

## AKTYWNOŚĆ USKOKÓW W DOLINIE RIO COLCA W REJONIE PINCHOLLO–MACA, ANDY ŚRODKOWE, POŁUDNIOWE PERU

**Fault activity in the Rio Colca Valley in the Pinchollo–Maca Area,  
Central Andes, Southern Peru**

**Jerzy ŻABA & Zbigniew MAŁOLEPSZY**

*Uniwersytet Śląski, Wydział Nauk o Ziemi, Katedra Geologii Podstawowej;*

*ul. Będzińska 60, 41-200 Sosnowiec;*

*e-mail: jzaba@interia.pl, malol@us.edu.pl*

**Treść:** Praca prezentuje wyniki badań strukturalnych sieci uskoków i spękań w utworach mezozoiku i czwartorzędu przeprowadzonych w Dolinie Rio Colca w okolicy Pinchollo–Lari–Maca (Andy Peruwiańskie). Z przeprowadzonych badań wynika, że Dolina Rio Colca ma założenia tektoniczne i wykorzystuje niemal wszystkie występujące na analizowanym terenie zespoły nieciągłości, ze szczególnym uwzględnieniem uskoków o przebiegu WNW-ESE, NE-SW oraz rzadziej – W-E. Większość stwierdzonych uskoków przemieszcza zarówno twory mezozoiczne i mioceńskie jak i czwartorzędowe, co świadczy o ich współczesnej aktywności. W pokrywających dużą część terenu czwartorzędowych koluwiach zaznaczają się kierunki niemal wszystkich uskoków stwierdzonych w utworach mezozoicznych. Współczesna aktywność uskoków spowodowała utworzenie się na powierzchni terenu wyraźnych pierwotnych skarp uskokowych, które nie uległy dotychczas procesom denudacyjnym.

**Słowa kluczowe:** analiza strukturalna, uskoki i spękania, współczesne deformacje tektoniczne, mezozoik, czwartorzęd, Dolina Rio Colca, Andy peruwiańskie

**Abstract:** Fault/fracture network within Mesozoic and Quaternary formations has been studied in Rio Colca Valley in Pinchollo – Lari – Maca area (Peruvian Andes). The results show structural framework of the Rio Colca Valley based on nearly all tectonic discontinuities observed in the area; mostly on WNW-ESE and NE-SW faults, and on few W-E faults. Displacements of Mesozoic, Miocene and Quaternary formations observed on nearly all faults in the study area provide evidence for recent tectonic activity. Most of the faults in the Mesozoic bedrock continue in Quaternary colluvial deposits. Recent faulting led to development of a system of distinct, primary scarps and land cracks on the surface, which have not been eroded yet.

**Key words:** structural analysis, faults and fractures, recent tectonic deformations, Mesozoic, Quaternary, Rio Colca Valley, Peruvian Andes

## WSTĘP

W pracy przedstawiono wstępne wyniki badań strukturalno-tektonicznych przeprowadzonych w Dolinie Rio Colca w ramach Wyprawy Naukowej Peru 2006. Wyprawa została zorganizowana – jako już czwarta z kolei – przez pracowników Wydziału Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH w Krakowie pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Andrzeja Paulo, we współpracy z Universidad Nacional San Augustin w Arequipie oraz Sociedad Geológica del Perú w Limie. Wyniki badań uzyskane podczas wcześniejszych wypraw do Peru zostały upowszechnione między innymi w pracach Paulo i Gałasia (2005), Gałasia i Paulo (2005) oraz Krzaka (2005). Głównym celem obecnej wyprawy były badania wulkanologiczne, tektoniczne, geomorfologiczne i geoturystyczne, ściśle powiązane z inicjatywą przygotowania dla tego obszaru dokumentacji projektowej przyszłego Parku Narodowego Kanion Colca. Kanion Colca, o długości 120 km i głębokości ponad 3000 m, przecina Kordylierę Zachodnią Andów w południowym Peru. Jest on powszechnie uważany za najgłębszy kanion świata.

W ramach badań strukturalno-tektonicznych realizowano temat dotyczący pozycji strukturalnej Kanionu Rio Colca. Przeprowadzone prace miały charakter rekonesansowy (były bowiem prowadzone po raz pierwszy); objęły Kanion Colca w rejonach Cabanaconde i Huambo–Canco oraz Dolinę Rio Colca (powyżej kanionu) na odcinku od Chivay do Pinchollo. Głównym celem tych badań było poznanie strukturalnych założeń rozwoju Kanionu Colca, a także określenie relacji pomiędzy budową i aktywnością tektoniczną tego obszaru, a procesami wulkanicznymi i wynikającymi z nich zagrożeniami środowiska (erupcje wulkanów, przemieszczenia i deformacje gruntu związane z aktywnością uskoków, trzęsienia ziemi, osuwiska, lawiny błotne itp.; por. m.in. Sébrier *et al.* 1985, Dorbath *et al.* 1991, Sébrier & Soler 1991, Huamán *et al.* 1993).

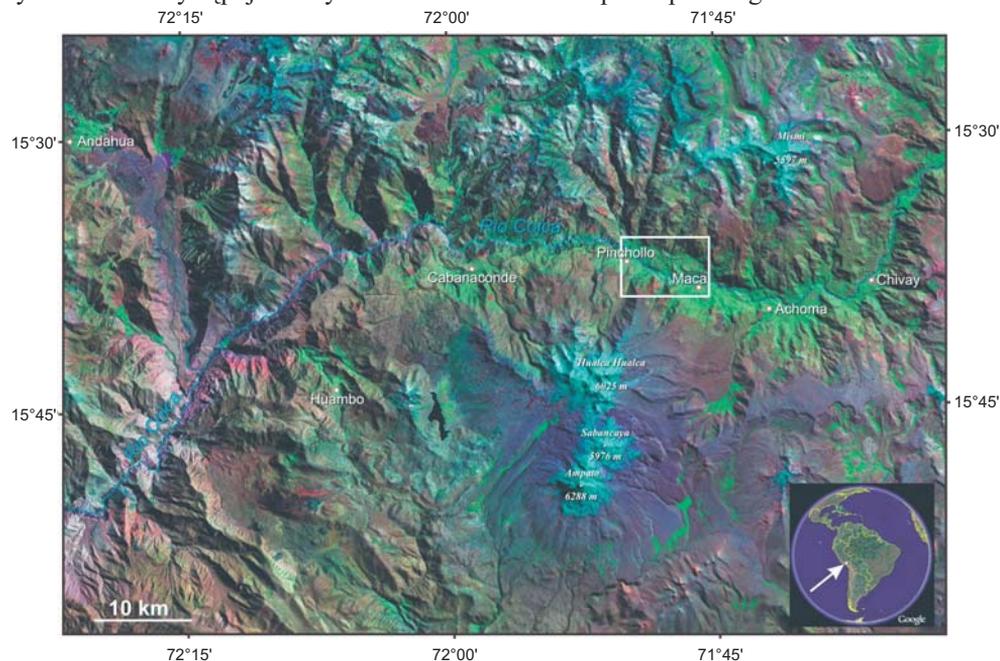
W pracy zaprezentowano wstępne wyniki badań stanowiących próbę określenia przebiegu, charakteru i następstwa różnowiekowych uskoków w rejonie Doliny Rio Colca, w okolicach miejscowości Maca, Lari, Pinchollo i Madrigal. Na tym obszarze w obrębie czwartorzędowych osadów koluwalnych zaznaczają się też przejawy współczesnego uskokuwania. Są one reprezentowane przez liczne zespoły synchronicznie bądź wielofazowo kształtujących się uskoków (przeważnie normalnych), tworzących częstokroć wyraźne skarpy i rowy tektoniczne doskonale widoczne w morfologii terenu. Formy te powstały tam między innymi wskutek trzęsień ziemi, które niedawno nawiedziły te okolice (w latach 1991, 1992 i 1998). W lipcu 1991 roku wystąpiło trzęsienie ziemi o sile 5,6 stopni w skali Richtera, które zniszczyło miejscowość Maca. Wstrząsy te miały ścisły związek z aktywnością pobliskiego (położonego na południe od omawianego terenu) wulkanu Sabancaya (patrz m.in. Guillande i Salas 1995, Bulmer *et al.* 1999, Antayhua *et al.* 2001, 2002). Stworzyło to niepowtarzalną okazję do porównania różnych cech tych nowoutworzonych uskoków z uskokami występującymi w starszym, mezozoicznym podłożu.

Należy zaznaczyć, iż bezpośrednie terenowe badania strukturalne na omawianym obszarze nigdy wcześniej nie były prowadzone.

## OBSZAR BADAŃ

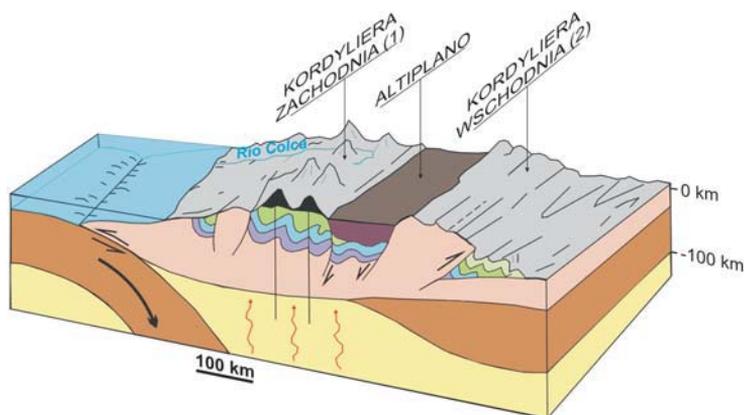
Prace terenowe przeprowadzono w środkowym odcinku rzeki Rio Colca w rejonie miejscowości Pinchollo–Maca (Fig. 1). W skali regionalnej obszar badań znajduje się w Kordylierze Zachodniej w Andach Środkowych (Fig. 2). Administracyjnie przynależy on do prowincji

Arequipa (Garayar 2004). Badany teren leży pomiędzy masywami wulkanów Mismi (5597 m n.p.m.) na północy i Hualca Hualca (6025 m n.p.m.) na południu. Dno Doliny Rio Colca na tym obszarze występuje na wysokości 3100–3220 m n.p.m. i przebiega ESE-WNW.



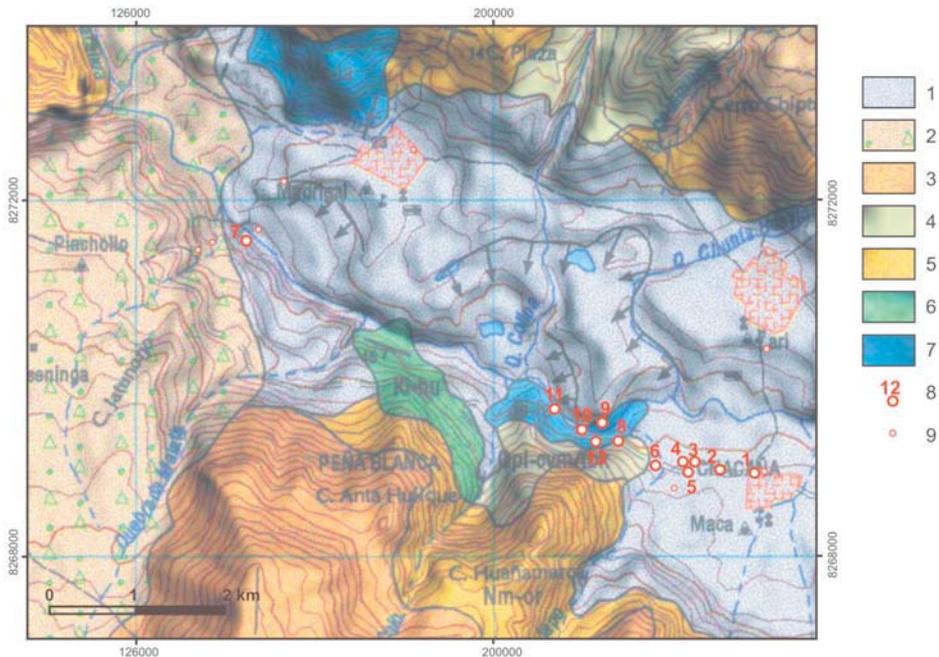
**Fig. 1.** Mapa lokalizacji obszaru badań w Dolinie Rio Colca, Andy Środkowe, południowe Peru (Landsat 7)

**Fig. 1.** Location map of study area in Rio Colca Valley, Central Andes, Southern Peru (Landsat 7)



**Fig. 2.** Szkic budowy geologicznej Andów Środkowych w strefie subdukcji, południowe Peru (wg Mattauer 1989, zmienione). 1 – Zachodnia Kordyljera, 2 – Wschodnia Kordyljera

**Fig. 2.** Geological sketch of subduction zone in the Central Andes, Southern Peru (after Mattauer 1989, modified). 1 – Western Cordillera, 2 – Eastern Cordillera



**Fig. 3.** Mapa geologiczna obszaru badań (wg Klinck & Palacios 1985, zmienione). 1 – osady aluwialne i koluwialne (czwartorzęd – holocen), 2 – koluwia (czwartorzęd), 3 – lawy andezytowe (czwartorzęd–plejstocen), 4 – tufy (neogen), 5 – tufy z brekcjami (neogen – miocen), 6 – piaskowce kwarcowe (kreda dolna), 7 – piaskowce kwarcowe z przeławieniami łupków mułowcowych (jura górna), 8 – główne punkty obserwacyjne – domeny, 9 – pozostałe punkty obserwacyjne; odwzorowanie mapy: UTM strefa-19, półkula południowa

**Fig. 3.** Geologic map of the study area (after Klinck & Palacios 1985, modified). 1 – alluvial and colluvial deposit (Quaternary – Holocene), 2 – colluvial deposit (Quaternary), 3 – andesitic lava (Quaternary – Pleistocene), 4 – tuff (Neogene), 5 – tuff with breccias (Neogene – Miocene), 6 – quartzitic sandstone (Lower Cretaceous), 7 – quartzitic sandstone intercalated by mudstone shale (Upper Jurassic), 8 – locations of major observation spots, 9 – minor observation spots; map projection UTM zone-19, Southern Hemisphere

Utwory koluwialne pokrywają większą część obszaru zazębiając się facjalnie z aluwiami w dnie doliny (Fig. 3). Podstawowym materiałem zalegającym na stokach i w dnie doliny są okruchy skał wulkanicznych powstałych w neogenie w wyniku działalności okolicznych wulkanów.

W nielicznych miejscach w korycie rzeki i na południowych stokach doliny odsłaniają się skały podłoża mezozoicznego (Fig. 4) wykształcone jako żelaziste piaskowce kwarcowe z przeławieniami czarnych łupków mułowcowych obfitujących w detrytus roślinny. Wiek tych skał określa się na późną jurę i wczesną kredę (Klinck & Palacios 1985). W centralnej części obszaru badań odsłania się kontakt skał mezozoicznych z nadległymi neogeńskimi białymi tufami (Fig. 5) o miąższości dochodzącej do 200 m (obserwowana w odsłonięciu).



**Fig. 4.** Dolina Rio Colca w rejonie Maca–Lari, widok w kierunku zachodnim. W dnie doliny odsłaniają się utwory jurajskie reprezentowane przez piaskowce kwarcowe i kwarcyty

**Fig. 4.** Rio Colca Valley in Maca–Lari area, view to the West. Jurassic quartzitic sandstone outcrops in the bottom of the valley



**Fig. 5.** Kontakt neogeńskich tufów z jurajskimi piaskowcami kwarcytowymi i łupkami mułowcowymi poniżej tunelu drogowego w Maca

**Fig. 5.** Contact of Neogene tuff with Jurassic quartzitic sandstone and siltstone shales at road tunnel in Maca

## METODYKA I ZAKRES BADAŃ

Prace terenowe, których wyniki omówiono w niniejszym artykule, przeprowadzono w obrębie dwunastu domen badawczych zlokalizowanych w większości przy pomocy GPS. Badaniami objęto: czwartorzędowe osady koluwalne, mioceńskie wulkanoklastyki reprezentowane przeważnie przez tufy oraz mezozoiczne utwory klastyczne reprezentowane głównie przez górnourajskie, a lokalnie kredowe piaskowce kwarcowe, kwarcyty oraz łożupki i łupki mułowcowe. W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań przeprowadzonych jedynie w obrębie utworów czwartorzędowych i mezozoicznych.

Czwartorzędowe osady koluwalne tworzą rozległe pokrywy o miąższości dochodzącej zazwyczaj do kilkudziesięciu metrów, a lokalnie przekraczającej nawet 100 m. Szczególnie duży obszar zajmują one we wschodniej części analizowanego terenu w okolicach miejscowości Maca. W ich obrębie zlokalizowano sześć domen badawczych. Natomiast utwory mezozoiczne tworzą liczne odsłonięcia w zachodniej części omawianego obszaru. Szczegółowe badania przeprowadzono tam w sześciu domenach zlokalizowanych zazwyczaj na stokach Doliny Rio Colca, a także w jej dnie na wysokościach wahających się przeważnie w granicach 3000–3400 m n.p.m.

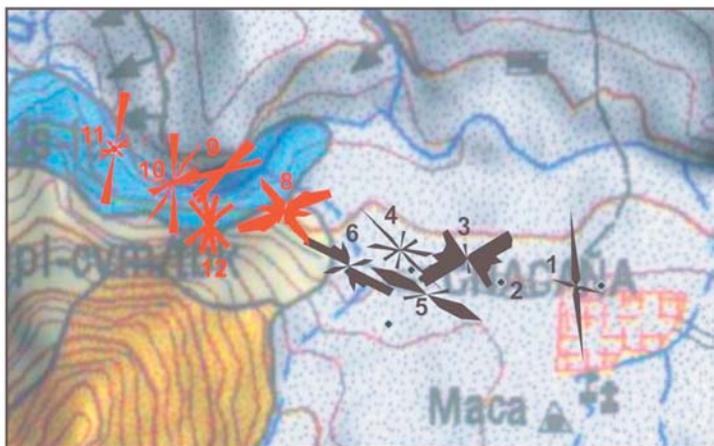
W obrębie wytypowanych domen badawczych przeprowadzono inwentaryzację występujących tam form tektonicznych, reprezentowanych głównie przez uskoki (wraz z towarzyszącymi im tektoglifymi), spękania (wraz z towarzyszącymi im strukturami spękaniaowymi) oraz fałdy (przeważnie reprezentowane przez tektonicznie zaburzone powierzchnie warstw w utworach mezozoicznych). Podstawę badań stanowiła szczegółowa analiza strukturalna wcześniej wyróżnionych form tektonicznych, prowadzona według ogólnie przyjętych zasad (m.in. Turner & Weiss 1963, Ramsay 1967, Whitten 1969, Hobbs 1971, Teisseyre 1971, Jarszewski 1972, 1976, Ragan 1973, Vialon *et al.* 1976, Ramsay & Huber 1983, 1987, Nicolas 1987, Marshak & Mitra 1988, Price & Cosgrove 1988, Groshong 1999, Żaba 1999, Ramsay & Lisle 2000).

Stwierdzone formy poddano szczegółowej analizie strukturalnej w celu określenia ich cech: geometrycznych (analiza geometryczna), czyli morfologii, przestrzennej orientacji i wzajemnych relacji wiekowych (superpozycja); kinematycznych (analiza kinematyczna), czyli kierunków i zwrotu względnych przemieszczeń oraz charakteru odkształceń (kierunki skracania i poszerzania); dynamicznych (analiza dynamiczna), czyli kierunków nacisków tektonicznych oraz układów pól naprężeń. W niniejszej pracy, prezentującej tylko wstępne wyniki badań, nie przedstawiono efektów analizy dynamicznej i częściowo też kinematycznej (w zakresie analizy odkształceń). W ramach prac terenowych wykonano ponad 1000 fotografii oraz około 100 szkiców dokumentacyjnych.

Przeprowadzone badania w dużej mierze opierały się na analizie orientacji różnych drobnych form deformacyjnych. Pomiarów orientacji struktur dokonywano dwuosiowym kompasem geologicznym (Freiberg), a uzyskane dane zestawiono w formie wykresów i diagramów, głównie statystycznych. Aby ułatwić porównanie przebiegu różnych uskoków i spękań ciosowych najczęściej stosowano diagramy rozetowe („róże spękań i uskoków”) prezentujące linie biegu tych struktur. Powierzchnie warstw w utworach mezozoicznych oraz część uskoków przedstawiono też na diagramach strukturalnych w projekcji równopowierzchniowej Lamberta–Schmidta (na górnej półkuli). Analiza superpozycji struktur pozwoliła w kilku przypadkach na określenie względnego następstwa (sekwencji) uskoków, a tym samym na wydzielenie etapów ich ewolucji.

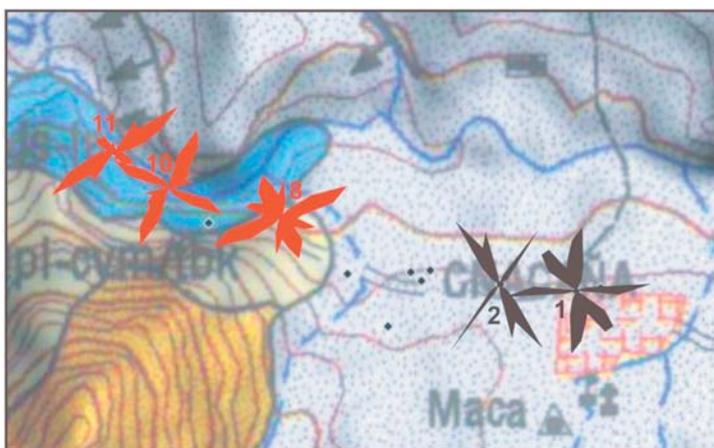
## USKOKI W OSADACH CZWARTORZĘDOWYCH

Szczegółową analizę strukturalną uskoków i towarzyszących im spękań ciosowych, występujących w czwartorzędowych koluwiach, przeprowadzono w sześciu domenach badawczych (zaznaczonych na mapach jako punkty) zlokalizowanych we wschodniej części analizowanego obszaru, w okolicach miejscowości Maca (Fig. 6, 7).



**Fig. 6.** Lateralna zmienność przebiegu uskoków w koluwiach czwartorzędowych (diagramy czarne) oraz w utworach górnourajskich (diagramy czerwone) w rejonie Maca–Lari; liczby oznaczają numery domen

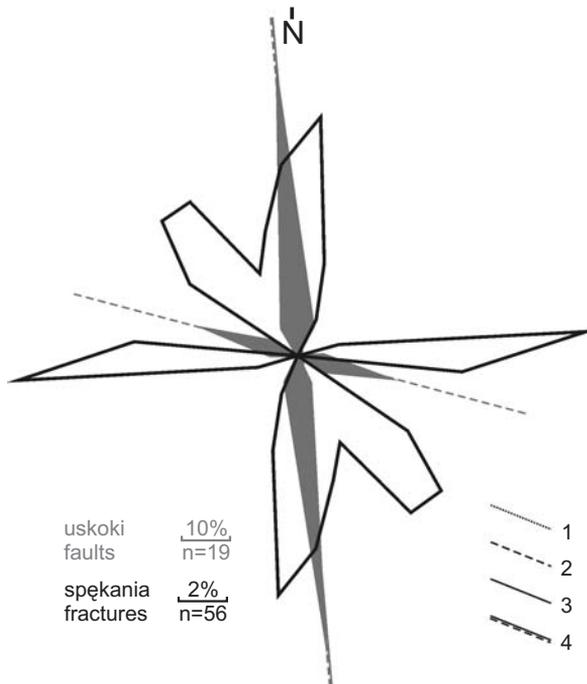
**Fig. 6.** Lateral variability of fault orientation in Quaternary colluvial deposits (black) and Upper Jurassic formation (red) in Maca – Lari area; locations numbered



**Fig. 7.** Lateralna zmienność kierunków spękań ciosowych w koluwiach czwartorzędowych (diagramy czarne) oraz w utworach górnourajskich (diagramy czerwone) w rejonie Maca – Lari; liczby oznaczają numery domen

**Fig. 7.** Lateral variability of joint orientation in Quaternary colluvial deposits (black) and Upper Jurassic formation (red) in Maca – Lari area; locations numbered

W **domenie 1** (Fig. 8) zdecydowana większość uskoków (o koncentracji pomiarów powyżej 50%) wykazuje przebieg zbliżony do południkowego (N05°W). Są to – bez wyjątku – strome uskoki normalne tworzące wyraźne, pierwotne skarpy uskokowe doskonale zaznaczające się w morfologii. Zgodnie z tym kierunkiem wyjątkowo często przebiegają osie – również zaznaczających się w morfologii – rowów tektonicznych (Fig. 9). Skośnie do powyższego kierunku (N75°W) przebiegają mniej liczne (ok. 17%) uskoki normalne, również zaznaczające się w morfologii w formie wyraźnych krawędzi terenowych. Z analizy wzajemnej superpozycji powyższych uskoków wynika, iż tworzenie się tych ostatnich poprzedzało w czasie rozwieranie się subpołudnikowych rowów tektonicznych, które kształtowały się najprawdopodobniej w warunkach lewoskrętnej transtensji (Fig. 9). Procesom tym towarzyszył rozwój przesuwczych dupleksów ekstensyjnych oraz niskokątowych, lewoskrętnych ściąg Riedla o orientacji NW-SE (N40°W). Orientacja tych ściąg, inicjujących w wielu miejscach rozwój ekstensyjnych dupleksów, znajduje doskonałe odbicie w statystycznym obrazie kierunków spękań na tym obszarze (Fig. 8). Struktury te tworzą wyraźne maksimum koncentracji pomiarów o wartości 11%. Orientacja pozostałych kierunków spękań wskazuje, iż bądź naśladują one przebieg subpołudnikowych rowów tektonicznych (Az. 0°, koncentracja pomiarów 14%), bądź są względem tych rowów prostopadłe (N90°W, 16%). Oba powyższe zespoły spękań tworzą wspólnie cios ortogonalny.

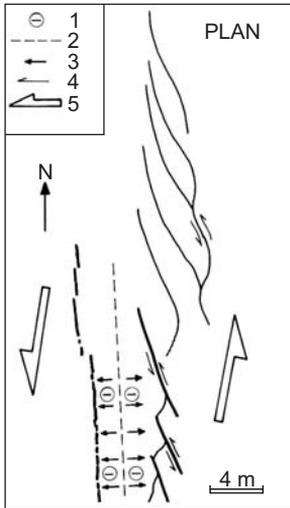


**Fig. 8.** Przebieg uskoków i spękań w czwartorzędowych koluwiach w rejonie Maca (domena 1).

1 – uskok zrzutowy, 2 – uskok zrzutowo-przesuwczy, 3 – uskok przesuwczy, 4 – rów tektoniczny

**Fig. 8.** Directions of faults and fractures in Quaternary colluvial deposit in Maca area (location 1).

1 – dip-slip fault, 2 – oblique-slip fault, 3 – strike-slip fault, 4 – graben



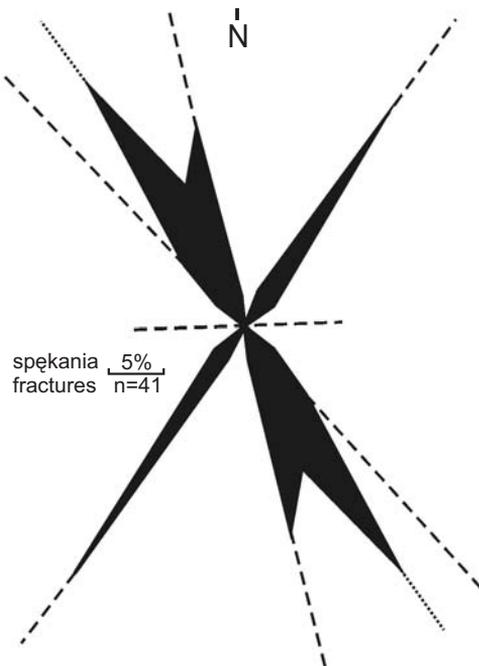
**Fig. 9.** Rozwój współczesnych rowów tektonicznych (w warunkach lewoskrętnej transtensji) w czwartorzędowych koluwiach w rejonie Maca (domena 1). 1 – obniżenie terenu w strefie rowu, 2 – oś rowu, 3 – kierunek poszerzania rowu, 4 – zwrot względnych przemieszczeń zgodny z niskokątowymi ścięciami Riedla (R) tworzącymi miejscami ekstensyjne dupleksy, 5 – kierunek oraz zwrot transtensji

**Fig. 9.** Development of recent grabens (sinistral transtension regime) in Quaternary colluvial deposits in Maca area (location 1). 1 – land surface depression in the graben area, 2 – graben axis, 3 – spreading direction of the graben, 4 – sense of relative displacement conformable with low-angle Riedel shears (R), locally creating extensional duplexes, 5 – direction and sense of transtension

Analizę struktur nieciągłych w **domenie 2** przeprowadzono w oparciu tylko o ścięcia, które tam dominują. Stwierdzone nieciągłości mają charakter stromo nachylonych ścięć rozwijających się w warunkach subhoryzontalnej ekstensji. Większość tych ścięć tworzy systemy złożone z dwu komplementarnych zespołów mezouskoków o charakterze normalno-zrzutowym, o czym świadczy asymetria zarówno tektoglifów, jak też sigmoidalnych, ekstensyjnych szczelin.

Zespoły te przecinają się pod kątem ostrym, przy czym dwusieczna kąta ostrego zawsze wykazuje subwertykalne ustawienie. Wskazuje to, iż omawiane ścięcia rozwijały się w reżimie ekstensyjnym (normalnym).

Róża spēkań z tego obszaru (Fig. 10) wykazuje trzy podstawowe kierunki o azymutach: N35°W, N15°W i N35°E oraz jeden znacznie słabiej reprezentowany N85°E.

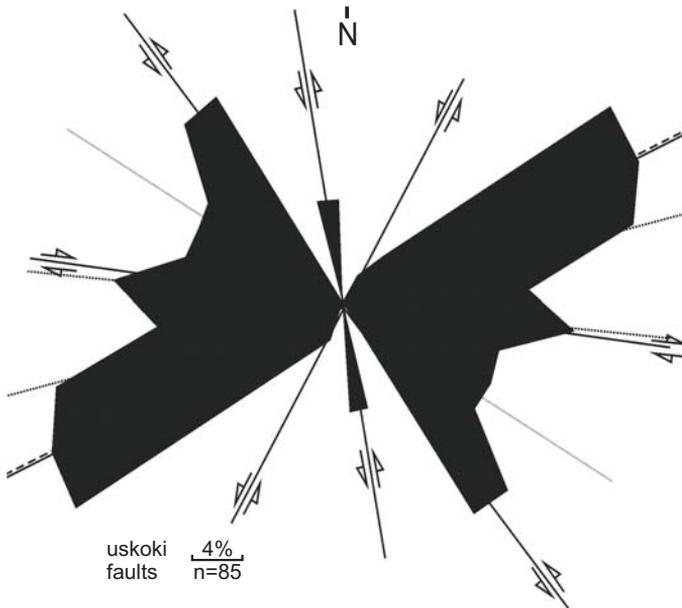


**Fig. 10.** Orientacja spēkań w czwartorzędowych koluwiach w rejonie Maca (domena 2)

**Fig. 10.** Orientation of fractures in Quaternary colluvial deposits in Maca area (location 2)

Cechy spękań wchodzących w skład wszystkich zespołów wskazują, iż tworzyły się one w warunkach ekstensyjnych. Zgodnie z nieciągłościami o azymucie  $N35^{\circ}W$  w morfologii tego obszaru zaznaczają się doskonale widoczne, pierwotne skarpy uskokowe.

W **domenie 3** stwierdzono skomplikowaną, wielofazowo tworzącą się sieć stromych lub wręcz pionowych uskoków, z których wiele zaznacza się w morfologii wyjątkowo okazałymi krawędziami terenowymi o wysokości dochodzącej nawet do kilku metrów. Krawędzie te wykazują najczęściej przebieg NE-SW ( $N65^{\circ}E$ , por. Fig. 11). Związane są one z aktywnością uskoków normalnych (ich skrzydła są zrzucone ku NW), często tworzących w morfologii terenu wielostopniowe struktury schodowe. Zgodnie z tym kierunkiem powszechnie rozwijają się też rowy tektoniczne (również doskonale widoczne w morfologii terenu). Równowierne z powyższymi rowy tektoniczne, podkreślone krawędziami terenowymi, są również zorientowane WNW-ESE ( $N60^{\circ}W$ ). Omawiane struktury należą w tym rejonie do najstarszych, gdyż są przecinane i przemieszczane przez kilka generacji młodszych uskoków występujących również we wzajemnej superpozycji. Uskoki drugiej generacji w domenie 3 charakteryzują się przebiegiem niemalże równoleżnikowym ( $N85^{\circ}W$ , Fig. 11). Są to uskoki prawoprzesuwowe, którym w morfologii terenu również towarzyszą pierwotne skarpy uskokowe. Uskoki trzeciej generacji, o przebiegu NW-SE ( $N40^{\circ}W$ ), wykazują charakter lewo-przesuwowy; gdzieś tam przemieszczają one wcześniej powstałe skarpy uskokowe. Do najmłodszych należą, rzadziej spotykane, lewo-przesuwowe uskoki generacji czwartej wyraźnie przemieszczające wszystkie wcześniej powstałe struktury. Odznaczają się one orientacją NNE-SSW ( $N30^{\circ}E$ ). Prawdopodobnie synchronicznie z nimi tworzyły się też uskoki o przebiegu NNW-SSE ( $N10^{\circ}W$ ), również lewo-przesuwowe.

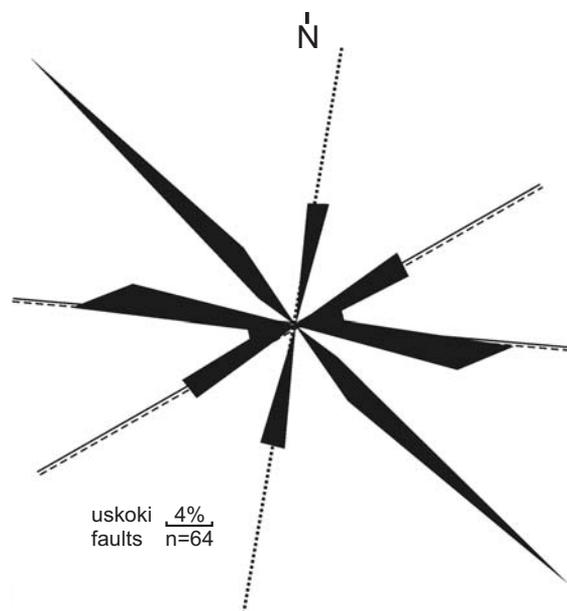


**Fig. 11.** Przebieg uskoków w czwartorzędowych koluwiach w rejonie Maca (domena 3)

**Fig. 11.** Orientation of faults in Quaternary colluvial deposits in Maca area (location 3)

Sieć uskoków w **domenie 4** wykazuje wiele podobieństw do sieci poprzedniej (Fig. 12). Uskoki tworzą tu cztery wyraźne zespoły o azymutach kolejno: N10°E, N60°E, N85°W

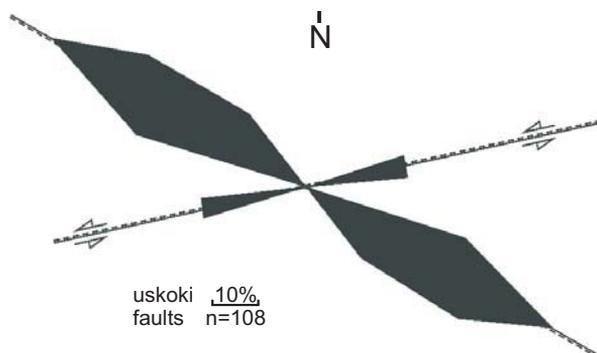
i N45°W. Pierwszy z nich należy do najstarszych na omawianym obszarze (kierunek ten nie był reprezentowany na obszarze poprzednim; por. Fig. 11), gdyż jest przecinany i przemieszczany przez wszystkie pozostałe uskoki, które wykazują – bez wyjątku – charakter normalny. Zgodnie z nimi powszechnie rozwinęły się (synchronicznie?) rowy tektoniczne, doskonale zaznaczające się w morfologii terenu.



**Fig. 12.** Przebieg uskoków w czwartorzędowych koluwiach w rejonie Maca (domena 4)

**Fig. 12.** Orientation of faults in Quaternary colluvial deposits in Maca area (location 4)

W **domenie 5** uskoki tworzą wyjątkowo czytelny obraz (Fig. 13). Zaznaczają się tam dwa przecinające się pod kątem ostrym zespoły normalnych uskoków (Fig. 14), z których jeden (młodszy zespół o przebiegu WSW-ESE, N80°E) przecina i nakłada się na drugi (starszy zespół o orientacji WNW-ESE, N65°W). Zgodnie z tymi kierunkami doszło do rozwoju, doskonale zaznaczających się w morfologii terenu, rowów tektonicznych (Fig. 15). Rowy starszej generacji są tu spotykane trzy razy częściej niż młodsze (Fig. 13), odznaczające się przemieszczeniami o niewielkim udziale składowej lewoprzesuwowej.



**Fig. 13.** Przebieg uskoków w czwartorzędowych koluwiach w rejonie Maca (domena 5)

**Fig. 13.** Orientation of faults in Quaternary colluvial deposits in Maca area (location 5)



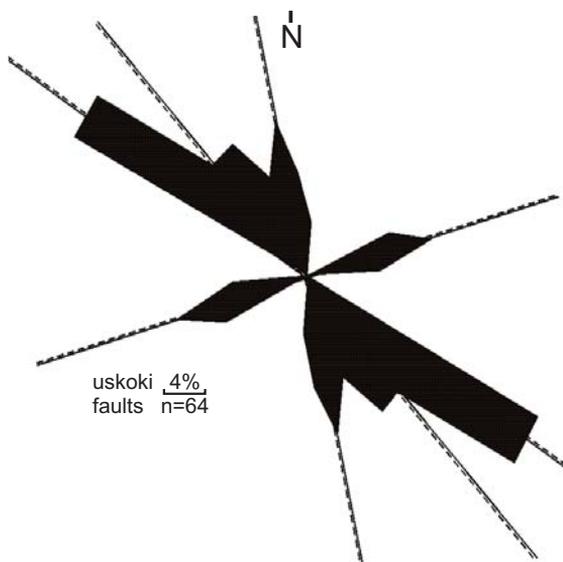
**Fig. 14.** Dwa różnowiekowe zespoły uskoków normalnych przecinające się pod kątem ostrym, w czwartorzędowych koluwiach w Maca (domena 5)

**Fig. 14.** Two normal fault sets of different age, intersecting each other at acute angle in Quaternary colluvial deposits in Maca area (location 5)



**Fig. 15.** Rów tektoniczny rozwinięty w czwartorzędowych koluwiach w Maca (domena 5)

**Fig. 15.** Graben in Quaternary colluvial deposits in Maca area (location 5)



**Fig. 16.** Przebieg uskoków w czwartorzędowych koluwiach w rejonie Maca (domena 6)

**Fig. 16.** Orientation of faults in Quaternary colluvial deposits in Maca area (location 6)

Sieć uskoków w **domenie 6** (Fig. 16) wykazuje uderzające podobieństwo do obrazu otrzymanego w domenie 5. Również i tu zaznaczają się dwa różnowiekowe zespoły uskoków normalnych podkreślonych przez wyraźne skarpy uskokowe (Fig. 17), tworzące często rowy (Fig. 18). Starszy zespół jest zorientowany WNW-ESE ( $N60^\circ W$ ), natomiast młodszy – WSW-ESE ( $N75^\circ E$ ). Do struktur młodszych, rozwijających się synchronicznie z poprzednimi, należą też – rzadziej spotykane – rowy o przebiegu NNW-SSE ( $N15^\circ W$ ) oraz NW-SE ( $N45^\circ W$ ). Również i one zaznaczają się bardzo wyraźnie w morfologii terenu w postaci pierwotnych skarpy uskokowych.



**Fig. 17.** Skarpy uskokowe wykształcone w czwartorzędowych koluwiach w Maca (domena 6)

**Fig. 17.** Fault scarps developed in Quaternary colluvial deposit in Maca area (location 6)



**Fig. 18.** Rowy tektoniczne i skarpy uskokowe zaznaczające się w osadach czwartorzędowych w rejonie Maca (domena 6)

**Fig. 18.** Grabens and fault scarps observed in Quaternary deposits in Maca area (location 6)

## USKOKI W UTWORACH MEZOZOICZNYCH

Szczegółową analizę strukturalną uskoków i współwystępujących z nimi spękań ciosowych, występujących w utworach mezozoicznych, przeprowadzono w sześciu domenach badawczych (zaznaczonych na mapach jako punkty), zlokalizowanych w zachodniej części analizowanego terenu (Fig. 6, 7), w okolicach miejscowości Pinchollo (domena 7), Maca (domeny 8, 10, 12) i Lari (domeny 9, 11). Badania przeprowadzono w obrębie utworów kredy (domena 7) oraz górnej jury (domeny 8–12).

Utwory mezozoiczne uległy na badanym terenie słabym deformacjom fałdowym (Fig. 19). Są one pochylone połogo w różnych kierunkach (Fig. 20), jednak najczęściej (ponad 20% pomiarów) zapadają ku NNW pod kątem około  $30^\circ$  (maksimum: 160/30).

Punkty projekcyjne warstwowania tworzą na diagramie wyraźny pas świadczący o występowaniu na tym obszarze makrostruktury fałdowej (Fig. 20). Z interpretacji diagramu wynika, że oś tego makrofałdu odznacza się niemal równoleżnikowym przebiegiem; jest ona nachylona ku wschodowi pod kątem około  $10^\circ$  (95/10).

W utworach mezozoicznych zaznacza się skomplikowana, tworząca się wielofazowo sieć uskoków o bardzo różnym przebiegu i cechach kinematycznych (Fig. 21).

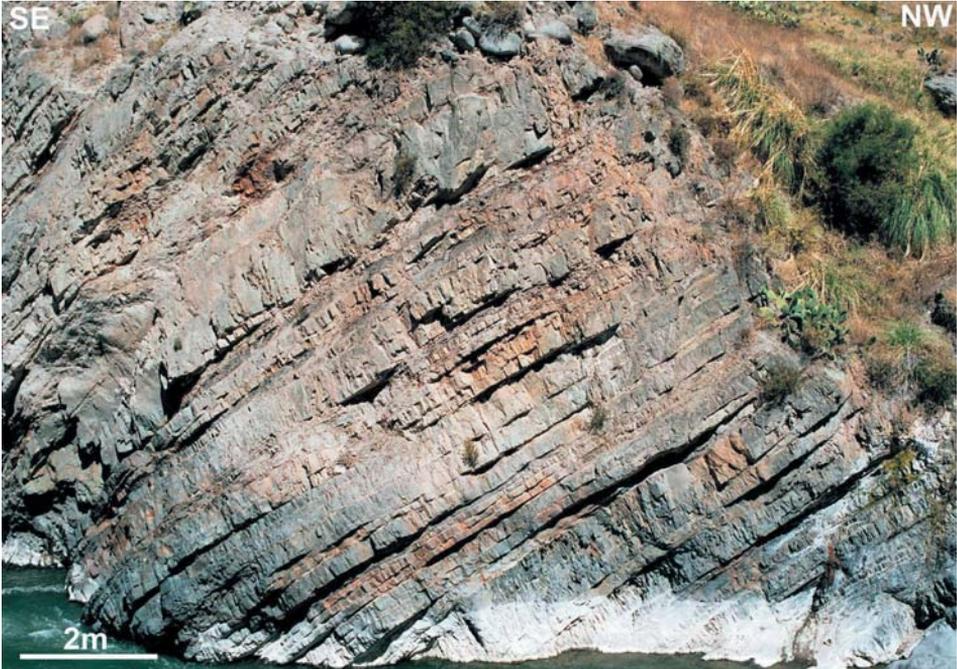


Fig. 19. Utwory kredowe w Dolinie Rio Colca w Pinchollo (domena 7)

Fig. 19. Cretaceous beds in Rio Colca Valley in Pinchollo area (location 7)

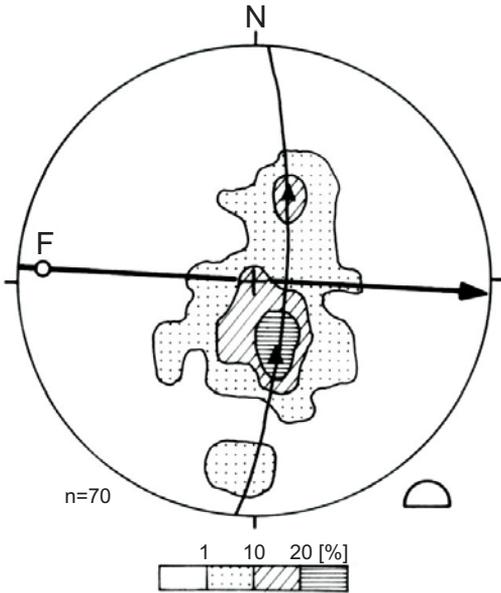
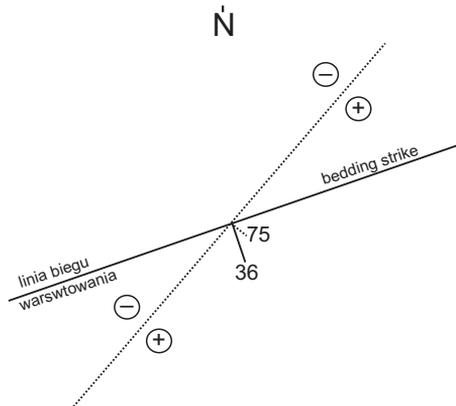
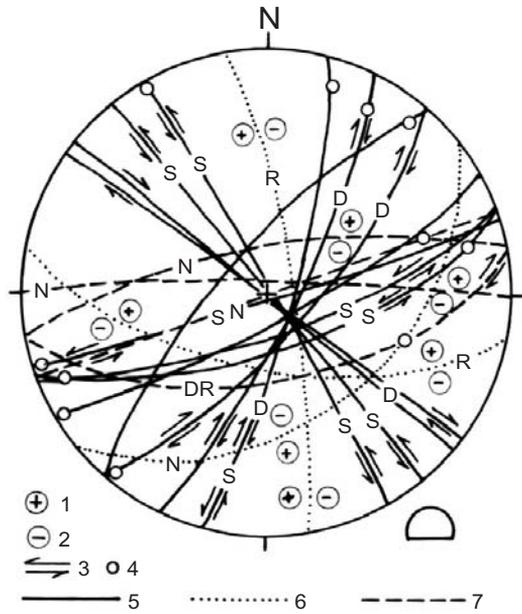


Fig. 20. Diagram strukturalny powierzchni uławicenia w utworach mezozoiku w rejonie Pinchollo – Lari – Maca. Łuk – pas foliacji, F – oś makrofałdu, strzałka – przebieg osi makrofałdu oraz kierunku jej nachylenia

Fig. 20. Stereogram of bedding within Mesozoic formations in the Pinchollo – Lari – Maca area. Arc – bedding belt, F – axis of macrofault, arrow – direction of macrofault axis and plunge azimuth of macrofault axis

**Fig. 21.** Sieć uskoków wraz z ich cechami kinematycznymi stwierdzona w utworach mezozoicznych w rejonie Maca – Lari. 1 – przemieszczenia skierowane ku górze, 2 – przemieszczenia skierowane ku dołowi, 3 – kierunek oraz zwrot względnych przemieszczeń, 4 – orientacja rys tektonicznych, 5 – uskoki normalne, 6 – uskoki zrzutowe, 7 – uskoki zrzutowo-przesuwcze; charakter składowej przemieszczeń uskokowych: N – normalno-zrzutowa, R – inwersyjno-zrzutowa (odwrócona), S – lewoprzesuwcza, D – prawoprzesuwcza

**Fig. 21.** Fault network and kinematic features of faults observed in Mesozoic formation in Maca – Lari area. 1 – upward displacements, 2 – downward displacements, 3 – direction and sense of relative displacements, 4 – tectonic striae orientation, 5 – normal faults, 6 – dip-slip faults, 7 – oblique-slip faults; style of fault displacements: N – normal, R – reverse, S – sinistral, D – dextral



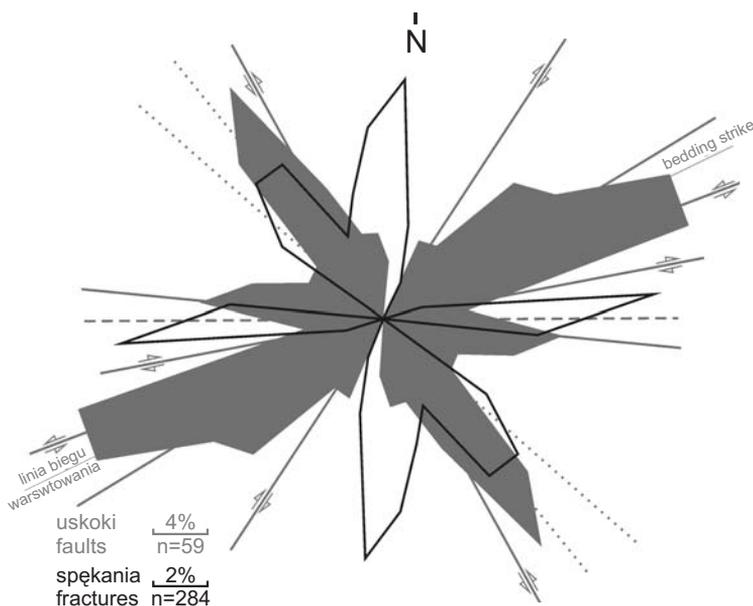
**Fig. 22.** Przebieg oraz cechy kinematyczne uskoków zrzutowych (progowych i odwroconych) stwierdzonych na dnie Doliny Rio Colca w rejonie Pinchollo (domena 7)

**Fig. 22.** Directions and kinematic features of dip-slip faults (normal and reverse) observed in bottom of the Rio Colca Valley in Pinchollo area (location 7)

W **domenie 7** (Pinchollo) położonej na dnie Doliny Rio Colca stwierdzono na południowym jej zboczu zespół schodowych uskoków zrzutowych o przebiegu NE-SW (ok.  $N40^{\circ}E$ ; Fig. 22). Są to uskoki zrzutowe, progowe lub – stromo nachylone – inwersyjno-zrzutowe. W kierunku wschodnim stopniowo przemieszczają one utwory mezozoiczne ku górze.

W **domenie 8** usytuowanej w okolicach wschodniego otworu tunelu drogowego w Maca stwierdzono trzy, wyraźnie zaznaczające się zespoły uskoków (Fig. 23). Najliczniej reprezentowane uskoki o przebiegu ENE-WSW ( $N60^{\circ}-70^{\circ}E$ ) wykazują charakter przesuwczy. Względ-

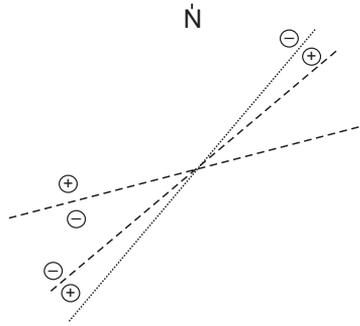
dem struktur fałdowych są one podłużne. Zgodnie z powyższym kierunkiem stwierdzono uskoki przesuwcze dwóch generacji: młodsze z nich odznaczają się lewoskrętnym zwrotem ścinania, natomiast zwrot starszych przemieszczeń przesuwczych nie został określony. Na obszarze domeny 8 bardzo licznie pojawiają się także uskoki normalne o przebiegu NW-SE ( $N40^{\circ}-50^{\circ}W$ ). Przemieszczają one zarówno utwory górnourajskie, jak i mioceńskie reprezentowane przez tufy wulkaniczne. Ich skrzydła zostały podniesione ku NE. Zgodnie z powyższym kierunkiem lokalnie stwierdzono także przemieszczenia o charakterze lewoprzesuwczym. Mniej liczne uskoki normalno-lewoprzesuwcze (starsze) oraz inwersyjno-przesuwcze (młodsze) odznaczają się na omawianym obszarze równoleżnikowym przebiegiem ( $N85^{\circ}W$ ). Inne uskoki są spotykane znacznie rzadziej; mają one charakter lewo- lub prawoprzesuwczy (uskoki NE-SW;  $N30^{\circ}-40^{\circ}E$ ) oraz inwersyjno-przesuwczy (ENE-WSW,  $N80^{\circ}E$ ). Diagram spękań z tego obszaru (Fig. 23) w miarę wiernie naśladuje kierunki przebiegu uskoków. Wyraźnie zaznaczają się na nim spękania podłużne o orientacji ENE-WSW ( $N65^{\circ}E$ ) oraz poprzeczne – NNW-SSE ( $N25^{\circ}W$ ), tworzące system ciosu ortogonalnego. Na uwagę zasługuje zespół ciosu o przebiegu południkowym ( $N05^{\circ}E$ ), nie mający odpowiednika wśród uskoków.



**Fig. 23.** Kierunki uskoków i spękań w utworach górnourajskich w rejonie tunelu drogowego Maca (domena 8)

**Fig. 23.** Orientation of faults and joints in the Upper Jurassic beds in Maca area next to road tunnel outlet (location 8)

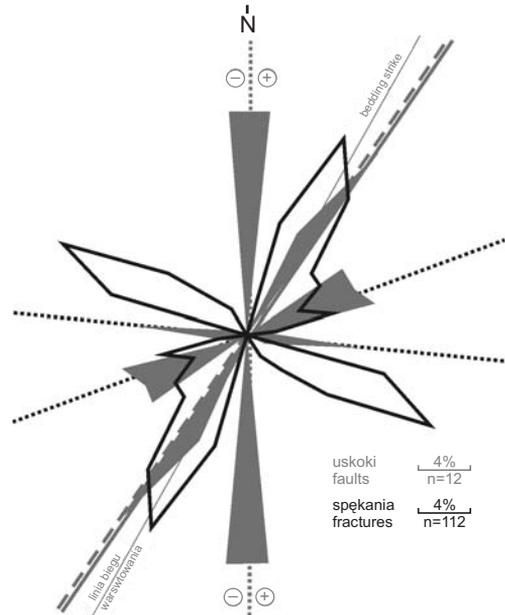
W **domenie 9** (Fig. 24) zlokalizowanej na północnej ścianie Doliny Rio Colca, w rejonie Lari, stwierdzono uskoki zorientowane NE-SW (normalne uskoki, których zrzucone skrzydła znajdują się na północnym zachodzie) oraz ENE-WSW (uskoki odwrócone, wzdłuż których doszło do obniżenia południowego skrzydła).



**Fig. 24.** Przebieg głównych uskoków w utworach górn jurajskich w rejonie Lari (domena 9)

**Fig. 24.** Orientation of major faults in the Upper Jurassic beds in Lari area (location 9)

Na południowym stoku Doliny Rio Colca, w rejonie miejscowości Maca (**domena 10**), zaznaczają się cztery wyraźne zespoły uskoków (Fig. 25) o orientacji N-S, NE-SW, ENE-WSW oraz W-E. W większości są to uskoki progowo-zrzutowe lub normalno-zrzutowe, kształtujące się w ekstensyjnym (normalnym) reżimie deformacji. Najliczniejsze z nich, o przebiegu kierunku N-S ( $N0^\circ$ ) oraz NE-SW ( $N35^\circ E$ ; uskoki podłużne), tworzą na powierzchni terenu wyraźne pierwotne skarpy tektoniczne oraz rowy i zręby. Przebieg ciosu (Fig. 25) tylko w niewielkim stopniu naśladuje przebieg uskoków. Spękania tworzą w tym rejonie wyraźny system ciosu ortogonalnego, którego zespoły są bądź równoległe (cios podłużny,  $N25^\circ E$ ), bądź prostopadłe (cios poprzeczny,  $N65^\circ W$ ) w stosunku do linii biegu warstwowania w utworach górn jurajskich. Stwierdzone w terenie spękania ekstensyjne o przebiegu ENE-WSW ( $N75^\circ E$ ) jako jedyne wiernie odpowiadają uskokom progowo-zrzutowym oraz normalno-zrzutowym o tej samej orientacji.



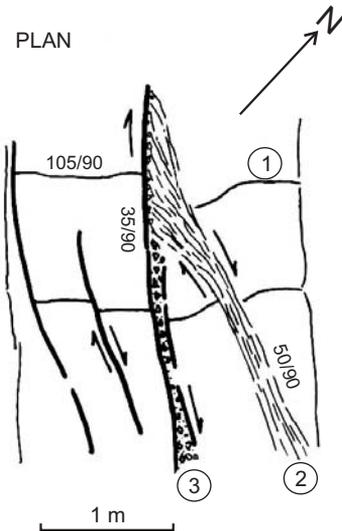
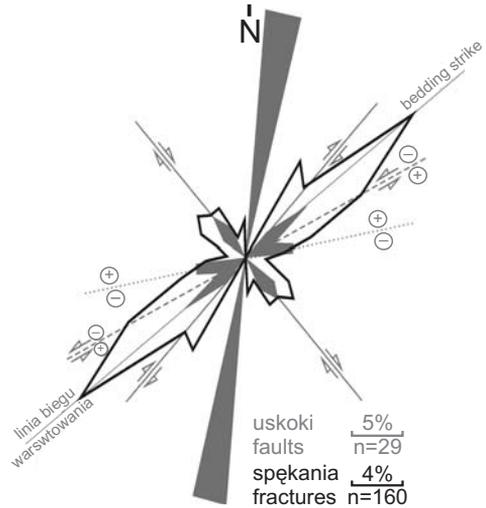
**Fig. 25.** Przebieg uskoków w utworach górn jurajskich w rejonie Maca (domena 10)

**Fig. 25.** Orientation of faults in the Upper Jurassic beds in Maca area (location 10)

Sieć uskoków w utworach górnourajskich stwierdzona na dnie Doliny Rio Colca w rejonie Lari (**domena 11**) składa się z czterech zespołów (Fig. 26). Są to uskoki: prawoprzesuwcze (dwu generacji) o przebiegu NW-SE (ok.  $N50^{\circ}W$ ), lewoprzesuwczo-zrzutowe, podłużne względem linii biegu warstwowania w utworach jurajskich ( $NE-SW$ ;  $N65^{\circ}E$ ) oraz normalno-zrzutowe o orientacji  $ENE-WSW$  ( $N80^{\circ}E$ ) i  $NNE-SSW$  ( $N10^{\circ}E$ ). Zgodnie z tym ostatnim kierunkiem rozwinęła się w tej okolicy dolina rzeki Rio Colca. Uskoki często występują w tej okolicy we wzajemnej superpozycji (Fig. 27).

**Fig. 26.** Kierunki uskoków i spękań w utworach górnourajskich w rejonie Lari (domena 11)

**Fig. 26.** Orientation of faults and joints in the Upper Jurassic beds in Lari area (location 11)



**Fig. 27.** Superpozycja mezouskoków w utworach górnourajskich występujących w dnie Doliny Rio Colca w rejonie Lari (domena 11)

**Fig. 27.** Superposition of mesofaults in the Upper Jurassic beds in the bottom of the Colca River Valley in Lari area (location 11)

Sieć ciosu (Fig. 26) w przybliżeniu nawiązuje do orientacji uskoków (Fig. 28). Zwracając uwagę bardzo licznie reprezentowane (koncentracja 24%) spękania podłużne (N55°E), które bywają wykorzystywane przez poślizgi o charakterze normalno-lewoskrętnym oraz rzadziej spotykany cios diagonalny (N60°W), zgodnie z którym zachodziły wielofazowe przemieszczenia prawopresuwowe.



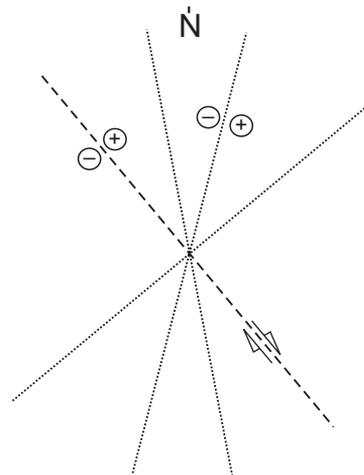
**Fig. 28.** Sieć spękań (cios romboidalny) widoczna na powierzchni warstwowania utworów górniojurajskich w Dolinie Rio Colca w Lari (domena 11)

**Fig. 28.** Joint network (rhomboidal) observed on the top surface of Jurassic beds in the bottom of the Rio Colca Valley in Lari area

Północne zbocza Doliny Rio Colca (**domena 12**) w rejonie miejscowości Maca przecinają liczne uskoki (Fig. 29) normalno-zrztowe o przebiegu NE-SW (N50°E), NNE-SSW (N15°E) i NW-SE (N40°W). Nawiązują one do dominujących kierunków przebiegu uskoków w całym regionie. Uskoki te przemieszczają, oprócz utworów górniojurajskich, również – wyżej leżące – mioceńskie tufy wulkaniczne. Ich skrzydła zostały zrzucone ku wschodowi.

**Fig. 29.** Przebieg głównych uskoków w utworach górniojurajskich w rejonie Maca (domena 12)

**Fig. 29.** Orientation of major faults in the Upper Jurassic beds in Maca area (location 12)



## PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Na badanym obszarze występuje skomplikowana, wielofazowo ukształtowana sieć uskoków. Większość z nich przemieszcza zarówno utwory mezozoiczne i miocenijskie jak i czwartorzędowe, co świadczy o ich współczesnej aktywności. Główne kierunki uskoków występujących w mezozoicznych i miocenijskich utworach podłoża zostały skopiowane w pokrywających dużą część terenu czwartorzędowych koluwiach.

Najstarsze uskoki występujące w utworach mezozoicznych wykazują przebieg południkowy (N-S). Są to uskoki normalne, podkreślone – również w osadach czwartorzędowych – przez rowy tektoniczne. Świadczy to dobitnie o ich długotrwałej aktywności, sięgającej po czasy współczesne. Na niektórych odcinkach rowy te są wykorzystywane przez Dolinę Rio Colca.

Nieco później wielofazowo kształtowały się uskoki przesuwcze o orientacji NE-SW oraz NW-SE (zarówno prawo- jak i lewo-przesuwcze), które w końcowych etapach swej ewolucji (po miocenie) uległy transformacji w uskoki normalno-zrzutowe. Zarówno uskoki o przebiegu NE-SW, jak i NW-SE, tworzą wyraźne struktury schodowe. Ich wschodnie skrzydła uległy wielokrotnym, cyklicznym przemieszczeniom ku górze. Spowodowało to, iż utwory jury pojawiają się we wschodniej części terenu w górnych partiach Doliny Rio Colca, podczas gdy na zachodzie w dnie tej doliny (która jest tam dużo głębiej wcięta) występują już utwory kredowe. Aktywność tych uskoków, zachodząca w reżimie ekstensyjnym, trwa do czasów współczesnych, gdyż wyraźnie zaznaczają się one w osadach czwartorzędowych, często w formie pierwotnych skarp tektonicznych oraz rowów.

Na badanym terenie stosunkowo rzadko pojawiają się – zazwyczaj strome – uskoki odwrócone; mają one przebieg południkowy (nasuwanie ku wschodowi), NE-SW (nasuwanie ku wschodowi) bądź równoleżnikowy (nasuwanie w kierunku południowym). Należy zaznaczyć, że większość uskoków o przebiegu równoleżnikowym ma charakter normalno-zrzutowy (obniżaniu uległo w różnych częściach terenu zarówno ich skrzydło północne, jak i południowe).

Niektóre uskoki o przebiegu równoleżnikowym wykazywały wielofazową aktywność zrzutowo-przesuwczą, przy czym przemieszczenia normalno- (lewo-) przesuwcze poprzedzały późniejsze ruchy o charakterze inwersyjno-przesuwczym.

W utworach mezozoiku stwierdzono niemal poziomo leżące makrostruktury fałdowe, których osie odznaczają się równoleżnikowym przebiegiem. Względem osi fałdu wyodrębniono na tym obszarze uskoki podłużne, poprzeczne oraz diagonalne.

Sieć spękań, w większości przypadków, odzwierciedla przebieg linii uskokowych. Zespoły spękań stosunkowo często tworzą system ciosu ortogonalnego. Najwięcej spękań (a często także uskoków) przebiega równolegle do osi fałdów lub do linii biegu warstwowania; są to spękania i uskoki podłużne.

W osadach czwartorzędowych zaznaczają się kierunki niemal wszystkich uskoków stwierdzonych w utworach mezozoicznych. Również one wykazują wielofazowy rozwój. Początkowo odznaczały się one aktywnością przesuwczą, by następnie przekształcić się w uskoki normalne, prowadzące do kształtowania się rowów i zrębów tektonicznych. Jako pierwsze rozwinęły się rowy o przebiegu NW-SE, a następnie młodsze rowy zorientowane WSW-ENE. Do najmłodszych należą rowy NNW-SSE, tworzące się w warunkach lewoskrętnej transtensji.

Współczesna aktywność uskoków spowodowała utworzenie się na powierzchni terenu wyraźnych pierwotnych skarp uskokowych pokrywających się z liniami uskoków. Świadczy to, iż formy te są na tyle młode, że nie uległy jeszcze w sposób wyraźny procesom denudacyjnym. Z analizy przebiegu linii uskokowych oraz orientacji spękań wynika, że Dolina Rio Colca ma założenia tektoniczne i wykorzystuje niemal wszystkie występujące na badanym terenie zespoły nieciągłości, ze szczególnym uwzględnieniem uskoków o przebiegu WNW-ESE, NE-SW oraz rzadziej – W-E.

Omawiana sieć uskoków i spękań nawiązuje do kierunków lineamentów stwierdzonych na południe od Doliny Rio Colca oraz w rejonie Doliny Wulkanów na podstawie analizy zdjęć satelitarnych (por. Antayhua *et al.* 2002, Delacour *et al.* 2002). Duże znaczenie mają uskoki o przebiegu NW-SE, które poniżej Kanionu Colca powodują pojawianie się na powierzchni terenu utworów prekambryjskich (Dalmayrac *et al.* 1971, Mégard *et al.* 1971).

*Praca powstała w ramach badań statutowych Katedry Geologii Podstawowej Uniwersytetu Śląskiego (BS/KGP/2006). Autorzy dziękują prof. dr hab. inż. Andrzejowi Paulo za życzliwość, inspirację i wszechstronną pomoc w realizacji tematu oraz władzom diekańskim Wydziału Nauk o Ziemi UŚ, a w szczególności prof. dr. hab. Andrzejowi Kowalczykowi, za wsparcie finansowe.*

## LITERATURA

- Antayhua Y., Tavera H. & Bernal I., 2001. Análisis de la Actividad Sísmica en la Región del Volcán Sabancaya (Arequipa). *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, 91, 55–68.
- Antayhua Y., Tavera H., Bernal I., Palza H. & Aguilar V., 2002. Localización hipocentral y características de la fuente de los sismos de Maca (1991), Sepina (1992) y Cabanaconde (1998), Región del Volcán Sabancaya (Arequipa). *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, 93, 63–72.
- Bulmer M.H., Johnston A., Engle F.C. & Salas G., 1999. Seismically triggered slope failures in the Colca Valley, Southern Peru. *EOS. Transactions, American Geophysical Union, Spring*, H41A-07, 127.
- Dalmayrac B., Laubacher G., Marocco R., Martínez C., Mégard F., Paredes J. & Tomasi P., 1971. *Mapa Geológico de los Terrenos Paleozoicos y Precambrianos del Perú y de Bolivia*, Escala aproximada 1 : 5 000 000. Service Cartographique. Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer, Paris.
- Delacour A., Paquereau P., Gerbe M.C., Thouret J.C. & Wörner G., 2002. *Quaternary minor volcanic centers in southern Peru: volcanology, petrology and geochemistry*. ISAG, Toulouse, 175–179.
- Dorbath L., Dorbath C., Jimenez E. & Rivera L., 1991. Seismicity and tectonics deformation in the eastern cordillera and the sub-andean zone of central Peru. *Journal of South American Earth Sciences*, 4, 13–24.
- Gałaś A. & Paulo A., 2005. Karłowate wulkany formacji Andahua w południowym Peru. *Przegląd Geologiczny*, 53, 4, 320–326.
- Garayar C. (red.), 2004. *Atlas regional del Perú, Tomo 3: Arequipa*. Ediciones Peisa S.A.C. & Quebecor World Perú S.A., Lima.

- Groshong R.H., 1999. *3-D structural geology. A practical guide to surface and subsurface map interpretation*. Springer, Berlin, 1–350.
- Guillande R. & Salas G. 1995. Geomorphological and geological survey and spot remote sensing of the current activity of Nevado Sabancaya stratovolcano (south Peru): assessment for hazard-zone mapping. *Zeitschrift für Geomorphologie, Neue Folge, Berlin-Stuttgart*, 39, 4, 515–535.
- Hobbs B.E., 1971. The analysis of strain in folded layers. *Tectonophysics*, 11, 329–375.
- Huamán D., Chorowicz J., Deffontaines B., Guillande R. & Rudant J., 1993. Cadre structural et risques géologiques étudiés à l'aide de l'imagerie spatiale: la région du Colca (Andes du Sud Pérou). *Bulletin de la Société Géologique de France*, 164, 6, 807–818.
- Jaroszewski W., 1972. Drobnostukturalne kryteria tektoniki obszarów nieorogenicznych na przykładzie północno-wschodniego obrzeżenia mezozoicznego Gór Świętokrzyskich. *Studia Geologica Polonica*, 38, 1–210.
- Jaroszewski W., 1976. *Metodyka badań drobnych struktur tektonicznych (stan, cele i perspektywy)* [W:] Przewodnik 48 Zjazdu Polskiego Towarzystwa Geologicznego w Starachowicach. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa, 134–157.
- Klinck B.A. & Palacios M., 1985. *Mapa Geologica del Cuadrangulo de Chivay*. Escala 1 : 100 000. Instituto Geologico Minero y Metalurgico, Peru.
- Krzak M., 2005. Ruch turystyczny w rejonie Arequipy i możliwości jego rozwoju w Dolinie Wulkanów (prowincja Castilla) w południowym Peru. *Geoturystyka*, 2, 2, 3–22.
- Marshak S. & Mitra G. (eds.), 1988. *Basic methods of structural geology*. Prentice Hall, New York, 1–446.
- Mattauer M., 1989. *Monts et Merveilles, Beautés et richesses de la Géologie*. Hermann Editores de Ciencias y Arte. Paris, 1–267.
- Mégard F., Dalmayrac B., Laubacher G., Marocco R., Martinez C., Paredes J. & Tomasi P., 1971. La chaîne hercynienne au Pérou et en Bolivie. Premiers résultats. *Cahiers, Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer, série Géologie*, III, 1, 5–44.
- Nicolas A., 1987. *Principles of rock deformation*. D. Reidel Publ. Co., Dordrecht, Boston, 1–192.
- Paulo A. & Gałaś A., 2005. Epitermalne złoża złota i srebra w okolicy Orcopampa i Cayllo-ma, południowe Peru. *Przegląd Geologiczny*, 53, 8, 639–648.
- Price N.J. & Cosgrove J.W., 1988. *Analysis of geological structures*. Cambridge University Press, Cambridge, 1–516.
- Ragan D.M., 1973. *Structural geology – an introduction to geometrical techniques*. John Wiley & Sons Inc., New York, 1–208.
- Ramsay J.G., 1967. *Folding and fracturing of rocks*. McGraw-Hill Book Co. Inc., New York, 1–568.
- Ramsay J.G. & Huber M.I., 1983. *The techniques of modern structural geology, 1: Strain analysis*. Academic Press, London, 1–307.
- Ramsay J.G. & Huber M.I., 1987. *The techniques of modern structural geology, 2: Folds and fractures*. Academic Press, London, 308–700.
- Ramsay J.G. & Lisle R.J., 2000. *The techniques of modern structural geology, 3: Applications of continuum mechanics in structural geology*. Academic Press, London, 701–1061.

- Sébrier M., Mercier J., Megard F., Laubacher G. & Carey-Gailhardis E., 1985. Quaternary normal and reverse faulting and the state of stress in the central Andes of Perú. *Tectonics*, 7, 895–928.
- Sébrier M. & Soler P., 1991. Tectonics and magmatism in the Peruvian Andes from late Oligocene time to Present. [In:] Harmon R.W. & Rapela C.W. (eds.), *Andean magmatism and its tectonic setting. Geological Society of America, Special Paper*, 265, 259–278.
- Teisseyre H., 1971. Zagadnienie analizy strukturalnej w Sudetach, jej cele i metodyka. *Rocznik Polskiego Towarzystwa Geologicznego*, 41, 1, 93–118.
- Turner F.J. & Weiss L.E., 1963. *Structural analysis of metamorphic tectonites*. McGraw-Hill Book Co. Inc., New York, 1–525.
- Vialon P., Ruhland M. & Grolier J., 1976. *Elements de tectonique analytique*. Masson, Paris, 1–118.
- Whitten E.H.T., 1969. *Structural geology of folded rocks*. Rand McNally & Co., Chicago, 1–678.
- Żaba J., 1999. Ewolucja strukturalna utworów dolnopaleozoicznych w strefie granicznej bloków górnośląskiego i małopolskiego. *Prace Państwowego Instytutu Geologicznego*, 166, 1–162.

## Summary

The fault/fracture network within Mesozoic and Quaternary formations has been studied in the Rio Colca Valley in Pinchollo–Lari–Maca area (Figs 1, 3, 4), Central Andes, Southern Peru. The study area is located in a subduction zone and is part of an active volcanic arc (Fig. 2). A fragment of the Rio Colca Valley dealt with this work is located between two volcanoes: Sabancaya in the South and Mismi in the North, both 20–30 km apart. Recent activity of Sabancaya volcano caused locally surface displacements as a result of earthquake in Maca in 1991. These structures in Quaternary colluvial deposits and their relation to existing tectonic framework in the bedrock have been studied in the paper (Figs 6, 7).

Displacements of Mesozoic, Miocene and Quaternary formations observed on nearly all faults in the study area provide evidence for recent tectonic activity. Most of the faults in Mesozoic bedrock continue in Quaternary colluvial deposits (Figs 5–29). Recent tectonic activity of these faults has developed on the surface a system of distinct scarps and land cracks.

Orientation of the first generation of faults displacing Mesozoic formations is N-S. These are normal faults, which form some horsts and grabens in Quaternary deposits. The next generation of strike-slip faults, both sinistral and dextral ones is oriented NE-SW and NW-SE. In late stages of its evolution (Post-Miocene), this fault system was transformed into oblique-slip faults. The activity of this fault system has influenced recently Quaternary grabens observed on the land surface. In the study area there is also another sparse system of steep faults (normal, reverse and oblique-slip) oriented N-S, NE-SW and W-E.

Analysis of faulting in Pinchollo–Maca area shows that structural framework of the Rio Colca Valley is based on nearly all tectonic discontinuities observed on the surface; mostly on WNW-ESE and NE-SW faults, and on few W-E faults.