

Streszczenie

Niniejsza monografia poświęcona jest czwartorzędowej grupie wulkanicznej Andahua, która wyróżnia się charakterem aktywności, wykształceniem i prawdopodobnie genezą. Grupa ta, stosunkowo późno wyróżniona i słabo rozpoznana występuje w Kordylerze Zachodniej, w południowym Peru. Niezwykle młodą rzeźbę stożków wulkanicznych i law dostrzegli i spopularyzowali w 1934 roku amerykańscy lotnicy. Autor niniejszej monografii miał na celu analizę wielu młodych form i produktów wulkanicznych odkrytych później. Obszar badań znajduje się prawie w całości w zlewni Rio Colca, która rozcina pasmo Kordyliery Zachodniej, tworząc najgłębszy kanion na Ziemi. Rozpoznana przez wspomnianych lotników Dolina Wulkanów łączy się od północy z Kanionem Colca w połowie jego długości.

Monografia jest rezultatem badań autora prowadzonych od 2003 roku. Wpisuje się ona w nurt badań Polskiej Wyprawy Naukowej Peru, których celem jest opracowanie naukowych danych niezbędnych do stworzenia projektu Parku Narodowego Kanion Colca i Dolina Wulkanów.

W pierwszej części monografii określono zasięg powierzchniowy i wiekowy grupy Andahua, typowe formy i związki z tektoniką. Grupa ta jest rozprzestrzeniona na obszarze 12 tys. km², po obydwu stronach Kanionu Colca. Wyróżniono siedem oddzielnych regionów, w których występują pola lawowe złożone z licznych potoków, lub pojedyncze kopuły i potoki lawy oraz stożki piroklastyczne. Rozpoznano 121 kopuł lawowych i 46 stożków piroklastycznych mających w większości monogenetyczny charakter. Ich rozmiary są nieduże: wysokość kopuł nie przekracza 50 m, a stożków rzadko przewyższa 100 m. Formy morfologiczne grupy Andahua są znacznie prostsze od stratowulkanów tworzących współczesny łuk wulkaniczny Środkowych Andów.

Grupa Andahua powstaje około 1 miliona lat. Pierwsze erupcje miały miejsce co najmniej w środkowym plejstocenie, a najmłodsze formy liczą około 300 lat. Wyróżniono trzy generacje wiekowe aktywności wulkanów grupy Andahua: I starszą (plejstocen), II pośrednią (plejstocen-holocen) i III młodą (holocen i czasy historyczne).

Związki wulkanicznej aktywności omawianej grupy z tektoniką są zróżnicowane w poszczególnych generacjach wiekowych oraz w stosunku do położenia centrów erupcji względem Kanionu Colca. Początkowo podnosząca się magma wykorzystywała systemy uskoku przesuwczych o przebiegu NW-SE. Liczne, wczesne centra erupcyjne na południe od Kanionu Colca uszeregowane są wzdłuż uskoku grawitacyjnych o kierunku NE-SW, W-E i N-S. W drugim etapie erupcje następowały wzdłuż systemu uskoku NE-SW. W trzecim etapie aktywności (holocen) największe znaczenie miały uskoki przecinające poprzecznie rów tektoniczny Doliny Wulkanów i przebiegające ponownie w kierunku NE-SW.

Pod względem geochemicznym skały grupy Andahua są głównie pośrednie co do zawartości krzemionki i słabo alkaliczne. Sklasyfikowano je jako trachyandezyty oraz bazaltowe trachyandezyty i dacyty. Pojedyncze próbki mają skład bazaltów, andezytów i trachitów.

Lawy grupy Andahua zwykle są ciemnoszare i czarne. Dominujące są struktury hipokryształiczno-porfirowa i afirowo-felsytowa. Zawartość fenokryształów jest dość niska, zwykle 0–20%. Wśród fenokryształów przeważają plagioklasy, ale obecne są także oliwiny, klinopirokseny oraz hornblenda. Ciasto skalne wykształcone hyalopilitowo lub mikrokryształicznie zawiera głównie mikrolity plagioklazów, którym towarzyszą pirokseny, minerały nieprzezroczyste i w kilku przypadkach oliwiny. Tekstura jest porowata, rzadziej zbita, bezładna lub fluidalna.

Dominujące we wszystkich odmianach skał fenokryształy skaleni mają zmienne zawartości Ca. W lawach najbardziej zasadowych zazwyczaj w granicach labradoru. Większe jest w dacytach, gdzie plagioklasy reprezentują szereg andezyn-labrador. W trachyandezytach zdarza się wzbogacenie w Ca, a plagioklasy reprezentują szereg andezyn-bytownit. Fenokryształy plagioklazów wykazują słabo zaznaczoną budowę pasową najczęściej normalną a sporadycznie odwróconą.

W bazaltowych trachyandezytach rozpoznano fenokryształy oliwinów właściwych. W skałach bardziej zasadowych rozpoznano liczne klinopirokseny i sporadycznie ortopirokseny. Określono je jako augity i enstatyty. W wielu próbkach fenokryształy reprezentują wyłącznie amfibole oznaczone jako oksyhornblenda. Minerały nieprzezroczyste, głównie tlenki Fe i Ti są małych rozmiarów i wchodzi w skład ciasta skalnego. Jest ono zbudowane głównie z mikrolitów plagioklazów z pewną ilością piroksenów i szkliwa.

Analizy chemiczne skał i minerałów skałotwórczych oraz składu izotopowego Sr, Nd, Pb posłużyły do wnioskowania o genezie magm źródłowych i ich ewolucji. Porównanie zawartości pierwiastków ziem rzadkich w lawach Andahua i w chondrytach oraz prymitywnym płaszczu ziemskim sugeruje, że skały grupy Andahua mimo dużego rozprzestrzenienia wykazują silne związki genetyczne. W powstaniu ich magm źródłowych pewną rolę odgrywały prawdopodobnie fluidy pochodzące z dehydratacji skorupy oceanicznej subdukowanej pod płytę kontynentalną. Magma macierzysta miała skład zbliżony do bazaltu. W jednym lub kilku zbiornikach magmowych dochodziło do frakcjonalnej krystalizacji oliwinów, klinopiroksenów oraz plagioklazów. Prawdopodobnie poszczególne pola lawowe zasilane były z izolowanych komór, w których następowały procesy różnicowania i kontaminacji magmy w zależności od składu otaczających skał. W komorach mogły być warunki do krystalizacji klinopiroksenów, plagioklazów i amfiboli. Równocześnie magma była kontaminowana w różnym stopniu skałami, z których zbudowana jest skorupa kontynentu.

Pod względem składu chemicznego wulkanity Andahua wykazują znaczne podobieństwo do nieco starszych lub równowiekowych i szeroko rozprzestrzenionych na tym obszarze wulkanitów grupy Barroso. Dotyczy to przede wszystkim pierwiastków głównych (np. K) i niektórych śladowych (np. Ba). Z drugiej strony lawy Andahua są wyraźnie zubożone w lekkie pierwiastki ziem rzadkich i z reguły mniej zasobne w krzemionkę. Magmy zasilające wulkany grupy Andahua nie są tak mocno wyewoluowane, jak te w grupie Barroso.

Modelowanie ewolucji magm zakłada trzy fazy rozwoju systemu magmowego grupy Andahua. Początkowo wytapiana z klina płaszczowego nad strefą subdukcji magma koncentrowała się w jednym zbiorniku na dużej głębokości, w pobliżu granicy Moho. Mogła tam następować frakcjonalna krystalizacja oliwinów, piroksenów i plagioklazów. Na drugim

etapie następowało pulsacyjne wynoszenie małych porcji magmy do komór położonych na różnych głębokościach w strefach nieciągłości tektonicznych. Prawdopodobnie zachodziła też asymilacja i kontaminacja składnikami pochodzącymi z granitoidów i amfibolitów, zarówno z masywu Arequipa, jak i Paracas. W trzeciej fazie stopień kontaminacji był największy, możliwe, że nakładały się na to efekty procesów MASH (*Melting, Assimilation, Storage, Homogenization*). W komorach magmowych położonych w płytszych częściach skorupy, magma podlegała w odmiennym stopniu dyferencjacji i kontaminacji przez otaczające formacje skalne. W efekcie produkty grupy Andahua uzyskały sporą różnorodność regionalną w zależności od lokalnej budowy.

Pomimo braku świadectw aktywności historycznej wulkany grupy Andahua można uznać za współczesne. Dlatego poświęcono uwagę ryzyku kolejnych ich erupcji i zagrożeniu okolicznej ludności wraz z innymi wulkanami Centralnej Strefy Wulkanicznej. Na badanym obszarze zidentyfikowano trzy strefy zagrożenia: A – strefa najwyższego ryzyka związana z wulkanem Sabancaya (należy do grupy Barroso), B – średniego zagrożenia związana z najmłodszymi centrami erupcji w Dolinie Wulkanów oraz C – małego zagrożenia w strefach aktywnych tektonicznie, gdzie mogą powstawać nowe centra erupcyjne.

Oceniono też walory krajobrazowe, edukacyjne i turystyczne grupy Andahua. Do najciekawszych wystąpień zaliczono kopuły lawowe, stożki piroklastyczne i potoki lawy w Dolinie Wulkanów. Uznano, że ich klasyczne wykształcenie, znikoma erozja i łatwa dostępność czynią je atrakcjami co najmniej w skali Ameryki Południowej. Obszar ten powinien być istotnym fragmentem projektowanego Parku Narodowego Kanion Colca i Dolina Wulkanów.

The characteristics of the Andahua Volcanic Group in southern Peru

Summary

This monograph is devoted to the Quaternary Andahua Volcanic Group, which is characteristic due to its activity, structures and, probably, genesis. This group relatively late distinguished and poorly known so far is located in the Western Cordillera in southern Peru. The first remark on young volcanic cones belonging to this group dates back to Shippee (1934). The present author aimed at analysing many young volcanic forms and eruption products having been distinguished since then. The research area is located in the Colca River basin, where the river intersects the Western Cordillera and forms the deepest canyon of the world. In its middle part, the Colca Canyon is connected with the Valley of the Volcanoes described for the first time in reports of US aviators (Shippee among them).

The monograph presents the results of studies initiated in 2003. It forms a part of a wider research project carried out by the Polish scientific expeditions to Peru, and is aimed to give a scientific background to the proposal of establishing the Canyon Colca and the Valley of the Volcanoes national park.

In the first part of the monograph, the extent, typical structures and the relation between volcanic activity and tectonics are described. The Andahua Group stretches over an area of 12,000 km² on both sides of the Colca Canyon. Seven regions where lava fields, domes with single flows, and pyroclastic cones occur have been distinguished. As much as 121 lava domes and 46 scoria cones were measured and described, most of them being of a monogenetic character. Most commonly lava flows start from lava domes or craters. The height of the lava domes usually does not exceed 50 m and of the pyroclastic cones 100 m. Contrary to the large stratovolcanoes forming the Central Volcanic Zone of the Andes, the Andahua Group morphological forms are much simpler.

The Andahua Group has been evolving for about a million years. The first eruptions occurred at least in the Middle Pleistocene, the youngest are some 300 years old. Three age generations have been distinguished: the older one (Pleistocene), the middle (Pleistocene – Holocene) and the youngest (Holocene to historical times).

The relations of the Andahua Group volcanic activity and the regional fault-and-fracture system are diversified within each of the age generations and in the relation to their location on the opposite sides of the Colca Canyon. In the beginning stages, the ascending magma used a strike-slip fault network trending NW-SE. Numerous, early eruption centers south of the Colca Canyon, are aligned along normal faults with the NE-SW, W-E and N-S trends. In the second generation the eruptions took place along the NE-SW fault system. In the third

stage (Holocene) the most important were the faults intersecting transversally also along the NE-SW trend the tectonic graben of the Valley of the Volcanoes.

Geochemically, the rocks of the Andahua Group are mainly intermediate with regard to their contents of silica and weakly alkaline. They have been classified as trachyandesites, basaltic trachyandesites and dacites. Single samples have revealed the chemical composition typical of basalts, andesites and trachytes.

The Andahua lavas are dark grey or black. Hypocrystalline-porphyritic and aphyric-felsitic structures are dominant. The contents of phenocrysts is low, varies from nil to 20%. The phenocrysts are represented mainly by plagioclases, but olivine, clinopyroxene and hornblende are also present. The groundmass is of felsitic or hyalopilitic development with microliths of plagioclase, pyroxene, opaque minerals and, in some samples, olivine. The rocks are porous, rarely massive, their fabric irregular or fluidal.

The plagioclase phenocrysts, dominating in all the rock varieties, display different contents of Ca. In the most basic lavas their composition is relatively stable, falling within the range of labradorite. In the dacites they vary between andesine and labradorite. In the trachyandesites Ca enrichment sometimes occur and their plagioclases have the andesine-bytownite composition. The plagioclase phenocrysts show slightly marked zoning, which is normal and occasionally reverse.

The euhedral olivine phenocrysts have been recognized in the basaltic trachyandesites. More basic varieties contain also abundant clinopyroxene and rarely orthopyroxene. In this rocks augite and enstatite were also found. In many samples mafic phenocrysts are represented only by amphiboles, identified as oxyhornblende. Opaque minerals are present mainly as Fe and Ti oxides, finely dispersed in the groundmass composed of microliths of plagioclase with minor pyroxene and occasional glass.

Chemical analyses of rocks and rock-forming minerals, and isotopic determinations of Sr, Nd and Pb in whole rock samples allowed to infer conclusions on the origin of parental magmas and their evolution. A REE pattern of the Andahua lavas normalized to chondrite C1 and to primitive mantle suggests a close genetic relationship within the whole Andahua Group despite its large aerial extent. Their parental magmas of basaltic composition were enriched in fluids derived during dehydration of the oceanic crust subducted under a continental plate. In several deep-seated magma reservoirs fractional crystallization of olivine, clinopyroxenes and plagioclases took place. Particular lava fields were supplied from isolated shallow-seated magma chambers, where differentiation and contamination processes were affected by crustal country rocks. The conditions within such chambers led to fractional crystallization of clinopyroxene, plagioclase and amphibole.

The chemical content of the Andahua volcanic rocks shows some similarity to both the slightly older and the contemporaneous Barroso Group volcanites widespread in this region. This similarity may be seen in both the major elements (e.g. K) and selected trace elements (e.g. Ba). On the other hand, the Andahua rocks are clearly depleted in light rare earth elements (LREE), while their silica contents are generally lower. The magmas feeding the Andahua volcanoes represent a lower level of evolution in comparison to those of the Barroso Group.

The results of modeling the evolution of the Andahua Group magma have revealed possible three stages. At the beginning magma was generated from a wedge mantle beneath the subduction zone and concentrated in a single, deep-seated reservoir. It was a probable site of

the fractional crystallization of olivine, pyroxene and plagioclase. In the second stage, small portions of magma were probably injected in several pulses to shallow-seated chambers, although located at various distances from the surface. Assimilation and contamination by easily melting components of the granitoids from the Arequipa and Paracas massifs probably took place. In the third stage, the contamination of the magma in the deep reservoir was the highest, possibly affected by the MASH (Melting, Assimilation, Storage, Homogenization) processes. In the upper crustal parts, the conditions of magma differentiation and, particularly, contamination differed in the separate shallow-seated magma chambers. It resulted in a relative large regional geochemical diversity of the Andahua Group rocks, depending on the differences of their local geological settings.

In spite of lacking historical evidences of their activity, some volcanoes of the Andahua Group can be considered dormant, not definitively extinct. Therefore, an attention has been paid to the risk of new eruptions representing a threat to the local population, alongside with the same risk caused by other volcanoes of the Central Andean Volcanic Zone. Within the area studied, have been distinguished three zones of such a hazard: A – the zone of the highest risk associated with the activity of the Sabancaya volcano (belonging to the Barroso Group), B – the zone of the medium risk connected with the youngest eruption centers in the Valley of the Volcanoes, and C – the low risk zone, where new eruption centers may be formed only in tectonically active zones.

Finally, have been assessed the Andahua Group in terms of its landscape, education and touristic values. The lava domes, scoria cones and lava flows appearing in the middle part of the Valley of the Volcanoes have been singled out as the most interesting forms. The classical and pristine morphology, only minor erosion and an easy access make them a large geoattraction, at least on a scale of South America. Therefore, the area should represent a significant part of the proposed National Park of the Colca Canyon and the Valley of the Volcanoes.