

Narażenie na promieniowanie jonizujące rąk chirurga w czasie operacji chirurgii ręki

Exposure of the Surgeon's Hands to Radiation During Hand Surgery Procedures

Andrzej Żyłuk^{1(A,B,C,D,E,F)}, Piotr Puchalski^{1(B,C,D)}, Zbigniew Szlosser^{1(B,C,D)},
Paweł Dec^{2(C,D,F)}, Joanna Chraćol^{2(C,D)}

¹ Klinika Chirurgii Ogólnej i Chirurgii Ręki, Pomorski Uniwersytet Medyczny, Szczecin, Polska

² Studenckie Koło Naukowe przy Klinice Chirurgii Ogólnej i Chirurgii Ręki, Polska

¹ Department of General and Hand Surgery, Pomeranian Medical University in Szczecin, Poland

² Student Scientific Club at the Department of General and Hand Surgery, Poland

STRESZCZENIE

Wstęp. Celem pracy była ocena czasu ekspozycji rąk chirurga na promieniowanie X i obliczenie dawki równoważnej pochłoniętej w trakcie operacji złamań w obrębie ręki i nadgarstka, wykonywanych w asyście mobilnego aparatu rtg.

Materiał i metody. Dane określone w celu pracy pozyskano po operacjach 278 chorych ze złamaniami w obrębie palców ręki, śródreżca, nadgarstka i dalszego końca kości promieniowej. 218 operacji (78%) wykonano metodą przezskórną, a 60 (22%) metodą otwartą. Dane o czasie i dawce promieniowania pozyskiwano z wyświetlacza mobilnego aparatu rtg, gdzie były one automatycznie generowane. Były one przypisywane do konkretnego pacjenta, typu jego złamania i użytej metody operacyjnej oraz do operującego chirurga.

Wyniki. Zespolecia złamań dalszego końca kości promieniowej wymagały dłuższego czasu ekspozycji (śr. 61 sek.), niż złamań kości nadgarstka, śródreżca i paliczków – 38 i 32 sek., co było związane z pochłonięciem statystycznie istotnie większych dawek równoważnych. Operacje dalszego końca kości promieniowej wykonywane metodą otwartą były związane ze statystycznie istotnie większą dawką równoważną (0,41 mSv), niż operacje techniką przezskórną (0,3 mSv). Operacje złamań kości nadgarstka i śródreżca wykonywane metodą otwartą wiązały się z mniejszą dawką równoważną (0,34 mSv), niż operacje techniką przezskórną (0,37 mSv), różnice nieistotne. Operacje złamań paliczków ręki wykonywane metodą otwartą wiązały się z mniejszą dawką równoważną (0,13 mSv), niż operacje techniką przezskórną (0,24 mSv), różnice statystycznie nieistotne. Stwierdzono statystycznie istotne różnice w czasie ekspozycji i dawkach równoważnych między 4 chirurgami biorącymi udział w badaniu, ale nie wykazano jednoznacznej zależności między tymi parametrami a stażem ich pracy.

Wnioski. 1. Operacje chirurgii ręki wykonywane przy asyście mobilnego aparatu rtg są związane z niewielkim narażeniem rąk chirurgów na promieniowanie. 2. Pochłonięta dawka równoważna zależy od rodzaju operowanego złamania, techniki operacyjnej i – w pewnym stopniu – od stażu pracy chirurga.

Słowa kluczowe: narażenie na promieniowanie, złamania – leczenie operacyjne, fluoroskopia

SUMMARY

Background. The objective of the study was to assess the time of exposure of the surgeon's hands to radiation and calculate of the equivalent dose absorbed during surgery of hand and wrist fractures with C-arm fluoroscope guidance.

Material and methods. The necessary data specified by the objective of the study were acquired from operations of 287 patients with fractures of fingers, metacarpals, wrist bones and distal radius. 218 operations (78%) were percutaneous procedures and 60 (22%) were performed by open method. Data on the time of exposure and dose of radiation were acquired from the display of the fluoroscope, where they were automatically generated. These data were assigned to the individual patient, type of fracture, method of surgery and the operating surgeon.

Results. Fixations of distal radial fractures required longer times of radiation exposure (mean 61 sec.) than fractures of the wrist/metacarpals and fingers (38 and 32 sec., respectively), which was associated with absorption of significantly higher equivalent doses. Fixations of distal radial fractures by open method were associated with statistically significantly higher equivalent doses (0.41 mSv) than percutaneous procedures (0.3 mSv). Fixations of wrist and metacarpal bone fractures by open method were associated with lower equivalent doses (0.34 mSv) than percutaneous procedures (0.37 mSv), but the difference was not significant. Fixations of finger fractures by open method were associated with lower equivalent doses (0.13 mSv) than percutaneous procedures (0.24 mSv), the difference being statistically non-significant. Statistically significant differences in exposure time and equivalent doses were noted between 4 surgeons participating in the study, but no definitive relationship was found between these parameters and surgeons' employment time.

Conclusions. 1. Hand surgery procedures under fluoroscopic guidance are associated with mild exposure of the surgeons' hands to radiation. 2. The equivalent dose was related to the type of fracture, operative technique and – to some degree – to the time of employment of the surgeon.

Key words: radiation exposure, fractures – operative treatment, fluoroscopy

WSTĘP

W ostatnich 10 latach obserwuje się znaczny wzrost liczby operacji wykonywanych z użyciem mobilnych aparatów rtg (ramię C, fluoroskop). Rozwój techniki pozwolił na znaczną miniaturyzację tych urządzeń i łatwiejsze ich użycie w warunkach sali operacyjnej. Operacja wykonywana pod kontrolą fluoroskopu umożliwia nastawianie i zespalanie nieraz bardzo skomplikowanych złamań. Ponadto, dobra wizualizacja i lokalizacja odłamów kości pozwala na zmniejszenie pola operacyjnego lub nawet wykonywanie zespołów przeskórnymi, co wpisuje się w ogólną tendencję do minimalizowania inwazyjności zabiegów chirurgicznych. Jednocześnie z niewątpliwymi korzyściami przy stosowaniu mobilnych aparatów rtg, pozostaje problem narażenia personelu na radiację. Niekorzystne skutki tego narażenia są dobrze udokumentowane w piśmiennictwie i obejmują zwiększone ryzyko rozwoju raka skóry, zaćmy, raka tarczycy i białaczki [1]. Dotyczy to szczególnie personelu medycznego pracującego w sali operacyjnej i używającego aparatury emitującej promienie X. Ze zrozumiałych względów lekarze ortopedzi są grupą najbardziej narażoną w trakcie operacji. W jednej z prac oceniono, że w tej grupie zawodowej ryzyko zachorowania na nowotwory złośliwe zależne od promieniowania jonizującego jest 5 razy większe, niż w przeciętnej populacji [2].

W piśmiennictwie radiologicznym używa się kilku pojęć związanych z promieniowaniem jonizującym wyemitowanym przez źródło i pochłoniętym przez różne części ciała w trakcie procedur radiologii zabiegowej. Używa się także różnych jednostek do wyrażenia tych pojęć i porównywania ich z innymi. Zdefiniujmy te pojęcia:

- a. Radioaktywność (natężenie emisji, natężenie promieniowania) jest wyrażana w bekerelach (Bq), gdzie 1 Bq oznacza 1 rozpad atomowy na sekundę. Ponieważ bekerel jest jednostką bardzo małą, bywa zastępowany przez kiur (Curie, Ci), gdzie $1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$.
- b. Ekspozycja (X) jest wielkością dozymetryczną stosowaną tylko dla promieniowania elektromagnetycznego (X i γ). Jest to wielkość ładunku elektrycznego powstałego w efekcie jonizacji powietrza przez przechodzące promieniowanie.
- c. Dawka pochłonięta (ang. absorbed dose, AD) jest to średnia energia przekazana materii przez promieniowanie jonizujące. Jest ona wyrażana w grayach (Gray, Gy), gdzie 1 Gy oznacza pochłonięcie energii 1 dżula (J) przez 1 kg masy ($1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$). Dawka pochłonięta może być także wyrażana w radach (rad, $1 \text{ rad} = 1 \text{ erg/g}$), a przelicznik między

BACKGROUND

The number of operations performed using the mobile X-ray device (C-arm, fluoroscope) has increased significantly over the past 10 years. The development of technology has allowed significant reduction of the size of these devices and their easier use in the operating room.

Fluoroscopy-guided procedures enable reposition and fixation even of very complex fractures. In addition, good visualization and localization of bone fragments allows reduction of the operating field and percutaneous fixation, which is consistent with the general tendency towards mini-invasive surgical procedures. Despite clear benefits of using fluoroscopes, radiation exposure of the staff still remains a problem. Adverse effects of this hazard are well documented in the literature and include increased risk of skin cancer, cataract, thyroid cancer and leukemia [1]. This concerns particularly medical staff working in the operating room and using devices emitting X-rays. Obviously, orthopedic surgeons are the most exposed group during such operations. One study estimated that in this specific professional group the risk of developing radiation-dependent cancer is five times higher than in the general population [2].

Several terms are used in the radiological literature regarding ionizing radiation emitted by the source and absorbed by different parts of the body during interventional radiology procedures. Also, different units are used to express these concepts and to compare them with other. These terms are defined below:

- a. Radioactivity (emission intensity, radiation intensity) is expressed in becquerels (Bq), where 1 Bq is one nuclear disintegration per second. Since a becquerel is a very small unit, it is sometimes replaced by a curie (Ci), where $1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$.
- b. Exposure (X) is the dosimetric quantity used only for electromagnetic radiation (X and γ). It is the size of the electric charge occurring as a result of ionization of air by radiation.
- c. Absorbed dose (AD) is the mean energy imparted to matter by ionizing radiation. It is expressed in grays (Gy), where 1 Gy is one joule (J) of energy absorbed by 1 kg of mass ($1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$). The absorbed dose can also be expressed in rads ($1 \text{ rad} = 100 \text{ erg/g}$), and the conversion between these units is as follows: $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$.
- d. Equivalent dose (ED). Because different types of radiation have different biological effects, and the tissues and organs have different sensitivity to radiation, the concept of dose equivalent takes these differences into account. The equivalent dose is the absorbed dose in a particular tissue or organ

- tymi jednostkami jest następujący: $1\text{Gy}=100\text{ rad}$.
- d. Dawka równoważna (ang. equivalent dose, ED). Ponieważ różne rodzaje promieniowania wywierają różne efekty biologiczne, a tkanki i narządy wykazują różną wrażliwość na promieniowanie, wprowadzono pojęcie dawki równoważnej, uwzględniającej te odmienności. Dawka równoważna jest to dawka pochłonięta w konkretnej tkance lub narządzie, obliczana dla określonego rodzaju promieniowania. Oblicza się ją mnożąc uśrednioną dawkę pochłoniętą w tkance przez tzw. współczynnik wagowy promieniowania (w) i wyraża w sievertach (Sievert, Sv). Dla promieniowania X przyjęto współczynnik wagowy $w=1$, zatem w określonej tkance lub narządzie dawka równoważna jest równa dawce pochłoniętej ($1\text{ Gy} = 1\text{ Sv}$). Dawka pochłonięta może być także wyrażana w remach (rem), a przelicznik między tymi jednostkami jest następujący: $1\text{Sv}=100\text{ rem}$.
 - e. Dawka wejściowa (ang. entry surface dose, ESD) lub dawka pochłonięta w powietrzu. Jest to dawka promieniowania pochłonięta w powietrzu, w punkcie styku wiązki promieniowania ze skórą pacjenta (lub rękami operatora, w przypadku radiologii zabiegowej), z uwzględnieniem promieniowania rozproszonego. Wyrażana jest w grayach (Gy).
 - f. Iloczyn dawki wejściowej i powierzchni (ang. dose area product, DAP). Nowoczesne aparaty rtg mają wbudowane liczniki podające automatycznie wartości powierzchniowej dawki wejściowej pomnożonej przez określone pole powierzchni, na które pada wiązka promieniowania (Ryc. 1).
- and it is calculated for a particular type of radiation. The averaged absorbed dose in tissue is multiplied by the so-called radiation weighting factor (w) and is expressed in sieverts (Sv). For X-rays, the weighting factor has been set to 1; accordingly, for a particular tissue or organ the equivalent dose is equal to the absorbed dose ($1\text{ Gy} = 1\text{ Sv}$). The absorbed dose can also be expressed in rem, and the conversion between these units is: $1\text{Sv} = 100\text{ rem}$.
- e. Entrance surface dose (ESD), or absorbed dose in air. It is the radiation dose absorbed in air, at the point of contact between the axis of radiation beam and the patient's skin (or operator hands, in the case of interventional radiology), taking into account backscattered radiation. It is expressed in grays (Gy).
 - f. The product of the absorbed dose and the surface area (dose area product, DAP). Modern X-ray apparatus have built-in automatic counters of the absorbed dose (usually calibrated to ESD) multiplied by the specific surface area onto which the beam falls (Fig. 1). This quantity is mainly used for determining the patient's exposure to radiation during the procedure and is expressed in centigrays $\times\text{ cm}^2$ (cGycm²). The dose absorbed by the patient's skin during an operation is calculated by dividing DAP by the area of patient's body (or its part) that is covered by the X-ray beam. In hand surgery procedures, it is the surface of the patient's hand lying on the operating table, onto which the fluoroscope is aimed. For the surgeon,



Ryc. 1. Monitor aparatu rtg z wyświetlonymi wartościami czasu ekspozycji i DAP w trakcie operacji usunięcia bliższego szeregu kości nadgarstka z powodu zwyrodnienia stawu promieniowo-nadgarstkowego

Fig 1. Display of the fluoroscope unit showing exposure time and DAP values recorded during a proximal row carpectomy performed for radiocarpal arthritis

Wielkość ta służy głównie do określania ekspozycji pacjenta na promieniowanie w trakcie zabiegu. i jest wyrażana w centygrayach razy cm^2 (cGycm²). Dawka pochłonięta przez skórę pacjenta w trakcie operacji jest obliczana przez podzielenie DAP przez pole powierzchni wiązki padającej na ciało pacjenta (lub jego część). W przypadku operacji chirurgii ręki, będzie to powierzchnia ręki pacjenta leżąca na stoliku operacyjnym, na który pada promieniowanie mobilnego aparatu rtg. Dla operującego chirurga będzie to powierzchnia jego dwóch rąk. Ponieważ część promieniowania odbija się od ciała pacjenta, do obliczania dawki pochłoniętej na podstawie DAP stosuje się jeszcze tzw. współczynnik rozproszenia wstecznego BSF (ang. back scatter factor), którego wartość dla radiologii zabiegowej wynosi 1,4 (wartość niemianowana).

Obliczanie dawki pochłoniętej na podstawie wartości DAP jest tylko orientacyjne i dlatego dla pracowników narażonych na promieniowanie jonizujące wprowadzono indywidualne dozymetry, pozwalające na dokładniejszy pomiar pochłoniętej dawki promieniowania, która zależy od następujących czynników:

- czas ekspozycji,
- odległość od źródła promieniowania (lampy),
- pozycja źródła promieniowania,
- pozycja osoby narażonej na promieniowanie,
- użycie zabezpieczeń,
- nasilenie (natężenie) emisji
- geometria wiązki promieniowania generowanego przez lampę.

Dozymetry są umieszczane na różnych częściach ciała, ponieważ ich ekspozycja na promieniowanie jest różna. Dla chirurga operującego pod kontrolą mobilnego aparatu rtg, największe narażenie dotyczy rąk, które są ekspozowane na bezpośrednie promieniowanie, mniejsze jest narażenie innych nieosłoniętych części ciała, a najmniejsze tych, pokrytych fartuchem zabezpieczającym. Dlatego wprowadzono dwa rodzaje dozymetrów: w formie pierścionka nakładanego na palec chirurga, mierzącego dawkę pochłoniętą przez ręce i w formie plakietki zapinanej na piersi, pod fartuchem zabezpieczającym (Ryc. 2). Wartości odczytywane z dozymetrów stanowią podstawę do określania rocznej dawki równoważnej. Przyjęta w Polsce dopuszczalna roczna dawka równoważna dla rąk pracowników biorących udział w procedurach radiologii zabiegowej wynosi 500 mSv.

Celem pracy była ocena wielkości czasu ekspozycji na promieniowanie X i dawki równoważnej w trakcie operacji złamań w chirurgii ręki, w zależności od typu złamania i metody operacji oraz lat pracy operującego chirurga.

it is the surface of both his or her hands. As a proportion of the radiation is reflected off from the patient's body, a backscatter factor (BSF) has to be taken into account to calculate the absorbed dose on the basis of the DAP, and for interventional radiology it has been set at 1.4 (unitless).

The assessment of absorbed dose based on DAP values will only yield approximations, so individual dosimeters for the staff exposed to ionizing radiation are in use to give a more precise measure of the absorbed dose, which depends on:

- time of exposure
- distance from radiation source (X-ray tube)
- position of radiation source,
- position of exposed person,
- use of shields,
- emission strength,
- geometry of the radiation beam emitted by the X-ray tube

Dosimeters are placed over various body parts, because their exposure to the radiation varies. The hands of the surgeon operating under fluoroscopic (portable X-ray device, C-arm) guidance are the most exposed parts. Exposure levels of other unprotected parts are lower and of those covered by a lead apron and other shields are the lowest. Because of this, two types of dosimeters are routinely used: the ring dosimeter, worn on a finger, which measures radiation exposure of the hands, and breast-badge dosimeters located under the lead apron for recording whole body exposure (Fig. 2). Dosimeter readings are the basis for the assessment of the yearly equivalent dose. The acceptable (recommended) equivalent dose for the hands of staff involved in interventional radiology procedures in Poland is 500 mSv per year.

The objective of this study was to investigate the relationship between X-ray exposure time and equivalent dose absorbed during hand fracture fixation vs. the type of the fracture, type of surgery and surgeons' employment time.



Ryc. 2. Dozymetry używane w czasie operacji w asyście fluoroskopu: w formie pierścienka nakładanego na palec i plakietki zapinanej na piersi, pod fartuchem zabezpieczającym

Fig 2. Dosimeters used during the fluoroscope-guided procedures: a ring dosimeter placed on the finger and a breast-badger dosimeter placed under the apron shield

MATERIAŁ I METODY

Analizie poddano dane uzyskane po operacjach złamań kości w obrębie kończyny górnej, wykonywanych w klinice autorów u 278 chorych w okresie 7 miesięcy 2012 roku. W tej grupie było 149 kobiet (54%) i 129 mężczyzn (46%) w wieku śr. 46 lat (zakres 18-86). Złamania dotyczyły dalszego końca kości promieniowej u 156 osób (56%), kości śródreżcza i nadgarstka u 64 (23%), i palców ręki u 58 (21%). Dwieście osiemnaście operacji (78%) wykonano metodą przezskórną, a 60 (22%) metodą otwartą. Większość operacji (minimum 15, maksimum 99) wykonywało 4 chirurgów o stażu pracy od 2 do 7 lat: chirurg (1) – 7 lat, chirurg (2) – 5 lat, chirurg (3) – 3 lata i chirurg (4) – 5 lat. Dane o czasie i dawce emisji (DAP) pozyskiwano po zakończeniu operacji z wyświetlacza mobilnego aparatu rtg, gdzie były one automatycznie generowane. Były one przypisywane do pacjenta, rodzaju złamania, metody operacyjnej oraz operującego chirurga.

Przeliczenie dawki wyemitowanej DAP wyrażoną w $cGycm^2$, na dawkę równoważną [ED] wyrażoną w mSv następowało według wzoru:

MATERIAL AND METHODS

We analyzed data from fixation surgeries of upper extremity fractures in 278 patients operated on at our department over seven months of the year 2012. The study group included 149 women (54%) and 129 men (46%) at a mean age of 46 years (range 18-86). Distal radial fractures occurred in 156 patients (56%), metacarpal and wrist bones fractures in 64 cases (23%), and phalangeal fractures in 58 persons (21%). Percutaneous fixation was used in 218 (78%) and the open technique in 60 cases (22%). Most of the procedures were performed by 4 surgeons whose employment times ranged from 2 to 7 years: surgeon (1) – 7 years, surgeon (2) – 5 years, surgeon (3) – 3 years and surgeon (4) – 5 years. Data on exposure (fluoroscopic) time and dose area product (DAP) were acquired after completion of the operation from the display of the fluoroscope, where they were automatically generated. They were attributed to the individual patient, type of fracture, type of surgery and a specific surgeon.

Conversion of the dose area product (DAP), expressed in $cGycm^2$, into equivalent dose (ED), expressed in mSv, was done according to the formula:

$$ED = DAP/400 \times 1,4 \times 10 = DAP \times 0,035,$$

gdzie 400 oznaczało przeciętne pole powierzchni dwóch rąk chirurga ($2 \times 10\text{cm} \times 20\text{cm} = 400 \text{cm}^2$), 1,4 współczynnik rozproszenia wstecznego BSF, a 10 przelicznik z cGy na mSv (1 centy=10 mili). Ponieważ oprócz DAP wszystkie pozostałe wartości były stałe, praktycznie dawkę równoważną obliczano mnożąc DAP przez 0,035.

Istotność statystyczną różnic między dawkami równoważnymi dla operacji różnych złamań, operacji metodą otwartą i zamkniętą oraz między czterema chirurgami obliczano za pomocą testu U Mann-Whitney'a, przyjmując współczynnik ufności, $p < 0,05$ jako wskazujący na różnicę istotną statystycznie.

WYNIKI

Wyniki obliczeń podano w Tabeli 1. Operacje złamania dalszego końca kości promieniowej wymagały dłuższego czasu ekspozycji (włączania aparatu rtg na śr. 61 sek.), niż operacje złamań kości nadgarstka, śródreżca – 38 sek. i paliczków – 32 sek., co było związane z większą wyemitowaną i równoważną dawką promieniowania. Czas ekspozycji w trakcie operowania złamań dkkp był statystycznie istotnie dłuższy, niż w trakcie pozostałych operacji ($p < 0,05$). Operacje dalszego końca kości promieniowej wykonywane metodą otwartą, były związane ze statystycznie istotnie dłuższym czasem ekspozycji (61 sek. vs 48 sek.), większą dawką równoważną (0,41 mSv), niż operacje techniką przezskórną (0,3 mSv). Operacje złamań kości nadgarstka i śródreżca wykonywane metodą otwartą wymagały krótszego czasu ekspozycji (38 sek.) i wiązały się z mniejszą dawką równoważną (0,34 mSv), niż operacje techniką przezskórną (43 sek., 0,37 mSv), jednak te różnice nie były znamienne. Operacje złamań paliczków ręki wykonywane metodą otwartą wymagały krótszego czasu ekspozycji (32 sek.) i wiązały się z mniejszą dawką równoważną (0,13 mSv), niż operacje techniką przezskórną (42 sek., 0,24 mSv), jednak też te różnice nie były statystycznie istotne.

Stwierdzono statystycznie istotne różnice w czasie ekspozycji i dawkach równoważnych między 4 chirurgami (Tab. 2), ale nie wykazano jednoznacznej zależności między tymi parametrami a stażem ich pracy, z wyjątkiem chirurga 3., który pracował najkrócej, a jego operacje wiązały się z najdłuższą ekspozycją i największymi dawkami równoważnymi, statystycznie istotnie różnymi od pozostałych operatorów ($p < 0,05$).

$$ED = DAP/400 \times 1,4 \times 10 = DAP \times 0,035,$$

where 400 corresponds to the mean surface area of the surgeon's both hands ($2 \times 10\text{cm} \times 20\text{cm} = 400 \text{cm}^2$), 1.4 is a back-scatter factor (BSF), and 10 is the cGy-to-mSv conversion factor (1 centi=10 milli). The equivalent dose was thus calculated just by multiplying DAP by 0.035 because all other values were constant.

The Mann-Whitney U test was used for assessing statistical significance of differences between EDs for open and percutaneous technique groups and between the participating surgeons. A p-value < 0.05 was assumed as statistically significant.

RESULTS

Results of the calculations are shown in Table 1. Distal radial fractures fixation required longer exposure times (average fluoroscopy time 61 sec.) than wrist and metacarpal bone fixation (38 sec.) and phalangeal fracture procedures (32 sec.), which correlated with higher emitted dose and equivalent dose of radiation. Exposure times during distal radial fracture fixation were significantly longer than during the fixation of other types of fracture ($p < 0.05$). Open distal radial fractures fixation required significantly longer fluoroscopy times (61 sec. vs 48 sec.) and were associated with higher EDs (0.41 mSv vs. 0.3 mSv) than percutaneous procedures. Open procedures in wrist and metacarpal fractures were associated with shorter fluoroscopy times (38 sec.) and lower EDs (0.34 mSv) than percutaneous operations (43 sec., 0.37 mSv, respectively), but the difference was not statistically significant. Open phalangeal fixation required shorter fluoroscopy times (32 sec.) and was associated with lower EDs (0.13 mSv) than the percutaneous technique (42 sec., 0.24 mSv, respectively); these differences were not significant, either.

Statistically significant differences between exposure times and equivalent doses were found between the four surgeons (Tab. 2). There was no correlation between those parameters and surgeons' employment time, except surgeon 3., whose employment was the shortest. Procedures performed by this surgeon required the longest fluoroscopic times and were associated with the greatest EDs, which was significantly different from the others ($p < 0.05$).

Tab. 1. Wartości badanych parametrów: czasu ekspozycji, dawki pochłoniętej DAP i równoważnej, w zależności od rodzaju złamania i sposobu operacji

Tab. 1. Values of the variables analyzed in the study: exposure time, DAP and equivalent doses, in relation to type of fracture and surgical method

Badane parametry/ rodzaj złamania Parameters measured/ type of fracture	Złamanie dalszego końca kości promieniowej Distal radial fractures		
Metoda operacji/ Method of operation	Metoda otwarta Open n=32	Metoda przezskórna Percutaneous n=124	p
Czas ekspozycji [sek.] Średnia i zakres Exposure time [sec] Mean and range	61 6 - 257	48 10 - 124	<0.05
Dawka pochłonięta DAP Absorbed dose (DAP) [cGycm ²]	11.7 1 - 40	8.5 1-83	<0.05
Dawka równoważna Equivalent dose [mSv]	0.41 0.03 - 1.4	0.3 0.03 - 2.9	<0.05
Badane parametry/ rodzaj złamania Parameters measured/ type of fracture	Złamanie kości śródreżca lub nadgarstka Metacarpal or wrist fractures		
Metoda operacji/ Method of operation	Metoda otwarta Open n=13	Metoda przezskórna Percutaneous n=51	p
Czas ekspozycji [sek.] Średnia i zakres Exposure time [sec] Mean and range	38 3 - 115	43 10 - 124	ns
Dawka pochłonięta DAP Absorbed dose (DAP) [cGycm ²]	9.5 1 - 36	10.5 1 - 103	ns
Dawka równoważna Equivalent dose [mSv]	0.34 0.03 - 1.2	0.37 0.03 - 3.6	ns
Badane parametry/ rodzaj złamania Parameters measured/ type of fracture	Złamanie kości paliczków ręki Phalangeal fractures		
Metoda operacji/ Method of operation	Metoda otwarta Open n=10	Metoda przezskórna Percutaneous n=48	p
Czas ekspozycji [sek.] Średnia i zakres Exposure time [sec] Mean and range	32 4 - 126	42 14 - 165	ns
Dawka pochłonięta DAP Absorbed dose (DAP) [cGycm ²]	3.8 1 - 13	6.8 1 - 30	ns
Dawka równoważna Equivalent dose [mSv]	0.13 0.03 - 0.4	0.24 0.03 - 1.0	ns

DYSKUSJA

Uzyskane w pracy wyniki stanowią tylko ilustrację problemu, jakim jest narażenie lekarzy specjalności zabiegowych na promieniowanie jonizujące, w trakcie operacji w asyście mobilnego aparatu rtg. Zastosowano uproszczoną metodykę opartą na pomiarze parametru charakteryzującego nasilenie emisji promieniowania, jakim jest iloczyn dawki wejściowej i powierzchni – DAP. Jest to wielkość generowana automatycznie przez komputer aparatu rtg

DISCUSSION

The results of this study illustrate the problem of surgeons' exposure to radiation during fluoroscopy-guided operations. A simplified methodology was used based on the measurement of a parameter characterizing radiation intensity – the dose area product (DAP) - which is a product of the entry dose and the area. DAP was automatically generated by the computer of the fluoroscope in the working mode and shown on the display. The actually absorbed

Tab. 2. Zależność średnich dawek równoważnych od czasu pracy 4 chirurgów biorących udział w badaniu i wartości skumulowanych dawek w czasie 7 miesięcy badania

Tab. 2. Relationship between equivalent doses (ED) and employment period of the 4 surgeons participating in the study and cumulative doses received during the 7 months of the study

Liczba wykonanych operacji i staż pracy chirurgów/ Number of procedures and surgeon's employment time	Średnia dawka równoważna na 1 operację [mSv]/ Mean ED per procedure [mSv]	Skumulowana dawka równoważna przez okres 7 mies. badania i przeliczona na okres 1 roku mSv] / Cumulative EDs received during 7 months of the study, extrapolated for 1 year (in brackets) [mSv]
Chirurg / surgeon 1 n=99, 7 lat/years	0.2	20 (34)
Chirurg / surgeon 2 n=82, 5 lat/years	0.15	12 (20)
Chirurg / surgeon 3 n=54, 3 lata/years	0.65	35 (59)
Chirurg / surgeon 4 n=15, 5 lat/years	0.4	6 (10)

i wyświetlana w trakcie jego pracy. Nie mierzono dawek faktycznie pochłoniętych, które są rejestrowane przez dozymetry. Jednak zmienna, jaką jest DAP, umożliwiła obliczenie orientacyjnej dawki równoważnej działającej na ręce chirurga umieszczone bezpośrednio w wiązce promieni z lampy aparatu. Uzyskane wyniki wskazują, że łączna dawka pochłonięta przez ręce 4 chirurgów, którzy w ciągu 7 miesięcy wykonali 250 operacji wynosiła 73 mSv (Tabela 2). Ekstrapolując tę wartość na okres 1 roku, otrzymamy dawkę pochłoniętą 125 mSv, co stanowi 25% dopuszczalnej rocznej dawki równoważnej dla 1 osoby. Z analizy prac, w których brano pod uwagę dawki faktycznie pochłonięte (odczyty z dozymetrów) wynika, że są one niższe, niż te obliczane na podstawie wartości DAP [1,3].

Międzynarodowa Komisja Ochrony przed Promieniowaniem przyjmuje liniową, bezprogową hipotezę wpływu promieniowania jonizującego, według której wpływ na organizm ludzki może mieć dowolnie mała dawka promieniowania jonizującego, a ryzyko poważnego zachorowania oraz skutki biologiczne radiacji są proporcjonalne do sumy pochłoniętych dawek. Takie sformułowanie problemu nie pozwala na stwierdzenie, że dawki dopuszczalne są zupełnie nieszkodliwe, ale określone ryzyko ich potencjalnej szkodliwości jest bardzo małe. Stosowne rozporządzenia w prawie polskim są zgodne z zaleceniami tej Komisji

W piśmiennictwie nie ma wielu prac na temat narażenia rąk na promieniowanie jonizujące. Poniżej przedstawimy wyniki kilku stosunkowo nowych, które znaleźliśmy w bazie Medline.

Tuhoj i wsp. analizowali narażenie na promieniowanie X rąk i całego ciała u 4 chirurgów operującym w asyście fluoroskopu w ciągu 1 roku. Analizowano odczyty dozymetrów umieszczonych na palcu i na piersi, pod fartuchem zabezpieczającym. Opera-

doses were not measured as they were recorded by dosimeters. However, the DAP variable enabled the calculation of the approximate equivalent dose absorbed by the surgeon's hands located directly in the irradiation field of the X-ray beam.

Our results show that the accumulated dose absorbed by the hands of the four surgeons who performed a total of 287 operations within 7 months amounted to 73 mSv (Table 2). By extrapolating this value over a full year, we obtain an absorbed dose of 125 mSv, which corresponds to 25% of the annual equivalent dose (ED) limit for one person. An analysis of studies using dosimeter exposure readings to calculate actually absorbed doses showed that these variables were actually lower than those calculated on the basis of the DAP [1,3].

The International Commission on Radiological Protection employs a linear, non-threshold hypothesis of the biological effect of radiation, which assumes that such effects may occur even on exposure to a minimal radiation dose and the risk of serious radiation-related disease and biological effects is proportional to the sum total of the absorbed doses. This formula questions the opinion that admissible doses below dose limits are fully safe, although the estimated risk of their potential harm is very low. Related regulations in the Polish law correspond with the recommendations of the International Commission.

There are not many published studies of hand exposure to radiation. Below we present several relatively recent reports available in the Medline database.

Tuhoj et al. investigated hand and whole-body X radiation exposure received by four surgeons operating during one-year period with fluoroscopic guidance. Records from ring dosimeters worn on fingers (hand exposure) and breast-badge dosimeters under the lead apron were analyzed. A total of 198 bony procedures were performed by the participating sur-

torzy wykonali łącznie 198 operacji kostnych, w tym 65 w obrębie palców, 91 śródreżca i nadgarstka, a pozostałe 42 w obrębie przedramienia, łokcia i ramienia. Średni czas ekspozycji (włączenia fluoroskopu) w czasie jednej operacji wynosił 133 sek. (zakres 104-136), a średnia dawka równoważna dla rąk 6,3 mrem (0,063 mSv). Natomiast dawka równoważna dla całego ciała, mierzona dozymetrem umieszczonym pod fartuchem zabezpieczającym, nie przekraczała 1 mrem (0,01 mSv) w ciągu całego okresu badania (1 roku). Autorzy stwierdzają, że roczną dopuszczalną dawkę równoważną dla rąk, która w USA wynosi także 500 mSv, chirurdzy uczestniczący w tej próbie osiągnęli by po wykonaniu 7900 operacji [1].

Przedstawione w tym artykule wartości dawek równoważnych są znacznie (średnio pięciokrotnie) mniejsze, niż obliczone w naszej pracy, przy jednocześnie dłuższym średnim czasie ekspozycji. Jak już wcześniej wspomnieliśmy, nasze obliczenia oparte na wartości DAP są bardziej orientacyjne i mniej dokładne, niż pomiary za pomocą dozymetrów palcowych, które wskazują dawkę faktycznie pochłoniętą. Dawka obliczona w naszej pracy odzwierciedla bardziej teoretyczne narażenie rąk, które znajdują się w polu ekspozycji w czasie całego czasu pracy lampy rtg. W praktyce nie zawsze tak jest: w polu może być jedna ręka (bez dozymetru), może ona być oddalona od osi wiązki, co wiąże się ze znacznym zmniejszeniem natężenia promieniowania. W takich sytuacjach, faktycznie pochłonięta dawka będzie mniejsza i to może tłumaczyć różnice między danymi z pracy Tuhoj i wsp. a naszymi. Uważamy jednak, że obliczenia te mają wartość dla ogólnego zobrazowania problemu narażenia na promieniowanie X w czasie operacji z użyciem fluoroskopu.

Singer mierzył narażenie rąk chirurgów operujących w asyście mobilnego aparatu rtg, za pomocą dozymetru umieszczonego na palcu. Średni czas ekspozycji w czasie 81 operacji wynosił 51 sek., a średnia dawka równoważna 20 mrem (0,2 mSv) na 1 operację [4]. Z kolei Thomson i wsp. obliczyli, że łączna dawka równoważna dla rąk chirurga operującego 26 przypadków w asyście fluoroskopu nie przekroczyła 1 mrem (0,01 mSv) [5]. Z porównania tych dwóch, stosunkowo aktualnych prac wynika, że obliczenia dawek pochłoniętych w trakcie operacji w asyście fluoroskopu różnią się znacznie, co wymagałoby osobnego wytłumaczenia.

Mesbahi i wsp. mierzyli dawkę wejściową (ESD) dla skóry za pomocą dozymetru umieszczonego na matrycy mobilnego aparatu rtg, w centrum wiązki promieniowania lampy, a więc tam, gdzie znajdują się ręce chirurga (i pacjenta) w czasie operacji [3]. Mierzono dawkę wejściową przez 1 minutę, uzysku-

geons, of which 65 involved the digits, 91 the hand/wrist and the remaining 42 involved the forearm, elbow and humerus.

The average exposure time (fluoroscopy time) and average cumulative ED for hands were 133 sec. (range 104-136) and 6.3 mrem (0.063 mSv) per case, respectively. The whole body ED measured by badge dosimeters underneath the lead aprons was less than 1 mrem (0.01 mSv) for the entire study (one year). The authors conclude that surgeons' hand radiation exposure would reach the annual limit (equal 500 mSv in the USA) after performing as many as 7900 procedures in a year [1].

The EDs reported in that study were substantially (five times on average) lower than those calculated in our work, while the average exposure (fluoroscopy) time was longer. As stated earlier, the calculation of EDs in our study was based on DAP values, and was thus less precise than if data had been acquired from the ring dosimeters showing actually absorbed doses of radiation. The ED values calculated in our study reflect more theoretical (assumed) hand exposure during the total fluoroscopy time. In practice it is not always the case: it may be that one hand (without a dosimeter) is placed in the radiation field or that it is outside the central axis of the beam, both situations being associated with a substantial reduction of radiation intensity. In such cases, the actual absorbed dose will be lower and this may explain the discrepancies between the findings from the study by Tuhoj et al. and from our work. We believe, however, that our findings are of value as a general illustration of the problem of X-ray exposure during fluoroscopy-guided procedures.

Singer et al. recorded surgeons' hand exposure during fluoroscopy-guided procedures using ring dosimeters. The average fluoroscopic time during 81 procedures was 51 sec. and the average ED was 20 mrem (0.2 mSv) per case (4). On the other hand, Thomson et al. calculated a total (cumulative) hand ED of less than 1 mrem (0.01 mSv) for a surgeon who performed 26 operations under fluoroscopic guidance [5]. Comparison of the findings from these two relatively new studies shows significant inconsistencies in calculations of EDs absorbed during fluoroscopically-assisted operations, which should be addressed separately.

Mesbahi et al., measured entry surface doses (ESD) for the skin with a dosimeter located in the central axis of the X-ray beam of the fluoroscope, i.e. in the place where the surgeon's and patient's hands can be found during the operation [3]. The ESD measured in this setting over one minute was 0.8 cGy/min. This result shows that the annual recommended ED of

jąc wartość 0,8 cGy/min. Ten wynik wskazuje, że roczną dopuszczalną dawkę równoważną (500 mSv) osiągnięto po łącznie 62,5 minutach ekspozycji śródoperacyjnej, co pozwoliłoby na wykonanie 31 operacji z łącznym dwuminutowym lub 62 z jednoniutowym użyciem fluoroskopii. Te dane różnią się znacznie od wcześniej przedstawionych, jednak należy zauważyć, że są one wynikiem eksperymentu, a nie pomiarów w czasie rzeczywistej operacji. Pomiar dawki wejściowej dla promieniowania rozproszonego, na jaką narażone są w trakcie operacji tarczyca i oczy chirurga, wykazały wartości rzędu 0,9 µGy/min. Uwzględniając dawkę graniczną dla soczewki oka wynoszącą 150 mGy, pozwala to na wykonanie 3300 operacji z użyciem fluoroskopu, zanim osiągnięto się dawkę graniczną. Autorzy zalecają także zachowanie ostrożności przy ich używaniu, monitorowanie pochłoniętych dawek za pomocą dozymetrów palcowych i kontrolę czasu aparatu. Autorzy stwierdzili ponadto, że mimo niewielkiego promieniowania emitowanego przez lampy nowoczesnych fluoroskopów, powinno się brać pod uwagę także ryzyko jego stochastycznych skutków i dążyć do ograniczenia narażenia chirurgów i personelu pomocniczego przez zmniejszanie czasu ekspozycji, większą odległość od źródła promieniowania, używanie w czasie operacji fartuchów ochronnych, osłon tarczycy, rękawic i okularów ochronnych, a także przez kolimację wiązki promieniowania.

WNIOSKI

1. Operacje chirurgii ręki wykonywane przy asyście mobilnego aparatu rtg są związane z niewielkim narażeniem rąk chirurgów na promieniowanie.
2. Pochłonięta dawka równoważna zależy od rodzaju operowanego złamania, techniki operacyjnej i – w pewnym stopniu – od stażu pracy chirurga.

PIŚMIENICTWO / REFERENCES

1. Tuohy CJ, Weikert DR, Watson JT, Lee DH. Hand and body radiation exposure with the use of mini C-arm fluoroscopy. *J Hand Surg* 2011; 36A: 632-8.
2. Mastrangelo G, Fedeli U, Fadda E, Giovanazzi A, Scozzato L, Saia. B. Increased cancer risk among surgeons in an orthopaedic hospital. *Occup Med* 2005; 55: 498-500.
3. Mesbahi A, Rouhani A. A study on the radiation dose of the orthopaedic surgeon and staff from a mini C-arm fluoroscopy unit. *Radiat Prot Dosimetry* 2008; 132: 98-101.
4. Singer G. Radiation exposure to the hands from mini C-arm fluoroscopy. *J Hand Surg* 2005; 30A: 795-7.
5. Thomson CJ, La Londe DH. Measurement of radiation exposure over a one-year period from Fluoroscan mini C-arm imaging unit. *Plast Reconstr Surg* 2007; 119: 1147-8.

500 mSv would be reached after a total of 62.5 minutes of intraoperative exposure, which allows for performing 31 procedures with two-minute or 62 with one-minute fluoroscopic time. These data are highly inconsistent with those quoted earlier, but it should be noted that they are the result of an experiment rather than measurements during actual operations. Measurements of the scattered ED for the eyes and thyroid gland during operations yielded values of 0.9 µGy/min. Considering the limit dose for the lens of the eye of 150 mGy, as many as 3300 procedures with fluoroscopic guidance can be performed before the annual dose limit is reached. The authors recommend caution at work with mobile X-ray devices, monitoring absorbed doses with ring dosimeters and checking fluoroscopy times. They also state that, despite minimal scattered radiation emitted by beams of present-day fluoroscopes, the potential stochastic risk of radiation effects should be considered and its potential harm to surgeons and supporting staff decreased by reducing exposure time, increasing the distance from the radiation source, increased shielding with lead aprons, thyroid gland covers, gloves and glasses as well as beam collimation [3].

CONCLUSIONS

1. Hand surgery procedures under fluoroscopic guidance are associated with mild exposure of the surgeons' hands to radiation.
2. The equivalent dose was related to the type of fracture, operative technique and – to some degree – to the time of employment of the surgeon.

Liczba słów/Word count: 5723

Tabele/Tables: 2

Ryciny/Figures: 2

Piśmiennictwo/References: 5

Adres do korespondencji / Address for correspondence

Andrzej Żyłuk, Klinika Chirurgii Ogólnej i Chirurgii Ręki, Pomorski Uniwersytet Medyczny w Szczecinie, 71-252 Szczecin, ul Unii Lubelskiej 1, Polska, tel/fax: +48 (91) 425 31 96, e-mail: azyluk@hotmail.com

Otrzymano / Received 29.05.2014 r.
Zaakceptowano / Accepted 22.07.2014 r.