

**Charakterystyka układów porowatych metodami
obrazowania magnetyczno-rezonansowego ze
szczególnym uwzględnieniem analizy rozkładów tensora
dyfuzji wody i czasów relaksacji T1 i T2.**

Autoreferat do postępowania habilitacyjnego

Artur Tadeusz Krzyżak

Listopad 2016

1. Wstęp	
1.1 Posiadane dyplomy, stopnie naukowe	5
1.2 Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych	5
1.3 Tematyka prac badawczych	5
1.4 Plany badawcze	6
2. Wskazanie osiągnięcia naukowego stanowiącego podstawę postępowania habilitacyjnego	7
2.1 Publikacje artykułów	7
2.2 Wprowadzenie	9
2.2.1 Układy porowate a Magnetyczny Rezonans Jądrowy	9
2.2.2 Obrazowanie dyfuzji metodami MRJ	9
2.2.3 Obrazowanie rozkładów czasów relaksacji T1 i T2 w MR	11
2.2.4 Cel prac	11
2.3 Omówienie prac składających się na cykl publikacji będących podstawą wniosku o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego	12
2.3.1 [H1]	13
2.3.2 [H2]	15
2.3.3 [H3]	16
2.3.4 [H4]	20
2.3.5 [H5]	21
2.3.6 [H6]	23
2.3.7 [H7]	25
2.3.8 [H8]	27
2.4 Podsumowanie	28
3. Wykaz osiągnięć naukowo badawczych niewchodzących w skład dzieła omówionego w punkcie 2., oraz wskaźniki dokonań naukowych	30
3.1 Wskazanie własnego udziału merytorycznego i procentowego w powstaniu publikacji w czasopiśmie znajdujących się w bazie Journal Citation Reports (JCR).....	30

3.2	Autorstwo lub współautorstwo monografii, publikacji naukowych w czasopismach międzynarodowych lub krajowych innych niż znajdujące się w bazach lub na liście, o których mowa w 3.1	33
3.3	Autorstwo lub współautorstwo opracowań zbiorowych, katalogów zbiorów, dokumentacji prac badawczych, ekspertyz, utworów i dzieł artystycznych.....	37
3.3.1	Dokumentacja know-how dotycząca wykorzystania prototypu wynalazku [H8].....	37
3.3.2	Dokumentacja know-how dotycząca wykorzystania wynalazku [Z2]	38
3.3.3	Dokumentacja know-how dotycząca wykorzystania prototypu wynalazku [Z3]	38
3.4	Wynalazki, wzory użytkowe i przemysłowe, które uzyskały ochronę i zostały wystawione na międzynarodowych lub krajowych wystawach lub targach	39
3.4.1	Pierwsza grupa wynalazków	39
3.4.2	Druga grupa wynalazków	39
3.4.3	Trzecia grupa wynalazków	39
3.5	Sumaryczny impact factor publikacji naukowych według listy Journal Citation Reports (JCR), zgodnie z rokiem opublikowania	45
3.6	Liczba cytowań publikacji według bazy Web of Science (WoS)	45
3.7	Indeks Hirscha według bazy Web of Science.3.6 Liczba cytowań publikacji według bazy Web of Science (WoS)	45
3.8	Kierowanie międzynarodowymi i krajowymi projektami badawczymi oraz udział w takich projektach	45
3.9	Międzynarodowe lub krajowe nagrody za działalność naukową	46
3.10	Wygłoszenie referatów na międzynarodowych lub krajowych konferencjach tematycznych	47
4.	Dorobek pracy dydaktyczny i popularyzatorski oraz informacja o współpracy międzynarodowej	47
4.1	Uczestnictwo w programach europejskich oraz innych programach międzynarodowych i krajowych	47
4.2	Aktywny udział w międzynarodowych i krajowych konferencjach naukowych	47
4.3	Udział w komitetach organizacyjnych międzynarodowych i krajowych konferencji naukowych	47
4.4	Otrzymane nagrody i wyróżnienia	47
4.5	Udział w konsorcjach i sieciach badawczych.....	48

4.6 Kierowanie projektami realizowanymi we współpracy z naukowcami z innych ośrodków polskich i zagranicznych oraz we współpracy z przedsiębiorcami, innymi niż wymienione w punkcie 3.9 i 4.5	48
4.7 Udział w komitetach redakcyjnych i radach naukowych czasopism	48
4.8 Członkostwo w międzynarodowych i krajowych organizacjach oraz towarzystwach naukowych	48
4.9 Osiągnięcia dydaktyczne i w zakresie popularyzacji nauk.....	49
4.10 Opieka naukowa nad studentami	49
4.11 Opieka naukowa nad doktorantami w charakterze opiekuna naukowego lub promotora pomocniczego	49
4.12 Staże w zagranicznych i krajowych ośrodkach naukowych lub akademickich	50
4.13 Wykonane ekspertyzy lub inne opracowania na zamówienie (nieodpłatnie)	50
4.14 Udział w zespołach eksperckich i konkursowych	50
4.15 Recenzowanie projektów międzynarodowych i krajowych	51
4.16 Recenzowanie publikacji w czasopismach międzynarodowych i krajowych	51
4.17 Inne osiągnięcia i pełnione funkcje nie wymienione dotychczas	51
Lista publikacji	52
Publikacje naukowe w czasopismach znajdujących się w bazie Journal Citation Reports (JCR) wchodzące w skład dzieła	52
Publikacje patentów i zgłoszeń patentowych wchodzące w skład dzieła	52
A Publikacje naukowe w czasopismach znajdujących się w bazie Journal Citation Reports (JCR)	53
B Publikacje naukowe w czasopismach międzynarodowych lub krajowych innych niż znajdujące się w bazie JCR	54
C Wystąpienia konferencyjne	56
D Manuskrypty publikacji naukowych pozostających w recenzji w czasopismach znajdujących się w bazie JCR	64

1. Wstęp

1.1. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe

Stopień naukowy **doktora nauk fizycznych** nadany 8 stycznia 2001 r. przez Instytut Fizyki Jądrowej im Henryka Niewodniczańskiego w Krakowie, tytuł wyróżnionej rozprawy doktorskiej: Badanie dynamiki wody w układach biologicznych metodą obrazowania MR tensora dyfuzji, promotor: prof. dr hab. A. Jasiński, recenzenci: prof. dr hab. Jacek Hennel, prof. dr hab. Edward Szcześniak.

Stopień naukowy **magistra nauk fizycznych** nadany w czerwcu 1993 r. przez Wydział Fizyki Matematyki i Astronomii Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie. Tytuł pracy magisterskiej: Fonokardiografia 3D, promotor: Prof. dr hab. S. Micek.

1.2. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

- Po obronie pracy doktorskiej stanowisko asystenta w Pracowni Tomografii Magnetycznego Rezonansu Jądrowego IFJ PAN w okresie od stycznia 2001 do września 2001.
- Przerwa w pracy naukowej od września 2001 do marca 2003.
- Powrót do pracy naukowo-badawczej na stanowisku adiunkta w IFJ PAN od marca 2003 do grudnia 2012.
- Przeniesienie do Katedry Surowców Energetycznych, Wydziału Geologii i Ochrony Środowiska AGH im St. Staszica w Krakowie w styczniu 2013, oraz kontynuacja pracy naukowo badawczej na stanowisku starszego specjalisty naukowo technicznego do teraz.

1.3. Tematyka prac badawczych

Moje zainteresowania badawcze dotychczas zrealizowanych prac dotyczyły następujących zagadnień:

- opracowania nowych oraz rozwoju istniejących metod Tomografii i Spektroskopii Magnetycznego Rezonansu Jądrowego, obrazowania współczynników dyfuzji oraz tensora dyfuzji wody w układach porowatych: biologicznych, geologicznych czy materiałowych, przy wykorzystaniu istniejących technik jak DWI (Diffusion Weighted Imaging) i DTI (Diffusion Tensor Imaging) oraz autorskich rozwiązań innowacyjnych,

- badania rzeczywistych rozkładów gradientów pola magnetycznego oraz związanych z nimi tzw. macierzy b , w trakcie trwania eksperymentów tomograficznych, w szczególności stosowanych do badania dyfuzji,
- badania błędów systematycznych w eksperymentach tomograficznych powstałych poprzez powszechnie stosowane przybliżenia w liczeniu tensora dyfuzji, pokazanie ich skali oraz opracowanie sposobów ich eliminacji,
- stworzenia koncepcji fantomów anizotropowych będących wzorcami tensora dyfuzji i budowa ich prototypów,
- opracowaniu metod BSD-DTI i sBSD-DTI, ich teorii fizycznej, formalizmu matematycznego oraz wykonanie przy ich użyciu prototypów do kalibracji tomografów MRJ,
- badanie parametrów petrofizycznych w rdzeniach skalnych skał: węglanowych, piaskowcowych i łupkowych metodami MRJ,
- określanie zawartości jąder wodoru ^1H w syntetyzowanych materiałach krzemionkowych: MCM-41 i SBA-15 oraz wzorcowych materiałach ilastych: illit, smektyt, kaolinit, chloryt, illit-smektyt.

1.4. Plany badawcze

Moje zainteresowania badawcze w najbliższym okresie będą dotyczyły następujących zagadnień:

- rozwoju metod magnetycznego rezonansu jądrowego do badania parametrów petrofizycznych skał węglanowych, piaskowcowych oraz łupkowych, opracowanie rozwiązań innowacyjnych oraz prototypów wynalazków w ramach projektu o akronimie NMR-ROCKS, programu PBS2 finansowanego przez NCBIr, którego jestem kierownikiem,

- rozwoju metod magnetycznego rezonansu jądrowego do badań diagnostycznych mięśnia sercowego oraz naczyń wieńcowych, opracowanie rozwiązań innowacyjnych oraz prototypów wynalazków w ramach zadania projektu o akronimie CIRCULATE, programu STRATEGMED2, również finansowanego przez NCBiR, w którym jestem koordynatorem zadań dotyczących tomografii i spektroskopii MRJ.

2. Wskazanie osiągnięcia naukowego stanowiącego podstawę postępowania habilitacyjnego.

Jako osiągnięcie naukowe w rozumieniu art. 16, ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. nr 65, poz. 595 ze zm.) przedstawiam cykl siedmiu powiązanych tematycznie publikacji, trzy międzynarodowe zgłoszenia patentowe oraz przyznany patent pod wspólnym tytułem: **Charakterystyka układów porowatych metodami obrazowania magnetyczno-rezonansowego ze szczególnym uwzględnieniem analizy rozkładów tensora dyfuzji wody i czasów relaksacji T1 i T2.**

2.1 Publikacje artykułów

[H1] **A. Krzyżak**, Z. Olejniczak. Improving the accuracy of PGSE DTI experiments using the spatial distribution of b matrix. *Magnetic Resonance Imaging* 2015, 33(3): 286–295., DOI:10.1016/j.mri.2014.10.007 IF (2.09).

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: opracowaniu nowej teorii dotyczącej obrazowania tensora dyfuzji, nazwanej BSD-DTI, wykonaniu eksperymentów i analizie ich danych, przygotowaniu tekstu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na 85 %.

[H2] K. Kłodowski, **A. Krzyżak**. Innovative anisotropic phantoms for calibration of diffusion tensor imaging sequences. *Magnetic Resonance Imaging* 2016, 34(4): 404-409., DOI:10.1016/j.mri.2015.12.010 (IF-2.09).

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu: nowej teorii dotyczącej obrazowania tensora dyfuzji, nazwanej BSD-DTI, koncepcji budowy fantomów anizotropowych, koncepcji eksperymentów i ich realizacji. Uczestniczyłem w przygotowaniu tekstu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na 67%.

[H3] W. Węglarz, **A. Krzyżak**, M. Stefaniuk. ZTE imaging of tight sandstone rocks at 9.4T - comparison with standard NMR analysis at 0.05 T. *Magnetic Resonance Imaging* 2016, 34(4): 492-495; DOI:10.1016/j.mri.2015.12.001 (IF-2.09).

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: współtworzeniu koncepcji pracy, wykonaniu eksperymentów MRJ na skanerze 0.05T, wykonaniu analizy danych. Uczestniczyłem w przygotowaniu tekstu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na 35%.

[H4] **A. Krzyżak**, A. Jasiński, W. Węglarz, D. Adamek, P. Sagnowski, M. Baj. Visualisation of the extent of damage in a rat spinal cord injury model using MR microscopy of the water diffusion tensor. *Acta neurobiologiae experimentalis* 02/2005; 65(3):255-64 (IF-1.43).

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu: koncepcji pracy, wykonaniu oprogramowania do obliczeń tensora dyfuzji i realizacji eksperymentów DTI, realizacji eksperymentów DTI i analizie danych, przygotowaniu tekstu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na 50%.

[H5] **A. Krzyżak**, A. Jasiński, D. Adamek. Qualification of the most statistically “sensitive” diffusion tensor imaging parameters for detection of spinal cord injury *Acta Physica Polonica A* vol. 108, 207-210 (2005) (IF-0.53).

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: opracowaniu koncepcji pracy, wykonaniu oprogramowania do obliczeń tensora dyfuzji i realizacji eksperymentów DTI, realizacji eksperymentów DTI i wykonaniu analizy danych, przygotowaniu tekstu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na 70%.

[H6] **A. Krzyżak**, A. Jasiński, S. Kwieciński, P. Kozłowski, D. Adamek. Quantitative Assessment of Injury in Rat Spinal Cords In Vivo by MRI of Water Diffusion Tensor. *Applied Magnetic Resonance* 07/2008; 34(1):3-20. DOI:10.1007/s00723-008-0095-7 (IF-0.748).

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: opracowaniu koncepcji pracy, wykonaniu oprogramowania do obliczeń tensora dyfuzji, realizacji eksperymentów DTI i wykonaniu analizy danych, przygotowaniu tekstu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na 50%.

[H7] **A. Krzyżak**, I. Habina. Low field ¹H NMR characterization of mesoporous silica MCM-41 and SBA-15 filled with different amount of water. *Microporous and Mesoporous Materials* 2016; 231:230-239. DOI:10.1016/j.micromeso.2016.05.032 (IF-3.45).

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: opracowaniu koncepcji pracy, realizacji eksperymentów MRJ i wykonaniu analizy danych. Uczestniczyłem w przygotowaniu tekstu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na 67%.

[H8] **A. Krzyżak**. Anisotropic diffusion phantom for calibration of diffusion tensor imaging pulse sequence used in MRI.

Przyznany patent amerykański: Ref. No: US8643369 B2 (2014).

Jestem jedynym autorem pracy. Mój udział procentowy wynosi 100%.

2.2 Wprowadzenie

2.2.1 Układy porowate a Magnetyczny Rezonans Jądrowy

Zjawisko Magnetycznego Rezonansu Jądrowego (MRJ) od czasu jego odkrycia w roku 1946 przez Blocha i Purcella jest intensywnie poznawane i wykorzystywane na licznych polach nauki i przemysłu [1-2]. W ciągu ostatnich 40 lat badanie układów porowatych metodami MRJ stało się jednym z najbardziej istotnych zagadnieniem zastosowania tego zjawiska dla szerokiego obszaru badań naukowych jak i rozwiązań przemysłowych w medycynie, biologii, geologii czy chemii [3-5]. Jedną z najistotniejszych zalet obrazowania MRJ jest możliwość uzyskania informacji jakościowych oraz ilościowych w sposób nieinwazyjny, bez niszczenia badanego układu. Jedyną ingerencją jest umieszczenie badanej próbki w stałym polu magnetycznym oraz naświetlenie jej falą elektromagnetyczną o niewielkiej energii i częstotliwości z zakresu fal radiowych, odpowiadającej częstotliwości rezonansowej zwanej częstotliwością Larmora. Jest ona wielkością charakterystyczną dla atomów posiadających niezerowy spin jądrowy [6-7]. Do najczęściej badanych pierwiastków należy przede wszystkim wodór ^1H będący składnikiem wody jak i np. węglowodorów. W dalszej kolejności metodami MRJ są badane układy zawierające izotopy węgla ^{13}C , azotu ^{15}N , tlenu ^{17}O , fluoru ^{19}F , sodu ^{23}Na , fosforu ^{31}P jak również izotop wodoru deuter ^2H [7]. Niniejsze dzieło koncentruje się na obrazowaniu obiektów zawierających atomy wodoru ^1H w zakresie niskich (0.05-0.5T) oraz wysokich pól magnetycznych (3-9.4T) ze szczególnym uwzględnieniem rozwiązań innowacyjnych opracowanych przez autora dotyczących obrazowania tensora dyfuzji wody oraz analizy rozkładów czasów relaksacji T1 i T2.

2.2.2 Obrazowanie dyfuzji metodami MRJ

Dyfuzja w układach porowatych jest procesem, w którym materia jest transportowana z jednej części systemu do drugiej wskutek ruchów swobodnych (przypadkowych) znanych jako ruchy Browna [8]. W układach, w których obserwujemy istnienie makroskopowej różnicy koncentracji cząstek, dyfuzję możemy opisać w sposób klasyczny, przy pomocy prawa Ficka. Jednakże w warunkach równowagi makroskopowej, gdzie koncentracja cząstek jest jednorodna i stała nie obserwujemy żadnych zmian makroskopowych. Wówczas chcąc określić współczynnik dyfuzji w sposób klasyczny (równanie Ficka) stosuje się środki kontrastowe, radioaktywne lub fluorescencyjne, których zmiana koncentracji w danym ośrodku pozwala określić współczynnik dyfuzji. Jednak taki sposób pomiaru dyfuzji ze względu na swoją inwazyjność nie może być dopuszczony np. do badań klinicznych. Alternatywą jest opisanie procesów dyfuzyjnych przy pomocy metod fizyki statystycznej. W 1926 roku A. Einstein i M. Smoluchowski [8] pokazali, że prawdopodobieństwo warunkowe znalezienia cząstki, w danej pozycji po czasie t , której przemieszczenie jest spowodowane ruchami Browna, jest opisane dokładnie taką samą funkcją gaussowską jak w przypadku równania Ficka.

W celu uzyskania dokładnego opisu wpływu dyfuzji na sygnał MRJ Stejskal i Tanner 1965 roku przeanalizowali zjawisko dyfuzji dla sekwencji echa spinowego w oparciu o równania Blocha [9]. Dla spinów znajdujących się w polu magnetycznym, które możemy przedstawić

jako wektor $\vec{B}(\vec{r}, t) = \vec{r}\vec{G}(\vec{r}, t) + \vec{B}_o$ zależny od wektora położenia $\vec{r} = (x, y, z)$, i czasu t , gdzie gradient pola magnetycznego $\vec{G}(r, t) = (G_x(t), G_y(t), G_z(t))$, a $\vec{B}_o = (0, 0, B_o)$ stałe pole magnetyczne w kierunku z wynoszące B_o , równanie Blocha z dodatkową częścią dyfuzyjną ma postać

$$\frac{\partial \vec{M}}{\partial t} = \gamma \vec{M} \times \vec{B} - T\vec{M} + M_o \vec{T}' + \vec{\nabla} \cdot (D\vec{\nabla} \vec{M}), \quad (1)$$

gdzie: wektor magnetyzacji $\vec{M}(r, t) = (M_x(t), M_y(t), M_z(t))$, macierz $T = \begin{pmatrix} 1/T_2 & 0 & 0 \\ 0 & 1/T_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1/T_1 \end{pmatrix}$

wektor $\vec{T}' = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1/T_1 \end{pmatrix}$, T_1 – czas relaksacji podłużnej, T_2 – czas relaksacji poprzecznej, M_o –

magnetyzacja równowagowa w kierunku pola B_o , D – tensor dyfuzji.

Po przekształceniach otrzymujemy równanie

$$\ln\left(\frac{M(t)}{M_o}\right) = -bD, \quad (2)$$

gdzie $\vec{k}(t) = \gamma \int_0^t \vec{G}(t') dt'$, a b jest zdefiniowana następująco $b = \int_0^t \vec{k}(t')^T \vec{k}(t') dt'$.

Występująca w równaniu macierz b lub macierz gradientowa jest parametrem odgrywającym kluczową rolę przy opisie sekwencji dyfuzyjnych, informuje on jak bardzo dana sekwencja MR jest czuła na zjawisko dyfuzji. To znaczy im b jest większe tym powinniśmy zaobserwować większe tłumienie sygnału MRJ wskutek ruchów dyfuzyjnych. Zależność (2) posłużyła blisko 20 lat później P. Basserowi do opracowania metody obrazowania tensora dyfuzji DTI [10-11]. W tym samym roku uzyskano pierwsze mapy składowych tensora dyfuzji. DTI jest metodą powstałą w celu opisanie dyfuzji w ośrodkach anizotropowych dla których pomiar współczynników dyfuzji nie jest wystarczający. Obliczenia tensora D uzyskujemy z obrazów MR ważonych dyfuzyjnie przy pomocy bardziej ogólnej zależności (3) (równanie Stejskala - Tannera) pomiędzy sygnałem echa dla każdego woksela a pełnym zestawem gradientów obrazujących i dyfuzyjnych

$$\ln\left(\frac{A(\mathbf{b})}{A(0)}\right) = -\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 b_{ij} D_{ij}, \quad (3)$$

gdzie: b_{ij} jest elementem symetrycznej macierzy b , a D_{ij} elementem symetrycznego tensora dyfuzji D .

2.2.3 Obrazowanie rozkładów czasów relaksacji T1 i T2 w MRJ

Podstawowa idea badania układów porowatych poprzez obrazowanie w oparciu o MRJ bazuje na zróżnicowaniu czasów relaksacji T1 i T2 cząsteczek w układach związanych w porównaniu do cieczy wolnej. Relaksacja molekuł wody z cząsteczkami tworzącymi powierzchnię wskutek oddziaływań hydrofobowych, hydrofilowych i wiązań wodorowych ulega skróceniu. W przypadku gdy dyfuzja molekuł jest szybka w trakcie eksperymentu MRJ dochodzi praktycznie do oddziaływania wszystkich protonów z cząsteczkami tworzącymi powierzchnię. Wówczas dla układu porowatego z równania Blocha (1) można wyprowadzić uproszczoną zależność dla czasów relaksacji T1, T2 oraz tensora dyfuzji D,

$$\frac{1}{T_i} = \frac{1}{T_{i,b}} + \frac{1}{T_{i,S}} + \frac{1}{T_{2,D}}, \quad (4)$$

gdzie $T_{i,b}$ jest czasem relaksacji dla wody wolnej, $T_{i,S}$ jest czasem relaksacji w wyniku oddziaływań z powierzchnią, a $T_{2,D}$ jest czasem relaksacji wskutek dyfuzji molekuł. Indeksy $i = 1, 2$ odpowiadają relaksacji spinowo-sieciowej (podłużnej) i spinowo-spinowej (poprzecznej). Wpływ dyfuzji występuje tylko dla relaksacji poprzecznej, dla systemów niskopolowych i sekwencji CPMG z krótkimi czasami echa jest praktycznie zaniedbywalny. Natomiast dla systemów wysokopolowych zjawisko dyfuzji stanowi główny powód braku powtarzalności pomiarów T2 przy różnym domieszkowaniu substancjami para i ferromagnetycznymi. Jest to związane z generowaniem dużych i różnych gradientów pola magnetycznego w zależności od lokalnych różnic podatności magnetycznych badanego obiektu znajdującego się w stałym zewnętrznym polu magnetycznym. Dla układu porowatego charakteryzującego się powierzchnią S , objętością V , promieniem R i stałą C (jest to wielkość informująca o dominującym kształcie porów równa 1, 2 lub 3 odpowiednio dla planarnych, cylindrycznych lub sferycznych porów), rozkład czasów $T_{i,S}$ można wyrazić następująco,

$$\frac{1}{T_{i,S}} = \rho_i \frac{S}{V} = \rho_i \frac{C}{r}, \quad (5)$$

gdzie relaksacja powierzchniowa ρ_i odpowiada sile oddziaływania spinów molekuł cieczy ze spinami cząstek tworzących powierzchnię. Parametr ten odgrywa kluczową rolę w konwersji rozkładu czasów relaksacji otrzymanych po odwrotnej transformacji Laplace'a (ILT) z sygnału MRJ, w rozkład przestrzeni porowych (PSD- Pore Size Distribution). Rozkład czasów relaksacji zależy zatem od współczynnika (S/V) i właściwości powierzchni porów [12].

2.2.4 Cel prac

W pracach dokonano charakterystyki różnych układów porowatych (modelowych, biologicznych, geologicznych, materiałowych) metodami obrazowania magnetyczno-rezonansowego ze szczególnym uwzględnieniem nowatorskich rozwiązań służących do analizy rozkładów tensora dyfuzji wody oraz czasów relaksacji T1 i T2.

Istotą prac innowacyjnych było **opracowanie założeń teoretycznych oraz wdrożenie nowej metody** z dziedziny Magnetycznego Rezonansu Jądrowego, nazwanej **BSD-DTI** (B matrix Spatial Distribution in-Diffusion Tensor Imaging) dotyczącej obrazowania zjawiska dyfuzji w szczególności współczynników dyfuzji i tensora dyfuzji w eksperymentach DWI (Diffusion Weighted Imaging) i DTI (Diffusion Tensor Imaging) [H1]. Integralną częścią metody BSD-DTI jest **nowy rodzaj anizotropowych fantomów ADP (Anisotropic Diffusion Phantoms)** charakteryzujących się dobrze zdefiniowaną strukturą oraz anizotropią tensora dyfuzji, niezbędnych w metodzie BSD-DTI jak również charakteryzujących się szerokim potencjałem badawczym i komercyjnym [H2]. Najistotniejsze elementy nowo powstałej metody jak również innowacyjne założenia dotyczące budowy i wykorzystania fantomów zawarto w publikacjach **krajowych i międzynarodowych zgłoszeń patentowych i patentów**: krajowe [Z1a, Z2a, Z3a], międzynarodowe PCT [Z1b, Z3b], europejskie [Z1e], amerykańskie [Z1c], japońskie [Z1d] i patent amerykański [H8].

Badania obrazowania MRJ wykorzystujące metodę BSD-DTI i/lub anizotropowe fantomy przeprowadzono dla szerokiej gammy układów porowatych. W opracowaniu przedstawiono wybrane wyniki badań dla samych fantomów będących modelami układów porowatych o strukturze kapilarnej i laminarnej [H1-H2], układów biologicznych przede wszystkim rdzenia kręgowego [H4-H6], rdzeni skał piaskowców pochodzących z obszarów gazo i ropośnych Polski [H3] i układów mezoporowych (średnice nanometryczne) zbudowanych ze związków silikatowych MCM-41 i SBA-15 [H7].

W pracach jest zawarty rys historyczny związany z tworzeniem założeń metody BSD-DTI, fantomów anizotropowych oraz ich zastosowania do badań układów porowatych w biologii, medycynie, geologii przy użyciu tomografów MR nisko i wysokopoolowych.

2.3 Omówienie prac składających się na cykl publikacji będących podstawą wniosku o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego.

2.3.1 A. Krzyżak, Z. Olejniczak: Improving the accuracy of PGSE DTI experiments using the spatial distribution of b matrix. *Magnetic Resonance Imaging*; 2015. 33(3): 286–295.

Ze względu na zazwyczaj anizotropowe właściwości tkanek biologicznych, czy geologicznych rdzeni skalnych, dyfuzja często musi być opisana poprzez tensor dyfuzji wody.

W publikacji [H1] zawarto pełne teoretyczne założenia nowatorskiej metody BSD-DTI poprawiającej dokładność liczenia tensora dyfuzji w eksperymentach DTI [10,13-14]. W metodzie uwzględnia się przestrzenny rozkład macierzy b określany przy wykorzystaniu fantomów o znanej strukturze będących wzorcami tensora dyfuzji, charakteryzujących się anizotropią dyfuzji przynajmniej w jednym kierunku. W przeciwieństwie do standardowej procedury numerycznego obliczania macierzy b [15-16], który wymaga dokładnej wiedzy o amplitudach, kształtach i zależnościach czasowych gradientów dyfuzji, nowa metoda – BSD opiera się na bezpośrednim pomiarze przestrzennego rozkładu komponentów macierzy b. Proponowana metoda została przetestowana na komercyjnym systemie Bruker Biospec 94/20USR, wykorzystując klasyczną sekwencję echa spinowego do obrazowania izotropowego fantomu wodnego oraz anizotropowego o strukturze kapilarnej. Uzyskana poprawa dokładności pomiaru tensora dyfuzji dla fantomu izotropowego wyniosła około 8.

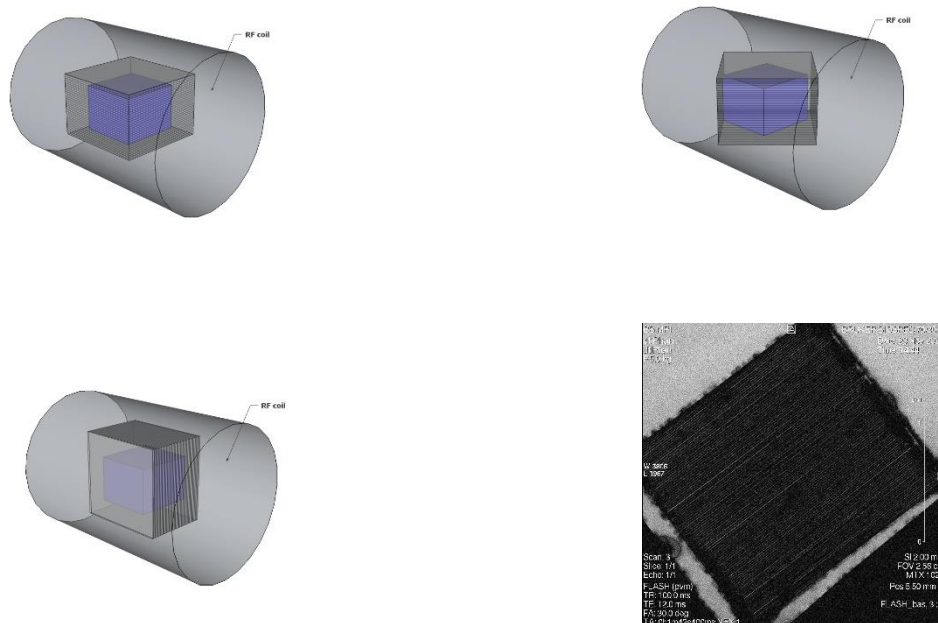
Tensor jest symetryczną macierzą 3 na 3, charakteryzowaną przez sześć niezależnych składowych, które można przedstawić w postaci elipsoidy gęstości prawdopodobieństwa [15-16], opisanej przez wektory i wartości własne macierzy obliczone po diagonalizacji. Uzyskane w ten sposób informacje charakteryzują badany obiekt w sposób jakościowy i co ważne również ilościowy niezależnie od położenia w układzie laboratoryjnym. Ostatecznym celem eksperymentu DTI jest precyzyjne określenie tych wielkości dla każdego woksela obrazu MR. Wymaga to w praktyce, zarejestrowania referencyjnego obrazu wykonanego bez gradientu dyfuzji, oraz co najmniej sześciu obrazów zmierzonych dla różnych liniowo niezależnych wektorów gradientu dyfuzji. Parametry charakteryzujące gradientów dyfuzji dla danej sekwencji obrazowania i dla danego kierunku gradientu dyfuzji są zawarte w tzw. macierzy B, zwanej również macierzą gradientową. W komercyjnych systemach MRI macierze B są obliczane automatycznie w sposób uproszczony i niedokładny. Zazwyczaj nie uwzględniają szeregu efektów występujących w trakcie obrazowania: obrazujących gradientów pola magnetycznego, ich sprzęgania z gradientami do obrazowania dyfuzji lub związanymi z prądami wirowymi. Dodatkowo, zakłada się istnienie stałych wartości macierzy b w całej objętości, co nie jest zgodne z rzeczywistością. Należy podkreślić, że powyższe działanie prowadzi do błędów systematycznych, a więc nie może być zredukowane przez uśrednienie sygnału poprzez kolejne akumulacje. Chociaż niektóre techniki zostały opracowane w celu zmniejszenia tych efektów są one albo bardzo czasochłonne lub nie można ich stosować w niektórych okolicznościach. Prowadzi to do ograniczonej dokładności uzyskanych danych, co ze względu na rosnącą liczbę zastosowań DTI jest poważną wadą tej techniki.

W pracy wprowadzono nieznanne do tej pory w literaturze pojęcie przestrzennego rozkładu macierzy b, którego istnienie potwierdzono eksperymentalnie. Przestrzenny rozkład macierzy b uzyskano poprzez całkowicie odmienne podejście do określenia tej wielkości. Mianowicie zauważono, że równanie (3), które służy do określania tensora dyfuzji w eksperymentach DTI, można również rozwiązywać zamieniając zmienne. Zatem mając znany rozkład tensora dyfuzji \mathbf{D}_{klm} w układzie laboratoryjnym o współrzędnych dyskretnych k, l, m, można określić składowe macierzy \mathbf{b}'_{klm} z następującego układu równań

$$\begin{bmatrix} \ln\left(\frac{S^1(\mathbf{b}_{klm})}{S(\mathbf{b}_{\mathbf{0}_{klm}})}\right) \\ \ln\left(\frac{S^2(\mathbf{b}_{klm})}{S(\mathbf{b}_{\mathbf{0}_{klm}})}\right) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \ln\left(\frac{S^N(\mathbf{b}_{klm})}{S(\mathbf{b}_{\mathbf{0}_{klm}})}\right) \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \mathbf{b}'_{klm} : \mathbf{D}^1_{klm} \\ \mathbf{b}'_{klm} : \mathbf{D}^2_{klm} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \mathbf{b}'_{klm} : \mathbf{D}^{N-1}_{klm} \\ \mathbf{b}'_{klm} : \mathbf{D}^N_{klm} \end{bmatrix} \quad (6)$$

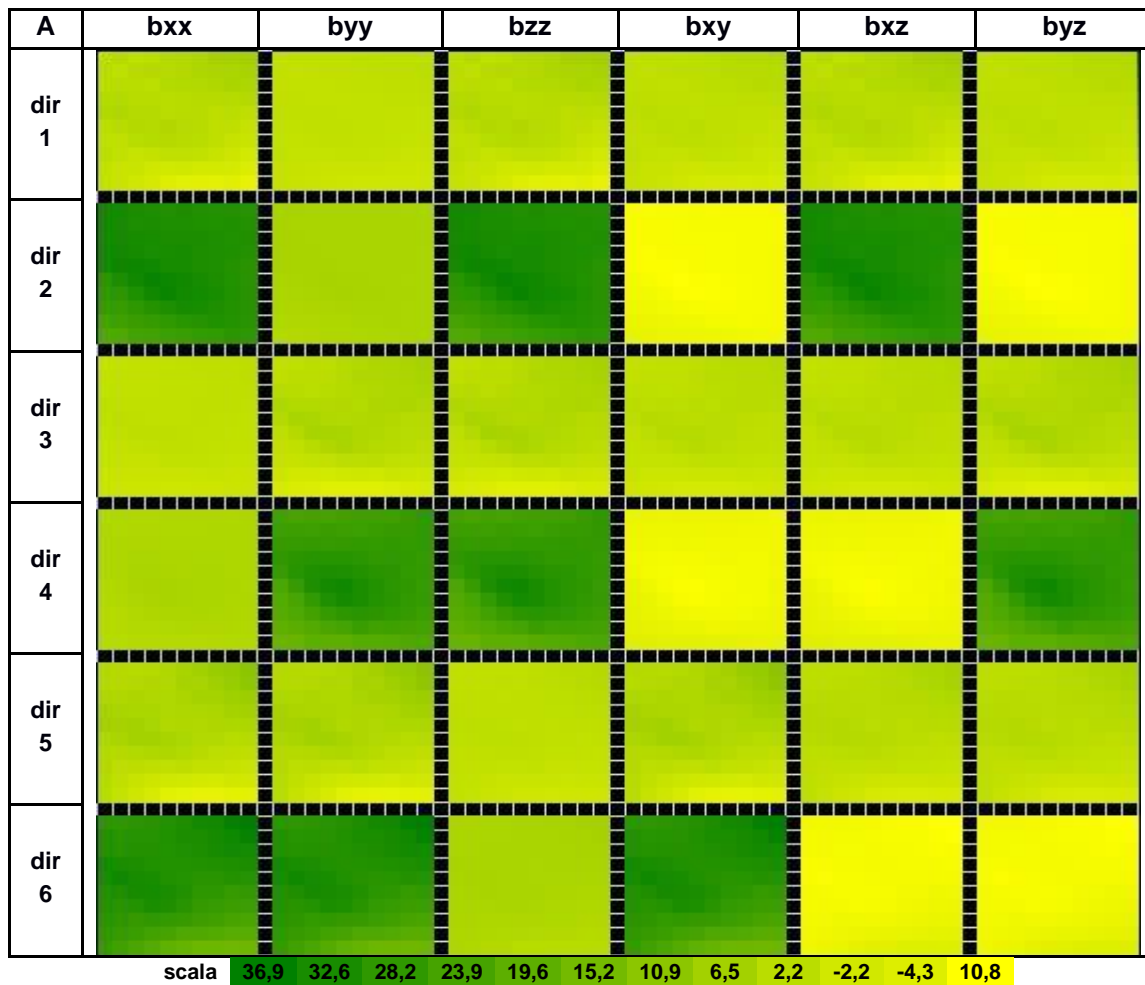
Składowe \mathbf{D}^l_{klm} odpowiadają wartościom tensora dyfuzji wzorcowego fantomu (Rys. 1) po kolejnych obrotach o znany kąt Eulera. Indeks l oznaczający kolejne położenia jest równy od 1 do 6, jest to minimalna liczba potrzebna aby rozwiązać układ równań (6). Znając wartości

tensora D_{klm} w układzie osi głównych oraz zestaw kątów Eulera łatwo określimy kolejne wartości D^l_{klm} . W przypadku gdy wzorcowy fantom jest wykonany z dużą precyzją co miało miejsce w naszym przypadku (odchylenie składowych tensora dyfuzji było mniejsze niż 1%) możemy przestrzenny rozkład D^l_{klm} zastąpić D^l .



Rys. 1. Przykładowe 3 położenia (z sześciu) wzorcowego fantomu (szary sześcian) po kolejnych obrotach o znany kąt Eulera, z zaznaczonym wewnątrz na niebiesko obszarem badanym. Badany obszar to stała objętość (względem układu laboratoryjnego) znajdująca się wewnątrz cewki RF i zawsze zawarta wewnątrz wzorcowego fantomu dla każdego z jego położeń. W prawym dolnym rogu pilotowy obraz MR fantomu o budowie laminarnej (płytki szklane - 100um, przedzielone warstwa wody – 20um) będące wzorcem tensora dyfuzji.

Zastosowanie metody BSD-DTI pozwoliło na uzyskanie przestrzennego rozkładu macierzy b , którego przykład jest pokazany na rysunku 2. Ponadto rozkład macierzy b został wykorzystany do obliczenia składowych tensora dyfuzji dla fantomu izotropowego i anizotropowego znacznie precyzyjniej w stosunku do możliwości oferowanych przez producenta. W pierwszym przypadku uzyskano znaczne zmniejszenie rozkładu standardowego składowych tensora dyfuzji wody, od trzykrotnego dla obrazowania w kierunku aksjalnym, do kilkunastokrotnego (~ 14) dla położenia koronalnego. W drugim, położenia fantomu anizotropowego w przestrzeni wewnątrz magnesu zostały określone w sposób bardziej precyzyjny poprzez pomiar BSD w porównaniu ze sposobem standardowym oferowanym przez producenta. Błąd dla położeń kątowych w obrazowaniu koronalnym i sagitalnym wyniósł kilkanaście stopni.

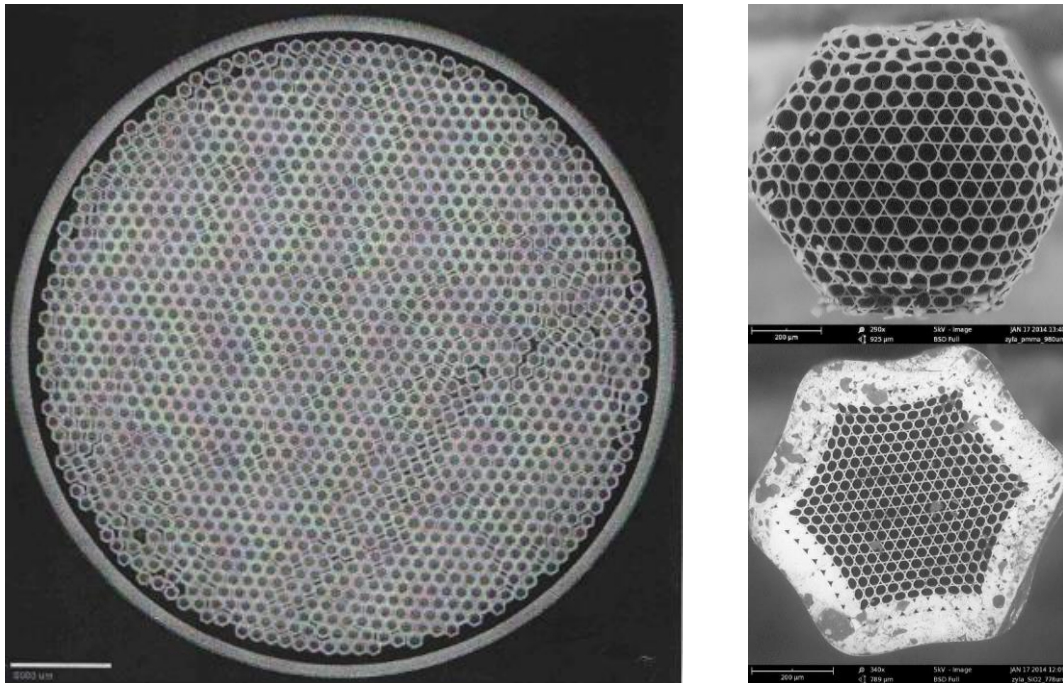


Rys. 2. Składowe macierzy b różnicowe (odchylenia od wartości stałej podawanej przez producenta) dla sześciu kierunków wektora gradientu dyfuzji w orientacji koronalnej.

2.3.2 K. Kłodowski, **A. Krzyżak**: Innovative anisotropic phantoms for calibration of diffusion tensor imaging sequences. *Magnetic Resonance Imaging* 2016, 34(4): 404-409., DOI:10.1016/j.mri.2015.12.010. (IF-2.09) (WoS).

Praca stanowi dotychczasowe zwięźczenie wysiłków dotyczących budowy fantomów anizotropowych będących wzorcami tensora dyfuzji dla układów porowatych. Po wieloletnich próbach zespół prof. Z. Raszewskiego z WAT w Warszawie skonstruował według pomysłów autora zestaw anizotropowych fantomów o strukturze kapilarnej i laminarnej, dla których różnice w podatności magnetycznej wewnątrz fantomu są zminimalizowane. Pozwala to na zastosowanie metody BSD-DTI do dużych systemów badawczych, gdzie podstawową rolę odgrywają techniki bazujące na echu planarnym głównie - EPI (Echo Planar Imaging) [17]. Są to metody szybkie, jednakże generujące duże gradienty pola magnetycznego i bardzo czułe na niejednorodności pola magnetycznego. Duże różnice podatności magnetycznych w badanym obiekcie są źródłem dystorsji i powodują ograniczenia stosowania sekwencji EPI.

Opracowanie nowej linii fantomów w sposób istotny rozszerza obszar zastosowań metody BSD-DTI. W pracy zaprezentowano wyniki zastosowania fantomów do badań na systemie tomograficznym o polu 3T przy użyciu sekwencji obrazowania SE-EPI.



A – przekrój poprzeczny fantomu kapilarnego. Widoczne wiązki kapilar.

B – pojedyncze włókna kapilarne zbudowane z: PMMA – góra i szkła – dół.

Rys. 3. Fantom jest zbudowany z wiązek kapilar wykonanych z włókna PMMA lub szkła. Wiązki o średnicy 0.8 mm wypełnione są kapilarami o średnicy wewnętrznej około 30 μm .

Fantomy zostały przetestowane na 3T systemie klinicznym firmy Siemens. Zarejestrowana poprawa w rozkładzie tensora dyfuzji dla fantomu izotropowego, mierzona poprzez iloraz odchyłeń standardowych rozkładów otrzymanych w sposób standardowy oraz za pomocą BSD-DTI, wahała się od 2.8 do 5.3. Najlepszą poprawę uzyskano dla orientacji koronalnej, a najniższą dla aksjalnej. Potwierdza to wcześniejsze obserwacje, że generalnie tomografy komercyjne osiągają najlepszą jakość obrazowania dla pomiarów aksjalnych (transwersalnych do osi pola magnetycznego). Jednocześnie po raz pierwszy dokonano implementacji metody BSD-DTI do systemu klinicznego korzystającego z bardzo wymagających pod względem jednorodności pola magnetycznego sekwencji bazujących na echu planarnym.



A – izotropowy (woda)

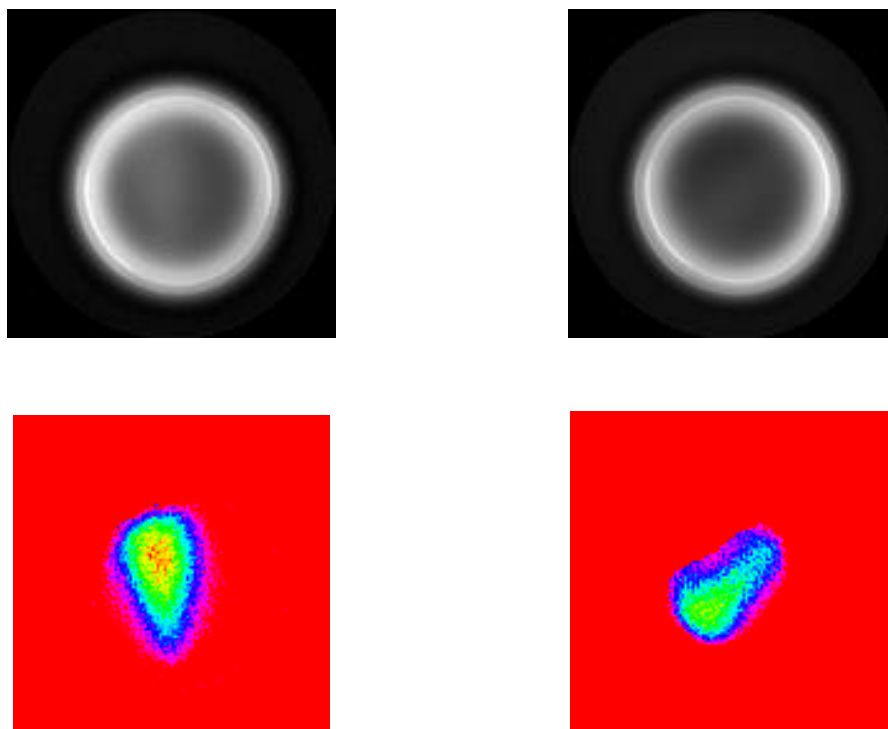
B – anizotropowy (płytki szklane)

C – anizotropowy (kapilary)

Rys. 4. Zestaw fantomów do określania rozkładu przestrzennego macierzy b. Fantomy są zbudowane ze szklanej kuli wypełnionej wodą destylowaną lub z odpowiednią zawartością jonów CuSO_4 . W fantomach B i C wewnątrz kuli dodatkowo umieszczono struktury anizotropowe o budowie laminarnej (cienkie płytki szklane przedzielone warstewkami wody) i kapilarnej.

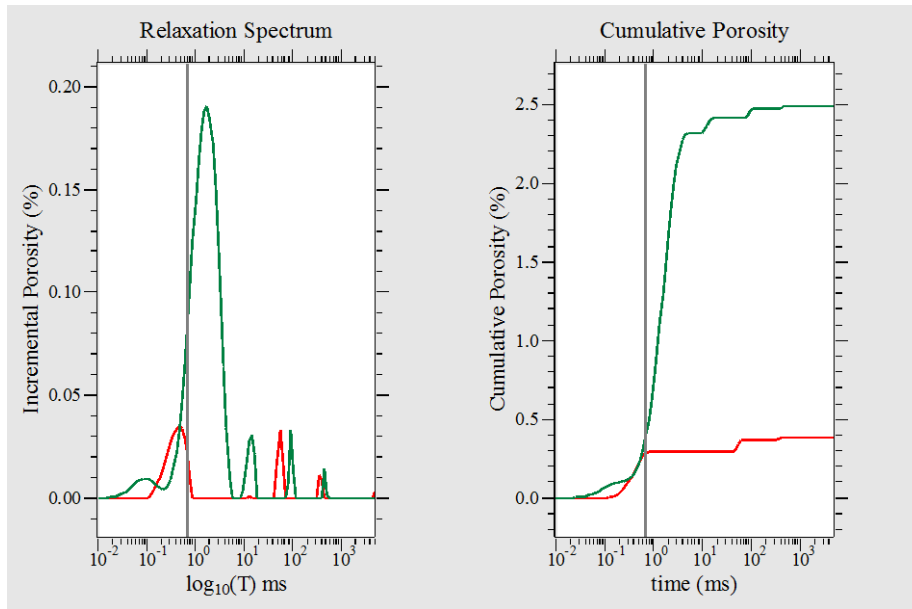
2.3.3 W. Węglarz, **A. Krzyżak**, M. Stefaniuk: ZTE imaging of tight sandstone rocks at 9.4T - comparison with standard NMR analysis at 0.05 T. *Magnetic Resonance Imaging* 2016, 34(4): 492-495; DOI:10.1016/j.mri.2015.12.001

W pracy dokonano komplementarnej analizy skał piaskowców przy użyciu systemu wysokopolowego 9.4T oraz niskopolowego 0.05T. Systemy wysokopolowe straciły praktyczne znaczenie w badaniu skalnych układów porowatych w szczególności ze względu na duże lokalne gradienty pól magnetycznych generowanych w zewnętrznym stałym polu magnesu tomografu [5]. Prowadzi to do braku możliwości przeprowadzenia wiarygodnej analizy ilościowej dla próbek o różnym domieszkowaniu paramagnetycznym czy ferromagnetycznym. Przyjętym standardem badań stały się systemy niskopolowe, które przy spełnieniu warunku w szczególności krótkiego czasu echa w sekwencjach echa spinowego są praktycznie nieczułe na rodzaj domieszkowania. Analiza rozkładów czasów relaksacji w szczególności T_2 po odwrotnej transformacie Laplace'a jest wiarygodnym źródłem informacji o rozkładach porów. Dodatkowo opracowana według naszych wymagań cewka RF pozwoliła na uzyskanie wiarygodnych pomiarów dla układów mezoporowych i mikroporowych (piaskowce zwięzłe, łupki). W eksperymencie bardzo precyzyjne wyniki z systemu niskopolowego (Rys. 6) zostały porównane z wynikami uzyskanymi przy pomocy nowej sekwencji obrazowania ZTE (zero echo time), która daje nadzieję na obrazowanie niektórych skał w systemach wysokopolowych (Rys. 5). W pracy została potwierdzona zależność liniowa między sygnałem zarejestrowanym dla piaskowców w ZTE i porowatością całkowitą obliczoną z rozkładów czasów T_2 zarejestrowanych przy pomocy sekwencji CPMG na systemie o polu 0.05T (Rys. 7). Należy zaznaczyć, że skały piaskowców charakteryzowały się niewielką zawartością związków para i ferromagnetycznych, w przypadku próbek testowych (np. łupków) o większej zawartości tych domieszek, sygnał ZTE był mocno zaburzony.

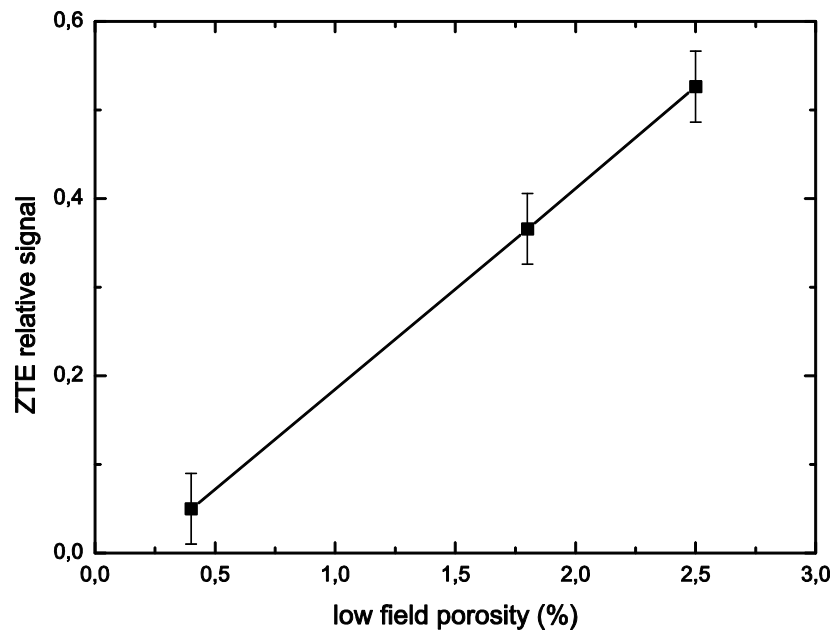


Rys. 5. Obrazy MR zarejestrowane za pomocą ZTE dla próbki piaskowców zwięzłych, saturowanej i naturalnej – wiersz górny i korespondujące obrazy rozkładu intensywności – wiersz dolny.

Głównym osiągnięciem pracy, oprócz potwierdzenia możliwości obrazowania układów porowatych typu zwięzłego w systemach niskopolowych jest ponowne zwrócenie uwagi na możliwość przestrzennego obrazowania ilościowego, niektórych typów skał w systemach wysokopolowych, przy użyciu nowej sekwencji obrazowania (ZTE) w relatywnie krótkim czasie, około 1h. Istniejąca alternatywa używana na systemach niskopolowych, czyli sekwencje SPI (Single Point Imaging) zazwyczaj wymagają znacznie dłuższego czasu pomiarowego. Ze względu na dużo lepszy stosunek sygnału do szumu (S/R) dla systemów o wyższym polu magnetycznym (liniowy wzrost wraz ze wzrostem natężenia pola magnetycznego) użycie przestrzennego obrazowania, może znaleźć praktyczne zastosowanie dla niektórych typów skał.



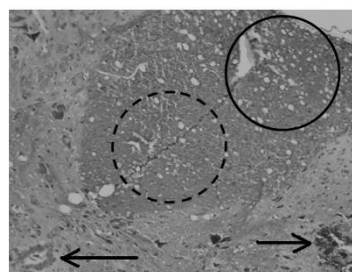
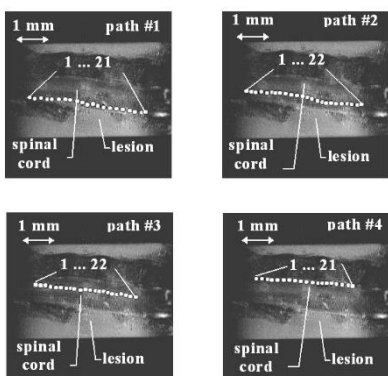
Rys. 6. Rozkłady czasów relaksacji T2 oraz skumulowanej porowatości dla próbki piaskowców zwięzłych saturowanej i suchej zarejestrowane za pomocą sekwencji T2 CPMG.



Rys. 7. Wykres zależności intensywności sygnału MR z obrazu zmierzonego za pomocą ZTE w polu 9.4T i skumulowanej porowatości określonej na systemie 0.05T.

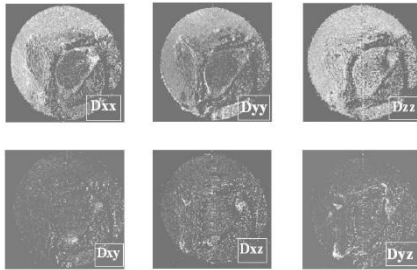
2.3.4 **A. Krzyżak**, A. Jasiński, W. P. Węglarz, D. Adamek, P. Sagnowski, M. Baj: Visualisation of the extent of damage in a rat spinal cord injury model using MR microscopy of the water diffusion tensor. *Acta neurobiologiae experimentalis* 2005, 65(3):255-64.

Prace [H4-H6] dotyczące obrazowania tensora dyfuzji w rdzeniu kręgowym legły u podstaw opracowanych w roku 2008 założeń zgłoszenia patentowego [H8a], w którym zawarto główne cechy metody opartej o przestrzenny rozkład macierzy b . Metody, która została w latach późniejszych nazwana BSD-DTI i której pełne założenia teoretyczne oraz wyniki eksperymentalne przedstawiono w pracy [H1]. W niniejszej publikacji dokonano obliczeń i analizy składowych tensora dyfuzji dla biologicznych układów porowatych jakim są tkanki nerwowe rdzenia kręgowego szczura. Tkanekę rdzenia kręgowego analizowano w dwóch stanach: kontrolnym i po uszkodzeniu w sposób ściśle kontrolowany. Składowe tensora dyfuzji oraz parametry otrzymane ze składowych jak: ślad, współczynnik izotropii, współczynnik dyfuzji poprzecznej oraz wzdłużnej analizowano dla różnych obszarów zainteresowania. Na rysunku 8A pokazane są różne ścieżki biegnące wzdłuż rdzenia kręgowego, dla których po dokonaniu analizy histopatologicznej (rys. 8B) analizowano również składowe tensora dyfuzji. Na rysunku 9A przedstawione są mapy symetrycznego tensora dyfuzji obliczone dla każdego woksela obrazu tomograficznego. Po dokonaniu diagonalizacji liczono parametry bazujące na składowych tensora dyfuzji (rys. 9B). Na rysunku 9B widzimy wyraźny (statystycznie istotny) wzrost współczynnika izotropii i obniżenie wartości współczynnika dyfuzji wzdłużnej w pobliżu centrum uszkodzenia. Obserwacje pokazały istnienie ścisłego powiązania między zmianami tensora dyfuzji wody w eksperymentach DTI oraz zmianami urazowymi tkanki nerwowej rdzenia kręgowego. Do przeprowadzania eksperymentów DTI oraz analizy danych korzystano z oprogramowania napisanego przez autora. Trudności związane z obliczeniem macierzy b w sposób niezależny od orientacji obrazów tomograficznych dla wykonanych eksperymentów *in vitro* (a więc statycznych); nieopublikowane w niniejszej pracy, były inspiracją do dalszych badań mający na celu uniezależnienie się od sposobu określania macierzy b w eksperymentach DTI.

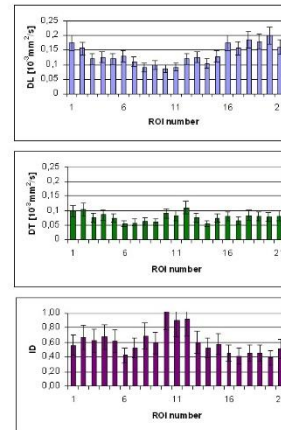


Rys. 8A. Ścieżki z obszarami wzdłuż rdzenia kręgowego dla, których analizowano składowe tensora dyfuzji oraz prowadzono badania histopatologiczne.

Rys. 8B. Obraz z mikroskopu optycznego tkanki rdzenia kręgowego po urazie. W zaznaczonych obszarach widoczne zmiany w strukturze tkanki.



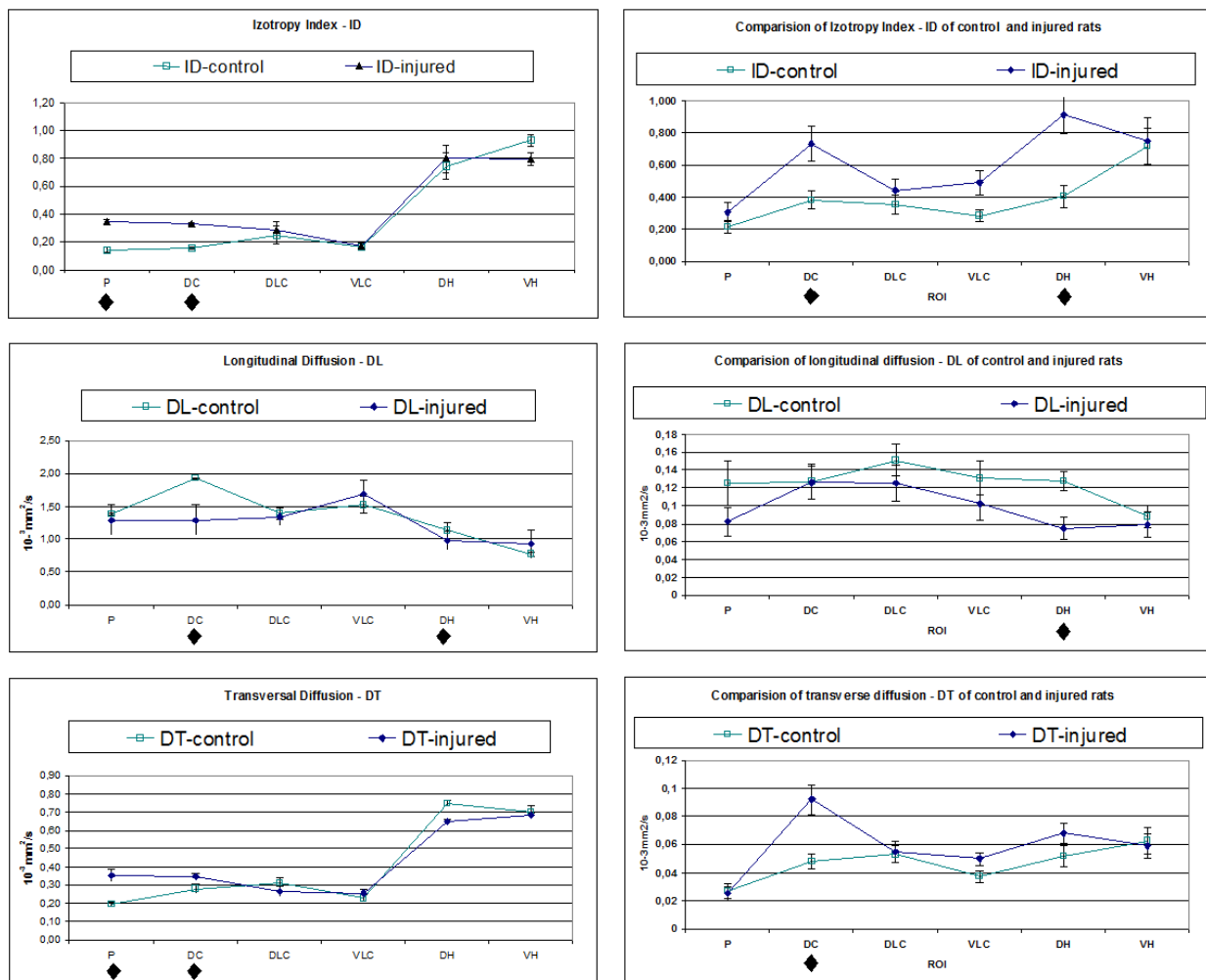
Rys. 9A Składowe symetrycznego tensora dyfuzji w układzie laboratoryjnym (związany z magnezem).



Rys. 9B Współczynniki obliczone z wartości własnych tensora dyfuzji (po diagonalizacji w układzie osi głównych): DT – dyfuzji poprzecznej, DL – dyfuzji wzdłużnej, ID – izotropii.

2.3.5 **A. Krzyżak**, A. Jasiński., D. Adamek.: Qualification of the most statistically “sensitive” diffusion tensor imaging parameters for detection of spinal cord injury Acta Physica Polonica A vol. 108, 207-210 (2005).

W pracy [H5] będącej kontynuacją i uzupełnieniem pracy [H4] skoncentrowano się na znalezieniu najbardziej efektywnych parametrów (obliczonych ze składowych tensora dyfuzji) do detekcji zmian pourazowych w rdzeniu kręgowym. Przeanalizowano kilkadziesiąt eksperymentów rdzenia kręgowego szczura in vitro i in vivo wykonanych na mikroskopie MRJ wyposażonym w magnes nadprzewodzący o polu magnetycznym 6.4T. Rdzenie kręgowie szczura w stanie kontrolnym oraz poddane urazowi w okolicach kręgów Th12 i Th13 obrazowano w eksperymentach DTI. Obliczone składowe tensora dyfuzji analizowano dla kilku wybranych obszarów zainteresowania znajdujących się w istocie szarej oraz białej tkanki rdzenia. Różnice pomiędzy grupami kontrolną i po urazie analizowano pod względem statystycznym. Wyniki pokazały, że najmniejszy potencjał w detekcji zmian pourazowych należy przypisać do śladu tensora, który dostarcza informacji uśrednionej z 3 ortogonalnych kierunków. Natomiast pozostałe parametry jak współczynniki dyfuzji poprzecznej, podłużnej, izotropii, anizotropii frakcyjnej, dostarczają informacji komplementarnych. Zestawienie graficzne wyników dla różnych obszarów zainteresowania rdzeni kręgowych zmierzonych in vitro i in vivo przedstawiono na rysunku 10, z kolei tabela 1 przedstawia statystycznie istotne zmiany zarejestrowane przy pomocy analizy różnych współczynników obliczonych z wartości głównych tensora dyfuzji dla kolejnych badanych obszarów zainteresowania.



Rys. 10. Wykresy współczynników: izotropii ID, dyfuzji poprzecznej DT, dyfuzji podłużnej DL dla rdzeni kręgowych kontrolnych oraz po kontrolowanym uszkodzeniu. Kolumna lewa odpowiada badaniom in vivo, prawa in vitro. Znak rombu określa obszary zainteresowania dla których współczynniki różnią się w sposób statystycznie istotny ($p < 0.05$)

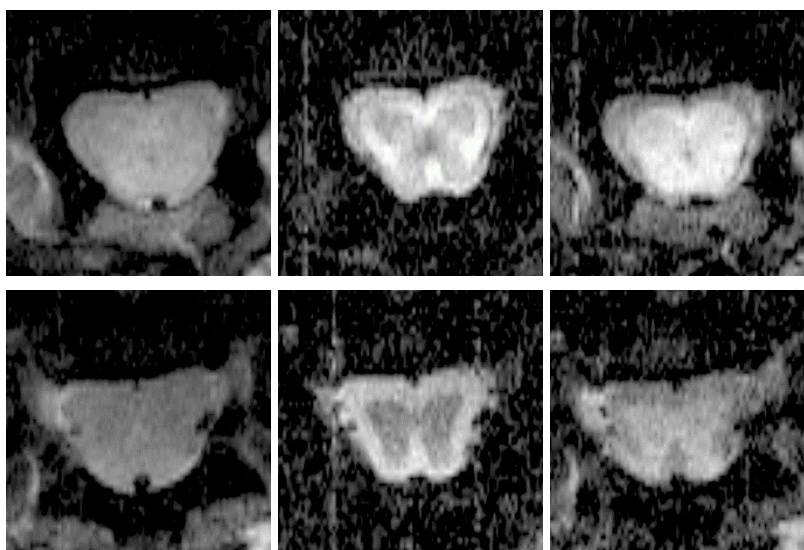
ROI	ID _A	ID _X	DL _A	DL _X	DT _A	DT _X	Tr _A	Tr _X	FA _A	FA _X
P	+	-	-	-	+	-	-	-	+	-
DC	+	+	+	+	+	-	+	+	-	+
DLC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
VLC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
DH	-	-	+	-	-	-	-	-	+	-
VH	-	+	-	-	-	+	-	-	-	-

Tabela 1. Zestawienie wyników statystycznie istotnych ($p < 0.05$) składowych tensora dyfuzji zmierzonych w eksperymentach in vivo (indeks A) i in vitro (indeks X). Znak “+” wskazuje statystycznie istotne różnice ($p < 0.05$) pomiędzy kontrolnymi i poddanymi urazowi tkankami rdzenia kręgowego szczura w określonych rejonach: P - pyramidal tracts; DC - Dorsal Column; DLC - Dorsal Lateral Column; VLC - Ventral Lateral Column; DH - Dorsal Horn; VH - Ventral Horn

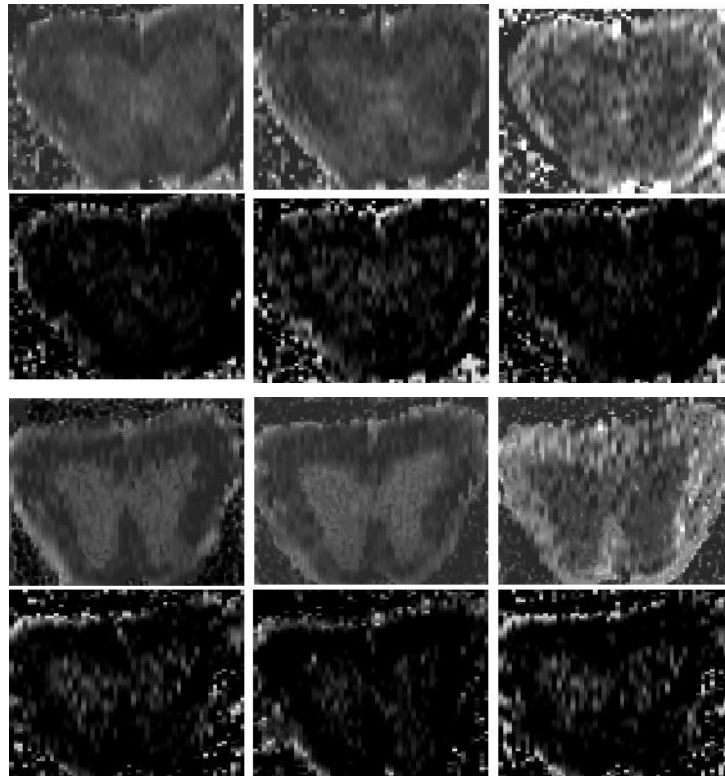
2.3.6 **A. Krzyżak, A. Jasiński, S. Kwieciński, P. Kozłowski, D. Adamek:** Quantitative Assessment of Injury in Rat Spinal Cords In Vivo by MRI of Water Diffusion Tensor. Applied Magnetic Resonance 2008, 34(1):3-20.

Doświadczenie uzyskane w wyniku eksperymentów in vitro dotyczących obrazowania biologicznych układów porowatych [H4-H5] pozwoliło na przeprowadzenie znacznie trudniejszych badań in vivo. Efekty tych doświadczeń zawarto w niniejszej publikacji [H6]. Podobnie jak w pracach [H4-H5] analizowano zmiany współczynników tensora dyfuzji tkanki nerwowej rdzenia kręgowego szczura w dwóch grupach: kontrolnej i po urazie przeprowadzonym w sposób kontrolowany. W celu właściwego pomiaru obrazów ważonych dyfuzyjnie będących źródłem danych do obliczeń map tensora dyfuzji, pomiary MR były synchronizowane przez impulsy pochodzące z EKG oraz detektora oddechu umieszczonego na klatce piersiowej. To pozwoliło na dokonanie wysokiej jakości pomiarów rdzenia bez artefaktów ruchowych i w konsekwencji na obliczenie składowych tensora dyfuzji. Na rysunku 11 przedstawiono obrazy MR ważone dyfuzyjnie rdzenia kręgowego w dwóch różnych przekrojach: w centrum uszkodzenia oraz 5 mm powyżej. Odpowiednie mapy składowych tensora dyfuzji są pokazane na rysunku 12. Rysunek 13 zawiera natomiast mapy FA (Fractional Anisotropy) współczynnika anizotropii oraz mapy składowych głównych tensora dyfuzji w postaci prezentacji RGB.

Głównym osiągnięciem było pokazanie możliwości obrazowania in vivo zmian pourazowych rdzenia kręgowego przy pomocy tensora dyfuzji. Zmiany dyfuzji w tkance nerwowej występują znacznie wcześniej niż obrzęki i krwawienia, daje to potencjalną możliwość wcześniejszej diagnostyki i leczenia wszelkich urazów rdzenia kręgowego, które w początkowej fazie nie wywołują np. obrzęków. Pojawienie się takich obrzęków np. po 2-3 dniach jest potencjalnie dodatkowo niebezpieczne i jest związane z dodatkowym uciskiem na rdzeń.



Rys. 11. Przykładowe obrazy rdzenia kręgowego: w centrum uszkodzenia – wiersz pierwszy i 5 mm powyżej – wiersz drugi. Odpowiednio bez gradientu dyfuzyjnego (kolumna pierwsza) i kolejne z gradientami dyfuzyjnymi w kierunku Y i Z.



Rys. 12. Składowe tensora dyfuzji dla warstwy w centrum uszkodzenia (2 pierwsze rzędy) i 5 mm powyżej (2 kolejne rzędy).

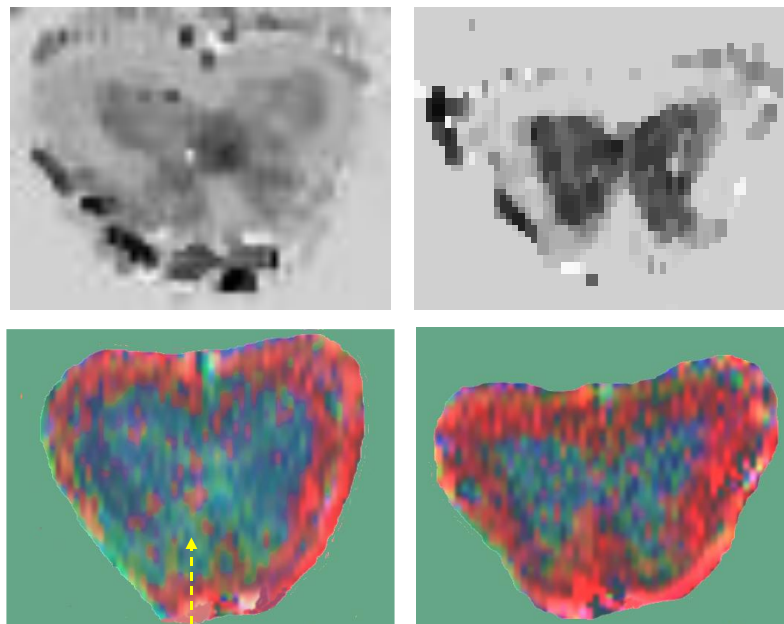
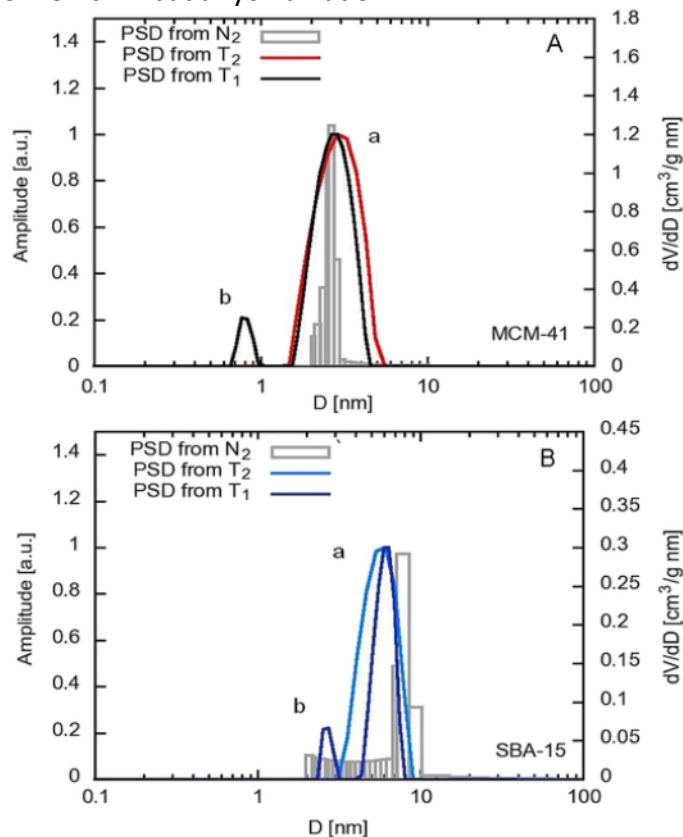


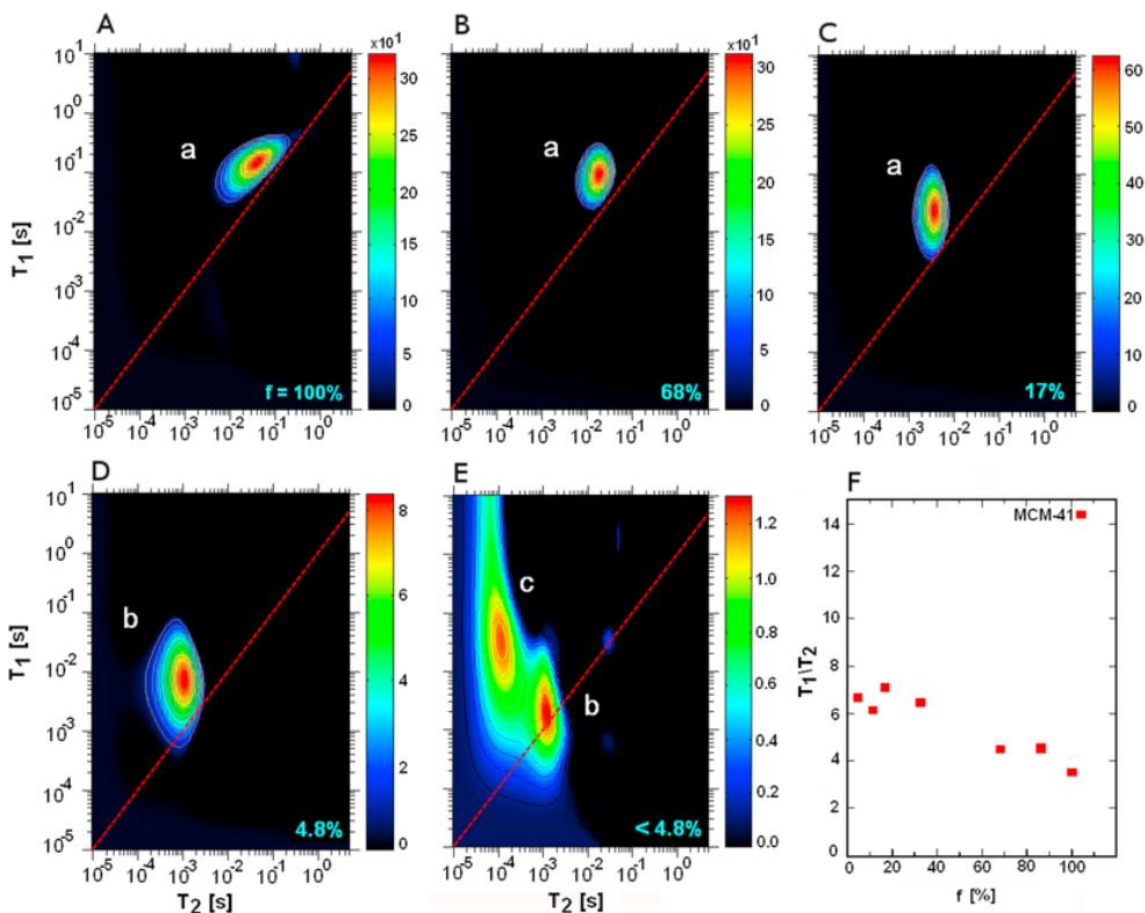
Fig. 13. Obrazy anizotropii frakcyjnej FA oraz składowe tensora dyfuzji w prezentacji RGB: w centrum uszkodzenia – kolumna pierwsza i 5 mm powyżej – kolumna druga.

2.3.7 **A. Krzyżak**, I. Habina: Low field 1H NMR characterization of mesoporous silica MCM-41 and SBA-15 filled with different amount of water. Microporous and Mesoporous Materials 2016, 231: 230-239. DOI:10.1016/j.micromeso.2016.05.032 (IF-3.45) (WoS).

Motywacją dla pracy [H7] było scharakteryzowanie układów mezoporowych (średnice nanoporowe) zbudowanych ze związków silikatowych o dużych powierzchniach i jednolitej heksagonalnie uporządkowanej strukturze porów metodą MRJ w niskim polu 50mT z krótkim czasem echa. Tak niskie pole umożliwiło uzyskanie wyników, na które nie mają wpływu różnice w podatnościach magnetycznych badanego ośrodka, co z kolei jest głównym problemem stosowania MRJ dla układów porowatych w systemach o wysokich polach magnetycznych. W pracy [H7] badaliśmy czasy relaksacji poprzecznej T₂ i podłużnej T₁ ich ilorazy oraz mapy T₁T₂ w zależności od zawartości wody w obu próbkach w stanach od przepiętnionych do częściowo wypełnionych mezoporów (Rys. 14). We wcześniejszych pracach wykonanych techniką MAS przez D'Agostino i wsp [18], wykazano, że stosunek T₁/T₂ koreluje z maksymalną energią aktywacji desorpcji, która daje informację o sile oddziaływania wody na powierzchni (rys. 15). Wyniki przedstawione w niniejszej pracy w sposób komplementarny potwierdzają wcześniejsze doniesienia Grunberg et al. [19], w którym silniejsze wiązanie cząsteczek wody obserwowano dla SBA-15 w porównaniu z MCM-41. Unikalnym osiągnięciem pracy jest zaobserwowanie rezonansu jądrowego jąder wodoru zarówno w wodzie wolnej wypełniającej przestrzeń porów jak i przestrzeni między porami, wodzie związanej z powierzchnią cząstek silikatowych MCM-41 i SBA-15, i wreszcie grup hydroksylowych występujących na powierzchni badanych układów.



Rys. 14. Rozkład porów uzyskany w badaniach czasów relaksacji T₁ i T₂ oraz izoterm N₂.



Rys. 15. Mapy rozkładów T_1T_2 , gdzie sygnały odpowiadają: a – wodzie wolnej, b – powierzchniowo związanej, c – grupom hydroksylowym.

Podsumowując, wyniki pracy [H7] stanowią również zademonstrowanie możliwości skutecznego (poprawnego) obrazowania poprzez MRJ układów porowych ciał stałych na granicy **mikro i mezoporów (2 nm)** według klasyfikacji IUPAC (w rzeczywistości jesteśmy też w stanie obrazować układy mikroporów np. w łupkach [B1,B3]). Dotychczas w pracach [H4-H6] badaliśmy **biologiczne makropory o wielkościach rzędu kilku do kilkudziesięciu mikrometrów**. Praca [H3] jest z kolei przykładem zastosowania MRJ do **układów mezo i makroporowych występujących w ciele stałym** (piaskowce). Natomiast prace [H1] i [H2] oprócz części innowacyjnej są egzemplifikacją zastosowania MRJ do wzorcowych układów **makroporów o strukturach kapilarnych i laminarnych**.

2.3.8 **A. Krzyżak.** Anisotropic diffusion phantom for calibration of diffusion tensor imaging pulse sequence used in MRI.

Publikacja [H8] stanowi opis przyznanego patentu amerykańskiego w lutym 2014 o numerze: US8643369 B2. W opisie patentu jest zawarta ochrona metody kalibracji co stanowi rozwinięcie zastrzeżeń 6-9 opisanych w zgłoszeniu polskim Z[1]. Na potrzeby amerykańskiego urzędu oraz w odpowiedzi na uwagi recenzentów amerykańskich, doszło do przeredagowania i rozwinięcia niektórych zapisów. Jednakże co do istoty jest to ochrona metody kalibracji opisanej powyżej. Szczegółowe zapisy znajdują się pod podanymi numerami zgłoszeń i patentów, które jednocześnie stanowią referencje publikacyjne.

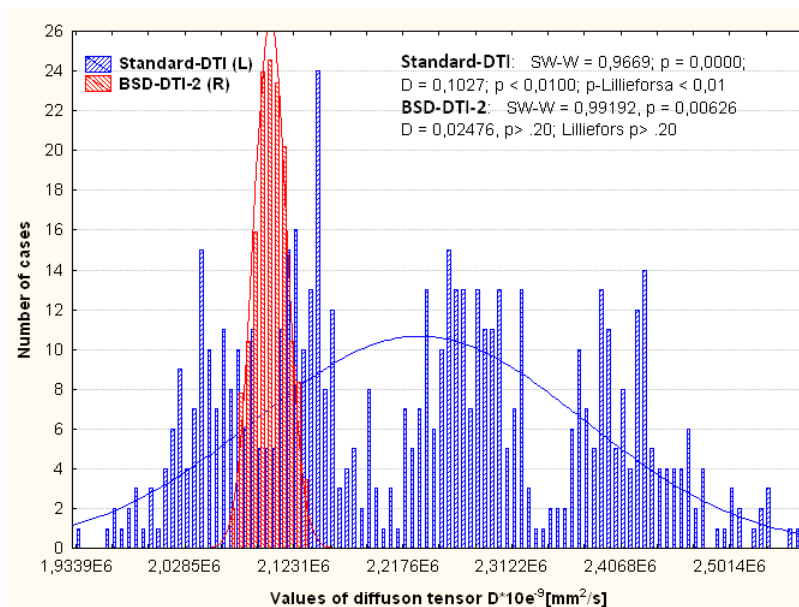
Przedmiotem wynalazku jest anizotropowy fantom dyfuzji dla kalibracji dowolnej dyfuzyjnej sekwencji obrazowania MR, DTI oraz sposób kalibracji dowolnego tomografu MR z wykorzystaniem anizotropowych wzorców dyfuzji w oparciu o macierz „b”, która stanowi wielkość charakterystyczną dla danej sekwencji obrazowania magnetycznego rezonansu MR i dla danego tomografu MR, wykorzystywanej podczas badań diagnostycznych, ciał stałych, ciał amorficznych i ciekłych oraz tkanek biologicznych.

W znanym stanie techniki, wartości macierzy „b” potrzebne dla obliczenia tensora dyfuzji, są określane analitycznie, dla każdej dyfuzyjnej sekwencji obrazowania MR i dla każdego tomografu oddzielnie, w sposób przybliżony, ze względu na skomplikowane wzory służące do ich wyliczenia. W obliczeniach tensora dyfuzji jest stosowana również pojedyncza wartość macierzy „b”, przyjmowana dla całej objętości badanego obiektu.

Wadą znanych metod obliczania tensora dyfuzji jest wysoka zawartość błędów przeliczeniowych, wynikających ze stosowania przybliżonych wartości macierzy „b” oraz założeniu braku przestrzennego rozkładu macierzy „b”. Stwarza to znaczne trudności właściwego, precyzyjnego i ilościowego określenia zmian dyfuzji wody obiektu badanego tomografem MR oraz brakiem powtarzalności otrzymanych wyników. Dla różnych tomografów MR występują różne sekwencje MR, co w konsekwencji daje różne, trudne do porównania wyniki. Wyniki te są obarczone błędami, ze względu na brak możliwości właściwego określenia wartości macierzy „b”.

Sposób kalibracji dowolnego tomografu MR według wynalazku, eliminuje te niedogodności, pozwalając na precyzyjne i przestrzenne określenie wartości macierzy „b” dla dowolnego tomografu MR i dowolnej sekwencji obrazowania, w szczególności DTI.

Szczegółowe przykłady zastosowania metody BSD-DTI na komercyjnych skanerach MR przedstawiono w pracach [H1] i [H2]. Natomiast rysunek 16 ilustruje możliwą skalę poprawy dokładności określania składowych tensora dyfuzji.



Rysunek 16. Rozkłady wartości głównych tensora dyfuzji dla fantomu izotropowego uzyskane przy pomocy metody standardowej DTI (kolor niebieski) i metody według wynalazku (kolor czerwony), nazwanej BSD-DTI (B matrix Spatial Distribution in DTI). Odchylenie standardowe rozkładu uzyskanego metodą BSD-DTI jest kilka razy mniejsze w stosunku do rozkładu uzyskanego metodą standardową.

2.4 Podsumowanie

Zagadnieniem łączącym prace [H1-H8] są nowatorskie rozwiązania w dziedzinie MRJ, pozwalające na znaczne zwiększenie dokładności estymacji parametrów biofizycznych układów porowatych w różnych dziedzinach nauki i techniki, jak biologia, geologia czy inżynieria materiałowa. Część rozwiązań w szczególności dotyczących obrazowania dyfuzji i tensora dyfuzji zostało objęte ochroną patentową [H8,Z1,Z2,Z3].

Do **najważniejszych osiągnięć zawartych** w publikacjach [H1-H8] mogą zaliczyć:

- Opracowanie teorii nowych metod obrazowania współczynników dyfuzji i składowych tensora dyfuzji w eksperymentach DWI i DTI:
 - BSD-DTI - B-matrix Spatial Distribution in DTI,
 - sBSD-DTI - simplified BSD-DTI.
- Opracowanie założeń i doprowadzenie do realizacji nowej linii fantomów anizotropowych o strukturze laminarnej i kapilarnej, będących wzorcami tensora dyfuzji.
- Wykonanie prototypów do zastosowania metody BSD-DTI w praktyce oraz wykonanie eksperymentów z ich wykorzystaniem na komercyjnych systemach tomograficznych firm Bruker 9.4T, GE 3T, Siemens 3T.
- Opracowanie teorii dotyczącej obrazowania jąder wodoru w stanie: wody ciekłej, wody powierzchniowo związanej oraz grup hydroksylowych w układach mezoporowych oraz jej weryfikacja eksperymentalna.
- Uzyskanie ochrony patentowej dla metody BSD-DTI w amerykańskim urzędzie patentowym.

Literatura

1. Bloch F, Hansen WW, Packard M. Nuclear Induction. Phys Rev 1946; 69:127 (The original announcement by Bloch's group)
2. Purcell EM, Torrey HC, Pound RV. Resonance absorption by nuclear moments in a solid. Phys Rev 1946; 69:37-38. (The original announcement by Purcell's group)
3. Simpson MJ, Simpson AJ. NMR Spectroscopy. A Versatile Tool for Environmental Research. 1st ed. Chichester : John Wiley & Sons Ltd, 2014.
4. Stapf S, Han S-J. NMR Imaging in Chemical Engineering Research. 4th ed. Weinheim : Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., 2006
5. George R. Coates, Lizhi Xiao, and Manfred G. Prammer, NMR Logging Principles and Applications, Halliburton Energy Services, 1999.
6. E.L.Hahn, Phys. Rev., 780,580(1950).
7. P.T. Callaghan, *Principles of Nuclear Magnetic Resonance Microscopy*, Clarendon Press, Oxford, 1993
8. A. Einstein *Investigation on the theory of the Brownian movement* . New York: Dover; 1926
9. EO. Stejskal, JE. Tanner, Spin diffusion measurements: spin echos in presence of time dependent field gradient. Journal of Chemical Physics 1965;42:288-292.
10. Basser PJ, Mattiello J, LeBihan D.. Estimation of the effective self-diffusion tensor from the NMR spin echo. J Magn Reson B 1994;103:247-254.
11. Basser PJ, Mattiello J, Le Bihan D.. MR diffusion tensor spectroscopy and imaging. Biophys J 1994;66:259-267.
12. M. Vogel, Eur. Phys. J. Spec. Top. 189 (2010) 47- 64.
13. Le Bihan D, Editor. Magnetic Resonance Imaging of Diffusion and Perfusion: Applications to Functional Imaging. Lippincott-Raven Press, New York, 1995..
14. Le Bihan D & Fukuyama H, Editors. Water: The forgotten Biological Molecule. Pan Stanford Publishing, Singapore, 2011.
15. Peter B. Kingsley. Introduction to diffusion tensor imaging mathematics: Part II. Anisotropy, diffusion-weighting factors, and gradient encoding schemes. Concepts in Magnetic Resonance Part A 2006; 101-122.
16. Peter B. Kingsley. Introduction to diffusion tensor imaging mathematics: Part III. Tensor Calculation, Noise, Simulations, and Optimization. Concepts in Magnetic Resonance Part A 2006; Volume 28A, Issue 2: 155-179.
17. Le Bihan D. Looking inside the brain: The power of neuroimaging. Princeton University Press, Princeton, 2014.
18. B. Grünberg, T. Emmler, E. Gedat, I. Shenderovich, G.H. Findenegg, H.H. Limbach, G. Buntkowsky, Chem. Eur. J. 10 (2004) 5689-5696.
19. C. D'Agostino, J. Mitchell, M.D. Mantle, L.F. Gladden, Chem. Eur. J. 20 (2014) 13009 - 13015.
20. M. Fleury, E. Kohler, F. Norrant, S. Gautier, J.M'Hamdi, L. Barree, J. Phys. Chem. C 117 (2013) 4551-4560.
21. M. Fleury, M. Romero-Sarmiento, J. Petr. Sci. Eng. 137 (2016) 55-62.

3. Wykaz osiągnięć naukowo badawczych (niewchodzących w skład dzieła omówionego w punkcie 2., oraz wskaźniki dokonań naukowych.

3.1 Wskazanie własnego udziału merytorycznego i procentowego w powstaniu publikacji w czasopismach znajdujących się w bazie Journal Citation Reports (JCR).

Jestem współautorem 19 prac opublikowanych w czasopismach z listy JCR, z tej listy 11 prac opublikowano po uzyskaniu stopnia doktora, a kolejne 8 przed jego uzyskaniem. Pełną listę zawiera **wykaz A** znajdujący się na końcu autoreferatu.

Po doktoracie.

[A1] K. Borkowski, K. Kłodowski, H. Figiel, A. Krzyżak. A theoretical validation of the B-matrix Spatial Distribution approach to Diffusion Tensor Imaging. Magnetic Resonance Imaging 2016, (IF-1.98).

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: opracowaniu koncepcji pracy, realizacji eksperymentów MRJ i wykonaniu analizy danych. Uczestniczyłem w przygotowaniu tekstu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na 35%.

[A2] G. Stoch, A. Krzyżak. Parameterized signal calibration for NMR cryoporometry experiment without external standard. Journal of Magnetic Resonance 2016, 269:97-103. Doi:10.1016/j.jmr.2016.05.015, (IF- 2.89).

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: dyskusji koncepcji pracy, dyskusji koncepcji eksperymentów MRJ i wykonania analizy danych. Uczestniczyłem w korekcie tekstu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na 10%.

[A3] A. Fheed, A. Świerczewska, A. KRZYŻAK: The isolated Wuchiapingian (Zechstein) Wielichowo Reef and its sedimentary and diagenetic evolution, SW Poland. Geological Quarterly 12/2015; 59(4):762-780. DOI:10.7306/gq.1266 (IF-1.0).

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: dyskusji koncepcji pracy w dziedzinie MRJ, realizacji eksperymentów MRJ i wykonaniu analizy danych. Mój udział procentowy szacuję na 15%.

[A4] K. Borkowski, A. Krzyżak: Simulations of rotation of the anisotropic phantom in BSD-DTI. MAGMA Magnetic Resonance Materials in Physics Biology and Medicine 10/2015; 28(1 Supplement):467-468. Doi:10.1007/s10334-015-0490-7 (IF-2.87).

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: opracowaniu koncepcji pracy. Uczestniczyłem w przygotowaniu tekstu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na 50%.

[A5] K. Kłodowski, A. Krzyżak: Pattern recognition and filtering of the b-matrix spatial distribution in the BSD-DTI technique. *MAGMA Magnetic Resonance Materials in Physics Biology and Medicine* 10/2015; 28(1 Supplement):468-469. Doi:10.1007/s10334-015-0490-7 (IF-2.87).

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: opracowaniu koncepcji pracy. Uczestniczyłem w przygotowaniu tekstu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na 50%.

[A6] A. Krzyżak: Application of anisotropic diffusion phantom for DTI experiments. *MAGMA Magnetic Resonance Materials in Physics Biology and Medicine* 10/2012; 25(1 Supplement):231-232. DOI:10.1007/s10334-012-0324-9 (IF-1.86).

Jestem jedynym autorem pracy. Mój udział procentowy wynosi 100%.

[A7] A. Krzyżak, Leszek Jaroszewicz: Anisotropic diffusion phantom - application for DTI. *Molecular Imaging & Biology* 12/2010; 12 (Suppl 2). DOI:10.1007/s11307-010-0453-3 (IF-3.14).

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: opracowaniu nowej teorii dotyczącej obrazowania tensora dyfuzji, nazwanej BSD-DTI, wykonaniu eksperymentów i analizie ich danych, koncepcji budowy fantomów anizotropowych, przygotowaniu tekstu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na 85 %.

[A8] A. Krzyżak: The comparison of statistically significant alterations of the water diffusion tensor parameters for injured rats' spinal cords in vivo and in vitro. *European Journal of Neurology* 09/2010; 17(S1):313-313, (IF-3.76).

Jestem jedynym autorem pracy. Mój udział procentowy wynosi 100%.

[A9] A. Krzyżak: Assessment of white and grey matter injury in rats spinal cord using alterations of the water diffusion tensor parameters. *Journal of the Neurological Sciences* 08/2009; 283(1-2):279-279, (IF- 2.32).

Jestem jedynym autorem pracy. Mój udział procentowy wynosi 100%.

[A10] A. Krzyżak, A. Jasiński: Application of statistical analysis of diffusion tensor parameters for assessment of spinal cord injury. *MAGMA Magnetic Resonance Materials in Physics Biology and Medicine* 09/2005; 18(S1):116-117. DOI:10.1007/s10334-005-0002-2, (IF-1.72).

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: opracowaniu nowej metody wykorzystania obrazowania tensora dyfuzji, wykonaniu eksperymentów i analizie ich danych, przygotowaniu tekstu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na 85 %.

- [A11] A. Jasiński, A. T. Krzyżak, D. Adamek, J. Pindel, W. P. Węglarz, P. Kozłowski, A. Urbanik: Investigation of spinal cord structures using water diffusion tensor imaging in a rat model of mechanical injury "in vivo". *Neurologia i neurochirurgia polska* 01/2001; 35(3):85-85, (IF-0.74).

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: współtworzeniu koncepcji pracy, wykonaniu oprogramowania do obliczeń tensora dyfuzji, realizacji eksperymentów DTI i wykonaniu analizy danych. Mój udział procentowy szacuję na 30%.

Przed doktoratem.

- [A12] J. Pindel, A. Jasiński, A. Krzyżak, W. Węglarz, D. Adamek, P. Sagnowski, P. Kozłowski, A. Urbanik: Temporal studies of water diffusion tensor in an injured spinal cord of the rat. *MAGMA Magnetic Resonance Materials in Physics Biology and Medicine* 01/2000; 11(SI):121-121, (IF-0.87).

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: wykonaniu oprogramowania do obliczeń tensora dyfuzji, realizacji eksperymentów DTI i wykonaniu analizy danych. Mój udział procentowy szacuję na 25%.

- [A13] D. Adamek, A. Jasiński, A. Krzyżak, J. Pindel, P. Kozłowski, P. Sagnowski, W. Węglarz: The distribution and spatial relations of damage to the spinal cord after mechanical injury may suggest a narrow potential therapeutical "window".. *MAGMA Magnetic Resonance Materials in Physics Biology and Medicine* 01/2000; 11(SI):10-10, (IF-0.87).

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: wykonaniu oprogramowania do obliczeń tensora dyfuzji, realizacji eksperymentów DTI i wykonaniu analizy danych. Mój udział procentowy szacuję na 25%

- [A14] A. Jasiński, A. Krzyżak, P. Kozłowski, W. Węglarz, J. Pindel, D. Adamek, P. Sagnowski, A. Urbanik: Investigation of spinal cord injury on a rat model - effects of formaline fixation on water diffusion tensor. *MAGMA Magnetic Resonance Materials in Physics Biology and Medicine* 01/1999; 8(SI):181-182, (IF-0.8).

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: współtworzeniu koncepcji pracy, wykonaniu oprogramowania do obliczeń tensora dyfuzji, realizacji eksperymentów DTI i wykonaniu analizy danych, przygotowaniu tekstu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na 40%.

- [A15] W. Węglarz, A. Jasiński, A. Krzyżak, P. Kozłowski, D. Adamek, P. Sagnowski, J. Pindel: MR microscopy of water diffusion tensor in biological systems. *Applied Magnetic Resonance* 12/1998; 15(3):333-341. DOI:10.1007/BF03162019, (IF-0.93).

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: opracowaniu koncepcji pracy, wykonaniu oprogramowania do obliczeń tensora dyfuzji, realizacji eksperymentów DTI i wykonaniu analizy danych, przygotowaniu tekstu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na 50%.

[A16] A. Jasiński, P. Kozłowski, A. Krzyżak, D. Adamek, P. Sagnowski: Water diffusion tensor imaging in an injured spinal cord of the rat in vivo at 9.4 T. *MAGMA Magnetic Resonance Materials in Physics Biology and Medicine* 01/1998; 6(SI):119-120, (IF-0.2).

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: współtworzeniu koncepcji pracy, wykonaniu oprogramowania do obliczeń tensora dyfuzji, realizacji eksperymentów DTI i wykonaniu analizy danych, udział w przygotowaniu tekstu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na 40%.

[A17] D. Adamek, J. Kałuża, P. Sagnowski, A. Krzyżak, A. Jasiński, M. Baj, W. Węglarz, A. Urbanik: In the search of better insight into pathology of spinal cord injury. Investigation of water diffusion in relation to the expression of ubiquitin and glial fibrillary acidic protein in spinal cord of rat after experimental weight drop injury. *Zentralblatt für Neurochirurgie* 01/1998; 58(3):211-211, (IF-0.3).

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: wykonaniu oprogramowania do obliczeń tensora dyfuzji, realizacji eksperymentów DTI i wykonaniu analizy danych. Mój udział procentowy szacuję na 20%.

[A18] A. Krzyżak, A. Jasiński, D. Adamek, M. Baj, J. Kuśmiderski, P. Sagnowski, W. Węglarz: Monitoring injury in a rat spinal cord using MR Microscopy of a water diffusion tensor. *MAGMA Magnetic Resonance Materials in Physics Biology and Medicine* 01/1997; 5(2):161-162, (IF-0.2).

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: opracowaniu koncepcji pracy, wykonaniu oprogramowania do obliczeń tensora dyfuzji, realizacji eksperymentów DTI i wykonaniu analizy danych, przygotowaniu tekstu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na 50%.

[A19] B. Tomanek, A. Jasiński, Z. Sułek, J. Muszyńska, P. Kulinowski, S. Kwieciński, A. Krzyżak, T. Skórka, J. Kibiński: Magnetic resonance microscopy of internal structure of drone and queen honey bees. *J Apic. Res. Journal of Apicultural Research* 01/1996; 35(1):3-9, (IF-0.774).

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: wykonaniu części oprogramowania, realizacji części eksperymentów. Mój udział procentowy szacuję na 5%.

3.2 Autorstwo lub współautorstwo monografii, publikacji naukowych w czasopismach międzynarodowych lub krajowych innych niż znajdujące się w bazach lub na liście, o których mowa w 3.1.

Oprócz prac dzieła [H1-H8] oraz prac w czasopismach wyróżnionych na liście JCR [A1-A19] jestem autorem bądź współautorem dwudziestu prac [B1-B20] opublikowanych w innych czasopismach oraz ponad stu wystąpień konferencyjnych [C1-C108]. Ponadto oprócz zamieszczonych poniżej prac, kolejne 6 prac znajduje się w fazie recenzji w wysoko punktowanych czasopismach z listy JCR. Listę tych prac oraz listę wystąpień konferencyjnych zawierają odpowiednio wykazy C i D zamieszczone na końcu tego dokumentu.

[B1] S. Bednarczyk, A. KRZYŻAK, G. MACHOWSKI. Comparative analysis of measurements and estimation of permeability of shales in selected well sections from Baltic Basin (Northern Poland). SCIENCE AND TECHNOLOGIES IN GEOLOGY, EXPLORATION AND MINING, SGEM 2016; 3:769-776. DOI 10.5593/SGEM2016/B13/S06.097.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: dyskusji koncepcji pracy w dziedzinie MRJ, realizacji eksperymentów MRJ i wykonaniu analizy danych. Mój udział procentowy szacuję na 30%.

[B2] J. Górka, A. Świerczewska, A. KRZYŻAK. Controls of pressure solution structures on fluid migration – nuclear magnetic resonance studies from Struga-1 well (Zechstein Main Dolomite; W Poland). SCIENCE AND TECHNOLOGIES IN GEOLOGY, EXPLORATION AND MINING, SGEM 2016; 3:785-792. DOI 10.5593/SGEM2016/B13/S06.099.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: dyskusji koncepcji pracy w dziedzinie MRJ, realizacji eksperymentów MRJ i wykonaniu analizy danych. Mój udział procentowy szacuję na 30%.

[B3] E. PUSKARCZYK, P. KRAKOWSKA, A. KRZYŻAK, G. MACHOWSKI. Correlation of nuclear magnetic resonance and mercury intrusion porosimetry data for the best petrophysical parameters estimation in shales. SCIENCE AND TECHNOLOGIES IN GEOLOGY, EXPLORATION AND MINING, SGEM 2016; 3:793-800. DOI 10.5593/SGEM2016/B13/S06.100.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: dyskusji koncepcji pracy w dziedzinie MRJ, realizacji eksperymentów MRJ i wykonaniu analizy danych. Mój udział procentowy szacuję na 30%.

[B4] A. PSTRUCHA, G. MACHOWSKI, A. KRZYŻAK. Petrophysical characterization of the Miocene sandstones of the Carpathian Foredeep (South-East Poland). SCIENCE AND TECHNOLOGIES IN GEOLOGY, EXPLORATION AND MINING, SGEM 2016; 3:891-898. DOI 10.5593/SGEM2016/B13/S06.112.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: dyskusji koncepcji pracy w dziedzinie MRJ, realizacji eksperymentów MRJ i wykonaniu analizy danych. Mój udział procentowy szacuję na 30%.

[B5] E. PSTRUCHA, G. MACHOWSKI, A. KRZYŻAK. Porosity and permeability of the Main Dolomite oil-bearing rocks in the S-1 well (Western Poland). SCIENCE AND TECHNOLOGIES IN GEOLOGY, EXPLORATION AND MINING, SGEM 2016; 3:905-912. DOI 10.5593/SGEM2016/B13/S06.114.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: dyskusji koncepcji pracy w dziedzinie MRJ, realizacji eksperymentów MRJ i wykonaniu analizy danych. Mój udział procentowy szacuję na 30%.

[B6] N. Radzik, A. KRZYŻAK, A. Świerczewska, G. MACHOWSKI. The complex characterization of sandstone cores using low-field NMR SCIENCE AND TECHNOLOGIES IN GEOLOGY, EXPLORATION AND MINING, SGEM 2016; 3:963-970. DOI 10.5593/SGEM2016/B13/S06.122.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: dyskusji koncepcji pracy w dziedzinie MRJ, realizacji eksperymentów MRJ i wykonaniu analizy danych. Mój udział procentowy szacuję na 40%.

- [B7] K. Kłodowski, P. Łukasik, A. Krzyżak. Approximation of the actual spatial distribution of the b-matrix in diffusion tensor imaging with bivariate polynomials. *Annals of Computer Science and Information Systems* 2016; 8:943-946. DOI: 10.15439/2016F457.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: dyskusji koncepcji pracy w dziedzinie MRJ, opracowaniu nowej teorii dotyczącej obrazowania tensora dyfuzji, nazwanej BSD-DTI, realizacji eksperymentów MRJ i wykonaniu analizy danych. Mój udział procentowy szacuję na 40%.

- [B8] K. Borkowski, A. Krzyżak. Improving precision and accuracy of DTI experiments with the simplified BSD calibration – computer simulations. *Annals of Computer Science and Information Systems* 2016; 8:935-938. DOI: 10.15439/2016F403.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: opracowaniu koncepcji pracy w dziedzinie MRJ, opracowaniu nowej teorii dotyczącej obrazowania tensora dyfuzji, nazwanej sBSD-DTI, realizacji eksperymentów MRJ i wykonaniu analizy danych. Mój udział procentowy szacuję na 60%.

- [B9] A. Krzyżak, P. Łukasik, K. Janc. Determination of the quality of results obtained by various numerical methods for BSD. *Annals of Computer Science and Information Systems* 2016; 8:955-958. DOI: 10.15439/2016F458.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: opracowaniu koncepcji pracy w dziedzinie MRJ, opracowaniu nowych teorii dotyczącej obrazowania tensora dyfuzji, nazwanej BSD-DTI i sBSD-DTI, realizacji eksperymentów MRJ i wykonaniu analizy danych. Mój udział procentowy szacuję na 60%.

- [B10] J. Górka, A. Świerczewska, A. Krzyżak. Significance of pressure solution structures analysis for fluid flow studies – examples from Struga-1 well (Zechstein Main Dolomite; W Poland): first results. *Geology, Geophysics & Environment* 01/2015; 41(1):82-83. DOI:10.7494/geol.2015.41.1.82.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: dyskusji koncepcji pracy w dziedzinie MRJ, realizacji eksperymentów MRJ i wykonaniu analizy danych. Mój udział procentowy szacuję na 30%.

- [B11] N. Radzik, A. Świerczewska, A. Krzyżak. Identification of tectonic microstructures in flysch sandstones of the Outer Carpathians using X-ray nanotomography and nuclear magnetic resonance – first results. *Geology, Geophysics & Environment* 01/2015; 41(1):127-128. DOI:10.7494/geol.2015.41.1.127.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: dyskusji koncepcji pracy w dziedzinie MRJ, realizacji eksperymentów MRJ i wykonaniu analizy danych. Mój udział procentowy szacuję na 30%.

- [B12] A. Krzyżak, K. Kłodowski, Z. Raszewski. Anisotropic phantoms in Magnetic Resonance Imaging. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Society Conference Proceedings* 2015; 414-417. DOI: 10.1109/EMBC.2015.7318387.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu: nowej teorii dotyczącej obrazowania tensora dyfuzji, nazwanej BSD-DTI, koncepcji budowy fantomów anizotropowych, koncepcji eksperymentów i ich realizacji. Uczestniczyłem w przygotowaniu tekstu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na 60%.

- [B13] A. Krzyżak, K. Borkowski. Theoretical analysis of phantom rotations in BSD-DTI. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society Conference Proceedings 2015; 410-413. DOI:10.1109/EMBC.2015.7318386.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: opracowaniu koncepcji pracy w dziedzinie MRJ, opracowaniu nowej teorii dotyczącej obrazowania tensora dyfuzji, nazwanej BSD-DTI, realizacji eksperymentów MRJ i wykonaniu analizy danych. Mój udział procentowy szacuję na 60%.

- [B14] A. Krzyżak, K. Kłodowski. The B Matrix Calculation Using the Anisotropic Phantoms for DWI and DTI Experiments. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society Conference Proceedings 2015; 418-421. DOI:10.1109/EMBC.2015.7318388.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: opracowaniu nowej teorii dotyczącej obrazowania tensora dyfuzji, nazwanej BSD-DTI, wykonaniu eksperymentów i analizie ich danych, przygotowaniu tekstu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na 90 %.

- [B15] Ł. Kaczmarek, M. Maksimczuk, T. Wejrzanowski, A. Krzyżak. Use of X-ray computed microtomography in the heterogeneity analysis of Polish Zechstein carbonate rocks. SCIENCE AND TECHNOLOGIES IN GEOLOGY, EXPLORATION AND MINING, SGEM 2016; 3:1027-1034. DOI 10.5593/SGEM2016/B13/S06.130.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: dyskusji koncepcji pracy w dziedzinie MRJ, realizacji eksperymentów MRJ i wykonaniu analizy danych. Mój udział procentowy szacuję na 20%.

- [B16] Ł. Kaczmarek, M. Maksimczuk, T. Wejrzanowski, A. Krzyżak. High-resolution x-ray microtomography and Nuclear Magnetic Resonance study of a carbonate reservoir rock. SCIENCE AND TECHNOLOGIES IN GEOLOGY, EXPLORATION AND MINING, SGEM 2015; 1:779-786. DOI 10.5593/SGEM2015/B11/S6.099.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: dyskusji koncepcji pracy w dziedzinie MRJ, realizacji eksperymentów MRJ i wykonaniu analizy danych. Mój udział procentowy szacuję na 20%.

- [B17] A. Krzyżak, A. Jasiński, W. Węglarz, D. Adamek, M. Baj, J. Kuśmiderski, P. Sagnowski. Quantitative assessment of injury in the spinal cord of a rat using MR Microscopy of water diffusion tensor, Proceedings of ISMRM, 6th Scientific Meeting in Sydney 1998, vol 3, p. 1931.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: opracowaniu koncepcji pracy, wykonaniu oprogramowania do obliczeń tensora dyfuzji, realizacji eksperymentów DTI i wykonaniu analizy danych, przygotowaniu tekstu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na 50%.

- [B18] A. Jasiński, P. Kozłowski, A. Krzyżak, D. Adamek, P. Sagnowski, and J. Pindel. Investigation of spinal cord injury on a rat model using water diffusion tensor

imaging. Proceedings of the IV Annual Meeting of the British Chapter of the ISMRM, p. B8, Nottingham, December 1998.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: współtworzeniu koncepcji pracy, wykonaniu oprogramowania do obliczeń tensora dyfuzji, realizacji eksperymentów DTI i wykonaniu analizy danych, udział w przygotowaniu tekstu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na 40%.

[B19] A. Krzyżak, A. Jasiński, P. Kozłowski, D. Adamek, P. Sagnowski, and J. Pindel, "Diffusion tensor imaging of the injured spinal cord of a rat *in vivo*. A comparison with *in vitro* experiments", Proceedings of VII Meeting of ISMRM, p. 327, Philadelphia, May 1999.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: opracowaniu koncepcji pracy, wykonaniu oprogramowania do obliczeń tensora dyfuzji, realizacji eksperymentów DTI i wykonaniu analizy danych, przygotowaniu tekstu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na 50%.

[B20] A. Krzyżak, A. Jasiński, P. Kozłowski, D. Adamek, P. Sagnowski, and J. Pindel, "Quantitative assessment of injury in the spinal cord of a rat *in vivo* using MRI of water diffusion tensor", Proceedings of VII Meeting of ISMRM, p. 1810, Philadelphia, May 1999.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: opracowaniu koncepcji pracy, wykonaniu oprogramowania do obliczeń tensora dyfuzji, realizacji eksperymentów DTI i wykonaniu analizy danych, przygotowaniu tekstu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na 50%.

3.3 Autorstwo lub współautorstwo opracowań zbiorowych, katalogów zbiorów, dokumentacji prac badawczych, ekspertyz, utworów i dzieł artystycznych.

Jestem autorem dokumentacji know-how wymienionej w trzech poniższych zestawieniach.

3.3.1 Dokumentacja know-how dotycząca wykorzystania prototypu wynalazku [H8].

Dokumentacja wynalazku z dziedziny Magnetycznego Rezonansu Jądrowego chronionego zgłoszeniami patentowymi [Z1] oraz patentem [H8] zawierająca opracowania w następujących obszarach:

- publikacji założeń chronionych zgłoszeniami patentowymi oraz patentem,
- założeń technologii budowy nowatorskich fantomów anizotropowych i implementacji metody BSD-DTI na kilku komercyjnych tomografach MR (0.05T, 0.5T firmy Magritek i 3T firmy Siemens),
- nowych rozwiązań teoretycznych,
- koncepcji i algorytmów oprogramowania do analizy danych w eksperymentach standardowych DWI, DTI i innowacyjnych metodą **BSD-DTI** dla systemów tomograficznych firm Bruker, GE, Siemens, wstępna nazwa programu to BSD-DTI,
- koncepcji i algorytmów oprogramowania do przechowywania i analizy wielu danych laboratoryjnych, wstępna nazwa programu to Geo Lab-Log,
- modelu biznesowego wykorzystania wynalazku oraz założeń utworzenia spółki spin-off.

3.3.2 Dokumentacja know-how dotycząca wykorzystania wynalazku [Z2].

Dokumentacja wynalazku z dziedziny Magnetycznego Rezonansu Jądrowego chronionego zgłoszeniami patentowymi [Z2] zawierająca opracowania w następujących obszarach:

- publikacji założeń chronionych zgłoszeniami patentowymi,
- nowych rozwiązań teoretycznych,

3.3.3 Dokumentacja know-how dotycząca wykorzystania prototypu wynalazku [Z3].

Dokumentacja wynalazku z dziedziny Magnetycznego Rezonansu Jądrowego chronionego zgłoszeniami patentowymi [Z3] zawierająca opracowania w następujących obszarach:

- publikacji założeń chronionych zgłoszeniami patentowymi,
- nowych rozwiązań teoretycznych,
- koncepcji i algorytmów oprogramowania do analizy danych w eksperymentach standardowych DWI, DTI i innowacyjnych metodą **sBSD-DTI** dla systemów tomograficznych firm Bruker, GE, Siemens.

3.4 Wynalazki, wzory użytkowe i przemysłowe, które uzyskały ochronę i zostały wystawione na międzynarodowych lub krajowych wystawach lub targach.

Jestem autorem trzech rodzin wynalazków wymienionych poniżej i szerzej opisanych w publikacjach [Z1, Z2, Z3].

3.4.1 Pierwsza grupa wynalazków – [Z1].

Pierwsza grupa jest chroniona zgłoszeniami patentowymi, polskim, europejskim, japońskim i przyznany patentem amerykańskim H[8] dotyczy:

- budowy różnych modeli fantomów anizotropowych o strukturach laminarnych oraz kapilarnych będących wzorcami tensora dyfuzji,
- metody obliczania rzeczywistego przestrzennego rozkładu gradientu pola magnetycznego oraz macierzy b w trakcie eksperymentów DWI i DTI, nazwanej **BSD-DTI**,
- sposobu kalibracji dowolnej sekwencji obrazowania dyfuzyjnego w tomografach MR oraz metody obliczania rzeczywistego rozkładu współczynników i tensorów dyfuzji w eksperymentach DWI i DTI.

3.4.2 Druga grupa wynalazków – Z[2].

Druga grupa chroniona polskim zgłoszeniem patentowym dotyczy:

- metody nazwanej **TSD-DTI** służącej jak poprzednio do obliczania rzeczywistego przestrzennego rozkładu gradientu pola magnetycznego oraz macierzy b w eksperymentach DWI i DTI, tym razem przy użyciu zestawu (macierzy) fantomów anizotropowych,
- sposobu kalibracji dowolnej sekwencji obrazowania dyfuzyjnego w tomografach MR oraz metody obliczania rzeczywistego rozkładu współczynników i tensorów dyfuzji w eksperymentach DWI i DTI.

3.4.3 Trzecia grupa wynalazków [Z3].

Trzecia grupa wynalazków chroniona zgłoszeniami patentowymi, polskim oraz międzynarodowym (procedura PCT) dotyczy:

- uproszczonej metody w stosunku do BSD-DTI służącej jak poprzednio do wyznaczania rzeczywistego przestrzennego rozkładu gradientu pola magnetycznego oraz macierzy b w trakcie eksperymentów DWI i DTI, nazwanej **sBSD-DTI**,

- sposobu dwukrotnego skrócenia czasu kalibracji dowolnej sekwencji obrazowania dyfuzyjnego w tomografach MR w stosunku do metody BSD-DTI.

[Z1] **A. Krzyżak.** Anizotropowy fantom dyfuzji dla kalibracji dowolnej sekwencji obrazowania MR,DTI, oraz sposób kalibracji dowolnego tomografu MR:

- a) Numer zgłoszenia polskiego: P.385276 (26.05 2008).
- b) Rozszerzenie zgłoszenia patentowego w międzynarodowym trybie PCT PCT/PL2009/000051, WO/2009/145648 (2009).
- c) Numer zgłoszenia amerykańskiego US2011074423 (2011).
- d) Numer zgłoszenia japońskiego JP2011520582 (2011).
- e) Numer zgłoszenia europejskiego EP09755104.8 (2011).

Ścieżka patentowa [Z1] chroniąca założenia metody później nazwanej BSD-DTI, opisanej szczegółowo w pracy [H1] oraz założenia budowy fantomów anizotropowych o strukturze laminarnej i kapilarnej inicjalnie zostały objęte ochroną patentową w maju 2008 roku jako jeden z rezultatów własnego grantu badawczego [G5]. W latach kolejnych ścieżka patentowa zostało wzbogacona o zgłoszenie międzynarodowe PCT i następnie zgłoszenie amerykańskie, japońskie, i europejskie. Wybór ścieżek patentowych został dokonany na podstawie wniosków płynących ze Studium Wykonalności opracowanego przez firmę Strategor w ramach grantu Patent Plus [G4]. Ścieżka polska, japońska i europejska pozostają nadal w fazie procedowania, natomiast ścieżka amerykańska zakończyła się przydzieleniem patentu [H8] w lutym roku 2014. Każda ze ścieżek narodowych jest procedowana oddzielnie i różni się mniej lub bardziej od pierwszego i najpełniejszego opisu zawartego w publikacji zgłoszenia pod numerem P.385276.

Główne zastrzeżenia patentowe zgłoszenia P.385276:

1. Anizotropowy fantom dyfuzji dla kalibracji dowolnej sekwencji obrazowania MR, znamienny tym, że stanowi go dowolna przestrzeń, wypełniona gęsto niemagnetycznymi i nie zawierającymi jąder wodoru, kapilarnymi elementami (1), które są wypełnione H₂O, hydrożelem lub inną substancją zawierającą jądra wodoru, lub stanowi go układ cienkich płytek szklanych (1), przedzielonych warstwami H₂O, hydrożelu lub inną substancją zawierającą jądra wodoru (2), przy czym fantom dyfuzji stanowią również anizotropowe ciekłe kryształy LC lub inne, dla innych pierwiastków, takich jak na przykład 2H, 3He, 13C, 14N, 17O, 19F, 29Si, 31P i inne.

2. Anizotropowy fantom według zastrz.1, znamienny tym, że stanowi go przestrzeń cylindryczna, wypełniona gęsto niemagnetycznymi i nie zawierającymi jąder wodoru, cylindrycznymi prętami, przedzielonymi H₂O, hydrożelem lub inną substancją zawierającą jądra wodoru.

3. Anizotropowy fantom według zastrz.1 i 2, znamienny tym, że poprzez regulację średnic kapilar, średnic cylindrycznych prętów, czy też grubością warstwy H₂O, hydrożelu lub innej substancji zawierającej jądra wodoru, pomiędzy cienkimi płytkami szklanymi, wyznacza się dla danej temperatury, wielkość ograniczenia dyfuzji dla określonych czasów dyfuzji Δ .

4. Anizotropowy fantom według zastrz.1, znamienny tym, że gęsto niemagnetyczne kapilary lub inne elementy fantomu dyfuzji stanowią szkło, teflon lub inny o podobnych właściwościach materiał.

5. Anizotropowy fantom według zastrz.1, znamienny tym, że stanowi rurkę z wiązką odpowiednio dobranych kapilar, wypełnionych H₂O, hydrożelem lub inną substancją zawierającą jądra wodoru tak, aby ograniczenie dyfuzji, dla danej temperatury, w kierunku prostopadłym do osi kapilary, było istotne w stosunku do danego zakresu czasów dyfuzji Δ, w danej dyfuzyjnej sekwencji obrazowania MR.

6. Sposób kalibracji dowolnego tomografu MR, polegający na przestrzennym określeniu wartości macierzy „b”, znamienny tym, że dla dokonania kalibracji dowolnej sekwencji tomografu MR anizotropowym fantomem dyfuzji, anizotropowy fantom dyfuzji zostaje umieszczony w polu oddziaływania cewki RF w badanej przestrzeni tomografu MR, po czym dla obliczenia tensora dyfuzji, wyznacza się wymaganą ilość macierzy „b” w oparciu o anizotropowy wzorec dyfuzji, co stanowi nie mniej niż sześć macierzy „b”, określonych dla każdego woksela i dla każdego wyznaczonego kierunku wektora gradientu dyfuzyjnego, przy czym wartości macierzy „b” dla danego wektora gradientu dyfuzji wyznacza się, poprzez rozwiązanie układu nie mniej niż sześciu równań dla różnych wartości tensora dyfuzji D, przy czym dla danego kierunku wektora gradientu dyfuzyjnego, różne wartości tensora dyfuzji uzyskuje się, korzystnie poprzez obrót anizotropowego fantomu dyfuzji w badanej przestrzeni tomografu MR, który stanowi wzorec dyfuzji, dla którego tensor dyfuzji w układzie osi głównych posiada znane wartości, przy czym wzorcem dyfuzji dokonuje się obroty o różne wartości kąta Eulera tak, aby wyznacznik macierzy D_M, której kolumny odpowiadają składowym tensora dyfuzji D po kolejnych obrotach wzorca dyfuzji o określone kąty Eulera, jest określony macierzą

$$D_M = \begin{pmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} & D_{14} & D_{15} & D_{16} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} & D_{24} & D_{25} & D_{26} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} & D_{34} & D_{35} & D_{36} \\ D_{41} & D_{42} & D_{43} & D_{44} & D_{45} & D_{46} \\ D_{51} & D_{52} & D_{53} & D_{54} & D_{55} & D_{56} \\ D_{61} & D_{62} & D_{63} & D_{64} & D_{65} & D_{66} \end{pmatrix},$$

której wyznacznik jest różny od zera, po czym, dla obliczenia wartości macierzy „b” dla danego kierunku wektora gradientu dyfuzji, rozwiązuje się układ równań:

$$\mathbf{L} = \mathbf{b} \mathbf{D}_M,$$

przy czym czynność ta jest powtarzana dla wymaganej ilości kierunków wektora gradientu dyfuzji, czyli dla nie mniej niż sześciu nie współliniowych kierunków gradientów dyfuzyjnych i nie mniej niż jeden dla kierunku bez gradientu dyfuzyjnego.

7. Sposób według zastrz.6, znamienny tym, że dla anizotropowego fantomu dyfuzji, wartości tensora dyfuzji w układzie osi głównych D₁, D₂, D₃ jako funkcji temperatury T i czasów dyfuzji Δ, wyznacza się poprzez wykonanie klasycznych, jednowymiarowych eksperymentów pomiaru współczynników dyfuzji dla kierunków anizotropii.

8. Sposób według zastrz.6, znamienny tym, że dla kalibrowanej przestrzeni tomografu MR, buduje się i dobiera wzorzec dyfuzji dla danej cewki RF, w zależności od jej kształtu i parametrów.

9. Sposób według zastrz.6, znamienny tym, że kalibrację dowolnego tomografu MR należy powtórzyć przed każdą zmianą parametrów sekwencji obrazowania, w szczególności przy zmianach gradientów dyfuzyjnych.

[Z2] **A. Krzyżak.** Metoda kalibracji sekwencji obrazowania współczynników dyfuzji i tensora dyfuzji w eksperymentach obrazowania DWI, DTI, fMRI – DTI:

Opracowanie zawarte w publikacji [Z2] dotyczy zgłoszenia patentowego w polskim urzędzie patentowym o numerze P.403172 z marca roku. 2013. Innowacyjne rozwiązanie jest jednym z rezultatów kolejnego grantu własnego realizowanego w latach 2010-2013 w IFJ PAN. Przedmiotem wynalazku jest sposób kalibracji sekwencji obrazowania dyfuzji w eksperymencie typu Diffusion MRI przeprowadzanym w tomografie MR, zwłaszcza w eksperymentach DWI, DTI, FMRI-DTI. Niniejszy wynalazek jest rozwiązaniem alternatywnym dla opisanego powyżej rozwiązania BSD-DTI. Sposób kalibracji dowolnej sekwencji obrazowania dyfuzji metodą MRJ według wynalazku eliminuje opisaną powyżej wady, pozwalając na precyzyjny pomiar współczynników dyfuzji i tensora dyfuzji przy pomocy dowolnej sekwencji obrazowania w szczególności w eksperymentach DWI, DTI, FMRI-DTI.

Jego istotą jest sposób kalibracji sekwencji obrazowania dyfuzji w eksperymencie typu Diffusion MRI przeprowadzanym w tomografie MR, który to sposób obejmuje następujące kroki w określonych miejscach pola oddziaływania cewki RF. W badanej przestrzeni tomografu MR, umieszcza się kolejno anizotropowy fantom dyfuzji, który ma ograniczenie dyfuzji w przynajmniej jednym kierunku wzdłuż jednej z osi układu osi głównych związanych z tym fantomem, i który ma tensor dyfuzji o znanych uprzednio wartościach. Po umieszczeniu anizotropowego fantomu dyfuzji w określonym miejscu, wykonuje się pomiary tensora dyfuzji, określając dla niego składowe tensora dyfuzji w układzie osi głównych. Następnie, po wykonaniu pomiarów dla każdego z miejsc, w których umieszczono anizotropowy fantom uzyskuje się przestrzenny rozkład tensora dyfuzji fantomu anizotropowego, którego wartości charakteryzuje pewna wartość przedkalibracyjna odchylenia standardowego. Kolejną czynnością to, na podstawie przestrzennego rozkładu tensora dyfuzji dokonanie korekty parametrów pomiarów tensora dyfuzji w celu obniżenia odchylenia standardowego do wartości pokalibracyjnej, mniejszej od wartości przedkalibracyjnej.

Przykład wykorzystania wynalazku jest przedstawiony na rysunku 17.

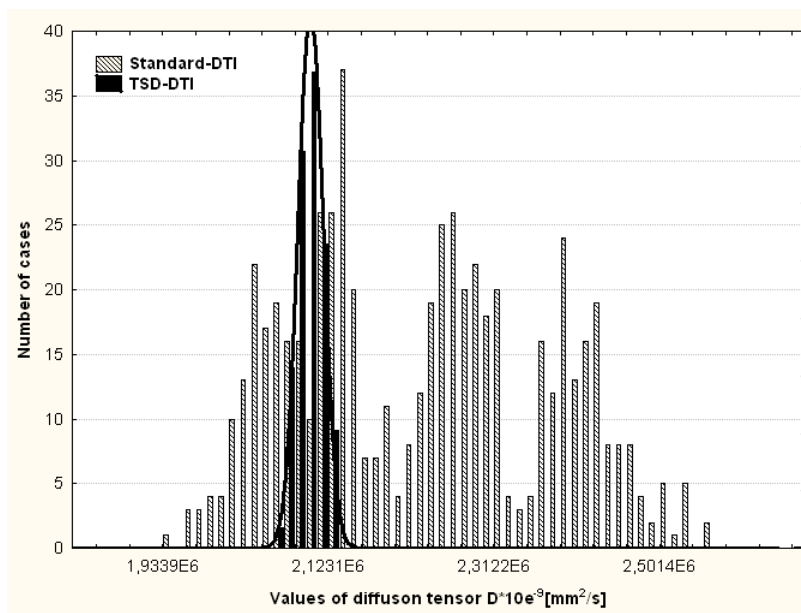


Fig. 17 Rozkłady wartości głównych tensora dyfuzji dla fantomu izotropowego uzyskane przy pomocy metody standardowej DTI (przerywane) i metody według wynalazku (pełne), wstępnie nazwanej TSD-DTI (Tensors Spatial Distribution in DTI). Odchylenie standardowe rozkładu uzyskanego metodą TSD-DTI jest kilka razy mniejsze w stosunku do rozkładu uzyskanego metodą standardową i jest porównywalne do rezultatów osiągniętych metodą BSD-DTI.

Główne zastrzeżenia patentowe zgłoszenia P.403172:

1. Sposób kalibracji sekwencji obrazowania dyfuzji w eksperymencie typu Diffusion MRI przeprowadzonym w tomografii MR, który to sposób obejmuje następujące kroki:

w określonych miejscach pola oddziaływania cewki RF w badanej przestrzeni tomografu MR, umieszcza się kolejno anizotropowy fantom dyfuzji, który ma ograniczenie dyfuzji w przynajmniej jednym kierunku wzdłuż jednej z osi układu osi głównych związanych z tym fantomem, i który ma tensor dyfuzji o znanych uprzednio wartościach, przy czym po umieszczeniu anizotropowego fantomu dyfuzji w określonym miejscu, wykonuje się pomiary tensora dyfuzji, określając dla niego składowe tensora dyfuzji w układzie osi głównych, tak że po wykonaniu pomiarów dla każdego z miejsc, w których umieszczono anizotropowy fantom uzyskuje się przestrzenny rozkład tensora dyfuzji fantomu anizotropowego, którego wartości charakteryzuje pewna wartość przedkalibracyjną odchylenia standardowego, po czym na podstawie przestrzennego rozkładu tensora dyfuzji dokonuje się korekty parametrów pomiarów tensora dyfuzji w celu obniżenia odchylenia standardowego do wartości pokalibracyjnej, mniejszej od wartości przedkalibracyjnej.

2. Sposób według zastrz. 1, znamienny tym, że pomiary tensora dyfuzji wykonuje się dla różnych parametrów sekwencji dyfuzyjnej, w szczególności dla różnych wartości gradientów dyfuzji, czasów dyfuzji wartości macierzy b, kierunków i amplitudy wektora gradientu dyfuzji.

3. Sposób według zastrz. 1, znamienny tym, że korekty parametrów pomiarów tensora dyfuzji dokonuje się poprzez eksperymentalną zmianę parametrów sekwencji, w szczególności wartości macierzy „b”, ponownie wykonując pomiary tensora dyfuzji fantomu anizotropowego w tych samych określonych miejscach, przy czym korekty parametrów sekwencji dokonuje się do momentu otrzymania przestrzennego rozkładu tensora dyfuzji o pożądanej wartości pokalibracyjnej odchylenia standardowego.

5. Sposób według zastrz. 1, znamienny tym, że weryfikuje się uzyskane parametry pomiarów tensora dyfuzji przy pomocy tego samego eksperymentu przy użyciu skorygowanych parametrów dla jednorodnego fantomu wodnego.

6. Sposób według zastrz. 5, znamienny tym, że jeśli odchylenie standardowe dla przestrzennego rozkładu tensora dyfuzji dla jednorodnego fantomu wodnego przekracza pożądaną wartość, to powtarza się korekcję parametrów pomiarów tensora dyfuzji dla fantomu anizotropowego.

7. Sposób według zastrz. 1, znamienny tym, że skorygowane parametry pomiarów tensora dyfuzji stanowią element finalny kalibracji dowolnej sekwencji obrazowania tensora dyfuzji i wykorzystuje się je przy obrazowaniu tensora dyfuzji dowolnego obiektu.

8. Sposób według zastrz.1, znamienny tym, że kalibrację wykonuje się przed każdą zmianą parametrów sekwencji obrazowania, w szczególności przy zmianach wartości i kierunków wektorów gradientów dyfuzyjnych.

[Z3] **A. Krzyżak.** Sposób kalibracji sekwencji obrazowania w eksperymencie typu DMRI przeprowadzanym w tomografie MR:

Publikacja [Z3] dotyczy ostatniej, trzeciej ścieżki zgłoszeń patentowych przedstawionych w niniejszym dziele. Inicjalne zgłoszenie o numerze P. 413306 zostało dokonane w polskim urzędzie patentowym w lipcu roku. 2015, a kolejne rozszerzające ochronę na wszystkie kraje świata w trybie PCT rok później w lipcu 2016. Innowacyjność rozwiązania jest częściowo zależna od wynalazku [H8], a jego istota polega na 2 krotnym skróceniu procesu kalibracji skanerów MR, i uproszczeniu procedury kalibracyjnej co ma fundamentalne znaczenie szczególnie dla dużych komercyjnych systemów MR. Prace te są jednym z rezultatów grantu z drugiego konkursu Programu Badań Stosowanych realizowanego w latach 2013-2017 na AGH.

3.5 Sumaryczny impact factor publikacji naukowych według listy Journal Citation Reports (JCR), zgodnie z rokiem opublikowania.

Sumaryczny impact factor wszystkich prac wynosi: 40,79.

3.6 Liczba cytowań publikacji według bazy Web of Science (WoS)

Łączna liczba cytowań publikacji wynosi 77*, w tym 52 bez autocytowań.

3.7 Indeks Hirscha według bazy Web of Science

Indeks Hirscha, $h = 6^*$.

(*) Stan na 30 października 2016. W trakcie indeksowania w bazie WoS znajduje się 15 opublikowanych artykułów mojego współautorstwa oraz 5 publikacji innych autorów. Oczekiwany indeks Hirscha związany z tym faktem wynosi 8, a liczba cytacji przekracza 105.

3.8 Kierowanie międzynarodowymi i krajowymi projektami badawczymi oraz udział w takich projektach

Funkcje kierownicze w projektach badawczych, które pełnię lub pełniłem po uzyskaniu stopnia doktora:

- [G1]. **Koordynator zadań AGH** projektu realizowanego w latach 2015-2018 na podstawie umowy z NCBiR nr STRATEGMED2/265761/10/NCBR/2015 w ramach **programu STRATEGMED** pod tytułem *Regeneracja uszkodzeń niedokrwiennych układu sercowo-naczyniowego z wykorzystaniem Galarety Whartona jako nieograniczonego źródła terapeutycznego komórek macierzystych*. Tematem zadań AGH jest *Rozwój metod obrazowania wykorzystujących zjawisko Magnetycznego Rezonansu Jądrowego w celu ilościowego określenia potencjału regeneracyjnego WJMSC w badaniach mięśni sercowych i szkieletowych*.
- [G2]. **Kierownik projektu** realizowanego w latach 2013-2017 na podstawie umowy z NCBiR nr PBS2/A2/0/2013 w ramach **Programu Badań Stosowanych** pod tytułem *Opracowanie innowacyjnej metody wykorzystującej zjawisko Magnetycznego Rezonansu Jądrowego oraz jej zastosowanie do estymacji parametrów petrofizycznych skał łupkowych, terygenicznych i węglanowych z formacji naftowych Polski*.
- [G3]. **Kierownik grantu** własnego realizowanego w latach 2010-2013 na podstawie umowy z MNiSzW nr N N518413238 pt. *Opracowanie metody istotnej poprawy stosunku do szumu w badaniach fMRI-DTI mózgu i rdzenia kręgowego człowieka*.

[G4]. **Kierownik zadania** w ramach grantu realizowanego w latach 2010-2012 na podstawie umowy z MNiSzW nr PP 54001 w ramach programu Patent Plus. Temat dotyczył *opracowania stadium wykonalności i zgłoszeń narodowych wynalazku*.

[G5]. **Kierownik grantu** własnego realizowanego w latach 2006-2008 na podstawie umowy z MNiSW nr N518 006 31/0406 pod tytułem *Opracowanie kompleksowej metody określania wartości składowych macierzy b za pomocą MR tensora dyfuzji*.

Ponadto uczestniczyłem jako wykonawca w kolejnych projektach badawczych:

[G6]. Projekt realizowany w latach 2013-2017 pod kierownictwem Prof. Dr hab. M. Stefaniuka w ramach programu Blue Gas I, pod tytułem *Badania sejsmiczne i ich zastosowanie dla detekcji stref występowania gazu z łupków Dobór optymalnych parametrów akwizycji i przetwarzania w celu odwzorowania budowy strukturalnej oraz rozkładu parametrów petrofizycznych i geomechanicznych skał*.

[G7]. Projekt realizowany w latach 2014-2017 pod kierownictwem Prof. Dr hab. M. Stefaniuka w ramach programu Blue Gas II, pod tytułem *Rozpoznanie, lokalizacja i udostępnianie optymalnych stref występowania niekonwencjonalnych akumulacji węglowodorów typu „shale gas” w Karpatach fliszowych oraz technologiczne aspekty eksploatacji*.

3.9 Międzynarodowe lub krajowe nagrody za działalność naukową

- Nagroda **Magna Cum Laude** (pierwsze wyróżnienie dla zespołu w Polsce na największej w Europie konferencji dotyczącej MRJ) A. Krzyżak, A. Jasiński, D. Adamek, M. Baj, J. Kuśmiderski, P. Sagnowski, W. Węglarz: Monitoring injury in a rat spinal cord using MR Microscopy. Abstr. of 14th Ann. Meeting of ESMRMB'97 MAGMA Suppl. V(II):161-162. 1997.
- **II nagroda** na prestiżowej konferencji ISMRM w Nottingham A. Jasiński, Kozłowski P, A. Krzyżak, D. Adamek, Sagnowski P, and Pindel J. Investigation of spinal cord injury on a rat model using water diffusion tensor imaging. Proc. of the IV Meeting of the British Chapter of the ISMRM, p. B8, Nottingham (1998).
- **Wyróżnienie IFJ PAN**, A. Krzyżak, Badanie wody w układach biologicznych metodą obrazowania MR tensora dyfuzji wody, **praca doktorska**, IFJ PAN (2001).
- Wyróżnienia poprzez **stypendia ufundowane** przez towarzystwa ESMRMB i ISMRM oraz prezentacja wyników badań na prestiżowych konferencjach w latach 1998 (Sydney, Australia) i 1999 (Filadelfia, USA) przez **ISMRM San Diego, USA**, i w latach 1997-1999 (Bruksela, Genewa, Sewilla) przez **ESMRMB, Wiedeń, Austria**.
- Wyróżnienie Rektora AGH II stopnia za osiągnięcia naukowe, Kraków 2016.

3.10 Wygłoszenie referatów na międzynarodowych lub krajowych konferencjach tematycznych

Jestem autorem bądź współautorem ponad stu wystąpień na 49 międzynarodowych i 27 krajowych konferencjach. Spośród tej liczby 9 referatów wygłosiłem osobiście [C17, C19, C28, C33, C41, C53, C78, C80, C98]. Pełną listę wystąpień konferencyjnych wraz ze wskazaniem konferencji zawiera **wykaz C** zamieszczony na końcu autoreferatu.

4. Dorobek pracy dydaktyczny i popularyzatorski oraz informacja o współpracy międzynarodowej

4.1 Uczestnictwo w programach europejskich oraz innych programach międzynarodowych i krajowych

- Program Badań Stosowanych PBS2 [G2] – realizowany w latach 2013-2017.
- Program strategiczny STRATEGMED2 [G1] – realizowany w latach 2015-2018.
- Programy strategiczne Blue Gas 1 [G6] i Blue Gas 2 [G7] – realizowane w latach 2013-2017.

Projekty [G1], [G2], [G6] i [G7] zostały szerzej opisane w pkt. 3.8.

4.2 Aktywny udział w międzynarodowych i krajowych konferencjach naukowych

Jestem współautorem 108 wystąpień konferencyjnych przedstawionych w wykazie C. W tej liczbie jest zawartych 34 referatów prezentowanych na konferencjach krajowych i międzynarodowych, po uzyskaniu stopnia doktora (20), przed uzyskaniem stopnia doktora (14). Natomiast liczba prezentacji plakatowych wynosi 70, po uzyskaniu stopnia doktora (42), przed uzyskaniem stopnia doktora (38).

4.3 Udział w komitetach organizacyjnych międzynarodowych i krajowych konferencji naukowych

- Udział w Komitecie organizacyjnym Ogólnopolskiego Seminarium nt. Magnetycznego Rezonansu Jądrowego i Jego Zastosowań Kraków, lata 1994 – 2012.

4.4 Otrzymane nagrody i wyróżnienia

Nagrody i wyróżnienia zostały opisane w punkcie 3.9.

4.5 Udział w konsorcjach i sieciach badawczych

W ramach grantu [G2] kierownik konsorcjum złożonego z następujących uczelni oraz firm:

- Akademia Górniczo Hutnicza im Stanisława Staszica w Krakowie,
- Politechnika Warszawska,
- Wojskowa Akademia Techniczna im. Jarosława Dąbrowskiego w Warszawie,
- Instytut Fizyki Jądrowej PAN im. Henryka Niewodniczańskiego,
- Polskie Górnictwo Naftowe i Gazownictwo SA.

W ramach grantu [G1] uczestnik konsorcjum złożonego z następujących uczelni oraz firm:

- Collegium Medicum Uniwersytetu Jagiellońskiego
- Krakowski Szpital Specjalistyczny im. Jana Pawła II
- Polski Bank Komórek Macierzystych SA
- Jagiellońskie Centrum Innowacji sp. z o. o.
- Akademia Górniczo Hutnicza im Stanisława Staszica w Krakowie
- Śląski Uniwersytet Medyczny w Katowicach

4.6 Kierowanie projektami realizowanymi we współpracy z naukowcami z innych ośrodków polskich i zagranicznych oraz we współpracy z przedsiębiorcami, innymi niż wymienione w punkcie 3.9 i 4.5.

W ramach grantu [G1] współpraca AGH z następującymi ośrodkami oraz przedsiębiorcami:

- RWTH Aachen – grupa prof. Bernharda Blumicha
- ETH Zurych – dr Franciszek Hennel
- Magritek GmbH – dr Federico Casanova, dr Mark Hunter, dr Jurgen Koltz.

W ramach grantu [G2] współpraca AGH z następującymi ośrodkami oraz przedsiębiorcami:

- Magritek GmbH – dr Federico Casanova, dr Juan Perlo, MSc Sean Buchannan.

4.7 Udział w komitetach redakcyjnych i radach naukowych czasopism

brak

4.8 Członkostwo w międzynarodowych i krajowych organizacjach oraz towarzystwach naukowych

- IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers (od 2015).
- WMIS - World Molecular Imaging Society (od 2010)
- ESMRMB - European Society for Magnetic Resonance in Medicine and Biology (1997 – 2001, 2005-2006, 2012-2015).
- ISMRM - International Society for Magnetic Resonance in Medicine (1997-2000).

4.9 Osiągnięcia dydaktyczne i w zakresie popularyzacji nauki

- Przygotowanie i prowadzenie (od 2010) wykładów i ćwiczeń eksperymentalnych popularyzujących zagadnienia z fizyki dla dzieci szkół podstawowych.
- Przygotowanie i prowadzenie (od 2000) wykładów seminaryjnych dotyczących zastosowania tomografii magnetycznego rezonansu jądrowego do obrazowania w szczególności dyfuzji i tensora dyfuzji dla studentów, doktorantów i pracowników naukowych IFJ PAN.
- Przygotowanie i prowadzenie prezentacji (od 2006 do 2012) dotyczącej zastosowania tomografii i spektroskopii MRJ w trakcie dni otwartych IFJ PAN.
- Przygotowanie i prowadzenie (od 2014) pokazowych wykładów i ćwiczeń eksperymentalnych popularyzujących zagadnienia z fizyki magnetycznego rezonansu jądrowego dla studentów geologii stosowanej.

4.10 Opieka naukowa nad studentami

Promotor prac magisterskich wykonanych na kierunku studiów fizyki technicznej AGH:

- Mgr inż. Michał Radwan. Opracowanie szybkich sekwencji obrazowania bazujących na echu spinowym do badania dyfuzji *in vivo*. AGH, 2010.
- Mgr inż. Iwona Habina. Przestrzenne określanie macierzy b dla dowolnej sekwencji obrazowania tensora dyfuzji metodami magnetycznego rezonansu z wykorzystaniem wzorca anizotropowej dyfuzji. AGH, 2010.
- Mgr inż. Karol Borkowski, Rozwój metod obrazowania mózgu człowieka za pomocą fMRI-DTI. AGH, 2014.
- Weronika Mazur, Obrazowanie tensora dyfuzji w układach anizotropowych metodami MRJ, planowana obrona pracy magisterskiej w czerwcu 2017.

4.11 Opieka naukowa nad doktorantami w charakterze opiekuna naukowego lub promotora pomocniczego

Promotor pomocniczy prac doktorskich wykonywanych na kierunku studiów fizyki technicznej lub geologii AGH:

- Mgr inż. Krzysztof Kłodowski – planowana obrona pracy doktorskiej pod tytułem *Development of the B-matrix Spatial Distribution Diffusion Tensor Imaging applications in porous media and soft tissue imaging* - styczeń 2017.
- Mgr inż. Karol Borkowski – planowana obrona pracy doktorskiej pod tytułem *Obrazowanie dyfuzyjne mięśnia sercowego z uwzględnieniem rozkładu przestrzennego macierzy b* - czerwiec 2018.

- Mgr inż. Adam Fheed – planowana obrona pracy doktorskiej pod tytułem *Textural and diagenetic assessment of the Zechstein carbonates in the scope of Nuclear Magnetic Resonance and supplementary methods* – czerwiec 2019.
- Mgr inż. Natalia Radzik – planowana obrona pracy doktorskiej pod tytułem *Investigation of the synthesized and natural porous materials with different MOFs applying NMR and complementary chemical engineering methods* – czerwiec 2019.

4.12 Staże w zagranicznych i krajowych ośrodkach naukowych lub akademickich

Odbyłem miesięczne staże połączone z badaniami naukowymi w:

- Institute for Biodiagnostic of National Research Council, Winnipeg, Kanada, kwiecień 1999.
- FORENAP Institute, Rouffach, Francja, wrzesień 1998 .

Uczestniczyłem w szkoleniach dotyczących różnych zagadnień spektroskopii i tomografii MRJ organizowanych przez największe towarzystwa, europejskie (ESMRMB) i światowe (ISMRM):

- ESMRM - Bruksela, wrzesień 1997, Genewa, wrzesień 1998, Sewilla, wrzesień 1999, Lizbona, wrzesień 2012.
- ISMRM – Sydney, kwiecień 1998, Filadelfia, kwiecień 1999.

Uczestniczyłem w szkoleniach dotyczących wykorzystania zjawiska MRJ do zagadnień petrofizycznych w badaniach otworowych jak i laboratoryjnych przeprowadzonych przez znane firmy:

- NMR Petrophysics INC – Marsylia, Francja, marzec 2014.
- Magritek GmbH – Aachen, Niemcy, październik 2014.

4.13 Wykonane ekspertyzy lub inne opracowania na zamówienie (nieodpłatnie)

- Opracowanie trzech publikacji zgłoszeń patentowych dla rzeczników patentowych panów H. Drelichowskiego oraz A. Pawłowskiego (2009-2015).
- Opracowanie modelu biznesowego wynalazku [H8] dla MARR (2009).
- Opracowanie modelu biznesowego wynalazku [H8] na potrzeby studium wykonalności przygotowanego przez firmę Strategor z Poznania (2010).
- Przygotowanie dokumentacji know-how dla AGH opisanej w punkcie 3.4 (2015-2016).

4.14 Udział w zespołach eksperckich i konkursowych

brak

4.15 Recenzowanie projektów międzynarodowych i krajowych

brak

4.16 Recenzowanie publikacji w czasopismach międzynarodowych i krajowych

- Recenzent kilku prac (od 2008) dla *NMR in Biomedicine* i *Neuroradiology*.

4.17 Inne osiągnięcia i pełnione funkcje nie wymienione dotychczas

- Kierownik i twórca koncepcji Laboratorium Tomografii i Spektroskopii Magnetycznego Rezonansu Jądrowego na Wydziale Geologii Geofizyki i Ochrony Środowiska do badania układów porowatych geologicznych, materiałowych i biologicznych w niskich i średnich polach (2014-2016).



Lista publikacji

Publikacje naukowe w czasopismach znajdujących się w bazie Journal Citation Reports (JCR) wchodzące w skład dzieła.

- [H1] A. Krzyżak, Z. Olejniczak. Improving the accuracy of PGSE DTI experiments using the spatial distribution of b matrix. *Magnetic Resonance Imaging* 2015; 33(3): 286–295., DOI:10.1016/j.mri.2014.10.007 IF (2.09).
- [H2] K. Kłodowski, A. Krzyżak. Innovative anisotropic phantoms for calibration of diffusion tensor imaging sequences. *Magnetic Resonance Imaging* 2016; 34(4): 404-409., DOI:10.1016/j.mri.2015.12.010 (IF-2.09).
- [H3] W. Węglarz, A. Krzyżak, M. Stefaniuk. ZTE imaging of tight sandstone rocks at 9.4T - comparison with standard NMR analysis at 0.05 T. *Magnetic Resonance Imaging* 2016, 34(4): 492-495; DOI:10.1016/j.mri.2015.12.001 (IF-2.09).
- [H4] A. Krzyżak, A. Jasiński, W. Węglarz, D. Adamek, P. Sagnowski, M. Baj. Visualisation of the extent of damage in a rat spinal cord injury model using MR microscopy of the water
- [H5] A. Krzyżak, A. Jasiński, D. Adamek. Qualification of the most statistically “sensitive” diffusion tensor imaging parameters for detection of spinal cord injury *Acta Physica Polonica A* 2005; 108: 207-210 (IF-0.53).
- [H6] A. Krzyżak, A. Jasiński, S. Kwieciński, P. Kozłowski, D. Adamek. Quantitative Assessment of Injury in Rat Spinal Cords In Vivo by MRI of Water Diffusion Tensor. *Applied Magnetic Resonance* 2008; 34(1):3-20. DOI:10.1007/s00723-008-0095-7 (IF-0.748).
- [H7] A. Krzyżak, I. Habina. Low field 1H NMR characterization of mesoporous silica MCM-41 and SBA-15 filled with different amount of water. *Microporous and Mesoporous Materials* 2016; 231:230-239. DOI:10.1016/j.micromeso.2016.05.032 (IF-3.45).
- [H8] A. Krzyżak. Anisotropic diffusion phantom for calibration of diffusion tensor imaging pulse sequence used in MRI.
Przyznany patent amerykański: Ref. No: US8643369 B2 (2014).

Publikacje patentów i zgłoszeń patentowych wchodzące w skład dzieła

- [Z1] A. Krzyżak. Anizotropowy fantom dyfuzji dla kalibracji dowolnej sekwencji obrazowania MR, DTI oraz sposób kalibracji dowolnego tomografu MR:
- numer zgłoszenia polskiego: P.385276 (26.05 2008),
 - rozszerzenie zgłoszenia patentowego w międzynarodowym trybie PCT PCT/PL2009/000051, WO/2009/145648 (2009),
 - numer zgłoszenia amerykańskiego US2011074423 (2011),
 - numer zgłoszenia japońskiego JP2011520582 (2011) i JP2014223546 (2014),
 - numer zgłoszenia europejskiego EP09755104.8 (2011).
- [Z2] A. Krzyżak. Metoda kalibracji sekwencji obrazowania współczynników dyfuzji i tensora dyfuzji w eksperymentach obrazowania DWI, DTI, fMRI – DTI:

- a) numer zgłoszenia polskiego: P.403172 (15.03.2013).
- [Z3] A. Krzyżak. Sposób kalibracji sekwencji obrazowania w eksperymencie typu DMRI przeprowadzonym w tomografii MR:
- a) numer zgłoszenia polskiego: P. 413306 (30.07.2015),
- b) numer zgłoszenia międzynarodowego PCT/EP2016/067964 (07.2016).

A Publikacje naukowe w czasopismach znajdujących się w bazie Journal Citation Reports (JCR).

- [A1] K. Borkowski, K. Kłodowski, H. Figiel, A. Krzyżak. A theoretical validation of the B-matrix Spatial Distribution approach to Diffusion Tensor Imaging. *Magnetic Resonance Imaging* 2017; 36:1-6. Doi:10.1016/j.mri.2016.10.002. (IF-1.98).
- [A2] G. Stoch, A. Krzyżak. Parameterized signal calibration for NMR cryoporometry experiment without external standard. *Journal of Magnetic Resonance* 2016, 269:97-103. Doi:10.1016/j.jmr.2016.05.015, (IF- 2.89).
- [A3] A. Fheed, A. Świerczewska, A. KRZYŻAK. The isolated Wuchiapingian (Zechstein) Wielichowo Reef and its sedimentary and diagenetic evolution, SW Poland. *Geological Quarterly* 12/2015; 59(4):762-780. DOI:10.7306/gq.1266 (IF-1.0).
- [A4] K. Borkowski, A. Krzyżak. Simulations of rotation of the anisotropic phantom in BSD-DTI. *MAGMA Magnetic Resonance Materials in Physics Biology and Medicine* 10/2015; 28(1 Supplement):467-468. Doi:10.1007/s10334-015-0490-7 (IF-2.87).
- [A5] K. Kłodowski, A. Krzyżak. Pattern recognition and filtering of the b-matrix spatial distribution in the BSD-DTI technique. *MAGMA Magnetic Resonance Materials in Physics Biology and Medicine* 10/2015; 28(1 Supplement):468-469. Doi:10.1007/s10334-015-0490-7 (IF-2.87).
- [A6] A. Krzyżak. Application of anisotropic diffusion phantom for DTI experiments. *MAGMA Magnetic Resonance Materials in Physics Biology and Medicine* 10/2012; 25(1 Supplement):231-232. DOI:10.1007/s10334-012-0324-9 (IF-1.86).
- [A7] A. Krzyżak, Leszek Jaroszewicz. Anisotropic diffusion phantom - application for DTI. *Molecular Imaging & Biology* 12/2010; 12 (Suppl 2). DOI:10.1007/s11307-010-0453-3 (IF-3.14).
- [A8] A. Krzyżak. The comparison of statistically significant alterations of the water diffusion tensor parameters for injured rats' spinal cords in vivo and in vitro. *European Journal of Neurology* 09/2010; 17(SI):313-313, (IF-3.76).
- [A9] A. Krzyżak: Assessment of white and grey matter injury in rats spinal cord using alterations of the water diffusion tensor parameters. *Journal of the Neurological Sciences* 08/2009; 283(1-2):279-279, (IF- 2.32).
- [A10] A. Krzyżak, A. Jasiński: Application of statistical analysis of diffusion tensor parameters for assessment of spinal cord injury. *MAGMA Magnetic Resonance Materials in Physics Biology and Medicine* 09/2005; 18(S1):116-117. DOI:10.1007/s10334-005-0002-2, (IF-1.72).
- [A11] A. Jasiński, A. T. Krzyżak, D. Adamek, J. Pindel, W. P. Węglarz, P. Kozłowski, A. Urbanik: Investigation of spinal cord structures using water diffusion tensor imaging in a

- rat model of mechanical injury "in vivo". *Neurologia i neurochirurgia polska* 01/2001; 35(3):85-85, (IF-0.74).
- [A12] J. Pindel, A. Jasiński, A. Krzyżak, W. Węglarz, D. Adamek, P. Sagnowski, P. Kozłowski, A. Urbanik: Temporal studies of water diffusion tensor in an injured spinal cord of the rat. *MAGMA Magnetic Resonance Materials in Physics Biology and Medicine* 01/2000; 11(SI):121-121, (IF-0.87).
- [A13] D. Adamek, A. Jasiński, A. Krzyżak, J. Pindel, P. Kozłowski, P. Sagnowski, W. Węglarz: The distribution and spatial relations of damage to the spinal cord after mechanical injury may suggest a narrow potential therapeutical "window".. *MAGMA Magnetic Resonance Materials in Physics Biology and Medicine* 01/2000; 11(SI):10-10, (IF-0.87).
- [A14] A. Jasiński, A.T. Krzyżak, P. Kozłowski, W. Węglarz, J. Pindel, D. Adamek, P. Sagnowski, A. Urbanik: Investigation of spinal cord injury on a rat model - effects of formaline fixation on water diffusion tensor. *MAGMA Magnetic Resonance Materials in Physics Biology and Medicine* 01/1999; 8(SI):181-182, (IF-0.8).
- [A15] W. P. Węglarz, A. Jasiński, A. T. Krzyżak, P. Kozłowski, D. Adamek, P. Sagnowski, J. Pindel: MR microscopy of water diffusion tensor in biological systems. *Applied Magnetic Resonance* 12/1998; 15(3):333-341. DOI:10.1007/BF03162019, (IF-0.93).
- [A16] A. Jasiński, P. Kozłowski, A.T. Krzyżak, D. Adamek, P. Sagnowski: Water diffusion tensor imaging in an injured spinal cord of the rat in vivo at 9.4 T. *MAGMA Magnetic Resonance Materials in Physics Biology and Medicine* 01/1998; 6(SI):119-120, (IF-0.2).
- [A17] D. Adamek, J. Kałuża, P. Sagnowski, A. Krzyżak, A. Jasiński, M. Baj, W. Węglarz, A. Urbanik: In the search of better insight into pathology of spinal cord injury. Investigation of water diffusion in relation to the expression of ubiquitin and glial fibrillary acidic protein in spinal cord of rat after experimental weight drop injury. *Zentralblatt für Neurochirurgie* 01/1998; 58(3):211-211, (IF-0.3).
- [A18] A. Krzyżak, A. Jasiński, D. Adamek, M. Baj, J. Kuśmiderski, P. Sagnowski, W. Węglarz: Monitoring injury in a rat spinal cord using MR Microscopy of a water diffusion tensor. *MAGMA Magnetic Resonance Materials in Physics Biology and Medicine* 01/1997; 5(2):161-162, (IF-0.2).
- [A19] B. Tomanek, A. Jasiński, Z. Sułek, J. Muszyńska, P. Kulinowski, S. Kwieciński, A. Krzyżak, T. Skórka, J. Kibiński: Magnetic resonance microscopy of internal structure of drone and queen honey bees. *J Apic. Res. Journal of Apicultural Research* 01/1996; 35(1):3-9, (IF-0.774).

B Publikacje naukowe w czasopismach międzynarodowych lub krajowych innych niż znajdujące się w bazie JCR

- [B1] S. Bednarczyk, A. KRZYŻAK, G. MACHOWSKI. Comparative analysis of measurements and estimation of permeability of shales in selected well sections from Baltic Basin (Northern Poland). *SCIENCE AND TECHNOLOGIES IN GEOLOGY, EXPLORATION AND MINING, SGEM* 2016; 3:769-776. DOI 10.5593/SGEM2016/B13/S06.097.

- [B2] J. Górka, A. Świerczewska, A. KRZYŻAK. Controls of pressure solution structures on fluid migration – nuclear magnetic resonance studies from Struga-1 well (Zechstein Main Dolomite; W Poland). *SCIENCE AND TECHNOLOGIES IN GEOLOGY, EXPLORATION AND MINING, SGEM 2016*; 3:785-792. DOI 10.5593/SGEM2016/B13/S06.099.
- [B3] E. PUSKARCZYK, P. KRAKOWSKA, A. KRZYŻAK, G. MACHOWSKI. Correlation of nuclear magnetic resonance and mercury intrusion porosimetry data for the best petrophysical parameters estimation in shales. *SCIENCE AND TECHNOLOGIES IN GEOLOGY, EXPLORATION AND MINING, SGEM 2016*; 3:793-800. DOI 10.5593/SGEM2016/B13/S06.100.
- [B4] A. PSTRUCHA, G. MACHOWSKI, A. KRZYŻAK. Petrophysical characterization of the Miocene sandstones of the Carpathian Foredeep (South-East Poland). *SCIENCE AND TECHNOLOGIES IN GEOLOGY, EXPLORATION AND MINING, SGEM 2016*; 3:891-898. DOI 10.5593/SGEM2016/B13/S06.112.
- [B5] E. PSTRUCHA, G. MACHOWSKI, A. KRZYŻAK. Porosity and permeability of the Main Dolomite oil-bearing rocks in the S-1 well (Western Poland). *SCIENCE AND TECHNOLOGIES IN GEOLOGY, EXPLORATION AND MINING, SGEM 2016*; 3:905-912. DOI 10.5593/SGEM2016/B13/S06.114.
- [B6] N. Radzik, A. KRZYŻAK, A. Świerczewska, G. MACHOWSKI. The complex characterization of sandstone cores using low-field NMR *SCIENCE AND TECHNOLOGIES IN GEOLOGY, EXPLORATION AND MINING, SGEM 2016*; 3:963-970. DOI 10.5593/SGEM2016/B13/S06.122.
- [B7] K. Kłodowski, P. Łukasik, A. Krzyżak. Approximation of the actual spatial distribution of the b-matrix in diffusion tensor imaging with bivariate polynomials. *Annals of Computer Science and Information Systems 2016*; 8:943-946. DOI: 10.15439/2016F457.
- [B8] K. Borkowski, A. Krzyżak. Improving precision and accuracy of DTI experiments with the simplified BSD calibration – computer simulations. *Annals of Computer Science and Information Systems 2016*; 8:935-938. DOI: 10.15439/2016F403.
- [B9] A. Krzyżak, P. Łukasik, K. Janc. Determination of the quality of results obtained by various numerical methods for BSD. *Annals of Computer Science and Information Systems 2016*; 8:955-958. DOI: 10.15439/2016F458.
- [B10] J. Górka, A. Świerczewska, A. Krzyżak. Significance of pressure solution structures analysis for fluid flow studies – examples from Struga-1 well (Zechstein Main Dolomite; W Poland): first results. *Geology, Geophysics & Environment 01/2015*; 41(1):82-83. DOI:10.7494/geol.2015.41.1.82.
- [B11] N. Radzik, A. Świerczewska, A. Krzyżak. Identification of tectonic microstructures in flysch sandstones of the Outer Carpathians using X-ray nanotomography and nuclear magnetic resonance – first results. *Geology, Geophysics & Environment 01/2015*; 41(1):127-128. DOI:10.7494/geol.2015.41.1.127.
- [B12] A. Krzyżak, K. Kłodowski, Z. Raszewski. Anisotropic phantoms in Magnetic Resonance Imaging. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Society Conference Proceedings 2015*; 414-417. DOI: 10.1109/EMBC.2015.7318387.
- [B13] A. Krzyżak, K. Borkowski. Theoretical analysis of phantom rotations in BSD-DTI. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Society Conference Proceedings 2015*; 410-413. DOI:10.1109/EMBC.2015.7318386.

- [B14] A. Krzyżak, K. Kłodowski. The B Matrix Calculation Using the Anisotropic Phantoms for DWI and DTI Experiments. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society Conference Proceedings 2015; 418-421. DOI:10.1109/EMBC.2015.7318388.
- [B15] Ł. Kaczmarek, M. Maksimczuk, T. Wejrzanowski, A. Krzyżak. Use of X-ray computed microtomography in the heterogeneity analysis of Polish Zechstein carbonate rocks. SCIENCE AND TECHNOLOGIES IN GEOLOGY, EXPLORATION AND MINING, SGEM 2016; 3:1027-1034. DOI 10.5593/SGEM2016/B13/S06.130.
- [B16] Ł. Kaczmarek, M. Maksimczuk, T. Wejrzanowski, A. Krzyżak. High-resolution x-ray microtomography and Nuclear Magnetic Resonance study of a carbonate reservoir rock. SCIENCE AND TECHNOLOGIES IN GEOLOGY, EXPLORATION AND MINING, SGEM 2015; 1:779-786. DOI 10.5593/SGEM2015/B11/S6.099.
- [B17] A. Krzyżak, A. Jasiński, W. Węglarz, D. Adamek, M. Baj, J. Kuśmiderski, P. Sagnowski. Quantitative assessment of injury in the spinal cord of a rat using MR Microscopy of water diffusion tensor, Proceedings of ISMRM, 6th Scientific Meeting in Sydney 1998, vol 3, p. 1931.
- [B18] A. Jasiński, P. Kozłowski, A. Krzyżak, D. Adamek, P. Sagnowski, and J. Pindel. Investigation of spinal cord injury on a rat model using water diffusion tensor imaging. Proceedings of the IV Annual Meeting of the British Chapter of the ISMRM, p. B8, Nottingham, December 1998.
- [B19] A. Krzyżak, A. Jasiński, P. Kozłowski, D. Adamek, P. Sagnowski, and J. Pindel, "Diffusion tensor imaging of the injured spinal cord of a rat *in vivo*. A comparison with *in vitro* experiments", Proceedings of VII Meeting of ISMRM, p. 327, Philadelphia, May 1999.
- [B20] A. Krzyżak, A. Jasiński, P. Kozłowski, D. Adamek, P. Sagnowski, and J. Pindel, "Quantitative assessment of injury in the spinal cord of a rat *in vivo* using MRI of water diffusion tensor", Proceedings of VII Meeting of ISMRM, p. 1810, Philadelphia, May 1999.

C Wystąpienia konferencyjne

- [C1]. N. Radzik, A. Świerczewska, A. KRZYŻAK. 2D and 3D Magnetic Resonance Imaging of cataclastic deformation bands. CETEG 2016: 14th meeting of the Central European Tectonic Groups, 21th meeting of the Czech Tectonic Studies Group (ČTS), Predná Hora, Słowacja, 2016.
- [C2]. K. KŁODOWSKI, A. T. KRZYŻAK. Analytical description of the B-matrix spatial distribution in Diffusion Tensor Imaging. AMPERE NMR School, Zakopane, 2016.
- [C3]. K. BORKOWSKI, A. KRZYŻAK. Improving precision and accuracy of DTI experiments with the simplified BSD calibration – computer simulations. FedCSIS. The Federated Conference on Computer Science and Information Systems, Gdańsk, 2016.
- [C4]. E. PSTRUCHA, G. MACHOWSKI, A. KRZYŻAK. Porosity and permeability of the Main Dolomite oil-bearing rocks in the S-1 well (Western Poland). 16th International multidisciplinary scientific geoconference, Albena, Bułgaria, 2016.
- [C5]. S. Bednarczyk, A. KRZYŻAK, G. MACHOWSKI. Comparative analysis of measurements and estimation of permeability of shales in selected well sections from

- Baltic Basin (Northern Poland). 16th International multidisciplinary scientific geoconference. Albena, Bułgaria, 2016.
- [C6]. J. Górka, A. Świerczewska, A. KRZYŻAK. Controls of pressure solution structures on fluid migration – nuclear magnetic resonance studies from Struga-1 well (Zechstein Main Dolomite; W Poland). 16th International multidisciplinary scientific geoconference, Albena, Bułgaria, 2016.
- [C7]. E. PUSKARCZYK, P. KRAKOWSKA, A. KRZYŻAK, G. MACHOWSKI. Correlation of nuclear magnetic resonance and mercury intrusion porosimetry data for the best petrophysical parameters estimation in shales and. 16th International multidisciplinary scientific geoconference, Albena, Bułgaria, 2016.
- [C8]. A. PSTRUCHA, G. MACHOWSKI, A. KRZYŻAK. Petrophysical characterization of the Miocene sandstones of the Carpathian Foredeep (South-East Poland). 16th International multidisciplinary scientific geoconference, Albena, Bułgaria, 2016.
- [C9]. N. Radzik, A. KRZYŻAK, A. Świerczewska, G. MACHOWSKI. The complex characterization of sandstone cores using low-field. 16th International multidisciplinary scientific geoconference, Albena, Bułgaria, 2016.
- [C10]. Ł. Kaczmarek, M. Maksimczuk, T. Wejrzanowski, A. Krzyżak. Use of X-ray computed microtomography in the heterogeneity analysis of Polish Zechstein carbonate rocks. 16th International multidisciplinary scientific, Albena, Bułgaria, 2016
- [C11]. E. PSTRUCHA, G. MACHOWSKI, A. T. KRZYŻAK. The porous-fractured space of the oil- and gas-bearing carbonates in the S-1 well (western Poland). IGSC Katowice: 7th International Geosciences Student Conference, Katowice, 2016.
- [C12]. A. FHEED, A. ŚWIERCZEWSKA, A. KRZYŻAK. Sulphate-induced porosity reduction in Permian Reef, SW Poland in the scope of nuclear magnetic resonance studies. Vienna 2016 - efficient use of technology – unlocking potential. 78th EAGE conference & exhibition, Wiedeń, Austria, 2016.
- [C13]. K. KŁODOWSKI, P. Łukasik, A. KRZYŻAK. Approximation of the actual spatial distribution of the b-matrix in diffusion tensor imaging with bivariate polynomials. FedCSIS: The Federated Conference on Computer Science and Information Systems : 11–14 September, Gdańsk, 2016.
- [C14]. P. Łukasik, A. KRZYŻAK, K. JANC. Determination of the quality of results obtained by various numerical methods for BSD. FedCSIS: The Federated Conference on Computer Science and Information Systems, Gdańsk, 2016.
- [C15]. A. PSTRUCHA, G. MACHOWSKI, A. KRZYŻAK. Characterization of the pore space of the Carboniferous gas-bearing deposits in the P-29. Vienna 2016 - efficient use of technology – unlocking potential. 78th EAGE conference & exhibition, Wiedeń, Austria, 2016.
- [C16]. A. Szymocha, Z. Olejniczak, G. Stoch, A. KRZYŻAK, K. Góra-Marek. Analysis of pore size distribution by NMR techniques. XLVII Ogólnopolskie Kolokwium Katalityczne. Kraków, 2015.
- [C17]. A. KRZYŻAK , K. KŁODOWSKI. The B matrix calculation using the anisotropic phantoms for DWI and DTI experiments. 37th annual international conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Mediolan, Włochy, 2015.

- [C18]. A. KRZYŻAK, K. KŁODOWSKI, Z. RASZEWSKI. Anisotropic phantoms in magnetic resonance imaging. EMBC 2015: 37th annual international conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Mediolan, Włochy, 2015.
- [C19]. A. KRZYŻAK. Application of diffusion techniques in fMRI. Innovative technologies in biomedicine: 2nd international conference. Kraków, 2015.
- [C20]. A. KRZYŻAK, K. KŁODOWSKI. B-matrix spatial distribution in diffusion tensor imaging. Innovative technologies in biomedicine: the 2nd International conference, Kraków, 2015.
- [C21]. Ł. Kaczmarek, M. Maksimczuk, T. Wejrzanowski, A. KRZYŻAK. High-resolution X-ray microtomography and nuclear magnetic resonance study of a carbonate reservoir rock. SGEM 2015 : Science and technologies in geology, exploration and mining. 15th International multidisciplinary scientific geoconference, Albena, Bułgaria, 2015.
- [C22]. N. Radzik, A. Świerczewska, A. KRZYŻAK. Identification of tectonic microstructures in flysch sandstones of the Outer Carpathians using X-ray nanotomography and nuclear magnetic resonance – first results. XVIth International conference of young geologists: Herl'any, Słowacja, 2015.
- [C23]. J. Górka, A. Świerczewska, A. KRZYŻAK. Significance of pressure solution structures analysis for fluid flow studies – examples from Struga-1 well (Zechstein Main Dolomite; W Poland): first results . Geology, Geophysics & Environment. XVIth International conference of young geologists, Herl'any, Słowacja, 2015.
- [C24]. K. KŁODOWSKI, A. KRZYŻAK. Pattern recognition and filtering of the b-matrix spatial distribution in the BSD-DTI technique. ESMRMB 2015: 32nd annual scientific meeting, Edynburg, Szkocja, 2015.
- [C25]. K. BORKOWSKI, A. KRZYŻAK. Simulations of rotation of the anisotropic phantom in BSD-DTI. ESMRMB 2015 : 32nd annual scientific meeting : Edinburgh, UK, 1–3 October.
- [C26]. A. KRZYŻAK, BORKOWSKI K.. Theoretical analysis of phantom rotations in BSD-DTI. 37th annual international conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Mediolan, Włochy, 2015.
- [C27]. A. Krzyżak. Application of anisotropic diffusion phantom for DTI experiments. 29th Annual Meeting of ESMRMB, Lizbona, Portugalia, 2012.
- [C28]. A. Krzyżak, The application of the spatial distribution of the B matrix - a new approach to determine the diffusion tensor in DTI. XLIV Polish Seminar on Nuclear Magnetic Resonance and Its Applications, Kraków, 2012.
- [C29]. A. Krzyżak, Z. Raszewski, I. Habina, W. Węglarz, L. Jaroszewicz. Usefulness of anisotropic diffusion phantom for DTI. Advanced Bioimaging Technologies, Kraków, 2011.
- [C30]. A. Krzyżak. The comparison of statistically significant alterations of the water diffusion tensor parameters for injured rats' spinal cords in vivo and in vitro. 14th Congress of European-Federation-of-Neurological-Societies. Genewa, Szwajcaria, 2010.
- [C31]. A. Krzyżak, Z. Raszewski. Anisotropic diffusion phantom – application for DTI. World Molecular Imaging Annual Congress, Kioto, Japonia, 2010.
- [C32]. A. Krzyżak. ANISOTROPIC DIFFUSION PHANTOM FOR B-MATRIX CALCULATION. XLI Polish Seminar on Nuclear Magnetic Resonance and Its Applications, Kraków, 2009.

- [C33]. A. Krzyżak. The space b-matrix calculation using model phantoms of anisotropic diffusion. Bat Sheva Seminar on „Frontiers of Biomedical Magnetic Resonance“, Safed, Izrael, 2008.
- [C34]. A. Krzyżak, A. Jasiński, S. Kwieciński, P. Kozłowski, D. Adamek. Quantitative assesment of injury in the spinal cord of rat in vivo using MRI of water diffusion tensor. XXII Int. Conf. on Radio and Microwave Spectroscopy, Poznań-Będlewo, 2007.
- [C35]. A. Krzyżak. Assessment of white and grey matter injury in rats spinal cord using alterations of the water diffusion tensor parameters. 5th International Congress on Vascular Dementia Location: Budapest, Węgry, 2007.
- [C36]. K. Banaś, A. Jasiński, A. Banaś, T. Banasik, T. Skórka, A. Krzyżak, P. Brzegowy, K. Majcher, D. Adamek. Application of linear discriminant analysis in evaluation of diffusion-weighted MRI results of spinal cord. XXXIX Polish Sem. on Nuclear Magnetic Resonance and Its Applications, Kraków, 2006.
- [C37]. A. Krzyżak, A. Jasiński. The b-matrix calculation using liquid crystal model. XXXIX Polish Sem. on Nuclear Magnetic Resonance and Its Applications, Kraków, 2006.
- [C38]. A. Krzyżak, A. Jasiński. Assessment of spinal cord injury using statistically significant changes in diffusion tensor parameters. 22nd Annual Scientific Meeting of ESMRMB, Bazylea, Szwajcaria, 2005.
- [C39]. A. Krzyżak, A. Jasiński. Assessment of Spinal Cord Injury Using Diffusion Tensor Parameters. 3rd Kraków-Winnipeg Workshop on Magnetic Resonance and molecular Imaging, Kraków, 2005.
- [C40]. A. Krzyżak, A. Jasiński, D. Adamek. Qualification of the Most Statistically „Sensitive“ Diffusion Tensor Imaging Parameters for Detection of Spinal Cord Injury. Ramis 2005, Poznań-Będlewo, 2005.
- [C41]. A. Krzyżak, A. Jasiński. Oszacowanie wielkości uszkodzenia rdzenia kręgowego przy użyciu parametrów tensora dyfuzji. V Zjazd Polskiego Medycznego Towarzystwa Rezonansu Magnetycznego, Szczyrk, 2005.
- [C42]. A. Krzyżak, A. Jasiński. Parametrization of the Extent of Spinal Cord Injury using Water Diffiusion Tensor. Ogólnopolskie Sympozjum - Magnetyczny Rezonans Jądrowy w Chemii, Biologii i Medycynie, Warszawa 2005.
- [C43]. A. Krzyżak, A. Jasiński. Oszacowanie wielkości uszkodzenia tkanki nerwowej rdzenia kręgowego szczura in vivo poprzez analizę zmian parametrów tensora dyfuzji wody. XXXVIII Ogólnopolskie Seminarium na Temat Magnetycznego Rezonansu i Jego Zastosowań, Kraków, 2005.
- [C44]. A. Jasiński, A. Krzyżak, A. Urbanik, D. Adamek, W. Węglarz, J. Pindel. Obrazowanie MR tensora dyfuzji w badaniach i diagnostyce urazów rdzenia kręgowego. XXXVI Zjazd Radiologów Polskich, Lublin, 2001.
- [C45]. J. Pindel, A. Jasiński, A. Krzyżak, W. Węglarz, D. Adamek, P. Sagnowski, P. Kozłowski, A. Urbanik. Temporal studies of water diffusion tensor in an injured spinal cord of the rat. 17th Annual Scientific Meeting of ESMRMB, Paryż, Francja, 2000.
- [C46]. A. Jasiński., A. Krzyżak., Urbanik A., D. Adamek., P. Kozłowski, Węglarz W., Pindel J. MRI tensora dyfuzji w badaniach i wczesnej diagnostyce urazów rdzenia kręgowego. Sympozjum - Diagnostyka Obrazowa w Chorobach Kręgosłupa i Kanału Kręgowego, Wrocław, 2000.

- [C47]. D. Adamek, A. Jasiński, A. Krzyżak, J. Pindel, P. Kozłowski, P. Sagnowski, W. Węglarz. The distribution and spatial relations of damage to the spinal cord after mechanical injury may suggest a narrow potential therapeutical "window". 17th Annual Scientific Meeting of ESMRMB, Paryż, Francja, 2000.
- [C48]. A. Jasiński, A. Krzyżak, A. Urbanik, D. Adamek, P. Kozłowski, P. Sagnowski, W. Węglarz, J. Pindel. Badanie urazów rdzenia kręgowego na modelu szczura metodą obrazowania tensora dyfuzji. III Kongres Polskiego Medycznego Rezonansu Magnetycznego, Łądek Zdrój, 1999.
- [C49]. A. Jasiński, P. Kozłowski, A. Krzyżak, D. Adamek, P. Sagnowski, J. Pindel and W. Węglarz. Effects of Formaline Fixation on Water Diffusion in Tissues of Normal and Injured Spinal Cord of the Rat. Symposium on „Applications of Magnetic Resonance to Chemistry and Related Areas”, Warszawa, 1999.
- [C50]. W. Węglarz, A. Krzyżak, A. Jasiński, P. Kozłowski, D. Adamek, P. Sagnowski, J. Pindel. Is Diffusion Tensor Imaging useful in characterization of the Spinal Cord Injury? AMPERE VII NMR School, Zakopane, 1999.
- [C51]. A. Jasiński, A. Krzyżak, A. Urbanik, D. Adamek, P. Kozłowski, P. Sagnowski, W. Węglarz, J. Pindel. Investigation of the spinal cord injury on a rat model using diffusion tensor imaging. III Zjazd Polskiego Medycznego Towarzystwa Rezonansu Magnetycznego, Łądek Zdrój, 1999.
- [C52]. A. Jasiński, A. Krzyżak, P. Kozłowski, A. Urbanik. Investigation of spinal cord injury on a rat model - effects of formaline fixation on water diffusion tensor. 16th Annual Scientific Meeting of ESMRMB, Sewilla, Hiszpania, 1999.
- [C53]. A. Krzyżak, A. Jasiński, P. Kozłowski, D. Adamek, P. Sagnowski and J. Pindel. Diffusion tensor imaging of the injured spinal cord of a rat *in vivo*. A comparison with *in vitro* experiments. VII Meeting of ISMRM, Philadelphia, USA, 1999.
- [C54]. A. Krzyżak, A. Jasiński, P. Kozłowski, D. Adamek, P. Sagnowski and J. Pindel. Quantitative assessment of injury in the spinal cord of a rat *in vivo* using MRI of water diffusion tensor. VII Meeting of ISMRM, Philadelphia, USA, 1999.
- [C55]. J. Pindel, A.T. Krzyżak, W.P. Węglarz, D. Adamek, P. Sagnowski, P. Kozłowski, A. Urbanik. Zależność tensora dyfuzji od czasu po urazie rdzenia kręgowego szczura. XXII Ogólnopolskie Seminarium na temat Magnetycznego Rezonansu Jądrowego i jego Zastosowań, Kraków, 1999.
- [C56]. D. Adamek, A. Jasiński, A. Krzyżak, J. Pindel, P. Sagnowski, A. Urbanik, W. Węglarz. Patomorfologia zmian pourazowych w rdzeniu kręgowym szczura w relacji do obrazowania dyfuzji MR. XXII Ogólnopolskie Seminarium na temat Magnetycznego Rezonansu Jądrowego i jego Zastosowań, Kraków, 1999.
- [C57]. A. Jasiński, F. Hennel, A. Krzyżak, J. Nedelec, A. Urbanik. Dyfuzyjno-zależne obrazowanie MR rdzenia kręgowego człowieka III Kongres Polskiego Medycznego Rezonansu Magnetycznego, Łądek Zdrój, 1999.
- [C58]. A. Krzyżak, A. Jasiński, W. Węglarz, D. Adamek, M. Baj, J. Kuśmiderski, P. Sagnowski. Quantitative assessment of injury in the spinal cord of a rat using MR Microscopy of water diffusion tensor. ISMRM Sixth Scientific Meeting, Sydney, Australia, 1998.
- [C59]. A. Jasiński, W. Węglarz, A. Krzyżak. Diffusion Tensor Imaging in an Injured Spinal

- Cord of the Rat *in vivo*. 29th AMPERE - 13th ISMAR Satellite Symposium on Spatially Resolved Magnetic Resonance, Lipsk, Niemcy, 1998.
- [C60]. A. Jasiński, P. Kozłowski, A. Krzyżak, D. Adamek and P. Sagnowski. „Water diffusion tensor imaging in an injured spinal cord of the rat *in vivo* at 9.4T. 15th Annual Scientific Meeting of ESMRMB, Genewa, Szwajcaria, 1998.
- [C61]. D. Adamek, P. Sagnowski, A. Krzyżak, A. Jasiński, P. Kozłowski, J. Kałuża „In the search of better insight into pathology of spinal cord injury. Investigations on nuclear magnetic resonance (NMR) water diffusion imaging in relation to patomorphological changes in spinal cord of rat after experimental weight drop injury”, European Meeting 1998 Neurotrauma, Magdeburg, Niemcy, 1998.
- [C62]. A. Jasiński, P. Kozłowski, A. Krzyżak, D. Adamek, P. Sagnowski, J. Pindel. Obrazowanie MR zmian tensora dyfuzji wody zachodzących pod wpływem urazu mechanicznego w rdzeniu kręgowym szczura *in vivo*. XXXI Ogólnopolskie Seminarium Magnetycznego Rezonansu Jądrowego i Jego Zastosowań, Kraków, 1998.
- [C63]. A. Jasiński, F. Hennel, A. Krzyżak, K. Szybiński, A. Urbanik. Obrazowanie MR dyfuzji wody w rdzeniu kręgowym człowieka. XXXI Ogólnopolskie Seminarium Magnetycznego Rezonansu Jądrowego i Jego Zastosowań, Kraków, 1998 .
- [C64]. K. Szybiński, A. Jasiński, J. Kozub, B. Sobiecka, A. Urbanik. Obrazowanie MR wysokiej rozdzielczości rdzenia kręgowego człowieka na systemie SIGNA 1.5 T. XXXI Ogólnopolskie Seminarium Magnetycznego Rezonansu Jądrowego i Jego Zastosowań, Kraków, 1998.
- [C65]. A. Jasiński, P. Kozłowski, A. Krzyżak, D. Adamek, P. Sagnowski and J. Pindel. Investigation of Spinal Cord Injury on a Rat Model Using Water Diffusion Tensor Imaging. IVth Annual Meeting of the British Chapter of the ISMRM, Nottingham, Anglia, 1998.
- [C66]. A. Jasiński, P. Kozłowski, A. Krzyżak, D. Adamek and P. Sagnowski. Water diffusion tensor imaging in an injured spinal cord of the rat *in vivo* at 9.4 T. Ogólnopolskie Sympozjum „Application of Magnetic Resonance in Chemistry and Related Areas”, Warszawa, 1998.
- [C67]. W. Węglarz, A. Jasiński and A. Krzyżak. MR Microscopy of Water Diffusion Tensor in Biological Systems. The Joint 29th AMPERE – 13th ISMAR International Conference on Magnetic Resonance and Related Phenomena, Berlin, Niemcy, 1998.
- [C68]. P. Sagnowski, D. Adamek, A. Krzyżak., A. Jasiński, A. Urbanik. Zmiany rozkładu przestrzennego dyfuzji wody na skutek urazu rdzenia kręgowego w obrazowaniu MR dyfuzji wody (D-MRI). 2 XXXV Zj. Rad. Pol., Katowice, 1998.
- [C69]. P. Sagnowski, A. Krzyżak, D. Adamek, M. Baj, A. Jasiński, A. Urbanik. Różnice anizotropii dyfuzji wody w istocie białej i szarej rdzenia kręgowego w obrazowaniu MR tensora dyfuzji wody (DT-MRI). XXXV Zj. Rad. Pol., Katowice, 1998.
- [C70]. A. Krzyżak, A. Jasiński. Quantitative assessment of injury in the spinal cord of a rat using MR Microscopy of water diffusion tensor. 6th Scientific Meeting of ISMRM, Sydney, Australia, 1998.

- [C71]. A. Krzyżak, A. Jasiński, D. Adamek, M. Baj, J. Kuśmiderski, P. Sagnowski and W. Węglarz. Monitoring injury in a rat spinal cord using MR Microscopy of a water diffusion tensor. 14th Annual Scientific Meeting of ESMRMB, Bruksela, 1997.
- [C72]. A. Krzyżak, W. Węglarz, A. Jasiński. MRI visualisation of a water diffusion tensor in a rat spinal cord. V NMR School, Zakopane, 1997.
- [C73]. A. Jasiński, A. Krzyżak, D. Adamek, M. Baj, J. Kuśmiderski, P. Sagnowski, W. Węglarz. Diffusion tensor imaging in an excised spinal cord of the rat Kraków-Winnipeg Workshop on Biomedical Applications of MRI and MRS, Kraków, 1997.
- [C74]. A. Jasiński, A. Krzyżak, D. Adamek, M. Baj, P. Sagnowski, W. Węglarz. Diffusion Tensor Imaging in an Excised Spinal Cord of the Rat. 1st Kraków - Winnipeg Workshop on Biomedical Applications of MRI and MRS, 6-8 November 1997, Kraków, Poland.
- [C75]. D. Adamek, P. Sagnowski, A. Krzyżak, M. Baj, W. Węglarz, J. Kałuża, A. Jasiński, J. Kuśmiderski. Assessment of Post-Traumatic Morphological Changes in Spinal Cord of a Rat After Experimental Dynamic Injury in Correlation with MR Water Diffusion Tensor Imaging. 1st Kraków - Winnipeg Workshop on Biomedical Applications of MRI and MRS, Kraków, 1997.
- [C76]. A. Krzyżak, A. Jasiński, W. Węglarz. Data Processing for Diffusion Tensor Imaging. 1st Kraków - Winnipeg Workshop on Biomedical Applications of MRI and MRS, Kraków, 1997.
- [C77]. W. Węglarz, A. Jasiński, A. Krzyżak, Z. Sułek. Metoda obrazowania MR tensora dyfuzji wody w układach biologicznych. XXX Ogólnopolskie Seminarium MRJ i Jego Zastosowań, Kraków, 1997.
- [C78]. A. Krzyżak, A. Jasiński, W. Węglarz, M. Baj, D. Adamek, P. Sagnowski, J. Kuśmiderski. Badanie uszkodzeń rdzenia kręgowego szczura metodą obrazowania MR tensora dyfuzji wody in vitro. XXX Ogólnopolskie Seminarium MRJ i Jego Zastosowań, Kraków, 1997.
- [C79]. P. Sagnowski, A. Krzyżak, D. Adamek, M. Baj, A. Jasiński, J. Kuśmiderski. MR microscopy of water diffusion tensor in rat spinal cord injury model. 10th European Congress of Radiology, Wiedeń, Austria, 1997.
- [C80]. A. Krzyżak. MR Microscopy of Water Diffusion Tensor in Injured Spinal Cord. XXIX Ogólnopolskie Seminarium MRJ i Jego Zastosowań, Kraków, 1996.
- [C81]. P. Sagnowski, A. Jasiński, A. Krzyżak, M. Baj. MR Microscopy of Water Diffusion Tensor in Rat Spinal Cord Model Injury. Second Meeting of the Polish Medical Magnetic Resonance Society, Kraków, 1996.
- [C82]. P. Sagnowski, A. Jasiński, A. Krzyżak, M. Baj. Water Diffusion Tensor in MRI, Mathematics and Diagnostics, Second Meeting of the Polish Medical Magnetic Resonance Society, Kraków, 1996.
- [C83]. A. Jasiński, A. Krzyżak. MR Microscopy of Water Diffusion Anisotropy in a Rat Spinal Cord. The Second Annual Meeting of the British Chapter of the International Society of Magnetic Resonance in Medicine, Londyn, Anglia, 1996.
- [C84]. P. Kulinowski, K. Szybiński, Z. Sułek, A. Jasiński. Oprogramowanie kontrolera gradientów do eksperymentu MRI. XXVIII Ogólnopolskie Seminarium Magnetycznego Rezonansu Jądrowego i Jego Zastosowań, Kraków, 1995.

- [C85]. A. Jasiński, A. Krzyżak, J. Kuśmiderski, D. Adamek, M. Baj, S. Kwieciński, J. Kozub, T. Skórka, P. Sagnowski. MR Imaging of Water Diffusion Tensor in Rat Spinal Cord. IV NMR School, Zakopane, 1996.
- [C86]. A. Jasiński, J. Kuśmiderski. Tensor dyfuzji - nowy mechanizm kontrastu w obrazowaniu MR. II Zjazd Polskiego Medycznego Towarzystwa Magnetycznego Rezonansu, Kraków, 1996.
- [C87]. P. Sagnowski, A. Jasiński, A. Krzyżak, D. Adamek, M. Baj, J. Kuśmiderski. Mikroskopia MR tensora dyfuzji wody na modelu zwierzęcym urazu rdzenia kręgowego. II Zjazd Polskiego Medycznego Towarzystwa Magnetycznego Rezonansu, Kraków 1996.
- [C88]. P. Sagnowski, A. Krzyżak, A. Jasiński, J. Kuśmiderski. Tensor dyfuzji wody w MR: matematyka a diagnostyka. II Zjazd Polskiego Medycznego Towarzystwa Magnetycznego Rezonansu, Kraków 1996.
- [C89]. A. Jasiński, A. Krzyżak, J. Kuśmiderski. Mikroskopia MR tensora dyfuzji wody w uszkodzonym rdzeniu kręgowym. XXIX Ogólnopolskie Seminarium Magnetycznego Rezonansu Jądrowego i Jego Zastosowań, Kraków, 1996.
- [C90]. D. Adamek, P. Sagnowski, M. Baj, A. Krzyżak, A. Jasiński, J. Kuśmiderski. Interpretacja zmian w obrazach MR dyfuzji wody w rdzeniu kręgowym szczura po urazie mechanicznym. XXIX Ogólnopolskie Seminarium Magnetycznego Rezonansu Jądrowego i Jego Zastosowań, Kraków, 1996.
- [C91]. S. Kwieciński, A. Jasiński, L. Przywara, B. Tomanek, A. Krzyżak, P. Kulinowski and K. Szybiński. MR Microscopy of the Plant Dactylis glomerata. XXVIII Ogólnopolskie Seminarium Magnetycznego Rezonansu Jądrowego i Jego Zastosowań, Kraków, 1995.
- [C92]. A. Krzyżak, A. Jasiński, J. Kuśmiderski, D. Adamek, M. Baj and P. Sagnowski, MR Microscopy of Water Diffusion Anisotropy in a Rat Injured Spinal Cord. XXVIII Ogólnopolskie Seminarium Magnetycznego Rezonansu Jądrowego i Jego Zastosowań, Kraków, 1995.
- [C93]. A. Jasiński, Z. Sułek, B. Tomanek, T. Skórka, A. Krzyżak, P. Kulinowski and J. Muszyńska. MR Microscopy Study of Honey Bee Queen and Drone in vivo, 3rd International Conference on Magnetic Resonance. Wurzburg, Niemcy, 1995.
- [C94]. A. Jasiński, A. Krzyżak, M. Baj, S. Kwieciński, J. Kozub, T. Skórka, P. Sagnowski. MR Imaging of Water Diffusion Tensor in Rat Spinal Cord. IV NMR School, Zakopane, 1995.
- [C95]. S. Kwieciński, B. Tomanek, A. Jasiński, A. Krzyżak, P. Kulinowski, T. Skórka, Z. Sułek, K. Szybiński. MR Microscopy of the Plant Dactylis Glomerata, International Conference on Magnetic Resonance. Wurzburg, Niemcy 1995.
- [C96]. A. Krzyżak, A. Jasiński, Z. Sułek, F. Hennel, B. Tomanek, P. Kulinowski, T. Skórka, S. Kwieciński. PC-based MRS and MRI Software. 10th Congress of the Polish Society of Medical Physics, Kraków, 1995.
- [C97]. A. Jasiński, Z. Sułek, B. Tomanek, T. Skórka, A. Krzyżak, P. Kulinowski and J. Muszyńska. MR Microscopy of Honey Bee of all Casts, 12th Conference of the International Society of Magnetic Resonance, ISMAR 95, Sydney, 1995.
- [C98]. A. Krzyżak, A. Jasiński, S. Kwieciński, T. Skórka, J. Kozub, M. Baj. MR Imaging of Water Diffusion Anisotropy in the Patiole of Saintpaulia Ionantha. XXVIII Ogólnopolskie Seminarium Magnetycznego Rezonansu Jądrowego i Jego Zastosowań, Kraków, 1995.

- [C99]. P. Kulinowski, A. Krzyżak, K. Szybiński, Z. Sułek, A. Jasiński. Gradient Controller Software for MRI Experiment. XXVIII Ogólnopolskie Seminarium Magnetycznego Rezonansu Jądrowego i Jego Zastosowań, Kraków, 1995.
- [C100]. A. Jasiński, A. Krzyżak, J. Kuśmiderski, T. Skórka, S. Kwieciński, D. Adamek, M. Baj, J. Kozub. "MR Imaging of Diffusion Anisotropy in Biological Systems". XXVIII Ogólnopolskie Seminarium Magnetycznego Rezonansu Jądrowego i Jego Zastosowań, Kraków, 1995
- [C101]. B. Tomanek, A. Jasiński, Z. Sułek, T. Skórka, A. Krzyżak, J. Kibiński, J. Muszyńska, Nieinwazyjne badania pszczoły miodnej metodą mikrotomografii MR. XXXI Naukowa Konferencja Pszczelarska, Puławy, 1994.
- [C102]. B. Tomanek, A. Jasiński, Z. Sułek, J. Muszyńska, S. Kwieciński, T. Skórka, A. Krzyżak, J. Kibiński. Application of MR Microtomography to Investigation of Honey Bee and Honey Bee Queen in Vivo. 2nd NMR School, Zakopane, 1994.
- [C103]. B. Tomanek, A. Jasiński, Z. Sułek, J. Muszyńska, S. Kwieciński, T. Skórka, A. Krzyżak, J. Kibiński. Magnetic Resonance Microscopy Study of Honey Internal Structure. Polish-German Symposium, Oberusel, Niemcy, 1994.
- [C104]. B. Tomanek, A. Jasiński, Z. Sułek, J. Muszyńska, S. Kwieciński, T. Skórka, A. Krzyżak, J. Kibiński. MR Microscopy of Honey Bee Morphology in Vivo. Ogólnopolskie Seminarium Magnetycznego Rezonansu Jądrowego i Jego Zastosowań, Kraków, 1994.
- [C105]. B. Tomanek, A. Jasiński, Z. Sułek, J. Muszyńska, S. Kwieciński, T. Skórka, A. Krzyżak, J. Kibiński. MR Microscopy of Plants. Ogólnopolskie Seminarium Magnetycznego Rezonansu Jądrowego i Jego Zastosowań, Kraków, 1994.
- [C106]. Z. Sułek, B. Tomanek, A. Jasiński, J. Muszyńska, S. Kwieciński, T. Skórka, A. Krzyżak, J. Kibiński. Modular MR Microscope. Ogólnopolskie Seminarium Magnetycznego Rezonansu Jądrowego i Jego Zastosowań, Kraków, 1994.
- [C107]. B. Tomanek, A. Jasiński, Z. Sułek, S. Kwieciński, T. Skórka, A. Krzyżak, J. Kibiński and J. Muszyńska. Magnetic Resonance Microscopy Study of Honeybee Internal Structure XXVII Ogólnopolskie Seminarium Magnetycznego Rezonansu Jądrowego i Jego Zastosowań, Kraków, 1994.
- [C108]. A. Jasiński, Z. Sułek, B. Tomanek, F. Hennel, J. Kibiński, T. Skórka, A. Krzyżak, P. Kulinowski and J. Muszyńska. MR Microscopy Study of Honey Bee in vivo, 2nd International Conference on Magnetic Resonance Microscopy, Heidelberg, Niemcy, 1993.

D Manuskrypty publikacji naukowych pozostających w recenzji w czasopismach znajdujących się w bazie JCR

- [D1] K. Borkowski, A. Krzyżak, K. Kłodowski. The influence of diffusion gradient inhomogeneity on the DTI based tractography. Magnetic Resonance Imaging 2016, (IF-1.98).
Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: opracowaniu koncepcji pracy w dziedzinie MRJ, realizacji eksperymentów MRJ i wykonaniu analizy danych. Uczestniczyłem w przygotowaniu tekstu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na 40%.
- [D2] A. Krzyżak, K. Kłodowski, K. Borkowski. Application of a Simplified B-Matrix Spatial Distribution method to a clinical 3.0 T MRI Scanner. Magnetic Resonance Imaging 2016, (IF-1.98).

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: opracowaniu nowej teorii dotyczącej obrazowania tensora dyfuzji, nazwanej sBSD-DTI, wykonaniu eksperymentów i analizie ich danych, przygotowaniu tekstu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na 60 %.

[D3] Ł. Kaczmarek, T. Wejrzanowski, J. Skibiński, M. Maksimczuk, A. Krzyżak. High-resolution computed microtomography for characterization of diffusion tensor imaging phantom. Acta Geophysica 2015, (IF-1.068).

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: dyskusji koncepcji pracy, koncepcji budowy fantomów anizotropowych. Uczestniczyłem w przygotowaniu tekstu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na 25%.

[D4] A. Krzyżak, I. Habina, G. Machowski. Novel approach to determination of the porosity coefficients by low field NMR. Fuel 2016, (IF-1.98).

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: opracowaniu koncepcji pracy w dziedzinie MRJ, realizacji eksperymentów MRJ i wykonaniu analizy danych. Uczestniczyłem w przygotowaniu tekstu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na 50%.

[D5] I. Habina, N. Radzik, T. Topor, A. Krzyżak. Insight into oil and gas-shales compounds signatures in low field 1H NMR and its application in porosity evaluation. Microporous and Mesoporous Materials 2016, (IF-3.45).

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: opracowaniu koncepcji pracy w dziedzinie MRJ, realizacji eksperymentów MRJ i wykonaniu analizy danych. Uczestniczyłem w przygotowaniu tekstu publikacji. Mój udział procentowy szacuję na 40%.

[D6] A. Fheed, A. Krzyżak. Textural and diagenetic assessment of the Zechstein carbonates in the scope of Nuclear Magnetic Resonance. Journal of Petroleum 2016, (IF-1.65).

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: dyskusji koncepcji pracy w dziedzinie MRJ, realizacji eksperymentów MRJ i wykonaniu analizy danych. Mój udział procentowy szacuję na 30%.

