

Karłowate wulkany formacji Andahua w południowym Peru

Andrzej Gałaś*, Andrzej Paulo*



A. Gałaś



A. Paulo

Dwarf volcanoes of Andahua Formation in South Peru. *Prz. Geol.*, 53: 320–326.

Summary. In July 2003 and 2004 small groups of geologists of AGH — The University of Science and Technology in Kraków investigated recent Andahua volcanic formation of Southern Peru. It was identified first some 45 years ago but its extension is not definitely determined yet. Field work resulted in discovery of about 100 individual emission centres: apparent pyroclastic cones 50–300 metres high, and usually smaller lava domes and vents by controlled fractures. Morphology of the Andahua lava flows coalescing into composite lava fields as well as criteria for their stratigraphy and tectonic controls are given.

Key words: lava flow, lava dome, pyroclastic cone, Andahua Formation, volcanic hazard

Z inicjatywy grupy pracowników i studentów Wydziału Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH w 2004 r. została zorganizowana wyprawa naukowa do Peru. Wzięli w niej udział: Sławomir Bębenek, Mariusz Krzak, Anna Kukuła-Góral, Michał Wasilewski i autorzy niniejszego artykułu. Prowadzone badania związane są z inicjatywą przygotowania dokumentacji przyszłego Parku Narodowego Kanion Colca. Kanion Colca zdobyli i odkryli dla Peru i świata uczestnicy Polskiej Akademickiej Wyprawy Kajakowej CANOANDES '79 z Krakowa. Teraz kanion Colca stał się jedną z największych atrakcji turystycznych Peru (Majcherczyk, 2002).

Pomysł utworzenia parku narodowego ma również polski rodowód. Z inicjatywą badań przyrodniczych, zmierzających do utworzenia Parku Narodowego Kanion Colca, na prośbę jednego z odkrywców, wystąpiła polska sekcja ekskluzywnego *The Explorers Club*. Udokumentowanie warunków geologicznych, walorów i zagrożenia jest istotnym elementem badań wstępnych, które z pewnością będą miały znaczenie międzynarodowe. Władze regionalne z uznaniem przyjęły polską inicjatywę i patronowały zarówno naszej wyprawie rekonesansowej w roku 2003 (Gałaś i Paulo), jak i badaniom w roku 2004, w ramach których realizowaliśmy dwa tematy: *Współczesny wulkanizm w otoczeniu kanionu Colca i Uwarunkowania rozwoju turystyki w rejonie Andahua (Peru)*. Celem pierwszego jest określenie genezy i stadium rozwoju formacji Andahua (w nowych dokumentach administracyjnych używa się też pisowni Andagua) oraz zagrożenia dla obszarów zamieszkałych. Badania te są koordynowane z międzynarodowym projektem *Oceana zagrożenia wulkanicznego na terytorium Peru*, prowadzonym pod kierunkiem prof. J-C. Thoureta z Uniwersytetu B. Pascala (Francja). Drugi temat eksponuje walory turystyczne tego ubożego regionu. W 2004 r., witając się z gubernatorem Arequipy i wójtem Andahua, przekazaliśmy na ich ręce około 1000 folderów informujących o atrakcjach Doliny Wulkanów (ryc. 1**). Zawarto umowę o współpracy AGH z Uniwersytetem San Augustin w Arequipie. Obie wyprawy polskich geologów do południowego Peru dowiodły, że prócz gotowości do współpracy, wyrażonej w dokumentach formalnych, można tu spotkać życzliwość i serdeczne przyjęcie.

*Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Akademia Górniczo-Hutnicza, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, polux@geol.agh.edu.pl, paulo@geol.agh.edu.pl;

**ryc. 1 i 2 patrz str. 266

Charakterystyka regionu

Kanion Colca, o długości 120 km, przecina Kordyliere Zachodnią Andów i wrzyna się ponad 3000 metrów w głąb Ziemi. Został on wpisany do Księgi Rekordów Guinnessa jako najgłębszy kanion świata (ryc. 2**, 3 i 4). Jest on znacznie węższy i dwukrotnie głębszy od Wielkiego Kanionu Kolorado.

Sekwencja warstw na stromych ścianach kanionu tworzy swoisty tort i zasługuje na uwagę. Oprócz zmienności litologicznej widoczne jest tu oddziaływanie różnych procesów, m.in. magmowych, tektonicznych i erozyjnych.

W pewnym miejscu północna ściana kanionu obniża się do 600 metrów i łączy się ukośnie z rowem tektonicznym Doliny Wulkanów. Jest on wypełniony neogeńskimi ignimbrytami i przykryty pokrywą plejstocenijskich law formacji Andahua (Caldas i in., 2001). Lawy te spadają zakrzepłą kaskadą na dno kanionu i są przecięte uskokiem podłużnym, względem przebiegu doliny i kierunku płynięcia law, o zrzucie około 100 m. Wyżej w dolinie nawierającą się potoki lawowe, najeżone licznymi karłowatymi stożkami, tworzą zwarte pole (ryc. 5). Najbardziej malowniczy krajobraz występuje w okolicy puebla Andahua, liczącego ponad 1000 mieszkańców.

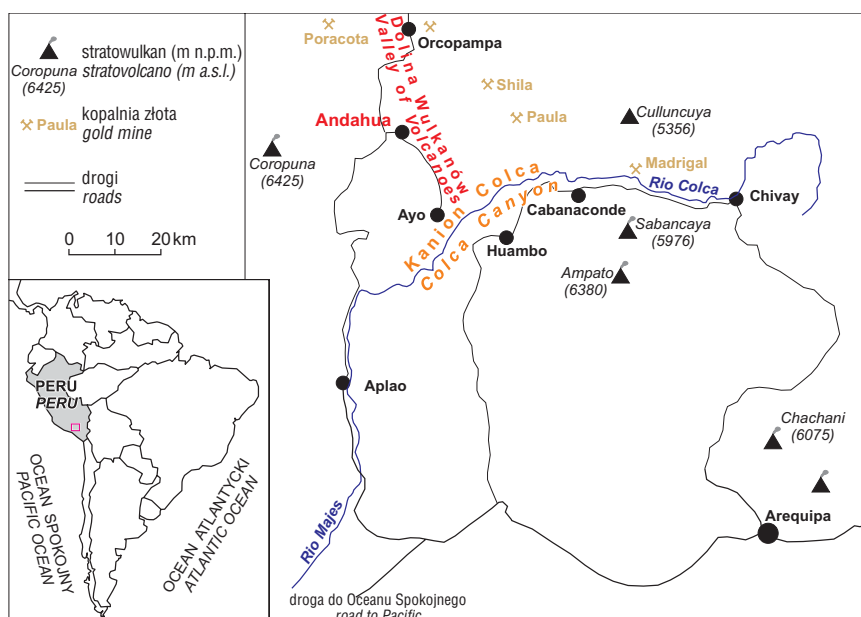
Formacja Andahua została wyróżniona niedawno (Portocarrero, 1960) i należy do najmniej zbadanych. Pierwsze fotografie tajemniczych wulkanów ukazały się w 1934 r. w *National Geographic*, towarzysząc relacji lotników amerykańskich, Shippego i Johnsona, którym udało się wylądować w ...zapomnianej dolinie Peru. Badania geochemiczne (Venturelli i in., 1978; Delacourl, 2002) wykazały specyfikę omawianych wulkanitów i różnice w stosunku do produktów wielkich stratowulkanów środkowoandyskiej strefy wulkanicznej.

Czy to możliwe w czasach dynamicznego rozwoju techniki, by najgłębszy kanion świata i najmłodsza formacja wulkaniczna Peru pozostały niezbadane? Odpowiedź jest prosta: do niedawna nieprzebrany kanion skutecznie oddzielał cywilizowany świat od Doliny Wulkanów. Dopiero na przełomie XX i XXI wieku zbudowano drogę łączącą pobliskie kopalnie złota z Arequipą. Droga ta liczy około 370 km, wspina się na przełęcz, leżącą na wysokości 4900 m n.p.m. u podnóża lodowej czapy stratowulkanu Coropuna (6430 m), by wkrótce zejść karkołomnymi serpentynami na poziom 3600 m — do Andahua.

Okolica jest pustylna, najeżona kaktusami. Zamieszkuje ją około 11 000 ludzi, uprawiających małe poletka,



Ryc. 3. Mapa okolic kanionu Colca
Fig. 3. Canyon Colca region



Ryc. 4. Ujście Rio Mamacocha w Dolinie Wulkanów do kanionu Colca. Fot. A. Paulo
Fig. 4. Confluence of the Rio Mamacocha in the Valley of the Volcanoes and the Colca Canyon. Photo A. Paulo



hodujących bydło lub pracujących w kopalniach. Niedawno poprowadzono tędy transandyjską linię elektryczną wysokiego napięcia, wprowadzono bezprzewodowy telefon, a obecnie instaluje się Internet ...

Utrwalając dorobek Polaków

Nasze działania zmierzają pośrednio do ugruntowania dorobku naukowego i eksploracyjnego Polaków w Peru oraz tworzenia klimatu do wzajemnej współpracy. Dobre imię Polski wiąże się w tym kraju z nazwiskami inżynierów: Ernesta Malinowskiego (1818–1899), Edwarda Habicha (1835–1906), Aleksandra Babińskiego (1823–1899), Władysława Folkierskiego (1842–1904) i Stanisława Dunin-Borkowskiego (1932–). Obecnie w Peru znakomite rezultaty mają badania Andyjskiej Misji Archeologicznej (AMA) Uniwersytetu Warszawskiego — *Proyecto Arqueológico Condesuyos*. Badania AGH znalazły wsparcie organizacyjne kierownika AMA, prof. Ziółkowskiego. Współ-

praca i wymiana doświadczeń tych dwóch jednostek przynosi obopólne korzyści i może zaowocować nowymi osiągnięciami.

Formacja Andahua

Do tej pory, mimo postępu badań, zasięg formacji Andahua ani centra erupcji nie zostały definitywnie określone. Jest to bowiem teren trudno dostępny, na ogół bezwodny, wysokogórski, leżący w strefie 1400–5200 m n.p.m.

Po dwóch sezonach badań terenowych (w lipcu, który jest tam pełnią zimy) wiemy, że nie dotarliśmy do kresu zasięgu formacji i nie poznaliśmy wszystkich form wulkanicznych. Wulkanity Andahua ciągną się z przerwami na obszarze o długości ponad 120 km i szerokości 5–10 km. Lawy zwartą pokrywają wypełniają dolinę między Orcopampa, Poracota i Ayo oraz płaskowyż między Huambo a Cabanaconde (ryc. 5). Nawet pole lawy koło kopalni Arcata oraz krater i mały stożek eksplozywny Cerro Nicholson, leżący blisko Arequipy, należy zaliczyć do formacji Andahua.



Ryc. 5. Wulkan Chilcayoc Grande i potoki lawowe w środkowej części Doliny Wulkanów. Fot. A. Paulo
Fig. 5. Chilcayoc Grande volcano and lava flows in the middle part of the Valley of the Volcanoes. Photo A. Paulo

Zasięg wiekowy formacji Andahua jest stopniowo precyzowany. Nie ma świadków zdarzeń, przekazów ustnych ani wiarygodnych zapisów historycznych. Młodsze wylewy nastąpiły na obszarze niemal pustynnym i pozbawionym roślinności. Katalog wulkanów Simkina i Sieberta (1994) oraz źródła internetowe powołują się na geologów Sappera (1917) i Hoemplera (1962), którzy pisali o zniszczeniu przez lawę osiedla kamiennych domów, a pierwszy z nich także o aktywności w czasie panowania Inków (XIV–XVI w.).

Świeżość niektórych form wulkanicznych, tj. nikle ślady erozji i wietrzenia oraz brak pokrywy roślinnej, wskazują, że powstały one nie dawniej niż 300–400 lat temu (ryc. 6). Na starszych popiołach i żuźłowatych lawach tej samej formacji utworzyły się pylaste i brunatne gleby, osiągając nawet 0,5–1 metra grubości. Zadomowiła się tam, stosownie do strefy wysokościowej, kolczasta trawa ichu, kserofity i inne rośliny, a ludzie przekształcili ten obszar w tarasowate pola uprawne. Ponieważ gleby takie rozwijają się pod wpływem wody i dość powoli, a obecnie panuje w tej części Andów klimat suchy, wnioskujemy, że powstały one w epoce lodowcowej i towarzyszących jej cieplejszych okresach tania lodowców, a więc co najmniej 10 000 lat temu (Thouret i in., 2001b). Z badań paleontologicznych (Moscol, 2001) wynika duża zmienność klimatyczna w czasie holocenu, w tym istnienie młodego okresu wilgotnego. Dowody archeologiczne i geologiczne (Grodzicki, 1994) wskazują, że w I w. p.n.e., około roku 600 (± 140) i około roku 1000 naszej ery występowały obfite opady atmosferyczne na skutek zjawiska *El Niño*. Musiała wówczas nastąpić znaczna erozja luźnych osadów piroklastycznych.

Inny sposób pośredniego wnioskowania o wieku stożków wulkanicznych polega na pomiarach ich kształtu. Starsze powstały w epoce lodowcowej i dłużej podlegały erozji. Przemierzający żużel pełznął po lodzie, a nasyczone wodą budowle miały mały kąt tarcia wewnętrznego. Podlegały też przez tysiące lat wstrząsom sejsmicznym. Najstarsze stożki mają wysokość około 100 m; ich południowe zbocza są strome, wyrzeźbione erozją lodowca, północne są nachylone pod kątem około 10°. Powstały one w plejstocenie. Kolejne grupy wiekowe wulkanów mają coraz bardziej nachylone zbocza. Kąt nachylenia stoków zmienia się od 21–23° u tych, które powstały na przełomie plejstocenu i holocenu poniżej strefy zlodowaczonej, do 28–31°, u tych którym przypisuje się wiek późnoholoceński (Cabrera & Thouret, 2000). Najmłodsza grupa uważana jest za bliską czasów historycznych, które w Peru zaczynają się formalnie od kronik pisanych, czyli hiszpańskiej konkwisty z początkiem XVI wieku. Są to wulkany na ogół niższe od 50 metrów i bardziej strome od 31°. Powstały już w środowisku niemal pustynnym, niemal pozbawionym erozji.

Jest oczywiste, że wiązanie nachylenia zboczy stożka z klimatem oraz datowanie erozji lodowcowej w formacji położonej w górach, w kilku piętrach klimatycznych, jest dużym uproszczeniem. Inną słabą stroną opisaną wyżej morfometrycznej metody datowania jest ograniczenie jej do stożków piroklastycznych. Tymczasem większa część formacji Andahua zbudowana jest z law. Przy sporządzaniu mapy tej formacji zastosowaliśmy prosty podział na 3 grupy wiekowe: starszą, pośrednią i młodą. Starsza jest zwietrzała, wyrzeźbiona erozyjnie, pokryta roślinnością, często zamieniona na pola uprawne. Bloki lawy są gładkie, a granice dawnych potoków lawy — niewyraźne. Zazębiają się one z osadami rzecznyymi. Na lawach grupy

pośredniej powstały inicjalne gleby, które porastają niekiedy trawy, kaktusy lub krzewy. Powierzchnia młodych law jest chropowata, ostra (ryc. 6), miejsca wyciskania lawy czytelne, zbocza potoków lawowych strome, mało stabilne, a struktury płynięcia wyraźne. Rośliny nie zdążyły się zakorzenić. Ze szczeliny, z której wypływał jeden z najmłodszych potoków, Niñamama, wydobywa się siarkowodór, a na jej ścianach wytrąca się siarka rodzima i gips. Takie solfatary są uważane za przejawy aktywności wulkanicznej.

Kolejnych danych o wieku formacji Andahua dostarczają badania składu izotopowego skał i składu izotopowego węgla w resztkach roślin zwęglonych przez gorący popiół, przeprowadzone przez Kaneokego i Guevara (1984). Najstarsze skały, datowane dotąd metodą K-Ar, powstały około 800 000–300 000 lat temu. Jest to zgodne z obserwacjami geologicznymi, według których, koło Orcopampa formacja ta zazębia się miejscami z utworami glacialnymi i rozwinęła się po powstaniu kanionów. Lawy blokowały nieraz przepływ rzek. Utwory kilku młodych form, występujących koło Andahua, zbadano metodą ^{14}C . Powstały one w okresie od 4050 do około 400 lat temu (Thouret i in., 2001b). Ale z obserwacji kształtu potoków lawy, która opływała badane stożki i do dziś nie porosła kaktusami, wynika, że potoki te są jeszcze młodsze. Toteż lawy mogły płynąć w czasie, gdy Hiszpanie zawojowali imperium Inków i rozpoczął się okres zapisany w kronikach. Prawdopodobnie, do Doliny Wulkanów nie dotarł wówczas żaden kronikarz.

Wprawdzie poszczególne wulkany Andahua są krótko czynne w porównaniu z wielkimi stratowulkanami południowego Peru, to jednak niektóre z nich wybuchały niejednokrotnie. Tajemnica wczesnych stadiów ich rozwoju ukryta jest pod szczelnym płaszczem osadów piroklastycznych ostatniej fazy erupcji. Tylko z rzadka wykop drogowy lub erozja rzeczna wcinają się w stok; wówczas okazuje się, że warstwy lapilli leżą na sobie niezgodnie, a na niektórych rozwinęły się pokrywy zwietrzelinowe. Tym samym niewłaściwe jest nazywanie tych wulkanów monogenetycznymi (Cabrera & Thouret, 2000).

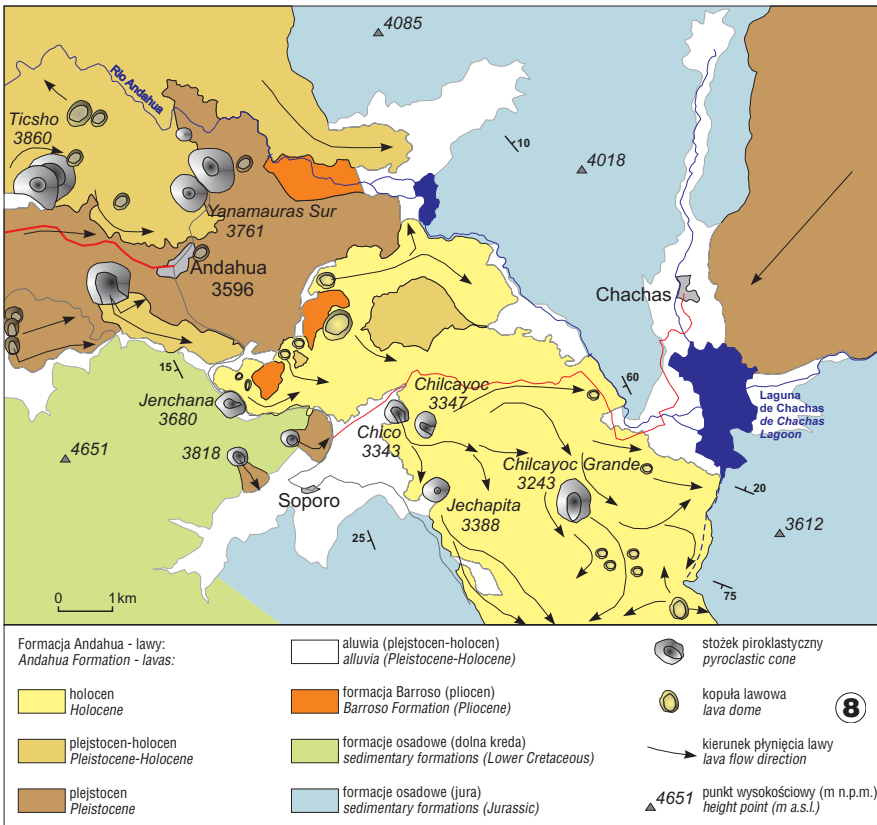
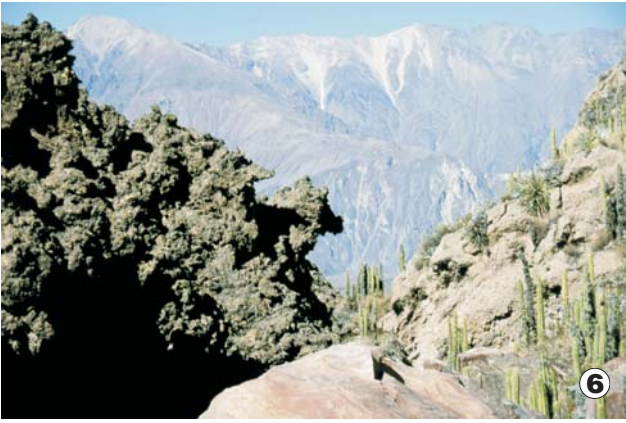
Jeśli więc jest wiele dowodów na długotrwałą i niedawną aktywność karłowatych wulkanów, to można oczekiwać ich kolejnych wybuchów. Siła sprawcza działa nadal. Jest nią podsuwanie płyty oceanicznej Nazca pod płytę Ameryki Południowej oraz wypiętrzanie Andów i pęknięcie ich na wielkie bloki.

Miejsca erupcji

Odnalezienie miejsc erupcji i jednocześnie dopływu magmy z głębi litosfery ma duże znaczenie dla ustalenia związku z budową podłoża. Pozwala także na przewidywanie zagrożeń.

Stożek zwieńczony u wierzchołka kraterem, zbudowany z bomb wulkanicznych, lapilli, popiołów (ryc. 7) oraz płaskich skorup aglomeratu, czyli bryzgów lawy spajających bomby, jest oczywistym miejscem erupcji. Takich wulkanów odnaleźliśmy 33. Niektóre z nich mają rozzerwany brzeg, a od krateru rozpoczyna się zakrzepły potok lawy, ale większość stożków wyrzucała tylko materiał piroklastyczny, czemu towarzyszyły niekiedy efuzje lawy. Świadczy to o dużym udziale gazu w produktach wulkanizmu.

Jednakże większość potoków lawowych zaczyna się od kopuły lub krótkiego grzbietu (ryc. 8). Małe kopuły ułożone



Ryc. 6. Powierzchnie potoków lawowych Andahua najmłodszej i średniej generacji. W tle neogeńskie formacje wulkaniczne. Fot. A. Paulo
Fig. 6. Surfaces of Andahua lava flows of the youngest and middle generations. Neogene volcanic formations at the background. Photo A. Paulo

Ryc. 7. Osady piroklastyczne: bomby i lapille oraz inicjalne gleby na stoku wulkanu Jenchaña. Fot. A. Paulo
Fig. 7. Coarse pyroclastic deposits and initial soils at Jenchaña volcano. Photo A. Paulo

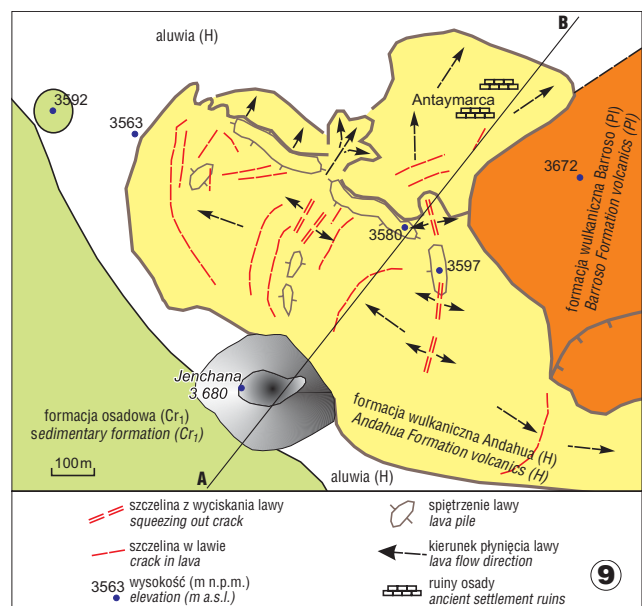
Ryc. 8. Uproszczona mapa geologiczna okolic Andahua
Fig. 8. Simplified geological map of Andahua region

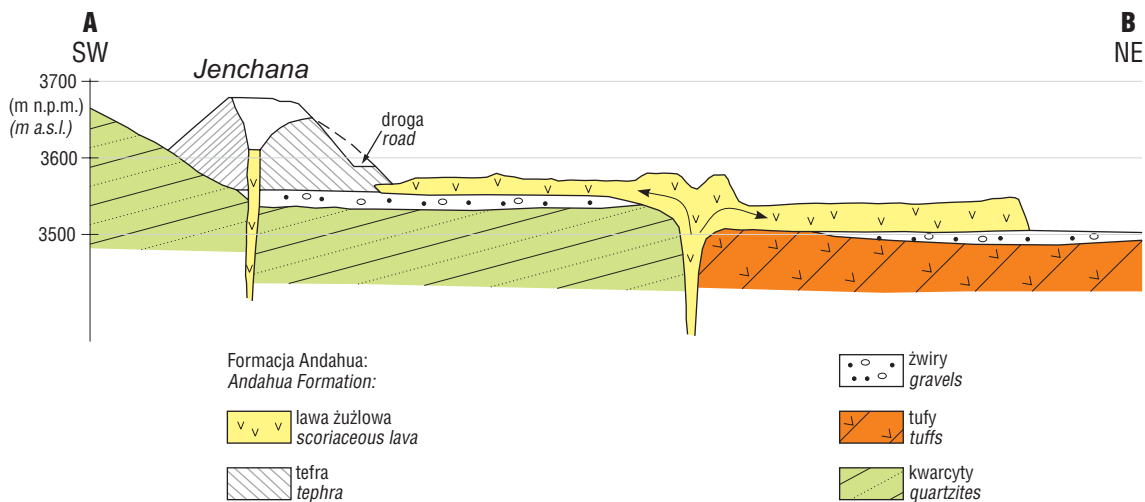
Ryc. 9. Szkic kopuły lawowej Antaymarca koło wulkanu Jenchaña
Fig. 9. Schematic draw of Antaymarca lava dome at Jenchaña foothills

są nieraz w jednej linii, co wskazuje, że lava była wyciskana ze szczeliny. Większe kopuły zawierają kilka szczelin, z których wachlarzowo wyciskana była lava, lecz po kilkunastu metrach od miejsca wypływu pękła na bloki i powierzchnia potoku przybrała postać rumowiska. Wierzchołki niektórych kopuł mają boczną depresję, na skutek cofnięcia się ostatnich porcji magmy do gardzieli, po spadku ciśnienia.

Kopuły i szczeliny eruptywne przeważają ilościowo nad stożkami piroklastycznymi — odnaleźliśmy ich 67. Na ogół dają one początek potokom lawowym, które mają długość 0,5–10 km (ryc. 9 i 10). Grubość tych potoków wynosi na ogół 10–30 m, a gdy nakładają się na siebie lub piętrzą u frontu — odpowiednio więcej. Kopuły lawowe wznoszą się na wysokość 20–150 m. Powierzchnia i objętość potoków lawowych jest zatem znacznie większa niż stożków piroklastycznych; stanowią one około 98% objętości formacji Andahua.

Porównując wiek law i tefry z różnych miejsc erupcji dochodzimy do wniosku, że działalność wulkaniczna prze-





Ryc. 10. Przekrój przez wulkan Jenchaña i kopułę lawową Antaymarca (lokalizację przekroju podano na ryc. 9 i zachowano te same oznaczenia barwne formacji)

Fig. 10. Cross-section of Jenchaña pyroclastic cone and Antaymarca lava dome (compare fig. 9)

mieszczą się z wysokiego obrzeża Doliny Wulkanów (Antapuna nad Orcopampą, okolice kopalni Shila, grzbiet między Huambo a Cabanaconde) do środkowej części tej doliny, koło Soporo i Ninaloma. Zauważmy, że erupcje następowały nie tylko w Dolinie Wulkanów, lecz także na jej krawędzi oraz na odległych płaskowyżach. Natomiast lawy spływały do doliny i tam nagromadziły się w największej masie.

Najwyżej położone centra erupcji znajdują się 4950–5180 m n.p.m., najniższe zaś — około 3000 m (opodal Sucna) oraz 2100 m n.p.m. (koło Chojetoyo). Lawy spływały aż na dno kanionu Colca, które leży tu na wysokości 1365 m n.p.m. Możliwe, że holoceni potok lawowy Queñua Rara (Weibel & Fejér, 1977), wypływający spod czapy lodowej wschodniego wierzchołka stratowulkanu Coropuna (tj. z wysokości co najmniej 5500 m n.p.m.), należy również do formacji Andahua.

Inne formacje wulkaniczne i stratowulkany

W środkowej części Andów neogen był okresem wzmożonej aktywności wulkanicznej, związanej z fazą keczuańska wypiętrzania Kordyliery Zachodniej, i towarzyszącego temu zjawisku zuskokowaniu. Miąższość wulkanitów neogenu wynosi 3000–5000 m, a aluwialnych i glacialnych osadów klastycznych, powstałych głównie w plejstocenie i holocenie — poniżej 100 m. Do regionalnie rozprzestrzenionych należy mioceńska grupa Tacaza, która składa się w przewadze z kwaśnych tufów i ignimbrytów (ryc. 11) oraz pumek-sowych potoków piroklastycznych o miąższości około 3500 m. Towarzyszą jej subwulkaniczne pnie ryolitowe i dacytowe oraz rozległe, barwne przeobrażenie skał, towarzyszące epitermalnej mineralizacji metalami szlachetnymi. Niektóre formacje pumek-sowe obfitują w obsydian.

Dolnopliocenijskie formacje wulkaniczne są znacznie cieńsze (około 100 m) i związane z tworzeniem powierzchni zrównania Puna. Grupa Barroso (300–2500 m) obejmuje potoki law andezytowych i dacytowych oraz osady laharrowe, powstałe w pozostałej części pliocenu i znacznej części plejstocenu przed ostatnim zlodowaczeniem. Jej centra erupcyjne da się zwykle powiązać ze stratowulkanami.



Ryc. 11. Neogeńskie spieczone tufy w okolicy Orcopampy. Fot. A. Kukuła-Góral

Fig. 11. Neogene welded tuffs near Orcopampa. Photo A. Kukuła-Góral

Grupie Barroso towarzyszą koluwia, moreny i luźne osady klastyczne, powstałe z ich rozmywania.

Wielkie stratowulkany południowego Peru wchodzi w skład aktywnej strefy wulkanicznej środkowych Andów. Tworzą one szereg równoległy do rowu oceanicznego, odległy od jego osi o 220–260 km i wznoszący się około 140 km ponad strefą Benioffa. Oś tej strefy ma zatem kierunek NWW. Wulkany te na ogół znajdują się na najwyższej kordylerze, górując nad podłożem 1000–3000 m. Sięgają wysokości 5200–6400 m n.p.m. Stratowulkany mają przeważnie objętość 20–100 km³, a w przypadku kilku centrów erupcyjnych nawet ponad 300 km³ (Fidel i in., 1997). Produkty ich należą do serii wapniowo-alkalicznej i wyróżniają się na tle wulkanitów północnych i południowych Andów stosunkowo wysoką zawartością alkaliów (zwłaszcza potasu) i wysokim stosunkiem izotopowym ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr (Paulo, 1988). Były one bardzo aktywne w pliocenie i plejstocenie, niektóre znajdują się w stadium solfatarowym, a tylko Ubinas, Huaynaputina, Misti i Sabancaya wyrzuciły popioły w czasach historycznych (Simkin & Siebert, 1994; Thouret i in., 1995; Rivera i in., 1998; Jara i in., 2000). W porównaniu z tymi potężnymi budowlami wulkanów z formacji Andahua to „krasnoludki”.

Związki z tektoniką

Zdaniem Caldas (1993), pokrywy lawowe i stożki piroklastyczne Andahua grupują się wzdłuż niecek i wąwozów, które mają założenie tektoniczne i powstały w wyniku regionalnej tensji wzdłuż uskoków i wcześniejszych szczelin kompresyjnych. Głębokie pęknięcie skorupy sięgało aż do komór magmowych, powodując spadek ciśnienia i podnoszenie się magmy.

Powyższy pogląd trzeba przyjąć z zastrzeżeniem. Centra erupcji nie są bowiem ograniczone do Doliny Wulkanów, lecz występują również na zrębach. Pola law w środkowej części tej doliny wydają się wypełniać pasywnie depresję, a zidentyfikowane szczeliny wiążą się z uskokiem poprzecznym do doliny.

Tektonika w tej części Andów wskazuje na następujący układ sił: rozciąganie N-S i kompresja subrównoleżnikowa, która zanika od końca plejstocenu (Mering i in., 1996). Wyróżnić można następujące trzy systemy uskoków: 1) grawitacyjny, stromy o kierunku 330–360°, który ogranicza dolinę Andahua w okolicy Poracota, Orcopampa i Ayo i jednocześnie przecina starsze potoki law Andahua (ryc. 2), 2) przesuwczy, lewoskrętny, o kierunku około 300°, powodujący wzajemne przesunięcie północnej i południowej części tej doliny, 3) grawitacyjny, pochylony ku SE, o biegu 50–60°, który zaznacza się w terenie rozwojem wąwozów. Systemy 2 i 3 są prawdopodobnie aktywne, lecz niewykluczone, że rola 2 systemu ogranicza się do osłabienia górotworu i rozwoju rzeźby dolinnej.

Ustalenie związku centrów erupcji formacji Andahua z tektoniką lokalną wymaga dalszych badań. Może mieć znaczenie praktyczne, jako pomoc w rozwiązaniu tektoniki podłoża, która ma wpływ m.in. na lokalizację i budowę złóż złota. Żyłowe złoża Au, znajdujące się w Dolinie Wulkanów i na jej obrzeżach (ryc. 3), powstały w warunkach epitermalnych. Występują one w obrębie neogeńskich formacji wulkanicznych (artykuł o złożach Au w południowym Peru ukaże się wkrótce).

Morfologia i litologia wulkanitów Andahua

Lawy Andahua są czarne lub ciemnoszare, a w strefie poniżej 3000 m n.p.m. na zwietrzałej powierzchni czerwone. Tefra stożków wulkanicznych jest w przewadze czarna, a tylko w pobliżu kraterów aglomerat bomb spojony lawą i scoria są czerwone. Popioły są czarne, nieraz z białymi warstewkami minerałów ilastych. Wszystkie te produkty cechuje znaczna porowatość, 10–40%, sięgająca w stożkach ponad 70%. W pobliżu miejsc erupcji wyciśnięte z kopał lawy blokowe są wyraźnie mniej porowate, niekiedy megaskopowo masywne, jednak w miarę oddalania się od kopał wzrasta porowatość law i przyjmują one formę żużłowatych bloków lawy typu aa. Ze starszych potoków żużłowata skorupa została już, oczywiście, usunięta przez erozję albo jest trudno dostrzegalna, ponieważ została wypełniona przez produkty wietrzenia i pokryta przez inicjalne gleby i rośliny. W kanionach rzek Andahua, Mamacocha i Colca, a także w wysokich piętrach dolin, dawniej zlodowaconych, odsłonięte są lawy masywne z wnętrza potoków.

Przy odgazowaniu powierzchnia i brzegi potoków lawowych krzepły szybciej niż ich wnętrza. Dlatego charakterystyczny przekrój poprzeczny przez potok lawowy wykazuje strome zbocza zewnętrzne (na ogół o wysokości 20–40 m), przechodzące w wąskie grzbiety najeżone kilku-

metrowymi blokami lawy. W stosunku do brzegów środek zastygłego potoku obniżony jest o 10–20 m. Środkiem potoku rzeka lawy płynęła szybciej niż przy brzegach, gdzie tracąc gaz, krzepła i pękała na żużłowate bloki. Owe bloki, transportowane jak kora na rzece, spiętrzały się u czoła stygnącego potoku. Jednocześnie opadał poziom lawy w górnej i środkowej części potoku względem zniuruchomiałych brzegów. Bardziej lepkie, ciastowate potoki żużlowej lawy, krzepnąc, tworzyły loby wałów wewnętrznych, podobnych do moren w lodowcu.

Petrografia i geochemia wulkanitów Andahua

Wśród wulkanitów Andahua przeważają skały afanitowe i porfirowe o małej zawartości fenokryształów, do 20%. Są to głównie fenoandezyty, czyli skały zawierające plagioklaz i pirokseny, a podrzędnie oliwin i (lub) hornblendę i tytanomagnetyt. W kilku miejscach występują bazalty oliwinowe i fenodacyty, czyli skały o przewadze hornblendy wśród minerałów ciemnych, niekiedy występującej w towarzystwie biotyту. Wyniki analiz chemicznych (Hoempler, 1962; Weibel & Fejér, 1977; Venturelli i in., 1978; Delacour, 2002) potwierdziły dość szeroką gamę składu: 51,8–67,9% SiO₂, przy czym większość próbek mieści się w przedziale 55–61% SiO₂, oraz 2–3% K₂O. Są to zatem wysokopotasowe andezyty (latyandezyty) i andezyty bazaltowe.

W pobliżu Andahua lawy zawierają liczne ksenolity białych kwarcytów dolnej kredy. Kwarcyty te budują wysokie zbocza doliny, a zapewne występują też na dnie rowu wypełnionego lawami.

Badania fenokryształów mikrosondą elektronową (Delacour, 2002) wykazały obecność zonalnych plagioklazów An_{63–72} w bazaltach i An_{29–49} w dacytach, a członów pośrednich labrador–andezyn w andezytach. W fenokryształach plagioklazów obserwowano strefy bogate w inkluzje szkliwa. Plagioklasy są również dominującymi składnikami mikrolitów i mikrokryształów, a ich skład jest tylko nieznacznie bardziej kwaśny od składu fenokryształów. Na podstawie tych obserwacji wnioskowano o przederuptywnym stanie magmy, bliskim likwidusu, i dość dużym udziale H₂O, rzędu 2–5%. Wśród piroksenów przeważa augit; w niektórych andezytach obecny jest też enstatyt, który tworzy otoczki na oliwinie. Oliwiny reprezentowane są przez człon magnezowy ze znaczną domieszką Cr i Ni. Amfibole, które badał Delacour (2002), miały skład Mg-hastingsytu i tschermakitu i były otoczone koronami ilmenitu oraz tytanomagnetytu.

Skały wulkaniczne niosą swoisty zapis procesów zachodzących w kilku miejscach: miejscu ich narodzenia w głębi Ziemi, w komorze wulkanicznej, gdzie magma dojrzewała, oraz na powierzchni, gdzie wędrowała i stygła. Z badań Delacoura i in. (2002) wynika, że komory magmowe wulkanów Andahua są oddzielone od komór wielkich stratowulkanów i znajdują się prawdopodobnie na głębokości 10–40 km. Ich dokładniejsza lokalizacja wymaga jednak badań sejsmologicznych.

Prognoza zagrożeń

Przebieg erupcji wulkanicznej można odczytać z ułożenia produktów wybuchu, a zwłaszcza warstw piroklastycznych. Każdy wulkan ma swoisty sposób działania, który często jest bardzo złożony, co dodatkowo komplikuje cykliczność wylewów i wybuchów. Poznanie ich pozwala

na prognozowanie typu przyszłych wybuchów. Erupcje wulkaniczne mają tak różną energię i tak różnorodny styl, że są trudno porównywalne. Wyzwalają energię kinetyczną rzędu $1 \cdot 10^{12}$ – $1 \cdot 10^{13}$ MJ i ciepłą, dochodzącą przy obfitym wypływie lawy do 10^{12} MJ. Rozmiary erupcji i zagrożenie życia są kwalifikowane przy użyciu wskaźnika eksplozywności VEI (Newhall & Self, 1982; Simkin & Siebert, 1994). Dziesięciostopniowa skala VEI (*Volcanic Explosivity Index*), jest proporcjonalna do rzędu objętości wyrzuconej tefry, n , mierzonej w km^3 .

$$\text{Stożek VEI} = (0,00001 - 0,0001) \cdot 10^n \text{ km}^3$$

Oznacza to stopień 0 dla erupcji czysto lawowych, 1 dla niektórych erupcji wulkanów hawajskich i słabych eksplozji Stromboli, 2 dla silniejszych erupcji Stromboli ($>0,001 \text{ km}^3$) itd., do 5 dla takich kataklizmów, jak wybuch St Helens w 1980 roku ($>1 \text{ km}^3$), 6 dla wybuchu Krakatau (1883 r., $>10 \text{ km}^3$), 7 dla Tambora (1815 r.) i 8 dla kaldery Yellowstone (plejstocen, $> 1000 \text{ km}^3$). Energia wybuchu bomb atomowej odpowiada w tej skali stopniowi 4.

Skala VEI nawiązuje do klasyfikacji opisowej kolumny erupcyjnej i klasyfikacji Walkera. Wyrzucanie bomb wulkanicznych z krateru i niskie kolumny konwekcyjne popiołu z lapillami uważane są za stosunkowo niegroźne. Ten typ erupcji jest podobny do współczesnej aktywności wulkanu Stromboli (VEI 1–2). Potoki lepkich law, które poruszają się zwykle z prędkością piechura lub wolniej, umożliwiają ewakuację ludzi i dobytku. Bulgotanie bardziej płynnych law w jeziorze kraterowym, a nawet fontanny bazaltowej lawy, określane stylem hawajskim, albo szerokie rozlewanie się lawy na równinie i dość szybki spływ po zboczu, charakterystyczny dla Islandii, należą również do arsenału nie najgroźniejszych broni, którymi straszy wulkan (VEI 0–1).

Podczas wybuchów piroklastycznych koło Andahua wystrzelwane z krateru rozżarzone bomby i fragmenty lawy opadały na powierzchnię stożka, a sporadycznie wokół niego w promieniu 100–1500 m. Znacznie dalej, ale tylko w smudze dyspersji towarzyszącej niektórym stożkom, można obserwować warstwy popiołu o grubości do kilku metrów. Takie fajerwerki trwały zwykle kilka dni. Jeśli zachodziły w Dolinie Andahua, nie były zauważone w innych częściach Andów. Odpowiadałoby to stopniom 1–2 (a wyjątkowo 3) VEI.

Obserwacja powierzchni potoków zakrzepłej lawy wskazuje, że spływały one powoli (stopień 0 VEI). Jeśli kopała lawowa piętrzyła się na półce płaskowyżu, niełatwo znajdowała odpływ boczny i jej zbocza mają dziś wysokość kilkudziesięciu metrów. Jeśli któreś zbocze nie wytrzymało obciążenia lawą, pozostał półkieszyńcowy rąbek kopuły i brama wylotowa, którą wypłynął potok lawy. Niektóre jezory law dotarły do rzeki i spiętrzyły ją. Erozja lawowej tamy trwała długo i nie spowodowała fali powodziowej.

Kilka miasteczek i wsi — Orcopampa, Andahua, Soporro, Chachas, Misahuanca i Huambo — leży tuż pod stożkami i kopułami wulkanicznymi. Wulkany te wydają się bezpowrotnie wygasłe. Najmłodsze centra erupcji znajdują się w odległości kilku kilometrów od najbliższych osiedli, a układ topograficzny uniemożliwiłby spływ lawy w ich kierunku, gdyby doszło do wznowienia działalności z tych miejsc. Jednakże migracja miejsc erupcji, charakterystyczna dla formacji Andahua, sprawia, że należy oczekiwać wznowienia erupcji w nowych miejscach. Będą one prawdopodobnie ułożone wzdłuż uskoku o kierunku NEE i

NWW, tj. poprzecznych i podłużnych względem środkowego segmentu Doliny Wulkanów.

Praca wykonana w ramach badań własnych AGH, nr 10.10.140.037

W imieniu wszystkich uczestników wyprawy pragniemy podziękować władzom AGH, Towarzystwu Badań Przemian Środowiska *Geosfera*, Polonijnemu Klubowi Podróżnika oraz Towarzystwu Przyjaciół Krakowa w Nowym Jorku za finansowe wsparcie badań.

Literatura

- CABRERA M. & THOURET J.-C. 2000 — Volcanismo monogenético en el sur del Perú. X Congr. Peruano de Geología, SGP Lima, Res. 186.
- CALDAS J. 1993 — Geología de los cuadrangulos de Huambo y Orcopampa. INGEMMET, Lima, Bul. 46.
- CALDAS J., LA TORRE V., LAJO A., DÍAZ J. & UMPIRE L. 2001 — Mapa geológico del cuadrángulo de Orcopampa (actualizado) 1 : 100 000 (digital). INGEMMET.
- DELACOUR A. 2002 — Etude pétrogénétique des laves des centres quaternaires mineurs dans les régions d'Andahua-Orcopampa, de Huambo et du Cerro Nicholson (Andes Centrales, Perou). DEA "Processus magmatiques et métamorphiques — Volcanologie" & Univ. B. Pascal, Clermont Ferrand, 48 p.
- DELACOUR A., PAQUEREAU P., GERBE M.-C., THOURET J.-C. & WÖRNER G. 2002 — Quaternary minor volcanic centres in southern Peru: volcanology, petrology and geochemistry. 5th ISAG, Toulouse, 175–179.
- FÍDEL S. L., MORCHE W. & NUÑEZ J.S. 1997 — Inventario de volcanes del Perú. INGEMMET Bul. 15, Lima.
- GRODZICKI J. 1994 — Nasca: Los síntomas geológicos del fenómeno El Niño y sus aspectos arqueológicos. CESLA, Studia i Materiały, 12, 114 p.
- HOEMPLER A. 1962 — Valle de volcanes de Andahua, Arequipa. Segundo Congr. Nac. de Geología Soc. Geol., Peru, Lima, 37: 59–69.
- JARA L.A., THOURET J.-C., SIEBE C. & DÁVILA J. 2000 — The AD 1600 eruption of Huaynaputina as described in early Spanish chronicles. Bol. Soc. Geol. Perú, 90: 121–132.
- KANEOKA I. & GUEVARA C. 1984 — K-Ar determinations of late Tertiary and Quaternary Andean volcanic rocks, Southern Peru. Geochimical J., 18: 233–239.
- MAJCHERCZYK J. 2002 — Zdobycie Rio Colca, najgłębszego kanionu na Ziemi. Wyd. II, Wydawnictwo AA s.c., Kraków.
- MERING C. in in. 1996 — New data on the geodynamics of southern Peru from computerized analysis of SPOT and SAR ERS-1 images. Tectonophysics, 259: 153–169.
- MOSCOL M. 2001 — La vegetación del Holoceno y los cambios climáticos en Arequipa, Cordillera Occidental, Perú. Proyecto Arqueol. Condesuyos, 1, Andes. Univ. Varsovia, 3: 241–245.
- PAULO A. 1988 — Współczesny wulkanizm i główne rysy metalogeenii Północnych Andów. Geologia, t. 14, z. 4.
- PORTOCARRERO A. 1960 — Reconocimiento geológico del Valle de Andahua. Tesis de maestro. UNSA Arequipa.
- RIVERA M., THOURET J.-C. & GOURGAUD A. 1998 — Ubinas, el volcán más activo del sur del Perú desde 1550: Geología y evaluación de las amenazas volcánicas. Bol. Soc. Geol., Perú, 88: 53–71.
- SIMKIN T. & SIEBERT L. 1994 — Volcanoes of the World — A regional directory, gazetteer and chronology of volcanism during the last 10,000 years. 2nd ed. Smithsonian Inst. Geosciences Press Inc., Washington DC, 349 p.
- THOURET J.-C., GOURGAUD A., URIBE M., RODRIGUEZ A., 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. Z. Geomorph. N.F., Berlin — Stuttgart, 39 (4): 515–535.
- THOURET J.-C., JUVIGNE E., MARIÑO J., MOSCOL M., LEGELEY-PADOVANI A., LOUTSCH I., DÁVILA J., LAMADON S. & RIVERA M. 2001b — Late Pleistocene and Holocene tephro-stratigraphy and chronology in southern Peru. Proyecto Arqueol. Condesuyos, 1, Andes. Univ. Varsovia, 3: 215–239.
- VENTURELLI G., FRANGIPANE M., WEIBEL M. & ANTIGA D. 1978 — Trace element distribution in the Cainozoic lavas of Nevado Coropuna and Andagua Valley, Central Andes of Southern Peru. Bull. Volcanol., 41 (3): 213–228.
- WEIBEL M. & FEJÉR Z. 1977 — El Nevado Coropuna, Departamento de Arequipa. Bul. de la Soc. Geol. del Perú., 57–58: 87–98.

Karłowate wulkany formacji Andahua w południowym Peru (patrz str. 320)



Ryc. 1. Wulkany Chilcayoc Grande i Jechapita (z prawej). Z zachodniego stoku Jechapita splywa krótki potok lawowy. Na pierwszym planie pola uprawne na najstarszych lawach formacji Andahua. Fot. A. Gałaś

Fig. 1. Pyroclastic cones of Chilcayoc and Jechapita (right). Short lava flow was outpoured from Jechapita western midslope. At the foreground cornfields settled on the oldest generation of the Andahua lavas. Photo A. Gałaś



Ryc. 2. Ujście Doliny Wulkanów do kanionu Colca. Potok lawowy Andahua (czerwonobrazowy kozuch), przykrywający miocenne ignimbryty (równina, cios kolumnowy) między Ayo i Rio Mamacocho, przecięty młodymi uskokami. Fot. A. Gałaś

Fig. 2. Confluence of the Valley of Volcanoes and Colca Canyon. Andahua lava flow (red-brown rough skin) covering Miocene ignimbrites (flat surface, columnar joint) in between Ayo and the Rio Mamacocho, cut through by young faults. Photo A. Gałaś