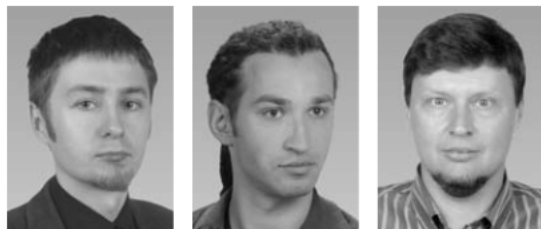


Określanie parametrów wektora przemieszczenia uskoku na podstawie rozsunienia biegowego

Michał Śmigielski¹, Marek Koprianiuk², Andrzej Konon¹



M. Śmigielski

M. Koprianiuk

A. Konon

Determination of fault displacement vector parameters based on strike separation. *Prz. Geol.*, 59: 74–81.

A b s t r a c t. A theoretical method is proposed for determining the relation between the potential dip-slip and strike-slip of the fault. This method is based on strike separation and allows for estimating the minimal displacement value along the fault for its sector where the strike separation was measured. Moreover, the value of total slip for different scenarios of the fault movement can be estimated using this method. Such assessments can be very useful in disproving hypotheses by comparing the obtained total slip values with geological data. The usability of this method is shown at the example of analysis of displacements along the Lysogóry Fault in the Holy Cross Mts.

Keywords: strike separation, structural mapping, fault, displacement distribution, Holy Cross Mts., Lysogóry Fault

Rozsuniecie biegowe to mierzona w płaszczyźnie poziomej odległość pomiędzy odpowiadającymi sobie i leżącymi na powierzchni uskoku w dwóch przeciwległych skrzydłach uskoku punktami jednego, pierwotnie ciągłego elementu strukturalnego rozciętego tym uskokiem (np. Dadlez & Jaroszewski, 1994) (ryc. 1A). Przemieszczony element może być zarówno strukturą liniową (np. żyłą mineralną, osią fałdu), jak i płaszczyzną (np. powierzchnią warstwy). Połączenie dwóch punktów przecięcia struktury liniowej z płaszczyzną uskoku wyznacza wektor całkowitego przemieszczenia tego uskoku. Możliwość identyfikacji tej samej struktury liniowej po obu stronach uskoku zachodzi jednak tylko w wyjątkowych przypadkach, co znacznie ogranicza przydatność tej metody do wyznaczania przemieszczenia. Gdy przemieszczona struktura zbliżona jest kształtem do płaszczyzny, jej rozsuniecie nie wyznacza w sposób jednoznaczny żadnego z elementów wektora przemieszczenia (np. Ramsay & Huber, 1987; Price & Cosgrove, 1990; Twiss & Moores, 1992) (ryc. 1A). Jednakże, w przeciwieństwie do rozsunienia struktur liniowych, wartość rozsunienia biegowego przemieszczzonej płaszczyzny może zostać dość łatwo wyznaczona – szczególnie tam, gdzie uskoki przecinają wychylone tektonicznie skały osadowe. W takich obszarach przemieszczenie stropu lub spągu charakterystycznego, łatwego do zlokalizowania pakietu skał zachodzi powszechnie (np. Mastella, 1988; Rubinkiewicz, 2000; Konon, 2007) i często jest podstawowym wskaźnikiem obecności uskoku.

Do tej pory rozsuniecie biegowe, wyznaczone na podstawie przeciętej uskokiem płaszczyzny, było wykorzystywane do określenia kinematyki uskoku wspólnie z innymi wskaźnikami, np. kierunkiem rys ślizgowych (np. Xu i in., 2007). Ewentualnie wykorzystywano w tym celu pomiary rozsunienia dwóch nierównoległych do siebie, pierwotnie ciągłych płaszczyzn (zwykle przeciwnych skrzydeł fałdu), przeciętych pojedynczym uskokiem (np. Twiss & Moores, 1992; Little, 1996; Regard i in., 2005). Obie metody mają ograniczoną użyteczność w przypadku, gdy powierzchnia

uskoku nie jest dostępna do bezpośrednich obserwacji, a uskok nie przecina przegubu fałdu.

W niniejszej pracy autorzy proponują metodę użycia pojedynczego pomiaru rozsunienia biegowego do częściowego scharakteryzowania przemieszczenia uskoku. Metoda ta pozwala na wyznaczenie wartości minimalnego przemieszczenia wzdłuż uskoku dla jego fragmentu, dla którego wyznaczono wartość rozsunienia biegowego. Ponadto umożliwia ona określenie wektora przemieszczenia całkowitego (ślizgu całkowitego) dla wysuniętych uprzednio hipotez dotyczących charakteru przemieszczenia na uskoku. Metoda ta ma szczególne znaczenie we wszystkich (częstych) przypadkach, gdy rozsuniecie biegowe przeciętej przez uskok płaszczyzny lub szeregu równoległych płaszczyzn jest jedyną dostępną informacją dotyczącą przemieszczenia uskoku.

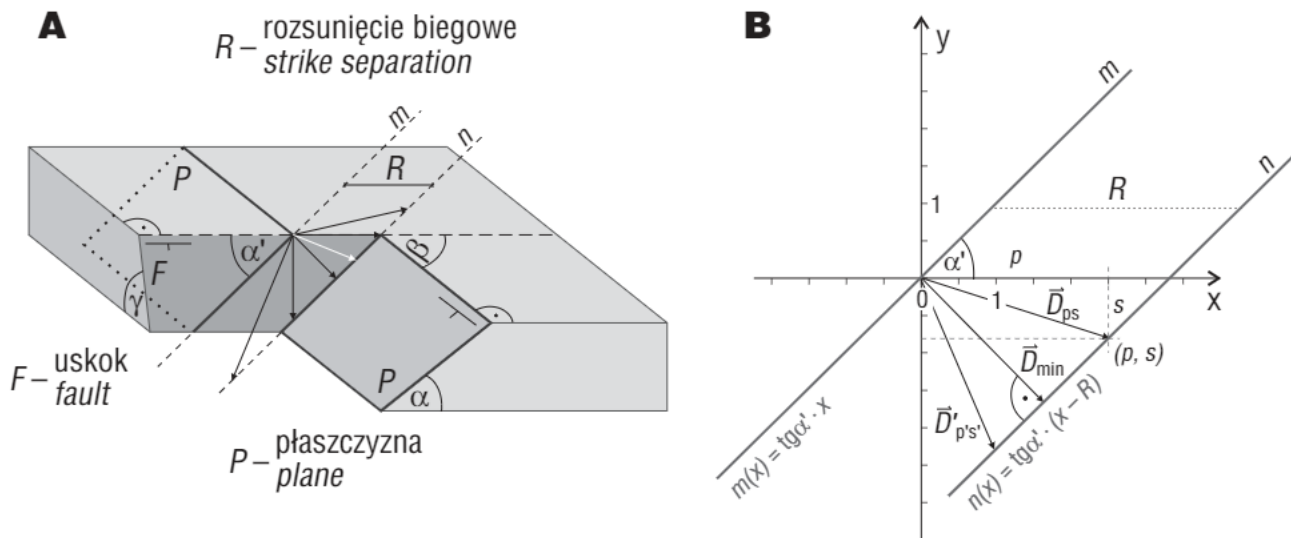
Opisany w pracy sposób wnioskowania dotyczy tych sytuacji tektonicznych, w których uskoki zostały nałożone na starsze od nich struktury. Nie jest on poprawny, gdy rozwój uskoku jest jednoczesny z regionalnym procesem deformacji (np. uskoki rozrywające, łączące oddzielne segmenty nasunięcia). W takich przypadkach rozsuniecie elementu strukturalnego może mieć częściowo charakter pozorny i wynikać z faktu, że w procesie deformacji w przeciwnych skrzydłach uskoku dochodzi do powstania podobnych struktur tektonicznych, które jednak nigdy nie były ze sobą połączone (np. McClay, 1992). Sytuacje tektoniczne zbliżone do opisanej powyżej nie mieszczą się w przyjętej w pracy definicji rozsunienia biegowego, a ich kinematyka nie może być rozważana za pomocą zaprezentowanych w niej metod.

Rozsuniecie biegowe jako wskaźnik kinematyczny

W celu wyjaśnienia metody autorzy proponują, aby powierzchnię uskoku, który przeciął starszą powierzchnię geologiczną, potraktować jako płaszczyznę kartezyjańskiego układu odniesienia (ryc. 1B). Na płaszczyźnie uskoku

¹Instytut Geologii Podstawowej, Uniwersytet Warszawski, al. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa; m.smigielski@uw.edu.pl, andrzej.konon@uw.edu.pl.

²Polskie Górnictwo Naftowe i Gazownictwo, ul. Kasprzaka 25, 01-224 Warszawa; marek.koprianiuk@pgnig.pl.



Ryc. 1. **A** – schemat wyjaśniający pojęcie rozsunienia biegowego (R) pierwotnie ciągłej płaszczyzny P , rozciętej i przemieszczonej uskokiem F ; białą strzałką oznaczono całkowity wektor przemieszczenia uskoku, czarnymi strzałkami inne potencjalne wektory przemieszczenia, które mogły doprowadzić do identycznego rozsunienia płaszczyzny P ; **B** – wykres położenia w płaszczyźnie uskoku dwóch śladów przecięcia rozsuniętej płaszczyzny P z płaszczyzną uskoku F . Pozostałe objaśnienia w tekście

Fig. 1. **A** – sketch illustrating the concept of strike separation (R) as a horizontal offset of two halves of an originally continuous plane P , cut and displaced by fault F . White arrow shows total displacement vector and black arrows – other possible slip vectors resulting in the same strike separation; **B** – plot of the position of cut off lines of mutually displaced halves of plane P on the fault plane F . For other explanations see the text

widoczne są dwie linie, oznaczone jako m i n , będące śladami intersekcji uskoku z przeciętą i przemieszczoną powierzchnią. Punkt początkowy układu wyznaczony jest w miejscu przecięcia linii intersekcyjnej m z powierzchnią terenu (ryc. 1A). Oś odciętych wyznaczono wzdłuż linii biegu płaszczyzny uskoku. W przyjętym układzie odniesienia linię intersekcyjną m można opisać wzorem:

$$m(x) = \operatorname{tg}\alpha' \cdot x \quad (1)$$

Efektom działania uskoku będzie przesunięcie linii m o wektor $\vec{D}(p, s)$ do nowej pozycji w drugim skrzydle uskoku oznaczonej jako n (ryc. 1). Wektor ten jest sumą wszystkich epizodów tektonicznych i wywołanych nimi przemieszczeń, których doświadczył uskok. Parametry p (ślizg biegowy) i s (ślizg upadowy) stanowią jego składowe mierzone odpowiednio wzdłuż biegu i upadu powierzchni uskoku. Położenie linii intersekcyjnej n po przemieszczeniu przez uskok można określić przy użyciu wyznaczonej wielkości rozsunienia biegowego R , będzie ono wyrażone wzorem:

$$n(x) = \operatorname{tg}\alpha' \cdot (x - R) \quad (2)$$

Na podstawie wartości rozsunienia biegowego płaszczyzny przeciętej uskokiem nie można wyznaczyć wprost rzeczywistych parametrów wektora całkowitego przemieszczenia p i s . Rozsunienie biegowe pozwala jednak na wyznaczenie zbioru hipotetycznych wektorów przemieszczenia $\vec{D}'(p', s')$, z których każdy mógł doprowadzić do obserwowanej obecnie sytuacji tektonicznej (ryc. 1). Każdy z hipotetycznych wektorów przemieszczenia \vec{D}' ma punkt zaczepienia w początku układu $(0, 0)$, więc jego współrzędne p' i s' muszą spełniać równanie (2) (ryc. 1B). Oznacza to, że po określeniu dla uskoku wartości rozsunienia biegowego hipotetyczne składowe całkowitego wektora przemieszczenia tego uskoku mogą przyjmować jedynie wartości spełniające równanie:

$$s' = \operatorname{tg}\alpha' \cdot (p' - R) \quad (3)$$

Równanie (3) jest równaniem liniowym z dwiema niewiadomymi s' i p' . Jego rozwiązania stanowią zbiór wszystkich możliwych par wartości ślizgu upadowego s' i biegowego p' dla danego uskoku, które mogły doprowadzić do zaobserwowanej na powierzchni terenu sytuacji tektonicznej.

W podsumowaniu powyższego wywodu należy stwierdzić, że jeżeli wielkość rozsunienia biegowego R jest znana, to oszacowanie wartości jednej z hipotetycznych składowych wektora całkowitego przemieszczenia (p' albo s') pozwala, z wykorzystaniem wzoru (3), na oszacowanie wartości drugiej składowej i obliczenie rzeczywistego wektora całkowitego przemieszczenia na uskoku.

Kluczowym parametrem niezbędnym do wykorzystania równania (3) jest wartość współczynnika $\operatorname{tg}\alpha'$, czyli pozornego kąta zapadania przemieszczanej powierzchni geologicznej w płaszczyźnie uskoku (ryc. 1). Analityczną metodę wyznaczenia wartości tego kąta dla trzech różnych przypadków względnego położenia uskoku i przemieszczonej płaszczyzny przedstawili Xu i in. (2007). W niniejszej pracy metoda ta została uproszczona i sprowadzona do jednego wzoru.

Żeby wyznaczyć wartości $\operatorname{tg}\alpha'$, należy obliczyć lub zmierzyć długość dwóch odcinków leżących w płaszczyźnie uskoku F i tworzących boki trójkąta prostokątnego (ryc. 2A), a następnie wykorzystać wzór:

$$\operatorname{tg}\alpha' = \frac{e'}{f}, \quad f \neq 0 \quad (4)$$

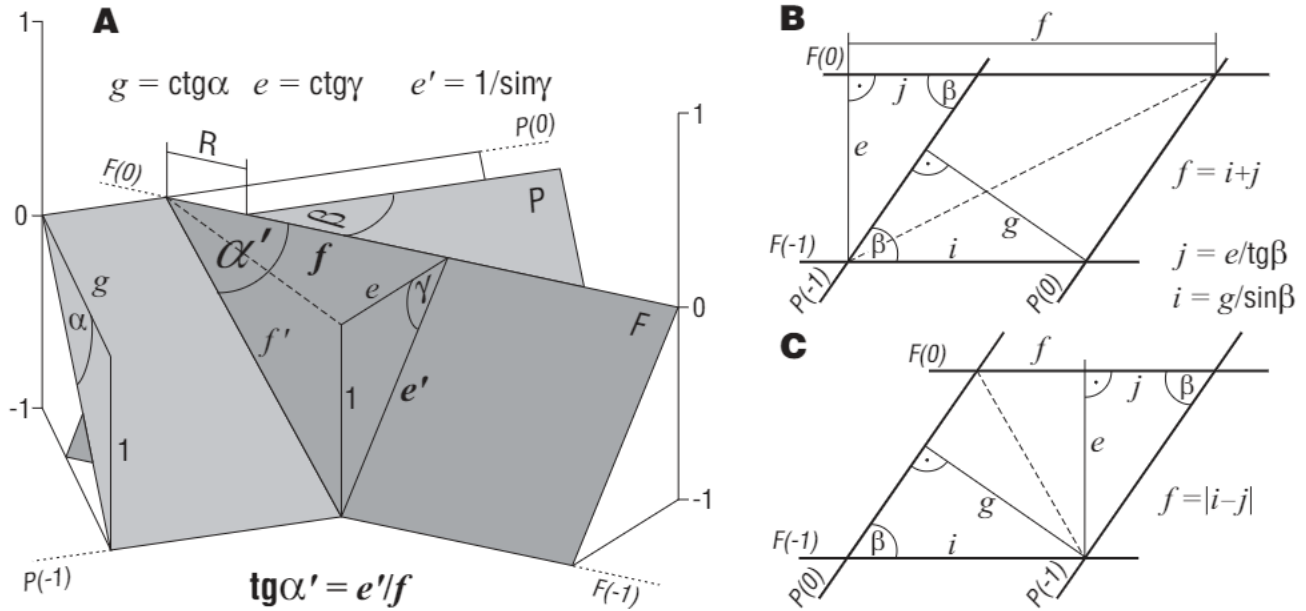
Pierwszy z tych odcinków (e') to fragment linii upadu uskoku mieszczący się pomiędzy dwiema dowolnymi poziomiami strukturalnymi uskoku (ryc. 2A). Jego długość można wyznaczyć przy użyciu poniższego wzoru (5) lub

poprzez wykonanie konstrukcji geometrycznej (kładu powierzchni uskokuwej):

$$e' = \frac{1}{\sin \gamma}, \quad \gamma \neq 0^\circ \quad (5)$$

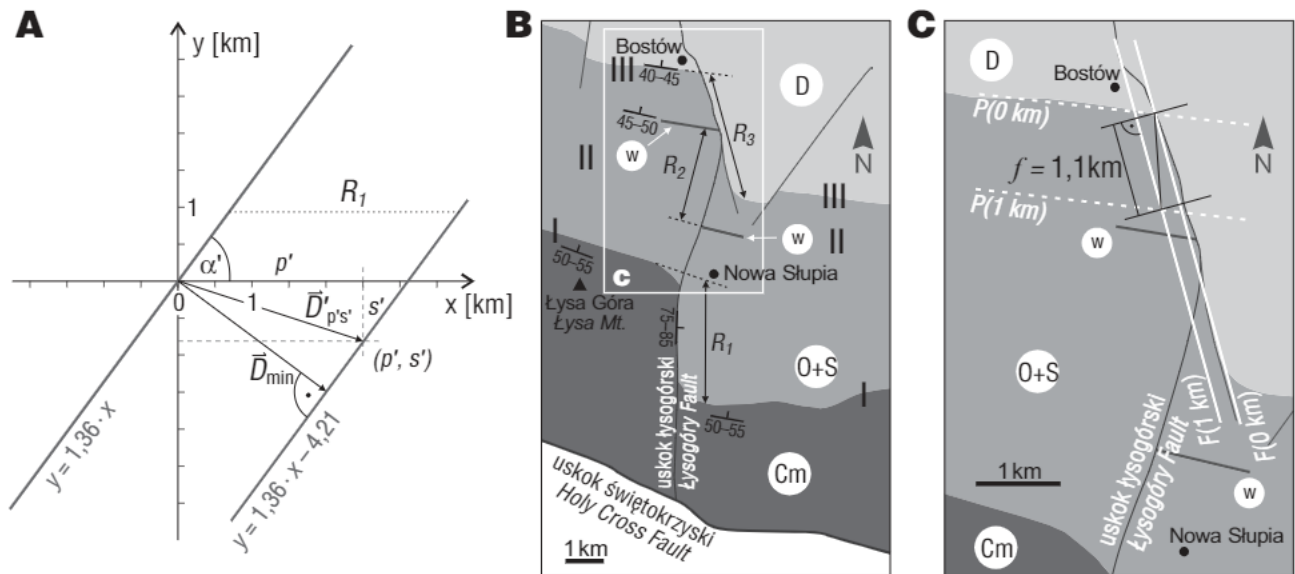
Drugi odcinek (f) to rzut na poziomice strukturalną powierzchni uskokuwej fragmentu linii intersekcyjnej f' ,

mieszczącego się między tymi samymi poziomcami strukturalnymi co odcinek e' . Długość tego odcinka można w łatwy sposób wyznaczyć konstrukcyjnie, bezpośrednio na mapie geologicznej, trzeba tylko znać biegi i upady płaszczczyzny i uskoku (ryc. 2, 3).



Ryc. 2. A – schemat przedstawiający metodę wyznaczania wartości parametru $\text{tg}\alpha'$; B, C – widok w planie; B – wyznaczanie wartości f dla przeciwnych kierunków zapadania płaszczczyzny uskoku F i płaszczczyzny P ; C – wyznaczanie wartości f dla zgodnych kierunków zapadania płaszczczyzny uskoku F i płaszczczyzny P . Pozostałe objaśnienia w tekście

Fig. 2. A – sketch illustrating the method of estimation of value of parameter f for the opposite senses of the fault F and the plane P ; C – estimation of the value of parameter f for the same senses of the fault F and the plane P . For other explanations see the text



Ryc. 3. A – wykres położenia dwóch śladów przecięcia rozsuniętej powierzchni stropu kwarcytów kambru z uskokiem Łysogórkim; x, y – współrzędne położenia na płaszczczyźnie uskoku; B – szkic geologiczny rejonu uskoku łysogórskiego, Cm – kambr, O+S – ordowik i sylur, D – dewon, w – oolity formacji Winnicy (Kozłowski, 2008), R_{1-3} – rozsunięcia biegowe wzdłuż uskoku; C – schemat wyznaczania wartości parametru f przy użyciu konstrukcji geometrycznej na przykładzie rozsunięcia biegowego R_3 ; P – poziomice strukturalne spągu kwarcytów dewonu, F – poziomice strukturalne uskoku. Pozostałe objaśnienia w tekście

Fig. 3. A – position of cut off lines of the top of Cambrian quartzite sandstones on the Łysogóry Fault plane; x, y – coordinates of the position on the fault plane; B – geological sketch of the Łysogóry Fault region, Cm – Cambrian, O+S – Ordovician and Silurian, D – Devonian, w – oolites of Winnica fm. (Kozłowski, 2008), R_{1-3} – strike separations along fault; C – sketch illustrating estimation of the parameter f value for the strike separation R_3 using geometrical construction; P – structural contour lines of the base of the Devonian quartzite sandstones, F – structural contour lines of the fault plane. For other explanations see the text

Wartości f można również wyznaczyć analitycznie przy użyciu wzoru (6), co prowadzi do analitycznego określenia parametru $\text{tg}\alpha'$.

$$f = \frac{\text{ctg}\gamma \pm \frac{\text{ctg}\alpha}{\sin\beta}}{\text{tg}\beta}, \quad \alpha \neq 0^\circ, \beta \neq 0^\circ, \gamma \neq 0^\circ, f \neq 0 \quad (6)$$

Do analitycznego wyznaczenia wartości $\text{tg}\alpha'$ autorzy proponują wykorzystanie wzoru (7) w dwóch wariantach: opartego na różnicy w przypadku zgodnych kierunków upadów płaszczyzny i uskoku oraz opartego na sumie w przypadku upadów przeciwnych (ryc. 2B, C):

$$\text{tg}\alpha' = \left| \frac{\sin\beta}{\cos\gamma \cdot \cos\beta \pm \text{ctg}\alpha \cdot \sin\gamma} \right| \quad (7)$$

Po obliczeniu wartości $\text{tg}\alpha'$ zgodnie ze wzorem (4) albo (7), można za pomocą wzoru (3) określić zależność pomiędzy hipotetycznym ślizgiem upadowym s' a biegowym p' . Zależność ta określa ramy, w których powinny się mieścić wszystkie hipotezy dotyczące całkowitego przemieszczenia na uskoku. Jednocześnie, równanie to – po przekształceniu do postaci (8) – pozwala obliczyć minimalne przemieszczenie D_{\min} na płaszczyźnie uskoku dla odcinka uskoku, dla którego wyznaczono wartość rozsunienia biegowego. Kierunek przemieszczenia minimalnego jest prostopadły do linii intersekcji przemieszczonej powierzchni i uskoku (ryc. 1A).

$$D_{\min} = \frac{\text{tg}\alpha' \cdot R}{\sqrt{1 + \text{tg}\alpha'^2}} \quad (8)$$

Jak wynika z przedstawionych powyżej wzorów, do określenia zależności między wartościami hipotetycznego ślizgu upadowego i biegowego wzdłuż uskoku niezbędna jest znajomość wartości rozsunienia biegowego R oraz kątów upadu uskoku γ , przemieszczanej płaszczyzny α oraz wartości kąta między ich biegami β . Zebranie tych danych podczas prac kartograficznych jest najczęściej możliwe.

Istnieje grupa takich położzeń uskoku i przeciętej płaszczyzny, które z przyczyn geometrycznych uniemożliwiają oszacowanie zależności między potencjalnymi wartościami ślizgu biegowego i upadowego na podstawie rozsunienia biegowego. Dotyczy to przede wszystkim przypadków, gdy pierwotnie ciągła płaszczyzna lub uskoku są horyzontalne albo zbliżone do tego położenia, ewentualnie równoległe do siebie ($\alpha \vee \beta \vee \gamma = 0^\circ$). Wtedy dowolne przemieszczenie wzdłuż uskoku nie generuje na powierzchni terenu rozsunienia biegowego płaszczyzny, choć może generować nieomawiane w niniejszej pracy rozsunienie upadowe.

Zależność między potencjalnym ślizgiem biegowym a upadowym nie istnieje również, gdy linia intersekcyjna uskoku i przeciętej płaszczyzny pokrywa się z linią upadu uskoku ($f = 0$). Ma to miejsce w przypadku, gdy parametry uskoku i przeciętej płaszczyzny spełniają poniższe równanie:

$$\cos\alpha \cdot \sin\gamma = \sin\alpha \cdot \cos\beta \cdot \cos\gamma \Rightarrow f = 0 \wedge p = R \quad (9)$$

Jest to zbiór specyficznych sytuacji geometrycznych, w których dowolnie duży zrzut uskoku nie spowoduje

na powierzchni terenu żadnego rozsunienia biegowego (ryc. 4A). Sytuacja taka nie pozwala na wyznaczenie całkowitego wektora przemieszczenia ani wykorzystanie zależności (7), ale umożliwia określenie wartości ślizgu biegowego p , który w tym wypadku jest równy rozsunieniu biegowemu R (ryc. 4B).

Rozsunienie biegowe pozorne i rzeczywiste

Morfologia powierzchni terenu sprawia, że widoczna na mapach wartość rozsunienia biegowego nie musi być wartością rzeczywistą, a może być jedynie pozorną (ryc. 5). Wartość rozsunienia biegowego powinna być mierzona w płaszczyźnie poziomej. Jeśli punkty, między którymi dokonuje się pomiaru, znajdują się na różnych wysokościach nad poziomem morza, to będzie ona zawyżona lub zaniżona. Kiedy wartość $\text{tg}\alpha'$ oraz różnica wysokości między punktami po obu stronach uskoku h , między którymi oznaczono wartość pozornego rozsunienia biegowego R' , są znane, można wtedy – zgodnie z poniższym wzorem – obliczyć rzeczywistą wielkość rozsunienia R (ryc. 5):

$$R = R' \pm \frac{h}{\text{tg}\alpha'} \quad (10)$$

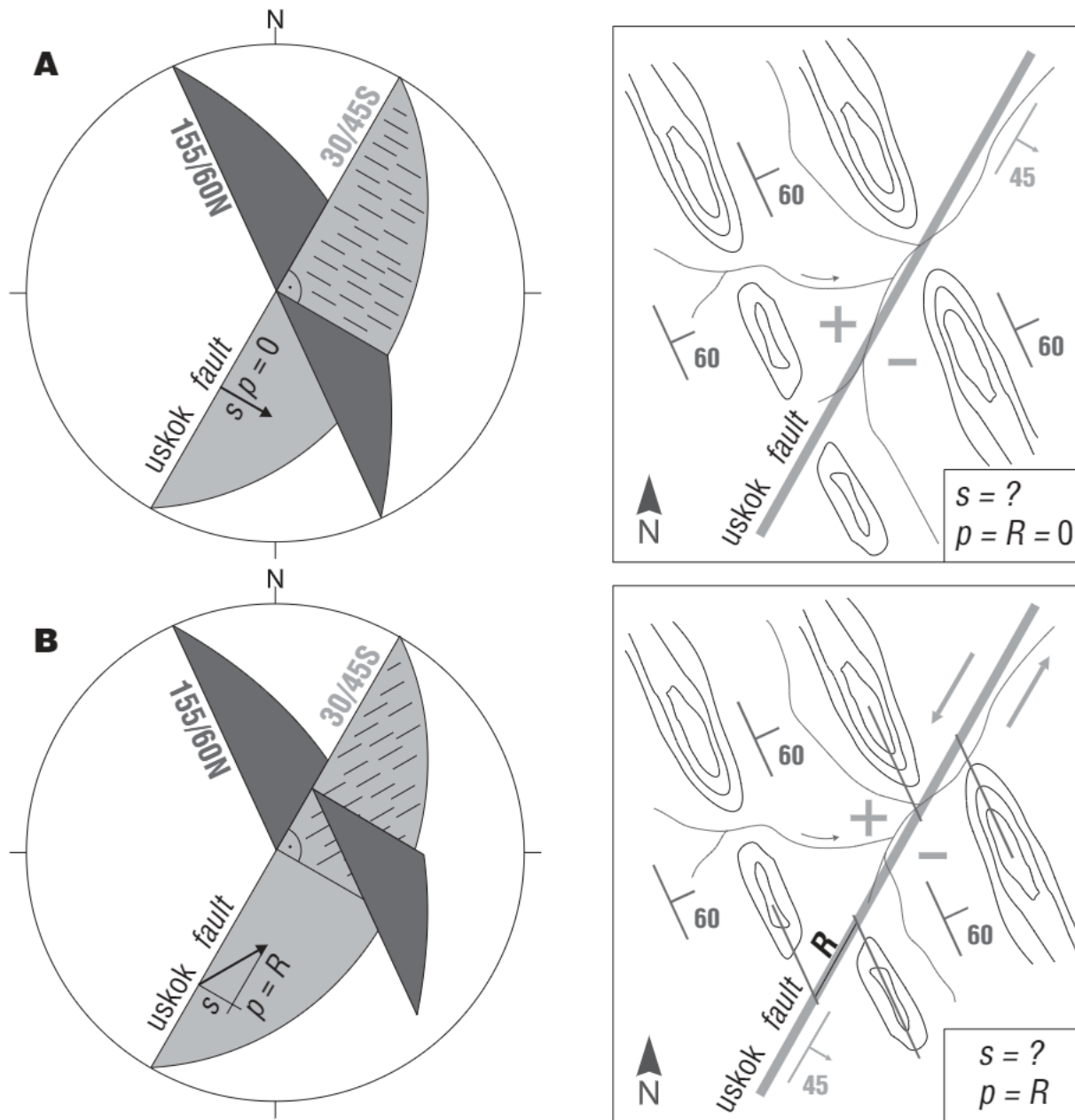
Szacowanie rozkładu przemieszczenia

Jeżeli uskoku nie ma charakteru rotacyjnego, szereg pomiarów rozsunienia biegowego wykonanych dla przemieszczonych przez uskoku płaszczyzn pozwala na przybliżone oszacowanie rozkładu przemieszczenia na uskoku (ryc. 3, 6). W przypadku gdy uskoku ma zmienny przebieg i zmienia się również położenie przemieszczonych płaszczyzn, należy wyznaczyć wartości kątów α , β i γ osobno dla każdego odcinka, dla którego dokonano pomiaru rozsunienia. Następnie można wykorzystać przedstawione wzory do oszacowania zależności między potencjalnym ślizgiem upadowym s' a biegowym p' . Pozwala to również na określenie minimalnego przemieszczenia dla poszczególnych odcinków uskoku (ryc. 6).

Interpolacja między wartościami uzyskanymi dla poszczególnych odcinków uskoku umożliwia skonstruowanie wykresu obrazującego zależność między położeniem wzdłuż uskoku a wartością przemieszczenia, tzw. profilu D-L (Higgs & Williams, 1987; Peacock, 1991). Kształt tego profilu i jego odstępstwa od kształtów najczęściej spotykanych dla uskoku mogą pozwolić na wyciągnięcie dodatkowych informacji o charakterze i ewolucji uskoku (Peacock & Sanderson, 1991; Willemsse i in., 1996; Cowie & Shipton, 1998; Kim i in., 2000).

Przykład zastosowania rozsunienia biegowego do analizy przemieszczenia wzdłuż uskoku

Algorytm postępowania, znaczenie zależności między potencjalnym ślizgiem biegowym a upadowym i jej wpływ na interpretację struktury autorzy proponują omówić na przykładzie uskoku łysogórskiego (Michalski, 1888; Czarnocki, 1950, 1956, 1957). Przecina on tektonicznie wychylone ku północy paleozoiczne skały łysogórskiej strefy pasma fałdowego Gór Świętokrzyskich w przybliżeniu prostopadłe do ich rozciągłości (ryc. 3B). Do zaprezentowania, w jaki sposób może przebiegać weryfikacja scenariuszy kinematycznych z wykorzystaniem opisanej w



Ryc. 4. Przykład ilustrujący konsekwencje pokrywania się linii upadu uskoku z linią intersekcyjną między uskokiem a przemieszczoną płaszczyzną. Po lewej diagramy położenia uskoku i położenia warstw w projekcji na dolną półkulę siatki równopowierzchniowej; wektorem oznaczono przemieszczenie całkowite na uskoku; po prawej szkice strukturalno-morfologiczne: „+” skrzydło wyniesione, „-” skrzydło zrzucone uskoku; **A** – uskoku zrzutowy – przemieszczenie wzdłuż uskoku nie powoduje rozsunienia biegowego; **B** – uskoku przesuwczo-zrzutowy – wartość rozsunienia biegowego jest równa ślizgowi biegowemu i jest niezależna od ślizgu upadowego

Fig. 4. Sketch illustrating the consequences of parallel position of the fault dip line and the cut off line of displaced plane on the fault surface. On the left plots of fault and bedding position – equal area lower hemisphere projection; vectors indicate total displacement; on the right morphostructural sketches: “+” upthrown and “-” downthrow side of the fault; **A** – normal dip slip fault – displacement on the fault does not generate any strike separation; **B** – oblique slip fault – strike separation is equal to the strike slip component of total displacement vector and is independent of dip slip component

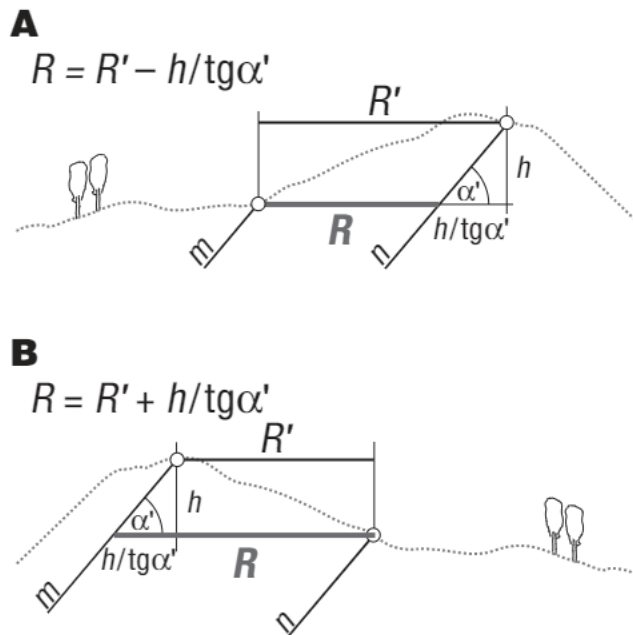
pracy metody, poniższe rozważania oparto wyłącznie na powierzchniowych danych kartograficznych (m.in. Filonowicz, 1966; Kozłowski, 2008). Dopiero w końcowej części wywodu posłużono się danymi otworowymi w celu częściowej weryfikacji omawianych scenariuszy.

W dotychczasowych badaniach dotyczących uskoku łysogórskiego formułowano różnorodne hipotezy dotyczące przemieszczenia wzdłuż tej struktury. Postulowano zarówno, że uskoku ten ma charakter prawoprzesuwczy, zrzutowo-przesuwczy, jak i całkowicie zrzutowy (Czarnecki,

1950; Jaroszewski, 1973, 1980; Mizerski, 1982; Konon & Śmigielski, 2006; Konon, 2006, 2007). Do dziś nie udało się zidentyfikować jednoznacznych wskaźników kinematycznych, które określiłyby wszystkie parametry całkowitego wektora przemieszczenia dla poszczególnych segmentów uskoku.

Prowadzone przez lata szczegółowe analizy kartograficzne (Czarnecki, 1950, 1956, 1957, 1961; Filonowicz 1966; Konon & Śmigielski, 2006; Kozłowski, 2008) umożliwiają wyznaczenie dla uskoku łysogórskiego wartości

rozsunięcia biegowego przynajmniej dla trzech pierwotnie ciągłych powierzchni przeciętych przez tę strukturę (ryc. 3B). Powierzchniami tymi są kolejno od południa: (I) strop formacji piaskowców kwarcytowych z Wiśniówki ($R_1 = 3,1$ km), (II) strop piaskowców i wapieni oolitowych z Jadownik w obrębie formacji mułowców i margli z Winnicy (Kozłowski, 2008) ($R_2 = 2,3$ km) oraz (III) spąg formacji piaskowców z Barczy ($R_3 = 3,2$ km). Z uwagi na zmieniające się upady warstw wzdłuż uskoku oraz jego zmienny przebieg w stosunku do kierunku rozciągłości struktur (Czarnecki, 1950; Filonowicz 1966; Konon & Śmigielski, 2006; Kozłowski, 2008) obserwowane wartości rozsunięcia biegowego nie przekładają się w prosty sposób na potencjalne przemieszczenia minimalne i relacje między potencjalnym ślizgiem upadowym a biegowym (tab. 1). Parametry te mogą być jednak wyznaczone analitycznie za pomocą wzorów (3), (7) i (8). Niewielkie różnice w wysokości n.p.m. punktów położonych po obu stronach uskoku, dla których wyznaczono wartości rozsunięcia biegowego, pozwalają na pominięcie poprawki wysokościowej ($R' = R$).



Ryc. 5. Wyznaczanie wartości rozsunięcia biegowego na podstawie rozsunięcia pozornego dla stoku konsekwentnego (A) i obsekwentnego (B). Pozostałe objaśnienia w tekście

Fig. 5. Determination of the true strike separation value from the apparent strike separation for consequent (A) and obsequent slope (B). For other explanations see the text

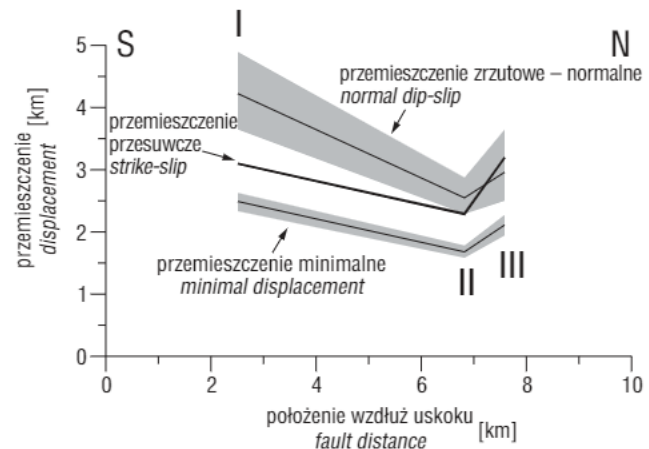
Tab. 1. Parametry wektora przemieszczenia uskoku Łysogórskiego na podstawie rozsunięć biegowych R_{1-3} , wartości przemieszczenia podane w km, pozostałe objaśnienia w tekście

Table 1. Parameters of the total displacement vector of the Łysogóry Fault from strike separations R_{1-3} , value of displacement in km. For other explanations see the text

Powierzchnia przemieszczona <i>Displaced surface</i>	Wiek <i>Age</i>	$R' = R$ [km]	α [°]	β [°]	γ [°]	$\text{tg}\alpha'$	D_{min} [km]	Typ uskoku <i>Fault type</i>			Wektor przemieszczenia <i>Displacement vector</i>		
								(a)	(b)	(c)	s [km]	p [km]	D [km]
								przesuwczy <i>strike-slip</i>	zrzutowy <i>dip-slip</i>	zrzutowo- przesuwczy <i>oblique-slip</i>			
III	S\O	$R_3 = 3,2$	40–45	65–75	75–85	0,925	2,17	$p' = 3,2$ $s' = 0$	$p' = 0$ $s' = 3,0$	$s' = 0,93p' - 2,96$	-0,25	2,93	2,94
II	S	$R_2 = 2,3$	45–50	85–90	75–85	1,116	1,71	$p' = 2,3$ $s' = 0$	$p' = 0$ $s' = 2,6$	$s' = 1,12p' - 2,57$	-0,25*	2,08*	2,09*
I	Cm\O	$R_1 = 3,1$	50–55	75–80	75–85	1,359	2,50	$p' = 3,1$ $s' = 0$	$p' = 0$ $s' = 4,2$	$s' = 1,36p' - 4,21$	-0,25*	2,92*	2,93*

W pracy rozważano możliwości występowania wzdłuż uskoku przeważających składowych (tab. 1): prawoprusuwczej (a), zrzutowej (b) i zrzutowo-przesuwczej (c). Dla każdego z tych scenariuszy wyznaczono również rozkład przemieszczenia wzdłuż uskoku. Wartości obliczonych parametrów w połączeniu z istniejącymi danymi na temat budowy geologicznej analizowanego obszaru pozwalają dyskutować nad prawdopodobieństwem każdej z wymienionych hipotez. W analizie rozkładu przemieszczeń wzdłuż uskoku Łysogórskiego należy wziąć pod uwagę fakt, że rozkład ten może być w istotny sposób zaburzony z powodu: kontaktu z uskokiem świętokrzyskim na południu (Czarnecki, 1950), przecinania przez uskoki Łysogórski skał o znaczących różnicach we właściwościach geomechanicznych (Pinińska, 1994) albo zmiennego przebiegu uskoku (Czarnecki, 1950, 1956, 1961; Konon & Śmigielski, 2006; Konon, 2007).

W przypadku pierwszym (a), gdy założymy występowanie przeważającej składowej przesuwczej, wartość rozsunięcia biegowego wyznacza bezpośrednio hipotetyczne przemieszczenie całkowite ($R' = p' = D', s' = 0$). Teoretycznie



Ryc. 6. Wykres zależności wielkości przemieszczenia od położenia wzdłuż uskoku Łysogórskiego dla hipotetycznych przemieszczeń przesuwczych, zrzutowych – normalnych i minimalnych przesuwczo-zrzutowych (linie ciągłe). Pola określają zakres minimalnych i maksymalnych wartości przemieszczeń oszacowanych na podstawie minimalnych i maksymalnych obserwowanych wartości kątów α , β i γ (zobacz tab. 1)

Fig. 6. Plot of displacement value to position along the Łysogóry Fault for three hypothetical slip directions: strike-slip, normal dip-slip, minimal oblique-slip (solid lines). Colored fields show the ranges between the minimal and the maximal values of the displacement estimated from the minimum and the maximum observed values of parameters α , β and γ (see Table 1)

maksymalne przemieszczenie na uskoku obserwuje się zwykle w jego środkowej części (Walsh & Watterson, 1988, 1989). Rozkład przemieszczeń (p') określony na podstawie trzech rozsunień biegowych wskazywałby jednak na profil krzywej D-L z zanizoną wartością przemieszczenia w obrębie osadów ordowiku i syluru (tab. 1; ryc. 6). Obniżenie to może być jednak w omawianym scenariuszu wyjaśnione nierównomierną kompensacją przemieszczenia przesuwczego w obrębie podatnych osadów w przeciwnych skrzydłach uskoku, na którą to możliwość wskazują obserwacje terenowe (Kozłowski, 2008, Fig. 4; Kozłowski – informacja ustna 2009), oraz różnicami we właściwościach geomechanicznych skał i morfologią uskoku. Ten ostatni czynnik mógł mieć znaczący wpływ w przypadku, gdyby historia ewolucji uskoku zawierała etap istotnej reaktywacji.

Duża wartość potencjalnego przemieszczenia ($R_I = p' = 3,1$ km) wzdłuż uskoku łysogórskiego w pobliżu jego południowego zakończenia (ryc. 3, 6) również odbiega od teoretycznego modelu rozkładu przemieszczenia dla pojedynczego izolowanego uskoku (Walsh & Watterson, 1988, 1989). Może być ona częściowo wyjaśniona wpływem podłużnego uskoku świętokrzyskiego, zaburzeniami w strefie kontaktu obu uskoku oraz kompensacją ruchu przesuwczego na uskoku łysogórskim przez dezintegrację południowej części jego zachodniego skrzydła na kontakcie z uskokiem świętokrzyskim (por. Peacock, 1991; Maerten i in., 1999, 2000). Sugestie te wymagają jednak dalszych, pogłębionych badań nad kinematyką obu struktur.

W drugim z rozważanych scenariuszy (b), zakładającym występowanie znaczącej składowej zrzutowej i brak przemieszczeń przesuwczych ($p' = 0$), wyznaczone wartości przemieszczeń i ich rozkład wydają się mało prawdopodobne (tab. 1, ryc. 6). Wyznaczona wartość ślizgu upadowego – od ok. 2,6 do 4,2 km – jest charakterystyczna dla obszarów, które cechuje znaczna ekstensja, powiązana np. z procesem ryftowania. Powstanie uskoku łysogórskiego jest datowane na okres po młodopaleozoicznym fałdowaniu i przed osadzeniem się zlepieńców permskich (Samsonowicz, zob. Czarnocki, 1950), co prawdopodobnie wyklucza taką genezę. Ponadto duża wartość ślizgu upadowego ($s' = 4,2$ km) na uskoku łysogórskim w pobliżu uskoku świętokrzyskiego (ryc. 3A, tab. 1) mogłaby być skompensowana jedynie w przypadku, gdyby istniała duża różnica wielkości składowej zrzutowej uskoku świętokrzyskiego po obu stronach uskoku łysogórskiego. Stoi to w sprzeczności z obserwacjami terenowymi. Dzisiejszy obraz kartograficzny wskazuje, że północne skrzydło uskoku świętokrzyskiego jest skrzydłem wiszącym (np. Czarnocki, 1938; Filonowicz, 1970; Szczepanik, 2001). Wielkość rzutu uskoku świętokrzyskiego może być oszacowana na podstawie opracowań kartograficznych na ok. 4–5 km (Filonowicz, 1970; Kozłowski, 2008). Przy hipotetycznym rzuceniu uskoku łysogórskiego w oszacowanej wielkości $s' = 4,2$ km spowodowałoby to w dzisiejszym obrazie kartograficznym bezpośredni kontakt skał dewońskich w przeciwnych skrzydłach uskoku świętokrzyskiego na wschód od uskoku łysogórskiego, co nie jest to obserwowane (Filonowicz, 1966). Z tych powodów hipotezę tę należy uznać za mało prawdopodobną.

Wartość przemieszczenia minimalnego D_{\min} dla poszczególnych sektorów uskoku może być potraktowana jako reprezentatywny wariant przemieszczenia przesuwczego-zrzutowego (c), z porównywalnym udziałem składowej

przesuwczej i zrzutowej, ponieważ wyznaczona wartość $\operatorname{tg}\alpha'$ jedynie nieznacznie odbiega od 1 ($\alpha \approx 45^\circ$) (tab. 1). Zgodnie z tym scenariuszem wartość przemieszczeń całkowitych wzdłuż uskoku wahałaby się od 1,7 do 2,5 km (ryc. 6). Mniejsze w porównaniu z poprzednimi hipotezami wartości przemieszczeń lepiej odpowiadałyby całkowitej długości uskoku, która w tym przypadku byłaby w przybliżeniu o jeden rząd wielkości większa od przemieszczenia, co jest typową wartością dla uskoku (Price & Cosgrove, 1990). Przemawia to na korzyść tego scenariusza. Na jego niekorzyść przemawiają jednak wszystkie te zastrzeżenia, które dotyczą hipotezy zrzutowej. Przede wszystkim brak możliwości skompensowania znacznego przemieszczenia zrzutowego na południowym końcu uskoku łysogórskiego. Powyższe rozważania wskazują, że spośród wszystkich możliwych wariantów przemieszczenia przesuwczego-zrzutowego najbardziej prawdopodobne są te, w których przemieszczenie przesuwcze odgrywa dominującą rolę.

Podsumowując: porównanie otrzymanych za pomocą przedstawionej metodyki wartości hipotetycznych przemieszczeń z obrazem kartograficznym omawianego obszaru wskazuje prawdopodobnie na prawoprzesuwczy charakter przemieszczenia na uskoku łysogórskim. Wnioski te potwierdzają pogląd, który na temat tej struktury w swych pracach wyrażali Czarnocki (1950), Jaroszewski (1973, 1980), Mastella i Mizerski (2002), Konon i Śmigielski (2006) oraz Konon (2007). Jednocześnie analiza ta sugeruje, że na wielkość przemieszczenia w południowym segmencie badanego uskoku mogło mieć wpływ przemieszczenie na uskoku świętokrzyskim i prawdopodobna reaktywacja uskoku łysogórskiego jako uskoku przesuwczego.

Istniejące materiały kartograficzne pozwalają na częściową weryfikację przedstawionej powyżej hipotezy. Na podstawie przekroju przez północną część strefy uskoku, wykonanego na podstawie wierceń, oraz jego tektonicznej interpretacji (Czarnocki, 1956; Konon, 2007 – ryc. 5) można oszacować ślizg upadowy dla tego fragmentu struktury na ok. 250 m. Przy użyciu wzoru (3) można wtedy określić pozostałe elementy wektora przemieszczenia dla tego segmentu uskoku łysogórskiego (tab. 1). Wyznaczony w ten sposób wektor przemieszczenia jest dowodem na dominujące znaczenie składowej prawoprzesuwczej w całkowitym przemieszczeniu uskoku.

Wnioski

Rozsuniecie biegowe wyznaczone na podstawie przemieszczenia pierwotnie ciągłej płaszczyzny jest wypadkową ślizgu upadowego i biegowego wzdłuż uskoku. Powinno być używane jako główne źródło informacji o kinematyce uskoku wszędzie tam, gdzie nie można zastosować innych metod z powodu ich niejednoznaczności lub braku możliwości przeprowadzenia odpowiednich obserwacji.

Przedstawiona w pracy metodyka postępowania i wzory pozwalają na określenie na podstawie wartości rozsunęcia biegowego bezpośredniej zależności między potencjalnym ślizgiem upadowym a biegowym. Zależność ta jest wyznaczana na podstawie łatwych do pozyskania danych strukturalnych w jego sąsiedztwie.

Szereg pomiarów rozsunęcia biegowego wzdłuż pojedynczej strefy nieciągłości umożliwia oszacowanie potencjalnego rozkładu przemieszczenia.

Zależność między składowymi potencjalnego wektora przemieszczenia i potencjalny rozkład przemieszczenia wzdłuż uskoku pozwalają zwykle, z wykorzystaniem kontekstu geologicznego, na przeprowadzenie dyskusji na temat potencjalnego kierunku przemieszczenia. Zależności te uzupełnione o inne obserwacje, które nie mają statusu jednoznacznych wskaźników kinematycznych, pozwalają również na oszacowanie ślizgu całkowitego.

Przeprowadzona przy użyciu przedstawionych metod analiza przemieszczenia wzdłuż uskoku Łysogórskiego wskazuje, że przemieszczenie to miało z dużym prawdopodobieństwem charakter prawoprzesuwczy z niewielką składową zrzutową. Całkowite przemieszczenie uskoku (D) dla sektora, dla którego określono wartość ślizgu upadowego, wynosi ok. 2,9 km. Jeśli założy się podobną wartość ślizgu wzdłuż całego uskoku, przemieszczenie całkowite wyniesie od 2,2 do 2,9 km (tab. 1 – wartości oznaczone gwiazdkami). Na wartość i rozkład przemieszczenia mogła mieć wpływ reaktywacja uskoku Łysogórskiego związana z przypuszczalnym prawoprzesuwczym ruchem wzdłuż uskoku świętokrzyskiego.

Wyjaśnienie dzisiejszego obrazu kartograficznego rejonu połączenia uskoku świętokrzyskiego z Łysogórskim pozostaje sprawą otwartą i wymaga dalszej analizy. Powyższy wywód może stanowić jedynie sugestię co do kierunku kolejnych badań strukturalnych w tym obszarze.

Podziękowania

Autorzy pragną gorąco podziękować Łukaszowi Gagale, Ewie Szykaruk, Markowi Jarosińskiemu i Anonimowemu Recenzentowi za szczegółową dyskusję i rzetelną recenzję wstępnej wersji pracy. Liczne sugestie i celne uwagi pozwoliły na znaczące ulepszenie artykułu i wyeliminowanie szeregu niejasności. Podziękowania kierujemy również do Wojtka Kozłowskiego za dyskusję dotyczącą osadów syluru w rejonie uskoku Łysogórskiego. Powyższa praca została sfinansowana ze środków BW1837/4 oraz BW1797/4.

Literatura

COWIE P.A. & SHIPTON Z.K. 1998 – Fault tip displacement gradients and process zone dimensions. *Journ. Struct. Geol.*, 20: 983–997.
 CZARNOCKI J. 1938 – Carte géologique générale de la Pologne, feuille 4, Kielce, Edition du Service Géologique de Pologne, scale 1 : 100 000.
 CZARNOCKI J. 1950 – Geologia regionu Łysogórskiego w związku z zagadnieniami złoża rud żelaza w Rudkach. *Pr. Inst. Geol.*, 6a: 15–400.
 CZARNOCKI J. 1956 – Surowce mineralne w Górach Świętokrzyskich. *Pr. Inst. Geol.*, 12: 9–108.
 CZARNOCKI J. 1957 – Tektonika Gór Świętokrzyskich. Geologia regionu Łysogórskiego. *Pr. Inst. Geol.*, 18: 11–138.
 CZARNOCKI J. 1961 – Materiały do przeglądowej mapy geologicznej Polski. Region Świętokrzyski. Arkusz Bodzentyn. Skala 1 : 100 000. Wyd. B zaktualizowane. Wyd. Geol.
 DADLEZ R. & JAROSZEWSKI W. 1994 – Tektonika. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa.
 FILONOWICZ P. 1966 – Mapa geologiczna Polski w skali 1 : 50 000, ark. Nowa Słupia. Wyd. Geol.
 FILONOWICZ P. 1970 – Mapa geologiczna Polski w skali 1 : 50 000, ark. Bodzentyn. Wyd. Geol.
 HIGGS W.G. & WILLIAMS G.D. 1987 – Displacement efficiency of faults and fractures. *Journ. Struct. Geol.*, 9: 371–374.
 JAROSZEWSKI W. 1973 – Analiza tektonicznych pól naprężeń jako kryterium poszukiwawcze. *Prz. Geol.*, 10: 523–528.
 JAROSZEWSKI W. 1980 – Tektonika uskoków i fałdów. Wyd. Geol., Warszawa.

KIM Y.S., ANDREWS J.R. & SANDERSON D.J. 2000 – Damage zones around strike-slip fault systems and strike-slip fault evolution, Crackington Haven, southwest England. *Geosci. Journ.*, 4: 53–72.
 KONON A. 2006 – Młodopaleozoiczna ewolucja strukturalna Gór Świętokrzyskich. Przewodnik LXXVII Zjazd Naukowego PTG, Ameliówka k. Kielce, 28–30.06.2006: 82–104.
 KONON A. 2007 – Strike-slip faulting in the Kielce Unit, Holy Cross Mountains, central Poland. *Acta Geol. Pol.*, 57: 415–441.
 KONON A. 2008 – Regionalizacja tektoniczna Polski – Góry Świętokrzyskie i regiony przyległe. *Prz. Geol.*, 56: 921–926.
 KONON A. & ŚMIGIELSKI M. 2006 – DEM-based structural mapping: examples from the Holy Cross Mountains and Outer Carpathians, Poland. *Acta Geol. Pol.*, 56: 1–16.
 KOZŁOWSKI W. 2008 – Lithostratigraphy and regional significance of the Nowa Słupia Group (Upper Silurian) of the Łysogóry Region (Holy Cross Mountains, Central Poland). *Acta Geol. Pol.*, 58: 43–74.
 LITTLE T.A. 1996 – Faulting-related displacement gradients and strain adjacent to the Awatere strike-slip fault in New Zealand. *Journ. Struct. Geol.*, 18: 321–340.
 McCLAY K.R. (red.) 1992 – Thrust Tectonics. Chapman & Hall, London.
 MAERTEN L., POLLARD D.D. & KARPUZ R. 2000 – How to constrain 3-D fault continuity and linkage using reflection seismic data: a geomechanical approach. *AAPG Bulletin*, 84: 1311–1324.
 MAERTEN L., WILLEMSE E.J.M., POLLARD D.D. & RAWNSLEY K. 1999 – Slip distributions on intersecting normal faults. *Journ. Struct. Geol.*, 21: 259–271.
 MASTELLA L. 1988 – Budowa i ewolucja strukturalna okna tektonicznego Mszany Dolnej, polskie Karpaty Zewnętrzne. *Rocz. Pol. Tow. Geol.*, 58: 53–173.
 MASTELLA L. & MIZERSKI W. 2002 – Znaczenie równoleżnikowych ruchów przesuwczych dla tektogeny paleozoiku świętokrzyskiego. *Prz. Geol.*, 50: 1213.
 MICHALSKI A. 1888 – Sprawozdanie przedwstępne z badań dokonanych w południowej części guberni radomskiej. *Pamiętnik Fizjograficzny*, 8: 37–45, Warszawa.
 MIZERSKI W. 1982 – O zrzutowym charakterze uskoku Łysogórskiego. *Biul. Geol., Wyd. Uniw. Warsz.*, 27: 193–201.
 PEACOCK D.C.P. 1991 – Displacements and segment linkage in strike-slip fault zones. *Journ. Struct. Geol.*, 13: 1025–1035.
 PEACOCK D.C.P. & SANDERSON D.J. 1991 – Displacements, segment linkage and relay ramps in normal fault zones. *Journ. Struct. Geol.*, 13: 721–733.
 PINIŃSKA J. 1994 – Procesy deformacji i pęknięcia cylindrycznych próbek skalnych – analiza porównawcza różnych litologicznie typów skał osadowych. *Pr. Nauk. Inst. Geotechniki i Hydrotechniki Politechn. Wrocław.*
 PRICE N. J. & COSGROVE J.W. 1990 – Analysis of Geological Structures. Cambridge University Press.
 RAMSAY J.G. & HUBER M.I. 1987 – The Techniques of Modern Structural Geology. T. 2 – Folds and Fractures. Academic Press.
 REGARD V., BELLIER O., THOMAS J.-C., BOURLÈS D., BONNET S., ABBASSI M.R., BRAUCHER R., MERCIER J., SHABANIAN E., SOLEYMANI S.H. & FEGHHI K.H. 2005 – Cumulative right-lateral fault slip rate across the Zagros–Makran transfer zone: role of the Minab–Zendan fault system in accommodating Arabia–Eurasia convergence in southeast Iran. *Geophys. Journ. Inter.*, 162: 177–203.
 RUBINKIEWICZ J. 2000 – Development of fault pattern in the Silesian Nappe: Eastern Outer Carpathians, Poland. *Geol. Quart.*, 44: 391–403.
 SZCZEPANIK Z. 2001 – Acritarch from Cambrian deposits of the southern part of the Łysogóry unit in the Holy Cross Mountains, Poland. *Geol. Quart.*, 45: 117–130.
 TWISS R.J. & MOORES E.M. 1992 – Structural Geology. Freeman, New York.
 WALSH J.J. & WATTERSON J. 1988 – Analysis of the relationship between the displacements and dimensions of faults. *Journ. Struct. Geol.*, 10: 239–247.
 WALSH J.J. & WATTERSON J. 1989 – Displacement gradients on fault surfaces. *Journ. Struct. Geol.*, 11: 307–316.
 WILLEMSE E.J.M., POLLARD D.D. & AYDIN A. 1996 – Three-dimensional analyses of slip distributions on normal fault arrays with consequences for fault scaling. *Journ. Struct. Geol.*, 18: 295–309.
 XU S., VELASQUILLO-MARTINEZ L.G., GRAJALES-NISHIMURA J.M., MURILLO-MUÑETÓN G. & NIETO-SAMANIEGO A.F. 2007 – Methods for quantitatively determining fault slip using fault separation. *Journ. Struct. Geol.*, 29: 1709–1720.

Praca wpłynęła do redakcji 4.06.2009 r.

Po recenzji akceptowano do druku 4.08.2010 r.

