Translated from English to Slovak - www.onlinedoctranslator.com

VÝSKUMNÝ ČLÁNOK

Prah bolesti vyvolaný lokálnym vystavením milimetrovým vlnám na ľudskej koži

Akiko Yuasa†1, Shintaro Uehara†2, Kazuki Ushizawa†1, Sachiko Kodera3,4, Akimasa Hirata3,4*a Johei Otaka1*

1Katedra rehabilitačnej medicíny, Lekárska fakulta Univerzity zdravia Fujita, Aiči, Japonsko
2Fakulta rehabilitácie, Fakulta zdravotníckych vied Univerzity Fujita Health, Aiči, Japonsko
3Katedra elektrotechniky a strojárstva, Nagojský technologický inštitút, Aiči, Japonsko
4Centrum biomedicínskej fyziky a informačných technológií, Nagojský technologický inštitút, Aiči, Japonsko

†Títo autori prispeli k tejto práci rovnakou mierou a delia sa o prvé autorstvo
* Títo autori prispeli k tejto práci rovnakou mierou a zdieľajú zodpovedajúce autorstvo

* Korešpondencia:

Yohei Otaka

Oddelenie rehabilitačnej medicíny, Lekárska fakulta Univerzity zdravia Fujita, Aiči, Japonsko

18 rokov 0562-93-2167

otaka119@mac.com

Akimasa Hirata

Katedra elektrotechniky a strojárstva, Nagojský technologický inštitút, Aiči, Japonsko

052-735-5241

ahirata@nitech.ac.jp

Stiahnuté z journals.physiology.org/journal/jn (2A02:AB04:01D2:5100:65FC:FD92:FC2A:7691) dňa 1. septembra 2026.

ABSTRAKT

Vystavenie milimetrovým vlnám môže spôsobiť bolesť a poškodenie tkaniva na exponovaných miestach tela. Prahová teplota, najmä prah bolesti, však zostáva nejasná. V tejto štúdii sme skúmali prahy vnímania štyroch rôznych typov pocitov – tepla, horúčavy, brnenia a bolesť – a individuálne fyzické charakteristiky spojené s vnímaním bolesti vyvolaným milimetrovými vystavenie vlnám. Tridsaťpäť zdravých dospelých bolo vystavených milimetrovým vlnám s frekvenciou 28 GHz na ľavej strednej časti tela konček prsta pri vstupnom výkone 8,5 W (hustota dopadajúceho výkonu priemerná na ploche 1 cm_2plocha: 1,00 W/cm_2) pre do 10 min. Teplota, pri ktorej sa dosiahne počiatočné subjektívne vnímanie každého zo štyroch pocitov typy, ktoré sa vyskytli, boli určené ako prah vnímania pre daný pocit. Keď povrch kože Ak teplota prekročila 44 °C alebo keď účastník pocítil bolesť, expozícia bola ukončená. Súvislosť medzi fyzickými charakteristikami účastníkov a prítomnosťou bolesti bola skúmaná pomocou logistická regresná analýza. V dôsledku toho sa prahy vnímania zvyšovali v nasledujúcom poradí: teplo < horúčava < brnenie < bolesť. Celkovo 18 (51 %) účastníkov vnímalo bolesť a priemerná bolesť Prahová hodnota bola 41,9 °C. Ženy vnímali bolesť častejšie ako muži (pomer šancí 4,80 [1,15–20.09]), čo možno čiastočne vysvetliť rozdielmi v úrovni hydratácie a prstov súvisiacimi s pohlavím obvodu. Naše výsledky ukázali, že vystavenie milimetrovým vlnám môže vyvolať bolesť pri približne 42 °C a odhalila jasné rozdiely medzi pohlaviami v citlivosti na vnímanie bolesti pod milimetrovým vystavenie vlnám.

NOVÉ A POZORUHODNÉ

Táto štúdia skúmala prahy vnímania štyroch typov pocitov – teplo, horúčava, brnenie a bolesť – keď bol konček prsta vystavený milimetrovým vlnám s frekvenciou 28 GHz. Výsledky ukázali, že vnímanie prahy nasledovali v poradí teplo, horúčava, brnenie a bolesť, pričom prahová teplota kože

Stiahnuté z journals.physiology.org/journal/jn (2A02:AB04:01D2:5100:65FC:FD92:FC2A:7691) dňa 1. septembra 2026.

pre bolesť pri 41,9 °C. Je pozoruhodné, že ženy vykazovali výrazne vyššiu citlivosť na bolesť ako muži. Tieto Zistenia poskytujú ďalšie dôkazy podporujúce potrebu ochrany pred vystavením milimetrovým vlnám.

Kľúčové slová: milimetrová vlna, bolesť, prah vnímania, pocit, teplota kože

ÚVOD

V poslednom desaťročí zohrali bezdrôtové komunikačné systémy významnú úlohu v sociálnej rozvoj a očakáva sa, že tieto systémy v budúcnosti nadobudnú ešte väčší význam. Najmä kvázi- a milimetrové vlnové technológie v rozsahu od 6 do 300 GHz (t. j. rádiofrekvenčné elektromagnetické polia), ktoré poskytujú vysokorýchlostné a výrazne rozšírené bezdrôtové siete, sú veľmi žiadané (1). Tieto frekvencie sa ďalej súhrnne označujú ako „milimetrové vlny“. Spolu s rýchlymi šírenia milimetrových vĺn, je naliehavo potrebné poskytnúť dôkazy o ich nepriaznivých účinkoch účinky na zdravie ľudí. Pri frekvenciách nad 6 GHz je zahrievanie povrchu tkaniva dobre podloženým účinok (2, 3). Usmernenia Medzinárodnej komisie pre ochranu pred neionizujúcim žiarením (ICNIRP) naznačujú, že vystavenie milimetrovým vlnám, ktoré zvyšuje lokálnu telesnú teplotu na 41 °C alebo viac, je potenciálne škodlivé, na základe obmedzených štúdií na ľuďoch (4).

Medzi štúdiami skúmajúcimi tepelné účinky na ľudskú pokožku existujú nezrovnalosti. Predchádzajúca V prehľade sa uvádza, že prah bolesti bol 45 – 48 °C pri vyvolaní aplikátorom s horúcou vodou (5), ale 42 – 44 °C pri indukcii tepelným stimulátorom (6), čo naznačuje, že vnímanie bolesti sa môže líšiť v závislosti na zdroji tepla. Na základe nášho prehľadu literatúry sa len niekoľko štúdií zaoberalo prahom bolesti s použitím milimetrových vĺn u ľudí (7). Štúdia uvádzala priemerný prah bolesti 43 °C na chrbte; hodnota nižšia ako teplota, ktorá môže spôsobiť poškodenie pokožky (5), čo naznačuje, že sa treba vyhnúť bolesti

Stiahnuté z journals.physiology.org/journal/jn (2A02:AB04:01D2:5100:65FC:FD92:FC2A:7691) dňa 1. septembra 2026.

môže pomôcť predchádzať závažnému poškodeniu kože. Tieto výsledky však môžu prehliadať možnosť kontaktu-Zahrievacie paradigmy môžu zavádzať maskovacie účinky v dôsledku súbežnej aktivácie iných nervov, ktoré by následne mohlo ovplyvniť vnímanie bolesti. Okrem toho, vnímanie bolesti na vysoko citlivých miestach tela nebola dostatočne riešená, a to aj napriek dobre známym rozdielom v hmatovej citlivosti v rámci tela časti; trup je menej citlivý ako končatiny a končeky prstov sú jednou z najcitlivejších oblastí (8, 9). Smernice ICNIRP odrážajú tieto rozdiely rozlišovaním limitov expozície pre tkanivo typu 1. (končatiny) a tkanivo typu 2 (trup a hlava)(4). Spoločne, hodnotiace účinky na vysoko citlivé telo lokality s bezkontaktnou expozíciou milimetrovým vlnám by poskytli kľúčové dôkazy na riešenie súčasných medzera vo výskume, keďže ICNIRP identifikovala určenie prahov bolesti pri milimetrových vlnách expozíciu ako prioritnú výskumnú potrebu vzhľadom na jej priamy význam pre odvodenie a validáciu expozície limity (10).

Hoci mnohé štúdie simulovali tepelné prahy pre poškodenie tkaniva u ľudí a zvieratá, od ľudských účastníkov sa priamo zhromaždilo len málo údajov na zlepšenie presnosti týchto simulácie (11). Okrem toho niektoré predchádzajúce štúdie vyvolali povrchové popáleniny v dôsledku vystavenia extrémne vysoké teploty nad 50 °C (12, 13). Zber údajov o ľuďoch v bezpečných experimentálnych prostredia je nevyhnutné pre vývoj usmernení založených na dôkazoch.

Individuálne fyzické charakteristiky môžu tiež prispievať k vnímaniu bolesti. Naša predchádzajúca štúdia ukázali, že prahy vnímania tepla kontaktným prúdom korelovali s vekom a prstom obvod (14). Individuálne charakteristiky spojené s prahmi bolesti však zostávajú nejasné. Okrem toho sa vie len málo o percepčných zmenách, ktoré by mohli slúžiť ako vodítka na predpovedanie bolesti počas vystavenia milimetrovým vlnám. Iniciuje sa tepelné vnímanie vrátane tepla, horúčavy a bolesti aktiváciou kanálov prechodného receptorového potenciálu (TRP kanál), ktoré sú selektívne aktivované v rámci špecifických teplotných rozsahov (15, 16). TRP kanály tepla sa však aktivujú počas široký teplotný rozsah (teplo: 25–43 °C; bolesť: > 42 °C)(16). Okrem toho, východisková teplota kože,

Stiahnuté z journals.physiology.org/journal/jn (2A02:AB04:01D2:5100:65FC:FD92:FC2A:7691) dňa 1. septembra 2026.

najmä v periférnych častiach tela, sa u jednotlivých jednotlivcov líši. Preto nebolo isté, či Prahy vnímania závisia od relatívnej zmeny oproti základnej teplote alebo od absolútnej teplotné hodnoty. Brnenie je navyše známe ako subjektívny zážitok podobný kváliám a môže byť aj vyvolané netermálnou stimuláciou (17). V tejto súvislosti zostáva nejasné, či pocity, vrátane brnenia, sa objavujú postupne alebo náhodne pri zmenách teploty počas vystavenie milimetrovým vlnám. Pochopenie zmien vnímania závislých od teploty by pomohlo predvídať bolesť a predchádzať nežiaducim účinkom.

Aby sme sa týmito problémami zaoberali, zamerali sme sa na preskúmanie tepelných účinkov milimetrových vĺn z hľadiska: (i) zmeny rôznych typov pocitov (teplo, horúčava, brnenie a bolesť) závislé od teploty a ich relatívne a absolútne prahy vnímania a (ii) súvislosť individuálnych fyzických charakteristiky vnímania bolesti.

MATERIÁLY A METÓDY

Účastníci

Zúčastnilo sa tridsaťpäť zdravých dospelých (priemerný vek 41,9 roka; štandardná odchýlka [SD] 13,4; 17 žien) v tejto štúdii. Aby sme zmiernili potenciálne skreslenia spojené s vekom a pohlavím, do štúdie sme zaradili účastníkov vo veku 24 – 66 rokov (od dvadsiatych do šesťdesiatky), s podobným počtom mužov a žien v každej skupine. Všetci účastníci poskytli písomný informovaný súhlas v súlade s Helsinskou deklaráciou z roku 1964, ako revidované v roku 2013. Kritériá zaradenia boli: žiadna anamnéza diabetu mellitus alebo mozgových, neuromuskulárnych alebo psychiatrické ochorenie. Kritériá vylúčenia boli: (1) anamnéza alebo súčasná lekárska liečba, ktorá by mohla ovplyvniť zmysly a vnímanie, (2) kardiostimulátor, (3) tehotenstvo a (4) ekzém alebo kožné vyrážky

Stiahnuté z journals.physiology.org/journal/jn (2A02:AB04:01D2:5100:65FC:FD92:FC2A:7691) dňa 1. septembra 2026.

na ruke. Túto štúdiu schválila etická komisia Fujita Health University (číslo schválenia HM20-430).

Vybavenie

Prah tepelného vnemu bol stanovený aplikáciou kontinuálnych sínusových milimetrových vĺn pri 28 GHz do končeka prsta ľavého prostredníka, čo bolo cieľové miesto stimulácie.

Zariadenie na expozíciu v milimetrových vlnách bolo identické s tým, ktoré bolo použité v našej predchádzajúcej štúdii (18). bola upravená kontinuálna sínusová vlna generovaná generátorom signálu (JOGSAG1401; SAF Tehnika, Lotyšsko) pomocou atenuátora a zosilnený na požadovanú intenzitu výkonovým zosilňovačom (AMP 6034-20, Exodus Advanced Communications, USA). Zosilnené vlny prechádzali cez izolátor a boli prepínané zapnutie/vypnutie pomocou vlnovodného prepínača s ukončovacím odporom, minimalizujúce kolísanie šumu počas expozície. Intenzita výkonu sa nepretržite monitorovala pomocou výkonového senzora (NRP-Z52-02, Rohde & Schwarz, Nemecko). Integrované zariadenie na núdzové zastavenie (MMWSTOP-28G, Oshima Prototype Engineering, Japonsko) pomocou spojky automaticky vypne zosilňovač, ak intenzita výkonu prekročí stanovenú úroveň alebo bol manuálne aktivovaný, ak účastník hlásil nepohodlie. Hustota dopadajúceho výkonu (IPD) bola merané meračom intenzity poľa (sonda SMP2 + WPF60, Wavecontrol SL, Španielsko) umiestneným vo vzdialenosti 30 cm od stredu šošovkovej antény. IPD a hustota absorbovaného výkonu (APD) boli vypočítané pomocou komerčný softvér (XFdtd, Remcom, Spojené štáty) a validovaný oproti nameraným hodnotám. priemerný IPD a APD na ploche 1 cm^2 v strede prostredníka s anténnym vstupným výkonom 8,5 W boli 1,00 W/cm^2 a 431 mW/cm^2 (18). Je potrebné poznamenať, že APD je definovaný ako základný obmedzenie nad 6 GHz podľa medzinárodných smerníc (2, 4) a táto metrika preukázateľne silne korelujú so zvýšením teploty kože (19).

Stiahnuté z journals.physiology.org/journal/jn (2A02:AB04:01D2:5100:65FC:FD92:FC2A:7691) dňa 1. septembra 2026.

Experimentálny protokol

Experimenty sa uskutočnili v tichej miestnosti s priemernou teplotou 24,7 °C (SD, 1,9) a relatívna vlhkosť 53,0 % (SD, 21,9). Účastníci sedeli na stoličke s ľavým predlaktím na nafukovací vankúš v neutrálnej polohe a mal nasadené slúchadlá, aby minimalizoval hluk z okolia. Ľavá prostredník bol položený na špongiu, pričom sa udržiavala vzdialenosť 30 cm od stredu antény šošovky (Obrázok 1). Prepážka zabránila účastníkom vidieť skúšajúceho, čím sa zabezpečilo načasovanie expozícia nebola známa. Teplota pokožky na exponovanom mieste sa kontinuálne zaznamenávala pomocou termokamera (FLIR T530; Teledyne FLIR, Wilsonville, OR, Spojené štáty) s priestorovým rozlíšením 320 × 240 pixelov pri 30 snímkach/s. Účastníci boli poučení, aby si udržali sediacu polohu čo najviac možné počas celej nahrávky.

Pred experimentálnou časťou sa uskutočnilo zoznamovacie stretnutie, na ktorom sa účastníci pociťoval typické pocity vyvolané vystavením milimetrovým vlnám. Najprv bol konček ľavého ukazováka vystavené milimetrovým vlnám so vstupným výkonom 2,1 W (IPD: 252 mW/cm_2). Počas tejto expozície hotspot (t. j. miesto zaznamenania maximálnej teploty pokožky v strede expozície) bol definovaný ako stred vizuálne identifikovanej oblasti s najvyššou teplotou (biela oblasť na termografická mapa farieb). Po určení hotspotu sa vstupný výkon zvýšil na 8,5 W (IPD: 1,00 W/cm_2), čo bolo v predbežnom testovaní potvrdené ako potenciálne bolestivo vyvolávajúca úroveň, aby sa oboznámili účastníkov s experimentálnou expozíciou. Účastníci boli inštruovaní, aby stlačili počítačovú myš pravou rukou hneď ako na končeku ľavého ukazováka pocítili jeden z nasledujúcich pocitov: teplo, horúčava, brnenie alebo bolesť. Poskytli tiež slovnú odpoveď na identifikáciu pocitu. Zoznam štyri pocity boli zobrazené pred účastníkmi, aby sa uľahčila identifikácia. V tejto štúdii, Teplo bolo definované ako neškodný pocit tepla, ktorý sa jasne odlišuje od iných tepelných vnemov.

Stiahnuté z journals.physiology.org/journal/jn (2A02:AB04:01D2:5100:65FC:FD92:FC2A:7691) dňa 1. septembra 2026.

pocit chladu alebo tepla. Teplo bolo definované ako silnejší tepelný pocit ako teplo, ale nebolestivý pocit. Brnenie bolo definované ako abnormálny parestétický pocit, často opisovaný ako pichanie (20). Bolesť bola definovaná ako nepríjemný pocit (15). Účastníci boli poučení, aby hlásili bolesť, keď pocit sa stal nepríjemným a chceli ukončiť expozíciu (20). Aby sa minimalizovalo skreslenie reakcie konkrétneho poradia pocitov a vyhnúť sa zmätku, podrobné vysvetlenia nad rámec zoznamu pocitov neboli poskytnuté okrem brnenia. Pretože brnenie bolo pre mnohých považované za neznámy pocit účastníkom bola jeho stručná definícia poskytnutá všetkým účastníkom konzistentne. Ak účastník požiadal o objasnenie ostatných pocitov bolo poskytnuté aj štandardizované vysvetlenie na základe našich vopred určené definície. Keď sa vnímanie zmenilo (napr. z tepla na teplo), boli poučení stlačiť myš a nahlásiť typ pocitu. Okrem toho, ak pocit postupne slabol a dočasne zmizli (pravdepodobne kvôli tepelnej adaptácii), dostali pokyn reagovať „žiadne." Táto úvodná expozícia trvala približne 10 sekúnd, čo účastníkom umožnilo precvičiť si odpovede.

Po oboznámení sa s materiálom sa uskutočnila experimentálna relácia s expozíciou milimetrovým vlny s intenzitou 8,5 W na končeku ľavého prostredníka. Teplota povrchu kože sa zaznamenávala 3 minúty pred expozícia ako východisková hodnota. Slovné pokyny na prípravu boli dané 10 – 15 sekúnd pred expozíciou, ale presné čas nebol zverejnený. Rovnako ako v úvodnom stretnutí, účastníci reagovali okamžite po vnímanie pocitu a zmeny pocitov a teploty boli zaznamenané. Z bezpečnostných dôvodov Experimentátor zastavil expozíciu v dvoch prípadoch: (1) keď pocítil bolesť alebo (2) keď koža teplota prekročila 44 °C. Pretože predbežné testovanie ukázalo, že teplota pokožky sa ustálila v priebehu 10 min, vo všetkých ostatných prípadoch bola doba expozície nastavená na 10 min. Keď bola hlásená bolesť, účastníci hodnotili jeho intenzitu pomocou 11-bodovej numerickej hodnotiacej škály (NRS) bezprostredne po ukončení (0 = žiadna bolesť; 10 = najhoršia predstaviteľná bolesť) (21). Po každej expozícii sa zaznamenávala teplota pokožky končeka prsta počas ďalšie 3 minúty.

Stiahnuté z journals.physiology.org/journal/jn (2A02:AB04:01D2:5100:65FC:FD92:FC2A:7691) dňa 1. septembra 2026.

Miery fyzikálnych charakteristík

Fyzické charakteristiky účastníkov vrátane výšky, hmotnosti, indexu telesnej hmotnosti, celkového množstva vody v tele a percentá telesného tuku boli merané pomocou bioelektrickej impedančnej analýzy (InBody270; InBody Co., Ltd., Soul). Okrem toho sa merali rozmery prstov: vzdialenosť od záhybu po konček prsta a obvod v distálnom interfalangeálnom kĺbe ľavého prostredníka (14).

Analýza údajov

Absolútna teplota kože, pri ktorej bol pocit prvýkrát zaznamenaný, bola definovaná ako pocit prahová hodnota. Relatívny prah bol vypočítaný ako zmena od východiskovej hodnoty (priemerná teplota počas 10 sekúnd pred začiatkom expozície) až po prah. Prahy vnímania boli stanovené pre každý pocit (teplo, horúčava, brnenie, bolesť alebo žiadny pocit). Na preskúmanie zmien závislých od teploty sa pomer času, počas ktorého bol každý pocit vnímaný, k celkovému vnímanému trvaniu v rámci každého 1 °C interval bol vypočítaný pre každého účastníka (doplnkový obrázok S1). Inými slovami, percento času bol stanovený pocit pre každý interval 1 °C, potom bol vypočítaný priemer medzi účastníkmi, ktorí zažili daný teplotný interval. Tieto analýzy boli vykonané s použitím absolútnych a relatívnych prahy.

Štatistiky

Na preskúmanie súvislostí medzi účastníkmi boli vykonané analýzy univariačnej logistickej regresie fyzikálne charakteristiky (nezávislé premenné) a prítomnosť bolesti (vnímanie bolesti). Pomery šancí

Stiahnuté z journals.physiology.org/journal/jn (2A02:AB04:01D2:5100:65FC:FD92:FC2A:7691) dňa 1. septembra 2026.

(OR) a 95 % intervaly spoľahlivosti (CI). Keďže výsledky ukázali, že sa bral do úvahy iba pohlavie súvisiace s vnímaním bolesti boli vykonané sekundárne multivariačné logistické regresné analýzy na vyhodnotiť potenciálne mediátory fyzických charakteristík súvisiacich s pohlavím, vrátane celkovej telesnej vody a obsahu prstov obvod (distálny interfalangeálny kĺb [DIP]), ktorý by bol špecificky spojený s tepelnou pocit (22). Model zahŕňal pohlavie a každý z týchto faktorov ako kovarianty. Štatistické analýzy boli vykonané pomocou SPSS verzie 26 (IBM Corp., Armonk, NY, USA). Účinky boli považované za významné, akp < 0,05.

VÝSLEDKY

Charakteristiky účastníkov

Charakteristiky účastníkov sú uvedené v tabuľke 1. Celkovo sedem účastníkov (20 % všetkých účastníci) boli vystavení maximálne 10 minút; expozícia bola zastavená kvôli bolesti vnímanie u 18 účastníkov (51 %) a teplota povrchu kože prekročila limit 44 °C u 10 účastníkov (29 %) (Tabuľka 2). U žiadneho z účastníkov neboli pozorované žiadne nežiaduce udalosti.

Zmena pocitov a prahov vnímania závislá od teploty

Celkové trvanie záznamu teploty kože bolo približne 6 – 16 minút vrátane východiskovej hodnoty a merania po expozícii. Pokiaľ ide o vývoj pocitov v priebehu času, väčšina účastníkov spočiatku cítil teplo.

Stiahnuté z journals.physiology.org/journal/jn (2A02:AB04:01D2:5100:65FC:FD92:FC2A:7691) dňa 1. septembra 2026.

Keď teplota prekročila 40 °C, mnohí hlásili pocit tepla, po ktorom nasledovalo brnenie a bolesť (obrázky 2A a 3A). Prahové hodnoty tepelného vnímania sú uvedené v tabuľke 3, obrázok 2B (absolútna hodnoty) a obrázok 3B (relatívne hodnoty). Prahy vnímania sa zvyšovali v tomto poradí: teplo < horúčava < brnenie < bolesť. Prah vnímania bolesti bol 41,9 °C (relatívna hodnota: 8,7 °C). Päť účastníci pociťovali dočasnú absenciu citlivosti po vnímaní niektorých pocitov, pravdepodobne kvôli tepelnej adaptácii.

Prahy vnímania sa medzi účastníkmi líšili v závislosti od typu pocitu a od absolútna verzus relatívna teplota. Najmä prah vnímania tepla vykazoval široký rozsah absolútnych hodnôt (SD: 2,7 °C) (obrázok 2B), zatiaľ čo jeho relatívne hodnoty vykazovali užší rozsah (SD: 1,4 °C) (obrázok 3B). Naproti tomu prahy brnenia a bolesti vykazovali úzke rozpätie absolútnych hodnôt (SD: brnenie = 1,9 °C; bolesť = 1,6 °C) (obrázok 2B), ale širšie rozsahy relatívnych hodnôt (SD: brnenie = 3,1 °C; bolesť = 3,7 °C) (obrázok 3B).

Vnímanie bolesti

Osemnásť účastníkov (51 % všetkých účastníkov) vnímalo bolesť, z ktorých 67 % boli ženy. Univariabilné Analýzy ukázali, že pohlavie bolo významne spojené s vnímaním bolesti, pričom ženy boli častejšie vnímajú bolesť ako muži (OR 4,8 [95 % CI: 1,15 – 20,09]),p =0,032) (Tabuľka 4). Žiadne ďalšie faktory neboli zohľadnené spojené s vnímaním bolesti. V sekundárnych analýzach bola súvislosť medzi pohlavím a vnímaním bolesti sa po úprave na každý z potenciálnych mediátorov (celková telesná voda a hladina vody v prstoch) už nepozorovala obvod [DIP]) (Tabuľka 5). Tento výsledok naznačuje pozorovanú súvislosť medzi pohlavím a bolesťou vnímanie možno čiastočne vysvetliť rozdielmi vo fyzických vlastnostiach súvisiacimi s pohlavím, ktoré pôsobia ako sprostredkujúce faktory.

Stiahnuté z journals.physiology.org/journal/jn (2A02:AB04:01D2:5100:65FC:FD92:FC2A:7691) dňa 1. septembra 2026.

DISKUSIA

Táto štúdia skúmala teplotne závislé zmeny v rôznych typoch pocitov (teplo, horúčava, brnenie a bolesť) a ich príslušné prahy vnímania. Všimnite si, že vypočítaná APD pri 28 GHz bola potvrdené, že sú v rámci validovaného rozsahu pre výpočtové modely lokálnej expozície (18), ktorý je nevyhnutné pre štúdium na ľuďoch (23, 24). Konkrétne sme sa zamerali na prah bolesti a skúmali faktory spojené s individuálnymi fyzickými charakteristikami a vnímaním bolesti. Naše výsledky ukázali, že Prahy vnímania sa menili v nasledujúcom poradí so zvyšujúcou sa teplotou: teplo < horúčava < brnenie < bolesť. Okrem toho sa typy vnímania neustále menili, keď teplota dosiahla plató. Okrem toho vystavenie milimetrovým vlnám vyvolalo bolesť u viac ako polovice účastníkov s priemernou absolútny prah bolesti 41,9 °C. Je pozoruhodné, že ženy vnímali bolesť výrazne častejšie ako muži.

Táto štúdia preukázala, že prahy vnímania sa riadili poradím teplo, horúčava, brnenie, a bolesť, hoci sa tieto prahy medzi účastníkmi líšili. Tieto zistenia naznačujú, že pocity majú tendenciu byť vnímané postupne so zvyšujúcou sa teplotou povrchu pokožky a že brnenie pocit môže slúžiť ako včasný varovný signál hroziacej bolesti. Vystavenie milimetrovým vlnám zvyšuje citlivosť pokožky povrchovej teploty premenou absorbovanej energie na teplo (25), čo môže ľahko aktivovať nociceptívne aferentné vlákna (Aδ- a C-vlákna). Aktivácia nociceptívnych aferentných vlákien vrátane C-vlákien môže prispievajú k pozorovanému pocitu brnenia (26). Je potrebné poznamenať, že prahy sa u jednotlivých ľudí líšia, pravdepodobne kvôli zmenám v absorbovanej elektrickej energii alebo množstve tepla premeneného z energie v pokožke. Najmä prah vnímania tepla vykazoval výrazne širší rozsah absolútnych hodnôt medzi účastníkmi, zatiaľ čo rozsah relatívnych hodnôt bol malý. Tento výsledok je v súlade s predchádzajúcimi zistenia, že kanály prechodného receptorového potenciálu zapojené do vnímania tepla sú aktivované počas široký teplotný rozsah (teplo: 25 – 43 °C; bolesť: > 42 °C) (16). Tieto výsledky možno pripísať

Stiahnuté z journals.physiology.org/journal/jn (2A02:AB04:01D2:5100:65FC:FD92:FC2A:7691) dňa 1. septembra 2026.

široká variabilita východiskových teplôt pokožky, pričom niektorí účastníci vnímali teplo pri veľmi nízkych hodnotách teploty. Naše výsledky naznačujú, že vnímanie tepla závisí od relatívnych zmien na povrchu kože teplota od východiskovej hodnoty (v priemere približne 2 °C) a nie absolútna teplota. Naša predchádzajúca štúdia skúmala prah tepelného vnímania pri vystavení milimetrovým vlnám s osobitný dôraz na jeho spoľahlivosť pri relatívne nižších intenzitách stimulácie (IPD: 27,0 – 399 mW/cm_2) (18). Táto štúdia tiež ukázala, že vnímanie tepla odráža relatívnu zmenu teploty približne 1 °C od základnej čiary. Spolu, bez ohľadu na intenzitu expozície, sa zdá, že prah tepla čo zodpovedá relatívnemu nárastu o 1 – 2 °C.

Naproti tomu prahy vnímania brnenia a bolesti vykazovali široké rozpätie relatívnych hodnôt. medzi účastníkmi, zatiaľ čo ich absolútne hodnoty boli relatívne konzistentné. Toto zistenie naznačuje, že vnímanie mravčenia a bolesti závisí skôr od absolútnej teploty povrchu pokožky (približne 42 °C) než relatívna zmena od východiskovej hodnoty. Predchádzajúca štúdia preukázala, že prah C-vlákna mechanotepelné nociceptory, ktoré reagujú na teplo a bolesť, boli približne 41 °C s prahom bolesti 41 – 49 °C pomocou termody pritlačenej na kožu (27). Autori naznačili, že dosiahnutie bolesti Prah vyžaduje priestorové sčítanie vstupov z viacerých nociceptorov. Podobne môžu milimetrové vlny vyvolať tepelnú bolesť, keď teplota kože dosiahne úroveň dostatočnú na aktiváciu viacerých nociceptorov, napr. absolútny teplotný prah.

Nové zistenia tejto štúdie sú, že vystavenie milimetrovým vlnám vyvolalo bolesť u viac ako polovice účastníkov s priemerným prahom 41,9 °C. Táto hodnota je v súlade s prahom špecifikované medzinárodnými smernicami pre vystavenie rádiofrekvenčnému elektromagnetickému poľu, t. j. ICNIRP 2020 (4), v ktorom sa uvádza, že lokálne zvýšenie teploty o 41 °C alebo viac je potenciálne škodlivé. Tieto usmernenia boli založené na predchádzajúcich štúdiách využívajúcich rôzne metodiky vrátane rôznych tepelných zdroje, ale s obmedzenými údajmi o vystavení ľudí rádiofrekvenčným elektromagnetickým poliam. Napríklad

Stiahnuté z journals.physiology.org/journal/jn (2A02:AB04:01D2:5100:65FC:FD92:FC2A:7691) dňa 1. septembra 2026.

Defrin a kol. (2006) uviedli prah tepelnej bolesti 43,8 °C na ruke pri použití kontaktného Peltierovho termočlánku. stimulátor metódou limitov (postupne zvyšujúca sa teplota) (28). Predpokladá sa, že takýto Zvýšenie teploty môže zmeniť citlivosť receptorov, a tým zvýšiť prah bolesti. Ďalšia štúdia Walters a kol. (2000) uviedli prah bolesti 43,9 °C pri použití milimetrových vĺn s frekvenciou 94 GHz na chrbte (7). Tento mierne vysoký prah možno pripísať nižšej citlivosti hmatového vnemu na trupe. v porovnaní s končatinami (8, 9). Naproti tomu prah bolesti citlivej oblasti kože v údajne je konček prsta ekvivalentný hodnote zistenej v tejto štúdii, ktorá je relatívne nižšia ako trupu. Uehara a kol. (2023) preukázali, že vnímanie tepelnej bolesti sa objavilo okolo 42 °C s rádiofrekvenčné kontaktné prúdy napriek potenciálnym maskovacím účinkom (14). Toto experimentálne pozorovanie bola ďalej podporená modelovou prácou od Kodery a kol. (2025), ktorá reprodukovala prechod mechanizmy vnímania od elektrostimulácie až po zahrievanie vo frekvenčnom rozsahu 100–300 kHz a potvrdilo, že približne 42 °C predstavuje relevantný prah bolesti, keď dominujú tepelné účinky (29). V dôsledku toho sa predpokladá, že prah bolesti vyvolaný vystavením rádiofrekvenčnému žiareniu je konzistentné, bez ohľadu na použitie kontaktných alebo bezkontaktných ohrevných paradigiem.

Dôležité je, že naša štúdia poskytuje údaje z citlivých oblastí pokožky u ľudí a naznačuje, že Vystavenie milimetrovým vlnám, ktoré zvyšuje teplotu pokožky nad 42 °C, môže spôsobiť bolesť a zvýšiť riziko nežiaduce účinky. Je zaujímavé, že viac ako polovica účastníkov pociťovala bolesť, zatiaľ čo sedem Účastníci tolerovali expozíciu až 10 minút bez vnímania bolesti. Okrem toho, hoci koža teplota v niektorých prípadoch prekročila 44 °C, 10 účastníkov neuviedlo bolesť, čo naznačuje, že ich bolesť prahy boli nad 44 °C. Naopak, najnižší pozorovaný prah bolesti bol pod 39 °C. Keďže Rozloženie elektromagnetických polí v kožnom tkanive silne závisí od anatómie a tvaru (30) a Simulačné štúdie ukazujú, že priemer vlákna ovplyvňuje variabilitu prahu (26), individuálne rozdiely v prahy bolesti sa očakávajú. Preto, hoci je 42 °C užitočnou indexovou teplotou pre bezpečné expozície, musí sa zvážiť interindividuálna variabilita.

Stiahnuté z journals.physiology.org/journal/jn (2A02:AB04:01D2:5100:65FC:FD92:FC2A:7691) dňa 1. septembra 2026.

Ďalším dôležitým zistením je, že pohlavie bolo spojené s vnímaním bolesti, pričom u žien bola vyššia pravdepodobnosť... vnímať bolesť ako muži. Ako bolo uvedené v predchádzajúcej recenzii, tento výsledok je v súlade s mnohými predchádzajúcimi štúdie, ktoré uvádzajú, že ženy sú citlivejšie ako muži na experimentálnu tepelnú bolesť vrátane kontaktnej teplo a teplá voda (31). Naša štúdia ďalej zistila, že úprava pre potenciálne mediátory celkového množstva telesnej vody a obvodu prstov viedli k zmierneniu súvislosti medzi sexom a bolesťou, čo naznačuje, že tieto opatrenia môžu čiastočne vysvetliť rozdielne vnímanie bolesti medzi pohlaviami. Podľa v predchádzajúcej recenzii, rozdiel v tepelnom vnímaní chladu medzi pohlaviami súvisí so zložením tela a morfologické charakteristiky vrátane hrúbky kože, hustoty mechanoreceptorov a hydratácie, ako aj ako pohlavné hormóny (22). Okrem toho sa v prehľade tiež naznačilo, že rozdiel v tepelnom vnímaní Tepelná bolesť medzi pohlaviami môže odrážať modulačné účinky pohlavných hormónov na termoreceptory. hustota alebo citlivosť, hoci táto súvislosť nie je výlučná (22). Naše výsledky môžu túto súvislosť rozšíriť poznatky tým, že naznačujú, že takéto rozdiely medzi pohlaviami môžu súvisieť aj so zložením tela a morfologické charakteristiky.

Treba poznamenať, že prahy vnímania tepla sú ovplyvnené niekoľkými faktormi, vrátane trvanie expozície (11), miesto na tele (6), vek (14) a subjektívny zážitok. Pretože podrobné vysvetlenia teplo, horúčka a bolesť boli poskytované iba na požiadanie a počet účastníkov, ktorí o to požiadali objasnenie nebolo zaznamenané, účastníci sa mohli v interpretácii týchto pocitov líšiť. Táto metodologická nekonzistentnosť mohla ovplyvniť odhadované prahy vnímania a mala by byť zohľadnené pri interpretácii výsledkov. Naše zistenia preto nemusia byť úplne zovšeobecniteľné na iné orgány lokality alebo vekové skupiny, ako sú deti alebo osoby staršie ako 70 rokov. Avšak v rámci našich najlepších vedomosti, toto je prvá štúdia, ktorá skúma zmeny vnímania a bolesti závislé od teploty prahy pri expozícii milimetrovým vlnám. Veríme, že naša štúdia prehlbuje pochopenie účinky milimetrových vĺn na ľudí a poskytuje ďalšie dôkazy relevantné pre bezpečnosť expozície.

Stiahnuté z journals.physiology.org/journal/jn (2A02:AB04:01D2:5100:65FC:FD92:FC2A:7691) dňa 1. septembra 2026.

Tieto zistenia by sa nakoniec mali interpretovať v kontexte medzinárodných usmernení o expozícii. ICNIRP 2020 uvádza, že lokálny nárast teploty o 41 °C alebo viac môže byť škodlivý, čo je limit stanovený konzervatívne (4). Súčasná štúdia preukázala priemerný prah bolesti 41,9 °C, čo podporuje odôvodnenie tohto limitu. Okrem toho bola bolesť vnímaná pri teplotách nižších, ako sú teploty spôsobujúce poškodenie tkaniva, posilnenie ochrannej hodnoty prahu ICNIRP. Naše pozorovanie, že ženy boli s väčšou pravdepodobnosťou vnímanie bolesti ako u mužov zdôrazňuje dôležitosť zohľadnenia interindividuálnej variability pri stanovenie redukčných (bezpečnostných) faktorov.

DODATOK

Neuplatňuje sa.

GLOSÁR

Neuplatňuje sa.

DOSTUPNOSŤ ÚDAJOV

Údaje budú sprístupnené na základe odôvodnenej žiadosti.

DOPLNKOVÝ MATERIÁL

Doplnkový obrázok S1: [https://doi.org/10.6084/m9.figshare.30539414]

POĎAKOVANIE

Autori ďakujú Dr. Takumovi Ishiharovi za pomoc so štatistickou analýzou a pani Norike Arai za zostavenie zariadenie.

Stiahnuté z journals.physiology.org/journal/jn (2A02:AB04:01D2:5100:65FC:FD92:FC2A:7691) dňa 1. septembra 2026.

GRANTY

Túto štúdiu podporil výskumný grant od Ministerstva vnútra a komunikácií

Číslo grantu JPMI10001.

ZVEREJNENIA

Autori neuvádzajú žiadne konflikty záujmov, finančné ani iné.

VYHLÁSENIA O VYLÚČENÍ ZODPOVEDNOSTI

Neuplatňuje sa.

PRÍSPEVKY AUTOROV

AH a YO navrhli a vypracovali výskum; AY a KU vykonali experimenty; AY a SK analyzoval údaje; AY, SU a KU interpretovali výsledky experimentov; AY pripravil obrázky; AY, SU a SK navrhli rukopis; AY, SU, KU, SK a AH ho upravili a zrevidovali rukopis; a AY, SU, KU, SK, AH a YO schválili konečnú verziu rukopisu.

Stiahnuté z journals.physiology.org/journal/jn (2A02:AB04:01D2:5100:65FC:FD92:FC2A:7691) dňa 1. septembra 2026.

REFERENCIE

1. Hong W, Jiang ZH, Yu C, Hou D, Wang H, Guo C, Hu Y, Kuai L, Yu Y, Jiang Z a kol. Úloha milimetrových vlnných technológií v bezdrôtovej komunikácii 5G/6G.Časopis IEEE Mikrovlnné rúry1: 101–122, 2021. https://doi.org/10.1109/JMW.2020.3035541.

2. Inštitút elektrotechnických a elektronických inžinierov (IEEE). Norma IEEE pre úrovne bezpečnosti s Rešpektovanie vystavenia ľudí elektrickým, magnetickým a elektromagnetickým poliam, 0 Hz až 300 GHz. IEEE Std C95.1-2019 (revízia IEEE Std C95.1-2005/zahŕňa IEEE Std C95.1-2019/korekcia 1-2019):1-312, 2019. https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2019.8859679.

3. Inštitút elektrotechnických a elektronických inžinierov (IEEE). Synopsa normy IEEE C95.1Prekladová pamäť-2019 „Norma IEEE pre úrovne bezpečnosti vzhľadom na vystavenie ľudí elektrickým, magnetickým a Elektromagnetické polia, 0 Hz až 300 GHz.Prístup k IEEE7: 171346–171356, 2019. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2954823.

4. Medzinárodná komisia pre ochranu pred neionizujúcim žiarením (ICNIRP). Usmernenia pre obmedzenie vystavenie elektromagnetickým poliam (100 kHz až 300 GHz).Zdravotná fyzika118: 483–524, 2020. https://doi.org/10.1097/HP.0000000000001210.

5. Dewhirst MW, Viglianti BL, Lora-Michiels M, Hanson M, Hoopes PJ. Základné princípy tepelnej dozimetria a tepelné prahy pre poškodenie tkaniva hypertermiou.Medzinárodný časopis Hypertermia19: 267–294, 2003. https://doi.org/10.1080/0265673031000119006.

6. Defrin R, Shachal-Shiffer M, Hadgadg M, Peretz C. Kvantitatívne somatosenzorické testovanie tepla a prahy tepla a bolesti: Vplyv oblasti tela a testovacej metódy.Klinický časopis bolesti22: 130–136, 2006. https://doi.org/10.1097/01.ajp.0000154048.68273.d8.

18 rokov

Stiahnuté z journals.physiology.org/journal/jn (2A02:AB04:01D2:5100:65FC:FD92:FC2A:7691) dňa 1. septembra 2026.

7. Walters TJ, Blick DW, Johnson LR, Adair ER, Foster KR. Pocit tepla a bolesti vyvolaný v ľudská pokožka milimetrovými vlnami: Porovnanie s jednoduchým tepelným modelom.Zdravotná fyzika78: 259–267, 2000. https://doi.org/10.1097/00004032-200003000-00003.

8. Arens E, Zhang H. Úloha pokožky v ľudskej termoregulácii a pohodlí. In:Tepelné a Vlhkosť Doprava v Vláknitý Materiály. Elsevier, 2006, 560–602. https://doi.org/10.1533/9781845692261.3.560

9. Mancini F, Bauleo A, Cole J, Lui F, Porro CA, Haggard P, Iannetti GD. Mapovanie celého tela priestorová ostrosť pre bolesť a hmat.Ann Neurol75: 917–924, 2014. https://doi.org/10.1002/ana.24179.

10. Medzinárodná komisia pre ochranu pred neionizujúcim žiarením (ICNIRP). Medzery vo vedomostiach Relevantné k „Smerniciam ICNIRP pre obmedzenie vystavenia časovo premenlivému elektrickému, magnetickému a Elektromagnetické polia (100 kHz až 300 GHz).Zdravotná fyzika128: 190–202, 2025. https://doi.org/10.1097/HP.0000000000001944.

11. Foster KR, Ziskin MC, Balzano Q. Prahové hodnoty času a teploty a bezpečnostné faktory pre tepelné Nebezpečenstvá z rádiofrekvenčnej energie nad 6 GHz.Zdravotná fyzika121: 234–247, 2021. https://doi.org/10.1097/HP.0000000000001447.

12. Gibbons JA. Lokalizovaná tepelná urtikária z milimetrových vĺn s frekvenciou 95 GHz.Aerosp Med Hum Perform 88: 586–588, 2017. https://doi.org/10.3357/AMHP.4707.2017.

13. Parker JE, Eggers JS, Tobin PE. Tepelné poranenie ľudí v dôsledku rádiového žiarenia s frekvenciou 94 GHz. Expozície frekvenčnému žiareniu. 2016. https://doi.org/10.21236/ADA631765.

14. Uehara S, Yuasa A, Ushizawa K, Kodera S, Kamimura Y, Hirata A, Otaka Y. Charakteristika vnímanie prúdu vyvolané kontaktnými prúdmi so strednou frekvenciou u zdravých dospelých.Predná strana Neurovedy17: 1145505 (9 strán), 2023. https://doi.org/10.3389/fnins.2023.1145505.

Stiahnuté z journals.physiology.org/journal/jn (2A02:AB04:01D2:5100:65FC:FD92:FC2A:7691) dňa 1. septembra 2026.

15. Vriens J, Nilius B, Voets T. Periférna termosenzácia u cicavcov.Nat Rev Neurosci15: 573–589, 2014. https://doi.org/10.1038/nrn3784.

16. Filingeri D. Neurofyziológia tepelných pocitov v koži.Kompr. fyziológia6: 1429–1491, 2016. https://doi.org/10.1002/CPHY.C150040.

17. Tihanyi BT, Ferentzi E, Beissner F, Köteles F. Neuropsychofyziológia brnenia.Vedomý Cogn58: 97–110, 2018. https://doi.org/10.1016/j.concog.2017.10.015.

18. Yuasa A, Uehara S, Ushizawa K, Kodera S, Arai N, Hirata A, Otaka Y. Tepelný pocit prah a jeho spoľahlivosť indukovaná expozíciou milimetrovým vlnám s frekvenciou 28 GHz.Predná neurologia 18: 1331416 (10 strán), 2024. https://doi.org/10.3389/fnins.2024.1331416.

19. Funahashi D, Hirata A, Kodera S, Foster KR. Plošne priemerovaná hustota prenášaného výkonu na koži povrch ako metrika na odhad zvýšenia povrchovej teploty.Prístup k IEEE6: 77665–77674, 2018. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2883733.

20. Chatterjee I, Wu D, Gandhi OP. Impedancia ľudského tela a prahové prúdy pre vnímanie a bolesť pri analýze rizika kontaktu v pásme VLF-MF.IEEE Trans Biomed EngBME-33: 486–494, 1986. https://doi.org/10.1109/TBME.1986.325735.

21. Williamson A, Hoggart B. Bolesť: Prehľad troch bežne používaných stupníc na hodnotenie bolesti.J Clin Nurs 14: 798–804, 2005. https://doi.org/10.1111/j.1365-2702.2005.01121.x.

22. Greenfield AM, Alba BK, Giersch GEW, Seeley AD. Pohlavné rozdiely v tepelnej citlivosti a vnímanie: Dôsledky pre behaviorálnu a autonómnu termoreguláciu.Fyziologické správanie263: 114126, 2023. https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2023.114126.

23. Diao Y, Joseph W, Poljak D, Giaccone L, Kodera S, Laakso I, Yamazaki K, Li K, Sasaki K, Tanghe E a kol. Nedávne pokroky a budúce perspektívy vo výpočtovej bioelektromagnetike pre

Stiahnuté z journals.physiology.org/journal/jn (2A02:AB04:01D2:5100:65FC:FD92:FC2A:7691) dňa 1. septembra 2026.

Vystavenie Hodnotenia. Bioelektromagnetika 46: e70002, 2025. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/bem.70002.

24. Foroughimehr N, Wood A, McKenzie R, Karipidis K, Yavari A. Návrh a implementácia Špecializovaný systém expozície milimetrovým vlnám na skúmanie radiačných účinkov 5G a Budúce technológie.Senzory24: 2024.

25. Hashimoto Y, Hirata A, Morimoto R, Aonuma S, Laakso I, Jokela K, Foster KR. Na priemer oblasť pre hustotu dopadajúceho výkonu pre limity vystavenia ľudí pri frekvenciách nad 6 GHz.Fyzikálne lekárstvo Biol62: 3124–3138, 2017. https://doi.org/10.1088/1361-6560/aa5f21.

26. Niimi Y, Gomez-Tames J, Wasaka T, Hirata A. Selektívna stimulácia nociceptívnych malých vlákien počas intraepidermálnej elektrickej stimulácie: Experiment a výpočtová analýza.Predná strana Neurovedy16: 1–10, 2023. https://doi.org/10.3389/fnins.2022.1045942.

27. Torebjork HE, LaMotte RH, Robinson CJ. Periférne nervové koreláty rozsahu kožných bolesť a hyperalgézia: Súčasné záznamy senzorických posudzovaní bolesti a u ľudí vyvolané reakcie v nociceptoroch s C-vláknami.J Neurophysiol51: 325–339, 1984. https://doi.org/10.1152/jn.1984.51.2.325.

28. Defrin R, Shachal-Shiffer M, Hadgadg M, Peretz C. Kvantitatívne somatosenzorické testovanie tepla a prahy tepla a bolesti: Vplyv oblasti tela a testovacej metódy.Klinický časopis bolesti22: 130–136, 2006. https://doi.org/10.1097/01.ajp.0000154048.68273.d8.

29. Kodera S, Kimura S, Uehara S, Yuasa A, Ushizawa K, Otaka Y, Hirata A. Estimating the Perception Prahová hodnota elektrostimulácie a ohrevu pre rádiofrekvenčný kontaktný prúd.IEEE Trans Elektromagnetická kompatibilita67: 418–426, 2025. https://doi.org/10.1109/TEMC.2024.3483168.

Stiahnuté z journals.physiology.org/journal/jn (2A02:AB04:01D2:5100:65FC:FD92:FC2A:7691) dňa 1. septembra 2026.

30. Van Rhoon GC, Samaras T, Yarmolenko PS, Dewhirst MW, Neufeld E, Kuster N. CEM43°C Prahové hodnoty tepelných dávok: Potenciálny návod pre úrovne expozície rádiofrekvenčnému žiareniu magnetickou rezonanciou? Eur Radiol23: 2215–2227, 2013. https://doi.org/10.1007/s00330-013-2825-y.

31. Fillingim RB, King CD, Ribeiro-Dasilva MC, Rahim-Williams B, Riley JL. Pohlavie, rod a bolesť: Prehľad nedávnych klinických a experimentálnych zistení.Časopis o bolesti10: 447–485, 2009. https://doi.org/10.1016/j.jpain.2008.12.001.

Stiahnuté z journals.physiology.org/journal/jn (2A02:AB04:01D2:5100:65FC:FD92:FC2A:7691) dňa 1. septembra 2026.

POPIS OBRÁZKA

Obrázok 1.Experimentálne usporiadanie. Ľavý prostredník účastníka bol umiestnený 30 cm od stredu šošovková anténa.

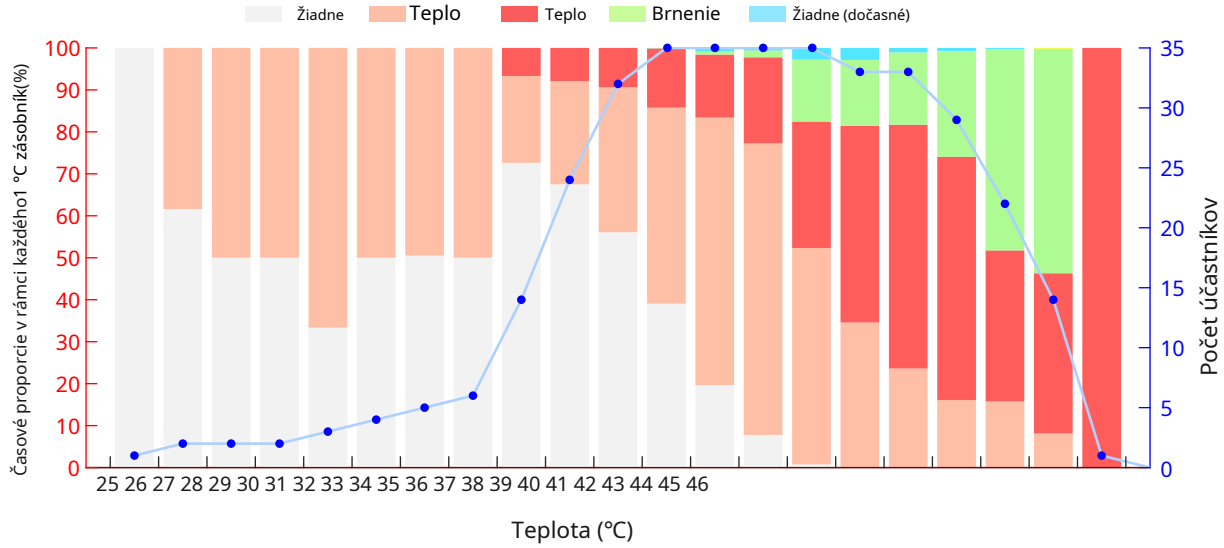
Obrázok 2. (A) Zmeny pocitov závislé od teploty (absolútne hodnoty) s pomerom pocitov v každom rozsahu 1 °C. Vypočítalo sa percento času, počas ktorého sa každý pocit vyskytol pre každý interval 1 °C pre každého účastníka a potom sa vypočítal priemer medzi účastníkmi, ktorí zažili daný teplotný interval. Modré kruhy označujú počet účastníkov, ktorí vnímali pocity v danom rozsahu. Percento vnímania bolesti nie je uvedené, pretože expozícia bola okamžite ukončená po účastníci hlásili bolesť. (B) Prahové hodnoty tepelného vnímania (absolútne hodnoty) pre každý typ pocitu. Čierne plné čiary označujú priemerné prahové hodnoty a farebné stĺpce označujú rozsah prahových hodnôt (minimum až maximum) medzi účastníkmi. Žiadne (dočasné): dočasná strata citlivosti.

Obrázok 3. (A) Zmeny pocitov (relatívne hodnoty) závislé od teploty s pomerom pocitov v každom rozsahu 1 °C. Vypočítalo sa percento času, počas ktorého sa každý pocit vyskytol pre každý interval 1 °C pre každého účastníka a potom sa vypočítal priemer medzi účastníkmi, ktorí zažili daný teplotný interval. Modré kruhy označujú počet účastníkov, ktorí vnímali pocity v danom rozsahu. Percento vnímania bolesti nie je uvedené, pretože expozícia bola okamžite ukončená po účastníci hlásili bolesť. (B) Prahové hodnoty tepelného vnímania (relatívne hodnoty) pre každý typ pocitu. Čierne plné čiary označujú priemerné prahové hodnoty a farebné stĺpce označujú rozsah prahových hodnôt (minimum až maximum) medzi účastníkmi. Žiadne (dočasné): dočasná strata citlivosti.

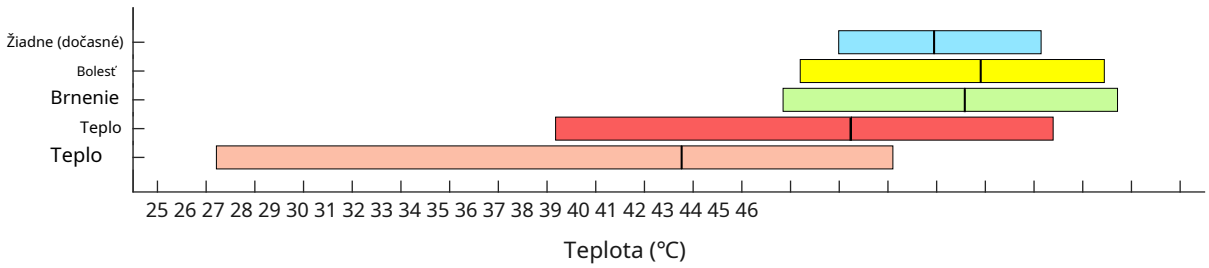
Stiahnuté z journals.physiology.org/journal/jn (2A02:AB04:01D2:5100:65FC:FD92:FC2A:7691) dňa 1. septembra 2026.

Stiahnuté z journals.physiology.org/journal/jn (2A02:AB04:01D2:5100:65FC:FD92:FC2A:7691) dňa 1. septembra 2026.

(A)

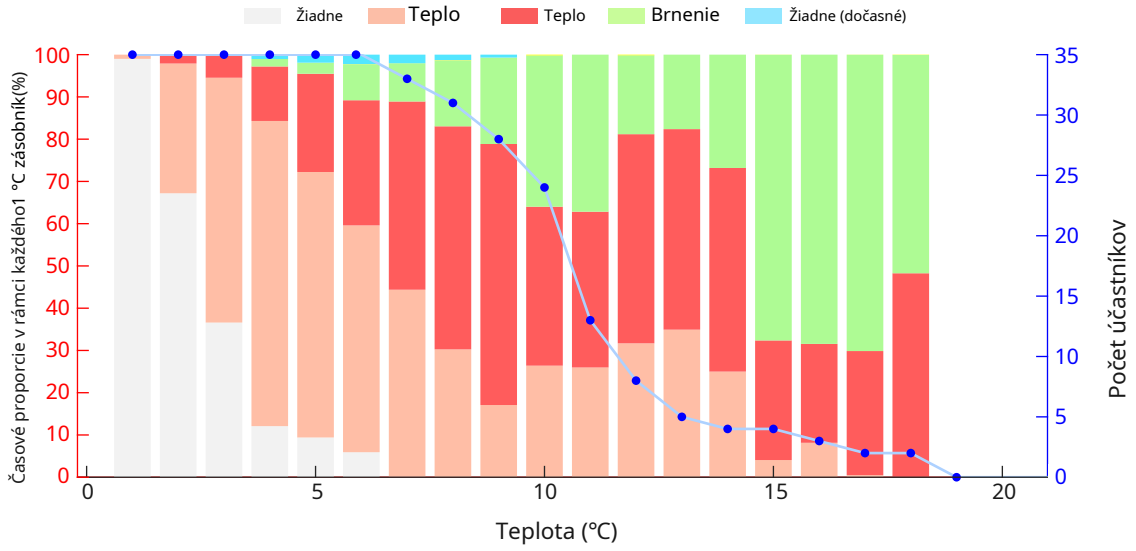


(B)

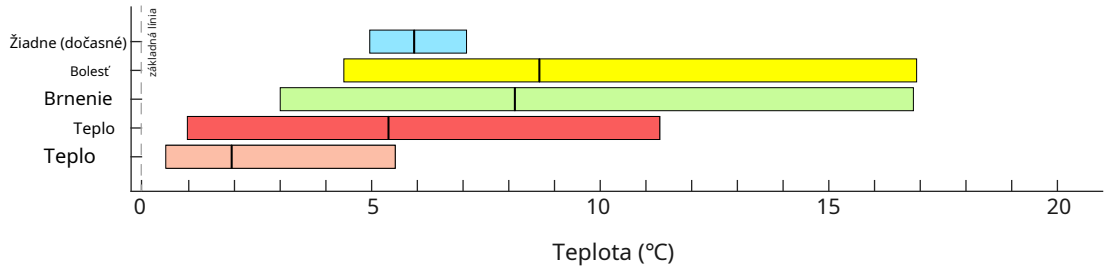


Stiahnuté z journals.physiology.org/journal/jn (2A02:AB04:01D2:5100:65FC:FD92:FC2A:7691) dňa 1. septembra 2026.

(A)



(B)



Stiahnuté z journals.physiology.org/journal/jn (2A02:AB04:01D2:5100:65FC:FD92:FC2A:7691) dňa 1. septembra 2026.

TABULKY

Tabuľka 1.Charakteristiky účastníkov

Charakteristiky	Všetky	Pohlavie		Vekové skupiny (roky)				
		Muž	Žena	20	30	40	50	60
Mužskí účastníci, n	18 rokov			3	6	2	4	3
Účastníčky, n	17			5	4	3	4	1
Vek, roky	41,9	43,8	39,9	26,8	34,0	43,0	55,0	64,5
	[24,0 – 66,0]	[27,0 – 66,0]	[24,0 – 62,0]	[24,0 – 29,0]	[30,0 – 37,0]	[41,0 – 45,0]	[50,0 – 59,0]	[62,0 – 66,0]
Výška, cm	166,5172,0161,0165,4169,9167,6162,4							167,3
	[151,0 – 180,0]	[160,0 – 180,0]	[151,0 – 168,0]	[157,0 – 176,0]	[158,0 – 180,0]	[160,0 – 173,0]	[155,0 – 173,0]	[151,0 – 177,0]
Hmotnosť, kg	59,4	66,0	52,5	54,8	62,1	58,9	61,5	58,4
	[41,7 – 84,6]	[42,2 – 84,6]	[41,7 – 62,6]	[42,3 – 70,0]	[41,7 – 77,2]	[48,9 – 78,1]	[48,0 – 84,6]	[42,2 – 68,7]
Kostrová svalová hmota, kg	42,8	49,5	35,7	40,8	45,0	43,4	41,9	42,6
	[28,9–59,3]	[35,8–59,3]	[28,9–41,9]	[33,2–54,0]	[28,9–59,3]	[33,4–56,0]	[32,9–52,2]	[34,1–50,3]
Index telesnej hmotnosti, kg/m^2	21,4	22.3	20.420.021.4			20.923.2		20,9
	[14,6–28,3]	[14,6–28,3]	[15,9–25,4]	[16,9–25,4]	[15,9–25,0]	[17,3–26,4]	[19,7–28,3]	[14,6–24,1]
Celková telesná voda, l	33,3	38,5	27,8	31,7	35,0	33,8	32,6	33,2
	[22,5 – 46,0]	[27,9 – 46,0]	[22,5 – 32,8]	[26,0 – 41,9]	[22,5 – 46,0]	[26,1 – 43,5]	[25,6 – 40,6]	[26,6 – 39,2]
Percento telesného tuku, %	23,5	19,9	27.2	21.2	23,6	22,0	27.2	22.2
	[10,5 – 36,4]	[10,5 – 36,4]	[15,3 – 35,0]	[12,4 – 35,0]	[10,7 – 34,0]	[14,6 – 27,4]	[14,0 – 36,4]	[10,5 – 34,3]
Dĺžka prsta[a], cm	8.08.3		7,6	8.07.9		8.07.9		8.1
	[7,0–8,8]	[7,5–8,8]	[7,0–8,6]	[7,5–8,7]	[7,0–8,4]	[7,4–8,5]	[7,5–8,6]	[7,0–8,8]
Obvod prsta (PIP)[b], cm	5,7	6.1	5.4	5.4	5.6	5.6	6.1	6.2
	[5,0–6,8]	[5,3–6,8]	[5,0–6,0]	[5,0–6,1]	[5,0–6,5]	[5,0–6,2]	[5,5–6,8]	[5,9–6,5]
Obvod prsta (DIP)[b], cm	4,9	5.2	4.6	4,7	4,7	4,7	5.2	5.2
	[4,0–5,9]	[4,4–5,9]	[4,0–5,1]	[4,0–5,8]	[4,0–5,4]	[4,0–5,3]	[4,7–5,9]	[5,0–5,3]

Hodnoty sú uvedené ako priemer [rozsah].

[a]Vzdialenosť od záhybu prsta po špičku ľavého prostredníka.

[b]Obvod proximálneho a distálneho interfalangeálneho kĺbu ľavého prostredníka. PIP, proximálny interfalangeálny kĺb; DIP, distálny interfalangeálny kĺb.

Stiahnuté z journals.physiology.org/journal/jn (2A02:AB04:01D2:5100:65FC:FD92:FC2A:7691) dňa 1. septembra 2026.

Tabuľka 2.Počet účastníkov podľa dôvodu ukončenia expozície

	Číslo	%
Expozícia po dobu 10	7 (3)	20
minút Vnímaná bolesť	18 (12)	51
Dosiahnuté 44 °C	10 (2)	29
Celkom	35 (17)	100

Hodnoty v zátvorkách označujú počet účastníčok.

Tabuľka 3.Prahové hodnoty vnímania: priemer a rozsah absolútnych a relatívnych teplôt

	Účastníci, n (žena)	Absolútna teplota (°C)			Relatívna teplota (°C)		
		Všetky	Muž	Žena	Všetky	Muž	Žena
Teplo	34 (16)	35,8	36,5	34,9	2.0	2.1	1,8
		[26.2–40.1]	[31,6 – 40,1]	[26,2 – 39,7]	[0,5 – 5,5]	[0,5 – 5,5]	[0,6 – 4,7]
Teplo	34 (17)	39,3	40,2	38,3	5.4	5.6	5.1
		[33,2 – 43,4]	[38,2 – 43,4]	[33,2 – 42,8]	[1,0 – 11,3]	[3.2–8.7]	[1,0 – 11,3]
Brnenie	25 (12)	41,6	42,2	40,9	8.1	7,7	8,6
		[37,8 – 44,7]	[38,8 – 44,7]	[37,8 – 43,7]	[3,0 – 16,8]	[3,8 – 9,5]	[3,0 – 16,8]
Bolesť	18 (12)	41,9	42,4	41,6	8,7	7.4	9.3
		[38,2 – 44,4]	[39,9 – 44,4]	[38,2 – 44,2]	[4,4 – 16,9]	[4.9 – 9.2]	[4,4 – 16,9]
Žiadne	5 (4)	40,9	43,1	40,4	5,9	7,0	5,7
		[39,0 – 43,1]	–	[39,0 – 41,5]	[5,0–7,1]	–	[5,0–7,1]

Hodnoty sú uvedené ako priemer [rozsah].

Tabuľka 4.Faktory spojené s vnímaním bolesti

Premenná	Univariabilná analýza		
	Pomer šancí	95 % interval spoľahlivosti	p-hodnota
Vek	0,99	0,94 – 1,04	0,636
Pohlavie, žena viac ako	4,80	1.15–20.09	0,032
muž Výška, cm	0,96	0,87 – 1,05	0,322
Hmotnosť, kg	0,96	0,89 – 1,02	0,203
Celková telesná voda, l Hmotnosť	0,90	0,81 – 1,01	0,086
kostrového svalstva, kg Index	0,93	0,85 – 1,01	0,083
telesnej hmotnosti, kg/m^2$_2$	0,89	0,71 – 1,12	0,323
Percento telesného tuku,	1,07	0,98 – 1,18	0,147
% dĺžky prsta$_a$, cm	0,37	0,09 – 1,51	0,165
Obvod prsta (PIP)$_b$Obvod	0,32	0,08 – 1,30	0,111
prsta (DIP) , cm$_b$, cm	0,40	0,09 – 1,76	0,226

$_a$Vzdialenosť od záhybu prsta po špičku ľavého prostredníka.

$_b$Obvod proximálneho a distálneho interfalangeálneho kĺbu ľavého prostredníka. CI, interval spoľahlivosti; PIP, proximálny interfalangeálny kĺb; DIP, distálny interfalangeálny kĺb.

Stiahnuté z journals.physiology.org/journal/jn (2A02:AB04:01D2:5100:65FC:FD92:FC2A:7691) dňa 1. septembra 2026.

Tabuľka 5.Pomer šancí pohlavia (žena oproti mužovi) upravený o potenciálnych mediátorov

Mätúci faktor	Viacrozmerná analýza (Žena nad mužom)			Muž	Žena
	Pomer šancí	95 % interval spoľahlivosti	p-hodnota	Priemer (rozsah)	Priemer (rozsah)
Celková telesná voda, l	6.23	0,40 – 98,0	0,193	38,5 (27,9 – 46,0)	27,8 (22,5 – 32,8)
Obvod prsta (DIP), cm	5,34	0,84 – 33,75	0,075	5,2 (4,4 – 5,9)	4,6 (4,0–5,1)

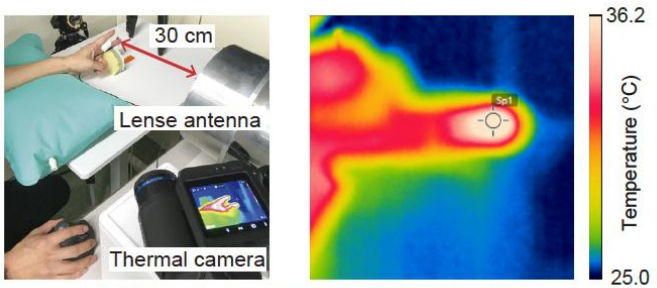
CI, interval spoľahlivosti; DIP, distálny interfalangeálny kĺb.

Stiahnuté z journals.physiology.org/journal/jn (2A02:AB04:01D2:5100:65FC:FD92:FC2A:7691) dňa 1. septembra 2026.

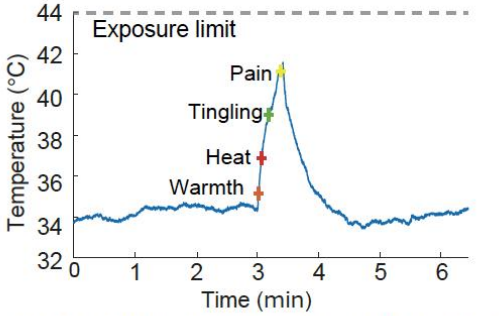
Vnímanie bolesti vyvolané

expozícia milimetrovým vlnám

METÓDY

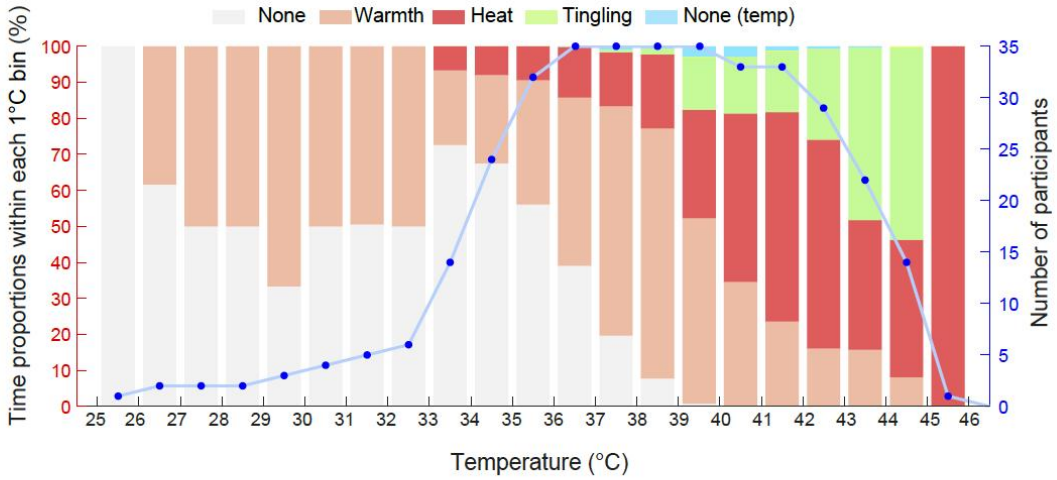


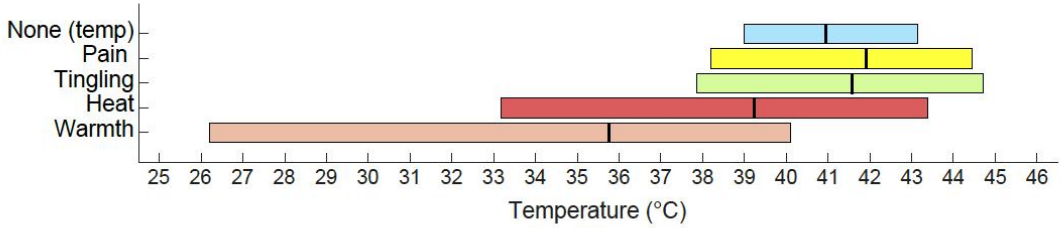
Millimeter-waves exposure on the fingertip



Changes in fingertip temperature and perception

VÝSLEDKY





Mean and range of thresholds

ZÁVER

Prahy vnímania sa zvyšovali v tomto poradí: teplo < horúčava < brnenie < bolesť. Priemerný prah bolesti bol 41,9 °C. Je pozoruhodné, že ženy vykazovali výrazne vyššiu citlivosť na bolesť ako muži.

Stiahnuté z journals.physiology.org/journal/jn (2A02:AB04:01D2:5100:65FC:FD92:FC2A:7691) dňa 1. septembra 2026.