

Spaciokardiografie

K 20. výročí úmrtí akademika Viléma Laufbergera

V padesátých a šedesátých letech minulého století nastal prudký rozvoj teoretických i praktických publikací v oboru elektrokardiografie. Vilém Laufberger založil po roce 1945 jako vedoucí Fyziologického ústavu v Praze na svém pracovišti laborator vyšší nervové činnosti. Napsal originální publikaci „Vzruchová teorie“,⁽⁶⁾ která přinesla základní poznatky o činnosti mozku. Zdůraznil, že jediný kód v lidském těle jsou vzruchy a že vedení vzruchů je řetězem biochemických reakcí, které se odehrávají na iontových dipólech. Laufbergera zaujala i srdeční vzrušivost a aktivita činnostních srdečních potenciálů. Elektrickým srdečním polem a jeho zdrojem se pak zabýval až do konce svého života. Své plány a výzkumy uskutečňoval později v nově založené Laboratoři grafických vyšetřovacích metod ČSAV v Praze Na Bulovce. Bylo to u nás jedno z prvních klinicko-fyziologických bioinženýrských experimentálních pracovišť ČSAV zaměřených na srdeční choroby. Na tehdejší dobu zde byly vybudovány dobré podmínky technické, laboratorní i klinické s malou lůžkovou částí, které mohly sloužit k ověřování teoretických a nových metodických přístupů v kardiologické diagnostice.

Elektrokardiografie, založená již před 100 lety Willemem Einthovenem,⁽³⁾ měřila zpočátku srdeční potenciály jako difference z končetinových svodů. Výklad těchto bipolárních svodů byl pouze ve frontální rovině na Einthovenově rovnostranném trojúhelníku. Přesto byla elektrokardiografie revolucí a dala zcela nový pohled na srdeční funkce. Stala se základní metodou v kardiologické diagnostice a jako každá metoda se postupně rozvíjela a je stále nepostradatelná pro klinickou praxi.

Významný pokrok nastal koncem 30. let zavedením Wilsonovy nulové referenční svorky.⁽¹²⁾ Měřené potenciály proti nulové referenci ukazují změny srdečního zdroje z místa polohy měřicí elektrody. Tyto unipolární Wilsonovy svody umožnily skalární měření časových změn kladných a negativních potenciálů srdečního zdroje z různých míst na hrudníku a umožnily prostorové pohledy na zdroj elektrického srdečního pole (ESP). Podle tvaru hrudníku s hraničními a vnitřními vodivými vlastnostmi a s různými vzdálenostmi šíření ESP od srdečního zdroje se jednotlivé unipolární EKG-svody liší svými velikostmi, tvary a časovým rozložením v průběhu depolarizační i repolarizační fáze. Tyto vztahy zevního prostředí ke zdroji charakterizuje *vektor svodu*, jako konstanta pro každý jednotlivý skalární EKG.

Duchosal⁽²⁾ přesvědčivě popsal unipolárními svody na celém obvodu hrudníku, tzv. *zrcadlové EKG-svody*, které mají stejný tvar a časový průběh, liší se jen opačnou polaritou i velikostí a nalézají se na protilehlých částech hrudníku. Spojnice těchto svodů z různých poloh v horizontální úrovni srdce se kříží v místě reálného elektrického zdroje. Laufberger⁽⁷⁾ toto nesymetricky ležící místo v hrudníku nazval *středem elektrické symetrie*. Znalost polohy zdroje uvnitř hrudníku je základním místem k výpočtu vzdáleností různých EKG. Zrcadlové EKG byly vyhledávány na osciloskopu podle fázové shodnosti *Lissajousovou metodou*. Z poměru velikostí vrcholů časově shodných potenciálů zrcadlových svodů a ze vzdálenosti obou elektrod lze rovnici podle nepřímého kvadratického zákona stanovit vzdálenosti elektrod od zdroje. Průsečnice dvou i více křížících se

spojnic nalezených zrcadlových dvojic, přibližně ve stejném místě, potvrzují zákonitost vztahu polohy elektrického zdroje se vzdálenostmi elektrod umístěných na povrchu hrudníku. Poloha elektrického srdečního zdroje je rozhodujícím místem pro prostorové měření elektrického srdečního pole. Určení polohy středu elektrické symetrie rovněž ukazuje dominanci informací o původu zdroje, jako ekvivalentního dipólu, který je základním konceptem pozitivního a negativního náboje v protilehlém směru. Svými změnami vytváří podmínky vzniku a šíření celého elektrického pole do okolních tkání.



Z vektorkardiografického setkání v Praze v roce 1963; zprava stojí V. Laufberger, uprostřed sedí P. W. Duchosal a A. Jouve a jeho blízcí spolupracovníci

V 50. letech minulého století bylo málo autorů, kteří použili střed elektrického pole na zobrazování ESP. Pouze Jouve⁽⁵⁾ publikoval v roce 1950 vektorkardiografický osový systém (VKG), založený na srdečním elektrickém středu s použitím unipolárních svodů.

Laufberger vytvořil vlastní teorii o *spaciokardiografii*.^(7,9) Zobrazení prostorového elektrického srdečního pole bylo koncipováno na základě individuálně vyhledávaného středu elektrické symetrie s vlastním souřadnicovým ortogonálním systémem os a s individuální korekcí velikostí potenciálů svodů (X, Y, Z), které odpovídají stejné vzdálenosti od elektrického zdroje. Většina ostatních badatelů ke zobrazování ESP používala VKG-systémy svodů s větším počtem elektrod na hrudníku a končetinách s unipolárním či bipolárním propojením. Jejich polohy měly být ortogonální a přizpůsobené na jakýsi standardní elektrický srdeční zdroj, avšak většinou bez úpravy jednotlivých svodů na stejnou vzdálenost od zdroje. Proto se srovnávané VKG různých autorů lišily tvarem i velikostmi.

Zdrojem akčních potenciálů je strukturou složitý mnohobuněčný srdeční sval cyklicky vzrušovaný specifickým vodivým systémem. Aktivace se rychle šíří po obou síních a na komorách současně z obou stran komorové přepážky po

všech vrstvách dutinové svaloviny komor naplněné krví s vyšší vodivostí. Kdyby bylo možné celý srdeční zdroj měřit galvanometrem, ukazoval by v průběhu postupující celé aktivity jen okamžité vrcholy průběhu maximálních potenciálů celého myokardu. Na okamžité aktivitě se zúčastňuje velkou většinou aktivita levé komory, která převládá množstvím svaloviny jak v průběhu rychlé depolarizace, tak v pomalejší fázi repolarizace. Průběhy potenciálů v srdci mají svůj časový a amplitudový charakter, které Laufberger nazval *kardiálou*.⁽⁹⁾ Tato *kardiála* představuje jednotný srdeční generátor pro vznik elektrického srdečního pole (ESP), které se pak šíří zákonitě do okolních tkání hrudníku s nižší vodivostí až na povrch těla s hraničními vlivy. Elektrické srdeční pole je rozšířeným prostorovým obrazem primárního ekvivalentního zdroje, které Laufberger jako celek nazval *frontálou*. *Kardiála* je vnitřní elektrický zdroj vyjadřující okamžitou rovnováhu elektrických sil vzniklých v myokardu formou rotujícího ekvivalentního dipólu s fixní patou, s proměnným modulem v čase a s lokalizací do oblastí středu elektrické symetrie. *Frontála* v celém ESP zahrnuje všechny změny srdeční elektrické aktivity spolu s okolními vlivy prostředí. Vliv vnitřního prostředí a tvar hrudníku ovlivňují informace primárního zdroje, jako konstanta vektoru svodu podle místa měření. Hlavní vliv na tento vektor má úbytek velikosti potenciálu se čtvercem vzdálenosti. Ostatní vlivy nehomogenit a hranic prostředí se jeví jako menší nedipolární složky asi jen v 10–15 %. Zhoršení zevních vlivů může záviset též od způsobu měření, množství, velikosti a vodivosti elektrod. Vektorový výklad ESP i *spaciokardiografie* jsou založeny na převaze dipólových informací v relativně homogenním prostředí a na znalosti polohy zdroje v hrudníku.

Unipolární svody jsou jednorozměrnou informací, jejich osy svodů (svodnice) procházejí středem elektrické symetrie. Kolmice na svodnici v elektrickém středu určuje nulovou linii svodu. Skalární časové průběhy amplitud potenciálů se mění podle místa uložení elektrody.

Vektorový výklad ESP je dvourozměrný a vyžaduje dva současné svody vzájemně kolmé s patou na středu elektrické symetrie. Vzniká průmětem elektrických změn do roviny proložené mezi oběma svodnicemi a zdrojem. V dané rovině vznikají obrazy křivek s časovými průběhy vrcholových vektorů potenciálových změn. Křivky mají svůj smysl rotace a jejich počátek vychází z nulového středu elektrické symetrie. Vzhledem k prostorové orientaci k povrchu hrudníku je nutné orientovat osy svodů souběžně s anatomickými osami hrudníku.

K trojrozměrnému prostorovému hodnocení ESP je pak nutné uložit na hrudník ještě třetí měřící elektrodu, která musí být kolmá k oběma dříve uvedeným, a jejíž svodnice musí rovněž procházet středem elektrické symetrie. Vzniknou tři poloosy s pozitivní polaritou a tři s negativní polaritou od zrcadlových svodů. Roviny proložené vždy dvěma osami vytvářejí tři vzájemně kolmé roviny v poloze horizontální, frontální a sagitální. Ke každé jednotlivé projekční rovině další dvě vytvářejí svou kolmostí nulové (izoelektrické) roviny. Podle polarit jednotlivých os vznikne rozdělení celého prostoru na osm oktantů či jednotlivé kvadranty podle polohy v horní, dolní, přední, zadní, levé nebo pravé oblasti osového dělení. Do všech se mohou promítat nejrůznější prostorové průběhy ESP. Podle polohy srdce a většiny průběhů vektorokardiografických (VKG) křivek byla stanovena pozitivní polarita os X, Y, Z pro levý, přední a dolní kvadrant. K prostorovému popisu elektrických změn je pak zapotřebí syntézy informací aspoň ze dvou rovin VKG-průmětů. Užívá se obvykle horizontální a frontální VKG nebo všech tří VKG. Hodnotí se charakteristické tvarové a časové průběhy křivek s rotací ve směru hodinových ručiček (CW) nebo proti směru (CCW) v jednotlivých rovinách. Prostorové uložení celých křivek nebo jednotlivých částí se hodnotí popisem úhlů azimutu (AZ) v horizontálním průmětu a úhlů elevace (EL) v rovině frontální nebo sagitální. Skutečné vektorové hodnoty amplitud v prostoru se musejí počítat z nalezených úhlů v daném čase.

Spaciokardiografie, kterou uvedl Laufberger jako metodu pro prostorové zobrazení ESP, se skládá rovněž ze tří ortogonálních unipolárních svodů centrovaných na nalezený střed elektrické symetrie a normalizovaných na kolmost a stejnou vzdálenost od zdroje (ortogonální a ortonormální svody). V roce 1952 publikoval spaciokardiografické zobrazení jako syntézu prostorových informací v jediném obraze, když k horizontálnímu VKG přepínáním po dvou milisekundách v předozadním směru byly přiřazeny hodnoty frontálního VKG. Později pro složitost některých průběhů potenciálových změn a zejména u patologických stavů se užívají jen časované VKG.

Ke skutečnému prostorovému zobrazení a hodnocení výsledků dospěl Laufberger v orbitální spaciokardiografii,⁽⁸⁾ kde opakuje, že potenciály v srdci vznikají při jeho vzrušení a mají své maximum v daném okamžiku. Toto maximum může být jen jedno a na jediném místě. *Kardiála* dává vznik ESP, rozprostírajícímu se v celém hrudníku. Všechny změny ESP měřené z nejrůznějších míst pak reprezentuje *frontála*. Syntézu všech prostorových informací o ESP představuje *orbíta*. Je to myšlená koule o průměru 10 cm kolem středu elektrické symetrie s nulovou hodnotou. Hlavními body na povrchu *orbity* jsou průměty os X, Y, Z a jejich protibody aX, aY, aZ. Jejich kombinací lze ve všech třech základních rovinách vytvořit zrcadlové VKG jako průměty. Kombinací X, Y a aX, aY se mohou vytvořit čtveřice VKG stejných tvarů a amplitud, které se liší pouze zrcadlovou polohou v jednotlivých kvadrantech vůči středu. Obdobné obrazce lze vytvořit i v rovinách X, Z a Y, Z se zrcadlovými protisvody všech dvanácti zrcadlových tvarů VKG. Tyto provedené pokusy platí pro nalezený střed pro depolarizaci (QRS) a jsou průkazem symetrie ESP a potvrzením existence elektrického středu. V obrazech čtveřic VKG bylo patrné, že repolarizace T-vlny nesouhlasí zcela se symetrickou polohou depolarizace QRS. Proto provedl Laufberger jako první i určení středu symetrie pro repolarizační vektory T. Byl určován obdobným způsobem fázového srovnávání zrcadlových obrazů zvětšených T-křivek. Malá změna polohy středu repolarizace směrem k anatomickému středu hrudníku je vysvětlována změnou systolického objemu krve a relaxací svaloviny jako trajektorie elektrického zdroje. Tato metoda prokázala též citlivost polohy elektrod ve vztahu k jejich velikosti a citlivost na fyziologické změny, například polohy těla a bránice.

V *orbitální spaciokardiografii* byla výrazným pokrokem rotace elektrických os. K jejich transformaci byl použit přístroj „resolver“, který je složen ze spřažených sinus-kosinusových potenciometrů pro jednotlivé osy. Vektorové křivky mají převážně rovinné průběhy u zdravých a i větší části nemocných osob. Otevřený průběh frontálního VKG se otáčením vertikální osy dostane do zákrytu a vytvoří přímku s výslednou hodnotou azimutového úhlu (AZ). Další rotací předozadní osy se určí EL tak, že se křivka v projekci přímky dostane do horizontální polohy. Rotací os se tak získá skutečná prostorová poloha průběhu křivek v těle se skutečnými velikostmi amplitud vektorů v čase. Tato poloha je určena dvěma úhly rotovaných základních os. Třetí osa je kolmá na získanou polohu roviny transformované křivky a je její normálou, která směřuje do místa minimální amplitudy EKG. Zároveň je to místo, kde se křižují všechny zrcadlové svody a mění svou polaritu. Transformovaná křivka ukazuje skutečný prostorový průběh *frontály* s obsahem maximálních informací o ESP. V průmětu roviny transformované křivky na orbitu (hlavní rovina frontály nebo rovník) se nalézají všechny nejrůznější tvary EKG s maximálními amplitudami v rozsahu 360 stupňů. V kolmém směru na hlavní rovinu *frontály* (analogie poledníků) probíhají linie stejných tvarů EKG po celé ploše *orbity* a směřují do místa třetí osy, do kladné normály a negativní antinormály. Kladná osa normály se hodnotí podle rotace CW-vektorů *frontály*. Průběhy linií stejných tvarů EKG (izofonní linie) postupně oběma

směry zmenšují amplitudy EKG (podle kosinusového zákona) a v bodě minimálních amplitud se všechny křížují a mění v dalším průběhu svou polaritu. To, co platí na *orbitě*, platí i na hrudníku, ovšem s určitými výjimkami. Projekce linií izoformních EKG získané na těle se nalézají obdobně v kolmém směru na stanovenou polohu roviny *frontály* a na elektrický střed. EKG však mají v nalezené izoformní linii různé velikosti podle vzdáleností elektrod od zdroje. Průběhy linií směřují na těle také k místu minimálního EKG-potenciálu a mění zde polaritu. V průmětu nalezené roviny *frontály* se nacházejí na obvodu hrudníku rovněž všechny rozdílné tvary EKG o různých velikostech. Izoformní linie EKG na hrudníku také směřují oběma směry k místu minimálních potenciálů nebo k bodu křížení a obratu polarity, k normálám roviny vektoru *frontály* QRS. Izoformní linie EKG lze nalézt po celém povrchu hrudníku *Lissajousovou metodou*. Poloha roviny *frontály* určuje rozložení EKG a izoformních linií. Leží-li rovina ve vertikálním směru, pak se obě normály nalézají v oblasti hrudníku. Většinou však se roviny *frontál* polohou blíží spíše k horizontální rovině, pak poloha normály směřuje do horní části hrudníku – často k oblasti levého ramene. Pod bránicí, která vlastně představuje velkou a těžko definovatelnou elektrodu, nelze obvykle najít dolní polohy těchto izoformních průběhů ani polohu protiležící normály. Jak na *orbitě* tak na těle lze nalézt celou síť EKG stejných tvarů, které vytvářejí globální systém šíření *kardiály* v prostoru. Tímto způsobem bylo ověřeno rozložení a šíření distribuce všech EKG na těle. U patologických stavů se polohy rovin i tvary křivek mohou výrazně měnit, a tím se mění celá distribuce ESP. Pak je složité posuzování ESP z jednotlivých skalárních svodů bez znalosti zákonitostí distribuce ESP.

Ověření metody *orbitální spaciokardiografie* bylo též prováděno inverzním způsobem tak, že byl vyhledáván EKG na těle podle určené úhlové polohy elektrody s ohledem na nitrohrudní polohu elektrického zdroje. Orbitální parametry byly určovány na vyšetřovaných osobách na upraveném souřadnicovém stole. Oba výsledné EKG byly porovnávány tvarově podle fázově shodných průběhů. Výsledky srovnání souhlasily v mezích biologického měření.

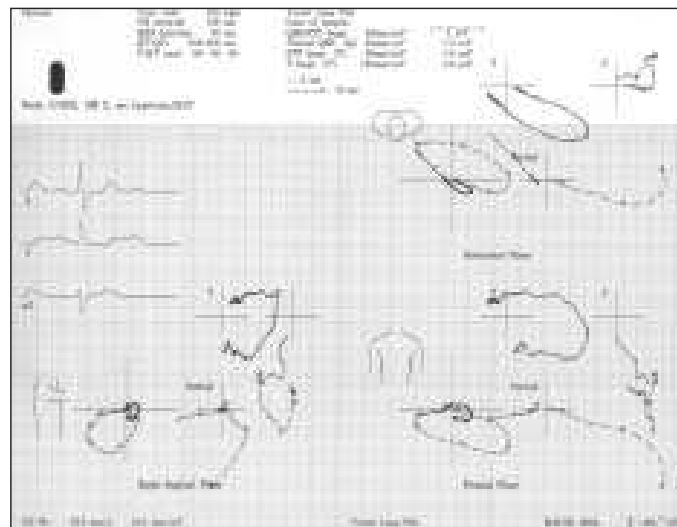
Byly zde uvedeny jen základní principy o elektrickém srdečním zdroji a zákonitosti šíření srdečních biopotenciálů měřitelných na těle. Blíže podrobnosti metodologické, technické, srovnávací a matematické modely, s četnou obrazovou dokumentací, atd., jsou v celé šíři popsány v knize *Spatiocardiography*,⁽⁹⁾ v práci *Orbitalspatiocardiografie*⁽⁸⁾ a v dalších citovaných publikacích. Většina uvedených prací byla prováděna ještě analogovou technikou. Po roce 1965 byla technologie převáděna do digitalizované formy zpracování spaciokardiografických údajů s užitím pro diagnostiku s oktantovým programem průběhů a ploch rovin křivek u základních diagnostických skupin.

Snaha o objektivní zobrazování informací prostorového elektrického srdečního pole nebyla v širší klinické praxi využita. Progrese digitalizace vedla k složitějšímu mnoho-elektrodovému měření ESP na celém povrchu hrudníku, které bylo dále zpracováno různými typy mapování se složitým vyhodnocováním dipolárních a multipolárních diagnosticky významných údajů. Ani tyto údaje nevedly pro komplexnost měření a výkladu k praktickému klinickému využívání. V kardiologické diagnostice pak převládl vývoj dalších metod, například ultrazvukové, izotopové a rozvoj tomografických a katetizačních metod, které významně rozšířily kardiologickou diagnostiku i terapii. I když bylo EKG technicky obecně zpřístupněno a užíváno vlastně u každého pacienta, více než 50 let se v podstatě nezměnilo empirické posuzování skalárních křivek a ustrnulo tak ve vývoji.

Laufberger svým systematickým fyziologickým výzkumem ukázal nový pohled na vlastnosti elektrického srdečního zdroje, na zákonitosti šíření a rozložení elektrického pole na povrchu těla a na objektivní prostorové zobrazení bio-

elektrických změn v srdci. Prokázal, že sjednocení informací ESP v třírozměrném zobrazení obsahuje všechny základní časové a amplitudové změny srdečního zdroje. Dále prokázal, že metoda orbitální spaciokardiografie je objektivní ve svém zobrazení a že podstatně zjednodušuje dosavadní metody měření skalární elektrokardiografie i mnoho-elektrodové mapovací metody celého povrchu hrudníku. Pro pochopení srdečního zdroje – ekvivalentního dipólu nebo Laufbergerovy kardiály – je důležité posuzovat okamžité vrcholové změny potenciálů celé srdeční aktivity jak při rychlé vzrušivosti metabolicko-stažlivé, tak při pomalejší fázi relaxační a návratné do klidu. Protože depolarizace je anatomicky definována strukturami vodivého a myokardiálního systému, jsou elektrické aktivity zákonitě svázány se synergií a synchronií srdeční kontrakce. Dojde-li k poruše v různé oblasti aktivačního systému nebo svaloviny, pak se mění i průběhy elektrických aktivit, někdy i dramaticky podle místa a rozsahu postižení. Většina činné svaloviny je z levé srdeční komory a její změny se účastní dominantně na vrcholové aktivitě potenciálu. Všechny patologické změny se projevují ve výrazné variabilitě průběhu vrcholových potenciálů v časovém i prostorovém tvaru zdroje. Tyto dynamické změny probíhají vždy směrem od postiženého místa myokardu. Depolarizace mění tvar, polohu i plochu určité části i celé křivky, pomalejší repolarizace obvykle mění tvary, velikosti i směry průběhu celých křivek. Je to např. u přechodné poruchy vyvolané námahou, kdy se dá zobrazit celý průběh prostorových změn s jejich názornou lokalizací v časových intervalech až do pozátěžového uklidnění.

Spaciokardiogramy stejně jako vektorkardiogramy poskytují podrobné prostorové informace získané ze tří ortogonálních a ortonormálních svodů a jsou skutečným pokrokem v elektrokardiografii. Sám Laufberger později ustoupil od precizního vyhledávání elektrického středu a normalizoval polohu zdroje $3 \times 4 \times 12$ cm vlevo od anatomického středu hrudníku. Při výpočtu normalizace vzdáleností bral v úvahu rozměry šířky i hloubky hrudníku. Později uznala Americká kardiologická společnost (AHA) pro klinické vyšetřování Frankův VKG-korigovaný systém,⁽⁴⁾ který řeší ortogonalitu a ortonormalitu standardního elektrického středu odporovou sítí. Tento způsob užíváme nyní na našem pracovišti přístrojem fy. GEM, MAC 5000 s vektorkardiografickým programem.



Ukázka vektorkardiogramu nynější aparaturou MAC 5000

Možnost srovnávání různých patologických stavů, sledovaných dalšími novými objektivními metodami, ukazuje výhody a bohatost informací při hodnocení prostorového obrazu VKG. Tato diagnostická metoda umožňuje zlepšení lokalizace některých perifernějších lézí krevního zásobení u non-Q-infarktu myokardu.

Účelem této práce je snaha obnovit a uplatnit v klinice prostorové zobrazení elektrického srdečního pole pro zjednodušení a lepší pochopení fyziologických a patologických srdečních změn. To bylo i hlavním cílem Laufbergera v jeho významné práci.

LITERATURA

1. Burger HC, van Milaan B. Heart vector and leads III. *Br Heart J* 1946;10:229.
2. Duchosal PW, Sulzer R. *La Vectocardiographie*. Bale: S. Karger, 1949.
3. Einthoven W, Lint K. Über das normale menschliche Elektrokardiogramm und über die capillar-elektrometrische Untersuchung einiger Herzkranken, *Pflugers Arch. ges. Physiol* 1900;80:139.
4. Frank E. An accurate clinically practical system for spatial vectorcardiography. *Circulation* 1956;13:737.
5. Jouve A, et al. *La Vectorcardiographie en Clinique*. Paris: Mason et Cie, 1950.
6. Laufberger V. *Vzruchová teorie*. Praha: SZdN, 1947.
7. Laufberger V. Spaciokardiografie. *Čs Fysiol* 1952;4:209.
8. Laufberger V. Orbitalspatiokardiographie. Praha: Rozpravy ČSAV, 1961:12.
9. Laufberger V. *Spatiocardiography. Textbook and atlas*. Prague: Publishing House of the Czechoslovak Academy of Science, 1965.
10. Laufberger V. Octant vectorcardiography. *Physiol Bohemoslov* 1980;29:481–94.
11. Soubor prací ke 100. výročí narození akademika V. Laufbergera. *Čas Lék čes* 1990;34:129.
12. Wilson FN. The precordial electrocardiogram. *Am Heart J* 1944;27:19.

*MUDr. Václav Král, CSc.,
Kardiologie na Bulovce s. r. o., Praha*