

ЗАШТО У АЛПИМА НЕМА ВУЛКАНСКОГ ЛУКА?

Драган Широњић¹

¹Универзитет у Грацу, Одјељење за геонауке, Грац, Аустрија

Сажетак: Алпи су орогенски појас који је резултат отварања и затварања два океана: Пијемонт-Лигурског и Валаис океана. Субдукција океанске литосфере је покретачка снага иза затварања океана, што обично доводи до формирања вулканских лукава. Међутим, ова уобичајена карактеристика субдукције типа Венеди-Бениоф не може се пронаћи у Алпском орогену. Штавише, подаци о магматским, седиментним и метаморфним стијенама не откривају никакву магматску активност током субдукције Пијемонт-Лигурског океана и високоприпремне метаморфозе. Подаци добијени из прикупљених стијена показују 50 милиона година магматске неактивности. Ово доводи до закључка да се орогенеза одвијала без присуства магме. Главни разлози за недостатак магматизма могу се приписати недовољној субдукцији хидрираних литологија, што је повезано са покретањем субдукције на пасивним маргинама. Субдукција „сувих“ литологија није била довољна да произведе значајне количине магме у клинастој геометрији. Таква архитектура је омогућила акрецију хидрираног материјала. Када се пажљиво посматрају, карактеристике алпинске субдукције указују на субдукцију типа Амперер, како је утврђено почетком 20. вијека.

Кључне ријечи: субдукција Амперер типа, субдукција Бениоф типа, Алпи, орогенеза, амагматско покретање субдукције.

¹ Аутор за кореспонденцију: Драган Широњић, Универзитет у Грацу, Одјељење за геонауке, Универзитетски трг 3, 8010 Грац, Аустрија, Е-mail: dragan.sironjic@edu.uni-graz.at

WHY IS THERE NO VOLCANIC ARC IN THE ALPS?

Dragan Šironjić¹

¹University of Graz, Department of Earth Sciences, Graz, Austria

Abstract: The Alps are an orogenic belt that is the result of the opening and closing of the two oceans: The Piedmont-Liguria and Valais Ocean. Typically, the subduction of the oceanic lithosphere is the driving force behind the ocean closure which is commonly followed by the formation of volcanic arcs. However, this common characteristic of Wenedi-Benioff subduction type cannot be found in the Alpine orogen. Moreover, igneous, sedimentary, and metamorphic data reveal no magmatic activity during subduction of Piedmont-Liguria Ocean and high-pressure metamorphism. Data obtained from gathered rocks reveal a 50 million years magmatic inactivity. This leads to the conclusion that during this phase Alpine orogeny was amagmatic. The main reasons behind this lack of magmatism can be attributed to the insufficient subduction of hydrated lithologies, which is related to the subduction initiation at the passive margins. Subduction of “dry” lithologies was not sufficient to produce significant amounts of magma in the wedge-shaped geometry. Such architecture allowed the accretion of hydrated material. When closely observed, features of Alpine subduction are pointing in direction of Ampferer type subduction, as investigated at the beginning of 20th century.

Key words: Ampferer type subduction, Benioff type subduction, Alps, orogeny, amagmatic initiation of subduction.

¹ Corresponding author: Dragan Šironjić, University of Graz, Department of Earth Sciences, Universitaetsplatz 3, 8010 Graz, Austria, E-mail: dragan.sironjic@edu.uni-graz.at

УВОД

Алпи су резултат затварања океана праћеног сударом Европе и Адрије (Dal Piaz et al., 2003), за које се сматрало да је резултат колизије океана и континента или субдукције типа Бениоф („Б-тип”). Међутим, недостатак најизразитије карактеристике субдукције типа Б – вулканског лука – у алпском орогену указује на необичне околности током затварања Пијемонт-Лигурског океана и судара Европе и Адрије. Субдукција океанске литосфере и њено рециклирање су есенцијални процеси тектонике плоча (Cloos, 1993). Она доводи до раста нове континенталне коре на конвергентним маргинама, као и до производње океанске коре на средњеокеанским гребенима. Како се удаљава од средњеокеанског гребена, океанска литосфера постаје хладнија, старија и негативно пловљива и тоне испод континенталне литосфере (Cloos, 1993). Згушњавање океанске коре литосфере и њена дјелимична еклогитизација доприноси механизму повлачења плоче, који је главна сила субдукције (Cloos, 1993). Након субдукције, океанска кора постаје дехидрирана и њена дехидрација омогућава топљење горњег плашног клина, што доводи до производње „калко-алкалног“ магматизма (Grove et al., 2012).

Међутим, сачувани докази указују на то да Пијемонт-Лигурски океан није био прекривен зрелом океанском кором, већ ексхумираним субконтиненталним плаштом и континенталним фрагментима, познатим као зоне транзиције океан-континент (Manatschal & Münterer, 2009). Такав сложен састав је усмјерио развој догађаја у другом правцу и био је један од разлога за амагматично затварање басена. Први корак у развоју Алпа повезан је са распадом Пангее који се догодио у касном тријасу, чији су се дуготрајни ефекти касније наставили. Рифт који је довео до распада Пангее допринио је формирању алпског (или западног) Тетиса који је био састављен од Пијемонт-Лигурског и Валаис океана (Pfiffner, 2014). Затварање ових басена одиграло је важну улогу у алпској орогенези, која је започела у креди. Узрокована је субдукцијом океанске литосфере и довела је до конвергенције између Европе и Адрије (Pfiffner, 2014).

У наредним поглављима разматраће се разлози за покретање субдукције и њен утицај на алпски магматизам.

INTRODUCTION

The Alps are a product of ocean closing followed by the collision of Europe and Adria (Dal Piaz et al., 2003), which was thought to be a result of ocean-continent collision or Benioff-type (“B-Type”) subduction. However, the lack of B-Type subduction’s most distinguishing feature – a volcanic arc – in the Alpine orogen indicates peculiar circumstances during the closure of Piedmont-Liguria Ocean and the collision of Europe and Adria. Subduction of oceanic lithosphere and its recycling is the essential process of plate tectonics (Cloos, 1993). It leads to the growth of new continental crust at the converge margins as well as the production of oceanic crust at spreading ridges. As it moves away from the Mid-Ocean ridge, the oceanic lithosphere gets cooler, older, and negatively buoyant and it sinks underneath the continental lithosphere (Cloos, 1993). Densification of the oceanic crust lithosphere and its partial eclogitisation contributes to the slab-pull mechanism, which is the main force of subduction (Cloos, 1993). After subduction, the oceanic crust becomes dehydrated and its dehydration provides flux melting of the overlying mantle wedge, which leads to the production of “calc-alkaline” magmatism (Grove et al., 2012).

However, preserved evidence points that the Piedmont-Liguria Ocean was not floored by mature oceanic crust, but by the exhumed subcontinental mantle and continental fragments, known as Ocean-Continent transition zones (OCTs) (Manatschal & Münterer, 2009). Such complex composition steered the expected chain of events in another direction and was one of the reasons behind the amagmatic closure of the basin. The first step in the development of the Alps is related to the breakup of the Pangea that occurred in the Late Triassic which long-lasting effects later on. The rift that led to the Pangea breakup contributed to the formation of the Alpine (or Western) Tethys which was composed of the Piedmont-Liguria and the Valais Ocean (Pfiffner, 2014). Closure of these basins played important role in the Alpine orogeny, which began in the Cretaceous. It was caused by the subduction of the oceanic lithosphere and led to the convergence between Europe and Adria (Pfiffner, 2014).

In the chapters that follow, the reasons behind subduction initiated and its influence on Alpine magmatism will be discussed.

МАГМАТСКИ РАЗВОЈ

Три карактеристичне фазе магматизма могу се пријетити у Алпима и оне се повезују са палеогеографском еволуцијом овог подручја (McCarthy et al., 2018).

Најстарији забиљежени магматизам датира из пермо-тријаског доба (300–240 милиона година) и забиљежен је у вулканокластичним депозитима и токовима лаве. Познате стијене из овог периода су гранити, који су углавном метаморфозирани младом алпском метаморфозом (Niggli, 1972). Овај период је такође карактерисан танком континенталном литосфером.

Сљедећа фаза је јурски магматизам, који се десио током фазе рифтинга и представља тип магматизма средње-океанског гребена (МОРБ) сачуван у алпско-апенинским офиолитима. Јурски рифтинг је довео до раздвајања Европе и Адрије и означио отварање Пијемонт-Лигурског и Валаис басена. Рифтовањем је дошло до екстремнога тањења континенталне литосфере, заједно са ексхумираним субконтиненталним плаштом, што је изазвало ломљење континенталне коре (Mohn et al., 2011). Према геохронолошком U-Pb датирању циркона из МОР габрова, као и пелагичких седимената оксфордског доба, Пијемонт-Лигурски океан се отворио око 160 милиона година (McCarthy & Münterer, 2015; Cordey et al., 2007). Поред тога, јурски магматизам је карактерисан оскудним базалтима средњеокеанског гребена, долеритима и габром. Поред тога, високопритисна метаморфоза је широко распрострањена, са врхунцем око 75 милиона година. Алпска метаморфоза показује тенденције подмлађивања од унутрашњих ка спољним маргинама, од адријатских до европских маргина (McCarthy et al., 2020). Старост метаморфозе и њена еволуција одговара затварању Пијемонт-Лигурског басена (McCarthy et al., 2020).

Посљедња фаза је повезана са затварањем басена и алпским колизијама које су трајале између 45–25 милиона година, и забиљежена је на периадријатској линији као калко-алкални до ултракални дајкови и плутони (Сл. 1).

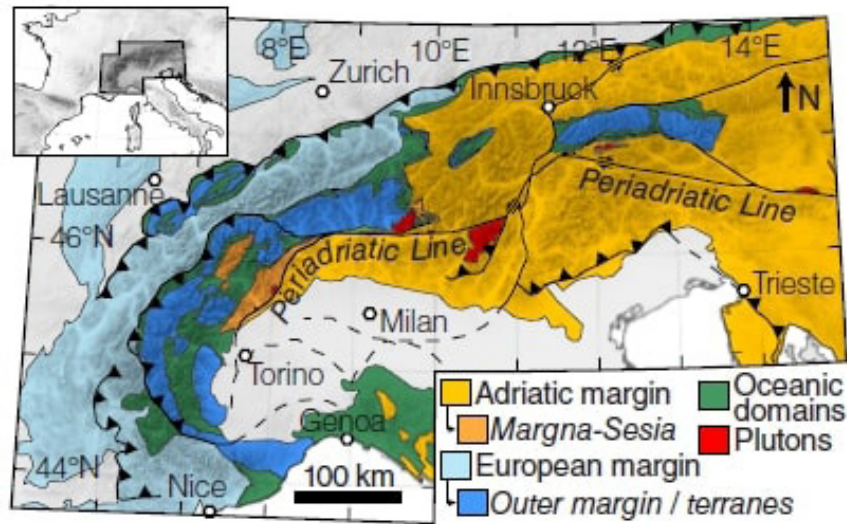
MAGMATIC DEVELOPMENT

Three distinctive phases of magmatism can be detected in the Alps and they correlate with the area's paleogeographic evolution (McCarthy et al., 2018).

The oldest recorded magmatism dates back to the Permian-Triassic age (300–240 million years) and is recorded in volcanoclastic deposits and lava flows. Known rocks from this period are granites, which were mostly metamorphized by young Alpine metamorphism (Niggli, 1972). This period is also characterized by the thinned continental lithosphere.

The next phase is Jurassic magmatism occurred during the rifting phase, and represents Mid-Ocean Ridge Basalt (MORB) type magmatism and is preserved in Alpine-Apennine ophiolites. Jurassic rifting led to the separation of Europe and Adria and marked the opening of the Piedmont-Liguria and Valais basins. Rift related extreme thinning of continental lithosphere, along with the exhumed subcontinental mantle, caused the breaking of continental crust (Mohn et al., 2011). According to the geochronological U-Pb dating of zircons contained in MOR gabbros, as well as Oxfordian aged pelagic sediments, the Piedmont-Liguria Ocean opened around 160 million years (McCarthy & Münterer, 2015; Cordey et al., 2007). Additionally, Jurassic magmatism was characterized by sparse mid-ocean-ridge basalts, dolerites, and gabbro. Besides, high-pressure metamorphism is widespread, which reached a peak at ca. 75 million years. Alpine metamorphism shows younging tendencies from internal towards external margins, from the Adriatic to the European margins. (McCarthy et al., 2020). The age of HP/LT metamorphism and its evolution corresponds with the closure of the Piedmont-Ligurian basin (McCarthy et al., 2020).

The last phase is related to the closure of basin and Alpine collision that lasted between 45–25 million years and is recorded at the peri-Adriatic line by calc-alkaline to ultrapotassic dikes and plutons (Fig. 1).

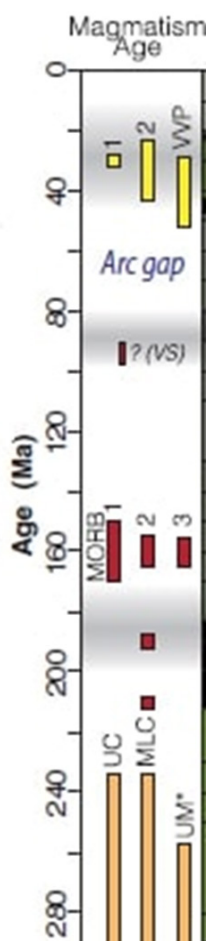


Сл. 1. Поједностављена тектонска карта Алпа са палеогеографским јединицама (вулкански дајкови на периадријатској линији нису представљени) (McCarthy et al., 2018)

Fig. 1. Simplified tectonic map of the Alps with palaeogeographical units (the volcanic dykes along the peri-Adriatic line is not shown) (McCarthy et al., 2018)

Као што се може примијетити на Сл. 2, постоји јаз у магматским догађајима од почетка субдукције која је почела између око 100–85 милиона година (Rosenbaum & Listen, 2005; Handy et al., 2010) и колизије континената око 40 милиона година. Добијени детритални циркони не показују никакве магматске процесе током овог периода, јер нису сачувани циркони магматског поријекла из креде. Ово је у супротности са подацима који се обично добијају у режимима субдукције типа Б, гдје популације детриталних циркона одражавају излаз вулканских лукова, јер се вулкански производи брзо премјештају и таложе у оближњим басенима (Cawood et al., 2012). Надаље, нема теренских доказа (плутонских или вулканских структура) о магматизму лука током овог периода (McCarthy et al., 2018). Ови докази указују на то да је алпски магматизам био оскудан и ограничен на колизију, око 50 милиона година након што је конвергенција почела (McCarthy et al., 2018). Супротно магматизму лука, гдје су услови топљења плашног клина плитки (1–2 GPa), у Алпима је извор магматизма знатно дубљи (~2.7 GPa) (Hürlimann et al., 2016).

As it can be noticed from Fig. 2, there is a gap in magmatic events from initiation of subduction that started between ca 100–85 million years (Rosenbaum & Listen, 2005; Handy et al., 2010) and continental collision at ca 40 million years. Obtained detrital zircons show no magmatic processes during this period since no Cretaceous-related zircons of magmatic origin were preserved. This is in contrast with the data that is commonly obtained in B-type subduction regimes, where detrital zircon populations reflect the output of volcanic arcs since volcanic products are quickly remobilized and deposited in nearby basins (Cawood et al., 2012). Furthermore, there is no field evidence (plutonic or volcanic structures) of arc magmatism during this period (McCarthy et al., 2018). These pieces of evidence suggest that C Alpine magmatism was sparse and confined to collision, ca 50 million years after the convergence started (McCarthy et al., 2018). Contrary to the arc magmatism where conditions of the mantle-wedge melting are shallower (1–2 GPa), in the Alps source of magmatism is significantly deeper (~2.7 GPa) (Hürlimann et al., 2016).



Сл. 2. Испитани циркони одражавају магматске догађаје. Међутим, током конвергенције између Европе и Адрије, старости циркона су одсутне. То имплицира да је дошло до амагматичног затварања басена. Модификовано према McCarty et al. (2020).

Fig. 2. Evaluated zircons reflect the magmatic events. However, during the convergence between Europe and Adria, the zircon ages are missing. It implies an amagmatic closure of the basin occurred. Modified after McCarty et al. (2020).

ПОКРЕТАЊЕ СУБДУКЦИЈЕ

Архитектура западног Тетиса и, према томе, Пије-монт-Лигурског океана била је веома сложена, уска и формирана серијом хиперпроширених басена и ембрионалне океанске коре у пратњи континенталних блокова (Handy et al., 2010). Такав састав може се описати као архитектура „штипање и набрекнуће“ (McCarthy et al., 2020), гдје су континентални блокови формирали набрекнућа, док је ексхумирани плашт стварао пинчеве.

Добијени докази указују на то да затварање Пије-монт-Лигурског басена није резултат спонтане субдукције хладне океанске литосфере, већ резултат изазване субдукције на пасивним маргинама (Kiss et al., 2019; Marroni et al., 2017). Тектонски амбијент компресије, који је садржао хиперразвучену континенталну кору одвојену ултра-споро

SUBDUCTION INITIATION

The architecture of the Western Tethys and therefore of the Piedmont-Ligurian Ocean was very complex, narrow, and formed of series of hyper-extended basins and embryonic oceanic crust accompanied by continental blocks (Handy et al., 2010). Such composition can be described as pinch and swell architecture (McCarthy et al., 2020), where continental blocks formed the swells whereas exhumed mantle created pinches.

Obtained evidence indicates that the closure of the Piedmont-Liguria basin was not a result of spontaneous subduction of cool oceanic lithosphere, but a result of induced subduction at passive margins (Kiss et al., 2019; Marroni et al., 2017). A tectonic environment of compression, that consisted of hyper-thinned continental crust separated by

ширећим доменима, чини се да је био окидач за затварање алпског басена. Такав тектонски амбијент био је повезан са сјеверним кретањем Африке и Адрије (Pfiffner, 2014; Rosenbaum & Listen, 2005). Сходно томе, зоне транзиције океан–континент могле би помоћи у компресији.

Серпентинизација ексхумираног плашта и разлика у вискозности између ексхумираних перидотита и серпентинизованог плашта могла би помоћи у тој компресији (Andreani et al., 2007). Таква комбинација омогућила би значајну акрецију серпентинизованог океанског дна Пијемонт-Лигурског океана у облику дебелих сочива (Lundin & Doré, 2011).

Поред тога, будући да иницијација субдукције може бити покренута гравитационом нестабилношћу, могуће је да би гравитационо нестабилна субконтинентална литосфера испод Адрије могла изазвати „интраконтиненталну субдукцију“ (Stüwe & Schuster, 2010).

КЉУЧНА УЛОГА „СУВОГ“ ПЛАШТА

Главни фактори магматизма лука су дехидрација субдукване океанске коре, флуksiрање плаштног клина и топљење декомпресијом (Grove et al., 2012). Сугерисано је да су услови споре и косе субдукције спријечили магматизам. Таква равна субдукција, заједно са субдукцијом мањих порција океанског плашта, довела би до „празнине“ лука (Bergomi et al., 2015; Zanchetta et al., 2012). Међутим, услови споре и косе субдукције били би повољни за продужено загријавање плоче – можда чак и топљење плоче – као и појачано флуksно топљење (McCarthy et al., 2018; Yagodzinski et al., 2017). То би довело до волуминозне производње магме, као што се види у случају западних Алеута (McCarthy et al., 2018; Yagodzinski et al., 2017).

Међутим, чини се да је серпентинизација која се догодила током ексхумације плашта (~150 милиона година) одиграла кључну улогу. Као резултат ниске вискозности серпентинита, чак и мала количина серпентинизованих перидотита драстично је смањила крхку чврстоћу субконтиненталног плашта (Escartin et al., 2001). Током субдукције у геометрији клина, већина серпентинизованог материјала заједно са хидрираним седиментима била је одсјечена, те акумулирана и уграђена у растући орогени клин (McCarthy et al., 2020). Ово би даље довело до

the ultra-slow spreading domains, seems to be a trigger for the closure of the Alpine basin. Such a tectonic environment was related to the northward movement of Africa and Adria (Pfiffner, 2014; Rosenbaum & Listen, 2005). Consequently, OCTs would have been able to assist compression.

The serpentinization of the exhumed mantle and the difference between viscosity between exhumed peridotites and serpentinized mantle front might have assisted that compression (Andreani et al., 2007). Such a combination would allow significant accretion of the serpentinized ocean floor of the Piedmont-Liguria Ocean in form of the thick slivers (Lundin & Doré, 2011).

Additionally, since the subduction initiation can be triggered by the gravitational instability, it is possible that the gravitationally unstable subcontinental lithosphere underneath Adria could have forced “intracontinental subduction” (Stüwe & Schuster, 2010).

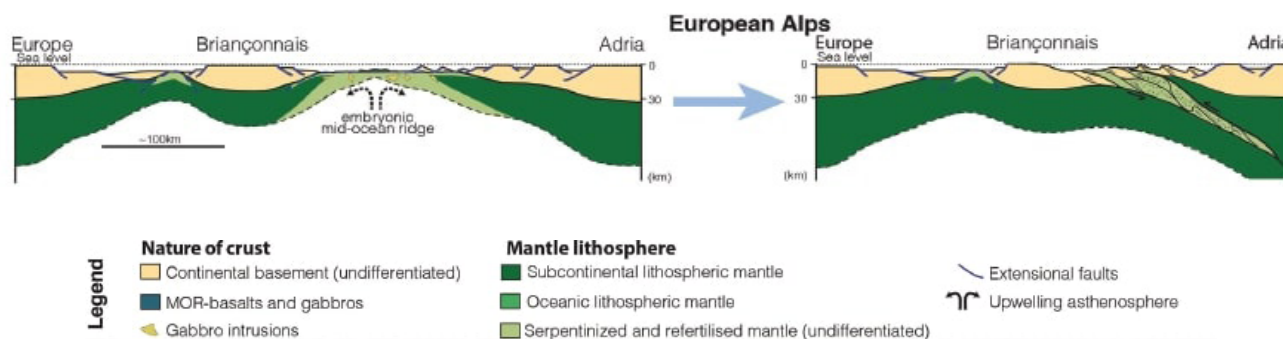
THE PIVOTAL ROLE OF “DRY” MANTLE

The main factors of arc magmatism are dehydration of subducted oceanic crust fluxing the mantle wedge and melting by decompression. (Grove et al., 2012). It was suggested that the condition of slow and oblique subduction prevented magmatism. Such flat-slab subduction along with the subduction of smaller portions of oceanic mantle would lead to the arc “gap” (Bergomi et al., 2015; Zanchetta et al., 2012). However, conditions of slow and oblique subduction would be favorable for prolonged heating of the slab – maybe even slab melting – as well as enhanced flux melting (McCarthy et al., 2018; Yagodzinski et al., 2017). This would have led to the voluminous production of magma just as seen in the case of the western Aleutians (McCarthy et al., 2018; Yagodzinski et al., 2017).

However, it seems that the serpentinization which occurred upon mantle exhumation (~150 million years) played a critical role. As a result of the low viscosity of serpentinites, even a small amount of serpentinized peridotites drastically lowered the brittle strength of the subcontinental mantle (Escartin et al., 2001). During the subduction in the wedge-shaped geometry, the majority of serpentinized material along with hydrated sediments were cut-off, and therefore accumulated and incorporated in the growing orogenic wedge (McCarthy et al., 2020). This would

субдукције танког слоја хидрираних литологија које би доспјеле до дубљих дијелова субдукционе зоне. Будући да такав „сув“ материјал не може произвести примјетне количине магме, то би довело до амагматичног затварања басена (McCarthy et al., 2020). Ове карактеристике чине алпски ороген транзиционим окружењем (Сл. 3) између два крајња сценарија (Бениоф тип и Амперер тип) субдукције (McCarthy et al., 2020).

further lead to the subduction of a thin-layered portion of hydrated lithologies that would reach deeper areas of the subduction zone. Since such “dry” material cannot generate a noticeable amount of magma, it would lead to the amagmatic closure of the basin (McCarthy et al., 2020). These features make Alpine orogen a transitional environment (Fig. 3) between two end-member scenarios (Benioff type and Ampferer Type) of subduction (McCarthy et al., 2020).



Сл. 3. Алпи представљају прелазно окружење између субдукције типа Амперер и Бениоф. Недовољна субдукција хидрираних литологија омогућава, а специфична архитектура басена типа „штипање и набрекнуће“ омогућава амагматично затварање басена. Модификовано према Mohn et al. (2011) и McCarthy et al. (2020).

Fig. 3. The Alps represent the transitional environment between Ampferer and Benioff type subduction. Insufficient subduction of hydrated lithologies accommodates, and specific pinch-and-swell architecture of the basin accommodates amagmatic closure of the basin. Modified after Mohn et al. (2011) and McCarthy et al. (2020).

ЗАКЉУЧАК

Наведени докази указују на то да алпска орогенеза има мало сличности са познатим режимима субдукције типа Б. Услови субдукције суве литосфере, постојање зона транзиције океан–континент, који су изазвали недостатак производње магме током субдукције и иницијацију субдукције на пасивним маргинама нису карактеристике Бениоф типа субдукције океана.

Поред тога, уска архитектура западног Тетиса са својом архитектуром „штипање и набрекнуће“ није могла резултирати магматичним затварањем басена. Даље, сачувани морски серпентинити и стијене у фацијама плавог шкриљца до еклогита указују на субдукцију недовољно хидрираних литологија. Стога, субдукција континенталне литосфере доказује се важнијом од субдукције океанске литосфере.

CONCLUSION

The above-presented evidence is indicating that Alpine orogenesis has little similarities to the known B-type subduction regimes. Conditions of subduction of dry lithosphere, the existence of ocean-continent transition zones, that caused a lack of magma production during subduction and subduction initiation at passive margins are not characteristics of Benioff-type oceanic subduction.

Additionally, the narrow architecture of the Western Tethys with its pinch and swell architecture could not have resulted in the magmatic closure of the basin. Further, preserved seafloor serpentinites and blueschist to eclogite facies rocks, indicate subduction of an insufficient amount of hydrated lithologies. Therefore, subduction of continental lithosphere proves to be more important than the subduction of oceanic lithosphere.

Захвалница

Велика захвалност Курту Штувеу и Валтеру Курцу за помоћ пружену током писања овог рада.

Acknowledgments

Many thanks to Kurt Stüwe and Walter Kurz for the help provided while writing this paper.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Andreani, M., Mevel, C., Boullier, A. M., & Escartin, J. (2007). Dynamic Control on Serpentine Crystallization in Veins: Constraints on Hydration Processes in Oceanic Peridotites. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 8(2), Article Q02012. <https://doi.org/10.1029/2006GC001373>
- Bergomi, M. A., Zanchetta, S., & Tunesi, A. (2015). The Tertiary Dike Magmatism in the Southern Alps: Geochronological Data and Geodynamic Significance. *International Journal of Earth Sciences*, 104, 449–473. <https://doi.org/10.1007/s00531-014-1087-5>
- Grove, T. L., Till, C. B., & Krawczynski, M. J. (2012). The Role of H₂O in Subduction Zone Magmatism. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 40, 413–439. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-042711-105310>
- Dal Piaz, G. V., Bistacchi, A., & Massironi, M. (2003). Geological Outline of the Alps. *Episodes*, 26(3), 175–180. <https://doi.org/10.18814/epiiugs/2003/v26i3/004>
- Escartin, J., Hirth, G., & Evans, B. (2001). Strength of Slightly Serpentinized Peridotites: Implications for the Tectonics of Oceanic Lithosphere. *Geology*, 29(11), 1023–1026. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2001\)029_1023:SOS SPI_2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2001)029_1023:SOS SPI_2.0.CO;2)
- Zanchetta, S., Garzanti, E., Doglioni, C., & Zanchi, A. (2012). The Alps in the Cretaceous: A Doubly Vergent Pre-Collisional Orogen. *Terra Nova*, 24(5), 351–356. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2012.01071x>
- Kiss, D., Candiotti, L. G., Duretz, T., & Schmalholz, S. M. (2019). Thermal Softening Induced Subduction Initiation at a Passive Margin. *Geophysical Journal International*, 220(3), 2068–2073. <https://doi.org/10.1093/gji/ggz572>
- Lundin, E. R., & Doré, A. G. (2011). Hyperextension, Serpentinization, and Weakening: A New Paradigm for Rifted Margin Compressional Deformation. *Geology*, 39(4), 347–350. <https://doi.org/10.1130/G31499.1>
- Manatschal, G., & Müntener, O. (2009). A Type Sequence Across an Ancient Magma-Poor Ocean–Continent Transition: The Example of the Western Alpine Tethys Ophiolites. *Tectonophysics*, 473(1–2), 4–19. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2008.07.021>
- Marroni, M., Meneghini, F., & Pandolfi, L. (2017). A Revised Subduction Inception Model to Explain the Late Cretaceous, Double-Vergent Orogen in the Precollisional Western Tethys: Evidence from the Northern Apennines. *Tectonics*, 36(10), 2227–2249. <https://doi.org/10.1002/2017TC004627>
- McCarthy, A., & Müntener, O. (2015). Ancient Depletion and Mantle Heterogeneity: Revisiting the Permian–Jurassic Paradox of Alpine Peridotites. *Geology*, 43(3), 255–258. <https://doi.org/10.1130/G36340.1>
- McCarthy, A., Chelle-Michou, C., Müntener, O., Arculus, R., & Blundy, J. (2018). Subduction Initiation Without Magmatism: The Case of the Missing Alpine Magmatic Arc. *Geology*, 46(12), 1059–1062. <https://doi.org/10.1130/G45366.1>
- McCarthy, A., Tugend, J., Mohn, G., Candiotti, L., Chelle-Michou, C., Arculus, R., Schmalholz, S., & Müntener, O. (2020). A Case of Ampferer-Type Subduction and Consequences for the Alps and the Pyrenees. *American Journal of Science*, 320(4), 313–372. <https://doi.org/10.2475/04.2020.01>
- Mohn, G., Manatschal, G., Masini, E., & Müntener, O. (2011). Rift-Related Inheritance in Orogens: A Case Study from the Austroalpine Nappes in Central Alps (SE-Switzerland and N-Italy). *International Journal of Earth Sciences*, 100(5), 937–961. <https://doi.org/10.1007/s00531-010-0630-2>

- Niggli, E. (1972). Magmatic History of the Alps – A Short Summary. *Tectonophysics*, 13, 119–121. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(72\)90016-9](https://doi.org/10.1016/0040-1951(72)90016-9)
- Pfiffner, O. (2014). *Geology of the Alps, Revised and Updated Translation of Geologie der Alpen* (Second Edition). John Wiley & Sons, Ltd.
- Rosenbaum, G., & Lister, G. S. (2005). The Western Alps from the Jurassic to Oligocene: Spatio-Temporal Constraints and Evolutionary Reconstructions. *Earth-Science Reviews*, 69(3–4), 281–306. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2004.10.001>
- Stüwe, K., & Schuster, R. (2010). Initiation of Subduction in the Alps: Continent or Ocean? *Geology*, 38(2), 175–178. <https://doi.org/10.1130/G30528.1>
- Handy, K. R., Schmid, S. M., Bousquet, R., Kissling, E., & Bernoulli, D. (2010). Reconciling Plate-Tectonic Reconstructions of Alpine Tethys with the Geological–Geophysical Record of Spreading and Subduction in the Alps. *Earth-Science Reviews*, 102(3–4), 121–158. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2010.06.002>
- Hürlimann, N., Müntener, O., Ulmer, P., Nandedkar, R., Chiaradia, M., & Ovtcharova, M. (2016). Primary Magmas in Continental Arcs and Their Differentiated Products: Petrology of a Post-Plutonic Dyke Suite in the Tertiary Adamello Batholith (Alps). *Journal of Petrology*, 57(3), 495–534. <https://doi.org/10.1093/petrology/egw016>
- Cawood, P. A., Hawkesworth, C. J., & Dhuime, B. (2012). Detrital Zircon Record and Tectonic Setting. *Geology*, 40(10), 875–878. <https://doi.org/10.1130/G32945.1>
- Cloos, M. (1993). Lithospheric Buoyancy and Collisional Orogenesis: Subduction of Oceanic Plateaus, Continental Margins, Island Arcs, Spreading Ridges, and Seamounts. *Geological Society of America Bulletin*, 105(6), 715–737. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1993\)105<0715:LBACOS>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1993)105<0715:LBACOS>2.3.CO;2)
- Cordey, F., & Bailly, A. (2007). Alpine Ocean Seafloor Spreading and Onset of Pelagic Sedimentation: New Radiolarian Data from the Chenaillet-Montgenèvre Ophiolite (French-Italian Alps). *Geodinamica Acta*, 20(3), 131–138. <https://doi.org/10.3166/ga.20.131-138>
- Yogodzinski, G. M., Kelemen, P. B., Hoernle, K., Brown, S. T., Bindeman, I., Vervoort, J. D., Sims, K. W. W., Portnyagin, M., & Werner, R. (2017). Sr and O Isotopes in Western Aleutian Seafloor Lavas: Implications for the Source of Fluids and Trace Element Character of Arc Volcanic Rocks. *Earth and Planetary Science Letters*, 475, 169–180. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.07.007>

Примљено / Received: 10. 6. 2024.

Исправљено / Revised: 1. 8. 2024.

Прихваћено / Accepted: 8. 8. 2024.