

PETR FILO

## STATISTICKÁ KRITÉRIA VÝZKUMU BIORYTMICITY

**Klíčová slova:** rytmus, rytmicita, perioda, fáze, statistická analýza

Rytmicita je všudypřítomným biologickým fenoménem, který je jedním z nejdůležitějších ukazatelů života (totéž platí o homeostaze atd.). Studium biorytmů má široký teoretický i praktický význam pro řadu základních (fyzika, chemie, biologie) a aplikovaných věd a oborů (lékařství, pedagogika, kosmonautika; sport, doprava).

Co se týče např. rytmicity neuropsychické, která je mnohdy v psychologii nedostatečně sledována, výsledky trpí jistou nejednotností. Ta je dána obtížnou registrací velkého množství specifických i nespecifických faktorů, které biorytmicitu spoluvytvářejí, nepřesnou kontrolou těchto faktorů a v neposlední řadě rovněž užitím neadekvátní analýzy. Díky tomu pak práce o biorytmicitě zachycují spíše vlivy motivace, učení, zvyků či důsledků narušení cyklu bdění – spánek, vlivy vnějšího prostředí včetně podnebí a počasí atd., než skutečnou endogenní rytmicitu, jmenovitě cirkadiánní změny, velikost amplitud rytmů atd.

V rámci přesnějšího ošetření dat se v oblasti statistické analýzy výsledků dává přednost zpracování původních (originálních) dat, která umožňují aplikaci víceméně libovolně vybraného matematického modelu. Tato data jsou považována za jedinou záruku validity. Zběžné vyšetření komplexních dat lze použít pouze v případě jednoduchého průběhu rytmů (tzn. rytmy vykazují pouze jednu maximální a minimální hodnotu). Kvantitativní závěry o rytmických parametrech jsou směrodatné na základě objektivně vypočítané analýzy, která je mimo jiné nezbytně nutná v případě ohodnocení závislosti rytmů na experimentálních podmínkách.

Interpretace charakteristik biorytmů je rovněž podmíněna mnoha fyzikálními a matematickými zákonitostmi. Tak například informace ohledně amplitudy nebo akrofáze rytmů jsou cenné pouze tehdy, jestliže zkoumaný rytmus vykazuje sinusový ráz (pokud jsou srovnávány rytmy s různými křivkami, je sdělení, týkající se rozdílů zmíněných aspektů, bezvýznamné).

Asi nejdůležitější operací kvantitativní analýzy je testování signifikantnosti (statistické významnosti) hodnocených výsledků. Např. významným statistick-

kým problémem bývá odhalení základního zdroje pravidelných variací rytmů (kromě biorytmicity jím totiž mohou být i náhodné vlivy). Ukazuje se, že tzv. longitudinální metody, které jsou schopny tento zdroj odhalit, nesplňují v plné míře, díky eliminaci vzájemných vlivů následných událostí, probíhajících v rámci jednoho úseku, metodologická kritéria. Tyto metody rovněž nedovolují vytvořit tvrzení o statistických pravděpodobnostech (např. standardní odchylce). Z těchto důvodů se výsledky naměřené longitudinálními metodami popisují pouze v termínech „spolehlivosti“ (reliability). Termínu „statistická významnost“ se mimo jiné užívá při uplatnění tzv. „průřezové“ (transversivní) statistiky, jejíž zjištění mohou být aplikovaná bez výhrad. Tato statistika je často založená na tzv. metodách nejmenších čtverců, které umožňují srovnání naměřených dat s matematickými funkcemi. Tato metoda je užitečná především tehdy, předpokládá-li se speciální (např. sinusový, či kosinusový) tvar zkoumaného rytmu. Biologické rytmy se však obvykle v závislosti na zkoumaných osobách, sledovaných proměnných či různých podmínkách ve svých tvarech liší. Díky tomu je použitelnost této metody značně omezená. Kritiky jsou také vznášeny na princip rozložení, který se u čtvercových metod neděje náhodně, nýbrž systematicky. Přitom náhodně rozložené odchylky jsou mnohem nutnějším předpokladem použitelnosti statistických operací. Proto jsou preferovány statistické metody, které nevytvářejí předpoklady ohledně konečných tvarů rytmů (či dalších finálních rytmických parametrů). V tomto směru se nabízí možnost aplikování analytických metod, jež jsou schopny srovnání interindividuálních rozdílů rytmických charakteristik, získaných za různých experimentálních podmínek. Přednost se primárně dává neparametrickým statistickým metodám, které svou povahou neumožňují ověření hypotéz o zřetelných distribucích hodnot. Při odhadu nejednoznačných tvarů a parametrů rytmů, sledovaných v jednom časovém úseku (sérii), se rovněž hojně používá, různými způsoby modifikované analýzy periodogramu. Tato se kromě jiného totiž osvědčuje při postulování spolehlivosti závěrů, které se týkají imitace předpokládané, náhodně (přirozeně) kolísající rytmicity. Základní princip analýzy periodogramu spočívá v „položení“ po sobě následujících, avšak libovolně definovaných period stejného trvání nebo v dlouhodobém shromažďování konstantních (zprůměrovaných) období.

Pro zajištění validity je nutným předpokladem použití stejných metod (parametrických, neparametrických; např. standardní odchylky), které měří míru variability rytmů, jak na dílčí průměry (příkladně získané z dvanácti hodinových úseků), tak na celkové průměry rytmů. Pro jednotnost statistického zpracování se v praxi ukazuje vhodné rozdělit vybraná období nezávisle na jejich délce, do stejně dlouhých kategorií (např. trvajících 24 hodin) a distribuovat naměřené hodnoty do těchto kategorií podle jejich časového seřazení. Posléze je ze všech hodnot příslušné kategorie vypočítán průměr a standardní odchylka. Jen ve zvláštních případech (např. pro orientační zjišťování délky celkové průměrné periody všech naměřených charakteristik) bývají kategorie systematicky rozlišeny; i zde je ovšem analýza rytmů přípustná. Díky srovnávání „identických“ kategorií, či spolehlivosti rytmů s jejich odpovídajícími, statisticky zpracovanými úseky, obsahujícími řadu náhodných čísel, může být ustanovena pravděpodob-

nost, která signalizuje možný vznik rytmů v nahodile rozloženém období. Přesněji řečeno, probabilita náhodného zrodu rytmicity nezáleží jen na vypočítané spolehlivosti, ale také na počtu period, objevujících se během jednoho celkového úseku měření, množství kategorií jedné periody a na kvantu měření v jednotlivých periodách, případně kategoriích. V rámci usnadnění srovnání bývá reliabilita (spolehlivost) rytmů normalizována k parametrům, které jsou pro vyšetřování rytmů typické; např. pro celkový úsek měření (tzv. časovou sérii) cirkadiánní rytmicity se většinou používá 25 po sobě následujících period s intervaly zkoumání jedné hodiny a 24 kategorií jedné periody. Díky „normalizované spolehlivosti“ s takto navolenými hodnotami vzniká pro všechny faktory, kterými jsou skutečná rytmicity, náhodné vlivy či jiné neperiodické variace, stejná 20 % pravděpodobnost, podle které vybrané časové úseky probíhají. „Normalizovaná spolehlivost“ také z 24 % (na hladině významnosti  $\beta$ ,  $p = 0.05$ ) značí pravděpodobnost vhodného modelování rytmicity za podmínek náhodného kolísání jejího průběhu a z 30 % (na hladině významnosti  $\alpha$ ,  $p = 0.0001$ ) určuje nahodilý ráz rytmicity. Posledně jmenovaná procentuální hodnota je běžně brána z výpočtů „hraniční reliability“, která je schopna v optimální míře rozlišovat mezi skutečnou rytmicitou a náhodnými průběhy. Pro vytvoření kompletní analýzy period se musí statistické operace, jež slouží k získání typických průměrných hodnot periody, aplikovat (opakovat) na všechny rozmanité druhy period.

Konečná analýza posléze vyplývá následkem označení „normalizované reliability“ za funkci období. Tato procedura může být použita jak na charakteristiky, jejichž hodnoty nabývají stabilních rozdílností (např. tělesná teplota), tak na proměnné, ve kterých se mohou zaznamenávat pouze jednotlivé hodnoty (např. subjektivní pocit ospalosti: aktivita = 0; ospalost = 1). „Normalizovaná reliability“ rytmů se nejednou srovnává s výsledky „konvenční analýzy“.

Tento analytický nástroj řeší problémy v lineárních systémech a analyzuje periodická data pomocí metody rychlé Fourierovy transformace (FFT); např. amplituda teplotního rytmu je sestrojena jako funkce období. FFT podporuje také inverzní transformace, při kterých inverze transformovaných dat vrací původní data. Stává se, že období maximálních hodnot (vrcholů) sledovaných charakteristik v obou analýzách mnohokrát splývají. Nicméně, jediné výpočty reliability umožňují rozhodnutí o tom, zda doba, ve které se maxima objevují, odpovídá skutečné rytmicitě. Dále jako jediné dovolují srovnání rytmů různých proměnných s ohledem na jejich kvalitativní stránky.

Častokrát se objevuje nevyhnutelná otázka o správnosti odhadu periody. Ta se totiž nejednou plete s proměnlivostí fází. Zatímco je ovšem posouzení periody založeno na délce úseku měření (časové série), variabilita fází na ni nezávisí. Rozmanitost fází, která bývá navíc podstatně menší, je významná jediné ve spojitosti s blíže specifikovaným obdobím a může být vypočítána buďto z intervalů mezi následnými, navzájem shodnými fázemi (např. počáteční, nejvyšší fáze apod.), nebo od odchylek těchto fází, vypočítaných pomocí regresní přímký. Proměnlivost fází může být užitečným údajem při popisování vlastností rytmů. Přesto je velmi důležité vědět, že tato proměnlivost neumožňuje přesná statistická sdělení o periodách (např. o odchylce odhadovaného období z experimentálně

stanovené délky periody, např. 24 hodin). V případě užití Fourierovy analýzy musí být hodnoty period definovány (vnímány) jako harmonické části celkového časového úseku. Za tímto účelem se používá metoda, skládající se ze dvou dílčích kroků. Při prvním kroku je z velkého množství variant period určována největší amplituda. V rámci kroku druhého je souhrnný časový úsek stanoven násobkem této periody. Důsledkem tohoto pojetí je vytvoření základních vztahů důležitých stěžejních bodů různých období (period). Pakliže se ovšem během sumárního úseku objevuje více než jedna (významná) perioda, může toto pojetí vést k názoru, že tyto periody jsou mezi sebou v primárním vztahu. Je tedy patrné, že tento výklad není zcela vysvětlujícím a potřebuje tudíž další „pomocná“ šetření aktuálních vztahů mezi periodami.

Zmiňované analýzy dovolují možnost popisu (interpretaci) časových úseků, které jsou měřeny kvantitativně. Připouští dokonce statistická sdělení, zda rytmus s předurčenou periodou je, či není zahrnut v celkovém časovém úseku. Zamítají naopak statistická tvrzení, jež se týkají ustanovení mechanismů zjevných (prokázaných) rytmicit, které mohou být řízeny buď oscilačními procesy nebo stochastickými (náhodnými) ději. Mezi těmito procesy jsou totiž paradoxně významné podobnosti, ačkoliv jsou založeny na zcela odlišných mechanismech. Například distribuce následných period (lépe řečeno ekvivalentních intervalů) časového úseku, znázorněných v histogramu period (sloupkovém diagramu intervalů), stejně jako všechny druhy analýz period, mohou vést díky těmto procesům ke shodným výsledkům. Pomocí párové korelace mezi po sobě jdoucími událostmi časového úseku však přece jen lze diskriminaci obou procesů provést. Následnými událostmi se vesměs rozumí postupná období, která jsou definovaná nějakou libovolně vybranou fází. V rámci stochastických dějů jsou postupná období na sobě vzájemně nezávislá. To znamená, že párová korelace mezi určitou periodou a periodou po ní následující (srovnávány však musí být v tomto případě pouze tyto dvě periody) je nulová, stejně jako i korelace mezi touto periodou a některou pozdější periodou. Na straně druhé dosahuje při působení oscilačních procesů párová korelace následných period obvykle záporných hodnot. Pokud nastane případ, že je tato korelace nulová či pozitivní, znamená to, že mezi oběma periodami je korelace záporná. V oscilačních procesech obecně platí, že se hodnoty (negativní, pozitivní) párové korelace dílčích období odvíjejí od vzájemné vzdálenosti period. Zmíněné rozlišení mezi oscilačními a stochastickými ději však není za přísných kritérií směrodatné. Záporná párová korelace totiž s přesvědčivostí vypovídá jediné o větší variabilitě zjevného rytmu, jehož průběh může být znázorněn samostatně, oproti rytmu základnímu. Touto prvotní rytmicitou mohou být ovšem vnější synchronizátory (časovače), které mají za normálních podmínek na průběh pozorovatelných rytmů hlavní vliv, což zapříčiňuje negativní korelaci těchto zjevných rytmů s oscilátory endogenního původu. Bazální rytmicita je považována za významný bod pro determinaci oscilačních procesů. Přesto nemůže být nikdy zcela vyvrácen názor, že je základní kontrolní rytmus založen na náhodných procesech, které mohou mít menší množství variability než rytmy zjevné. Touto úvahou se ovšem ohnisko bádání přesouvá jiným směrem, do oblastí, ve kterých se statistická rozlišování stávají více otáz-

kou definic než principů. Z praktických i teoretických (terminologických) důvodů je nicméně podstatné, že podle konvenčního názvosloví je pro primární rytmus, jenž vykazuje nejmenší možnou proměnlivost a který řídí sledovatelné rytmy, zakotveno označení oscilátor.

## LITERATURA

- Aschoff, J., Wever, R. (1962). Spontanperiodik des Menschen bei Ausschluß aller Zeitgeber. *Naturwiss.*, 49, s. 337–342.
- Aschoff, J. (1998). Human perception of short and long time intervals: its correlation with body temperature and the duration of wake time. *Journal of Biological Rhythms*, 13, 5, s. 437–443.
- Berger, J. (1995). Biorytmy. Praha – Litomyšl, Paseka.
- Birbaumer, N., Schmidt, R. F. (1991). *Biologische Psychologie*, 2. Auf., Berlin, Heidelberg, Springer.
- Brown, F. M., Graeber, R. C. (eds.) (1982). *Rhythmic aspects of behavior*. New Jersey, London, Lawrence Erlbaum Associates.
- Brožek, J. (1964). Psychorhythmics: a special review. *Psychophysiology*, 1, 2, s. 127–141.
- Colquhoun, W. P. (ed.) (1971). *Biological rhythms and human performance*, London+New York, Acad. Press.
- Folkard, S. (1975). Diurnal variation in logical reasoning. *Br. J. Psychol.*, 66, 1, s. 1–8.
- Folkard, S. (1990). Circadian performance rhythms: some practical and theoretical implications. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, 327, s. 543–553.
- Frøberg, J. E. (1977). Twenty-Four-Hour Patterns in Human Performance, Subjective and Physiological Variables and Differences Between Morning and Evening Active Subjects. *Biological Psychology*, 5, s. 119–134.
- Geréb, G. (1974). Výzkum vlivu monotónní činnosti v průmyslu umělých hmot. *Psychologie v ekonomické praxi*, VIII., 1, s. 18–23.
- Gilbertová, J., Beneš, V. (1970). Možnosti stanovení kritérií pro hodnocení monotónní práce. *Studia psychologica*, XII., 1, s. 60–68.
- Gilbertová, J., Plamínek, J. (1979). Hodnocení monotónní práce. *Psychologie v ekonom. praxi*, XIV., 3–4, s. 199–208.
- Gross, D. W., Gotman, J. (1999). Correlation of high-frequency oscillations with the sleep-wake cycle and cognitive activity in humans. *Neuroscience Article Details*, 94, 4, s. 1005–1018.
- Kess, E. (1972). Aktivitätszeit, Zeitschätzung, subjektive Vigilanz und akustische Reaktionszeit bei frei laufender Circadianrhythmik unter Zeitgeberausschluß. Marburg, Philipps-Universität Marburg.
- Kleitman, N. (1963). *Sleep and wakefulness*. Chicago, Univ. of Chicago press.
- Loudon, A. S. I., Semikhodskii, A. G., Crosthwaite, S. K. (2000). A brief history of circadian time. *TIG*, 16, 11, s. 477–481.
- Monk, T. (1991). *Sleep, Sleepines and Performance*. Pittsburg, John Wiley & Sons Ltd.
- Monk, T., Buysse, D., Reynolds III., F., Kupfer, D., Houck, P. (1996). Subjective Alertness Rhythms in Elderly People. *Journal of Biological Rhythms*, 11, 3, s. 268–276.
- Moore, R. Y., Eichler, V. B. (1972). Loss of a circadian adrenal corticosterone rhythm following suprachiasmatic lesions in the rat. *Brain Research*, 42, s. 201–206.
- Pinel, J. P. J. (1997). *Biopsychologie. Eine Einführung*. Heidelberg, Berlin, Spektrum.
- Plamínek, J. (1969). Podíl technologie, pracovního prostředí a biologických vlivů na spotřebu času. *Psychologie v ekonom. praxi*, IV., 4, s. 181–188.
- Poche, V. (1993). Režim práce a odpočinku zaměstnanců v dopravě a kultura cestování. In: *Člověk a železniční doprava*. Loučeň, VŠDS Žilina, s. 149 – 153.
- Poirel, Ch. (1995). Evidence for two asynchronous circadian systems of emotionality: Theoretical

- aspects in Comparative Psychology. *Journal of General Psychology*, 122, 4, s. 401–425.
- Pöppel, E., Aschoff, J. C., Giedke, H. (1970). Tagesperiodische Veränderungen der Reaktionszeit bei Wahlreaktionen. *Zeitschrift für experimentelle und angewandte Psychologie*, XVII., 4, s. 537–552.
- Redfern, P. H., Campbell, I. C., Davies, J. A., Martin, K. F. (eds.) (1985). *Circadian Rhythms in the Central Nervous System*. London, International Union of Pharmacology.
- Schmidt, R. F. (1998). *Neuro-und Sinnesphysiologie*. Berlin, Heidelberg, Springer.
- Sirois, W. G., Moore-Ede, M. (1996). Review article: Preventing Fatigue and Human Error in Around-the-Clock Operations. *SSA Journal*, 10, s. 31–38.
- Sirois, W. G. (1996). *Achieving Shiftwork Excellence: Maximizing Health, Safety and Operating Efficiency in Round-the-Clock Operations*. Cambridge, Circadian Technologies.
- Wever, R. A. (1979). *The Circadian System of Man*. New York, Heidelberg, Berlin, Springer-Verlag.
- Wever, R. A. (1991). Interaction Between Human Circadian and (About 90 min) Sleep Rhythms: Problems in the Simulation and the Analysis. *Rhythms in Physiological Systems*, 55, s. 235–253.
- Wynn, T., Arendt, J. (1988). Effect of melatonin on the human electrocardiogram and simple reaction time responses. *Journal of Pineal Research*, 5, s. 427–435.
- Young, M. W. (2000). The Tick-Tock of the Biological Clock. *Scientific American*, 282, 3, s. 64–72.
- Zucker, I., Stephan, F. K. (1972). Paper of NAS, 69, s. 1583–1586.

## SOUHRN

Cílem článku je seznámení se specifickou statistickou analýzou biorytmicity, s možnostmi a hranicemi aplikace parametrických a neparametrických statistických metod v této oblasti. V příspěvku jsou zmíněny statistické postupy, jejichž použití vede k pravděpodobně úspěšnějšímu rozlišení mezi (pravými) endogenními biologickými rytmy a náhodnými vlivy.

## SUMMARY

### Statistical criterions of biorhythmic research

Rhythmicity is a ubiquitous biological phenomenon. Like homeostasis, it is one of the basic manifestations of living systems (rhythmic variations occur in the biological activity of all species from simple organism to man). A variety of analytical techniques have been applied to biological and physiological (psychological) data suspected of having inherent periodicity. Choice among methods, and pronency for one or another technique, depends on the relative values given to the often competitive goals of such analyses. The primary and necessary goal of time-series analysis is to demonstrate the presence of rhythmicity (as opposed to its absence), for which any of described several methods suffice.

**Key words:** rhythm, rhythmicity, period, phase, statistical analysis