v minerálech usazených i vyvřelých hornin lze v rámci horninového sledu rekonstruovat historii přepólování v čase a srovnat ji se stejně naměřenými hodnotami v jiném sledu. Vzniká něco jako krátký výsek čarového kódu, který je třeba správně přiřadit do celkového sledu magnetických inverzí v geologické historii Země. Cyklostratigrafie (viz STRASSER et al. 2006) využívá pravidelnosti ve změnách rotace osy Země a excentricity její oběžné dráhy kolem Slunce. Tyto cyklické změny se projevují změnami v osvitlu planety Sluncem a její tepelné bilanci. Výsledkem jsou cyklické klimatické změny, které se zase odrážejí ve změnách charakteru usazovaných hornin. Cyklostratigrafie tedy srovnává cyklické změny v charakteru usazovaných hornin a výsledné vzorce porovnává mezi různými vrstevními sledy. Velmi dobré výsledky poskytuje zejména v mladších, kenozoických a mesozoických mořských sedimentech. Chemostratigrafie (viz WEISSERT, JOACHIMSKI a SARNTHEIM 2008) využívá změny v chemickém složení usazenin, nebo i zkamenělin, zejména změny poměru stabilních izotopů některých prvků, které odrážejí změny ve fyzikálně-chemických podmínkách při vzniku horniny, a opět srovnává průběh těchto změn mezi různými celky vrstevnatých hornin. Výsledky měření napříč vrstevním sledem se u chemostratigrafie a cyklostratigrafie obvykle zobrazují pomocí grafu, kde jsou naměřené hodnoty pro jednotlivé vrstvy spojeny křivkou. Tato křivka pak vyjadřuje kolísání dané hodnoty napříč profilem.

U magnetostratigrafie se nejčastěji zobrazuje úsečka s barevně odlišenými etapami tzv. normální a opačné polarity magnetického pole. Výhodou použití instrumentálních metod ve stratigrafii je to, že mohou výrazně zvýšit přesnost korelace. Nevýhodou pak to, že obvykle nefungují samostatně, je nutné je kombinovat s dalšími stratigrafickými metodami, a to omezuje jejich použití. Problémem totiž je, že rychlost usazování sedimentárních hornin obvykle velmi kolísá, a to jak v rámci jednoho vrstevního sledu, tak mezi více (srovnávanými) vrstevními sledy. To stlačuje a natahuje výsledný vzorec získaný jednou z výše zmíněných instrumentálních metod. Rychlost usazování se může dokonce i zastavit, což se projeví tak, že určitá část globálně platného vzorce zcela chybí. Takové přerušení je přirozenou a častou vlastností sedimentace a nazývá se hiát. Všechny tyto změny jsou navíc repetitivní, tedy se mohou opakovat.

Abychom nesrovnávali úseky hornin, které k sobě vůbec nepatří, potřebujeme stáří ověřit jinou, nezávislou metodou. Takovou metodou může být například geochronometrie (<http://quaternary.stratigraphy.org/stratigraphic-guide/geochronometry/>), založená na rozpadu radioaktivních prvků. Geochronometrické měření nám poskytne přímý časový údaj o vzniku dané horniny. Abychom mohli geochronometrii aplikovat na usazené horniny, musíme v nich ale najít nepřeplavené vrstvy sopečného popela s určitými minerály (apatit nebo zirkon), které uchovávají stáří příslušného sopečného výbuchu. Pokud bychom měřili geochronometrické stáří jiných usazených hornin, zjistili bychom stáří jejich zdrojových minerálů. Ty pocházely z vyvěřelých nebo přeměněných hornin, které vznikly dávno před tím, než byly erozí rozrušeny a jejich částičky větrem nebo vodou transportovány a usazeny na dně moře. Problematické je, že vrstev nepřeplaveného sopečného popela bývá ve vrstevních sledech usazených hornin poskrovnu a jejich rozmístění se ani zdaleka neřídí tím, kde by tyto vrstvy popela vědci potřebovali. Zbývá tedy jediné řešení – stará, dobrá biostratigrafie a srovnávání stáří vrstev pomocí obsahu zkamenělin. Nepostradatelnost této nejstarší stratigrafické metody je dána biologickou evolucí, která nikdy neopakuje již jednou zaniklé formy. Každý nový druh je tedy jedinečný a indikativní pro čas, kdy existoval. Správná kombinace biostratigrafie a geochronometrie na jedné straně s magnetostratografií, cyklostratografií nebo chemostratografií na straně druhé, nám tak může poskytnout korelaci o nebyvale vysoké přesnosti.

2.7. Dnešní (moderní) pojetí stratotypů

Na pokrok v metodách a přístupech musela vědecká komunita reagovat a dvacet let po vydání první stratigrafické rukověti vychází pod hlavičkou International Commission on Stratigraphy (ICS) další, upravená verze Pokynů ke hraničním stratotypům (REMANE et al. 1996). Toto vydání upravuje pojetí a význam mezinárodních stratotypů do podoby, jak je chápeme dnes. V úvodu je zdůrazněno, že při definování stratotypu je nutno pracovat se stratotypem hraničním, nikoliv stratotypem jednotky. Předchozí publikace ICS (HEDBERG 1976; COWIE et al. 1986) preferovaly použití hraničního stratotypu, ale nevylučovaly ani použití stratotypu jednotky. REMANE et al. (1996) použití jiného, než hraničního stratotypu, vylučují. Nejnovější postup v cyklostratigrafii kenozoika sice pozvolna vrací použití stratotypu jednotky zpět do vědecké diskuze (GRADSTEIN a OGG 2020), ale preference použití hraničních stratotypů je stále platná. V tomto pojetí definují GSSP stratotypy pouze hraniční interval stupně (konkrétně jeho bázi) a nikoliv jeho horninovou náplň. Horní hranice daného stupně pak je definována GSSP stratotypem následujícího stupně (obr. 2). Zároveň REMANE et al. (1996) upřesňují hierarchické vztahy mezi stupni a vyššími chronostratigrafickými

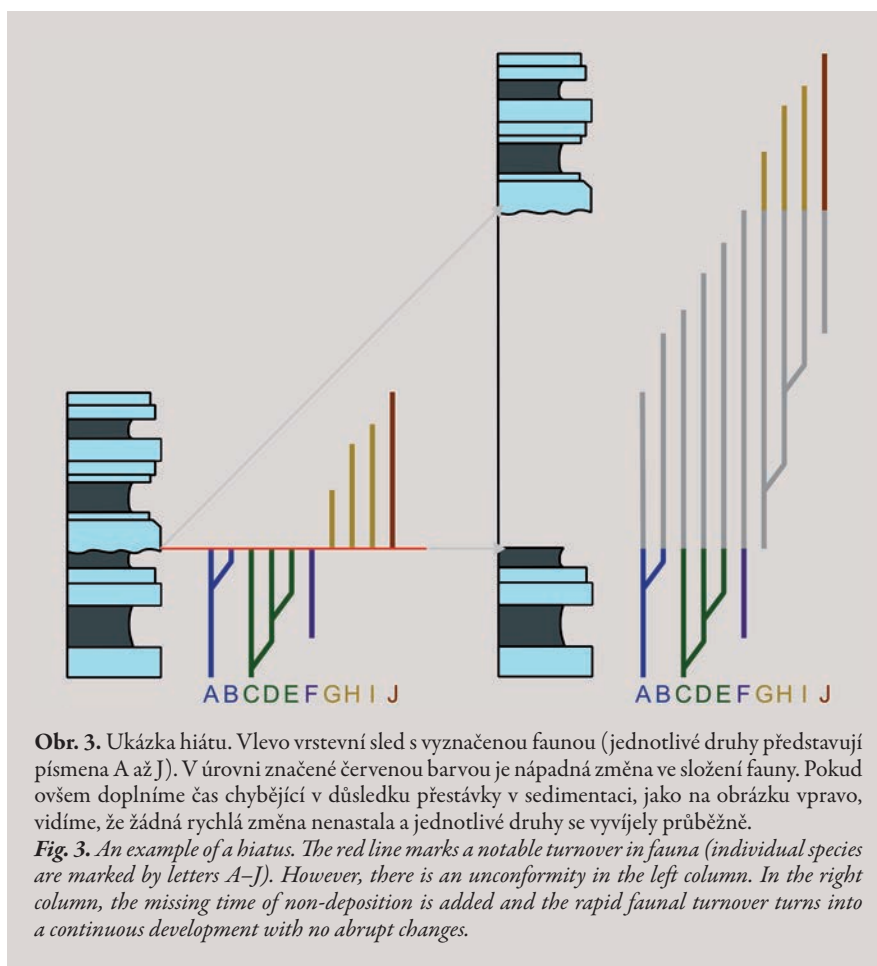
jednotkami. Zjednodušeně lze říci, že největší se řídí dle nejmenšího; báze chronostratigrafické jednotky vyššího řádu je vždy stanovena bázi nejspodnější hierarchicky nižší jednotky. Tedy eotém má svoji bázi definovanou bázi svého nejnižšího eratému, eratém má svoji bázi definovanou bázi svého nejnižšího útvaru, útvar bázi svého nejnižšího oddělení a toto oddělení má svoji bázi definovanou bázi svého nejnižšího stupně a tato je definována GSSP stratotypem. Nové vydání Pokynů pro hraniční stratotypy již jasně definuje, že korelace musí předcházet definici: „...*korelační potenciál jakékoliv hranice by měl být důkladně testován studiem několika intervalů vrstevních sledů jdoucích napříč touto hranicí, ideálně na několika kontinentech. Nejlepší z těchto vrstevních sledů pak může být vybrán pro definici GSSP... toto implikuje integraci dat z různých lokalit a (paleo)prostředí do globální syntézy*“ (REMANE et al. (1996).

REMANE et al. (1996) se také vyjadřují k využití instrumentálních metod, zejména k chemostratigrafii a magnetostratigrafii. Poukazuje na repetitivní charakter dat získaných těmito metodami a nutnost tyto metody následně kalibrovat radioizotopickým stářím hornin (geochronometricky). Bohužel rozmístění geochronometricky datovatelných (vulkanických) horizontů neodráží potřeby stratigrafa a navíc jejich přesnost klesá s rostoucím stářím (mladší horniny datujeme přesněji, tedy s menší odchylkou, nežli starší). Nezbyvá než se vrátit k biostratigrafii. Biostratigrafické události nejsou ze své podstaty zcela isochronní, ale každý druh existuje na Zemi v rámci daného časového úseku. Pokud nějaká fylogenetická linie odštěpuje rychle nové druhy, mohou mít tyto odštěpené druhy korelační potenciál menší než jeden milion let, což je pro korelaci horninových sledů velmi dobrá přesnost. Proto je biostratigrafie, zejména u velmi starých hornin, stále přesnější, levnější a obvykle i lépe dostupná než geochronometrické měření stáří (REMANE et al. 1996; REMANE 2003).

Pokyny k hraničním stratotypům také poprvé pracují s terminologií primární a sekundární události. Jako primární událost je chápána taková událost, na kterou je přímo vázáno pomyslné umístění „zlatého hřebu“ na stratotypu. Sekundární události pak pomáhají zpřesnit pozici primární události a korelovat celý GSSP v oblastech a na lokalitách, kde primární událost není zjištělná. GRADSTEIN a OGG (2020) zdůrazňují, že těsné provázání primární události ve stratotypovém vrstevním sledu několika sekundárními je nezbytným požadavkem pro definici stratotypu a Achillovou patou, která již znemožnila umístění stratotypu na mnoha historických lokalitách s klasickými vrstevními sledy. Jako sekundární události jsou podle možnosti využívána data získaná instrumentálními metodami. Tento trend posiluje zejména s dalšími pokroky v cyklostratigrafii a chemostratigrafii stabilních izotopů.

2.8. Katastrofismus

Vývoj života na Zemi byl již od raného období stratigrafie nahlížen i skrze tzv. katastrofismus. Toto pojetí předpokládalo, že jednotlivá období v historii života na Zemi jsou přirozená a každé období představuje určitý časový úsek, vyjádřený úsekem vrstevnatého sledu s určitými zkamenělinami. Tento soubor zkamenělin pak existoval tak dlouho, dokud nevymizel v důsledku katastrofy (vymírání). Takové vymírání vyhubilo do té doby žijící druhy a vyhubené druhy byly po čase nahrazeny novými. Katastrofické pojetí předpokládá existenci diskrétních celků vrstevních sledů definovaných přítomným obsahem zkamenělin, které mají trvání od katastrofy do katastrofy. Úkolem stratigrafa pak není takové období stanovit, ale objevit (REMANE 2003). Proto měly být vyhledávány výrazné změny v geologickém záznamu a hranice měly být kladeny na tyto změny. Takový přístup ale vede k tomu, že hranice bývají nevědomky kladeny na hiáty (diskon-



tinuity v sedimentárním a fosilním záznamu) nebo na kondenzované horizonty (REMANE 2003). Jedná se o místa, kde ve vrstevním sledu chybí jakýkoli záznam času. A to buď zcela (diskonformita, neboli hiát), nebo je relativně dlouhý čas zaznamenaný v několika málo vrstvách (kondenzovaný horizont). Zdánlivě pak tato místa vypadají, jako místa výrazných změn ve fosilních společenstvech (obr. 3).

Dnes je zjevné, že skutečný vývoj ekosystémů na Zemi je mnohem složitější. Velkých katastrof, či více nebo méně globálních kolapsů a krizí, známe celou řadu. Ačkoliv mnohé z nich mají na svědomí výrazné změny celých ekosystémů, tak jejich distribuce v rámci historie Země není nijak rovnoměrně rozložená. Tyto katastrofy často nebývají náhlé a univerzální. To znamená, že zasahují různé skupiny organismů v různých prostředích různou silou a v různých časech. Záznam, který po sobě tyto události zanechávají v usazeninách, tak může být rozostřený a nemusí mít dobré vlastnosti pro korelaci.

2.9. „Nudné“ úseky (non-eventy)

Z tohoto důvodu jsou pro umístění stratotypů vyhledávány úseky vrstevního sledu, kde se „nic neděje“. Kde nejsou náhlé výrazné změny v celých fosilních společenstvech, ani v charakteru usazování, které zrcadlí změnu prostředí. V úsecích stabilního, rovnoměrného a klidného vývoje jsou vyhledávány jednotlivé události, jako jsou objevení se, nebo výjimečně zmizení fosilního druhu, změna magnetismu, či výraznější výchylky v poměrech stabilních izotopů některých environmentálně citlivých prvků. Následně se vědci snaží tyto události korelovat a vytvářet tak hranice, které se svým průběhem v celosvětovém měřítku co nejvíce blíží isochronám. Přesto je názor, že stratigrafické dělení by mělo odrážet přirozený vývoj Země, hluboce zakořeněn u mnoha badatelů. Taková místa jsou nazývána, trochu

posměšně, jako „non-eventy“, volně přeloženo jako nudné, či bezvýznamné úseky a kladení hranic na tyto události je kritizováno (LUCAS 2018). Tato kritika je vedena například z pohledu, že bazální stratotypy stupňů určují i hranice hierarchicky vyšších jednotek. Dle tohoto názoru není správné, aby například spodní hranice paleozoika (eratém, který trvá téměř 290 milionů let) byla položena na víceméně nicotné události objevení se ichnofosilního taxonu, tj. zvláštního typu stopy po činnosti organismů, u které neznáme s jistotou ani původce.

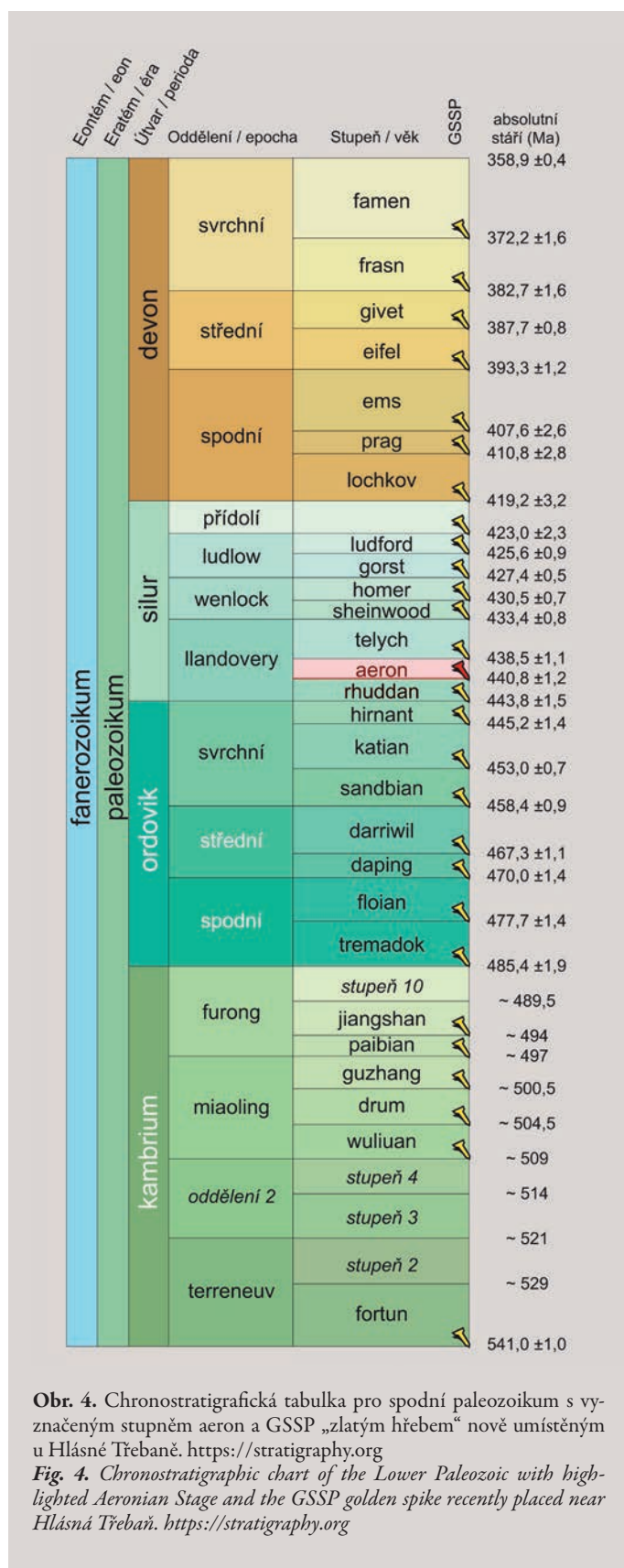
2.10. „Výměna“ stratotypů

Jak se s postupem času neustále zpřesňovala korelace a pojetí stratotypů se vyvíjelo, ukázalo se, že některé dříve definované stratotypy neslouží dobře jako standardy pro korelaci chronostratigrafických jednotek. Jedním z nich byl i stratotyp pro bázi stupně aeron – druhého stupně bazálního silurského oddělení llandovery (obr. 4). Z oblasti Walesu pochází i názvy pro oddělení llandovery (podle města v jihozápadní části Walesu) i stupeň aeron (podle farmy s tradičním velšským názvem Cwm-Coed-Aeron). Stratotyp spodní hranice stupně aeron byl definován v roce 1984 (BASSETT 1985; COCKS, HOLLAND a BASSETT 1989) v souvrství Trefawr, v zářezu lesní komunikace, poblíž stejnojmenné obce v samém srdci tradiční typové oblasti pro silur již od dob Rodericka Murchisona. Tato oblast byla chápána jako typová oblast pro silur a stala se přirozenou

volbou pro umístění stratotypů silurských stupňů. Tento přístup se nakonec ukázal jako jeden z důvodů, proč je dnes při výběru stratotypu kladen důraz na to, aby korelace hranice předcházela definici stratotypu (WALSH, GRADSTEIN a OGG 2004; REMANE 2006).

Stav stratotypu Trefawr track cutting shrnuje MELCHIN et al. (2020) tak, že stratotypový bod je definován na úrovni výskytu graptolita *Pernerograptus sequens*, který sice indikuje graptolitovou zónu *Demirastrites triangulatus*, ale vůdčí druh graptolita zóny *triangulatus* se ve stratotypovém vrstevním sledu vyskytuje pouze v jednom horizontu, zřejmě někde uvnitř rozsahu biozóny *triangulatus*. *Pernerograptus sequens* nemá dobrý korelační potenciál, neboť se kromě stratotypového vrstevního sledu vyskytuje pouze na několika dalších lokalitách, a to pouze v Evropě. Na těchto lokalitách se navíc poprvé objevuje výrazně výše ve vrstevním sledu, než vůdčí druh *D. triangulatus*. Záměrem při definici tohoto GSSP bylo umístit hranici na bázi biozóny *D. triangulatus* (kterou měl indikovat právě *P. sequens*). Původně definovaný GSSP ale prvním výskytem *P. sequens* indikuje událost výše, již uvnitř biozóny *triangulatus*, a navíc, díky nízkému korelačnímu potenciálu graptolita *P. sequens*, neumožňuje dostatečně přesnou korelaci.

V roce 2011 se mezinárodní subkomise pro stratigrafii siluru (pracovní komise složená z mezinárodních odborníků na stratigrafii siluru) rozhodla postupně nahradit nevyhovující stratotypy několika silurských stupňů a mimo jiné začala hledat i nový GSSP pro bázi stupně aeron. Během následující dekády se podařilo předložit tři návrhy: 1) vrstevní sled Danangou, v Nanzhengu, provincie Shaanxi, Čína (SHAO et al. 2018), 2) vrstevní sled Rheidol Gorge, ve Walesu, Velká Británie (MELCHIN et al. 2023) a 3) vrstevní sled u Hlásné Třebaně, Česká republika (ŠTORCH et al. 2018). Do finálního hla-



Obr. 4. Chronostratigrafická tabulka pro spodní paleozoikum s vyznačeným stupněm aeron a GSSP „zlatým hřebem“ nově umístěným u Hlásné Třebaně. <https://stratigraphy.org>

Fig. 4. Chronostratigraphic chart of the Lower Paleozoic with highlighted Aeronian Stage and the GSSP golden spike recently placed near Hlásná Třebaně. <https://stratigraphy.org>

3. Nový GSSP stratotyp u Hlásné Třebaně

Vrstevní sled u Hlásné Třebaně se nachází na vyvýšenině, kterou tvoří ostroh nad silnicí z Hlásné Třebaně na Rovinu a Lety a tvoří část jižní hranice CHKO Český kras. Vyvýšený ostroh je budován ložní žilou bazaltu, tedy silurských láv. Na ty nasedají pískovce a prachovce kosovského souvrství nejvyššího ordoviku. Tyto pískovce a prachovce tvoří hlavní část ostrohu. Silurské usazeniny následují pod horní hranou ostrohu a tvoří je jemnozrnné, tmavě šedé až černé, tence laminované břidlice želkovického souvrství (obr. 5, 6 a 10C). Tato výrazná a náhlá změna v sedimentaci byla odrazem globálních změn klimatu. Ve svrchním ordoviku došlo k ochlazení planety a tvorbě rozsáhlého ledovcového štítu ve vyšších zeměpisných šířkách jižní polokoule (FORTEY 2005). Toto ochlazení bylo doprovázeno jedním z největších hromadných vymírání v historii planety (WEBBY et al. 2004; FORTEY 2005). V Barrandieniu, který se tehdy nacházel ve středních šířkách jižní polokoule, se tato perioda projevuje ukládáním pískovců a prachovců kosovského souvrství (HAVLÍČEK in CHLUPÁČ et al. 1998). Na samém konci ordoviku se Země rychle otepluje, ledovce tají a voda, která v nich byla vázaná, se vrací do oceánů. Dochází ke zvýšení hladin oceánů a snížení cirkulace oceánského proudění. Díky tomu nebylo dno spodnosilurského moře prokysličené a bez kyslíku nedocházelo k oxidaci organické hmoty, která se tak na dně hromadila a zbarvila usazeniny do černa. Tímto způsobem vznikly černé břidlice spodního siluru, které můžeme najít na mnoha místech po světě (COCKS 2005), a které jsou zdrojem ropných ložisek v severní Africe a na Arabském poloostrově a ložisek břidlicového plynu např. v Číně. Nasedání tmavých silurských břidlic želkovického souvrství na kosovské souvrství, které je ve své svrchní části vyvinuto jako jemné, světlé prachovce, je na naší lokalitě u Hlásné Třebaně skvěle odkryto. Vědecký tým, který návrh nového stratotypu pro bázi stupně aeron na území Barrandieniu vypracoval, publikoval své výsledky v prestižním časopise *Lethaia* (ŠTORCH et al. 2018). Tento článek se stal základem pozdějšího formálního návrhu, předloženého ICS k posouzení.

Vrstevní sled spodního siluru je u Hlásné Třebaně výjimečně dobře zachován. Vědci kromě této lokality zevrubně prostudovali dalších šest lokalit v Barrandieniu a vrstevní sled u Hlásné Třebaně se ukázal jako zdaleka nejvhodnější pro návrh GSSP stratotypu báze stupně aeron. Profil usazeninami o celkové mocnosti téměř 4 m byl důkladně, vrstvu po vrstvě, prostudován a zakreslen (obr. 6). V rámci studovaného vrstevního sledu byly rozlišeny dva kratší intervaly s přerušovanou sedimentací, tedy hiáty. Oba se nachází v blízkosti hranice se svrchním ordovikem, tedy poměrně hluboko v bazálním silurském stupni rhuddan, mimo důležitý hraniční interval s aeronom. Jedinou lehkou výtkou, kterou lze uvést k vývoji usazenin u Hlásné Třebaně je, že se jedná o poměrně kondenzovaný vrstevní sled. To znamená, že se sedimenty usazovaly pomalu a značný čas je tedy vyjádřen relativně malou mocností vrstev. Tento nedostatek je ale bohatě kompenzován plynulostí a úplností sedimentárního i fosilního záznamu zachovaného ve zdejší vrstevní sledu. Jenže jakou korelační událost může nabídnout mořské dno chudé na kyslík? Na takovém dně obvykle nežijí živočichové, kteří by mohli zkamenět, protože ti potřebují ke svému životu kyslík. Přesto jsou tyto horniny plné zkamenělin.

3.1. Graptoliti

Nejčastěji nacházenou zkamenělinou v uloženinách anoxického silurského moře jsou graptoliti. Graptoliti byli koloniální, resp. klonální živočichové, které řadíme do kmene polostrunatců a kteří si vytvářeli pevnou schránku z organické hmoty podobné kolagenu, zvanou rhabdosom nebo tubarium (MALETZ 2017). Jeden rhabdosom

sování na podzim roku 2023 se dostaly pouze dva návrhy – britský Rheidol Gorge v klasické oblasti Walesu a Hlásná Třebaně. Subkomise téměř jednomyslně zvolila jako nový stratotyp vrstevní sled u Hlásné Třebaně. Návrh byl následně schválen i nadřazenou Mezinárodní stratigrafickou komisí (ICS) IUGS. Čím komisi Hlásná Třebaně přesvědčila?



Obr. 5. Schematické znázornění geologické stavby ostrohu u Hlásné Třebaně, podle CHLUPÁČE (1999).

Fig. 5. A schematic drawing of the geological setting of the Hlásná Třebaň hill, after CHLUPÁČ (1999).

odpovídal jedné kolonii a jsou známe rhabdosomy o velikosti od několika milimetrů do velikosti přesahující metr (LOYDELL a LOVE-RIDGE 2001). Tato vnější schránka, složená z trubičkovitých komůrek (ték) jednotlivých zooidů, snadno fosilizovala.

Graptoliti se jako makroplankton volně vznášeli v blízkosti hladiny ordovických, silurských a spodnosedonských moří a na dno dopadali až po odumření. Tam většinou chyběly organismy, které by jejich zbytky mohly sežrat nebo rozložit. Proto jsou dominantní a často jedinou zkamenělinou, kterou ve velmi rozšířených bezkyslíkatých (anoxických) břidlicích spodního siluru po celém světě nacházíme. Nejdůležitější vlastností graptolitů z hlediska stratigrafie je právě jejich planktonický způsob života a rychlá evoluce. Graptoliti rychle vytvářeli nové druhy a ty se mořskými proudy rychle šířily na velké vzdálenosti. Zejména období siluru je význačné tzv. nízkou bioprovincialitou graptolitů, tedy tím, že stejné druhy graptolitů mnohdy nacházíme v mořských usazeninách různých kontinentů obou polokoulí. Graptoliti tak představují ideální zkameněliny pro biostratigrafické členění a časovou korelaci sedimentů. A tmavé břidlice u Hlásné Třebaně jsou jimi doslova přeplněné.

ŠTORCH et al. (2018) jen z této lokality prostudovali více než 5 000 rhabdosomů, které zařadili do 65 druhů. Jako primární znak určující spodní hranici stupně aeron vybrali první objevení druhu *Demirastrites triangulatus*, vůdčího druhu celosvětově rozlišované stejnojmenné graptolitové biozóny. Je to stejný druh graptolita, který měl indikovat bázi stupně aeron i na původním GSSP stratotypu ve Walesu (viz kapitola „Výměna“ stratotypů). Druh se na lokalitě Hlásná Třebaň poprvé objeví 1,38 m nad bází želkovického souvrství (obr. 6). Vyskytuje se téměř po celém světě a je snadno rozlišitelný, takže představuje ideální korelační nástroj.

Vrstevní sled u Hlásné Třebaně nabídl také řadu dalších, sekundárních korelačních událostí – prvních objevení jiných světově rozšířených druhů několika rodů graptolitů (obr. 7 a 8). *Demirastrites triangulatus* byl prvním zástupcem celého rodu *Demirastrites*, který záhy po druhu *D. triangulatus* dal vznik ještě několika dalším druhům (ŠTORCH a MELCHIN 2018; obr. 7). Rod *Demirastrites* je navíc morfologicky dobře rozeznatelný i pro ne-specialistu na graptolity.

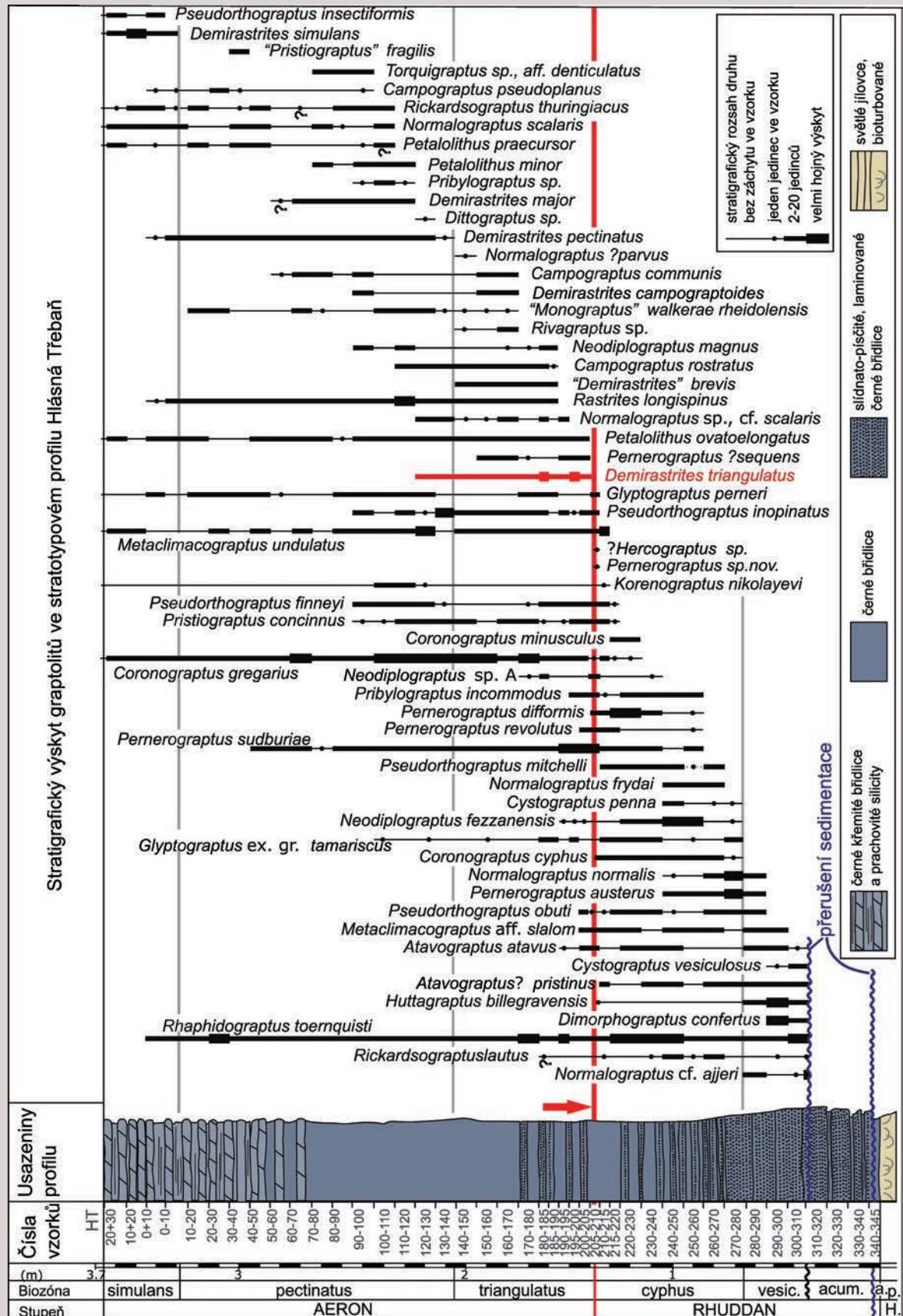
Jakékoli objevení graptolita rodu *Demirastrites* dává jasnou informaci o pozici nad primární událostí a tudíž o aeronském stáří příslušné vrstvy.

Kromě spodní hranice a bazální biozóny *D. triangulatus* jsou na stratotypu Hlásná Třebaň zastíženy i graptolitové biozóny *Demirastrites pectinatus*, *Demirastrites simulans*, *Pribylograptus leptotheca* a *Lituigraptus convolutus*, dohromady více než polovina vrstevního sledu celého stupně aeron. Jednotlivé události graptolitové biostratigrafie, tedy hlavně první, ale i poslední objevení druhu, jsou na Hlásné Třebani kolem hranice hustě proloženy (obr. 8). Výrazně tím zvyšují přesnost korelace hranice. Takového proložení biozonálních událostí bylo popsáno jako ideální způsob korelace stratotypové hranice již v první stratigrafické rukověti (HEDBERG 1976).

3.2. Chitinovci (chitinozoa)

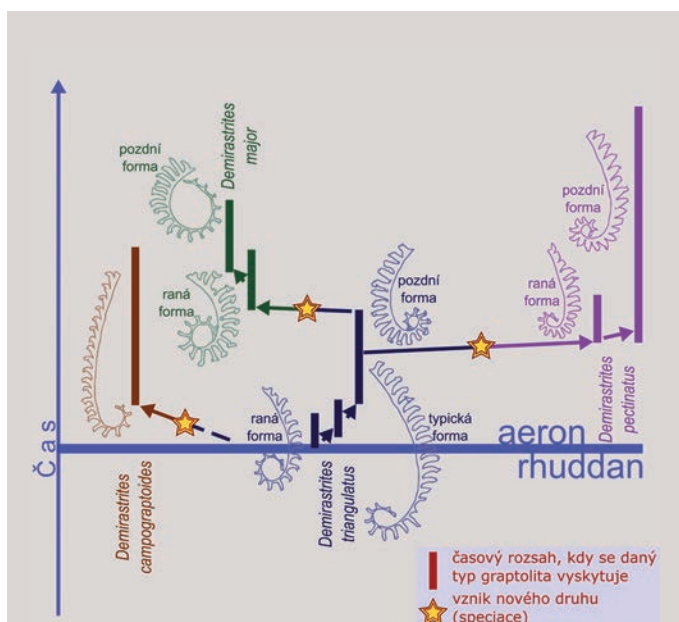
Kromě graptolitů nabízí vrstvy u Hlásné Třebaně další skupinu zkamenělin vhodnou ke korelaci. Tato skupina se nazývá chitinovci, což je český překlad mezinárodně užívaného slova chitinozoa. Jedná se o drobné, mikroskopické objekty, které svým tvarem připomínají lahvičku. Aby bylo možné je studovat, je potřeba usazenou horninu rozpustit v silných anorganických kyselinách. Chitinovci jsou tvořeni organickou hmotou, která je vůči těmto kyselinám odolná, takže je následně můžeme pipetou vybrat z tzv. organického rezidua, tedy organickém zbytku po rozpouštění. O tom, jaký organismus tyto tajemné lahvičky představují, se dodnes diskutuje. V poslední době jsou nejvíce přijímány dvě hypotézy. První předpokládá, že se jedná o samostatné, jednobuněčné organismy, podobné protistům (LIANG et al. 2019; LIANG et al. 2020), druhá předpokládá, že se jedná o vajíčka neznámých mnohobuněčných (PARIS a NÖLVAK 1999; VODIČKA et al. 2022). Pro otázky stratigrafie ale není tato otázka podstatná, naopak je důležité, že chitinovci měli přinejmenším část svého životního cyklu planktonní, proto je můžeme získat i z kyslíkem chudých usazenin spodního siluru, kam napadali zřejmě po odumření.

Pro biostratigrafickou korelaci stratotypu u Hlásné Třebaně se nejvíc nadějným jeví rod *Spinachitina* (obr. 9). V rámci tohoto rodu je pro období začátku stupně aeron dobře dokumentovaný druh



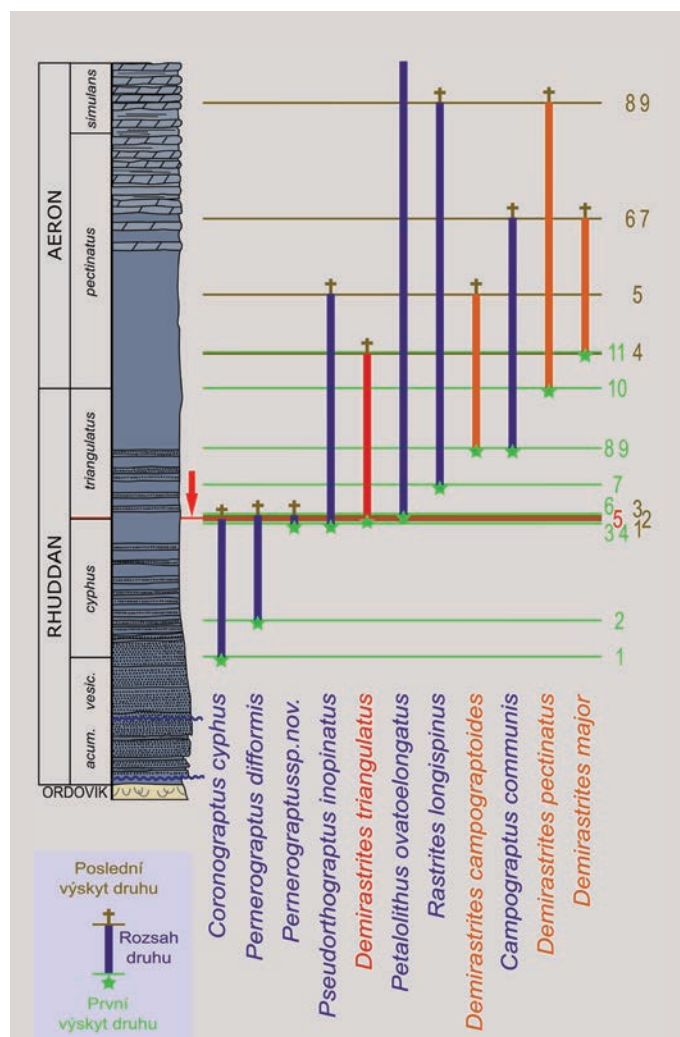
Obr. 6. Schematický profil usazeninami stratotypovým vrstevním sledem s biostratigrafií a rozsahy jednotlivých druhů graptolitů, podle ŠTORCHA et al. (2018).

Fig. 6. A schematic sedimentary section of the Hlásná Třebaň stratotype, with indicated biostratigraphy and ranges of individual graptolite species, after ŠTORCH et al. (2018).



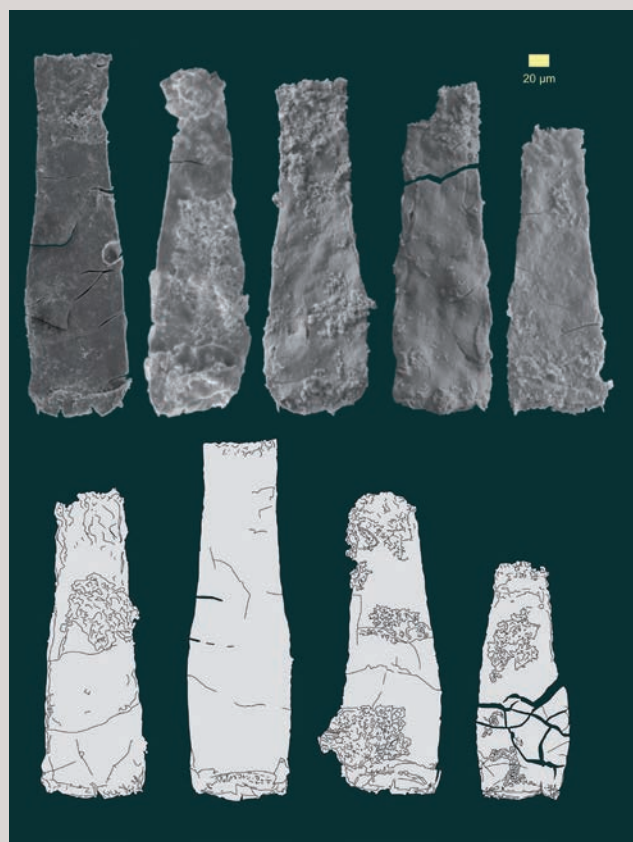
Obr. 7. Schematizovaný obrázek radiace a stratigrafických rozsahů jednotlivých druhů a morfotypů graptolitů rodu *Demirastrites* na bázi aeronu. Podle ŠTORCHA a MELCHINA (2018).

Fig. 7. A schematic drawing of radiation and stratigraphic ranges of individual species and morphotypes of the graptolite genus *Demirastrites* in the lowermost Aeronian. After ŠTORCH and MELCHIN (2018).



Obr. 8. Schematizované stratigrafické rozsahy korelačně významných graptolitových druhů na profilu u Hlásné Třebaně s vyznačenými údálostmi prvních a posledních výskytů každého druhu.

Fig. 8. A schematic drawing of stratigraphic ranges of biostratigraphically significant graptolite species with highlighted correlation events of the first and the last appearances of all individual species in the Hlásná Třebaně section.



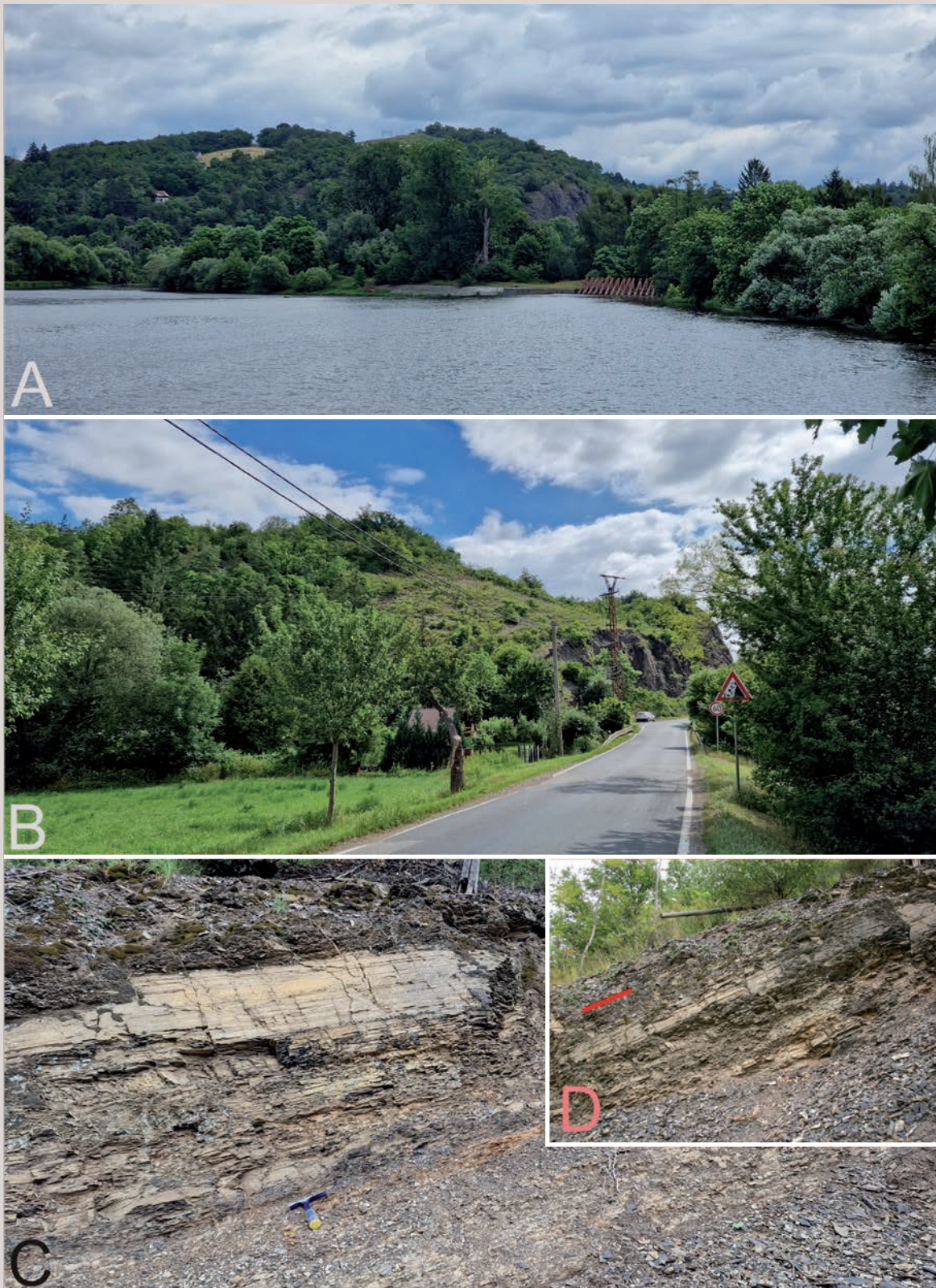
Obr. 9. Ukázka chitinovců rodu *Spinachitina* z Hlásné Třebaně. Horní řada: fotografie z řádkovacího elektronového mikroskopu. Spodní řada: obrysové kresby.

Fig. 9. Examples of chitinozoans of the genus *Spinachitina* from Hlásná Třebaně. Scanning electron photomicrographs (top) and line drawings (bottom).

Spinachitina maenilli, a to zejména z Baltiky (kontinent, který se v siluru nacházel v tropech a dnes tvoří významnou část Skandinávie). Ve vrstevním sledu Hlásné Třebaně se zatím nepodařilo přítomnost druhu *S. maenilli* potvrdit. Je ale přítomno několik druhů, které jsou *S. maenilli* velmi podobné a některé z nich mají svůj první výskyt zcela shodný s prvním výskytem graptolitu *D. triangulatus*. Studie chitinovců z Hlásné Třebaně není ještě dokončena, ale korelační potenciál chitinovců pro tuto úroveň je významný.

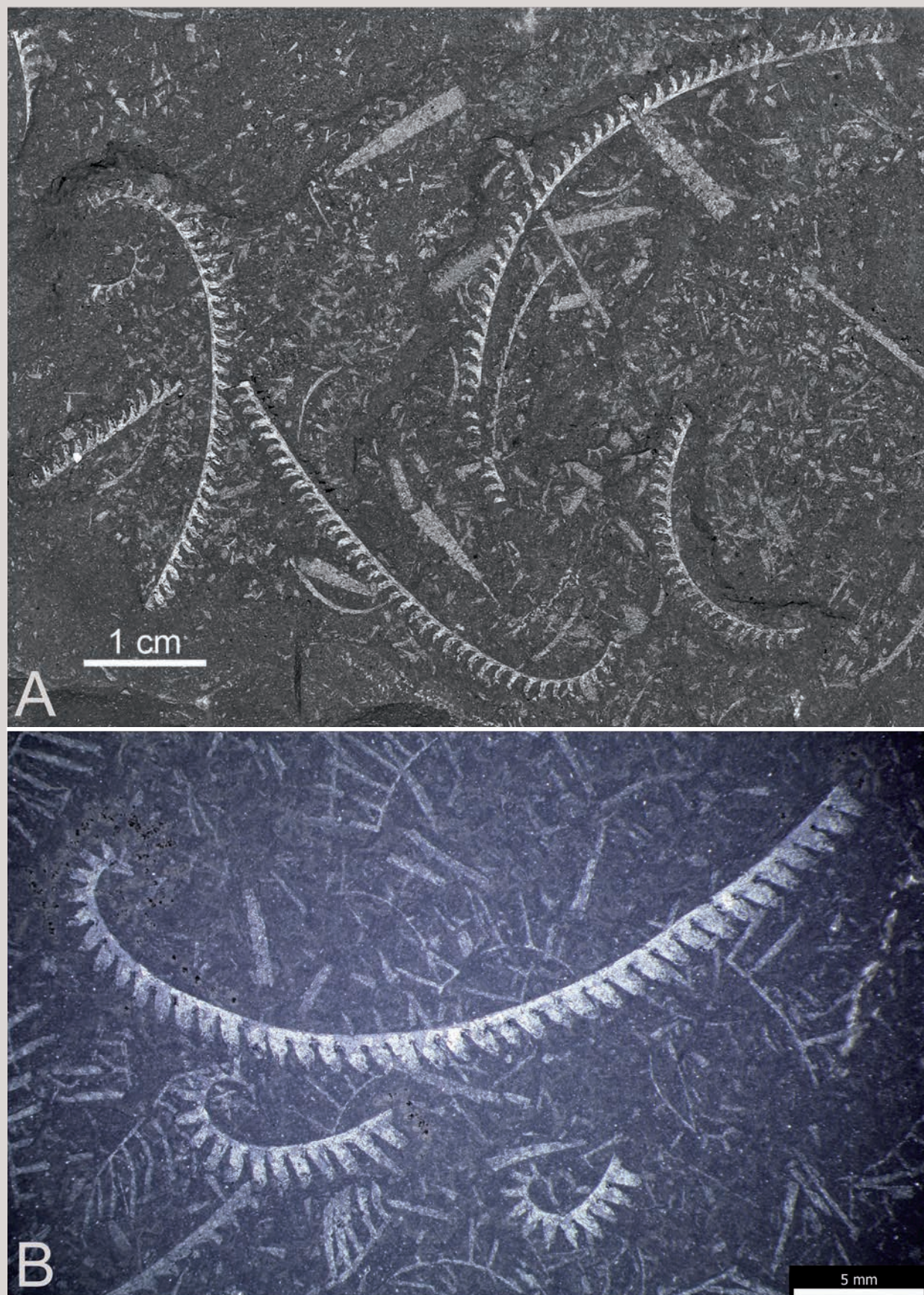
3.3. Chemické a fyzikální vlastnosti silurských vrstev u Hlásné Třebaně

Kromě výzkumu sedimentologie a biostratigrafie věnovali vědci velkou pozornost také fyzikálně chemickým vlastnostem hornin stratotypu u Hlásné Třebaně, zejména jejich vývoji napříč vrstevním sledem. Byla provedena celá řada analýz s cílem co nejvíce poznat charakter prostředí, ve kterém se tento vrstevní usazoval, a pokusit se zachytit takovou změnu v podmínkách sedimentace, která se do vrstevního sledu prokopírovala jako měřitelný signál korelovatelný na velké vzdálenosti. Zde je nutno poznamenat, že v takové chvíli



Obr. 10. A – pohled na vrch u Hlásné Třebaň přes řeku ze Zadní Třebaň. B – pohled na vrch u Hlásné Třebaň od silnice Hlásná Třebaň–Lety; C – vrstevní sled kosovského souvrství ordoviku a želkovického souvrství siluru na profilu u Hlásné Třebaň; kladivo označuje měřítko a přibližnou polohu hranice ordovik/silur; D – jiný pohled na želkovické souvrství spodního siluru s vyznačenou GSSP úrovní báze stupně aeron na profilu u Hlásné Třebaň. Foto J. Vodička (A–C) a P. Štorch (D).

Fig. 10. A – a view of the hill near Hlásná Třebaň from across the river from Zadní Třebaň. B – the hill near Hlásná Třebaň viewed from the Hlásná Třebaň – Lety road. C – a sedimentary succession of the Ordovician Kosov Formation and Silurian Želkovice Formation in the Hlásná Třebaň section; the hammer is placed roughly on the Ordovician/Silurian boundary. D – a different view of the lowermost Silurian Želkovice Formation near Hlásná Třebaň with marked position of the GSSP base of the Aeronian Stage. Photos A–C by J. Vodička, photo D by P. Štorch.



Obr. 11. Vrstevní plocha břidlice z profilu u Hlásné Třebaně. A – s rhabdosomy graptolitů *Demirastrites triangulatus*; B – s rhabdosomy graptolita *Demirastrites pectinatus*. Foto P. Štorch.

Fig. 11. A shale bedding plane from the Hlásná Třebáň section. A – with rhabdosomes of graptolite *Demirastrites triangulatus*; B – with rhabdosomes of graptolite *Demirastrites pectinatus*. Photos by P. Štorch.

se vědci ocitají trochu na vážkách. Ve všech doporučeních ke stratotypům je totiž jako důležitá podmínka uvedeno, že sedimentace musí být kontinuální a bez významných změn, tedy úsek, kde se „nic neděje“. A výrazná změna v některém chemickém či fyzikálním parametru by naopak naznačovala, že se v daném úseku „něco dělo“. Vrstevní sled u Hlásné Třebaně v tomto směru potvrdil svoji výjimečnost – drtivá většina měření neukázala žádnou takovou významnou změnu. Výjimkou byl pozitivní výkyv v zastoupení těžkého stabilního izotopu uhlíku ^{13}C označovaný zkratkou EACIE (Early Aeronian Carbon Isotope Excursion), který záhy po prvním objevení graptolita *D. triangulatus* (hranice rhuddan/aeron) vykázal vrchol a změnu směru ve vývoji poměru těžkého izotopu uhlíku ^{13}C k lehkému ^{12}C . Jedná se o drobný, ale celosvětově korelovatelný výkyv (MELCHIN et al. 2020; YU et al. 2024) – sekundární událost indikující bázi stupně aeron.

4. Závěr

Geologický čas je nesmírně dlouhý, a proto je orientace v něm obtížná. Člověk studuje geologickou historii Země pomocí hornin a k orientaci v čase musí přirozeně využívat všech vlastností záznamu, který je v nich uchován. V pionýrských dobách geologie velikáni jako byl Sedgwick, Murchison nebo Barrande používali ke srovnání stáří hornin téměř výhradně zkameněliny. S jejich pomocí byly velmi nahrubo srovnávány relativně velké horninové celky. Postupem času ale rostla potřeba přesnosti korelace a ukázala se nezbytnost mezinárodního sjednocení metodiky i terminologie pro korelaci hornin a vytvoření jednotné klasifikace pro horniny na základě stáří jejich vzniku. Po dlouhých debatách nalezla odborná komunita v 70. letech 20. století shodu na použití stratotypů hranic geologických období v typových sledech vrstevnatých hornin. Tato snaha vyvrcholila schválením prvního mezinárodního stratotypu pro hranici období siluru a devonu, který je vrchu Klonk u obce Suchomasty v Českém krasu. Pojetí stratotypů se od jejich zavedení neustále vyvíjí a od 80. let jsou pomyslné zatloukány „zlaté hřeby“ do vybraných typových sledů. Tyto pomyslné hřeby umístěné na jednom vybraném profilu symbolizují pevné body v čase a dají se přirovnat k majákům, podle kterých se vědci orientují v hlubokém čase.

Shodu celosvětové odborné komunity na principu fungování mezinárodních stratotypů označovaných zkratkou GSSP a schopnost tento princip neustále vylepšovat a aktualizovat lze bez nadsázky označit za příklad vítězství spolupráce v extrémně nepřehledném terénu geologické minulosti. Princip a aplikace hraničních stratotypů je i výsledkem české stratigrafické školy, která v celém procesu hraje od počátku až dodnes výraznou roli.

Nově definovaný stratotyp u Hlásné Třebaně je dobrým příkladem tradice a moderního pojetí. Tradiční vlastnosti stratotypů, jako jsou neporušený vrstevní sled, hojnost zkamenělin a hojnost biostratigrafických událostí, jež jsou kolem hranice hustě proloženy, či rychlé objevování se nových druhů, zaručují vysokou rozlišovací schopnost korelace. Navíc vyhovují i současným nárokům na velmi dobrou korelovatelnost po celém světě a využití instrumentálních metod. GSSP stratotyp u Hlásné Třebaně tak představuje moderní stratotyp, který slibuje velmi dlouhou a stabilní životnost a vysokou funkčnost. Navazuje na barrandienskou tradici stratotypů na Klonku u Suchomast a v lomech Požáry a Homolka.

Literatura

- BASSETT M. G. (1985): Towards a “common language” in stratigraphy. – *International Geoscience*, 8 (2): 87–92.
- COCKS L. R. M. (2005): Silurian. – In: R. C. SELLEY, L. R. M. COCKS, I. R. PLIMER (Eds.): *Encyclopedia of geology*: 184–193. Elsevier Academic Press.
- COCKS L. R. M., HOLLAND C. H., BASSETT M. G. (1989): The Llandovery Series in the Llandovery area. – In: C. H. HOLLAND, M. G. BASSETT (Eds.): *A Global Standard for the Silurian System, Geological Series*, 9: 36–50. National Museum of Wales. Cardiff.
- COWIE J. W., ZIEGLER W., BOUCOT A. J., BASSETT M. G., REMANE J. (1986): Guidelines and statutes of the International Commission on Stratigraphy (ICS). – *Episodes*, 9 (2): 1–14.
- FORTEY R. A. (1993): Charles Lapworth and the biostratigraphic paradigm. – *Journal of the Geological Society*, 150 (2): 209–218.
- FORTEY R. A. (2005): Ordovician. – In: R. C. SELLEY, L. R. M. COCKS, I. R. PLIMER (Eds.): *Encyclopedia of geology*: 175–184. Elsevier Academic Press.
- GRADSTEIN F. M., OGG J. G. (2020): The chronostratigraphic scale. – In: F. M. GRADSTEIN, J. G. OGG, M. D. SCHMITZ, G. M. OGG (Eds.): *Geologic Time Scale*, 21–32. Elsevier BV.
- HAVLÍČEK V. (1998): Prague Basin, Ordovician. – In: I. CHLUPÁČ, V. HAVLÍČEK, J. KRÍŽ, Z. KUKAL, P. ŠTORCH (Eds.): *Palaeozoic of the Barrandian (Cambrian to Devonian)*: 39–79. Czech Geological Survey, Prague.
- HEDBERG H. D. (1972): Introduction to an international guide to stratigraphic classification, terminology, and usage. – *Boeras*, 1 (3): 199–211.
- HEDBERG H. D. (1976): *International stratigraphic guide: a guide to stratigraphic classification, terminology, and procedure*. – J. Wiley & Sons: 1–200. New York.
- HOLLAND C. H. (1984): Steps to a standard Silurian. – In: *Proceedings of the 27th International Geological Congress*, Moscow, 1 (Stratigraphy): 127–156. VNU Science Press.
- CHLUPÁČ I. (1999): *Výcházky za geologickou minulostí Prahy a okolí*. – Academia: 1–279. Praha.
- CHLUPÁČ I., KUKAL Z. (1977): The boundary stratotype at Klonk. The Silurian-Devonian Boundary. – *IUGS Series A* (5): 96–109.
- CHLUPÁČ I., OLIVER W. A. (1989): Decision on the Lochkovian-Pragian boundary stratotype (Lower Devonian). – *Episodes, Journal of International Geoscience*, 12 (2): 109–114.
- CHLUPÁČ I., VACEK F. (2003): Thirty years of the first international stratotype: The Silurian-Devonian boundary at Klonk and its present status. – *Episodes*, 26 (1): 10–15.
- KRÍŽ J., JAEGER H., PARIS F., SCHÖNLAUB H. P. (1986): Přídolí – the fourth subdivision of the Silurian. – *Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt*, 129: 291–360.
- LANGEREIS C. G., KRIJGSMAN W., MUTTONI G., MENNING M. (2010): Magnetostratigraphy-concepts, definitions, and applications. – *Newsletters in Stratigraphy*, 43 (3): 207–233.
- LIANG Y., BERNARDO J., GOLDMAN D., NÖLVAK J., TANG P., WANG W., HINTS O. (2019): Morphological variation suggests that chitinozoans may be fossils of individual microorganisms rather than metazoan eggs. – *Proceedings of the Royal Society B*, 286 (1908): 1–8.
- LIANG Y., HINTS O., TANG P., CAI C., GOLDMAN D., NÖLVAK J., TIHELKA E., PANG K., BERNARDO J., WANG W. (2020): Fossilized reproductive modes reveal a protistan affinity of Chitinozoa. – *Geology*, 48 (12): 1200–1204.

- LOYDELL D. K., LOVERIDGE R. F. (2001): The world's longest graptolite? – *Geological Journal*, 36 (1): 55–57.
- LUCAS S. G. (2018): The GSSP method of chronostratigraphy: a critical review. – *Frontiers in Earth Science*, 6 (191): 1–18.
- MALETZ J. (2017): *Graptolite paleobiology*. – J. Wiley & Sons: 1–323. New York.
- MELCHIN M. J., DAVIES J. R., BOOM A., DE WEIRDT J., MCINTYRE A. J., RUSSELL C., VANDENBROUCKE T. R., ZALASIEWICZ J. A. (2023): Integrated stratigraphical study of the Rhuddanian-Aeronian (Llandovery, Silurian) boundary succession in the Rheidol Gorge, Wales: a proposed Global Stratotype Section and Point for the base of the Aeronian Stage. – *Lethaia*, 56 (1): 1–23.
- MELCHIN M. J., SADLER P. M., CRAMER B. D. (2020): The silurian period. – In: F. M. GRADSTEIN, J. G. OGG, M. D. SCHMITZ, G. M. OGG (Eds.): *Geologic Time Scale*: 695–732. Elsevier BV.
- PARIS F., NÖLVAK J. (1999): Biological interpretation and paleobiodiversity of a cryptic fossil group: The “chitinozoan animal”. – *Geobios*, 32 (2): 315–324.
- PROKOP R. (1989): *Zkamenělý svět*. – Práce: 1–275. Praha.
- REMANE J. (2003): Chronostratigraphic correlations: their importance for the definition of geochronologic units. – *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 196 (1–2): 7–18.
- REMANE J., BASSETT M. G., COWIE J. W., GOHRBANDT K. H., LANE H. R., MICHELSEN O., NAIWEN W. (1996): Revised guidelines for the establishment of global chronostratigraphic standards by the International Commission on Stratigraphy (ICS). – *Episodes Journal of International Geoscience*, 19 (3): 77–81.
- SALVADOR A., MURPHY M. A. (1999): International Stratigraphic Guide – An Abridged Version. – *Episodes Journal of International Geoscience*, 22 (4): 255–271.
- SECORD J. A. (1990): *Controversy in Victorian Geology: The Cambrian – Silurian dispute*. – Princeton University Press: 1–386. Princeton.
- SHAO T., JIA C., LIU Y., FU L., ZHANG Y., QIN J., JIANG K., TANG H., WANG Q., HU B. (2018): The Llandovery graptolite zonation of the Danangou section in Nanzheng, Shaanxi Province, central China, and comparisons with those of other regions. – *Geological Journal*, 53: 414–428.
- STØRMER L. (1966): Concepts of stratigraphical classification and terminology. – *Earth-Science Reviews*, 1 (1): 5–28.
- STRASSER A. (2018): Cyclostratigraphy of shallow-marine carbonates—limitations and opportunities. – In: M. MONTENARI (Ed.): *Stratigraphy & Timescales, Volume 3*: 151–187. Academic Press.
- STRASSER A., HILGEN F. J., HECKEL P. H. (2006): Cyclostratigraphy-concepts, definitions, and applications. – *Newsletters on Stratigraphy*, 42: 75–114.
- ŠTORCH P., MELCHIN M. J. (2018): Lower Aeronian triangulate monograptids of the genus *Demirastrites* Eisel, 1912: biostratigraphy, palaeobiogeography, anagenetic changes and speciation. – *Bulletin of Geosciences*, 93 (4): 513–537.
- ŠTORCH P., MANDA Š., TASÁRYOVÁ Z., FRÝDA J., CHADIMOVÁ L., MELCHIN M. J. (2018): A proposed new global stratotype for Aeronian Stage of the Silurian System: Hlásná Třebaň section, Czech Republic. – *Lethaia*, 51 (3): 357–388.
- THACKRAY J. C. (1976): The Murchison-Sedgwick controversy. – *Journal of the Geological Society*, 132 (4): 367–372.
- VODIČKA J., MUIR L. A., BOTTING J. P., ŠPILLAR V., FATKA O. (2022): Palaeobiological significance of chitinozoan clusters with parallel vesicles. – *Marine Micropaleontology*, 172: 102–109.
- WALSH S., GRADSTEIN F., OGG J. (2004): History, philosophy, and application of the Global Stratotype Section and Point (GSSP). – *Lethaia*, 37 (2): 201–218.
- WEBBY B. D., PARIS F., DROSER M. L., PERCIVAL I. G. (2004): *The Great Ordovician Biodiversification Event*. – Columbia University Press: 1–496. New York.
- WEISSERT H., JOACHIMSKI M., SARNTHEIN M. (2008): Chemostratigraphy. – *Newsletters on Stratigraphy*, 42 (3): 145–179.
- WICANDER R., MONROE J. S. (2016): *Historical geology*. 1–463. Cengage Learning.
- YU S., LI Q., KERSHAW S., MUNNECKE A., MAO Y., LI Y. (2024): Rhuddanian to Aeronian (Llandovery, early Silurian) carbon isotope stratigraphy throughout carbonate sequences in the upper Yangtze region, South China block. – *Island Arc*, 33 (1): e12512.