

Doc. RNDr. František Staněk, Ph.D., Ing. Jan Jelínek, Ph.D., VŠB-TU Ostrava, IGI HGF
Doc. Ing. Josef Honěk, CSc., Ing. Kerstin Hořková, Ph.D., Opavská 4150/9, Ostrava - Pustkovec

Metodické postupy v interaktivním programovém systému pro aplikaci moderních metod hodnocení uhelných ložisek a jejich dílčích částí v komplikovaných podmínkách

Přijato: 10.10.2005, recenzováno: 16.11.2005

Methodische Vorgänge im interaktiven Programmsystem für Anwendung der modernen Bewertungsmethoden für Kohlenlagerstätten und deren Teilabschnitte unter komplizierten Bedingungen

Im Beitrag werden methodische Vorgänge der Modellierung und Bewertung von Kohlenlagerstätten beschrieben, die im Rahmen der Lösung des Projektes der Grantagentur GAČR Nr. 105/03/1417 unter dem Namen „Interaktives Programmsystem für die Anwendung von modernen Methoden der Bewertung der Kohlenlagerstätten und derer Teilabschnitte unter komplizierten Bedingungen“ eingesetzt wurden. Die Entwicklung der Computertechnik sowie jüngste Erkenntnisse aus dem Gebiet des Wissenschaftsbereiches Geoinformatik ermöglichen die Nutzung neuer Verfahren der Modellierung und anschließende Bewertung der Kohleflöze. Es geht vor allem um Vorgänge auf dem Gebiet der statistischen Datenverarbeitung, der Geostatistik, der Wahl und Anwendung von geeigneten Interpolationsmethoden, der grafischen Kartenverarbeitung und 3D-Visualisierung von modellierten Kohleflözen und weiteren Vorgängen, die Wahl der bilanzierten Lagen im Flöz sowie Identifikation und Korrelation von Flözen leichter machen. Das gestaltete Programmsystem ist für den Einsatz auf allen Typen der Kohlenlagerstätten, die in der Tschechischen Republik auftreten, konzipiert.

Methodical procedures in an interactive programme system after the application of modern coal deposit evaluation methods and their fragments in complex conditions

The article describes methodical procedures of modelling and evaluation of coal deposits used in the solution of grant

project GAČR No. 105/03/1417 called “Interactive Programme System for Application of Modern Evaluation Method of Coal Deposits and Their Fragments in Complex Conditions“. Development of information technique and the new findings in geoinformatics enable using new modelling procedures and the following evaluation of coal beds. It mainly concerns the procedures in statistic data processing, geostatistics, selection and application of suitable interpolation method, graphic map processing and 3D visualization of modelled coal beds and other procedures enabling selection of balanced positions in bed, bed identification and correlation. The developed programme system is drawn for the use in all types of coal beds occurred in CR.

Методические порядки системы интерактивного программирования для применения современных методов оценки угольных месторождений и их отдельных частей в сложных условиях

В статье описываются методические подходы к моделированию и оценке угольных месторождений, которые были использованы в рамках решения грантового проекта ГАЧР номер 105/03/1417 под названием „Интерактивная программная система для применения современных методов оценки угольных месторождений и их отдельных частей в сложных условиях“. Развитие вычислительной техники, а также новые сведения в области научной дисциплины геоинформатики, позволяют применение новых порядков моделирования и последующей оценки угольных пластов. Речь идет прежде всего о порядках в области статистической обработки данных,

геостатистики, выбора и приложения подходящих методов интерполяции, графической обработки карт и 3D визуализации моделированных угольных пластов и других процессов, облегчающих выбор балансированных местоположений в слое и идентификацию и корреляцию пластов. Созданная система программирования сконципирована для использования на всех типах угольных месторождений Чешской Республики.

Metodické postupy v interaktivním programovém systému pro aplikaci moderních metod hodnocení uhelných ložisek a jejich dílčích částí v komplikovaných podmínkách

V příspěvku jsou popsány metodické postupy modelování a hodnocení uhelných

ložisek, které byly použity v rámci řešení grantového projektu GAČR č. 105/03/1417 s názvem „Interaktivní programový systém pro aplikaci moderních metod hodnocení uhelných ložisek a jejich dílčích částí v komplikovaných podmínkách“. Rozvoj výpočetní techniky a také nové poznatky v oblasti vědního oboru geoinformatika umožňují použití nových postupů modelování a následného hodnocení uhelných slojí. Jde především o postupy v oblasti statistického zpracování dat, geostatistiky, výběru a aplikaci vhodných interpolačních metod, grafického zpracování map a 3D vizualizace modelovaných uhelných slojí a dalších postupů usnadňujících výběr bilancovaných poloh ve sloji a identifikaci a korelaci slojí. Vytvořený programový systém je koncipován pro použití na všech typech ložisek uhlí vyskytujících se v ČR.

1. Úvod

Příspěvek je věnován metodickým postupům aplikovaným v nově vyvinutém programovém systému pro tvorbu modelu uhelného ložiska a jeho následnému hodnocení. Programový systém byl vyvíjen v rámci řešení grantového projektu GAČR č. 105/03/1417 s názvem „Interaktivní programový systém pro aplikaci moderních metod hodnocení uhelných ložisek a jejich dílčích částí v komplikovaných podmínkách“ (dále *IPSHUL*). Systém je použitelný pro všechny typy uhelných ložisek v ČR. Vzhledem k tomu, že jednotlivé uhelné pánve se od sebe značně liší především celkovou geologickou stavbou, hloubkou uložení, prozkoumaností atd., byl *IPSHUL* přizpůsoben zpracované geologické charakteristice vybraných uhelných pánví ČR.

Obecně jsou z hlediska metodiky a postupu výpočtu zásob uhelná ložiska ČR rozdělena do dvou základních skupin. V první skupině jsou uhelná ložiska s malým počtem a obvykle větších mocností slojí, menší hloubkou uložení slojí a jednodušším tektonickým vývojem. Do této skupiny patří vybraný severočeský hnědouhelný revír a jihomoravský lignitový revír, pro které byl *IPSHUL* prvotně vytvořen. V některých, především okrajových částech těchto pánví se vyskytují oblasti s větším počtem mocnějších proplátek rozdělujících sloj do samostatných lávek. Ovšem základní charakter stavby sloje má na velké ploše celopáneví platnost. Druhým typem jsou uhelné pánve s velkým počtem uhelných slojí převážně nestálého charakteru. Sloje často vyklíňují, mají čočkovitý vývoj, štěpí se do dvou i více slojí. Tyto změny mají lokální charakter. Sloje se stabilním vývojem z hlediska celopáneví jsou výjimkou. K tomuto typu pánví patří dolnoslezská pánev a vybraná hornoslezská černouhelná pánev, pro kterou byl vyvíjený systém hodnocení uhelných ložisek upraven později.

2. **Způsoby hodnocení zásob uhelných ložisek v ČR**

Zásadní rozdíl metod odhadu zásob Schejbal (2001) spatřuje ve způsobu odhadu objemu ložiskového tělesa a v proceduře odhadu hodnot sledovaných ložiskových atributů v definované doméně, resp. bloku. Použitá metoda odhadu zásob, statistická a prostorová distribuce ložiskových proměnných, morfogenetický typ ložiska a systém průzkumu ložiska jsou určující pro postup odhadu průměrných hodnot ložiskových proměnných. Během minulých let byla navržena a prakticky využita řada metod odhadu zásob pevných nerostných surovin. Mezi nejpopulárnější metody lze řadit:

- metodu aritmetického průměru (geologických a těžebních bloků);
- metodu mnohoúhelníků (Boldyrevovu metodu);
- metodu vrstevnic;
- metodu trojúhelníků;
- metodu geologických řezů;
- metodu izolinií a
- statistické metody (Schejbal 2003).

První dvě z těchto klasických metod (metoda geologických a těžebních bloků, metoda mnohoúhelníků) byly také dříve přednostně aplikovány při praktických výpočtech zásob uhlí.

Současné postupy odhadu zásob použité při interaktivním programovém hodnocení uhelných ložisek jsou založeny na diskrétním modelování (část 3.3). Využívají segmentace ložiskového objektu do plošné či prostorové sítě elementárních plošných nebo prostorových jednotek představujících základní stavební prvky odhadů. Tato množina stavebních prvků je pak transformována podle stupně prozkoumanosti (tj. podle rozsahu a spolehlivosti poznání), požadovaných technicko-ekonomických kritérií využitelnosti, přípustnosti k dobývání (zásoby volné a vázané), případně dalších kritérií (viz část 6) do ocenění zásob jednotlivých kategorií. Pro odhad hodnot ložiskových atributů jednotlivých elementárních jednotek se používají interpolační metody popsané dále. Příkladem takových postupů je právě *IPSHUL*.

3. **Matematické postupy odhadu ložiskových atributů**

Základem jakéhokoliv komplexního zpracování údajů z ložiska uhlí (nejčastěji se jedná o výpočet nebo přepočet zásob) je vytvoření modelu ložiska uhlí co nejvíce vystihujícího reálnou situaci. Kromě stanovení celkových zásob uhlí podle různých kritérií je pro mnohé účely nutné znát také rozložení suroviny na ložisku a její ukazatele.

Při vytváření *IPSHUL* jsou v jeho jednotlivých modulech použity matematické postupy, především postupy z matematické statistiky a geostatistiky a také vybrané druhy interpolace funkce.

Matematická statistika a geostatistika

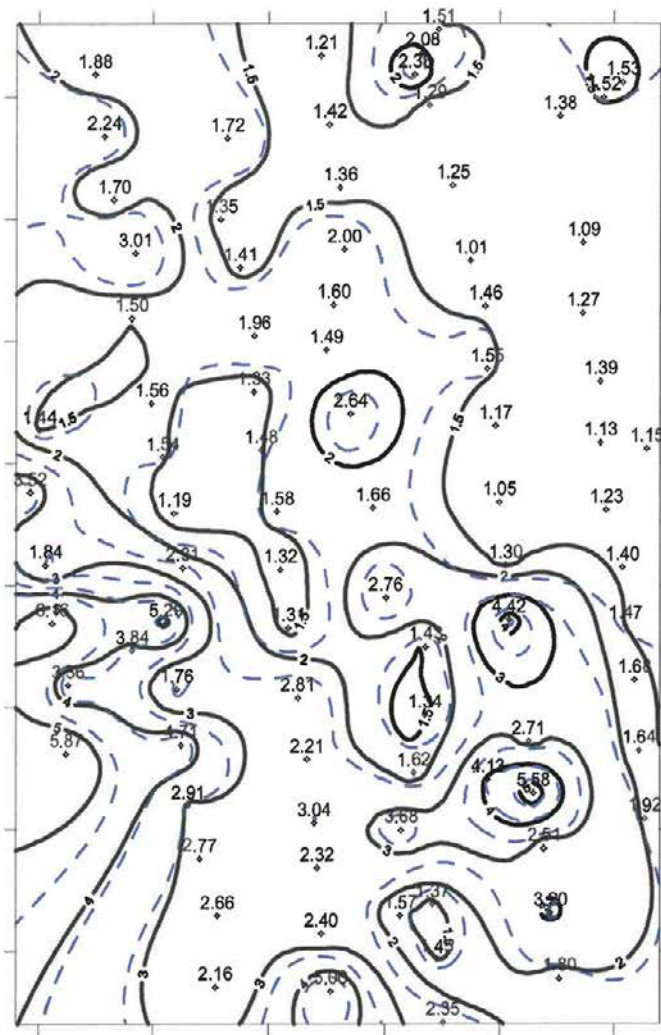
Rozdíly mezi klasickou matematickou statistikou a analýzou geodat pomocí statistických a geostatistických postupů vyplývají z vlastností geologických objektů a z reálných možností jejich zkoumání. Jak uvádí Schejbal (2001), prakticky vždy

hodnocení vychází z nehomogenních souborů dat (důsledek různých nositelů - vzorků), které velmi často představují smíšené statistické distribuce. Veličiny, které charakterizují zkoumané objekty, často nejsou statisticky nezávislé. Geologická tělesa se vyznačují zastoupením strukturální i náhodné složky v prostorovém rozmístění hodnot veličin. Navíc lze geologická tělesa zkoumat jen v omezeném rozsahu a to vzhledem k dostupnosti a také k nákladnosti geologických prací. Uvedené aspekty ovlivňují možnosti a postupy statistické a geostatistické analýzy geodat. Proto se zde setkáváme s některými problémy a zejména omezeními, které musíme při analýze respektovat.

Jednou ze základních úloh statistického rozboru i volby dalších metod zpracování je studium charakteru statistické distribuce. Jen na základě správného popisu distribuce lze odhadnout statistické charakteristiky a realizovat další zpracování. Je známým faktem, že empirické distribuce většiny veličin, popisujících geologická tělesa, nevyhovují běžně uvažovanému normálnímu rozdělení, ale že mají distribuci asymetrickou (převážně kladně, ale i záporně) – nejčastěji lognormální. Přitom je ale normální distribuce základní podmínkou použití mnoha dalších matematických postupů. Bez správného přístupu k „zešikmeným“ datům není možné dělat například geostatistické analýzy a odhady, neboť nejlepší lineární odhad je ten, který je získaný z experimentálních hodnot, řídících se normálním Gaussovým rozdělením (Vizi, Timčák 2002).

Lognormální distribuce je jedním z mnoha typů možných distribucí souboru hodnot. V případě modelování uhelné sloje jsou z nepravidelně rozmístěných průzkumných bodů interpolovány hodnoty jednotlivých ložiskových atributů do pravidelné sítě bodů – tzv. gridu. Jelikož se jedná o lineární matematické postupy, je nutné, aby vstupní údaje byly rozloženy normálně. Aby se modelovaná sloj co nejvíce blížila realitě, je potřebné použít pro interpolaci normálně rozložené vstupní hodnoty jednotlivých ložiskových atributů. V případě, že vstupní soubor dat nevyhovuje normální distribuci, lze provést tzv. grafickou (kvantilovou) transformaci vstupního souboru pomocí kumulovaných četností (empirické distribuční funkce) (Deutsch 2002) tak, že výsledný soubor má normované normální rozdělení (se střední hodnotou nula a směrodatnou odchylkou 1).

Proto je v programovém řešení *IPSHUL* v případě, že je statistickým testem zjištěna jiná než normální distribuce, programově provedena kvantilová transformace vstupních údajů do normovaného normálního rozdělení (dále NNR), následně se provede interpolace vybranou interpolační metodou a hodnoty gridu pak budou programově zpětně transformovány opět pomocí kumulovaných četností (empirické distribuční funkce). Grafická transformace je v podstatě přiřazení odpovídajících kvantilů dvou typů distribucí. Rozdíly mezi průběhem odpovídajících vybraných izolinií mocnosti interpolovaných z původních hodnot (plné izolinie s popisy) a hodnot převedených do NNR (čárkované izolinie s popisy) jsou zobrazeny na obr. 1. Pro interpolaci původních i transformovaných hodnot mocnosti byla použita metoda kriging, lineární model, isotropní, grid čtvercový 57*83 bodů.



Obr. 1 Rozdíly mezi průběhem odpovídajících vybraných izolinií mocnosti interpolovaných z původních hodnot (plné izolinie s popisy) a hodnot převedených do NNR (čárkované izolinie bez popisu) testovacího příkladu

Geostatistická strukturální analýza jednotlivých atributů uhelné sloje se v *IPSHUL* provádí v prostředí programu Surfer. Výsledky geostatistické strukturální analýzy jsou pak použity pro interpolaci jednotlivých atributů uhelné sloje při vytváření modelu sloje.

Interpolace funkce

Mnoho prakticky používaných metod výpočtů zásob převádí prostorový model na sérii modelů rovinných (Staněk 1999a). Obvykle se v těchto modelech generují hodnoty v pravidelné síti bodů (gridu) jako základ pro následnou interpretaci empirických hodnot. Přitom do výpočtu pro daný bod vstupují pouze vzorky ze zóny vlivu, jejíž tvar a velikost je určena podle kontinuity a anizotropie pole.

Výběr interpolační metody má značný vliv na výsledný model ložiska a tím i na množství vypočtených zásob suroviny. Použití nevhodné interpolační metody vede k vytvoření nereálného modelu ložiska (Staněk 1999a). V praktických aplikacích je možno rozdělit nejčastěji se vyskytující interpolační úlohy na tři základní skupiny:

- skupinu statistických metod;
- skupinu metod geostatistického korigování a
- skupinu metod spojitých a hladkých ploch.

Vytvořený *IPSHUL* pro gridování využívá programové objekty Grid programu Surfer. Pro interpolaci ložiskových atributů jsou vhodné následující metody:

- inverzních vzdáleností (Inverse Distance to a Power),
- krigování (Kriging),
- plochy minimální křivosti (Minimum Curvature),
- modifikovaná Shepardova metoda, která spojuje metodu inverzních vzdáleností s vyrovnáním metodou nejmenších čtverců,
- metoda přirozeného okolí (Natural Neighbor),
- metoda nejbližšího okolí (Nearest Neighbor),
- metoda radiálních funkcí (Radial Basis Function),
- metoda triangulace s lineární interpolací (Triangulation with Linear Interpolation).

K usnadnění výběru vhodné interpolační metody se v *IPSHUL* využívá modul tzv. bumerangové metody (Cross Validation), kdy se pro bod se známou hodnotou provede výpočet lokálního odhadu z ostatních hodnot. Výsledkem je vypočtená hodnota z v místě, kde známe skutečnou hodnotu. Můžeme tedy stanovit chybu odhadu v tomto místě a následně chybu pro všechny body (Deutsch 2002, Staněk 1999b). Testování se provádí pro konečnou množinu interpolačních metod s různými parametry.

Diskrétní modely přírodních objektů

Klasické automatické mapovací systémy stejně jako programy CAD (Computer-Aided Design) nejsou schopny komplexně modelovat geologické povrchy a tím méně složitá geologická tělesa porušená složitými tektonickými poruchami (Mallet 2002). Z těchto důvodů, v průběhu vývoje výzkumného projektu gOcad, Mallet v roce 1989 navrhl naprosto odlišnou strategii, využívající diskrétní modelování přírodních objektů. Při tomto diskrétním přístupu je geometrie modelovaných objektů definována pomocí konečné množiny uzlů (bodů) ve 3D prostoru, zatímco jejich topologie je modelována prostřednictvím propojení spojujících tyto uzly. Oproti klasickým CAD metodám založeným na spojitých funkcích (polynomech), je předkládaný přístup založen na diskretizaci objektů podobné technice konečných prvků používané pro řešení parciálních diferenciálních rovnic. Každý objekt je modelován množinou propojených bodů popisujících jak geometrii, tak další vlastnosti objektů a pro interpretaci geometrie a vlastností komplexních dat je používána diskrétní hladká interpolace. V případě geologických aplikací je nutno věnovat mimořádnou pozornost diskrétním metodám modelování a také geostatistickým metodám.

IPSHUL je založen na vytváření rovinných diskretních modelů jednotlivých slojí. Z geologického hlediska to předpokládá správně provedenou identifikaci a korelaci slojí na ložisku.

4. Hlavní aspekty modelování ložiska uhlí

Databáze ložiskových údajů

Databáze *IPSHUL* vychází z koncepce relační ložiskové databáze realizované v projektu GA ČR „Vývoj systému pro ukládání a vyhodnocování údajů uhelných zdrojů a jeho využití pro analýzy využitelnosti těchto zdrojů po roce 2000“, ukončeném v roce 1998 na IGI HGF VŠB – TU Ostrava (Schejbal et al. 1998). Cílem databáze je obsáhnout veškeré údaje nezbytné pro provedení výpočtu zásob uhlí. Do databáze jsou zařazeny údaje, z nichž je možno vytvořit prostorový model tělesa uhelné sloje a modely vybraných atributů sloje, rozdělit model uhelné sloje na dílčí výpočtové bloky a stanovit množství zásob v blocích se současným provedením klasifikace zásob. Modelování se provádí na základě údajů z tzv. bilancovaných mocností sloje v místech zastížení slojí průzkumnými díly, tj. z úseků ve slojích vybraných s přihlédnutím ke stanoveným kritériím definovaným v podmínkách využitelnosti. Pro uhelná ložiska jsou nejčastěji limitními parametry minimální mocnost [m] a maximální obsah popela A^d [%]. Bilancovaný úsek ve sloji bývá často omezen dalšími kritérii, jako např. podmínkou tzv. okrajového vzorku, kdy při „stropu“ a „bázi“ vymezeného úseku nelze do sloje zahrnout krajní polohy s obsahem popela převyšujícím smluvní limitní hodnotu. Z uvedeného vyplývá, že databáze pro výpočet zásob musí obsahovat jak data primární, získaná při ložiskovém průzkumu, tak data z nich odvozená.

Databáze byla sestavena využitím nejrozšířenějšího databázového řídicího systému MS Access (Morkes 2004). Je tvořena řadou tabulek, které se dělí do dvou částí:

1. systémová část,
2. datová část.

Tabulky systémové části představují především kódovníky, které tvoří pevnou součást vyvíjeného systému včetně jejich datových záznamů. Jedná se především o seznamy povolených hodnot, pomocí nichž jsou ložisková data kódována a tím do databáze uložena jednotným způsobem. V několika dalších tabulkách jsou uloženy koeficienty a smluvní hodnoty používané v matematických výpočtech a mnohé doplňkové údaje vyžadované při automatizovaném zpracování dat. Přestože jsou tabulky systémové části již naplněny, zůstávají pro uživatele při práci se systémem částečně otevřené. Databázi a tím i systém tak lze přizpůsobit specifickým podmínkám jednotlivých uhelných pánví, resp. jejich dílčích částí, nebo účelu výpočtu zásob. Například další typy hornin nebo typy linií tvořících hranice výpočtových bloků si uživatel může podle svých potřeb rozšiřovat (vytvářet nové záznamy). Může také doplňovat nové podmínky využitelnosti včetně hodnot limitních parametrů a připravit si tak různá kritéria pro případná variantní řešení výpočtu zásob, která program nabízí.

Do tabulek datové části jsou uloženy vlastní ložiskové údaje. Číselné údaje jsou ponechány v původním tvaru, popisné informace jsou kvůli automatizovanému zpracování dat téměř v plném rozsahu kódovány pomocí údajů ze systémové části.

Datová část byla rozdělena do dvou samostatných tematicky i strukturně odlišných souborů, označených jako:

1. část popisná,
2. část grafická.

Grafická část je zaměřena na data typu linií a polygonů, popisná část shromažďuje číselné a textové údaje.

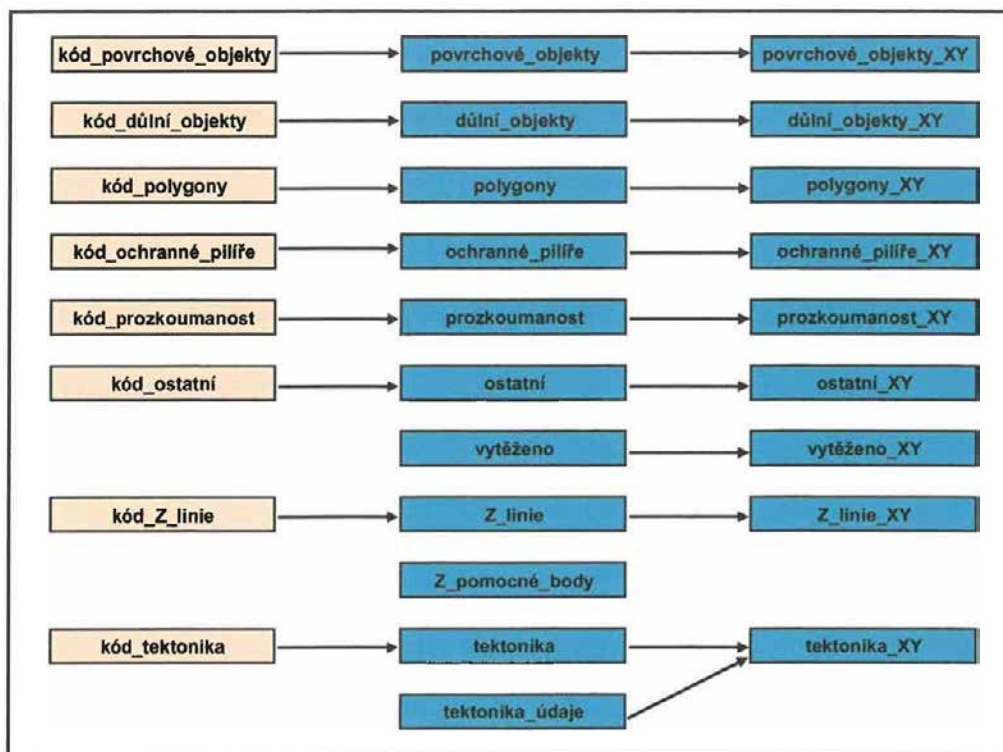
V popisné části databáze tvoří hlavní podíl dat výsledky chemicko-technologických analýz a profily vrtů s petrografickými popisy hornin. Pro jednotné uložení názvů hornin byly využity principy univerzálního systému grafického zobrazení hornin, přechodných hornin a uhlí vyvinutého v minulosti (Honěk et al. 2003).

Hlavní náplní grafické části databáze jsou plošné nebo prostorové objekty definované a do databáze uložené pomocí lokalizačních souřadnic lomových bodů linií nebo polygonů. Přehled grafické datové části je schematicky prezentován na obr. 2. Data jsou tematicky rozčleněna do několika skupin. Vnitřní organizace dat ve skupinách je jednotná a je založena na jednoduché dílčí struktuře tvořené trojicí relačně propojených tabulek:

- kódovník pro daný typ objektu,
- seznam všech existujících objektů daného typu a
- tabulka s polohopisnými souřadnicemi.

Elementární struktura tří propojených tabulek je použita téměř pro všechny objekty, modifikace jsou provedeny podle potřeb vyplývajících z charakteru dat jednotlivých typů na úrovni datových polí tabulek. Kromě povrchových a důlních objektů a vymežujících polygonů (např. hranice ložiska) jsou všechny ostatní objekty a další údaje v grafické části databáze vázány na uhelnou sloj. Kód příslušné sloje, na jehož základě aplikace filtruje vstupní data pro výpočet zásob, je zařazen do tabulky se seznamem objektů daného typu.

Členitější strukturu mají tabulky zaměřené na tektonické poruchy, neboť ty se od ostatních objektů databáze informačně výrazně odlišují. Linie, pomocí níž se tektonická porucha vyznačuje ve svislém průmětu (např. v mapě zásob) a která je polohopisnými souřadnicemi lomových bodů zaznamenána v databázi, představuje průsečnici dislokační plochy s plochou báze sloje. K popisu zlomových struktur v mapě se na ložiskách uhlí nejčastěji používá pouze úklon a výška skoku. Jejich hodnoty jsou uloženy v databázi spolu se souřadnicemi bodu, ke kterému se váží, a jsou doplněny orientací úklonu pomocí symbolu jedné ze čtyř světových stran. Přesnější směr úklonu je udán kolmicí na průběh zlomu v popisovaném místě. Výraznější poruchy projevující se jako poruchová pásma, vyjádřená několika dílčími liniemi, jsou v databázi zaznamenány přidáním kódů k jednotlivým dílčím liniím, které určují příslušnost a pozici linie v rámci pásma.



Obr. 2 Struktura a relace části databáze věnované grafickým objektům

Databáze je organizována tak, aby byla univerzálně využitelná pro všechny typy uhelných ložisek v ČR. Většina tabulek je strukturována jednotně, pouze tabulky s nutně odlišnou stavbou v závislosti na typu uhlí (např. chemicko-technologické analýzy) existují ve vhodných alternativách. Jednoduchou substitucí několika tabulek s rozdílnou strukturou jsou vytvořeny modifikace databáze vyhovující jednotlivým typům uhlí.

Identifikace a korelace slojí v IPSHUL

Při modelování ložiska uhlí zpracováním údajů z databáze se na základě jednotlivých průzkumných děl identifikují a korelují v těchto dílech jednotlivé sloje, popř. jednotlivé lávky slojí. Výběr bilancovaných poloh ve vrtu a zjištění průměrných hodnot ložiskových parametrů v těchto polohách v grafickém prostředí umožňuje aplikace vyvinutá jako součást systému IPSHUL. Vlastní identifikaci a korelaci provádí ložiskový geolog na základě svých zkušeností a představ. Jako podklady mu slouží různé grafické výstupy vytvořené na základě údajů ložiskové databáze:

- petrografické profily vrtů,
- detaily slojí,
- geologické řezy.

Tyto výstupy jsou vykreslovány na základě klasifikace hornin, přechodných hornin a uhlí včetně způsobu jejich grafické reprezentace tak, jak je popsal Honěk et al. (2003). K tomu je možné využít programové vybavení, které vyvinul Staněk (2003).

Modelování vnitřních atributů ložiska

Jednou z nejdůležitějších podmínek spolehlivého modelování uhelného ložiska na všech úrovních, jež jsou postižitelné realizovaným systémem pozorování, je odhalení a popis struktury polí rovinných proměnných veličin, které je charakterizují. Obvykle se generují hodnoty v pravidelné síti (gridu) jako základ pro následnou interpretaci empirických hodnot.

Zvláštní pozornost je třeba věnovat tektonickým poruchám. V případě malých tektonických poruch, které v průmětu příliš neposunují jednotlivé kry sloje, je možné vytvářet atektonický model ložiska (jihomoravská lignitová pánev). V případě ložiska s výraznějšími posuny tektonických ker, u kterých se mohou vyskytnout i přesmyky (hornoslezská pánev), je nutné před modelováním vnitřních atributů ložiska provést prostorovou transformaci jednotlivých ker, tedy „narovnání“ do původního stavu (část 5.3).

5. Tvorba diskrétního modelu ložiska uhlí a jeho hodnocení

Z technického hlediska probíhalo programování jednotlivých modulů *IPSHUL* pod operačním systémem MS Windows. Programovacím jazykem byl Visual Basic. V systému jsou využity objekty moderního programového vybavení z oblasti statistického zpracování dat, geostatistické strukturální analýzy, interpolačních metod, grafického znázorňování map a prostorového 3D zobrazování modelovaných slojí. Pomocí Visual Basicu jsou takto propojeny například aplikace MS Access, MS Excel, Surfer, ArcView.

Jednotlivé moduly *IPSHUL* byly testovány na zkušebních příkladech vybraných uhelných pánví. Zpracování probíhá podle jednotlivých slojí, příp. lávek, s možností alternativně měnit parametry podmínek využitelnosti (viz část 6), jak při výběru bilancovaných poloh ve vrtu, tak při vytváření modelu sloje (lávky sloje) a následného výpočtu zásob.

Postup prvotního zpracování pánve

IPSHUL provádí prvotní zpracování modelu pánve v následujících krocích:

- 1) Výběr potřebných hodnot z externích databází, popřípadě vstup dalších hodnot do ložiskové databáze.
- 2) Testování věrohodnosti dat, vyřazení chybných údajů na základě volitelných logických omezení.
- 3) Grafické znázornění profilů vrtů zájmového území s využitím nového způsobu grafického znázorňování dat uložených v databázi.
- 4) Identifikace a korelace slojí, případně jednotlivých lávek slojí.

Této fázi musí interpretující geolog věnovat zvýšenou pozornost. Nesprávně provedená identifikace a korelace vede hned na počátku k nesprávnému modelu ložiska a tím i k chybným závěrům.

Postup zpracování sloje, případně lávky sloje

Postup zpracování sloje následuje bezprostředně po předchozím prvotním zpracování modelu pánve a je realizován v následujících krocích:

- 1) Stanovení bilancovaných poloh slojí, resp. lávek, ve vrtech podle zadaných podmínek využitelnosti, uložení vypočtených geologických a technologických parametrů do databáze. Výběru bilancovaných poloh slojí předchází komplikovaný výběr jednoznačných parametrů pro jednotlivé hloubkové úseky, neboť tyto údaje mohou být získávány z různých typů vzorků (segmenty, sesypy, sesypy segmentů, kontrolní analýzy apod.) a v mnoha případech jsou mnohoznačné.
- 2) Výběr údajů v průzkumných bodech zájmového území (vrtech, zásecích) z ložiskové databáze a jejich grafické znázornění spolu s hodnotami technologických a geologických parametrů pro modelovanou sloj (například vykreslení technologických detailů sloje).
- 3) Statistická analýza a geostatistická strukturální analýza jednotlivých veličin prováděná pro další rozhodování o způsobu modelování sloje. Výběr vhodné interpolační metody.
- 4) Vytvoření základního modelu ložiska z dat informačních bodů (vrtů, záseků) uložených v databázi.
- 5) Vykreslení velkoformátových map izolinií modelovaných veličin sloje, včetně zobrazení tektonické situace, vydobytých prostorů, bezpečnostních ochranných celků, smluvních hranic (například hranic ložiska) a dalších důležitých informací.
- 6) Základní model se rozdělí zjištěnými tektonickými liniemi na samostatné kry. Podle linií vymezujících další geologické jevy (eroze, výchoz), smluvních hranic (hranic ložiska, ochranných pilířů), technologických omezení a dalších (část 6) se ložisko rozdělí do menších jednotek – geologických či těžebních výpočtových bloků.
- 7) Výpočet zásob sloje (lávky sloje) v zájmovém území.
- 8) Sestavení textových přehledů zásob s rozdělením podle způsobu hodnocení ložiska, například podle prozkoumanosti, bilančnosti a přípustnosti k dobývání.
- 9) Tvorba velkoformátových map zásob v tradičním pojetí.
- 10) Moderní prezentace modelu sloje – převedení jednotlivých typů map do prostředí GIS s využitím jejich možností.

Princip interaktivního programového hodnocení uhelných zásob v geologicky komplikovaných podmínkách

Tento postup byl zvláště upravován na geologicky komplikované podmínky hornoslezské černouhelné pánve. Složitý variský vývoj pánve se projevil v nepravidelném vývoji slojí, jejich laterální stálosti, proměnlivé mocnosti, kvalitě uhlí a tektonickém porušení. Mezi další faktory stěžující výpočet zásob patří velká hloubka uložení slojí a nízký počet dokumentačních bodů. Uvedené elementy způsobují problémy nejen při vzájemné korelaci uhelných slojí a tektonických poruch, ale také při zvolení vhodné interpolační metody pro jejich vymodelování.

Postup výpočtu probíhá zvlášť pro jednotlivé tektonické kry (pokud zájmové území není tektonicky porušeno, pak lze celé území pokládat za jednu tektonickou kru) v těchto krocích:

- 1) V důsledku rozdělení uhelných slojí na kry bylo nutné systém přizpůsobit této skutečnosti. Navržený systém umožňuje zásoby uhlí počítat nejen pro celou sloj, ale také ji rozděluje do bloků na základě tektonické stavby, která se vymodeluje pro celou vybranou sloj. Tektonickou stavbu je možné vymodelovat na základě v databázi uložených průnikových linií zlomů se slojí, údajů z vrtů a jiných zdrojů (např. důlní mapy). Každá hraniční linie je rozdělena do segmentů v závislosti na vzájemném křížení. Okrajové body dílčích linií leží na křížení s jinými liniemi, což umožňuje libovolně kombinovat dílčí části zlomových linií. Uživatel má navíc možnost do systému vkládat vlastní dělicí linie nebo dílčí části zlomových linií vypustit a vytvořit tak vlastní tektonické nebo jiné omezení konkrétní dílčí části černouhelné sloje. Takto vyčleněné polygony jsou následně označeny a jejich hranice uloženy v databázi.
- 2) V následujícím kroku systém automaticky vymodeluje návrh báze sloje pro vytvořené polygony (tektonické kry). Uživatel si vybere způsob zobrazení vymodelované báze sloje ze standardní nabídky použitého programu Surfer a vizuálně posoudí, zda vymodelovaná báze sloje odpovídá jeho představě o reálné podobě. Snahou je dosažení modelu, který by co možná nejvěrněji zachycoval skutečnost. Přitom přesnost modelu a následný výpočet zásob závisí jednak na množství a hustotě vstupních údajů a také na volbě vhodné interpolační metody. Pokud model neodpovídá skutečnosti, může uživatel doplnit pomocné body, které společně se vstupními hodnotami z databáze pomohou vymodelovat přesnější průběh báze sloje. Tento proces se opakuje do doby než je uživatel s výsledným modelem plně spokojen.
- 3) Vytvořený interaktivní systém při výpočtu uhelných zásob vztahuje veškeré atributy slojí k pravé mocnosti sloje. V ideálním případě, kdy tektonicky neporušená sloj deskovitého tvaru s konstantní pravou mocností je uložena v horizontální pozici, je modelování atributů a báze sloje snadné. V hornoslezské pánvi je situace podstatně komplikovanější. Sloje jsou často uloženy monoklinálně nebo jsou zvrásněné a místy dislokačně porušené. Velikost přemístění na zlomech je různá, objevují se široká zlomová pásma porušení, složitý průběh zlomových ploch a orientace ker. Proto byl vytvořen programový modul transformující vymodelované strukturní plochy do horizontální polohy. Tak zvané „narovnávání“ báze sloje pracuje na principu nalezení středu tektonické kry nebo zadaného bloku, od kterého se přepočtou souřadnice každého bodu gridu. Současně dojde k transformaci souřadnic dokumentačních bodů do nové souřadnicové sítě. V případě, že je nutno do výpočtu brát i hodnoty z vrtů z okolních tektonických ker, pak jsou vybrány vrty ze zadané zóny vlivu (podle vzdálenosti od obvodového polygonu zájmového území), provede se transformace jejich souřadnic jednak na základě typu tektonické linie (posun ve směru x a posun ve směru y), podle strukturní mapy modelované kry a také podle strukturní mapy tektonické kry, do které transformovaný vrt patří.
- 4) V takto upravených transformovaných souřadnicích se provede výpočet všech atributů sloje a zhodnocení uhelných zásob. Podle zadaných podmínek využitelnosti se automaticky stanoví obvodové polygony bloků zásob podle požadovaných kategorií podmínek využitelnosti spolu s průměrnými hodnotami sledovaných atributů sloje. *IPSHUL* umožňuje charakterizovat uhelné zásoby i u nás málo používanými způsoby (viz část 6).

- 5) Následuje operace zpětné transformace všech modelovaných parametrů do původních souřadnic, včetně vypočtených obvodových polygonů zásob. Proces narovnávání slouží také pro spojování dislokačně oddělených tektonických ker, které vychází z informací o směru přemístění na zlomu a výšky skoku.
- 6) Výsledek je vykreslen formou map izolinií a zásob v původním území tektonické kry. Celý proces výpočtu se může libovolně opakovat pro další navržené polygony nebo tektonické kry. Systém umožňuje spojení zásob jednotlivých tektonických ker a vykreslení sloučených map.
- 7) Takto vytvořené jednotlivé typy map (vrtů, izolinií, zásob) se exportují do prostředí GIS pro případné další úpravy a zpracování. Proběhne tisk výsledných sestav zásob. Uživatel má možnost tvorby další varianty podle změněných mezních hodnot podmínek využitelnosti (přechod na bod 4).

6. Nabídka způsobů hodnocení uhelných ložisek vytvořeným interaktivním programovým systémem

IPSHUL nabízí hodnocení uhelných ložisek následujícími způsoby:

A) Hodnocení podle mezinárodní klasifikace uhlí ve sloji [13]

Mezinárodní klasifikace uhlí ve sloji (MKUS) dovolu je klasifikovat uhlí pro charakteristiku uhelných ložisek. Klasifikace není urč ená pro komerční a obchodní účely. Klasifikace se v ČR příliš nepoužívá, označován í typů uhlí v MKUS a hranice mezi nimi se zcela neshodují s dosud používaným dělením uhlí v ČR. Proto tradiční české názvy doplňují dále v závorce anglické termíny. Klasifikace je založena na třech charakteristikách, při hodnocení uhlí je třeba vzít v úvahu všechny tři charakteristiky společně:

1. Stupeň prouhelnění (Rank)

Označován í stupně prouhelnění je provedeno dvěma způsoby umožňujícími srovnat konvenční názvy uhlí seřazené od lignitu k antracitu a hierarchické členění na nízko, středně a vysoce prouhelněná uhlí. Konvenční názvy vycházejí z některých národních systémů, založených na chemických, teplotních a reologických vlastnostech. Spodní hranici mezi rašelinou a ortolignitem (nizký stupeň prouhelnění C - *Low Rank C*) tvoří 75 % obsahu vody W_t^r . Horní hranice mezi metaantracitem (vysoký stupeň prouhelnění A - *High rank A*) a semigrafitem je 0,8 % obsahu vodíku H^{daf} . Mezi nimi se vydělují v hierarchické řadě slabě prouhelněná uhlí (*Low Rank Coals*) zahrnující v konvenční řadě lignity (*Lignite*) a hnědá uhlí (*Subbituminous Coals*), středně prouhelněná uhlí (*Medium Rank Coals*) zahrnující v konvenční řadě černá uhlí (*Bituminous Coals*) a silně prouhelněná uhlí (*High Rank Coals*) zahrnující v konvenční řadě antracit (*Anracite*).

Všechny tři hlavní prouhelňovací skupiny se dále dělí na podskupiny označené v konvenční řadě Para, Orto, Meta, per a v hierarchické řadě A, B, C, D. Pro dělení méně prouhelněných uhlí (lignit a hnědé uhlí) se používá spalné teplo v bezpopelovém stavu s obsahem vody Q_s^{af} [MJ.kg⁻¹]. K podrobnějšímu dělení černého uhlí a antracitu se používá průměrná náhodná odraznost vitrinitu R_o [%].

2. Petrografické složení (Petrographic Composition)

Petrografické složení je vyjádřeno výsledkem macerální analýzy podle ČSN ISO 7404-3. Určuje se procentuální obsah macerálových skupin vitrinitu V, liptinitu L a inertinitu I bez minerální složky. Je-li to možné, uvede se makropetrografická charakteristika s použitím litotypových termínů, jmenovitě lesklé (*Bright*), pololesklé (*Intermediate*) a matné (*Dull*) uhlí.

3. Kvalita uhlí (Grade)

Kvalita uhlí je závislá na množství anorganické příměsi v uhlí vyjádřeném obsahem popela v bezvodém stavu A^d [%]. Pro humitová uhlí je horní hranicí hodnota 80 % A^d , horniny nad touto hranicí nejsou zahrnuty do klasifikace. Horní hranicí pro rozdělování uhlí podle popelnatosti je obsah popela $A^d = 50.0$ %. Nad touto hranicí jsou přechodné horniny (*Carbonaceous rock*), např. uhelnatý jíl. Pro sapropelitová uhlí je horní hranicí 50 % A^d oddělující sapropelové nebo živičné břidlice (*Oil Shales*). Srovnání anglických termínů s českými kvalitativními a petrografickými ekvivalenty je v následujícím přehledu:

A^d (%)	Kvalitativní popis	Petrografický popis
0 – 10	vysoce kvalitní uhlí (<i>High grade coal</i>)	čisté uhlí
10 – 20	středně kvalitní uhlí (<i>Medium grade coal</i>)	uhlí
20 – 30	nízko kvalitní uhlí (<i>Low grade coal</i>)	uhlí s anorganickou (jílovou) příměsí
30 – 50	velmi nízko kvalitní uhlí (<i>Very low grade coal</i>)	popelovinové uhlí
50 – 80	uhelná hornina (<i>Carbonaceous rock</i>)	přechodná hornina (např. uhelnatý jíl)
> 80	hornina (<i>Rock</i>)	hornina

B) Hodnocení podle mezinárodního kodifikačního systému pro uhlí slabého stupně prouhelnění [15]

Kodifikační systém hnědých uhlí (uhlí s $Q_s^{af} < 24 \text{ MJ.kg}^{-1}$ a zároveň $R_o < 0.6$ %) je určen pro těžená a upravovaná uhlí z jednotlivých slojí nebo pro směsi uhlí z několika slojí. Hodnotí se podle čtyř parametrů: spalného tepla v bezvodém stavu Q_s^{daf} , obsahu veškeré vody W_t^r , obsahu popela A^d a obsahu síry S_t^d . Kódové číslo je osmimístné, každému parametru je vymezeno jedno dvojčíslí. Kódové číslo lze doplnit výsledky analytických rozborů dalších doplňujících parametrů, které se označují jako doporučené (např. obsah prchavé hořlaviny V^{daf}). Jestliže hodnota některého parametru nebyla stanovena nebo není dostupná, provede se částečné (neúplné) kódování. Do kódového čísla se místo číslic zaznamená „xx“.

C) Hodnocení podle mezinárodního kodifikačního systému pro uhlí středního a vysokého stupně prouhelnění [14]

Kodifikační systém černých uhlí a antracitů (uhlí s $Q_s^{af} \geq 24 \text{ MJ.kg}^{-1}$ anebo uhlí s $Q_s^{af} < 24 \text{ MJ.kg}^{-1}$ a přitom s $R_o \geq 0.6$) je určen pro těžená a upravovaná uhlí z jednotlivých slojí nebo pro směsi uhlí z několika slojí. Hodnotí uhlí podle osmi

parametrů: odraznosti R_o , histogramu odraznosti, macerálních skupin I, L, indexu puchnutí SI , V^{daf} , A^d , S_t^d a Q_s^{daf} . Kódové číslo je čtrnáctimístné, každému parametru je vymezena jedna číslice nebo jedno dvojčíslí. Kódové číslo lze doplnit doporučenými parametry (např. obsah uhlíku a vodíku).

Sestavení úplných kódových čísel černých uhlí nebývá snadné. V České republice se v minulosti jen výjimečně určovaly hodnoty všech kódových parametrů, především chybí stanovení střední odraznosti vitrinitu a histogramu těchto hodnot. Proto u většiny archivních analýz lze provést pouze částečné (neúplné) kódování.

D) Hodnocení podle mezinárodního kódového systému (MKS) – stanovení obchodních skupin [16]

V České republice se v minulosti používal (a dosud používá) mezinárodní kódový systém pro stanovení obchodních skupin. Charakteristika uhlí z hlediska výroby koksu se udává třímístným kódovým číslem. První kódová číslice udává obsah prchavé hořlaviny V^{daf} (u méně prouhelněných uhlí spalné teplo Q_s^{af} .) Druhá kódová číslice udává spékavost uhlí podle indexu puchnutí a třetí kódová číslice charakterizuje koksovatelnost podle výsledků dilatometrického stanovení. Uhlí se podle kódových čísel zařazují do obchodních skupin označených římskými číslicemi a velkými písmeny.

E) Hodnocení zásob uhlí ve shodě s horním zákonem

- podle stupně prozkoumanosti na zásoby vyhledané a prozkoumané,
- podle podmínek využitelnosti na zásoby bilanční a nebilanční,
- podle přípustnosti k dobývání na zásoby volné a vázané.

7. Závěr

V příspěvku je popsán metodický postup tvorby modelu ložiska uhlí a proces jeho následného hodnocení, což je náplní grantového projektu GA ČR č. 105/03/1417 „Interaktivní programový systém pro aplikaci moderních metod hodnocení uhelných ložisek a jejich dílčích částí v komplikovaných podmínkách“. Vytvořený systém byl po stránce metodické i programové připraven pro hodnocení hlavních uhelných pánví ČR jednotným moderním způsobem. V článku popsané metodické zázemí dává předpoklad, že se uživatel vyvaruje chybám, které byly při hodnocení ložisek uhlí dříve mnohdy běžné a které vznikaly především z důvodu použití nevhodných a přímo nesprávných postupů.

V projektu pro hodnocení ložiska jsou využity rovinné diskrétní modely jednotlivých uhelných slojí, což umožňuje v jednotlivých modulech programového systému provádět i detailní výpočty ve složitých geologických podmínkách. Navíc byly implementovány nové klasifikační systémy hodnocení uhelných zásob. Postup klasifikace zásob probíhá nejen podle způsobů používaných v ČR, ale také podle klasifikací evropských a mezinárodních.

Poděkování: Autoři děkují Grantové agentuře ČR za možnost a podporu projektu s registračním číslem 105/03/1417.

Literatura

1. Deutsch, C., V.: Geostatistical Reservoir modeling. Oxford, *Oxford university press*, 2002, 376 s.
2. Honěk, J., Hoňková, K., Jelínek, J., Staněk, F.: Univerzální systém hodnocení a grafického zobrazení hornin, přechodných hornin a uhlí. In *Sb. vědeckých prací VŠB – TU Ostrava, rok 2003, ročník XLIX, řada hornicko-geologická, monografie 9*, s. 69 - 92.
3. Mallet, J., L.: Geomodeling. New York, Oxford, *Oxford university press*, 2002, 599 s.
4. Morkes, D.: Microsoft Office Access 2003. Brno, *Computer Press*, 2004, 350 s.
5. Schejbal, C., Honěk, J., Staněk, F.: Vývoj systému pro ukládání a vyhodnocování údajů uhelných zdrojů a jeho využití pro analýzy využitelnosti těchto zdrojů po roce 2000. In *Sb. vědeckých prací VŠB – TU Ostrava, č. 2, rok 1998, roč. XLIV, řada hornicko - geologická, s. 2 - 8*.
6. Schejbal, C.: Matematické metody a postupy ložiskového průzkumu. In *Sb. vědeckých prací VŠB – TU Ostrava, monografie 5, rok 2001, roč. XLVII, řada hornicko - geologická, 222 s*.
7. Schejbal, C.: Problematika výpočtu a klasifikace zásob a zdrojů pevných nerostných surovin. In *Sb. věd. prací VŠB-TU Ostrava, řada hornicko-geologická, monografie 9, Ostrava, 2003, s. 139 - 161*
8. Staněk, F.: Některé aspekty modelování ložiska uhlí. In *Sb. Documenta geonica 1999 – 4. česko - polská konference o sedimentologii karbonu hornoslezské pánve & 2. česko - polské geomechanické sympozium, Ostrava, ÚGN AVČR, 1999a, s. 155 – 162*
9. Staněk, F.: Vliv výběru interpolační metody na přesnost výpočtu zásob uhelného ložiska. *Věstník Českého geologického ústavu 74, 2, 1999b, s. 211 - 222*.
10. Staněk, F.: Interaktivní programový systém pro aplikaci moderních metod hodnocení uhelných ložisek a jejich dílčích částí v komplikovaných podmínkách. In *Sb. vědeckých prací VŠB – TU Ostrava, 1, rok 2003, ročník XLIX, řada hornicko-geologická, s. 99-104*
11. Surfer 8. Contouring and 3D Surface Mapping for Scientists and Engineers. *User's Guide. Golden Software Inc., Golden, USA, 2002, 640 s*.
12. Vizi, L., Timčák, G., M.: Význam štúdia lognormálneho rozdelenia v geológii a baníctve. In *Sb. věd. prací VŠB-TU Ostrava, řada hornicko-geologická, Ostrava, 1, 2002, s. 29-39*
13. UN-ECE. International Classification of in-Seam Coals. *Economic Commission for Europe, Committee on Sustainable Energy, Geneva, 1998, 41 pp. (Document ENERGY/1998/19)*
14. UN-ECE. International Codification System for Medium and High Rank Coals. *Economic Commission for Europe, Committee on Sustainable Energy, Geneva, 1988, 17 pp. (Document ECE/COAL/115)*
15. UN-ECE. International Codification System for Low-Rank Coal Utilization. *Economic Commission for Europe, Committee on Sustainable Energy, Geneva, 2002, 13 pp. (Document ECE/ENERGY/50)*
16. ČSN 44 1391. Klasifikace černých uhlí kódovými čísly, *Praha, 1966*
17. ČSN ISO 7404-3. Metody petrografické analýzy černého uhlí a antracitu. Část 3. Metoda stanovení složení macerálových skupin, *Praha, 1998*