

Ján Chrapan; Anna Polášková
Antropogénny rádiouhlík v životnom prostredí

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 29 (1984), No. 2, 89--90,91--95

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/139981>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1984

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

Antropogénny rádiouhlík v životnom prostredí

Ján Chrapan, Anna Polášková, Bratislava

Uhlík patrí k dôležitým biogénnym prvkom. Existuje vo všetkých formách života a zúčastňuje sa väčšiny biologických, biochemických a biogeochemických procesov. Z hľadiska radiačného nebezpečia je najväčší záujem o jeho dlhožijúci izotop ^{14}C . ($T_{1/2} = (5730 \pm 40)$ rokov, $E_{\beta} = 155$ keV). Obsah a správanie sa ^{14}C v prírode sa stalo predmetom dôkladného štúdia v päťdesiatych rokoch nášho storočia. Záujem o tento izotop vyvolali jeho nové, antropogénne zdroje

- jadrové skúšky (bombový efekt),
- jadrová energetika (reaktorový efekt),
- výroba rádioizotopov (pre vedecké, technické a lekárske účely).

V článku chceme priblížiť spoločenský dosah týchto zdrojov rádiouhlíka. Prognózy vychádzajúce zo súčasného stavu nie sú totiž uspokojivé. Bez prijatia medzinárodných opatrení sa stane rádiouhlík v budúcnosti zdrojom radiačného nebezpečia.

Bombový efekt

Pri výbuchu jadrových bômb sa ^{14}C tvorí hlavne reakciou $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$. Množstvo ^{14}C , ktoré sa dostalo do atmosféry za obdobie jadrových skúšok, možno určiť z energie, ktorá sa uvoľní pri výbuchu a z množstva pri tom uvoľnených neutrónov. Pozorovania ukázali, že v roku 1972 v dôsledku skúšok jadrových zbraní z predchádzajúceho obdobia v atmosfére nahromadený rádiouhlík predstavuje aktivitu 270,2 PBq.

Pri prízemných výbuchoch jadrových náloží ekvivalentu desiatok kt TNT zostanú produkty výbuchu v troposfére a tu sa šíria stovky kilometrov od miesta výbuchu, sledujúc turbulenciu vzdušných mäs. Ak mohutnosť výbuchu prevýši 1 Mt TNT, dostanú sa produkty výbuchu do stratosféry. Tu sa rýchlo rozšíria po celej severnej alebo južnej pologuli. Do stratosféry opačnej pologule prenikajú so značným oneskorením. Množstvo bombového ^{14}C , ktoré prechádza každoročne v podobe CO_2 zo stratosféry do troposféry, závisí od intenzity meteorologických procesov. Predstavuje 15 až 20% celkového množstva bombového rádiouhlíka. V období rokov 1945 až 1962 vzniklo bombovým efektom okolo $70 \cdot 10^{27}$ atómov ^{14}C , čo je asi 163,3 kg tohto izotopu. To síce predstavuje len 0,23% celkového množstva prírodného rádiouhlíka na Zemi, avšak bombový rádiouhlík nie je rozložený v celom geomigračnom cykle, a preto v mieste svojho vnosu (v atmosfére) predstavuje značný prírastok. Následkom výmenných procesov v atmosfére a v dôsledku jarného a letného kolísania tropopauzy vnikajú do troposféry veľké masy stratosférického vzduchu a prinášajú so sebou ^{14}C .

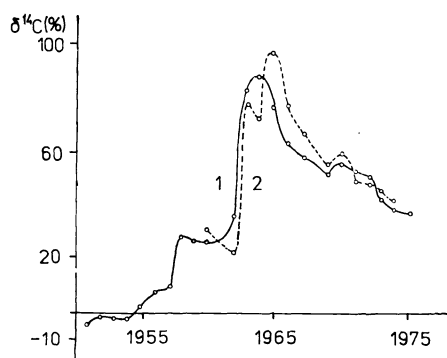
Prvé experimentálne údaje o zvýšení obsahu ^{14}C v troposfére získali v roku 1956 Rafter a Fergusson [1]. V období jadrových výbuchov z rokov 1961 až 1963 obsah ^{14}C v troposfére rýchle vzrástola jeho relatívne prevýšenie predstavovalo približne 90 až 100% prírodnej hladiny. Toto množstvo sa udržalo prakticky počas troch rokov. Od

roku 1966 koncentrácia bombového ^{14}C v troposfére začala klesať. K roku 1970 poklesla takmer na 60% prírodnej hladiny a k roku 1984 bude túto hladinu prevyšovať na 20%. Tento pokles nevznikol ako následok rádioaktívnej premeny, ale vďaka prenikaniu $^{14}\text{CO}_2$ do iných rezervoárov geomigračného cyklu, do vôd oceánov a do biosféry. Množstvo bombového ^{14}C v troposfére severnej a južnej pologule je rôzne. Aj v troposfére južnej pologule toto množstvo vzrastalo, avšak pomalšie ako na severnej pologuli. Súvisí to s menším množstvom jadrových výbuchov, rozsiahlejšou výmenou atmosférického CO_2 s vodou oceánov a s pomalým premiešavaním vzdušných mäs oboch pologúl. Koncentrácia bombového ^{14}C v troposférickom CO_2 oboch pologúl sa bude postupne vyrovnávať.

Koncentrácia ^{14}C v uhlíku biosféry je v dynamickej rovnováhe s jeho koncentráciou v troposfére. Fotosyntéza predstavuje bariéru pre prechod rádiouhlíka z troposféry do biosféry. V dôsledku izotopickej frakcionácie prebiehajúcej pri fotosyntéze, aktivita atmosférického uhlíka je mierne vyššia, ako odpovedajúca merná aktivita biosférického uhlíka. Priemerný pomer mernej aktivity atmosférického a biosférického uhlíka je 1,037 [2]. Údaje o koncentrácii ^{14}C v biosfére v období jadrových skúšok študovali Burčuladze, Povinec a ďalší [3] pomocou letokruhov a gruzínskych vín [4]. Relatívne prevýšenie koncentrácie ^{14}C udané v týchto prácach je na obr. 1.

Molekuly CO_2 prechádzajú z atmosféry do vôd oceánov rýchlejšie než z oceánov do atmosféry. V súčasnosti obsah antropogénneho ^{14}C vo vodách oceánov neprestajne narastá. K roku 1966 dosiahol $27,2 \cdot 10^{27}$ atómov, čo predstavuje približne 39% množstva rádiouhlíka, vytvoreného za celé obdobie pokusov s jadrovými zbraňami. K roku 2000 prejde do oceánu okolo 96% bombového ^{14}C .

Koncentrácia antropogénneho rádiouhlíka v morských organizmoch približne zodpovedá jeho koncentrácii v morskej vode [5]. Tu predstavuje po roku 1968 okolo 17% prirodzenej hladiny a jeho koncentrácia v telách morských živočíchov leží v rozmedzí 1,3 až 10,2% prirodzenej hladiny.

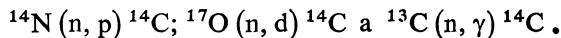


Obr. 1.

Relatívne prevýšenie koncentrácie ^{14}C nad prírodnú hladinu v dôsledku bombového efektu v období rokov 1950 až 1975. Krivka 1 je určená z gruzínskych vín, 2 z letokruhov stromov.

Reaktorový efekt

Po zákaze skúšok jadrových zbraní pochádza základný príspevok antropogénneho rádiouhlíka v geomigračnom cykle od jadrových elektrární. V aktívnej zóne jadrových reaktorov sú veľké hustoty tokov neutrónov ((1 až 5) 10^{14} neutrónov.cm⁻².s⁻¹). Neutróny interagujú s okolitým materiálom a prímiesami, ktoré sa v ňom nachádzajú a vytvárajú ¹⁴C nasledovnými jadrovými reakciami:



Tvorba ¹⁴C závisí od typu a konštrukcie reaktora. Jednako však reakcia (n, p), ktorá prebieha na dusíku, je pre svoj veľký účinný prierez ($1,7 \cdot 10^{-28}$ m²) a obsah dusíka vo vzduchu, vo väčšine prípadov základným zdrojom rádiouhlíka. Reaktorovými neutrónmi vytvorený rádiouhlík môže vstupovať spolu s plynými exhalátmi jadrových elektrární do okolitého prostredia [6]. Činnosť reaktorov vedie teda k systematickému úniku značného množstva izotopu ¹⁴C do vonkajšieho prostredia. Časť rádiouhlíka môže uniknúť do vonkajšieho prostredia v kvapalnom odpade vo forme nerozpustných karbonátov a plyného CO₂, rozpusteného vo vode. Horná hranica úniku reaktorového rádiouhlíka sa dnes odhaduje na 428 kBq.s⁻¹. Dôležitú úlohu pre zvládnutie úniku reaktorového rádiouhlíka hrá otázka typu chemických zlúčenín v aktívnej zóne reaktorov a v exhalátoch. Pri tvorbe ¹⁴C v atmosfére plyného dusíka možno očakávať jeho výskyt vo forme C, CN₂ a C₂N₂. V dusíku sa v dôsledku jeho nedokonalého čistenia vždy udrží určité množstvo kyslíka. Pri výstupe z aktívnej zóny sa dusík zrieduje vlažným vzduchom z ventilačných systémov. Ku kontaktu zlúčenín uhlíka s kyslíkom a parami vody dochádza pri dostatočne vysokej teplote a v silných poliach žiarenia gama. Pritom je väčšina molekúl vo vzbudenom alebo silne ionizovanom stave. V takýchto podmienkach treba očakávať takmer úplné okysličenie všetkých vytvorených zlúčenín na CO₂ alebo CO. Neokysličené atómy elementárneho uhlíka a pevných zlúčenín vytvárajú aerosolovú frakciu odpadu ¹⁴C. Takýmto spôsobom pri ľubovoľnej tvorbe rádiouhlíka v jadrových elektrárnach vždy možno očakávať jeho maximálny výťažok v tvare molekúl CO₂ a len v malom množstve vo forme CO a iných zlúčenín. Pri výpocíte tvorby reaktorového rádiouhlíka ťažko možno brať do úvahy všetky faktory, ktoré ovplyvňujú jeho tvorbu. Preto sa množstvo ¹⁴C uniknuté do životného prostredia vo väčšine prípadov ľahšie určí priamym meraním v plynom odpade jadrových elektrární [7].

Vo všetkých ekonomicky vyspelých krajinách sa budujú jadrové elektrárne, nakoľko zásoby nerastného paliva sú ohraničené a hydroenergetika pre väčšinu krajín nemá podstatný význam. Využívanie jadrovej energie zmenší znečistenie okolitého prostredia produktami horenia. Podľa údajov komisie OSN [8] existovalo už v roku 1974 v 19 krajinách 161 jadrových reaktorov, ktoré mali celkový elektrický výkon 59,4 GW. Predpokladá sa, že v roku 2000 dosiahne celkový elektrický výkon jadrových elektrární 32 TW.

Absolutná hodnota prírastku odpadu reaktorového ¹⁴C v roku 1980 predstavovala 214 MBq.s⁻¹, čo je 4krát viac ako rýchlosť tvorby prírodného rádiouhlíka. K roku 2000 sa vznik odpadu ¹⁴C zdvadsaťpäťnásobí. Tento výsledok núti zamyslieť sa nad

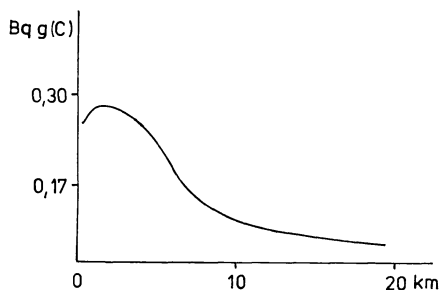
prijatím špeciálnych opatrení pre čistenie odpadov jadrových elektrární. Uvedené hodnoty tvorby reaktorového ^{14}C sú odhadované ako maximálne. Treba však pripomenúť, že určité množstvo ^{14}C budú disipovať aj závody na spracovanie jadrového paliva a reaktory využívané na školské a priemyslové účely. Tieto okolnosti sme v uvedených odhadoch nebrali do úvahy.

Pri štúdiu hromadenia reaktorového rádiouhlíka v okolitom prostredí treba brať do úvahy dve navzájom súvisiace časti:

- hromadenie ^{14}C v oblastiach bezprostredne obklopujúcich zdroj tohto izotopu,
- globálne zvýšenie jeho koncentrácie v geomigračnom cykle uhlíka (v atmosfére, biosfére, vo vode oceánov a v litosfére).

Každú jadrovú elektrárň možno považovať za lokálny zdroj rádiouhlíka. Okolo neho možno pozorovať zvýšenú koncentráciu tohto izotopu v rôznych objektoch prostredia. Takýmito lokálnymi zdrojmi sú aj závody na výrobu izotopov, vedeckovýskumné zariadenia a iné.

Do biosféry prechádza rádiouhlík prevážne fotosyntézou a dýchaním. Pre väčšinu rastlín v podmienkach mierneho klimatického pásma prebieha fotosyntéza iba počas teplej časti roka a cez deň. Proces dýchania prebieha nepretržite počas celého dňa a rastlina vydáva 20 až 30% získaného uhlíka. Teda pre určenie koncentrácie rádiouhlíka v biomase rastlín treba uvažovať koncentráciu ^{14}C v atmosfére len pri takých meteorologických podmienkach, ktoré sú charakteristické pre letné dni roka. V tej dobe prebieha intenzívne premiešavanie vzduchových mäs. V stebľoch, semenách, jahodách, koreňoch rastlín sa uhlík zhromažďuje počas celého vegetačného obdobia, t.j. takmer 4 až 5 mesiacov. Teda obsah rádiouhlíka vo väčšine poľnohospodárskych produktov (zrno, zemiaky, zelenina) bude zodpovedať sezónnej alebo strednej sezónnej koncentrácii ^{14}C v prízemnej vrstve vzduchu. Obsah ^{14}C v takom dôležitom potravinovom článku ako je mlieko (ak je krmivom tráva) zodpovedá priemernej koncentrácii ^{14}C vo vzduchu. Na obr. 2 je rozloženie koncentrácie ($\text{Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ uhlíka) rádiouhlíka v CO_2 v prízemnej vrstve vzduchu v okolí trvale pracujúceho zdroja, ktorého výkon je asi $0,4 \text{ MBq} \cdot \text{s}^{-1}$ a pri ktorom exhaláty unikali z výšky 100 m. Experimenty ukázali, že maximálna koncentrácia ^{14}C v rastlinstve je vo vzdialenosti 1 až 2 km od takéhoto zdroja.



Obr. 2.

Rozloženie reaktorového ^{14}C v okolí miestneho zdroja s výkonom 37 GBq za deň, z ktorého radiouhlík uniká v exhalátoch z výšky 100 m.

Rozvoj jadrovej energetiky, sprevádzaný rastom počtu jadrových elektrární a zvyšovaním ich výkonu, hrozí globálnym znečistením výmenného rezervoáru uhlíka Zeme reaktorovým rádiouhlíkom. Prognózy ukazujú, že k roku 2000 budú jadrové elektrárne

vyrábať 60% celkovej elektrickej energie a tento podiel sa bude zvyšovať [9]. Množstvo jadrových elektrární bude narastať na všetkých kontinentoch. Pritom bude rásť počet oblastí lokálneho zvýšenia koncentrácie ^{14}C . Rozmery týchto oblastí sa budú po celý čas zväčšovať. Reaktorový ^{14}C , ktorý sa dostane do atmosféry z nepretržite pracujúcich zdrojov, nebude, vďaka svojej dlhšej dobe života, miznúť, ale sa bude rozširovať od zdroja a prenikať do celého geomigračného cyklu uhlíka. Jednotlivé centrá sa budú navzájom spájať, čo bude mať za následok globálne znečistenie biosféry. Znečistenie výmenných rezervoárov uhlíka možno odhadnúť. Potrebné výpočty možno oprieť o tieto podmienky:

- o prognózu rozvoja jadrovej energetiky,
- o prognózu typového zloženia budovaných reaktorov,
- o poznanie správania sa reaktorového rádiouhlíka v okolitom prostredí, teda o poznanie jeho migrácie.

Takto získané rozloženie ^{14}C v jeho výmenných rezervoároch je v tabuľke 1.

Tabuľka 1. Očakávané rozloženie ^{14}C vo výmenných rezervoároch, dané prognózou rozvoja jadrovej energetiky v jednotkách PBq

rezervoár, resp. jeho zložka	1985	1990	1995	2000	2005	2010
1 stratosféra	4,662	7,104	23,68	44,03	71,41	111,37
2 troposféra	38,11	91,39	183,89	315,98	495,8	732,6
3 biosféra	6,697	15,355	32,893	58,83	95,09	143,19
4 humus	12,432	30,118	69,56	140,23	249,75	407,0
5 povrchové vody oceánu	12,913	30,192	66,97	126,91	214,6	335,22
6 hlbinné vody oceánu	5,254	14,245	35,076	77,33	152,07	272,32

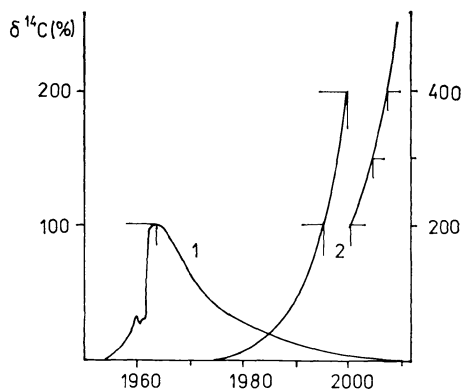
Celkové množstvo rádionuklidu, ktoré je v danom rezervoári, nevystihuje nebezpečnosť stupňa znečistenia tohto rezervoáru. Lepší obraz o znečistení dáva veličina, ktorá vyjadruje obsah rádioizotopu pripadajúci na jednotku hmotnosti jeho prvku. Očakávaná koncentrácia ^{14}C v uhlíku troposféry a biosféry je v tabuľke 2. Koncentrácia rádiouhlíka v biosfére sa nepatrne oneskoruje za koncentráciou v troposfére. Rovnováha medzi týmito rezervoármi sa dosiahne veľmi rýchle. Podľa prognóz rastu výkonu jadrovej energetiky a podľa typového zloženia budovaných reaktorov prevýši koncentrácia rádiouhlíka v biosfére k roku 2010 prírodnú hladinu koncentrácie ^{14}C takmer

Tabuľka 2. Očakávaná koncentrácia reaktorového ^{14}C v troposfére a biosfére v mBq na 1 g uhlíka

rezervoár	1985	1990	1995	2000	2005	2010
troposféra	68,33	165,0	333,0	566,6	900,0	1316,0
biosféra	53,33	123,3	266,0	466,6	766,6	1150,0

5krát. Množstvo reaktorového rádiouhlíka bude nepretržite narastať (obr. 3), ak len sa neprijmú účinné opatrenia na čistenie odpadov jadrových elektrární, a to v globálnom meradle.

Ak sa neobnovia jadrové výbuchy, tak začiatkom 21. storočia budú základným zdrojom antropogénneho ^{14}C jadrové elektrárne. Koncentrácia bombového rádiouhlíka sa vyrovná koncentrácii reaktorového ^{14}C už v roku 1985. Suessov efekt, t.j. CO_2 vstupujúce do atmosféry v dôsledku spaľovania fosílnych palív, bude spomaľovať narastanie koncentrácie antropogénneho rádiouhlíka, nebude však vplývať na jeho absolútne množstvo.



Obr. 3.

Priemerný priebeh bombového (1) a reaktorového (2) efektu na severnej pologuli a jeho prognóza do roku 2010.

Výroba rádioizotopov

V súčasnosti na celom svete rastie počet vedeckovýskumných zariadení, v ktorých sa používajú látky značené ^{14}C . Druhá strana sledovaného problému súvisí s možnosťou znečistenia okolitého prostredia pri vedeckých a priemyslových experimentoch. Hoci sa pri práci s rádioaktívnymi látkami dodržujú pravidlá bezpečnosti, predsa sa miesta uskladňovania môžu zmeniť na zdroje znečistenia okolitého prostredia. Vyčíslíť takéto znečistenie ešte nie je možné. Nejestvuje ani inventarizácia všetkých laboratórií a iných zariadení využívajúcich rádiouhlík. Je preto nevyhnutné merať obsah ^{14}C na rôznych miestach blízko veľkých zdrojov jeho odpadu a taktiež v oblastiach veľkých vedeckovýskumných centier a poľnohospodárskych staníc, kde sa experimentuje so zlúčeninami značenými ^{14}C . Použitím rádiouhlíka začali totiž biologické vedy disponovať presnými a hybnými metódami štúdia otázok fyziológie, biochémie rastlín, živočíšstva a ekológie.

Hromadenie dostatočného experimentálneho materiálu, rozpracovanie a zdokonaľovanie metód registrácie globálneho a lokálneho rozloženia rádiouhlíka dáva možnosť vyslovovať presnejšie prognózy vstupu ^{14}C do okolitého prostredia.

Rozvoj jadrovej energetiky bude prinášať stále nové a nové úlohy súvisiace s rozšírením a hromadením reaktorového rádiouhlíka v životnom prostredí. Pre zabezpečenie nepretržitej kontroly obsahu ^{14}C v ovzduší je výhodné pravidelné meranie koncentrácie tohto izotopu, a to v širokej medzinárodnej spolupráci.

Literatúra:

- [1] RAFTER T. A., FERGUSSON G. I.: *Science* 126 (1957) 557—558.
- [2] VINOGRADOV A. P., DEVIRC A. L., DOBKINA E. I.: *Doklady AN SSSR*, 137 (1961) 688—691.
- [3] BURČULADZE A. A., PAGAVA S. V., ŠIVO A., POVINEC P., USAČEV S.: *ACTA F.R.N. UNIV. COMEN- Form. et prot. nat. VII* (1981) 147—156.
- [4] BURČULADZE A. A., GEDEVANIŠVILI D. D., PAGAVA S. V., TOGONIDZE G. I., In: *Zborník Low Radioactivity Measurements and Applications*. Bratislava SPN 1977, 261—263.
- [5] BERGER R., LIBBY W. F.: *Radiocarbon* 9 (1967) 477—504.
- [6] SIVINCEV J. V.: *Radiacionnaja bezopasnost na jadernych reaktorach*. Atomizdat, Moskva 1967.
- [7] POLÁŠKOVÁ A., POVINEC P., CHUDÝ M., USAČEV S.: *Radioizotopy 21* (1980) 253—265.
- [8] *Proizvodstvo jadernoj energetiky*. Doklad naučného Komiteta OON po dejstviju atomnoj radiacii A/AS, 82/R (1975) 299.
- [9] FLOREK M.: *Rozhledy mat. fyz.* 10, (1982) 451.

Filozofické a svetonázorové dôsledky matematizace poznání

Stanislav Hubík, Brno

Hovořit o svetonázorových dôsledcích procesu matematizace poznání znamená nastolit problém vztahu matematiky a svetonázoru, respektive aspoň jednu jeho důležitou složku. Téma svetonázoru se v poslední době často vyskytuje, a to nejen ve filozofii a společenskovedních disciplínách, ale také na speciálních pracovních setkáních přírodovědců a matematiků. Zabývat se problémem matematika a svetonázor je obtížné, zejména pro matematika. Tkví to již v samotné podstatě věci, že matematika nemá přímé vztahy k třídně ideologickým střetům; V. I. Lenin to lapidárně vyjádřil konstatováním: kdyby se geometrické axiómy bezprostředně dotýkaly života lidí, lidé by je vyvraceli. Zabývat se problémem matematika a svetonázor tedy znamená zformulovat smysluplný problém.

Matematika a vědecký svetonázor

Vcelku běžně se setkáváme s tvrzením, že rozvoj přírodovědy a matematiky vede ke stabilizaci a posilování vědeckého svetonázoru. Taková představa je dosti naivní. *Rozvoj přírodních věd a matematiky sám o sobě k posilování vědeckého svetonázoru nevede*. Někteří vynikající přírodovědci a metafyzici — ba dokonce spoluvůdci moderní vědy — nebyli stoupcí vědeckého svetonázoru. Stačí připomenout názorovou kombinaci vědecké teorie a náboženského názoru A. Einsteina, humanismu a náboženského názoru A. Schweitzera nebo logicko-matematických konstrukcí a teologie B. Bolzana, o starších vědeckých autoritách nemluvě. Věda a vědecký svetonázor jsou dvě různé filozofické a metavědecké kategorie, které k sobě mají blízko,