

613.693:612.886.1:616-008:159.937.3

SOMATOSENZORICKÉ ILUZE ZA LETU

Pplk. MUDr. Miloš SÁZEL, CSc.
Ústav leteckého zdravotnictví, Praha
(ředitel: plk. doc. MUDr. Jiří Šulc, CSc.)

"Z problémů, které se vynořily s vynálezem letounu a jichž úspěšné řešení bylo podmínkou dalšího vývoje letectví, byl - a do jisté míry ještě stále zůstává - problém orientace letce v prostoru jedním z nejtěžších řešitelných, neboť fyziologické možnosti orientace ukázaly se za určitých situací krajně nedostatečné a bylo nutno najít přístroje, které nahradily nedostatečné smyslové funkce pilota. Tento fyziologický nedostatek smyslových funkcí člověka má dvě příčiny. Člověk prodělal celý svůj fylogenetický vývoj na zemi; pohyboval se ve dvou rozměrech a rychlostí, která nevykazovala velkých výkyvů v běžném denním životě. Orgány, sloužící jeho orientaci a udržení jeho tělesné rovnováhy, vyvinuly se a nabyly konečného, dnešního anatomického tvaru a funkcionálního stupně souhlasně s touto situací; jsou jí účelně přizpůsobeny a za normálních okolností vyhovují. Vyhovují i dnes, pokud se příliš nevzdalujeme od podmínek, za kterých se dál jejich vývoj."

Jde o citaci slov zakladatele našeho leteckého lékařství (Čapek, 1948). Jejich platnost je stále trvalá. Zavádění vojenských letadel s vysokou manévrovostí problémy letce ve vzduchu dále prohlubuje.

Vrcholem narušení orientace letce ve vzduchu je prostorová dezorientace. Rozumí se jí: "Stav charakterizovaný chybným orientačním vnímáním, tj. chybným pocitem vlastní pozice a pohybu ve vztahu k povrchu země." (Gillingham, 1990).

Prostorová dezorientace a letové iluze

Prostorové dezorientaci je ve světě věnována značná pozornost, neboť podíl na vzniku leteckých nehod se uvádí mezi 5-24 % (Harding, Mills, 1983; Gillingham, Wolfe, 1985; Gjurdžian, 1986; Benson, 1988; Lyons aj., 1994). U nás se hodnotil následek prostorové dezorientace v 5,8 % případů leteckých nehod (Slavík cit. Šulc, Kolouch, 1984). Podíl na příčinách leteckých katastrof se považuje obvykle za vyšší (2,5-34 %). Přitom se ještě počítá s určitým částečným podílem na vzniku řady nehod. Jako nebezpečné pro vznik ztráty orientace jsou hodnoceny lety v malých výškách, s manévry blízko země, nad uniformním a neznámým terénem, při vysokých přetíženích a pohledech pilota na cíl. Poslední podrobné údaje USAF (1986-1991) ukazují podíl prostorové dezorientace na leteckých nehodách asi ve 24 % případů (ze 172 leteckých nehod) (Lyons aj., 1994).

Prostorové dezorientaci podléhají všichni piloti, neboť její vznik je dán vztahem fylogenetického vývoje člověka a jeho vstupem do vzdušného prostředí. Výsledkem je rozpor mezi požadavky na orientaci a vrozenou schopností se orientovat (Gillingham, Wolfe, 1985). V průzkumech popíralo výskyt prostorové dezorientace pouze 2 % pilotů, 68 % uvádělo výskyt během létání více než desetkrát, z toho 61 % ji hodnotilo alespoň jednou jako velmi závažnou (Benson, 1988). Jinde je potvrzován výskyt u 67 % letců (Lapajev, Vorob'jev, 1985), či dokonce u 92 % letců (Kamenš-

čikov, Ovečkin, 1989). Nepotvrdily se výrazné vztahy výskytu s počtem nalétaných hodin, věkem a zkušeností pilotů. O rozložení výskytu dezorientace mezi druhy letectva nejsou jednoznačné závěry. Obecná shoda panuje pouze v tom, že za ztížených podmínek bez viditelnosti země (noční lety, lety v mracích) jsou možnosti objevení se prostorové dezorientace vyšší.

Prostorová dezorientace nastává často po letové iluzi nebo nezvyklém pocitu (Pavlik, 1978; Šulc, 1980; Šulc 1990). Průběh dezorientace může vést k situaci, kdy je pilot přesvědčen o správnosti vjemu a řídí letoun podle něho (tzv. typ I), nebo si pilot uvědomuje určitý konflikt ve vnímání (typ II) a může i nemusí ho správně vyřešit (Benson, 1988). Existují však případy začínající jako typ II, ovšem pilot je nemůže řešit vzhledem k objektivně působícím podkorovým fyziologickým mechanismům - typ III (Gillingham, Wolfe, 1985). Uváděné dělení nelze užít jen na malou část stavů, kdy je dezorientace spíše následkem centrálních poruch než poruch vnímání.

Jaké je zastoupení jednotlivých druhů iluzí? Ankety ukázaly, že zřejmě převažují klamné pocity vestibulárního původu. Jsou uváděna vysoká čísla - 70 % (Giosa, 1980), 96-97 % (Lapajev, Vorob'jev, 1985)! Iluze není obvykle delší než 1 minutu. Panuje shoda, že nejčastější je iluze příčného sklonu. Další iluze jsou pravděpodobně méně časté. Patří k nim známé somato(okulo)gyrální a somato(okulo)gravické iluze podrobně objasněné na podkladě mechanismů polokruhovitých kanálků a otolitů s těsným propojením na zrakový systém (Guedry, 1974).

Hodnocení příčin prostorové dezorientace není ve světě jednotné. Detailní klasifikace v USAF je od roku 1990 (Lyons aj., 1994). U 13 leteckých nehod (48 leteckých nehod r. 1990-1991) s prostorovou dezorientací se uvádí následující podíly složky senzorio/percepční: chybný vjem polohy 5krát, vestibulární iluze 5krát, zraková iluze 2krát, kinestetická iluze 1krát, ztráta sluchového podnětu 1krát, chybný odhad vzdálenosti 1krát; podíly stavu situační bdělosti: selektivní nepozornost 4krát, senziorické zaujetí 10krát, pocit odtržení 5krát.

Řada iluzí má spojitost s více senziorickými systémy. Patří sem i tzv. somatosenziorické iluze. Pod tento pojem zahrnují ty typy iluzí, na kterých se podílí významnou měrou somestetický analyzátor, který však funkčně neoddelitelně spolupracuje s vestibulárním analyzátozem.

Fyziologické podklady somatosenziorických iluzí

Somestetický analyzátor

Somestetický analyzátor přijímá, analyzuje a zpracovává informace vyvolané drážděním receptorů kůže, podkoží, svalů, fascií, šlach a kloubů (Trojan aj., 1988). Jde o soubor velmi rozmanitých dílčích analyzátorů, které však mají některé společné rysy. Mají do značné

míry společný průběh drah, umístění korového pole, a často fungují současně. Proto se považují za komplexní celek a označují se společným skupinovým názvem.

Z funkčního hlediska je možné rozdělení na systém povrchní kožní citlivosti a systém hlubokého cití. První systém, označovaný též jako exteroceptivní kožní analyzátor, se podílí na percepci dotyku, tlaku, tepla, chladu a tzv. povrchové bolesti. Druhý systém, označovaný též jako komplexní propioceptivní analyzátor, má komponentu svalovou, šlachovou a kloubní. Zprostředkuje také vnímání tzv. hluboké bolesti. Informuje nervový systém o momentálním stavu pohybového aparátu, tj. o svalovém napětí, o poloze jednotlivých tělních segmentů (statestie), o rychlosti, směru a rozsahu jejich pohybu v prostoru (kinestezie).

Ve vzestupných drahách, thalamu i na korové úrovni je vyjádřen princip somatotopické projekce receptorů. Oblasti s velkým biologickým významem zaujímají větší plochy, u člověka je to výrazná projekce ruky a mluvidel. Známa je somestetická oblast S I v postcentrální oblasti s topografickým uspořádáním zobrazeným Penfieldem. I oblast S II v hloubce Sylviova žlábků má stejný princip uspořádání. Oblast S III je přimknuta k oblasti S I na mediální ploše hemisféry. Vnitřní organizace somestetické oblasti vykazuje specifické korové jednotky tvaru sloupců či lamel, pro něž je charakteristické společné receptivní pole a odpověď na stejný podnět. Složitá strukturně-funkční diferenciace korové somestetické oblasti je předpokladem jejího rozhodujícího podílu na percepci základních druhů somatické citlivosti. Pro jemnou percepci, zvláště analýzu a syntézu, je nezbytná dokonalá součinnost postcentrální a parietální kůry mozku.

Komplexní kožní analyzátor

Tento analyzátor zahrnuje řadu druhů mechanoreceptorů, které zachycují a přeměňují ve vzruchovou aktivitu energii mechanických podnětů působících na povrch kůže a sliznic. Uvažuje se obecně o minimální energii dráždivosti asi $3 \cdot 10^{-9}$ J (Keidel, 1973). Hustota rozložení receptorů kolísá od 5 do 200 na cm^2 . Citlivost na stisk je např. na palcích nohou 0,5 mm po dobu 100 ms. Zatím je prozkoumán spíše efekt vibrací na receptory než vliv na vnímání pohybu apod. (Gundry, 1978).

Morfologicky nejsložitější Vater-Paciniho tělíska hlubších vrstev koria patří k receptorům s velice rychlou adaptací, nedostatkem směrové citlivosti, krátkým cyklem zotavení a nepatrnou únavou. To jim dovoluje reagovat i na vibrace. Nejcitlivěji ve frekvenčním rozsahu 150-400 Hz, podněty o frekvenci nižší než 40-60 Hz jsou i při velkých intenzitách málo účinné.

Golgi-Mazzoniho tělíska se vyskytují nejen v hlubších vrstvách koria, ale i v pojivových tkáních jiných orgánů. Jejich fyziologické vlastnosti jsou obdobné výše uvedeným. Podobná jsou i tělíska Krauseho.

Merkelovy terče jsou uloženy ve shlukách v nejpovrchnějších vrstvách epidermis jako hmatové, případně

vlasové destičky. Patří k poměrně pomalu se adaptujícím receptorům. Reagují na tlak, ale také na trvání podnětu a v určitém rozsahu i rychlost nástupu podnětu, mají naznačenu i směrovou citlivost.

Ruffiniho tělíska jsou situována v hlubších vrstvách koria i v kloubech. Pomalu se adaptují, mají vysoce vyvinutou směrovou citlivost při natažení kůže. Částečně zprostředkují vnímání rychlosti podnětu.

V koriu, epidermis i podkoží se vyskytují kromě mechanoreceptorů i četná volná nemyelinizovaná nervová zakončení. Některá slouží termoreceptci, percepce bolesti, ale jsou mezi nimi vlákna odpovídající specificky na dotykové podněty o malé intenzitě. Více se vyskytují ve vlasaté kůži. Odpovídají s poměrně dlouhou latencí na působení mechanického podnětu a vykazují vzruchovou aktivitu i poté, když podnět přestal působit. Reagují také na velmi pomalu se pohybující podnět po povrchu kůže. Jsou směrově citlivá a jejich únavnost je velká. Nelze u nich, na rozdíl od předchozích typů, přesně vymezit jejich receptivní pole.

Podle charakteru odpovědi mechanoreceptoru na působení konstantního taktilního podnětu rozlišujeme dva typy mechanoreceptorů. První z nich, rychle se adaptující, odpovídají krátkou sérií vzruchů na začátku jeho působení a pak, když podnět působí dále, přestávají vzruchovou aktivitu generovat. Naproti tomu druhý typ, pomalu se adaptující receptory, vytvářejí vzruchy o poměrně konstantní frekvenci po celou dobu působení podnětu. Počítek dotyku nebo tlaku vznikne jenom tehdy, když podráždění receptorů dosáhne prahu excitace. Hodnota prahu závisí na vzrušivosti receptorů a kromě toho ovlivňuje tuto hodnotu řada dalších faktorů. Jsou to především lokální podmínky v místě stimulace (kožní teplota, tloušťka kůže, množství potu apod.), ale i individuální vlastnosti subjektu (pohlaví, věk, momentální emoční stav atd.). Vyšší etáže centrálního nervového systému mají zásadní význam pro diskriminaci dvou bodů (topognosie) a určování prostorového útvaru (stereognosie).

Komplexní propioceptivní analyzátor

Tento analyzátor má komponentu svalovou, šlachovou a kloubní. První dvě složky jsou shrnuty v pojmu hluboký smysl svalový, který je východiskem reflexního mechanismu zajišťující kontrolu svalového tahu a který je součástí zpětnovazebního okruhu realizujícího korekce svalového napětí. Citlivost vnímání změn polohy částí těla se značně liší (Weit, Lucci, 1975). Jako nejcitlivější je uváděn pohyb v ramenním kloubu s prahem vjemu při změně o $0,2-0,4^\circ$ při pohybu rychlostí $0,5-1^\circ \cdot s^{-1}$. Zápěstí, palec ruky, loket, koleno a hlezno mají citlivost v tomto pořadí od $1,15^\circ$ do $1,3^\circ$.

Svalová vřeténka jsou tvořena intrafuzálními vlákny v pouzdru z pojivové tkáně. Aktivují se jen při protažení svalu. Obvyklá je jejich trojitá inervace - senzoričká, motorická a autonomní. Substrátem propioceptivního (napínacího) reflexu jsou senzoričká vlákna

vstupující zadními kořeny do míchy a spojená s motorickými buňkami předních rohů s eferentními vlákny k extrafuzálním svalovým vláknům. Svalová vřeténka jako receptory reagují nejen na změnu délky svalových vláken, ale i na rychlost této změny. Svalový tonus je zajištěn velmi nízkým prahem dráždivosti svalových vřetének. Aferentace z nich spolu s účastí gama-systému umožňuje stálý klidový tonus.

Golgiho šlachová tělíska jsou umístěna ve šlachách a svalových úponech sériově vůči svalovým vláknům. Reagují na napnutí šlachy. Aferentace podává informaci o velikosti kontrakce extrafuzálních vláken a má chránit sval před poškozením nadměrnou kontrakcí. Cestou míšních interneuronů se uskutečňuje inhibice příslušných alfa-motoneuronů a současně jsou aktivovány motoneurony antagonistů.

V kloubech lze nalézt čtyři typy receptorů. Typ I. (podobný Ruffiniho tělískům) s pomalou adaptací signalizuje rychlost pohybu v kloubu a jeho směr. II. typ (modifikovaná Vater-Paciniho tělíska) rychle se adaptující zaznamenává rychlý pohyb bez směrové citlivosti. III. typem jsou receptory (podobné Golgiho šlachovým tělískům), které se pomalu adaptují, funkce není objasněna. IV. typem jsou nervová větvení nemyelinizovaných vláken, pravděpodobně nociceptory. Zdá se, že kloubní receptory nemají významnou roli při statestezii a kinestezii, uplatňují se jen při extrémních polohách, případně mění úroveň dráždivosti centrálních struktur ovlivňujících svalové receptory.

Informace z analyzátorů jsou předávány přes zadní kořeny do spinální míchy, kde existují tyto možnosti zapojení:

Terminální synapse na motoneuronech předních rohů k realizaci napínacího monosynaptického reflexu; Synapse na interneuronech a přes ně inhibice alfa-motoneuronů antagonistů; Synapse s interneurony aktivizujícími motoneurony synergistů; Po přepojení průchod zadními provazci míšními, spinothalamickým a spino-cerebelárním traktem do vyšších etáží CNS, mozečku, podkorových oblastí kůry mozkové, kde dochází k analýze informací, k jejich komparaci s informacemi z jiných smyslových orgánů a vypracovává se zde výstupní informace směřující k periferním orgánům, podle níž reaguje organismus vědomě i mimovolně na změněné podmínky zevního prostředí, které byly příčinou podráždění recepčních mechanismů.

Na vjemu pohybu se však také pravděpodobně podílejí i některé interoreceptory. Již Čapek (1948) uvádí z praktické zkušenosti význam pohyblivosti orgánů dutiny břišní, zejména jater, které nazývá břišním otolitem. Uplatňují se především receptory v mezenteriu a seroze (Leek, 1972). Dnes se potvrzuje význam ledvin a krevního sloupce ve velkých cévách.

Vestibulární analyzátor

Vestibulární část ušního labyrintu je orgánem, jehož prostřednictvím je vnímána odchylka postavení hlavy

vzhledem ke gravitaci, změna rychlosti a směru pohybu hlavy a celého organismu v prostoru jak při pohybu přímočaře, tak kruhově (Trojan aj., 1988). Vrchy z labyrintu mají zásadní význam pro reflexní úpravu tonu všech svalů, nejvíce antigravitačních a okohybných. Reflexní pohyby řízené z vestibulárních čidel je možno jen do určité míry potlačit vůlí.

Statolitový aparát utrikulu a sakulu je považován převážně za receptor gravitace a lineárního zrychlení (Syka, Voldřich, Vrabec, 1981). Umístění utrikulární makuly zhruba horizontálně, sakulární makuly přibližně vertikálně spolu se směrovou polarizací vláskových buněk zajišťuje registraci změn ve všech směrech pohybem statokonií. Receptory statolitových orgánů se uplatňují při statických reflexech, tj. při udržování vzpřímeného těla pomocí vzpřimovacích a tonických labyrintových reflexů. U očí provokují zvrtné stáčení, což je opačný pohyb oka než směr pohybu hlavy. Subjektivně nastává vjem lineárního zrychlení, např. při pohybu v rovině utrikulární makuly již od 0,005 G, registrace odklonu od vertikály je nejcitlivější při vzpřímené hlavě s chybou 0,5°.

Receptory ampulárních krist polokruhovitých kanálků reagují na úhlové zrychlení pohybu hlavy. Přesná funkce krist není dosud objasněna, i když výsledný efekt rotačního dráždění odpovídá klasickému záklopkovému modelu Steinhausena. Soustava tří párů kanálků v rovinách navzájem kolmých umožňuje určit jakýkoli směr rotace. Spojitost směru pohybu endolymfy a dráždění receptorů není jednotná (Ewaldovy zákony). Při dostatečně účinném dráždění vznikají kompenzační statokinetické reflexy. Nystagmus slouží k základní funkci vestibulárního aparátu, tj. udržení zrakového obrazu na sítnici během pohybu hlavy (práh asi 5°·s⁻¹). Stejný směr jako pomalá složka nystagmu mají tonické úchyly trupu a končetin, příp. až ataxie s pádem. Subjektivní pocit otáčení (práh kolem 2°·s⁻¹) může být spojen s pocitem závratě (i postrotační), případně je doprovázen podrážděním vegetativního systému, což při déle trvajícím podnětu ústí v kinetózu.

Zakončení vestibulárního nervu vytvářejí synapse vláskových buněk. Tato vlákna jsou dendrity nervových buněk uložených v ganglion vestibuli Scarpa. Jejich neurity vedou informace do čtyř vestibulárních jader v mozkovém kmeni i do mozečku. Jejich vzájemná spojení zřejmě zasahují do ladění vestibulárních reflexů. Vestibulární kortikální projekce je situována do gyrus postcentralis při dolním okraji intraparietální rýhy a leží v oblasti 2. Brodmannovy arey. Thalamická aferentace sem míří z dorzální části nucleus ventralis posterior inferior. Další projekční oblast je v area 3a. Vestibulární korová aferentace se druzí ke korové projekci propioceptivní. Slouží vědomé orientaci v prostoru a regulaci motoriky končetin. Vestibulo-okulární regulace zůstávají na nižší úrovni, kde roli hrají, kromě vestibulárních jader a mozečku, také fasciculus longitudinalis medialis a pontinní retikulární formace s centrem pro rychlé oční pohyby.

Vzájemné propioceptivní a další vlivy na orientaci

Percepce polohy a pohybu těla a jeho částí je obecně závislá na topografické organizaci neurálních map somatosenzoriky v thalamu a mozkové kůře. Neurofyziologické studie ukazují, že tyto mapy jsou potenciálně modifikovatelné ovlivňováním jejich senzoric- kých vstupů. Podrobněji byly prozkoumány zejména vztahy mezi svalovou aferentací a vlivem na vjem pozice končetin (Lackner, Levine, 1979; Lackner, 1988). Vibrace svalů vyvolávaly zdánlivé pocity pohybu těla, i dokonce až fyzicky nemožných pozic končetin. K výrazným poruchám vzájemných vztahů senzoric- kých vstupů dochází rovněž při změně tíži oběma směry (Lackner, Graybiel, 1981). Např. při 2 G poci- tuje subjekt, že se pohybuje rychle směrem dolů i že se podložka hýbe nahoru proti jeho nohám. Při pohybu ve zvýšené tíži vyšší aktivita antigravitačních svalů budí pocit většího ohnutí v kolenou, což je interpre- továno jako zvedání paluby proti nohám. Tento stav nenastává při dvojnásobném zvýšení váhy člověka. Řada pozorování naznačuje, že je více komplexních senzoric- kých interakcí, které jsou zahrnuty ve vymezení orientačního smyslu, než by to odpovídalo jednotlivým statickým mapováním somatosenzoriky. Nálezy ukazují na extrémní labilitu v prezentaci orientace a rozpozná- vání rozměrů a vztahů částí těla. Rozměry a model těla jsou sice zakódovány v aktivních vzorcích topografické somatosenzorické mapy v thalamu a kortexu, kde jsou délka končetin a kontury těla reprezentovány vzrucho- vým vzorem, ale schopnost měnit pocíťovanou délku částí těla při iluzorním pohybu jiné tělesné části indikují, že poziční smysl a tělesné schéma reprezentují spolupracující interakce mnohočetných aferentních a eferentních sfér, které mohou vést ke generaci mnohočetných reálných i iluzorních pozic a orientací. Reverzibilní změny v kortikálních mapách somatosen- zoriky svědčí pro určité časové intervalové percepční kalibrování (remapping), které se děje řádově v sekun- dách. Řada experimentů prokazuje podobné mechanis- my v okulomotorické kontrole.

V oblasti smyslových interakcí se zdůrazňuje úloha zraku, nejdůležitějšího smyslu v prostorové orientaci letců. Zdůrazňuje se různý podíl obou složek zraku s důrazem na význam periferního vidění (Gillingham, Wolfe, 1985; Straube, Brandt, 1987). Toto vidění, využívající vrozená neurální spojení a především podkorové struktury, musí být dostatečně potlačeno centrální složkou, výsledkem zkušenosti a výcviku, zejména v létání podle objektivních informací palub- ních přístrojů. To je nezbytné pro správný obraz polohy pilota a představu dynamiky situace mimo letoun, kterou by letec pozoroval za vidu. Přestože se pilotovi daří dominantním centrálním viděním umělých orien- tačních podnětů z přístrojů udržovat správnou orientaci, je za určitých okolností možný přechod k převaze fylogeneticky starších nervových systémů nad korovou složkou. Vestibulární nervová jádra, kam přicházejí nejen vestibulární, ale i ostatní propioceptivní a peri-

ferní zrakové informace, jsou pro to přímo "předurčena". Jsou jak primárními počátky drah pro reflexní orientační odpovědi, tak počáteční úrovní integrace vědomé průvodní percepce prostorové orientace. Při řešení dezorientací typu II a III jsou navíc piloti často v psychickém stresu, což degraduje komplexy kognitivních a motorických dovedností a může i dezintegrovat letecké návyky. V letecké praxi jsou známé jevy fascinace pozornosti, imobilizační reflex atd. Nověji se sem řadí i tzv. fenomén obří ruky (giant hand phenomenon - Gillingham, Wolfe, 1985; Lyons, Simpson, 1989). Pilot pociťuje na řídicí páce sílu, která mu brání vyrovnání náklonu letounu. Podstatou je střet primitivních orientačních reflexů (vestibulookulární, posturální), vyšších reflexů a volních motorických aktivit na společné dráze, přičemž vliv první složky převládne. I experimentálně se pomocí galvanické vestibulární stimulace dařilo vestibulospinálními reflexy podvědomě působit odchýlení řídicí páky (Sázel, 1993).

Samostatnou oblastí letových iluzí jsou iluze čistě vizuální. Nejčastěji jsou charakterizovány falešným vjemem pohybu stabilních objektů, nesprávnou interpretací rychlosti pohybujících se předmětů, chybným vnímáním jejich rozměrů a vzdálenosti od pozorovatele nebo neadekvátním hodnocením polohy viděného horizontu (Šulc, 1980). I zde je nejčastější pravděpodobně iluze náklonu. Vzniká falešnými vizuálními podněty, např. záměnou linie horizontu s linií šikmé oblačnosti nebo s linií světél v šikmém terénu. Řada iluzí vzniká při přiblížení a přistávání a je spojena s otázkami vzdušné perspektivy. Iluze délky a počátku dráhy závisí na jejím sklonu, šířce, typu okolního terénu, meteorologických podmínkách apod. Velmi známá je autokinetická iluze, vznikající především za letu v noci při fixaci pohledu na vzdálené světlo. To se zdánlivě začíná pohybovat. Spíše pro oblast simulační techniky je využíván efekt iluze vlastního pohybu při skutečném pohybu okolí (vection) (Sázel, 1985). Další iluze nelze řadit mezi jednoznačně vizuální, neboť mají návaznosti na další systémy, např. na vestibulární iluze okulo gravické a okulo gyrální.

Nejčastější somatosenzorické iluze

Většina autorů publikujících v oblasti leteckého lékařství nepoužívá názvu somatosenzorické iluze. Je tomu tak asi z řady důvodů: vzhledem k pravděpodobné převaze podílu vestibulární složky nad somestetickou; vzhledem k možnosti jednoduchým a didakticky přístupným postupem vysvětlit průběh i laikům-letcům; vzhledem k málo objasněným mechanismům somestetiky oproti relativně známým principům vestibulární psychofyziky. V poslední rozsáhlé učebnici leteckého lékařství jsou nadále označeny jako vestibulární, přestože v předchozí části nechýbí poměrně rozsáhlý popis nevestibulární propriocepce (Gillingham, Wolfe, 1985). V následujícím výčtu uvedu ty iluze, které považuji za somatosenzorické.

Somatogyrální iluze

Je vjem otáčení v opačném směru, který nastane po deceleraci z otáčivého pohybu. Jako příčina se uvádí moment hybnosti rotující endolymfy, který tlačí proti kupule. Po určité době rotace nastává vnitřním třením zástava pohybu endolymfy a tím i ukončení dráždění na kristě. Při deceleraci pokračuje setrvačností endolymfa v pohybu, což vyvolává tlak na kupulu opačným směrem než na počátku rotace a na kristě je vyvoláváno dráždění také směrově opačného charakteru. Klasicky je uváděno nebezpečí této iluze následovně. V podmínkách snížené viditelnosti, pokud se pilot dostane do vývrtky, pociťuje zpočátku velmi přesně podle úhlového zrychlení reálný pohyb. Postupně však tento vjem upadá až zanikne. Když poté pilot vyšlápnutím pedálu proti otáčení vývrtku zastaví, úhlová decelerace vyvolá pocit vývrtky na opačnou stranu. Respektování subjektivního pocitu znamená vyšlápnutí ve směru prvotní vývrtky a její pokračování.

Aby se pilot vyvaroval hazardní situace, musí se řídit údaji přístrojů. Odečítání z nich však může být komplikováno úhlovým zrychlením indukovaným vestibulookulárním reflexem, vyvolávajícím až nystagmus.

Na moderních vysokomanevrujících vojenských letadlech nastává tato iluze ve spirále. Pilot vykonává protáhlou zatáčku s mírným náklonem. Po řadě sekund ztrácí pocit zatáčení, jednak setrvalé klonění již není registrováno kupuloendolymfovým systémem, jednak gravitoinerciální výsledný silový vektor směřuje ve směru jeho osy z, což otolity i somestetika ztotožní s osou gravitace. Když pilot chce ukončit zatáčku zpětným kloněním do horizontálního přímočarého letu, začne cítit nejen zatáčení opačným směrem, ale i klonění na druhou stranu. Činnost podle subjektivního pocitu znamená zpětný pohyb řídicí páky a klonění ve směru do původní zatáčky při současném pociťování horizontálního přímočarého letu. Obvyklé je současné klesání, tzn. výsledný pohyb ve "smrtící" spirále do země.

Okulogyrální iluze

Je určitým vizuálním korelátem somatogyrální iluze. Po zastavení rotace nepociťuje subjekt jenom otáčení v opačném směru, ale také objekty před ním se pohybují v tomto směru. Pravděpodobně se na této iluzi podílí částečně vestibulookulární reflex, mechanismus je však komplexnější. Za letu bez vidu podporuje tato iluze somatogyrální. Pilot pociťující falešné zatáčení pozoruje rovněž pohyb přístrojové desky v tomto směru.

Somatogravická iluze

Je založena na vlastnosti otolitového orgánu interpretovat působící vektor gravitoinerciální síly vždy jako gravitační. Nejobvyklejším příkladem somatogravické iluze je iluze klopení letounu vzhůru při startu v podmínkách zhoršené viditelnosti. Nastává zvláště u pilotů

vysoce výkonných strojů. Je uváděn tento zjednodušený případ: Dosahuje-li po odpoutání od dráhy inerciální síla $1 G_x$, pak výsledný gravitoinerciální vektor působí v úhlu 45° ke gravitační vertikále. Pilot pocítuje klopení přidí vzhůru tímto náklonem. Pokud by uposlechl subjektivní dojmy a potlačil řídicí páku narazil by do země. U startu z letadlových lodí dosahují inerciální síly $3-5 G_x$ v několika sekundách, iluze pak přetrvává přes půl minuty. Iluze však může být nebezpečná i při vzletu u velkých dopravních letadel, kde se sice konečná gravitoinerciální síla zvětšuje jen o setiny G , ale protože úhel stoupání po startu je několik stupňů, může i nepatrná iluze stoupání hrozit v malé výšce katastrofou.

Somatogravická iluze se může podílet také na "smrtící" spirále. Při nevědomém klesání ve spirále, kdy jsou boční síly vyrovnány a náklon nepocítován, se s nárůstem rychlosti objevuje tangenciální lineární akcelerace, která potlačí vjem sklonu letadla přidí dolů.

Vrcholem somatogravických iluzí je iluze převrácení (inversion). Typicky nastane u vysoce výkonného letounu, který prudce stoupá a náhle ukončuje vzestup. To vyvolá odstředivou sílu $-G_z$, současně začíná prudce narůstat dopředná rychlost a přidává tangenciální inerciální sílu $+G_x$. Výsledkem je postupně rotující gravitoinerciální vektor ve směru nahoru a vzad. Stimulace otolitů je obdobná jako klopení přidí letadla nahoru až do převrácené polohy. Dojem je umocněn stimulací somestetických receptorů gravitoinerciální silou. Stimulace polokruhovitých kanálků se neuplatní. Iluze klopení či klonění zvýšeným drážděním na utrikulární otolitové membráně může také nastávat při působení přetížení a současném náklonu hlavy.

Okulogravická iluze

Je vizuálním korelátem somatogravické iluze. Obecně je u této iluze při pocitu pohybu subjektu v určitém směru současně pozorován pohyb objektů v tomtéž směru. Např. při zbrzdění letadla a pocitu klopení dolů pozoruje pilot pohyb palubní desky v tomtéž směru. Podstatou je pravděpodobně vestibulookulární reflex sloužící k vizuální fixaci a vyvolaný v tomto případě G vektorem.

Specifickým případem jsou tzv. "elevátorové" iluze nastávající při změně velikosti G_z . Snaha fixovat pohled na objekty při zvýšení tíže se projeví jejich zdánlivým pohybem směrem nahoru. Při snížení tíže je tomu naopak - směrem dolů. Předpokládá se, že tyto iluze se uplatňují za letu v turbulenci.

Iluze náklonu (the leans)

Je asi vůbec nejčastější somatosenzorickou iluzí. Obvykle se uvádí tak, že pilotovi snažícímu se letět horizontálně se pomalu, pod prahem vnímání letounu příčně nakloní. Pilot si toho náhle všimne a nadprahovým kloněním vyrovnává náklon do horizontu. Pocítuje však, kromě jen částečně omezeného vjemu

tohoto korigujícího klonění, náklon z horizontu ve směru vykonávaného klonění. Jeho velikost může odpovídat velikosti původní odchylky.

Tato iluze však může nastat i při vykonávání zdoluhavých pomalých a navazujících zatáčení a nemusí jít o spojení podprahového a nadprahového podnětu. V průběhu dlouhé zatáčky postupně pilot ztrácí vjem náklonu, ten je nahrazen pocitem horizontálního letu. Endolymfa je již zbrzděna a otolity jsou drážděny gravitoinerciálním vektorem síly. Při zakončování zatáčky pak pocítuje náklon na opačnou stranu.

Je také dokumentována řada případů iluzí náklonu bez jasně vysvětlitelných příčin. To podporuje myšlenku, že nelze vždy vycházet jen z fyzikálního podnětu, a že na vzniku iluzí se nepodílejí jen mechanismy koncového receptoru, ale že se uplatňuje ještě řada jiných veličin.

Coriolisova iluze

Je vysvětlována tzv. "cross-coupling" Coriolisovým vestibulárním efektem. Nastává tehdy, když je subjekt delší dobu v rotaci až vymizí pohyb endolymfy a poté změni polohu hlavy a tím se do roviny rotace (v maximálním případě) dostává jiný polokruhovitý kanálek, jehož endolymfa se začne pohybovat a tlačí na kupulu. Tím je vyvolán signál, který organismus interpretuje jako pohyb celého těla, letadla v příslušné rovině a směru. U vysoce výkonných strojů tato situace může často nastat během přístrojového létání při odpoutání pozornosti od palubní desky a pohybu hlavy pohledem na přepínače umístěné jinde v kabině. Nejde však vždy jen o iluzi, může docházet také k nevolnosti, úleku.

I když je asi nesporný vestibulární podíl na této iluzi, existují i laboratorně prokázané podobné efekty vyvolávané také somestetickým drážděním, což svědčí i o účasti této složky (Lackner, Graybiel, 1978).

Prevence dezorientace za letu

Opatření k prevenci a překonání prostorové dezorientace jsou rozsáhlá (Gillingham, Wolfe, 1985; Lapajev, Vorob'jev, 1985; Gjurdzian, 1986; Benson, 1988). Začínají u vhodného ergonomického uspořádání kabiny, zejména palubních přístrojů. Např. průhledové displeje umožnily současně sledování okolí i letových informací, vnější displeje horizontu dovolují využívat i periferního vidění při získávání informací o poloze letounu. Také výběr letců musí důsledně vyloučit vestibulární poruchy. Význam zjišťování vestibulární asymetrie se ověřuje. Spolehlivý test odolnosti vůči vzniku prostorové dezorientace není k dispozici. V jejím vývoji se předpokládá vliv únavy, nepravidelné životosprávy, léků, alkoholu a nemocí. Ve výcviku letců je nutné včas provádět seznamování s možnostmi vzniku iluzí a dezorientace i s protipatřeními, při zdůraznění normalnosti jejich výskytu u všech osob. Perspektivní a účinnou je přímá demonstrace iluzí

na speciálních trenažerech (Guedry, 1980; Benson, 1980), které se i průmyslově vyrábějí (např. Vertigon, Vertifuge, Gyrolab GL-100). Poté by měla následovat ukázka za skutečného letu na dvojím řízení. Obecný výcvik v habituaci na vestibulární dráždění má, jak se zdá, význam především v prevenci kinetózy, ne dezorientace. Obecně je shoda v těchto doporučeních při výskytu prostorové dezorientace za letu: koncentrovat se na let podle údajů přístrojů, převést letadlo do horizontálního letu, spojit se rádiem se zemí. Názory na efekty zvýšení svalového napětí nebo pohyby hlavou nejsou jednoznačné. Své nezvyklé pocity za letu by měl letec vždy následovně konzultovat s leteckým fyziologem.

Jaké lze vyvodit závěry pro naši současnou letecko-lékařskou praxi? Vezmeme-li za základ tři americká doporučení prevence prostorové dezorientace (Gillingham, 1990) pak:

1. Výzkum mechanismů:

Přímé zkoumání za letu či na soudobém simulátoru není v našich podmínkách bohužel realizovatelné. Bylo by však možné prozkoumat dokumentaci o leteckých nehodách a i zpětně hledat podíly dezorientace (Sázel, Pavlík, 1993). Je také snaha objevit předpoklady pilotů k dezintegraci letových návyků jednoduchým vyšetřováním posturálních reflexů při stoji na stabilometru (Kohen-Raz aj., 1994; Sázel, 1994).

2. Přístroje a zobrazovače:

Měly by přispívat k potlačení jevů dezorientace. Na to by se mělo pamatovat při vybavování nových letounů přístroji, pravděpodobně zahraniční výroby.

3. Výcvik:

Použití pozemních trenažerů prostorové dezorientace jako prvořadé je u nás zatím v nedohlednu. Metoda letového výcviku v tomto směru je ve světě ve vývoji, snad ji bude možno v budoucnosti převzít. Jedinou možností v rukou našich leteckých lékařů je výuka velitelů a pilotů v letecké fyziologii, počínaje leteckou školou, a případný individuální poleťový rozbor při výskytu dezorientace.

Souhrn

Při orientaci letce ve vzdušném prostředí nastává řada problémů. Nejtěžším stavem je prostorová dezorientace, která se podílí na řadě leteckých nehod. Obvykle nastává po letové iluzi. Na těchto iluzích se účastní většina receptorů komplexního kožního a proprioceptivního analyzátoru stejně jako vestibulárního, tj. systému otolitového a polokruhovitých kanálků. K těmto tzv. somatosenzorickým iluzím lze řadit: somatogyrální, okulogyrální, somatogravickou a okulogravickou iluzi, iluzi náklonu a Coriolisovu iluzi. Prevence dezorientace za letu zahrnuje její výzkum, požadavky na konstrukci letadel a zejména dezorientační výcvik letců. V České republice jsou uznávaná doporučení realizovatelná zatím jen minimálně.

Literatura

- BENSON, A. J.: The RAF spatial disorientation familiarisation device. In: Spatial disorientation in flight: Current problems. Eds. G. Perdriel, A. J. Benson: AGARD-CP-287, 1980 (11). 10 s.
- BENSON, A. J.: Spatial disorientation. In: Aviation medicine. Ed. 2. Eds. J. Ernsting, P. King. London, Butterworths 1988, s. 277-317.
- ČAPEK, D.: Fysiologie letce. 1. vyd. Praha, Naše vojsko 1948, s. 44.
- GILLINGHAM, K. K.: The spatial disorientation problem in the United States Air Force. In: Spatial Orientation in Unusual Force Fields. NASA workshop. Houston 23-24 April 1990. 22 s.
- GILLINGHAM, K. K. - WOLFE, J. W.: Spatial orientation in flight. In: Fundamentals of aerospace medicine. Ed. R. L. de Hart. Philadelphia, Lea Febiger 1985, s. 299.
- GIOSA, P.: Perceptual errors in flight - a survey of 100 military pilots on active duty. In: Spatial disorientation in flight: Current problems. Eds. G. Perdriel, A. J. Benson: AGARD-CP-287, 1980 (3). 7 s.
- GIJURDŽIAN, A. A.: Prostranstvennaja orientirovka letčika. In: Aviacionnaja medicina. Red. H.M. Rudnyj, P.V. Vasil'jev, S. A. Gozulov. Moskva, Medicina 1986, s. 339-351.
- GUEDRY, F. E.: Psychophysics of vestibular sensation. In: Vestibular system. Part 2: Psychophysics, applied aspects and general interpretations. Ed. H.H. Kornhuber. Berlin, Springer-Verlag 1974, s. 3-154.
- GUEDRY, F. E. jr.: A multistation disorientation demonstrator. In: Spatial disorientation in flight: Current problems. Eds. G. Perdriel, A. J. Benson: AGARD-CP-287, 1980 (10). 9 s.
- GUNDRY, A. J.: Thresholds of perception for periodic linear motion. Aviat. Space environ. Med., 49, 1978, č. 5, s. 679-686.
- HARDING, R. M. - MILLS, F. J.: Function of the special senses in flight. Brit. med. J., 286, 1983, s. 1728-1731.
- KEIDEL, W. D.: Stručná učebnice fyziologie. 1. vyd. Bratislava, Vydavateľstvo SAV 1973. 467 s.
- KAMENŠČIKOV, Ju. V. - OVEČKIN, I. G.: K probleme zritel'nyh illuzij u letnogo sostava. Voj. med. Ž., 1989, č. 9, s. 42-44.
- KOHEN-RAZ, R. et al.: Postural control in pilots and candidates for flight training. Aviat. Space environ. Med., 65, 1994, č. 4, s. 323-326.
- LACKNER, J. R.: Some proprioceptive influences on the perceptual representation of body shape and orientation. Brain, 111, 1988, s. 281-297.
- LACKNER, J. R. - GRAYBIEL, A.: Some influences of touch and pressure cues on human spatial orientation. Aviat. Space environ. Med., 49, 1978, č. 6, s. 798-804.
- LACKNER, J. R. - GRAYBIEL, A.: Illusions of postural, visual, and aircraft motion elicited by deep knee bends in the increased gravito-inertial force phase of parabolic flight: evidence for dynamic sensory-motor calibration to Earth gravity force levels. Exp. Brain Res., 44, 1981, s. 312-316.
- LACKNER, J. R. - LEVINE, M. S.: Changes in apparent body orientation and sensory localization induced by vibration of postural muscles: Vibratory myesthetic illusion. Aviat. Space environ. Med., 50, 1979, č. 4, s. 346-354.
- LEEK, B. F.: Abdominal visceral receptors. In: Enteroreceptors. Ed. E. Neil. Berlin, Springer-Verlag 1972, s. 113-160.
- LAPAJEV, E. V. - VOROB'JEV, O. A.: Ob illuzijach prostranstvennogo položenija vestibularnogo gena v aviacionnom polete. Kosm. Biol. Med., 49, 1985, č. 6, s. 11-15.
- LYONS, T. J. et al.: Classification problems of U.S. Air Force spatial disorientation accidents, 1989-91. Aviat. Space environ. Med., 65, 1994, č. 2, s. 147-152.
- LYONS, T. J. - SIMPSON, C. G.: The giant hand phenomenon. Aviat. Space environ. Med., 60, 1989, č. 1, s. 64-66.
- PAVLÍK, J.: Létání podle přístrojů. 1. vyd. Praha, Naše vojsko 1978, s. 84-114.
- SÁZEL, M.: Sensorická problematika simulovaného letu. [Studie]. Praha, Ústav letec. zdravotnictví 1985. 67 s.
- SÁZEL, M.: Prostorová dezorientace za letu na simulátoru při galvanické vestibulární stimulaci pilota. Voj. zdrav. Listy, 62, 1993, č. 6, s. 207-212.
- SÁZEL, M.: Vestibulární stimulace při stabilometrii a při letu na simulátoru. Voj. zdrav. Listy, 63, 1994, č. 3/4, s. 57-62.

27. SÁZEL, M. - PAVLÍK, J.: Úvaha o podílu sensomotorických reakcí na vzniku leteckých nehod v poslední době. In: Aktuální problémy leteckého lékařství. Praha, Ústav letec. zdravotnictví 1993, s. 77-86.
28. STRAUBE, A. - BRANDT, T.: Importance of the visual and vestibular cortex for self-motion perception in man (circularvection). *Human Neurobiol.*, 6, 1987, č. 4, s. 36-45.
29. SYKA, J. - VOLDŘICH, L. - VRABEC, F.: Fyziologie a patofyziologie zraku a sluchu. 1. vyd. Praha, Avicenum 1981. 322 s.
30. ŠULC, J.: Letecká fyziologie. 1. vyd. Praha, Naše vojsko 1980. 283 s.
31. ŠULC, J.: Sensomotorický konflikt a bezpečnost letu. In: Aktuální problémy leteckého lékařství. Praha, Ústav letec. zdravotnictví 1990, s. 116-121.
32. ŠULC, J. - KOLOUCH, J.: Příčiny dezorientace za letu. In: Aktuální problémy leteckého lékařství. Praha, Ústav letec. zdravotnictví 1984, s. 73-76.
33. TROJAN, S. aj.: Fyziologie. Učebnice pro lékařské fakulty. 1. vyd. Praha, Avicenum 1988. 1057 s.
34. TROJAN, S. - DRUGA, R. - PFEIFER, J.: Centrální mechanismy řízení motoriky - teorie, poruchy a léčebná rehabilitace. 2. vyd. Praha, Avicenum 1990. 255 s.
35. WEIT, P. - LUCCI, M.: Labirintnyj i proprioceptivnyj aspekty aviacionnoj i kosmičeskoj mediciny. In: Aviacionno-kosmičeskaja medicina (problemy bezopasnosti poleta). [překl.]. Red. A. A. Gjurdzžian. Moskva, Voenizdat 1975, s. 15-35.

Klíčová slova: Pilot; Letová iluze; Prostorová dezorientace; Somestický; Vestibulární; Proprioceptivní; Kožní.

Do redakce došlo 8. 6. 1994