

Geneza i aktywność neotektoniczna lokalnego rowu andyjskiego w świetle analiz deformacji osadów jeziornych w dolinie Rio Colca (Peru)

Origin and neotectonic activity of a local Andine trench in the light of studies of deformation in lacustrine sediments of the Río Colca valley (Peru)

Józef Kukulak¹, Tomasz Kalicki²

¹ *Uniwersytet Pedagogiczny, Instytut Geografii, ul. Podchorążych 2, 30-084 Kraków,*

² *Uniwersytet Humanistyczno-Przyrodniczy Jana Kochanowskiego, Instytut Geografii, ul. Świętokrzyska 15, 25-406 Kielce; tomaszkalicki@ymail.com*

Zarys treści: Na obwodzie doliny Rio Colca (uformowanej w osadach jeziornych) w Andach Środkowych (Peru) znajdują się uskoki, których bieg jest zgodny z kształtem tej doliny. Zbadano je w miejscowościach Madrigal, Coporaque, Chivay i Maca, gdzie mają cechy uskoków zrzutowych, zarówno normalnych, jak i odwróconych. Ich geometryczne parametry wskazują, że dolina jest tektonicznym zapadliskiem, a uskoki są jego brzegiem. Porównano ich układ z teoretycznymi modelami geotektonicznymi (ryc. 10A–C). Widoczna krzywizna i nachylenie powierzchni uskoków są obecnie tylko fragmentami pełnego kształtu uskoków, co nie pozwala jednoznacznie ustalić jaką formę ma całe zapadlisko i który z modeli jest właściwy. Stwierdzono natomiast, że są to uskoki młode, ponieważ deformują osady czwartorzędowe. Ich powstanie jest związane z intensywnym wypiętrzaniem Andów. Jest możliwe, że nawiązują do układu uskoków starszych i są ich przedłużeniem w młodszym piętrze strukturalnym.

Słowa kluczowe: neotektonika, osady jeziorne, deformacje osadów, dolina Rio Colca

Abstract: Tectonic faults run along the margins of the Río Colca valley (incised in lacustrine sediments) in the Central Andes of Peru. The faults were studied at localities Madrigal, Coporaque, Chivay and Maca, where they have characteristics of normal and reverse dip-slip faults. Their geometrical parameters indicate that the valley is a graben bounded by the studied faults. The fault pattern has been compared with theoretical geotectonic models (Fig. 10A–C). As the visible curvatures and slopes of the fault surfaces are representative only for their exposed fragments, they are not sufficient for unanimous recognition of the graben form and for the selection of the proper model. It has been ascertained that the faults are young, because they deform Quaternary sediments. It is possible that they are linked to the older faults and are their continuation in the younger structural stage.

Key words: neotectonic, lacustrine deposits, sediments deformations, Rio Colca valley

Wprowadzenie

Andy są młodym orogensem, w którym procesy tektoniczne są nadal żywotne. Ciągły proces subdukcji płyty oceanicznej Nazca pod płytę kontynentalno-oceaniczną południowoamerykańską jest przyczyną postępującego wypiętrzania Andów (Megard

1984, Marcedo-Sanchez i in. 1992, Mercier i in. 1992) oraz modyfikacji i wzbogacania ich starszych (laramijskich) struktur fałdowych w młodsze struktury uskokowe i wulkaniczne (Jaillard, Soler 1996). Liczne są zręby i rowy tektoniczne, którym zwykle towarzyszą formy wulkaniczne (Sebrier i in. 1988, Hsu 1992, Leffler i in. 1997, Thouret i in. 2001, Gałaś,

Paulo 2005). W budowie środkowej części Andów wyróżniają się rozległe trzeciorzędowe zapadliska śródgórskie, które rozdzielają wysokie zręby kordylier. Zapadliska te są wypełnione górnioiocenijskimi molasami oraz czwartorzędowymi seriami fluwialno-limnicznymi i wulkanicznymi (Ollier 1987, Zeilinger, Schlunegger 2007, Paulo 2008).

Miniaturą zapadliska śródgórskiego, w porównaniu z innymi w Andach, wydaje się być środkowy odcinek doliny Rio Colca. Ale to na jego przykładzie można wnioskować, jak tworzyły się formy większe. Cechy rzeźby doliny Rio Colca i wypełniających ją osadów, a zwłaszcza obecność licznych uskoków deformujących te osady (Kalicki, Kukulak 2008a, Żaba, Małolepszy 2008a), wskazują na tektoniczne założenia tej doliny jako jednego z lokalnych rowów tektonicznych. Z analizy obecnych tam uskoków wynika również, że formowanie się rowu Rio Colca postępowało także w plejstocenie i trwa nadal.

Obszar badań

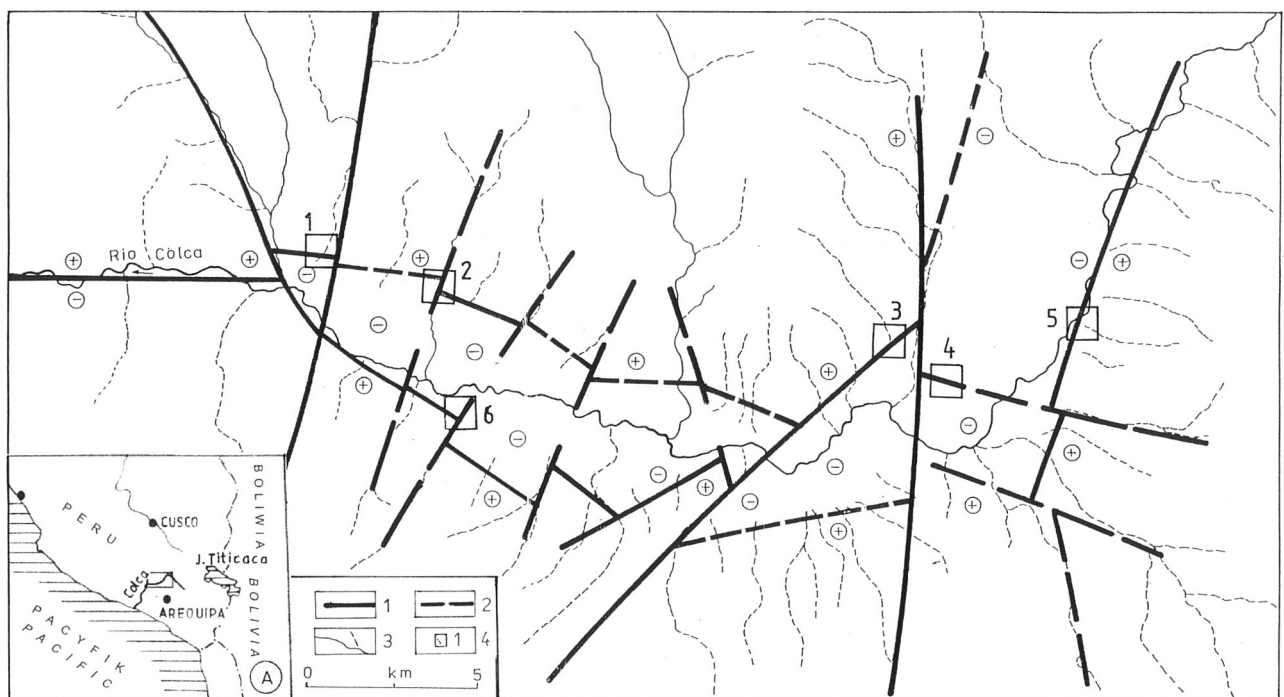
Dolina Rio Colca znajduje się w środkowo-zachodniej części Andów. Administracyjnie jest ona usytuowana w południowej części Peru (prowincja Arequipa). Rzeka należy do systemu krótkich rzek zlewiska Oceanu Spokojnego. Ma swoje źródła powyżej 4500 m n.p.m., płynie początkowo po płaskowyżu Altiplano, następnie skręcając ku zachodowi,

omija lub przecina pasma górskie Kordyliery Zachodniej Andów Środkowych.

Badania uskoków w dolinie Rio Colca były prowadzone na jej środkowym odcinku (na ok. 170–200 km jej biegu), pomiędzy masywami wulkanów Hualca Hualca (6025 m n.p.m.) i Mismi (5597 m n.p.m.), powyżej przełomu tej rzeki (kanion Rio Colca) przez najwyższe grzbiety wspomnianej Kordyliery (Coropuna 6425 m n.p.m., Ampato 6288 m n.p.m.). Na tym odcinku (ok. 30 km długości) dolina Rio Colca ma większą szerokość i jej rzeźba jest słabiej odmłodzona (ryc. 1).

Badany fragment doliny ma generalnie przebieg równoleżnikowy i rozciąga się od miejscowości Chivay (3650 m n.p.m.) na wschodzie po Madrigal (3260 m n.p.m.) na zachodzie. Jej dno tworzy schodowy system teras (o wysokościach od kilku do 250 m), a średni spadek podłużny rzeki na tym odcinku wynosi 16,7‰. Na długości doliny wyodrębniają się morfologicznie trzy odcinki, różniące się orientacją kierunkową osi podłużnej i są rozdzielone wyraźnymi zwężeniami dna (Achoma, Chivay).

Zbocza doliny Rio Colca są zbudowane z mezozoicznych skał osadowych, sfałdowanych i pociętych intruzjami, na ogół przykrytych przez kenozoiczne pokrywy law i tufów wulkanicznych. Bardzo miąższym (do kilkuset metrów) wypełnieniem doliny są natomiast młodsze osady dawnego jeziora (tufity) z włożeniami osadów aluwialnych (żwiry i piaski stożków napływowych) i stokowych (koluwia), a lokalnie nawet z wkładkami pokryw lawowych. Seria jeziorna jest przestrzennie zróżnicowana facjalnie, litologicz-



Ryc. 1. Lokalizacja badanych uskoków na planie zapadliska Rio Colca

1 – uskoki stwierdzone, 2 – fotolineamenty, 3 – sieć rzeczna, 4 – stanowiska badawcze

Fig. 1. Location of the studied faults within the Río Colca graben

1 – proven faults, 2 – photolineaments, 3 – drainage network, 4 – study sites

nie, teksturalnie i strukturalnie. W osiowej części dawnego zbiornika zalegają poziomo drobnoziarniste jasne osady rytmicznie warstwowane. To pyły wulkaniczne o cechach tufitów, których materiał pochodzi zapewne nie tylko z bezpośredniego opadu do zbiornika, ale w większości został redeponowany ze stoków. Przy wylotach bocznych dolin seria ta jest głównie żwirowa, o słabszej regularności warstwowania (deltę stożków napływowych). W sąsiedztwie brzegów dawnego zbiornika osady są najsilniej zaburzone sedymentacyjnie i grawitacyjnie (spływy koluwiów). Ponadto w rynnach erozyjnych, wyciętych w osadach jeziornych przez Rio Colca, występują młodsze włożenia żwirów.

Tektoniczne zaburzenia osadów jeziornych koncentrują się głównie u podnóża zboczy doliny Rio Colca, ale odsłaniają się również w jej osiowej części. Występują one zarówno w osadach typowo limnicznych (tufity), jak i w żwirowych deltach stożków napływowych, a nawet w koluwiach współczesnych osuwisk na zboczach doliny (Żaba, Małolepszy 2008a, b). Cementacja osadów jeziornych jest różna, przeważnie silniejsza w tufach i tufitach (spoiwo ilasto-krzemionkowe) a słabsza w żwirach (ilasto-węglanowe lub ilasto-krzemionkowe), ale żwiry najwyższych poziomów dna doliny są prawie zlepioncami. Uskoki w takich osadach są wyraźnie ukształtowane.

Metodyka i zakres badań

Badania nieciągłych deformacji osadów jeziornych dotyczyły pomiarów biegu powierzchni uskokowej, kierunku i kąta upadu tej powierzchni (azymut linii upadu i kąt upadu) oraz oceny stosunku nachylenia powierzchni uskokowej do położenia przeciętych warstw. W miejscach o jednoznacznej korelacji warstw na skrzydłach uskoku mierzono wielkość zrzutu uskoków. Gdy uskoki występowały zespołowo (w strefach uskokowych), mierzono odległości między nimi, określano ich wzajemne ułożenie i dokumentowano zaburzenia osadów wzdłuż powierzchni uskokowych. Zwracano uwagę na stopień otwartości powierzchni uskoków. Rejestrowano również obecność, gęstość i położenie spękań ciosowych towarzyszących uskokom. Pomiar orientacji uskoków wykonywano kompasem geologicznym. Uzyskane dane porównywano z orientacją kierunkową i lokalizacją stwierdzonych już uskoków (Mapa geológico... 2001, Żaba, Małolepszy 2008a, b) i siecią kartograficznie i terenowo wyznaczonych fotolineamentów.

Charakterystyka uskoków

Zbadano zespołowe uskoki w sześciu miejscach doliny Rio Colca (ryc. 1). Większość stanowisk (5) znajduje się w strefie kontaktowej osadów jeziornych

ze starszym podłożem, na obwodzie wysokich teras doliny (stan. Madrigal 1, Madrigal 2, Coporaque 1, Coporaque 2, Chivay). Jedno zespołowe stanowisko Maca leży również blisko tego kontaktu, ale uskoki są czytelne głównie w koluwiach.

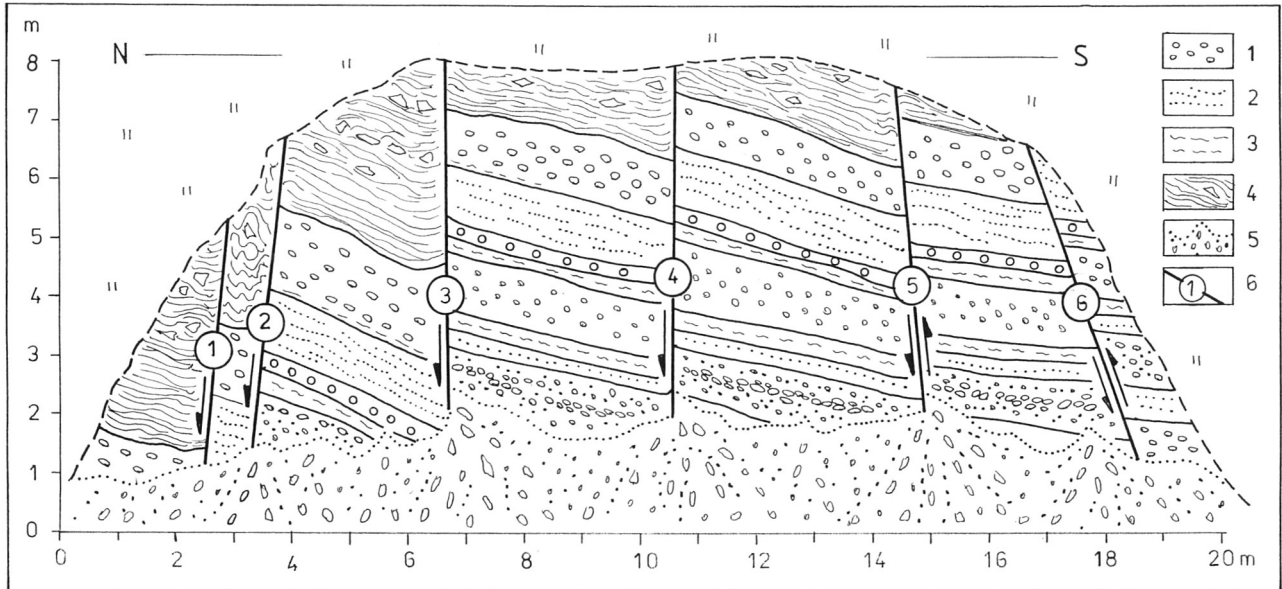
1. Madrigal 1 – stanowisko to (3270 m n.p.m.) znajduje się 2 km na NW od miejscowości o tej samej nazwie (ryc. 1), bezpośrednio nad drogą prowadzącą do miejscowych kopalń rud polimetalicznych. Na wschodnim skłonie niskiej przełęczy (którą biegnie owa droga i kanał irygacyjny), oddzielającej izolowany pagór wulkaniczny (3280 m n.p.m. od W) od grzbietu Cerro Ichocollo (3900 m n.p.m. od E), odsłania się w podciętych sztucznie zboczach zespół uskoków w żwirach (ryc. 2).

Ściana świeżo podciętej serii żwirów ma 7–8 m wysokości i 18–21 m długości i jest fragmentem większego płata pokrywy aluwialnej, zachowanej blisko 200 m nad korytem Rio Colca. Budowa wewnętrzna tej pokrywy wokół odsłonięcia jest słabo czytelna, maskuje ją gruby (do 3–4 m) płaszcz glin stokowych bądź darń. W miejscu odsłoniętym pokrywę tworzy osiem warstw żwirów średnich (2–8 cm) i drobnych (do 2 cm) z piaskiem, piasków i mulków z piaskiem, zalegających na przemian. Mięszce (do 0,9 m) są warstwy żwirów grubszych, najcieńsze (2–15 cm) są warstwy osadów najdrobniejszych. Większość warstw utrzymuje na długości odkrywki stałą miąższość, ale pozostałe się wyklinowują. Istotną cechą wszystkich warstw jest ich zgodne ułożenie i łagodne pochylenie w kierunku południowym (ku osi doliny Rio Colca).

Ujawniona w odkrywcę strefa uskokowa składa się z 6 uskoków (w sąsiedztwie odkrywki może ich być jeszcze więcej) (ryc. 2). Tworzą one zespół uskoków równoległych, prawie pionowych, jakkolwiek kąt i kierunek upadu płaszczyzny uskoków nie są identyczne (żwiry rodzaj powierzchni uskokowej pozwalał na wykonanie pomiarów jej położenia z dokładnością do 5 stopni – tab. 1).

Wszystkie uskoki mają zrzucone skrzydła północne, niezależnie od kierunku pochylenia powierzchni uskokowej, a sumaryczny zrzut tych skrzydeł przekracza 7,5 m. Zrzuty skrzydeł są zatem w kierunku przeciwnym do nachylenia terenu. Należą one do uskoków homotetycznych normalnych (1–4), przechodzących w odwrócone (5–6). Powierzchnia uskokowa jest bardzo wyraźna (ryc. 3) i prawie płaska, na uskokach 3 i 4 pomiędzy ich skrzydłami jest miejscami szczelina o szerokości do 1 cm. Wzdłuż uskoków 1, 2, 3 jest czytelne wygięcie warstw ku górze na skrzydłach zrzuconych.

2. Madrigal 2 – obejmuje teren z typową rzeźbą strukturalną. W odległości około 1,5 km na wschód od miejscowości Madrigal ma swój początek martwa dolina, której dno obniża się łagodnie ku miejscowości Lari (w kierunku SE) z wysokości 3420 m do około 3390 m n.p.m. Biegnie nią droga między tymi miejscowościami. Jest ona początkowo dolina



Ryc. 2. Strefa uskokuwa Madrigal 1

1 – żwiry, 2 – piaski, 3 – pyły, 4 – utwory stokowe, 5 – materiał osypiskowy, 6 – uskoki

Fig. 2. Fault zone of Madrigal 1

1 - gravels, 2 - sands, 3 - silts, 4 - slope deposits, 5 - talus deposits, 6 - faults

skrzynkową (o głębokości 15–25 m), ale wraz z biegiem jej zbocze SW obniża się i zanika, natomiast zbocze NE utrzymuje kształt pionowej skarpy. Na jej ścianie odsłaniają się żwiry. Na długości około 1 km szerokość doliny zwiększa się od 10–20 m w części NW do 60–80 m w części SE. Na podłużnym profilu tej doliny znajduje się wysoki próg (do 5 m), którego położenie nawiązuje do wyraźnego zwężenia martwej doliny oraz bocznej doliny (od NNE), o wysoko zawieszonym wylocie. Na zachodnim stopniu tego progu znajduje się dziś zbiornik wodny.

Układ wszystkich elementów rzeźby ściśle odwzorowuje sytuację tektoniczną tego miejsca (ryc. 4). Dolina jest bowiem rowem tektonicznym ograniczonym dwoma uskokami o biegu WNW–ESE (ok. 100° i 115°), a jej poprzeczny próg i wylot zawieszonyj bocznej doliny przypadają na przecięcie tego rowu uskokiem poprzecznym o biegu NNE–SSW (10–20°). Skrzyżowanie uskokuw, a zwłaszcza bieg uskoku po-

przecznego, wykorzystuje obecnie potok okresowy, wcinając się głęboko w oba wiszące skrzydła rowu tektonicznego. Przemieszczenia skrzydeł uskoku poprzecznego pionowego odsłaniają się we wciósie tego potoku (po stronie NNE drogi Madrigal–Lari).

3. Coporaque 1 – jest odsłonięciem najwyższej położonych osadów deltowych zazębających się z typowo limnicznymi. Znajduje się ono w dnie prawej doliny okresowego dopływu Rio Colca, pierwszego na zachód od miejscowości Coporaque, na wysokości 3580 m n.p.m. W lewej ścianie głębokiego wciosu odsłania się 5-metrowej miąższości profil osadów warstwowanych, pociętych uskokami i spękaniem. Są tam odsłonięte 4 warstwy żwirów (od góry: 1,0 – 0,4 – 0,8 – 0,5 m) przedzielone trzema warstwami piasków (od góry: 1,0 – 1,0 – 0,3 m). Kontakt warstw piasków z nadległymi żwirami jest erozyjny. Piaski są białoszare, gruboziarniste (z soczewkami drobnych żwirów), warstwowane przekątnie (warstwa górna) i

Tabela 1. Parametry uskokuw w odsłonięciu Madrigal 1

Table 1. Parameters of trenches in Madrigal 1 excavation

Nr uskoku	Bieg powierzchni uskoku (w stopniach)	Kąt upady powierzchni uskoku (w stopniach)	Kierunek upady powierzchni uskoku	Wielkość zrzutu uskoku (w metrach)	Odstęp między uskokami (z numeracją) (w metrach)
1	115	85	NEN	2,1	?
2	115	85	NEN	0,7	0,6 (1–2)
3	120	90	Pionowy	2,6	1,5–2,0 (2–3)
4	120	90	Pionowy	1,0	4,0 (3–4)
5	120	85	SWS	0,8	2,0–30 (4–5)
6	115	70	SWS	0,5	?

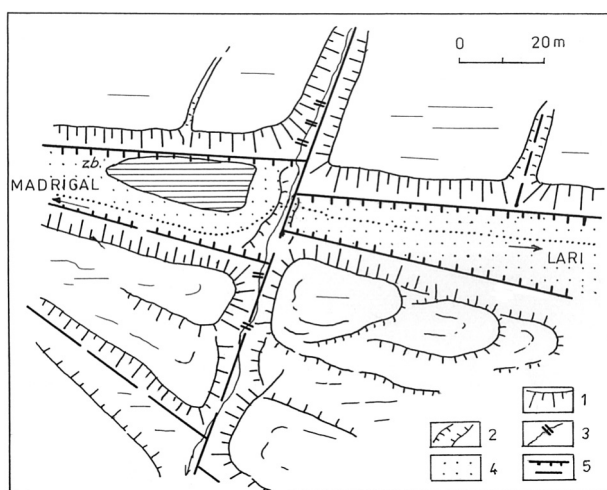


Ryc. 3. Uskoki w żwirach i piaskach w Madrigal 1
Fig. 3. Faults in gravels and sands at Madrigal 1

równoległe (warstwy dolne). W stronę cofki dawnego zbiornika warstwy piasków cienieją i ulegają wyklinowaniu, a zastępują je żwiry (stożek napływowy). Żwiry w badanym profilu są bardzo słabo wysortowane, średnie z grubymi (4–12 cm średnicy), coraz grubsze w warstwach kolejno wyższych. Wszystkie warstwy są nachylone ku osi doliny Rio Colca pod kątem około 20°.

Młodym śladem tektonicznym w odsłoniętej serii osadów są otwarte szczeliny i niewielkie uskoki, zrzucające skrzydła ku osi doliny Rio Colca. Powierzchnie uskoków i szczelin są strome (ok. 80° ku SE), a ich bieg jest SW–NE (ok. 50°). Odstępy pomiędzy głównymi szczelinami wynoszą 4–5 m, a zespołowe uskoki są szczególnie wyraźne w warstwach piasków. Strefa widocznych uskoków i szczelin ma około 50 m szerokości, ale jest możliwa większa jej szerokość. W tej strefie na dnie doliny leżą ponadto wielkie luźne bloki trawertynu, a na jej intersekcyjnym przedłużeniu w odległości 200 i 500 m (ku SW) znajdują się na zboczach bardzo obfite źródła wody.

4. Coporaque 2 – jest odkrywką silnie zdeformowanych osadów typowo limnicznych. Znajduje się ona w odległości 1 km na SE od miejscowości Copo-



Ryc. 4. Plan terenu o rzeźbie strukturalnej (Madrigal 2)
 1 – krawędzie skarp zboczowych, 2 – erozyjne wcięcia potoków, 3 – progi w dnach dolin, 4 – dno martwej doliny, 5 – linie uskoków

Fig. 4. Sketch of a locality with structural relief (Madrigal 2)
 1 – margins of slope escarpments, 2 – erosional incision of streams, 3 – thresholds at valley floors, 4 – bottom of an inactive valley, 5 – fault lines

raque, przy drodze do Chivay, w dnie okresowego potoku na wysokości 3500 m n.p.m. W rozległym (do 15 m długości i do 6 m wysokości) wklęsłym podcięciu stoku odsłaniają się zalegające na przemian warstwy tufitów i piasków, łagodnie pochylone ku SW i pocięte gęstą siecią uskoków. Warstwy tufitów mają miąższość od 40 cm (dolna część profilu) do 10 cm (część górna), równoległą laminację, są pylaste, białe i dość mocno scementowane, a pękają płytkowo wzdłuż uwarstwienia. Warstwy piasków (20–50 cm miąższości) są z piasku słabo wysortowanego, średnio- i drobnoziarnistego, ich warstwowanie zmienia się od przekątnego i falistego w piaskach drobnych do równoległego w grubszych, w tych ostatnich są również cienkie (1–5 cm) wkładki drobnych żwirów białej barwy i klasty tufów.

Warstwy są zaburzone różnej wielkości uskokami, spękaniami, a nawet nasunięciami (ryc. 5), mającymi w całości charakter strefy uskokowej. Duża gęstość nieciągłości spowodowała silną fragmentację warstw, ich bryłową rotację i przemieszczenia pionowe, tworząc ogólnie strukturę brekcyjową. Środkową część odsłonięcia zajmuje główny uskoczek o biegu NW–SE. Ma on rozwarpte płaszczyzny (3–5 m), rozdzielone brekcją ze stłoczonych warstw tufów i piasków. Wzdłuż tego uskoku zrzucone jest skrzydło NE, w którym są widoczne dwa nasunięcia i kilka drugorzędnych uskoków oraz liczne szczeliny i spękania. Wszystkie te uskoki mają zrzucone skrzydła NE, a zrzucone wynoszą 0,1–1,0 m, w dodatku w każdym ze skrzydeł zmienia się upad warstw, choć generalnie kierunek ich upadu jest ku N. Wszystkie nieciągłości mają podobną orientację kierunkową jak uskoczek główny (120–130°) i upad ku NNE. Na skrzydle SW są trzy duże uskoki o nieokreślonej wielkości i kierunku przemieszczenia skrzydeł, ale ich bieg jest pod względem kierunku podobny do uskoku głównego, tylko upad powierzchni uskokowej jest ku SSW. Najniższe topograficznie części obu skrzydeł są przykryte aluwiami stożkowymi o nie zaburzonej budowie (prawie poziomo leżące warstwy żwirów i pia-

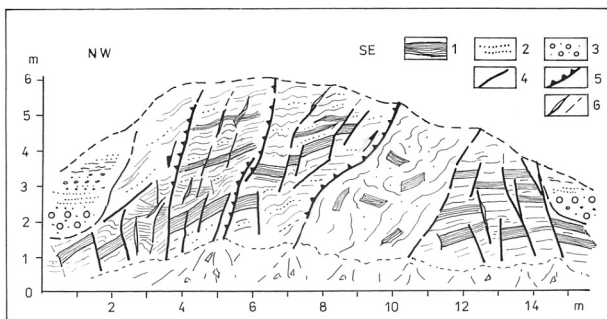
sków). Tym samym można określić powstanie tego uskoku na okres przed akumulacją aluwii.

5. Chivay – to odsłonięcie zuskokowanej serii żwirowo-piaszczystej, usytuowane w dolinie Rio Colca około 2,5 km powyżej miejscowości Chivay. Na lewym zboczu tej doliny, w sąsiedztwie gorących źródeł wód mineralnych (La Calera), na wysokości 3580 m n.p.m. jest zachowany płat aluwialnej pokrywy około 8–10-metrowej miąższości. W jej podcięciu przez drogę fragmente odsłania się seria warstw na przemian żwirowych i piaszczystych, przykrytych w stropie rumoszem stokowym. Miąższości tych warstw są zróżnicowane (0,4–2,5 m). W najgrubszej z warstw żwirowych (2,2 m) dominują otoczaki o wielkości 4–8 cm. W innych warstwach żwiry są drobniejsze. Także warstwy piasku są zróżnicowane frakcjonalnie, od piasków grubo- po drobnoziarniste, a budulcem warstwy o największej miąższości (2,5 m) są nawet utwory pylasto-piaszczyste. Warstwy osadów najdrobniejszych są biało-szare, a ławice grubych piasków i drobnych żwirów rdzawe. Wszystkie warstwy są łagodnie nachylone w kierunku osi doliny.

Cała seria jest przecięta dwoma równoległymi uskokami o przebiegu NE–SW (ok. 20–30°) i upadzie ich powierzchni 60–75° ku NW (ryc. 6). Są uskoki normalnymi, mają zrzucone skrzydła ku NW, a ich powierzchnia jest łagodnie wklęsła (typu szufłowego). Wygięciu tej powierzchni towarzyszą dwa mniejsze pionowe uskoki pomocnicze (drugorzędne) na skrzydłach wiszących (ryc. 7). Zrzuty skrzydeł wynoszą 1,8 m i 4,0 m, a w uskokach towarzyszących 0,2–0,4 m. Odstęp między uskokami wynosi 4,5 m. Do biegu uskoku nawiązuje bieg doliny Rio Colca i jej strome, wysokie lewe zbocze. Obfite zażelazienie piasków w uskoku jest związane z miejscowym wpływem wód termalnych bogatych w związki żelaza.

6. Maca – w której jest kilka miejsc z widocznymi uskokami. Występują one zarówno w litych skałach mezozoicznych (przy korycie Rio Colca), w koluwiach potężnego osuwiska Maca (Żaba, Małolepszy 2008b), a nawet w osadach wewnętrznego zbiornika w tym osuwisku. Szczególnie wyraźne i regularne są szczeliny i uskoki w osadach zbiornikowych osuwiska, odsłaniające się dziś na wysokości 3250 m n.p.m. na wschód od miejscowego kościoła. W rozległej (kilkanaście hektarów) niecce między wysokimi wałami koluwiów, wypełnionej kiedyś okresowym jeziorem, nagromadziły się pylaste osady krzemionkowe o składzie diatomitów i miąższości co najmniej 4 m. Są to skały jasne (białe), mączaste i kruche, bardzo porowate, w większości laminowane. Ich laminacja jest wyraźniejsza w części spągowej (rytm warstw jasnych i ciemnych), ku górze słabnie i skała staje się bardziej masywna. Parometrową serię białych diatomitów przykrywa warstwa masywnych osadów szaro-brązowych, bardziej ilastych, o miąższości 1,0–1,5 m.

Cały kompleks skał jest pocięty prawie pionowymi, równoległymi szczelinami i uskokami o orientacji



Ryc. 5. Struktura brekcyjowa w osadach jeziornych (Coporaque 2)

1 – tufity, 2 – piaski, 3 – żwiry, 4 – uskoki, 5 – nasunięcia, 6 – szczeliny i spękania

Fig. 5. Brecciated lacustrine sediments (Coporaque 2)

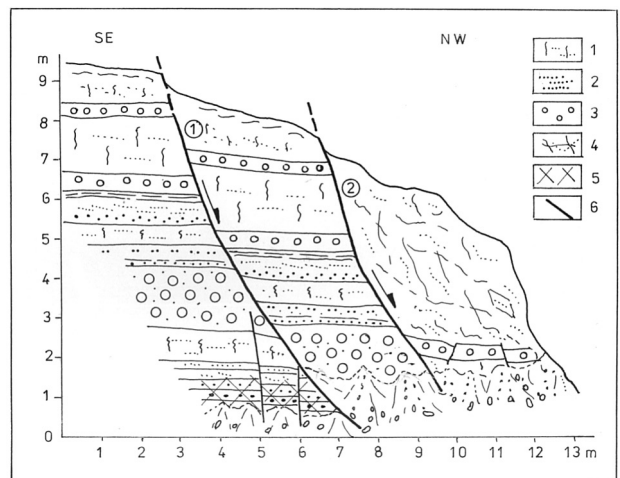
1 – tuffites, 2 – sands, 3 – gravels, 4 – faults, 5 – thrusts, 6 – fractures and joints



Ryc. 6. Uskoki w osadach stożkowych w Chivay
Fig. 6. Faults in fan sediments AT Chivay

150–160° oraz spękaniem 70–80° (ryc. 8). Wyraźniejszy jest zespół nieciągłości NW-SE, podkreślony nagromadzeniem związków żelaza wzdłuż powierzchni szczelin i uskoków. Odstępy między tymi nieciągłościami są regularne i wynoszą 2–3 m. Przemieszczenia skał wzdłuż nich są niewielkie (od paru do kilkunastu centymetrów) i mają formę niskich zrębów i płytkich rowów tektonicznych.

Około 350 m na NW od miejscowego kościoła (strefa uskoku Maca), w obrębie grubego wału koluwiów, występuje regularny zespół otwartych (do 2–5 cm) szczelin uskokowych, o podobnym biegu ich ścian (NW–SE). Mają one stromy upad (70–80°) ku SW (ryc. 9). Około 100 m dalej ku zachodowi, nad drogą do miejscowości Pinchollo, są widoczne trzy duże równoległe uskoki o zrzuconych skrzydłach ku SW. Mniej strome uskoki (ok. 65–70°) są tam normalne, o odległościach 4–5 m i wielkości zrzuć każdego ze skrzydeł po 2 m. Powstałe wówczas na powierzchni terenu krawędziowe nierówności zostały wypełnione grubszymi koluwiami, które dziś wyraźnie odróżniają się budową od pakietów międzyuskokowych. Obniżone pakiety w stronę lewego zbocza



Ryc. 7. Zuskokowana seria aluwii w Chivay
 1 – piaski i pyły, 2 – piaski, 3 – żwiry, 4 – rumosz stokowy, 5 – strefa zażelazienia osadów, 6 – uskoki
Fig. 7. Faulted alluvia at Chivay
 1 – sands and silts, 2 – sands, 3 – gravels, 4 – scree, 5 – zones of rusty-stained sediments, 6 – faults



Ryc. 8. Spękania osadów jeziornych w osuwisku Maca
Fig. 8. Joints in lacustrine sediments in a landslide at Maca

doliny Rio Colca są prawdopodobnie jednym ze skrzydeł tektonicznego rowu, o ustalonym już przebiegu uskoku skrzydła przyboczowego (Zaba, Małolepszy 2008a).

Interpretacja założeń i aktywności badanych uskoku na tle tektoniki regionu

Z analizy cech geometrycznych opisanych uskoku wynika, że powstały one w złożonym polu naprężeń i nie są równoległe. W dodatku ich orientacja kierunkowa, wartości i kierunek upadu płaszczyzn są lokalnie zróżnicowane (tab. 2).

Uskoki w odsłonięciu Madrigal 1 mają zrzucone skrzydła w kierunku przeciwnym do nachylenia terenu, co dowodzi raczej tektonicznego niż grawitacyjnego impulsu genetycznego. Ich wiek jest młodszy od zdeformowanej nimi serii zwirowej, położonej dziś 200 m nad korytem Rio Colca, a dawniej w poziomie dna zapadliska. Wysokość hipsometryczna (poziom VI) i korelacja z poziomami zazębającymi się z potokami lawowymi formacji Andahua koło Chivay (Eash,

Sandor 1995) wskazuje na młodoplejstocenijski wiek uskoku (Kalicki, Kukulak 2008c, w druku). Uskoki te są zapewne częścią strefy dyslokacyjnej ograniczającej od północy zapadlisko wykorzystywane przez Rio Colca koło Madrigal. Strefa ta jest czynna prawdopodobnie od miocenu, kiedy rozpoczęła się tektoniczna przebudowa fałdowych struktur andyjskich. Zachodni skraj doliny Rio Colca jest generalnie gęsto i krzyżowo uskokuwany (Paulo, Gałaś 2005, Kalicki, Kukulak 2008a).

Do przebiegu tej strefy ku wschodowi nawiązuje również strukturalna rzeźba w Madrigal 2. Powstały tam rów tektoniczny (martwa dolina), zdeformowany poprzecznym uskoku, jest śladem silnego uskoku północnego obrzeża doliny Rio Colca. Rów ten przylega od północy do wysokiego stoku, jego uskoki mogą należeć do uskoku granicznych zapadliska. Jest możliwe, że stok ten uformował się na powierzchni brzeżnego uskoku aż po miejscowość Lari. Mogą na to wskazywać trapezoidalne czoła bocznych grzbietów międziodolnych. Podobnie jak w Madrigal 1 położenie rowu przypada na pogranicze najwyższych poziomów osadów jeziornych (plejstocenijski poziom VI około 300 m nad korytem Rio



Ryc. 9. Młode szczeliny w koluwiach osuwiska w Maca
Fig. 9. Young fractures in colluvium of the landslide at Maca

Colca) (Kalicki, Kukulak 2008c, w druku). W osadach tych bliżej dna doliny powstały rozległe, progowe osuwiska, wykorzystujące m.in. uskoki o podobnym przebiegu (Żaba, Małolepszy 2008b).

Do uskoków granicznych zapadliska należą niewątpliwie deformacje osadów jeziornych w Coporaque 1. Nawiązuje do nich nie tylko kontakt różnych

litologicznie i wiekowo skał, ale również prostoliniowy przebieg stromego stoku. Antytetyczność uskoków sugeruje, że ich młodszy etap aktywności może być natury grawitacyjnej. Jednak o głębokim założeniu tych uskoków świadczy m.in. miejscowa obecność trawertynu i obfitych źródeł.

Tabela 2. Parametry badanych uskoków (położenie w stopniach)

Table 2. Parameters of studied trenches (location in degree)

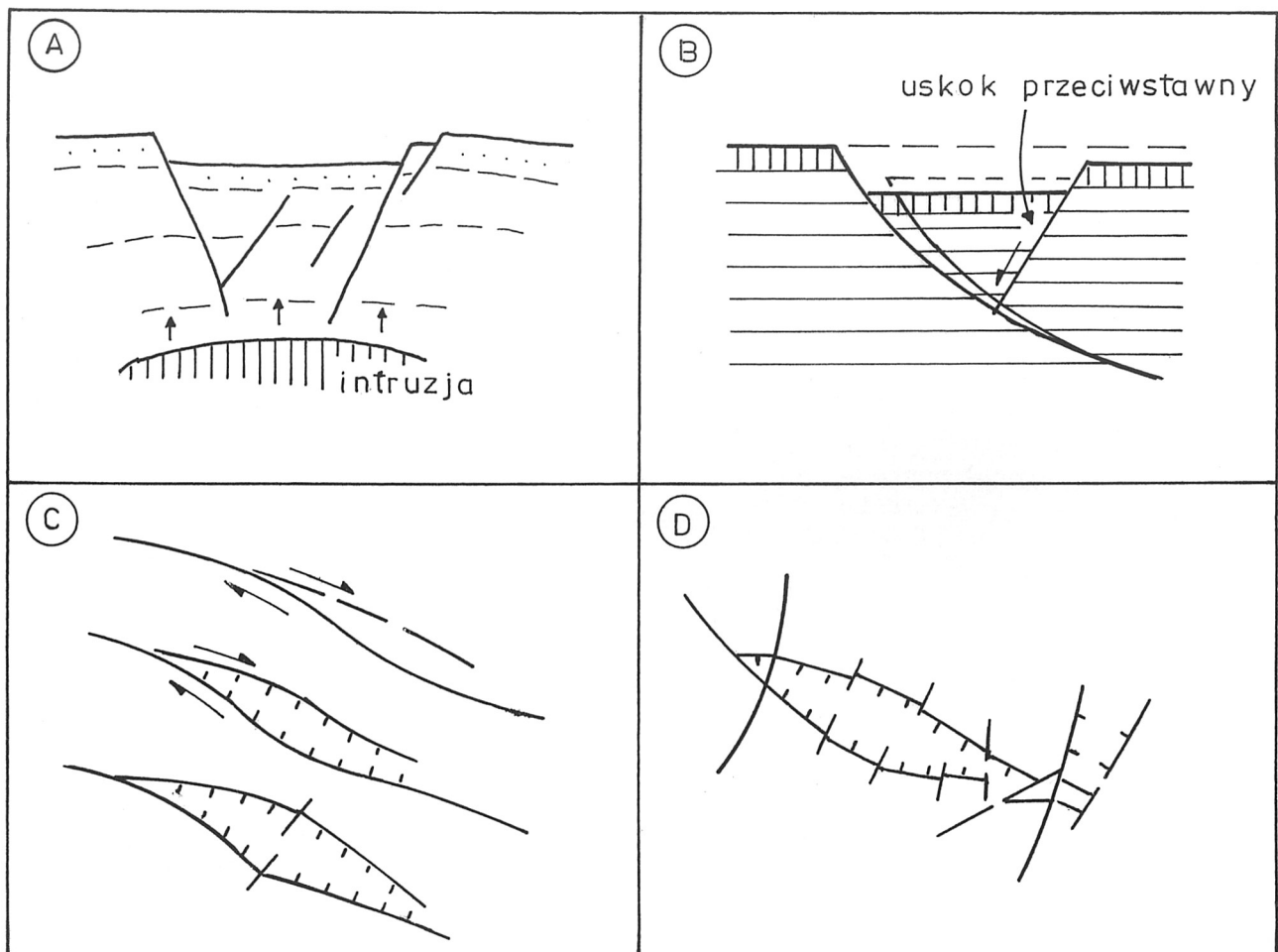
Lokalizacja	Bieg	Upad	Kierunek upadu	Rodzaj uskoków
1. Madrigal 1	115–120	70–90	NNW–SSE	antytetyczne normalne – odwrócone
2. Madrigal 2	110, 115	20–30	ok. 90	pionowe pionowe normalno-zrzurowe progowe
3. Coporaque 1	50	80	WE	antytetyczne normalne
4. Coporaque2	120–130	70–80 ok. 90	SSE pionowe	homotetyczne – antytetyczne normalne
5. Chivay	20–30	60–75	NW	normalno-zrzurowe, szuflowe
6. Maca	150–160 70–80 130–150	ok. 90 ok. 90 70–80	pionowe pionowe SW	normalno-zrzurowe

W odsłonięciu Coporague 2 deformacje osadów jeziornych są skomplikowane i w całości można je uznać za strukturę brekcyjową. Uformowała się ona w słabo spoiwystych skałach wzdłuż wielkiego uskoku przy granicy zapadliska. Jej założenia sięgają czasów przed włożeniem w plioceńsko-dolno-czwartorzędową serię limniczną młodoplejstocenijskich żwirów potężnego stożka Rio Cantumayo, którego osady zajął się z potokiem lawowym datowanym na 64 ka BP (Eash, Sandor 1995, Kalicki, Kukulak 2008c, w druku). Obecność szczelin w brekcyjowej strukturze wskazuje na jej odmładzanie.

Na uskoku obwodowym rowu Rio Colca znajduje się także stanowisko w Chivay. Bieg odsłoniętych tam uskoku nawiązuje do wschodniego ograniczenia dna tego rowu. Wzdłuż tej granicy na skrzydle wisiącym są wysoko zawieszony wyloty bocznych dolin. Miejscowe uskoki mają głębokie założenia. Wskazuje na to ciągnąca się równoległe do granicy morfologicznej linia wypływów wód termalnych, które spowodowały silne, lokalne zażelazienie osadów.

Deformacje osadów jeziornych i koluwiów w Maca są najbardziej zróżnicowane kierunkowo i zapewne różnowiekowe. Obok współczesnych szczelin i uskoku w koluwiach są również obecne spękania i uskoki starsze, pogrzebane pod młodszymi koluwiami. Ich skomplikowaną sieć i generacje wiekowe w zachodniej części osuwiska przedstawił w swej pracy Żaba i Małolepszy (2008a 2008b).

Obserwowane uskoki w osadach jeziornych mają głównie cechy uskoku zrzuwowych. Krzywizna i nachylenie ich powierzchni ku dołowi nie są jednak pewne. Ich geometryczne parametry i rozciągłość na obwodzie doliny Rio Colca wskazują, że dolina jest tektonicznym zapadliskiem. Jest ona w zarysie podłużnym wielobokiem, zrzuconym uskokami w stosunku do otoczenia. Zapadlisko to składa się z częściowych rowów tektonicznych. Na planie tego zapadliska (ryc. 10) obwodowe uskoki nie mają bowiem stałego kierunku na całej jego długości. Występują lokalne załamania ich biegu i przemieszczenia poziome odcinków. Przerwanie ciągłości uskoku spowodowały uskoki poprzeczne do osi zapadliska.



Ryc. 10. Modele rozwoju zapadliska (rowu tektonicznego) Rio Colca

A – z wypiętrzeniem nad intruzją „balonową”, B – z uskukiem przeciwstawnym, C – typu „releasing bend”, D – zarys obecnego zapadliska Rio Colca

Fig. 10. Models of the Río Colca graben evolution

A – with uplift above a ballooning pluton, B – halfgraben, C – releasing bend type, D – outline of the present-day Río Colca graben

Segmenty zapadliska rozdzielone tymi właśnie uskoki zostały obniżone głębiej lub płycej i tworzą w budowie całego zapadliska wyraźne struktury schodowe lub zrębowe. Tym można tłumaczyć powierzchniowe zwężenia i rozszerzenia doliny oraz lokalne zmiany kierunku jej podłużnej osi.

Taki kształt zapadliska dopełniają lineamenty wyznaczone podczas bezpośredniej obserwacji terenu oraz w oparciu o zdjęcia satelitarne i mapy topograficzne (ryc. 10). Załomowy lub z występami przebieg granicy dna doliny i jej zboczy, prostoliniowość tych odcinków i progowy profil zboczy sugerują ich naturę uskokową. Wiążą one odcinki zboczy doliny założone na uskokach stwierdzonych.

Podsumowanie

Z całościowego układu uskoków granicznych zapadliska wynika, że ma ono kształt rowu o zarysie szeroko rozwartej litery V, której jedno ramię tworzy rów powyżej Chivay o kierunku NNE–SSW, a drugie poniżej miejscowości Achoma (Achoma–Madrigal) o przebiegu NW–SE. Oba ramiona połączone są odcinkiem przełomowym pomiędzy miejscowościami Yanque–Achoma, powstałym na strefie dyslokacyjnej (Kalicki, Kukulak 2008a, b).

Przedstawione uskoki są jednymi z wielu w dolinie Rio Colca. W skałach mezozoicznych najstarsze uskoki wykazują przebieg bardziej południkowy, nieco młodsze są uskoki przesuwcze o orientacji NE–SW oraz NW–SE, które po miocenie uległy transformacji w uskoki normalno-zrzutowe (Żaba, Małolepszy 2008a b). Wzdłuż nich nastąpiły duże przemieszczenia pionowe starszego podłoża. Uskoki te kontynuują się w osadach jeziornych zapadliska, a nawet w koluwiach, co świadczy o ich aktywności także w czwartorzędzie.

Aktywność ta wiąże się zapewne z silną i częstą sejsmicznością tej części Andów (Bulmer i in. 1999). Odnawianie dawnych i powstawanie nowych struktur nieciągłych łączy się z występującymi tu często tektonicznymi trzęsieniami ziemi oraz z wstrząsami ziemi natury wulkanicznej, związanej m.in. z aktywnością pobliskiego wulkanu Sabancaya (Antayhua i in. 2001, 2002).

Generalny rys tektoniki analizowanego terenu może być wiązany z różnymi modelami geotektonicznymi (ryc. 10). Ponieważ w zapadlisku Rio Colca występują uskoki zarówno normalne, jak i odwrócone, a krzywizny ich powierzchni są odsłonięte jedynie w części przypowierzchniowej, jednoznaczne stwierdzenie, która z hipotez jest prawdziwa, jest trudne.

Pierwsza z nich zakłada (Closs 1936), że przyczyną utworzenia się zapadliska było aktywne rozciąganie powierzchni nad powstałą w podłożu dużą intruzją magmy (ryc. 10A). Gdy intruzja ma kształt „balonowy”, nadległe skały podlegają tensyjnemu

rozrywaniu i dochodzi do uskokowego, grawitacyjnego obniżenia strefy najbardziej naprężonej, powstaje tam rów tektoniczny. Cechą charakterystyczną rowów tak utworzonych jest ich symetryczność oraz ostro zarysowane krawędzie, co w przypadku doliny Rio Colca jest szczególnie wyraźne od strony południowej. Krawędź północna rowu Rio Colca ma profil bardziej schodowy, co z kolei jest zgodne z przyjęciem modelu rowu przyuskokowego z uskokiem przeciwstawnym (Bogacz 1967) (ryc. 10B). Uskok przeciwstawny (lub ich zespół) byłby uskokiem towarzyszącym uskokowi głównemu (od strony południowo-zachodniej rowu) i wzdłuż niego nastąpiły pochodne, schodowe przemieszczenia skrzydeł (od strony północno-wschodniej). W tym modelu oba uskoki rowu mają powierzchnie nachylone ku osi rowu. Model rowów z uskokiem przeciwstawnym jest w zgodności z wcześniejszą koncepcją intruzji, która tworzenie takich uskoków również zakłada (Sanford 1959, Jaroszewski 1981). Możliwość takiej genezy rowu Rio Colca jest duża, bowiem ta część Andów cechuje się od miocenu wyjątkową aktywnością tektoniki intruzywnej, zwłaszcza zjawisk wulkanicznych (Megard 1984, Macedo-Sanchez i in. 1992, Mercier i in. 1992, Paulo 2008).

W kolejnym modelu powstanie rowu byłoby efektem rozwarcia się szczeliny uskoku przesuwczego o przebiegu łukowym lub falistym, gdy zmianie ulega położenie pola naprężeń tektonicznych (ryc. 10C). Rozsuwające się skrzydła na pewnych odcinkach takiego uskoku ułatwiają zapadanie się skorupy pomiędzy jego powierzchniami i tworzenie się rowów (Gzowski 1953, Blick, Biddle 1985, Birkenmajer 1985). Uskoki stają się wówczas przesuwczo-zrzutowymi. Wygięcie uskoku przesuwczego (pierwotnie prostego na łukowy) może być późniejsze w wyniku lokalnej zmiany reżimu naprężeń, a powstające struktury typu „releasing bend” stają się zapadliskami o uskokowanych, także poprzecznie, skrzydłach (Crowell 1974, Pomianowski 1995). W przypadku zapadliska Rio Colca dyslokacją przesuwczą jest potężna strefa uskokowa w jego południowo-zachodnim obrzeżeniu (Madrigal-Maca) (Mapa... 2001, Żaba, Małolepszy 2008a), czynna do dziś podczas trzęsienia ziemi.

Powstanie zapadliska może być również wyjaśniane na gruncie hipotezy o ukształtowaniu się rowu jako ubocznego następstwa aktywności uskoków przesuwczych, w warunkach niejednakowej siły tarcia powierzchni ich skrzydeł, gdy te nie przebiegają równolegle do osi naprężeń poziomych (Lensen 1958).

Utworzenie się zapadliska Rio Colca (ryc. 10D), podobnie jak i innych wielkich zapadlisk andyjskich, jest zapewne uwarunkowane intensywnym wypiętrzaniem gór. Efektem pionowych przemieszczeń części skorupy ziemskiej są bowiem liczne uskoki (zarówno normalne, jak i odwrócone), wzdłuż których od neogenu tworzą się grawitacyjne rowy i zręby

tektoniczne (Hafner 1951, Sanford 1959, Chain 1974). Dotychczasowe badania uskoków w dolinie Rio Colca nie pozwalają na jednoznaczną odpowiedź, który z wymienionych powyżej modeli geotektonicznych jest prawdziwy. Stwierdzono jedynie różne generacje wiekowe uskoków i wielofazowy ich rozwój (Żaba, Małolepszy, 2008a). Zaburzenia tektoniczne osadów wypełniających to zapadlisko dowodzą, że uskoki w jego obrębie były aktywne także w czwartorzędzie. Jest możliwe, że nawiązują one do orientacji narzuconej im przez starszy plan tektoniczny i są jego przedłużeniem w młodszym piętrze strukturalnym. Świadczą one równocześnie o odmładzaniu się tych uskoków.

Literatura

- Antayhua Y., Tavera H., Bernal I., 2001. Análisis de la ctividad Sismica 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. Localizacion hipocentral y características dela fuente de los simos de Maca (1991), Sepina (1992) y Cabanacode (1998), Región del Volcán Sabancaya (Arequipa). *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, 93: 63–72.
- Birkenmajer K., 1985. Major strike-slip faults of the Pieniny Klippen Belt and Tertiary rotation of the Carpathians. *Publ. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sci. A-16*, 175: 101–115.
- Blick N., Bidlle K.T., 1985. Deformation and basin formation along strike-slip faults. *Society of Economic Palaeontologists and Mineralogists Spec. Publ.*: 37: 1–34.
- Bogacz K., 1967. Budowa geologiczna północnego obrzeżenia rowu krzeszowickiego. *Prace Geol. PAN w Krakowie*, 41.
- Bulmer M.H., Johnston A., Engle F.C., Salas G., 1999. Seismically triggered slope failures in the Colca Valley, Southern Peru. *EOS. Translations, American Geophysical Union*, Spring, H41A-07, 127.
- Chain W.J., 1974. *Geotektonika ogólna*. Wydaw. Geol., Warszawa.
- Closs H., 1936. *Einführung in die Geologie*. Borntraeger, Berlin.
- Crowell J.C., 1974. Origin of late Cenozoic basins in southern California. W: W.R. Dickinson (red.), *Tectonics and Sedimentation. Society of Economic Palaeontologists and Mineralogists Spec. Publ.* 22: 190–204.
- Eash N.S., Sandor J.A., 1995. Soil chronosequence and geomorphology in a semi-arid valley in the Andes of southern Peru. *Geoderma* 65: 59–79.
- Gałaś A., Paulo A., 2005. Karłowate wulkany formacji Andahua w południowym Peru. *Przeł. Geol.* 53: 320–326.
- Gzowskij M.W., 1953. *Wolnistost prostiranja krupnych tektonicznych razrywow*. Izwiesti AN CCCP, ser. Geofiz. 2.
- Hafner W., 1951. Stress distributions and faulting. *Bull. Geol. Soc. Am.* 62, 4.
- Hsu J.T., 1992. Quaternary uplift of the Peruvian coast related to the subduction of the Nazca Ridge: 13.5 to 15.6 degrees south latitude. *Quaternary International* 15–16: 87–97.
- Jaillard E., Soler P., 1996. Cretaceous to Early Paleogene tectonic evolution of the northern Central Andes (0–18°S) and its relations to geodynamics. *Tectonophysics* 259: 41–53.
- Jaroszewski W., 1981. Tektonika uskoków. W: *Tektonika uskoków i fałdów*. Wyd. Geol. Warszawa: 91–217.
- Kalicki T., Kukulak J., 2008a. Czwartorzędowa ewolucja doliny i kanionu Colca – raport z badań geomorfologicznych wykonanych w roku 2006. *Kwartalnik AGH. Geologia* 34, 2/1: 55–81.
- Kalicki T., Kukulak J., 2008b. Formowanie sieci rzecznej zachodniego skłonu Andów Peruwiańskich na przykładzie doliny Rio Colca. W: E. Gariat, E. Smolska (red.), *Rekonstrukcja dynamiki procesów geomorfologicznych – formy rzeźby i osadów*: 245–257.
- Kalicki T., Kukulak J., 2008c. *Ewolucja rzeźby doliny Rio Colca w Andach Środkowych*. Prace Paleogeografii Czwartorzędu Polskiej Akademii Umiejętności. Kraków (w druku).
- Leffler L., Stein S., Mao A., Dixon T., Ellis M.A., Ocola L., Selwyn Sacks I., 1997. Constraints on present-day shortening rate across the central eastern Andes from GPS data. *Geophysical Research Letters* 24, 9: 1031–1034.
- Lensen G.J., 1958. A method of graben and horst formation. *Jurn. Geo.* 66, 5.
- Mapa geológico del cudràngulo de Chivay (actualizado) 1:100 000 (digital)*, 2001. INGEMMET.
- Megard F., 1984. The Andean orogenic period and its major structures in central and northern Peru. *Journal of the Geological Society* 141, 5: 893–900.
- Macedo-Sanchez, O., Surmont J., Kissel C., Mitouard P., Laj C., 1992. Late Cainozoic rotation on the Peruvian Western Cordillera and the uplift of the Central Andes. *Tectonophysics* 205: 65–77.
- Mercier J.L., Sébrier M., Lavenu A., Cabrera J., Beller O., Dumont J.F., Machare J., 1992. Changes in the tectonics regime above a subduction zone of Andean type: The Andes of Peru and Bolivia during the Pliocene-Pleistocene. *Journal of Geophysical Research*, 97, 11 B8: 945–982.
- Ollier C., 1987. *Tektonika a formy krajobrazu*. Wyd. Geol., Warszawa.

- Paulo A., 2008. Zarys budowy geologicznej Kordyliery Zachodniej południowego Peru. *Kwart. AGH Geologia* 34, 2/1: 35–53.
- Pomianowski P., 1995. Budowa depresji orawskiej w świetle analizy wybranych materiałów geofizycznych. *Annales Societatis Geologorum Poloniae* 64: 67–80.
- Sanford A.R., 1959. Analytical and experimental study of simple geologic structures. *Bull. Geol. Soc. Am.* 70, 1.
- Sébrier M., Lavenu A., Fornari M., Soulas J., 1988. Tectonics and uplift in Central Andes (Perú, Bolivia and Northern Chile) from Eocene to present. *Géodynamique* 3: 85–106.
- Thouret J.-C., Finizola A., Fornari M., Legeley-Padovani A., Suni J., Frechen M., 2001. Geology of El Misti volcano near the city of Arequipa, Peru. *Bulletin of the Geological Society of America* 113, 12: 1593–1610.
- Zeilinger G., Schlunegger F., 2007. Possible flexural accommodation on the eastern edge of the Altiplano in relation to focussed erosion in the Rio La Paz drainage system. *Terra Nova* 19: 373–380.
- Żaba J., Małolepszy Z., 2008a. Aktywność uskoków w Dolinie Colca w rejonie Pinchollo – Maca, Andy Środkowe, Południowe Peru. *Kwart. AGH, Geologia* 34, 2/1: 83–106.
- Żaba J., Małolepszy Z., 2008b. Zagrożenia osuwiskami związane z aktywnością tektoniczną w rejonie Rio Colca, Peru. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi* 34, 2/2: 117–134.