

V.4 NAČIN POJAVLJIVANJA MAGMATSKIH STENA

Magmatske stene, znamo, nastaju hlađenjem magme ili lave. Oblik ohlađenog magmatskog tela zavisi od dubine, tektonske građe tamo gde je magma smeštena, njenog sastava i uslova konsolidacije i kristalizacije.

Za ovu grupu stena u stranoj literaturi sa engleskog govornog područja često se sreće i izraz *igneous rocks*, koji potiče od latinske reči *igneus*, koja znači „vatra”, tj. označava da su nastale iz „vatrene” (crvene) magme, lave. Imajmo u vidu da veći deo magme ne izlazi na površinu već je smešten, hladi se i kristališe u dubini, uglavnom u Zemljinoj kori ili litosferi, kada se stvaraju intruzivne, dubinske magmatske stene. U ovom poglavlju prikazaćemo i objasniti u kojim geološkim sredinama se javljaju magmatske stene i koja fizičko-hemijska svojstva magme, lave, i način njihovog intrudovanja (utiskivanja) ili izlivanja utiču na njihov oblik i veličinu pojavljivanja.

Prema mestu očvršćavanja, tj. smeštaja i hlađenja, magmatske stene se dele na:

1. **dubinske**, intruzivne (plutonske), koje su se „polako” hladile, kristalisale, očvrsle na velikoj dubini i smestile se u litosferi, kori (slika 310), i koje **imaju zrnastu strukturu** i

2. **vulkanske** (ekstruzivne, efuzivne, površinske), koje su nastale izlivanjem magme (lave) na površini Zemlje ili blizu nje, kada se ona naglo ohladila i dala drugačije oblike i strukture od dubinskih stena, iako vode poreklo iz iste magme, a koje **imaju porfirsku strukturu**.

V.4.1 NAČIN POJAVLJIVANJA DUBINSKIH MAGMATSKIH STENA

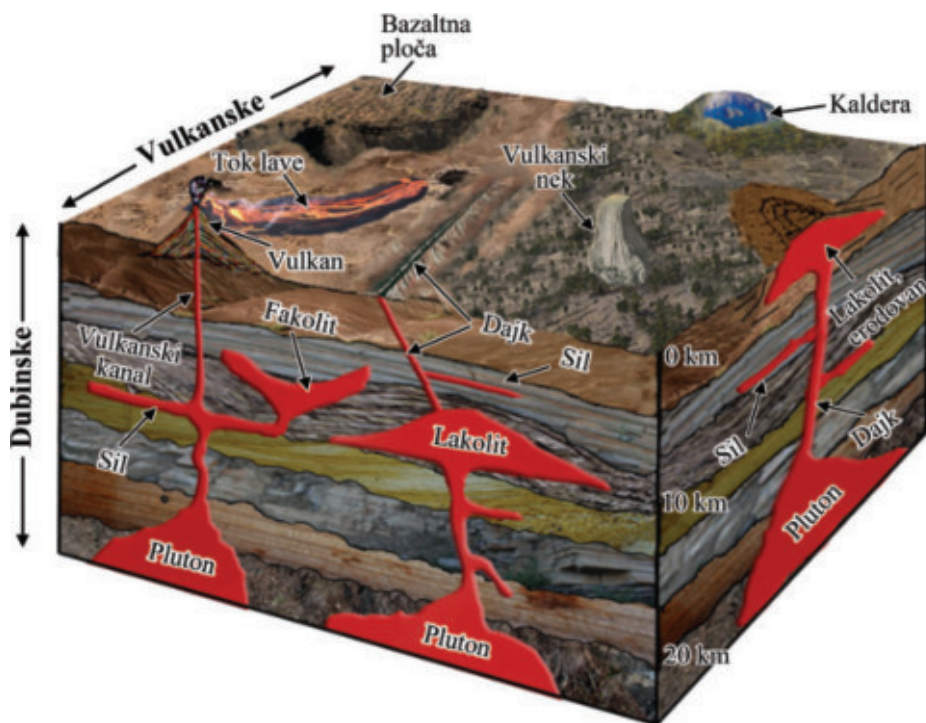
UVOD

Dubinske magmatske stene su magme koje nisu dosegle površinu već su smeštene, hladile se i kristalisale u kori, ponekad i ispod nje. One su tektonskim pokretima i erozijom podignute i na kraju „izašle” na površinu Zemlje (slika 310). Dubinskim stenama „nedostaje” drama vulkanizma, ali je „uteha” da se nalaze ispod svakog vulkana, koji „hrane” magmom (lavom).

Kristalizacija magme i njen „prelaz” u čvrstu stenu, opisali smo, zavisi od niza procesa, hemijskog sastava, temperature, prisustva fluida, brzine i načina hlađenja, dubine na kojoj se proces odvija itd. Sklop stene, struktura i tekstura daju značajne podatke o tome kako je nastala.

Prema obliku i odnosu prema okolnim stenama, dubinske (intruzivne) stene dele se na:

- „neslojevita” magmatska tela;
- konkordantna (slojevita) magmatska tela i
- diskordantna magmatska tela. (slika 310).



Slika 310. Plutonske i vulkanske stene (napomena: oblici na slici nisu u srazmeri; dubinske magmatske stene su u prirodi znatno veće)

V.4.1.1 INTRUZIVNA MAGMATSKA TELA

Oblik ovih tela je nepravilan i zavisi od dubine smeštaja, sastava, gustine i viskoziteta magme, sastava i sklopa okolnih stena i uslova njihovog smeštaja. U ovu grupu spadaju pluton, batolit i štok.

PLUTON

Pluton je termin za ogromno „hladno” magmatsko telo smešteno u kori, litosferi. To je opšti naziv za sva intruzivna tela, ali se ovaj termin koristi i kada se tačan oblik intruzivnog tela ne zna. Mnogi „mali” plutoni mogu biti kupole znatno većih magmatskih tela u dubini. Veličina i oblik plutona su generalno nepoznati. Tektonskim pokretima i erozijom otkriveni su samo manji delovi, pa su veličina i oblik plutona dobijeni najvećim delom na osnovu geofizičkih studija i rudarskih radova. Veći plutoni se obično javljaju u zonama subdukcije. Mnogi od njih, posebno u orogenim pojasevima, imaju i po nekoliko faza utiskivanja nove magme, koja se smestila, kristalisala, hladila i očvrsla. Plutone, prema dubini na kojoj su smešteni i iskristalisali, pojedini autori dele na:

- **epizonalne**, plitko utisnute, smeštene plutone (ispod ≈ 5 km); po obodu su često uškriljeni i sa „širim” kontaktnim oreolom zbog velike razlike u temperaturi magme i okolnih stena koje su u plitkim nivoima hladnije u odnosu na dublje;
- **mezozonealne**, plutone smeštene na većim dubinama (5–15 km) od prethodno navedenih i
- **katazonealne**, plutone koji se nalaze na još većim dubinama; imaju manje kontaktne oreole zbog manje razlike u temperaturi magme i okolnih stena (geotermalni gradijent); obično se javljaju u jako metamorfisanim stenama, kada prate njihov sklop.

NAPOMENA: prikazane dubine su date na osnovu „većine” autora. Pomenimo da se u literaturi na osnovu sličnih kriterijuma navode i drugačija imena. Termin *pluton* se obično koristi za opisivanje „umereno velikih” do „stvarno” velikih intruzija koje su smeštene na dubinama većim od 15 km i nazivaju se **abisalnim plutonima** (intruzijama).

Na pomenutim dubinama, okolne stene su, zbog geotermalnog gradijenta, tople, zbog čega magme smeštene na tim dubinama gube manje toplote, tj. sporije se hlade. Za „ogromne” plutone (prečnika nekoliko stotina kilometara) potrebne su stotine hiljada godina, a po nekim autorima i milioni godina, da se potpuno ohlade, tj. da magma očvrсне i postane stena. Sporo hlađenje magme omogućava mineralima (kristalima) da narastu i do nekoliko centimetara i da u većini slučajeva budu u hemijskoj ravnoteži sa rastopom, magmom. Zbog toga plutonske (dubinske) stene imaju zrnastu strukturu i ne sadrže staklo.

Intruzije na manjim dubinama (ispod ≈ 5 km) nazivaju se i **hipoabisalne intruzije**. Zbog veće temperaturne razlike između magme i okolnih stena u odnosu na abisalne intruzije, na njihovim bočnim, marginalnim delovima minerali su brže kristalisali i sitniji su u odnosu na središnji deo, a ponekad se sreće i staklo. Pomenimo da se po obodu nekih hipoabisalnih intruzija javljaju ksenoliti, komadi okolnih stena zahvaćeni tokom utiskivanja magme.

Kontakt, mineralni sastav i struktura intruzije (plutona) sa okolnim stenama su važni jer ukazuju na stepen iskristalisalosti i hemijski sastav magme u vreme njenog utiskivanja. Unutrašnji, središnji deo ovih intruzija ima krupnija zrna (magma se sporije hladila) od margine, gde je hlađenje bilo sporije. Ali, ako magma sadrži fluide ili je vodu „uzela” iz okolnih stena, neki minerali mogu brže rasti i po obodu masiva.

Većina granitskih masa pripada ovom tipu intruzija, koje su nastale očvršćavanjem magme unutar kontinentalne kore. Kako ih danas vidimo na površini? Milioni godina erozije stena koje su iznad (ekshumacija, izostazija itd.) i uz „pomoć” tektonike „izdigli” su granite (ali i druge dubinske stene) do naših terenskih cipela da ih sada gledamo, proučavamo i, naravno, uživamo u poslu kojim se bavimo.

BATOLIT

Batolit je geološko telo ogromnih dimenzija, nepravilnog oblika s brojnim istaknutim, kupolastim delovima i nepoznatim prostiranjem u dubinu. Najčešće je granitskog sastava. Ima sledeća svojstva:

- prostiranje u dubinu obično se ne može odrediti;
- ogromnih je dimenzija;
- oblik gornje površine intruzije je nepravilan, često s nekoliko kupola;
- odnos prema okolnim stenama je diskordantan, samo lokalno konkordantan;
- na marginama batolita sreće se veliki broj odlomaka okolnih stena koje su u njega uklopljene;
- sastav batolita najčešće je granitski.

Batolit je pluton, po definiciji pojedinih autora, s „izloženom” površinom (otkriveni na površini) većom od 100 km². „Izmerena” površina (vidljiva, određena na terenu) obično nema veze sa ukupnim volumenom plutona koji je, prema većini autora, mnogo, mnogo veći. Postoji opšta tendencija, smatra se, da se prostiru na velikoj dubini, ali koliko i gde za sada nema pouzdanih podataka. Zbog toga ih i danas crtamo „bez dna”, podine, jer, po našem mišljenju, postaju veći prema dole (dubini).

Pičer (*Pitcher, 1993*) predložio je da je pluton svako veliko neslojevito telo, a batolit predstavlja nizove plutona nastale u određenim orogenima (tektonskim sredinama). Pojedini autori smatraju da je pluton deo batolita, dok drugi smatraju da su pluton i batolit sinonimi jer imaju slična svojstva, pre svega po veličini. Gravitaciona, seizmička i teorijska ispitivanja, razmatranja ukazuju na to da su

batoliti relativno široki i tanki i da zauzimaju mnogo manje volumena nego što se prvobitno mislilo.

Pomenimo i autore koji smatraju da su batoliti ogromne magmatske komore u dubini Zemlje koje su se hladile hiljadama, pa i milionima godina (*Buddington, 1959*). Smatra se da batoliti u nekim područjima mogu sadržavati i do 10% rastopa (magne) i da se dalje polako i dugo hlade (*Coleman i dr., 2004; Glazner i dr., 2004*).

Batoliti kiselog sastava, graniti, kvarcmonconiti, granitoidi itd., nastaju tamo gde ima „najviše” magmatizma, na konvergentnim granicama ploča, tj. zonama subdukcije, koje su zbog intenzivne tektonike i erozije otkrivene. Na primer, planinski venac Anda je kompozitni (složeni) batolit koji se sastoji od preko 700 odvojenih plutona (*Pitcher, 1979*).

Magma intruzije na konvergentnim marginama igraju ključnu ulogu u rastu kontinenata kroz geološko vreme. U ovim stenama (i njihovim vulkanskim ekvivalentima) značajne su količine „vrednih” metala – molibdena, kalaja, zlata itd.

Na divergentnim granicama (područja razmicanja ploča) batoliti su bazičnog sastava (gabrovi) i retko se javljaju na površini jer uglavnom grade donje delove okeanske kore. Mogu se utvrditi seizmički u okeanima ili u ofiolitima, gde se javljaju kao kriške (olistoliti), zajedno sa stenama iz gornjeg omotača (peridotitima). Smatra se da veći deo gabrova „dolazi” na mesto očvršćavanja kao kristalno „boga” kaša. Između gabrova i tipičnih *pillow* lava postoji „sloj”, sistem subparalelnih dajkova koji nije ni plutonski niti vulkanski (detaljnije u poglavlju Dajkovi).

NASTANAK BATOLITA I PLUTONA

Kako se magma uzdiže sa svog mesta nastajanja, dolazi i smešta se u plića područja u čvrstoj litosferi, kori? Kako se stvara magmatska komora, koliko dugo i kako se hladi magma? Ovo su najčešća pitanja u vezi sa nastankom batolita i plutona.

Magma se intruduje kao rezultat povećane viskoznosti i gubitka pokretljivosti pri hlađenju ili povećane „snage” okolnih stena da je zadrži. Proces smeštanja se najprikladnije razmatraju u tri dimenzije. Međutim, odnos plutona i okolnih stena je obično uočljiv samo u površinskom delu (otkriven erozijom) i uglavnom manji od jednog kilometra. Mehanizam kretanja, izdizanja magme u pliće nivoe nije potpuno jasan, zbog čega je na ovu temu napisan veliki broj debata i diskusija. „Otvorene” pukotine, rasedi su na velikoj dubini „ograničeni” (retko se javljaju), pa pojedini autori ovu mogućnost osporavaju.

Dugo vremena se smatralo da je osnovna pokretačka sila koja uzrokuje kretanje magme nagore manja gustina u odnosu na okolne stene. Lokalna ekstenziona (relaksaciona) tektonska sredina može stvoriti prostor i omogućiti intrudovanje magme. Kada se magma formira procesom parcijalnog stapanja na dubini, nastaje „samostalno telo”, koje se zbog manje gustine od okolnih čvrstih stena gravitaciono „penje”, uzdiže kroz čvrste stene u pliće nivoe. Proces traje dok se gustina magme ne izjednači sa gustinom okolnih stena.

Da li se magme uzdižu samo pomenutim procesima? Postoje različita objaš-

njenja. Za kisele, granitske magme smatra se da je potrebna velika količina magme da bi se obezbedilo kretanje nagore i „prevazišla” sila otpora na margini tela magme sa okolnim stenama. Manje viskozne bazaltne magme se lakše uzdižu od pomenutih kiselih.

Uzlazna magma (koja se izdiže) jeste „klasična” interakcija dva fundamentalna, ali suprotna izvora energije – termičke i gravitacione, koja se dešava unutar Zemlje. Stapanje na izvoru magme može se nastaviti dok se sva izvorna stena ne istopi, a uzročni mehanizam (npr. dekompresija, priliv fluida) prestane. U gravitacionom polju, to je delimično rastopljena stena ili segregisani, izdvojeni rastop koji postaje dovoljno pokretljiv da „napusti” svoj izvor pre nego što dođe do potpunog stapanja.

Gravitacioni uspon se, nakon nekog vremena, obično zaustavlja jer magma gubi toplotu predajući je okolnim stenama, postaje viskozna i prestaje da se kreće. Na koji način proces teče da bi ona izašla ili se izlila na površini? Da, traži se najmanja količina energije. Kretanje i smeštaj magme ne mogu uvek biti razdvojeni i izdvojeni, ipak je to dinamički kontinuum.

Uspom magme kroz litosferu je termomehanički proces koji najvećim delom upravlja „uzgonskim” silama. Tu su i viskoznost magme, sastav okolnih stena, karakter tektonskih procesa (stresa), stratifikacija stena itd. Bazaltne magme iz omotača mogu se „podvući” i smestiti u podini kontinentalne kore i dati „svoju toplotu” za stapanje okolnih stena.

U ekstenzionim tektonskim okruženjima (riftnim zonama), magme prate „samogenerisane” pukotine koje su orijentisane upravno na najmanji horizontalni glavni stres (riftne zone).

Prenos, transport magme „kroz” dajkove i udaljenost od izvora je „kompromis” između brzine protoka, brzine hlađenja, njenog viskoziteta i gubitka toplote sa okolnim stenama. Bazaltna magma je niske viskoznosti, lako se i dugo kreće kroz „dajk” (dovodni kanal) prečnika nekoliko stotina metara, naravno i znatno više. Kiselija magma, međutim, „zahteva” mnogo „deblje” dajkove da bi se „normalno” kretala. Spori uspon viskozne granitne magme kroz duktilne (plastične) stene je alternativni mehanizam transporta.

ZAKLJUČIMO!

Magma koja se uzdiže „prisilno” pomiče stene koje formiraju pukotine i rase-de kroz koje ona dalje napreduje. Sposobnost magme da stvori i uzrokuje otvorene pukotine ipak je ograničena, jer pritisak „ubrizgavanja” magme treba da savlada i litostatički pritisak, tj. težinu stena koje su iznad. Naravno, ako je neko područje zahvaćeno aktivnom tektonikom, stvaraju se dekompresione pukotine, rasedi itd. koji olakšavaju smeštaj (ponekad i nastanak nove magme), kao i njeno utiskivanje u okolne stene, stvarajući dajkove i silove. Problem stvaranja velikih magmatskih komora i njen smeštaj „zahteva” pomeranje mnogo, mnogo stena da bi se stvorio slobodan prostor u kojem će se smestiti i ostati. Plutoni, kao što su lakoliti, mogu podići krov. Ako je sila „podizanja” magme ograničena, smanjuje se sposobnost

(mogućnost) da magma podigne krov, jer je njena gustina jednaka gustini okolnih stena. Proces uzdizanja može biti „potpomognut” dodatnim pritiskom koji dolazi iz dubine (usled novog utiskivanja magme u komoru). Na manjim dubinama, od 2 do 3 km, stvaraju se lakoliti, u kojima magma delom može stopiti i asimilirati okolne stene. Intenzitet stapanja zavisi od latentne toplote kristalizacije, količine magme, prisustva fluida, razlike u sastavu magme i okolnih stena itd.

Duktilna deformacija i povratni protok su mehanizmi povezani sa porastom dijapira na većim dubinama i verovatno su efikasni tamo gde su okolne stene „omekšane” toplotom plutona. Na bilo kojoj dubini može se dogoditi i „baloniranje” ili radijalno širenje magmatske komore dodavanjem magme odozdo. „Baloniranje” može fizički razlomiti okolne stene na stranama dijapira i deo magme može „pobeći” napolje kroz stvorene rasede, pukotine (stvaraju se dajkovi) ili se izliti na površinu.

Bazične (mafične) i retke ultrabazične magme u gornjem delu gornjeg omotača su manje guste od peridotitnog omotača od kojeg su nastale parcijalnim stapanjem. Zbog toga se uzdižu sve do granice **Moho** (Mohorovičićevog) **diskontinuiteta**, gde su stene manje gustine, približno iste kao i magma koja se uzdiže. Smatra se da čak i „fine” (male) razlike u gustini magme i okolnih stena mogu biti „dovoljne” da promene, zaustave ili nastave izdizanje magme ka površini. Gustina okeanske bazaltne kore, debljine oko 7 km, raste sa dubinom jer se pritisak povećava, što smanjuje „slobodne” prostore u steni (vezikule), pukotine, izbacivanje vode itd. U tom području, stvara se „nivo neutralnosti” pa je otvoreno pitanje da li će magma tu biti smeštena ili će nastaviti put ka površini. Na ovom neutralnom horizontu stvorena bazaltna magma može se, zbog dekompresije u području okeanskog rifta, dalje izdizati, „gurati” stvarajući dajkove ili se izliti na morsko dno.

Kontinentalna kora je daleko heterogenija po sastavu od okeanske, što smanjuje mogućnost daljeg uspona magme zbog veće gustine. Ispod promenljive debljine sedimenata, koji su gustine od $2,2 \text{ g/cm}^3$ do $2,7 \text{ g/cm}^3$, i magmatskih i metamorfnih stena, koje imaju prosečnu gustinu od $2,6 \text{ g/cm}^3$ do $2,9 \text{ g/cm}^3$ u dubljim delovima, što je blizu gustine bazalta, ne očekuje se da će se magme ovog sastava dalje uzdizati u pliće nivoe.

Smatra se da će bazaltne magme u njoj i ostati, ali zbog više temperature uzrokovane parcijalnim stapanjem, stvoriće se magme bogatije silicijom i manje gustine – andeziti, daciti (ako se izliju) ili granitoidni plutoni (ako tu ostanu). Ali, paradoksalno je da se neke primitivne bazaltne magme veće gustine od stena kontinentalne kore „obično” izlivaju na površinu kao lave u kontinentalnim područjima (kontinentalni plato bazalti). Kako se to može dogoditi? Jedna od mogućnosti je volumetrijska ekspanzija nakon topljenja u izvoru, koja pokreće magmu prema nižim pritiscima. Međutim, malo je verovatno da je ovaj efekat sposoban da pokrene magmu vrlo daleko od njenog izvora. Druge pokretačke sile su oslobađanje i širenje mehurića u gasovitim zasićenim masama, što može značajno smanjiti gustinu magme, povećati uzgon i izazvati vulkansku erupciju. Na kraju, magme

moraju imati i druge mehanizme kretanja koji ih „guraju” nagore kroz stene manje gustine. Jedan od njih su i dijapiri.

DIJAPIRIZAM

Pojedini autori smatraju da se magma lagano, kao dijapir, izgurava kroz okolnu duktilnu (savitljivu, plastičnu) stenu u omotaču (gornjem), litosferi i kori. Naziv *dijapir* potiče od grčkog glagola *diaperien*, što znači „probiti”. Postojanje i priroda magmatskih dijapira proizlaze iz ispitivanja odnosa polja intruzivnih tela magme, modelskih studija i teorijskih razmatranja. Magma takođe može brzo da se kreće i uzdiže kroz subvertikalne pukotine u mehanički polomljenoj steni, kada se stvaraju dajkovi. Kretanje magme kroz frakture, mehaničke diskontinuitete (pukotine, rasede) može se pratiti i seizmički.

Pojedini autori nazivaju dijapire „kapljicama” magme ili plutajućim „dugovečnim” bazičnim telima koja dolaze iz omotača ili felzitskih (kiselih) magmi, i koja su obično utisnuta u okolne, gušće stene različitog sastava, uglavnom u kontinentalnoj kori. Sličan mehanizam kretanja postoji i za kamene soli u sedimentnim stenama, po čemu su i dobile ime.

U sedimentnim sekvencama, dijapiri soli postaju mobilni kada se nalaze ispod debelih naslaga (slojeva) mlađih sedimenata i kada dosegnu dubinu od oko 450–1000 metara. Tada se pokreće mehanizam za kretanje, duktilni tok, uz jako uvijanje. Većina solnih dijapira ima oblik peščanog sata, sa tankim vratom i proširenom glavom. Neki slani dijapiri su se kretali i desetine kilometara od svog područja taloženja. Dijapiri soli i glinaca obično formiraju pregrade i zamke za naftu i gas.

Dijapiri magme se utiskuju u manje guste okolne stene i bili su predmet brojnih studija laboratorijskih modela (npr. **Ramberg, 1981**), kao i teorijskih i numeričkih analiza.

Gornja granica dijapira, manjeg gustog nestabilnog dela, usled kretanja se razvija u sinusoidne izbočine poznate kao Rejli-Tejlerove (**Rayleigh-Taylor**) nestabilnosti, koje rastu sve dok se razlika u gustini ne izjednači, tj. dok se proces ne stabilizuje i ne zaustavi uzdizanje.

Kretanje magme nagore kao dijapira zavisi od debljine stena koje su iznad, toplotne provodljivosti, razlike u međusobnoj gustini itd. i složena je funkcija mnogih parametara.

Brzina kretanja zavisi i od oblika i veličine dijapira. Magmaški dijapir koji raste kroz duktilnu koru mora imati relativno veliki odnos zapremine prema površini, zbog čega je „idealni” oblik „savršena” sfera (lopta), koja je u prirodi veoma retka, često i sa repom u donjim delovima. Veliki dijapiri zbog „nepovoljnog” oblika (naravno i drugih faktora, razloga) mogu ostati u kori.

Smatra se da su neke granitne intruzije po mehanizmu smeštaja dijapiri. Pomenimo da neki geolozi sumnjaju da su kisele magme termički i fizički sposobne da se uzdignu u gornje delove kontinentalne kore. Sumnje, barem delimično, pro-

izlaze iz teorijskih modela, koji zavise i od odabranih parametara i pretpostavljenih graničnih uslova. Dalja sumnja proizlazi iz nepostojanja nedvosmislenih dokaza na terenu za vertikalno kretanje. Više ili manje sferni oblik uzlaznog dijabira smanjuje viskozno povlačenje zbog minimalne površine u odnosu na zapreminu. Ovo, zauzvrat, maksimizira podizanje i zadržavanje toplotne energije. Dijapiri su najverovatnije u duktilnoj, toplijoj donjoj kori, gde se stene mogu lako termalno „omekšati” kako bi se olakšao uspon pre stagnacije na višim nivoima hladnije kore, gde je povećana čvrstoća stena i otežano uzdizanje.

Teorijske i eksperimentalne studije ukazuju na to da su dijabiri i baloniranje „efikasni” čak i kada su slične gustine magme i okolnih stena u ovim plitkim uslovima (*Marsh, 1982; Arzi, 1978*). Jedan od njih je natpritisak (engl. *overpressure*) magme, koji može polako „iznositi” magmu kroz okolne stene.

VREME UTISKIVANJA, SMEŠTAJA MAGME

Određivanje vremena kretanja, utiskivanja i hlađenja magme i tektonike veoma je važno. Da li je magma smeštena pre deformacije okolnih stena, istovremeno ili kasnije? Ovo su veoma važni podaci i presudni u izradi „hronološke” evolucije orogenih zona, jer su intruzivne magmatske stene vrlo „zahvalan” materijal za izotopsko datiranje. Kriterijumi za određivanje vremena smeštaja magme u odnosu na okolne stene baziraju se na međusobnim odnosima njihovog sklopa (struktura, tekstura), posebno u kontaktnom oreolu, i veoma su važni za određivanje, obično složene, polifazne orogene hronologije. Većina batolita (uključujući plutone „svih” vrsta, lakolite, lopolite, štokove itd.) deo je subdukcionih, orogenih procesa koji imaju ključnu ulogu u stvaranju i evoluciji orogenih pojaseva ili stvaranju kontinentalne kore.

Proučavanje deformacija, folijacije, lineacija, razlomnih struktura i nabora u većini slučajeva je povezano sa smeštajem i položajem plutona u odnosu na okolne stene, prostorno i vremenski. Na osnovu sklopa plutona i odnosa sa okolnim stenama, tektonske građe, izotopskog sastava itd., može se odrediti vreme i način smeštaja intruziva:

- **pretektonski** ili **prekolizioni** plutoni su već bili smešteni u stenama kada su zahvaćeni, obično snažnim tektonskim procesima (orogenezom); njihov sklop sa okolnim stenama je „zajednički”, pa je potrebno umeće (znanje) uz veliki, često i uporan, istraživački rad kako bi se pomenuto potvrdilo; pokazalo se da su pretektonski plutoni „hladniji” i verovatno otporniji na deformacije, kojih ima više na njihovim marginama; treba mnogo zajedničkog rada petrologa, tektoničara, geofizičara itd. da bi se spoznala „prava” istina;
- **sintektonski (sinkolizioni)** plutoni su oni kod kojih su njihovo utiskivanje i smeštaj istovremeni sa dejstvom tektonske aktivnosti; sklop (folijacija, lineacija, nabori itd.) u plutonu i okolnim stenama je isti ili sličan;

- **posttektonski (postkolizioni)** plutoni su smešteni nakon dejstva tektonskih procesa, stvaranja velikih raseda, relaksacionih faza, kada su znatno niži pritisci, zbog čega nemaju deformacije u strukturi i teksturi (bez folijacije i lineacije itd.).

Zemlja ima složenu istoriju. Većina plutona pokazuje višestruko i vremenski polifazno utiskivanje magme, čak i različitog sastava. Veliki batolitski pojasevi sastavljeni su od brojnih složenih intruzija koje su nastale „ponovljenim” (polifaznim) intrudovanjem (utiskivanjem) brojnih plutona tokom dugog vremenskog perioda. Pojedina manja intruzivna tela, kada se „pažljivo” proučavaju, pokazuju „više vremenskih” događaja. Najčešće imaju zonarnu građu sa „kasnijim” utiskivanjima magme u komoru. Ona nije „savršena” jer su neki delovi plutona asimilirani, „nabijeni” sa velikim brojem hemijskih i mineraloških trendova koji su povezani sa razvojem i diferencijacijom magme u komori i njenom asimilacijom sa okolnim stenama. Kontaktne zone mogu biti veoma „suptilne”, ponekad i teško prepoznatljive bez obzira na višestruka injektovanja, hemijske i mineraloške varijacije. Pojedini autori smatraju da je većina velikih plutona nastala „narastanjem” i spajanjem manjih magmatskih tela.

Pažljivo i kritičko proučavanje odnosa plutona i okolnih stena, uz njihov sastav i sklop, omogućava tumačenje procesa koji su uključeni u vreme smeštaja plutona.

KONTAKT PLUTONA SA OKOLNIM STENAMA

Magme bliže kontaktu se brže hlade od središnjeg dela, zbog čega su kristali sitniji. U nekim kontaktnim zonama uočava se i orijentacija minerala, najčešće biotita, hornblende, piroksena (kao i ksenolita), u magmatskoj steni koja je posledica kretanja magme u vreme njenog utiskivanja, intrudovanja.

Pomenuti procesi liče na metamorfne stene, pa su potrebna detaljnija terenska, a i mikroskopska proučavanja.

Karakter i širina kontaktne zone zavise od dubine, sastava magme, prisustva fluida i sastava okolnih stena. Veličina zrna i stepen rekristalizacije u okolnim stenama se smanjuju brzo sa udaljavanjem od kontakta (detaljnije u poglavlju o kontaktno-metamorfnim stenama).

Na kontaktu ili u blizini kontakta sreću se žične stene, apliti i pegmatiti, koji se mogu utisnuti i u okolne stene. Česti su i ksenoliti, komadi okolnih stena koji su zahvaćeni u vreme utiskivanja magme.

Nastavimo diskusiju sa ostalim intruzivnim oblicima.

ŠTOK

Štok je diskordantna intruzija velikih dimenzija i nepravilnog oblika. Obično je kupola batolita sa izloženom površinom manjom od 100 km². Zajedno sa batolitima, vezani su za kisele i intermedijarne (prelazne) stene, koje uglavnom seku

sklop okolnih stena, slojevitost i škrljavost. Po obliku i geometriji razlikuju se od lakolita i lopolita. Njihova podina (dno) jeste nepoznanica, tj. do sada nije otkriveno. Najčešće su stvarani u više vremenskih intervala (faza). U njima se često sreću anklave, posebno u kiselim (granitskim) batolitima i štokovima.

V.4.1.2 KONKORDANTNA MAGMATSKA TELA

Konkordantna plutonska magmatska tela imaju granicu paralelnu sa slojevima sedimentnih stena u koje su utisnuta ili su paralelna sa škrljavošću u metamorfnim stenama. U ovu grupu spadaju lakoliti, lopoliti i silovi. Nastaju kada se magma „ubrizgava” (utiskuje) u postojeće ravni diskontinuiteta (slojevitosti, škrljavosti), kada ih „razdvaja”.

LAKOLIT

Lakolit je „skladno” kupolasto konkordantno intruzivno telo sa lučnim, zasvođenim, konveksnim gornjim delom, krovom nastalim „uguravanjem” (utiskivanjem) magme i smeštenim paralelno sa sklopom okolnih stena, slojevima, škrljavošću itd. i ravnom podinom (slika 310).

Ulaskom dodatne magme, krov (površinski, gornji deo) podiže se stvarajući konveksnu strukturu. Magma koja utiskivanjem gradi lakolit uglavnom dolazi (izdiže se) iz dubljih izvora preko sistema dajkova, o kojima će biti reči kasnije. Lakoliti mogu biti veličine i nekoliko desetina kilometara. Većina granitoidnih masa u našoj zemlji ima oblik lakolita. Smatra se da su veličine nekoliko desetina km².

LOPOLIT

Lopoliti su konkordantna intruzivna magmatska tela oblika levka, zdele (slika 410) nastala utiskivanjem magme u sinformu. Slične su veličine kao lakoliti, a mogu biti i veći. Obično su vezani za bazične magme.

Lopoliti se „protežu” (pružaju) od nekoliko desetina do (retko) nekoliko stotina kilometara, i debljine su do nekoliko kilometara. Izgrađeni su od zonarnih bazičnih ili, retko, kiselih stena. Često se u njima sreću dragoceni metali poput nikla, bakra, hroma, platine i paladijuma.

FAKOLIT

Fakolit je konkordantna intruzija oblika jako povijenog sočiva, jer se magma utisnula u antiklinalne i sinklinalne delove struktura ili u šarnire velikih nabora. Kao i lopoliti, javljaju se u grupama. U preseku imaju oblik savijene kifile.

SIL

Sil je tabelarno, „skladno” **konkordantno magmatsko telo utisnuto u okolne sedimente paralelno sa ravnima slojevitosti ili u metamorfne stene para-**

lelno sa škriljavošću. Morfološki, to je žica, dugačka i tanka u odnosu na dužinu pružanja (slika 311). Jasno je da magma nije mogla biti stvorena između dva sloja sedimenata tako da je stvoreni „sil” „hranjen” magmom iz komore, obično preko



Slika 311. Sil dioritporfirita, Rudnik; debljina sila je oko 1 m

dajka. Silovi se obično formiraju u magmama sa niskim viskozitetom i uglavnom su debljine od desetak centimetara do stotinu metara, a dužine i do nekoliko desetina kilometara. Obično se, kao i dajkovi, hlade od zidova prema središnjem delu. Javljaju se kao pojedinačna tela, retko kao „rojevi”, kada su udruženi sa dajkovima.

ŽICE

Žice su „opšti” termin koji koristi veliki broj geologa. Nastaju kretanjem i utiskivanjem magme kroz mehaničke diskontinuitete, pukotine, rasede, duž ravni lučenja itd. unutar magmatskog tela odakle potiču ili se javljaju u drugim, okolnim stenama. Mogu biti konkordantne i diskordantne. Prečnika su (debljine) od nekoliko centimetara do nekoliko stotina metara i obično su ispod metra. Javljaju se najvećim delom u matičnoj magmatskoj steni, granitu, kvarcmonzonitu itd.

Pojedini autori ih svrstavaju među „male” dajkove i silove. Sreću se i „rojevi” žica koji mogu biti međusobno paralelni ili se radijalno razdvajaju. Od magmatskih stena, kao žice najčešće se javljaju apliti i pegmatiti, koji će detaljnije biti opisani u poglavlju Granitoidi.

Apliti su sitnozrne, a **pegmatiti** veoma gruboizrne stene (izgrađene od krupnih zrna kristala, minerala) koje se javljaju u žicama debljine od nekoliko centimetara do najviše nekoliko metara, obično oko desetak centimetara. Apliti su obično manje debljine.

V.4.1.3 DISKORDANTNA MAGMATSKA TELA

Diskordantne magmatske intruzije „presecaju” slojeve stena ili škriljavost. One su najčešće bili „dovodni” kanali za transport magme iz dubljih delova magmatske komore do plitkih intruzija ili do njenog izlivanja, površinskih erupcija. U ovu grupu intruzija spadaju dajk, nek i dijatrema.

DAJK

Dajk je diskordantno magmatsko telo koje nastaje utiskivanjem magme duž postojećih raseda, pukotina (nekada ih i sami stvaraju), naročito u područjima zahvaćenim širenjem (riftingom), najčešće u plitkim (hipoabisalnim) uslovima (slika 312). Često su stvarani u više faza, kada se međusobno seku, ukrštaju itd. U odnosu na okolne stene, diskordantni su, tj. seku slojevitost ili škriljavost. Dajk je morfološki žica, debljine od nekoliko centimetara do više stotina metara, a dužine i više kilometara. Brže se hlade od plutona jer su „tanki”, lakše oslobađaju toplotu, naročito po njihovom obodu. Minerali su obično sitniji nego u intruziv-



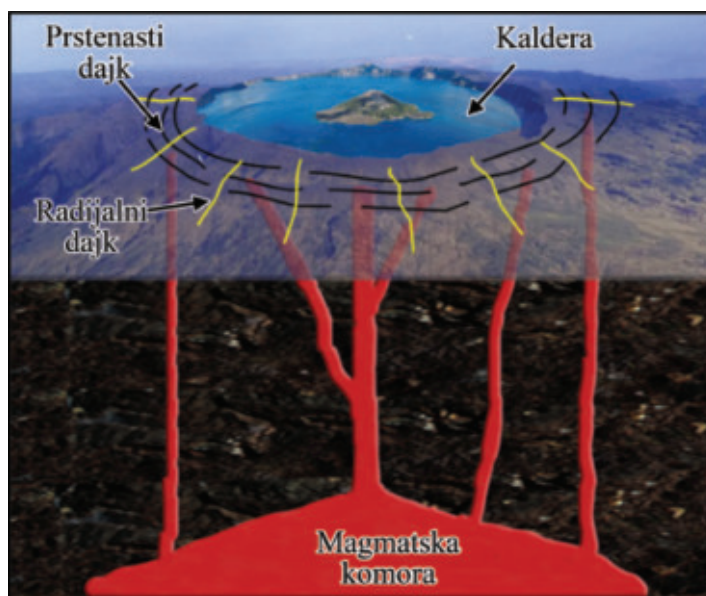
Slika 312. Dajk bazične metamorfisane stene u gnajsevima Vučja

nim stenama. Dajkovi su uglavnom otporniji na atmosferske uticaje od okolnih stena, pa topografski često formiraju uzdignute grebene. Dajkovi se javljaju kao „samostalna” tela ili u „setovima” (grupama), kada se nazivaju rojevi. Obično su međusobno paralelni.

ROJEVI DAJKOVA

Rojevi dajkova, radijalni dajkovi i koncentrični dajkovi sastoje se od više dajkova koji su međusobno paralelni, subparalelni, zrakasti ili nepravilno orijentisani. Uglavnom su istovremeno utisnuti u matičnu ili (retko) okolnu stenu. Mogu biti različitog sastava i obično se nalaze na margini intruzije ili u području vulkanske aktivnosti (kupe). Radijalni dajkovi nastaju usled uzdizanja magme koja lomi stene iznad sebe stvarajući pukotine, razlome u koje se utiskuje. Tokom intruzije magme u okolne stene, pritisak u komori varira. Nakon početnog „previsokog” pritiska koji je dovoljan da „izazove” magmu, stvori radijalne rasede, pritisak se verovatno smanjuje. U nekim magmatskim komorama, to može biti rezultat oslobađanja fluida ili usled hlađenja i kristalizacije minerala. Utiskivanje magme u okolne stene ili njeno izlivanje može stvoriti potencijalne „šupljine” u delimično ispražnjenoj komori. Sa gubitkom pritiska magme, stene iznad mogu da se „uruše”, stvarajući depresiju poznatu kao kaldera (detalnije u delu o vulkanskim oblicima). Tada se stvaraju i prstenasti rasedi koji slede oblik komore. Magma u oslabljenim zonama može da se utisne („ušpricuje”), formirajući prstenaste dajkove, kada se stvaraju kompletne kružne strukture. Skoro su vertikalne, a u preseku kružne. Prstenasti dajkovi se formiraju kada se krov plutona uruši zbog smanjenja pritiska u donjoj komori, što dovodi do „izlaska” magme u vidu dajkova oko kaldere. Konusni dajkovi se formiraju pod pritiskom magme, koja lomi krovne stene i magmu, i utiskuje se duž nastalih fraktura, pukotina i raseda. Pritisak koji se javlja tokom intruzije magme stvara rasede i pukotine koji se šire prema gore iz centralne tačke i u koje se utiskuje magma. Oni grade međusobno povezane mreže, koje su povezane i usaglašene tektonskim sklopom, procesom uzdizanja magme, lave.

U literaturi se sreću termini **prstenasti dajkovi** i **radijalni dajkovi**, i to su sistemi koncentričnih dajkova koji na površini formiraju prstenaste strukture (slika 313).



Slika 313. Prstenasti i radijalni dajkovi

BAZALтни DAJKOVI U EKSTENZIONIM REŽIMIMA

Generalno, izlivi bazalta se javljaju u područjima riftovanja, širenja ploča, a andeziti u kompresionim područjima subdukcije. Pomenuti uslovi imaju fundamentalno različita stresna stanja koja omogućavaju različite mehanizme uzdizanja magme i razvoj, stvaranje litosfere.

Bazaltne magme koje dolaze iz gornjeg omotača kroz procese adijabatske dekompresije, kristalizacije i diferencijacije dolaze na površinu i najvećim delom se izlivaju na površinu.

Ovim mehanizmom, procesom, stvaraju se ekstenzione frakture, nezavisno od bilo koje „dodatne” sile, uticaja prisustva „druge” tektonike, fluida itd. Pomenuto je u saglasnosti sa geološkim opservacijama. U kompresionim režimima, bazaltne magme su manje „sposobne” za uzdizanje do površine.

Smatra se da ogromni radijalni rojevi dajkova nastaju u područjima širenja kontinenata i otvaranja okeana (riftnim zonama), kada mogu biti dugački i 2000 km, a širine do par kilometara (*Ernst i Buchan, 1997, 2001*). Većina dajkova je bazaltnog sastava i vezuje se za uzdizanje ogromne količine magme iz gornjeg omotača, koja se kretala duž raseda i pukotina do kore, blizu površine.

Bazaltni dajkovi, kanali su verovatno putevi za kretanje magme kontinentalnih i okeanskih vulkana (kao što su Havaji) i za rast okeansko-grebenskih podmor-skih vulkanskih sistema vezanih za širenje morskog dna i samim tim i rast „čitavog” morskog dna. Kompleksi dajkova koji se formiraju na okeanskim grebenima u okeanskoj kori svedoče o dugotrajnom obnavljanju, pritokama magmi u dilatacionom okeanskom grebenu. Neki dajkovi nikada „ne stižu” na površinu Zemlje, gde magma „vidi” svetlo dana. To su „slepi” dajkovi. Rojevi bazaltnih silova leže u podlozi (podini) platoa bazalta i mogu imati sličan volumen kao i dajkovi. Smatra se da je ogroman roj jurskih dijabaznih silova formiran tokom raspada Gondvane. Segmenti ovih silova nalaze se u Antarktiku, Južnoj Africi i Tasmaniji, gde su pojedinačni silovi debeli čak 300 m, a segment roja izrasta preko 25% površine od 65.000 km².

DOVODNI DAJKOVI

Dovodni dajkovi (engleski termin *feeder dykes* obično se u praksi koristi nepreveden) jesu dajkovi koji su ponekad i zrakasto raspoređeni i javljaju se na padinama, stranama vulkanskih kupa (slika 314). Njihovo prisustvo ukazuje na to da se vulkanske erupcije dešavaju u glavnom krateru, ali i sa strane duž



Slika 314. Dovodni dajkovi, Vezuv, Italija

pukotina. Dovodni dajkovi snabdevaju magmom povezane silove ili druge intruzije (proboje) na padinama i obodima vulkanskih kupa. Ogromni pomenuti radijalni rojevi dajkova verovatno su hranili obilne izlive lava formirajući plato bazalte.

EŠALON I PARALELNI DAJKOVI

Ešalon i paralelni dajkovi su sistemi paralelnih dajkova koji nastaju smicanjem. Česti su u riftnim zonama.

SISTEMI SUBPARALELNIH DAJKOVA

Sistemi subparalelnih dajkova (engl. *sheeted dykes*) izgrađeni su od dijabaza, ali i gabrova, ponekad i bazalta. Najčešće grade središnje delove okeanske kore, područje ispod *pillow* lava. Debljine su i do nekoliko kilometara. Nastaju hlađenjem i kontrakcijom bazaltne magme koja se utiskuje („ubrizgava”) u ekstenzione pukotine nastale širenjem u okeanskom grebenu, tj. riftu, duž kojih se izliva na okeansko dno i hrani *pillow* lave. Širenjem okeanskog dna, proces se obnavlja, ponavlja, pa dajkovi ulaze jedan u drugi, gradeći nadaleko poznati sistem subparalelnih do paralelnih dajkova, koji su zbog brzog hlađenja po obodu sitnijeg zrna i grade tzv. „zamrznute” rubove (engl. *chilled margins*), koji su važno teksturno svojstvo u okviru petrološkog proučavanja (slika 315).



Slika 315. Sistemi subparalelnih dajkova dijabaza, Maljen; gore desno: zamrznut rub

NEKOVI

Nekovi su cilindrični, cevasti plutonski dajkovi izloženi na površini pa su često i erodovani. Najčešće predstavljaju ostatke vulkanskog kanala u kojima se nalazi brečast, eksplozijom razbijen vulkanski materijal. Različite su debljine, obično nekoliko desetina do nekoliko stotina metara, pa i do nekoliko kilometara.

To su „drevne” cevi koje su usmeravale magmu prema vulkanu koji je odavno uklonjen erozijom. Neki dajkovi su dublji delovi vulkanskih kanala, kao i vulkanskih kupa koje su manje kompaktne, zbog čega se brže eroduju i vodom ili gravitacijom odlaze, dok neki „zaostaju” kao vertikalni stubovi. Ponekad se nazivaju i „vulkanski vratovi” jer su hlađenje i kristalizacija magme u „cilindričnoj” cevi smatrani centralnim delovima vulkana, iako zapravo predstavljaju plutonske cilindrične dajkove. Kada se neki od njih levkasto završavaju, nazivaju se **etmoliti**.

DIJATREME

Dijatreme su levkaste cevi zapunjene brečama koje su bogate fragmentima, odlomcima stena, najvećim delom iz gornjeg omotača i smatraju se posebnom vrstom intruzija (detaljnije u poglavlju Kimberliti). Veliki sadržaj odlomaka ponekad otežava određivanje njihovog načina nastanka. Pojedini autori smatraju da dolaze sa dubine od preko stotinu kilometara. Gornji deo je u obliku plitke „posude”, koja se naziva **maar** i okružena je piroklastičnim prstenom (biće prikazana u odeljku Kimberliti).

Poreklo dijatrema se vezuje za magmu bogatu fluidima (**Lorenz, 1986**). Nastaju eksplozivnim intruzijama magme koja ima visok sadržaj fluida, koji „gura” fragmente magme i ksenolite (odlomke okolnih stena) prema gore.

Dijatreme se detaljno proučavaju zbog genetske veze sa kimberlitima koji sadrže dijamante.

Vulkanske tekture poput tufovih konusa mogu se razviti na površini iznad dijatrema, a obično su „odavno” erodovani, uklonjeni uz zaostale gornje delove dijatreme. Mnoge dijatreme su vezane za alkalne bazične do ultrabazične stene, kimberlite, koje su bogate H_2O i CO_2 .

Iznad „korenske” zone dajka koji sadrži nefragmentirani kimberlit, visoko naponska magma oslobođanjem fluida „lomi”, kida stene i brzo se, turbulentno uzdiže (10–30 m/s) na površinu, noseći ovaj materijal (ksenolite) i fragmente kore. Složeni mineralni (petrološki) sastav nekih dijatrema otežava određivanje mehanizma njihovog stvaranja.

V.4.2 NAČIN POJAVLJIVANJA VULKANSKIH STENA

UVOD

Površinski (ekstruzivni) vulkanski procesi, za razliku od intruzivnih (dubinskih), mogu se posmatrati direktno, ali to ne znači da su erupcije lava i stvoreni morfološki oblici za geologe „potpuno razumljivi”. Vulkani su mnogo više od akademskog teksta koji čitate u ovoj ili bilo kojoj drugoj knjizi iz oblasti petrologije, geologije, hazarda itd.

Vulkan je mesto na kopnu ili u moru (okeanu) gde se lava i gasovi izliva-ju na Zemljinu površinu.

To mogu biti strukture kružnog oblika, pukotine i rasedi dužine od par desetina metara do par hiljada kilometara (srednjeokeanski riftovi).

Bez obzira na to da li ste ikada bili svedoci izlivanja lave ili ih gledali na filmu, televiziji, uvek osećate uzbuđenje jer je vulkanizam jedan od najimpresivnijih, najspektakularnijih, ali i najopasnijih fenomena na Zemlji.

Ljudi širom sveta žive u blizini aktivnih vulkana i treba razumeti njihov strah (a i rizik) od vulkanskih erupcija i kako na njih „reagovati”. Ljudi su ugroženi, ali i fascinirani silom i „besom” vulkana hiljadama godina, što je zapisano i u „biblijskim” odlomcima koji se odnose na mnoge erupcije. Setimo se, „u skorije” vreme, 79. godine naše ere, kada su vreli pepeo i lava Vezuva veoma „brzo” zatrpali, pokrili Pompeju i Herkulanum, a kada je u teškim mukama nastradao ogroman broj ljudi. Veliki broj vulkana na našoj planeti je samo „potencijalna” pretnja i opasnost. To su „spavajući” giganti na koje treba uvek misliti jer u svakom trenutku mogu izliti veliku količinu lave ili „izbaciti” blokove očvrsele lave ili pepela, prašine i gasova na desetine kilometara u atmosferu, a koji u nekim slučajevima mogu ugroziti i stotine hiljada, pa i milione ljudi, uzrokovati atmosferske i klimatske promene, devastirati plodno zemljište, stvoriti blatne bujice itd.

Vulkani su prepoznati na drugim planetama Sunčevog sistema – Veneri, Marsu, Jupiterovom satelitu Io itd.

Na Marsu smo, sećate se, pomenuli najveći pojedinačni vulkan, Olympus, sa prečnikom od 440 km i 24 km nadmorske visine.

Lava, lava, čudesna lava! Većina nas želi da je vidi, dodirne i bude svedok izlivanja vulkana.

Lava je magma kada izađe i izlije se na površinu.

Naziv *lava* potiče od italijanske reči za potok, koja je izvedena od glagola *lavare* – „oprati”.

Malo italijansko ostrvo Vulkano (Volcano, slika 316). dalo je „porodično” ime za sve vulkane. Istorijske erupcije navele su Rimljane da veruju da je ovo ostrvo „kovačnica” Vulkana, Jupiterovog sina i kovača rimskih bogova. Vulkano je dao naziv i za poseban stil erupcije–vulkanski. Postoji ogromna raznolikost u stilu i karakteru erupcija, čak i unutar jednog vulkana. Viskozitet, uz hemijski sastav i



Slika 316. Ostrvo Vulkan (Volcano) u Italiji

prisustvo fluida, jedno je od važnih svojstava koja „kontroliraju” erupciju, uspon ka površini, izlivanje i brzinu kretanja.

Bazaltna lava je obično niskog viskoziteta, zbog čega brzo teče, dok dacitska i riolitska lava imaju veliku viskoznost i teku sporo. Magma obično sadrži minerale koji su počeli kristalizaciju ranije (u dubini) pre nego što se izlije na površinu i postane lava. Veći sadržaj iskristalisanih minerala povećava viskozitet, zbog čega postaje „sporija”. Ako u lavi ima više od 30% kristala, efekat postaje primetan, a sa 60–70% ona se ne može kretati. Pomenimo i veličinu, oblik i raspodelu kristala, koji takođe značajno utiču na kretanje lave. Ako u lavi nema fluida (gasova), erupcija je „mirna”. Zavisno od njenog sastava, viskoziteta i morfologije terena, stvaraju se tokovi lave dužine i do nekoliko kilometara, koji obično završavaju u moru (okeanu). Bazaltna lava ima nizak viskozitet i uglavnom nema fluide, zbog čega se brzo kreće. Havajske lave su tokom erupcije 1950. godine na Mauni Loi putovale od otvora (kratera) do okeana, udaljenog 10 km, samo 3 sata.

Nasuprot tome, silicijske lave, koje su viskozne, a ne sadrže fluide, teku veoma sporo. Tokom erupcije 1991–1995 godine u Unzenu, u Japanu, maksimalna brzina protoka dacitskih lava je bila manja od 50 m na dan.

Ako lava sadrži fluide (gasove), erupcija obično počinje s „izduvavanjem”

(gubitkom gasova) koje nalikuje diskretnim kratkotrajnim „eksplozijama” u trajanju od „samo” nekoliko minuta do nekoliko sati. Oni su „prethodnica” glavne erupcije. Uz „zaglušujuću” buku, nalik grmljavini, izbacuju se vulkanski blokovi, bombe i prašina visoko u atmosferu. Erupcija je eksplozivna, karakteristična i „uobičajena” za dacite, andezite, ali i za sve lave koje imaju fluide i gasove.

Erupcija u oba slučaja može trajati kratko, nekoliko sati, dana, ali i „dugo”, par nedelja, meseci, pa i godina.

Ponovna aktivnost vulkana nakon mirovanja zavisi od niza faktora: dopunjavanja magme u komori, brzine hlađenja i kristalizacije magme koja zavisi od sastava, ali i od veličine i oblika komore, viskoznosti, sadržaja fluida i, na kraju, tektonske aktivnosti, koja stvara pukotine i rasede, omogućavajući da se lava izlije. Tokom istorije izlivanja nekog „dugovečnog” vulkana, erupcije mogu biti mirne, ali i eksplozivne, posebno nakon perioda mirovanja. Razlog je oslobađanje fluida (gasova) tokom početne, prve erupcije kada su se gasovi izdvojili na vrhu magmatske komore. Nakon daljeg izlivanja „stvar se smiruje”, lava se „normalno” izliva.

Zapremina izlivenog toka lave zavisi od intenziteta erupcije, viskoziteta i drugih faktora. Najveći tok lave u istorijskom zapisu bila je erupcija 1783. godine na Islandu. Lava se izlivala iz pukotine, raseda, dužine 25 km u periodu od 8 meseci, a ukupna površina je dostigla 600 km². Nastradalo je oko 10.500 ljudi, jedna petina Islanda, a hiljade ovaca, konja i goveda su umrle od gladi.

Mnogi istraživači su modelirali mehanizam erupcije. Numeričkom simulacijom je utvrđeno da brzina erupcije kontroliše i širinu toka lave, a njegova dužina zavisi od niza parametara: ugla nagiba kretanja (morfologija terena), njenog sastava, količine fluida itd. Pomenimo da su „pravi” tokovi lave složeni i uglavnom ih čini više manjih tokova, koji se dugo vremena hrane iz glavnog sistema.

Šta omogućava izlivanje lave? Dva uslova moraju biti ispunjena da se magma istisne direktno iz njenog izvora u gornjem omotaču, dubokoj kori gde je nastala ili iz komore u kojoj je smeštena, obično na manjoj dubini.

Prvo, mora postojati otvor (pukotina, rased) koji ide do izvora ili komore, a drugo, magma treba da bude u stanju da se kreće i izlazi na površinu. Ovo nisu nužno nezavisni procesi, obično su međusobno povezani i zavise od niza faktora koje smo pomenuli.

Ekstenzioni tektonski režimi (među njima su i riftne zone) omogućavaju pad pritiska, kada bazaltna magma stvorena u gornjem omotaču ili plice smeštenim rezervoarima počinje da se kreće, penje kroz stvorene pukotine i izliva na površinu. Smatra se da je ovo najverovatniji mehanizam izlivanja bazaltne magme.

Kretanje magme od mesta stvaranja do izlivanja često je praćeno fazama odmora, kada se magma smešta na znatno manjim dubinama formirajući komore, magmatske rezervoare. Erupcija može biti i naknadno pokrenuta kada pritisak fluida rastvorenih u magmi smeštenoj u najplićoj komori nadjača pritisak stena

iznad, koje kida i drobi, ponekad uzrokujući i eksplozivnu erupciju. Navedimo neke detalje:

(a) Kada se stacionarna magma smeštena u komori hladi, kristališu bitni minerali, feldspati, bojeni minerali, pri čemu se ostatak rastopa obogaćuje fluidima. Pri kraju kristalizacije, sadržaj fluida može biti dovoljan da nadjača spoljašnji pritisak i uzrokuje kretanje, izlivanje magme na površinu.

(b) Bazična „topla” magma može se utisnuti u bazu, podinu komore u kojoj se nalazi „hladnija” magma (kiselijeg sastava) bogata silicijumom i fluidima. Prenos toplote može stvoriti dovoljno dodatnog „uzgona” da izazove erupciju.

(c) Kada voda koja se nalazi u okolnim stenama, jezerima, snegu, ledu itd. dođe u dodir sa vrućom magmom, ona prelazi u gasovito stanje, naglo povećavajući volumen i raspršava lavu stvarajući ogromne količine prašine i pepela, i na kraju uzrokuje eksplozivnu erupciju.

Promene uslova tokom izlivanja lave mogu „zaustaviti” erupciju. To uključuje različite faktore, kao što su manje ili veće količine fluida, položaj fraktura duž kojih se magma kreće, brzina kretanja, stepen iskristalislosti itd.

V.4.2.1 KLASIFIKACIJA VULKANA

Većina vulkanskih erupcija podrazumeva izlivanje lave iz centralnog otvora – kratera koji se nalazi na vrhu vulkanske kupe. Međutim, neke erupcije su duž pukotina na strani vulkana (parazitski krateri) ili duž dugih i velikih razloma, riftnih zona unutar okeanskih i kontinentalnih grebena.

Vulkani se, prema većini autora, klasifikuju prema:

1. načinu, mestu izlivanja
2. karakteru erupcije
4. obliku, morfologiji vulkana
3. morfologiji toka lave i
5. tektonskoj sredini stvaranja.

V.4.2.1.1 PODELA ERUPCIJA VULKANA PREMA MESTU IZLIVANJA

Prema načinu i mestu izlivanja, erupcije vulkana se dele na **centralne i linearne i arealne**.

CENTRALNE ERUPCIJE

Lava se izliva na površinu iz jednog centralnog otvora – **kratera**. Obično dolazi iz magmatske komore preko vertikalnog do subvertikalnog cilindričnog dovodnog kanala, koji morfološki predstavlja „cev”, a izliva se na površinu stvarajući centralni krater, koji je najčešće smešten na vrhu vulkanske kupe.

KRATER

Krater je obično okruglastog, levkastog oblika i gradi udubljenje – depresiju prečnika od manje od 100 m pa do nekoliko kilometara (detaljnije u drugom delu ovog poglavlja, Morfologija vulkana).

Erupciju prate oslabljene zone, pukotine i rasedi, obično uz slabe zemljotrese. Kada se lava u krateru ohladi, očvrstne, stvara se čep, koji naredna erupcija uništava ili traži nove mogućnosti da se izlije na površinu kroz nove „**parazitske**” **kratere** ili duž pukotina po obodu vulkana stvarajući dovodne dajkove (engl. *feeder dykes*). Volumen izlivanja je obično manji. Pomenimo da poznati Vulkan Manuna Kea na ostrvu Havaji ima nekoliko desetina parazitskih kratera i dovodnih dajkova.

Centralni otvori, krateri i pukotine na boku, parazitski krateri mogu se pojaviti sami, ali i kombinovano na istom vulkanu. Centralne erupcije su obično pojedinačni vulkani, ponekad se sreću i manji „satelitski” vulkani, kada se grade vulkanski lanci. Obično su vezani za srednje kisele i kisele lave: dacite, andezite, riolite, koje obično sadrže fluide, stvarajući eksplozivne erupcije. Pomenimo i pit (jama) kratere.

PIT (JAMA)

Pit (jama) jeste krater kružnog oblika, nastao tonjenjem ili urušavanjem tla koje nije posledica erupcije vulkana (slika 317).

Može biti delom popunjen lavom, kada se formira jezero lave. Ovakvi krateri sreću se na padinama štitastih vulkana (Mauna Loa i Kilauea na Havajima). Smatra se da su krateri jame nastali „povlačenjem” magme (lave) koja „leži” ispod (nije izlivena). Analizom velikog broja erupcija na kopnu utvrđeno je da se polovina svih vulkanskih erupcija događa iz centralnih otvora.



Slika 317 Pit krater, Havaji

LINEARNE ERUPCIJE

Osim „centralnog” vulkanizma, koji izbija iz jedne centralne tačke, izlivanje lava se javlja i duž „linija”, jedne ili više obično paralelnih pukotina, fraktura ili raseda. Ovaj tip erupcija se najviše javlja u područjima srednjeokeanskih grebena, gde se ploče razilaze. To su najveće mase bazalta na Zemlji. One grade okeansku koru, koja se i sada, dok ovaj tekst čitate, neprekidno stvara širenjem, razilaženjem ploča u riftnim zonama.

Linearne erupcije se stvaraju i u kontinentalnim riftovima sa dominantnim bazaltnim lavama, kada nastaju ogromni izlivi – plato bazalti, koji se ponekad nazivaju i „poplavni” bazalti (engl. *flood basalts*). Pokrivaju hiljade kvadratnih kilometara, a debljina im je i nekoliko kilometara. Smatra se da pojedinačni tokovi lava prelaze ogromne udaljenosti (ponekad preko 100 km) zahvaljujući „ubrizgavanju” rastopljene lave ispod rano oblikovane, ojačane, očvrсле kore koja izoluje lavu koja teče ispod, sprečavajući gubitak toplote mesecima i godinama od izvora (*Self i dr., 1996, 1998*). Erupcije su obično polifazne i dugo traju, zbog čega izlivenne mase stvaraju plateau, velike površine i debljine. Zbog velike težine, plato bazalti uzrokuju spuštanje tla u podini, stvarajući ogromne basene. Pomenimo plato bazalte reke Kolumbija (zapadni deo SAD), koji čine više od 100 tokova nastalih u vrlo kratkom vremenskom periodu, miocenu, pre oko 17–15 Ma (*Reidel i Hooper, 1989*). Ukupna zapremina je 180.000 km³, a pokrivaju površinu od 160.000 km² i debljinu do 3 km. Pojedinačni veliki tokovi lave bukvalno poplave ogroman, obično ravan prostor. Plato bazalti često pokazuju dobro razvijeno lučenje.

Linearnom tipu erupcije pripadaju i opisani dovodni dajkovi koji se javljaju duž nekih većih vulkanskih kupa. Mogu biti pojedinačni, ali i radijalni, zrakasto raspoređeni oko kratera vulkana, ponekad i kao paralelni setovi (detaljnije u odeljku Morfologija vulkana).

AREALNE ERUPCIJE

Kada se lava izliva na velikim površinama, erupcija je arealna. Ovaj tip erupcije genetski je vezan uglavnom za opisane linearne erupcije. Lava se izliva duž velikih raseda i pukotina u kontinentalnim sredinama. Primer ovog tipa erupcije su pomenuti plato u Kolumbiji ili Dekan u Indiji itd.

V.4.2.1.2 PODELA VULKANA PREMA KARAKTERU ERUPCIJA

Vulkani se međusobno razlikuju i po „buci” koju stvaraju, od „jako glasnih”, eksplozivnih, do „mirnih”, koje možete, ako imate mogućnosti i sreće, gledati, pa čak i dodirnuti. Prema karakteru, erupcija se dele na eksplozivne, mirne, hidromagmatske i gasovite erupcije.

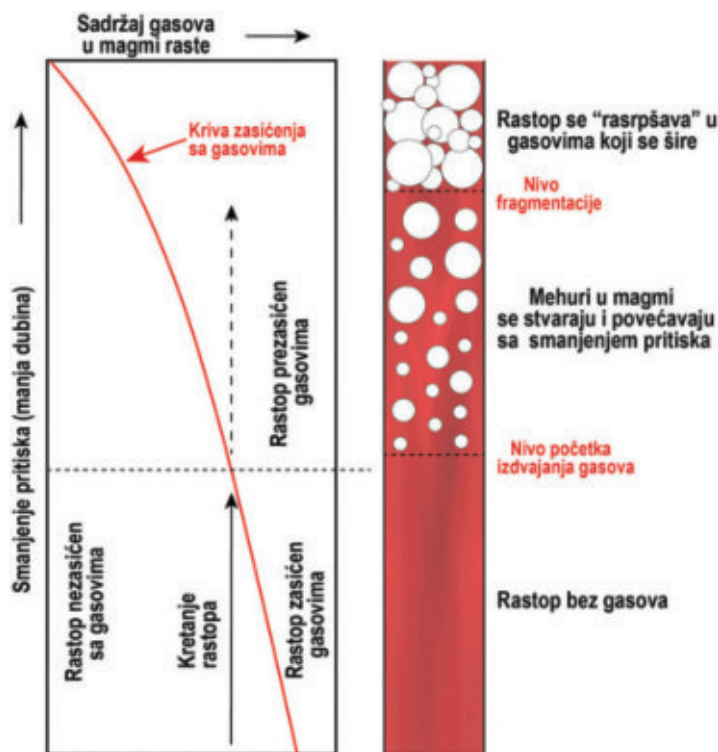
EKSPLOZIVNE ERUPCIJE

Eksplzivne vulkanske erupcije su među najdramatičnijim prirodnim događajima na Zemlji. Vulkani mogu eksplodirati snagom koja odgovara „sili” od stotine, pa i nekoliko hiljada atomskih bombi, kada ruše čitave planine, a izbačeni materijal, prašina i pepeo izbijaju čak i do stratosfere (slika 318). Eksplzivne erupcije počinju s „topovskim” grmljavinama u intervalima od nekoliko minuta do nekoliko sati. Kao i kod zemljotresa, još uvek ne znamo kada će se dogoditi. Obično nas „iznenade” jer ih ne možemo predvideti. „Male” erupcije događaju se, prema nekim autorima, bar jednom mesečno na našoj planeti, velike su znatno ređe (srećom), jednom u stotinu, hiljadu pa čak i milion godina. Komadi, blokovi očvrslе lave, ali i otkinuti komadi stena sa zida kanala, izbacuju se „balistički” i obično se deponuju (padaju) po obodu kratera vulkana, dok se pepeo i prašina „šalju” u atmosferu i mogu putovati oko cele planete.

Eksplzivne vulkanske erupcije najvećim delom su vezane za andezitske, dacitske i riolitske lave, koje su **bogate fluidima**, a koje su „smeštene” (nastale) u aktivnim kontinentalnim marginama, zonama subdukcije, odnosno vulkanskim (magmatskim) lukovima. Sastav lave, viskozitet i količina fluida i brzina njenog uzdizanja jesu ključni faktori koji „definišu” vulkansku eksplzivnu erupciju. Veliki pritisak na dubini „drži” gasove rastvorene u magmi. Tokom uspona, kretanja magme prema površini, pritisak se snižava i smanjuje se rastvorljivost fluida, koji se zbog toga izdvajaju kao mehurići u magmi. U jednom trenutku, usled izdizanja lave, unutrašnji pritisak fluida „nadjačava krhku” lavu i nastaje „eksplzija”.

Toplotna energija prelazi u kinetičku energiju, kada se naglo povećava volumen fluida, uzrokujući brže „rastezanje” zidova mehurića i skoro sva očvrsla lava se „raspršava”. Stvara se prašina, pepeo, koji se zajedno sa još uvek toplim fluidima, zbog manje težine, izbacuje u atmosferu. To je eksplzivna erupcija.

Sitniji materijal, vulkanski pepeo i prašina mogu biti „izbačeni” i na preko 10 km visine, gradeći „pečurku”, koju vidimo na nebu iznad nas. Vazдушnim strujanjima, oblaci prašine i pepela mogu otići „daleko” od vulkana i, uz hlađenje i



Slika 318. Eksplzivne erupcije (Sparks, 1978, dopunjeno)

uz „pomoć atmosferskih pojava” (kiše) pasti i taložiti se kao piroklastične stene na udaljenosti od nekoliko desetina pa i stotina kilometara od kratera.

Eksplzivne erupcije lava pome-
nutog sastava su obično polifazne, kada
se izlivaju „čiste lave” koje se smenjuju
sa „istaloženim” pepelom, prašinom, ali
i transportovanim blokovima, fragmen-
tima lave (piroklastičnim stenama). U
okviru eksplozivnih erupcija, u pojedini-
nim udžbenicima prikazan je i **strom-
bolijski tip erupcija**. Reč strombolijski
potiče od vulkana Stromboli (slika 319),
jednog od Eolskih ostrva severno od Si-
cilije. Erupcije se javljaju svakih dvade-
setak minuta iz jednog otvora ili kratera.
Stvara se epizoda svetlosne emisije,
zbog koje je ovaj vulkan dobio nadimak
„Svetionik Mediterana”. Svaka epizoda



Slika 319. Erupcija vulkana Stromboli

je uzrokovana oslobađanjem vulkanskih gasova, koje se događa, obnavlja na neko-
liko minuta, ponekad ritmično, a ponekad neredovno. Fragmenti lave se uglavnom
sastoje od delimično rastopljenih vulkanskih bombi, koje postaju zaobljene dok
lete kroz vazduh. Stromboli je skoro neprekidno aktivan poslednjih 2400 godina.
Drugi vulkani koji pokazuju „strombolijsku aktivnost” su Etna (Italija), Pakaja
(Gvatemala) i Erebus (Antarktik).

Termin „strombolijski” se koristi neselektivno za opisivanje raznih vulkan-
skih erupcija koje variraju od malih vulkanskih eksplozija do kilometarskih visokih
eruptivnih stubova. Međutim, „pravu” strombolijsku aktivnost karakterišu kratko-
trajni, eksplozivni izlivi lave izbačene nekoliko desetina ili stotina metara u vazduh.
Za razliku od havajskih erupcija, strombolijski tip erupcije nije „trajan” tip erupcije.

Povećanje visokog pritiska gasa potrebnog za fragmentaciju dovodi do po-
vremenih eksplozivnih erupcija.

Iako su strombolijske erupcije mnogo bučnije od havajskih erupcija, nisu
opasnije. One „izbacuju” fragmente veličine bombe i lapila koji putuju parabolič-
nim balističkim putanjama pre nego što se akumuliraju oko kratera.

Zbog velikog broja faktora koji su uključeni u nastanak eksplozivnih erupci-
ja, različiti su kriterijumi za njihovu klasifikaciju. Podele se kreću od „malih otvo-
ra bezazlenog prskanja” lave od nekoliko metara do snažnih, ogromnih opasnih i
katastrofalnih erupcija koje stvaraju i deponuju piroklastični materijal koji pokriva
na hiljade kvadratnih kilometara površine. Karakter erupcije se na istom vulkanu
može menjati, od veoma eksplozivnih faza do relativno mirnih, što zavisi od niza

faktora, najviše od sadržaja i sastava fluida i dubine njihovog izdvajanja iz lave.

Vulkanolozi koriste različite kriterijume za merenje „eksplozivnosti” vulkanske erupcije: intenzitet (brzinu lave koja izlazi iz kratera), veličinu, ukupnu zapreminu ili masu izbačene lave i vulkanskog materijala, indeks eksplozivnosti (odnos piroklastičnih naslaga i svih drugih vulkanskih materijala) i disperzivnu moć, područje gde su i koliko vulkanski materijali raspršeni od centra erupcije.

Eksplodije mogu biti veoma snažne i opasne, ugrožavajući čoveka, floru i faunu, ponekad i na ogromnom prostoru. Bili smo svedoci velikog broja eksplozivnih erupcija vulkana.

Pomenimo erupciju vulkana Pinatubo na Filipinima koja se dogodila juna 1991. godine. Vulkan je bio „uspavan” 500 godina. Stvoren je stub pepela i prašine neverovatne visine od 60 km. Tu je i kaldera Jeloustoun, iz koje je pre 600.000 godina izbačeno u atmosferu više od 1000 km³ vulkanskog materijala, pokrivajući većinu Sjedinjenih Država gustim vulkanskim ostacima, što je 1000 puta više nego pri erupciji vulkana Sveta Jelena 1980. godine.

Snažnom erupcijom vulkana Krakatau 1883. godine, kaldera prečnika oko 6 kilometara razorena je energijom koja je bila 5000 puta jača od atomske bombe koja je pala na Hirošimu. Eksplozija se čula u Australiji, udaljenoj oko 2000 km. Pepeo iz vulkana je pokrio oko 700.000 km² i „zaklonio” Sunce, što je dovelo do snižavanja globalne temperature u odnosu na prethodne godine na celoj planeti. Tada je stvoren i veliki cunami sa talasima visokim i do 40 metara, kada je nastradalo oko 36.000 ljudi.

Tu je i erupcija vulkana Pele 1902. godine, kada je uništena varoš Sen Pjer na karipskom ostrvu Martinik i nastradalo skoro 30.000 ljudi. Jedan od preživelih bio je u zatvoru bez prozora ukopanom u zemlji. Dva dana kasnije je iskopan, teško povređen, ali i „pomilovan” zbog svoje „sreće” u životu.

Ipak, piroklastični tokovi imaju tendenciju da budu ograničeni na doline. Lakši deo, šupljikav i sitniji, brzo se kišama spira i odnosi, posebno u tropskim uslovima, kada se stvaraju blatne reke. Često se nazivaju lahari (indonežanska reč). Mogu biti veoma opasni po ljude ili devastirati plodno zemljište. Lahari nastaju i kada vulkanska erupcija otopi glečér ili snežni pokrivač (detaljnije u poglavlju o Piroklastičnim stenama). Takva je bila i erupcija vulkana Ruiz u Kolumbiji 1985. godine, kada je stradalo preko 20.000 ljudi. U narednom tekstu više detalja.

PIROKLASTIČNI TOK

Piroklastični tok je lavina vrućeg pepela, plovućca, fragmenata stena i vulkanskog gasa koja se spušta niz stranu vulkana brzinom i do 100 km/sat ili više (slika 320). Temperatura unutar piroklastičnog toka može biti veća od 500 °C, dovoljna za sagorevanje i ugljenisanje drveta. Jednom deponovani, pepeo, plovuće i fragmenti stena mogu se deformisati (spljoštiti) i zavariti zajedno zbog intenzivne toplote i težine materijala koji leži iznad.

Piroklastični tok može biti rezultat eksplozivne erupcije lave ili čvrstih fra-

gmenata stena (ohlađene lave ili odlomaka iz kratera) ili oboje. On takođe može biti rezultat neeksplozivne erupcije lave kada se delovi kupole ili gusti tok lave sruše (uruše) niz strmu padinu. Većina piroklastičnih tokova sastoji se od dva dela: bazalnog toka grubih fragmenata koji se kreće po tlu i turbulentnog oblaka pepela koji se uzdiže iznad bazalnog toka. Pepeo može „otići” iz ovog oblaka „niz vetar” (vazdušnih struja).



Slika 320. Piroklastični tok

Piroklastični tok će na svom putu gotovo sve uništiti. Sa fragmentima stena veličine od pepela do kamenih gromada piroklastični tokovi obaraju, razbijaju, zatrpavaju ili odnose skoro sve objekte i strukture na putu. Ekstremne temperature stena i gasa unutar piroklastičnih tokova mogu izazvati sagorevanje zapaljivih materijala, posebno naftnih derivata, drveta, vegetacije i kuća.

Piroklastični tokovi se značajno razlikuju po veličini i brzini. I relativno mali tokovi koji se kreću <5 km od vulkana mogu uništiti zgrade, šume, i poljoprivredno zemljište, a u naseljenim područjima naneti ozbiljne povrede ljudi i životinja usled opekotina i udisanja vrućeg pepela i gasova.

Piroklastični tokovi uglavnom prate doline ili druga „ravna” područja. Zavisno od količine stena koje tok nosi, mogu se taložiti slojevi „labavih” (slabo vezanih) fragmenata stena do dubine od manje od jednog metra pa do više od 200 metara, kada nastaju i lahari. Vrući piroklastični tokovi nastaju i mešanjem lave sa snegom i ledom (na primer, na Islandu).

LAHAR

Lahar je indonežanski izraz koji opisuje toplu ili hladnu mešavinu vode i fragmenata stena koja teče niz padine vulkana i/ili rečne doline. Kada se kreće,

lahar izgleda kao masa vlažnog betona koja nosi ostatke stena veličine od gline do gromada prečnika većih od 10 metara (slika 321). Lahari se razlikuju po veličini i brzini. Mali lahari, širine manje od nekoliko metara i duboki desetak centimetara, mogu teći brzinom od nekoliko metara u sekundi. Veliki lahari su široki stotine metara i duboki desetine metara i mogu da protiču nekoliko desetina metara u sekundi, prebrzo da bi ljudi mogli da pobegnu.



Slika 321. Lahar

Dok lahar juri od vulkana, njegova veličina, brzina i količina vode i ostataka stena koje nosi stalno se menjaju. Početni talasi vode i fragmenata stena (očvrсле lave) često eroduju (stružu) tlo po kojem se kreću i uništavaju sve pred sobom. Često se „ulivaju” u postojeće doline, ponekad čak i u same reke. Piroklastični tokovi su posebno efikasni u stvaranju lahara jer imaju sposobnost da otope velike količine snega i leda, za samo nekoliko sati. Lahar na početku može uključiti vodu od otopljenog snega i leda (ako postoje) i reku koju preplavljuje. Erozijom (struganjem) stena i dodavanjem dodatne vode, lahari mogu lako narasti do više od 10 puta svoje početne veličine. Kada se lahar udaljava od vulkana, uglavnom se smanjuje. U literaturi postoje brojni termini za opis svojstava lahara: muljeviti tokovi, prezasićeni tokovi, kohezivni i nekohezivni tokovi itd.

Erupcije mogu direktno pokrenuti jedan ili više lahara brzim topljenjem snega i leda na vulkanu ili izbacivanjem vode iz jezera kratera. Lahari se češće formiraju intenzivnim padavinama tokom ili nakon erupcije – kišnica može lako erodovati labave vulkanske stene i tlo na padinama i u dolinama reka. Neki od najvećih lahara počinju kao klizišta izmenjenih stena zasićena vodom na boku vulkana ili na susednim padinama brda. Klizišta pokreću nove erupcije, zemljotresi, padavine ili neprekidna sila gravitacije na vulkanu.

Lahari se skoro uvek javljaju kod stratovulkana koji imaju tendenciju eksplozivne erupcije. „Uobičajene” su pojave sa snegom i ledom prekrivenih štitastih vulkana na Islandu, gde su erupcije bazaltne lave često ispod ogromnih glečera (na primer, u Vatnajokulu, na Islandu).

Lahari koji jure dolinama reka i šire se po poplavnim ravnicama desetinama kilometara nizvodno od vulkana često izazivaju ogromnu devastaciju zemljišta, poplave i ugrožavaju živote ljudi. Direktna udar fronta turbulentnog toka lahara ili gromada i trupaca koje nosi lahar može da „očisti” sve što se nađe na njegovom putu.

Čak i ako nisu smravljeni ili odneseni silom lahara, zemljište, putevi (i zgrade) mogu biti delimično ili potpuno zatrpani jednim ili sa više „slojeva” prašine i

pepela koje je doneo lahar. Tragičan primer takvog događaja bila je erupcija vulkana Pinatubo na Filipinima 1991. godine, koja je bila istovremena s dolaskom velikog uragana.

LAPILI

Lapili su fragmenti stena između 2 mm i 64 mm koji su izbačeni iz vulkana tokom eksplozivne erupcije. Lapili (jedinina: lapillus) na italijanskom znači „malo kamenje” (slika 322). Lapili su izgrađeni od različitih tipova tefre, uključujući skoriju, plovu-ćac i retikulit. Zaobljene čestice tefre u ovom opsegu veličina nazivaju se akrecioni lapili, i se sastoje od sitnih zrna pepela zalepljenih zajedno. Pepeo ponekad formira tako zaobljene čestice u stubu ili oblaku, zbog vlage ili elektrostatičkih sila.



Slika 322. Lapili; gore desno detalj

TEFRA

Tefra je opšti termin za fragmente vulkanske stene i lave bez obzira na veličinu. Tefre obično sadrže obilne mehuriće gasa (vezikule). One uključuju i velike guste blokove i bombe, kao i male ostatke lakih stena kao što su skorija, plovu-ćac, retikulit i pepeo (slika 323).

Kada tefra pada na zemlju s povećanjem udaljenosti od vulkana, prosečna veličina pojedinačnih čestica stene postaje manja, a debljina istaloženog materijala tanja. Sitniji fragmenti (pepeo i prašina) ostaju u vazduhu stvarajući oblak erupcije duže vreme, što omogućava vetru da odnese sitne čestice dalje od vulkana. Tefra se sastoji od širokog spektra čestica stena različitog sastava, uključujući kombinacije plovu-ćca, komadića stakla, kristala različitih vrsta minerala i razbijenih stena svih tipova (magmatskih, sedimentnih i metamorfnih). Opasnost od udara velikih fragmenata tefre najveća je u blizini vulkanskog otvora (unutar 5–10 km) i opada sa povećanjem udaljenosti. Na primer, nekoliko eksplozija na planini Sveta Jelena tokom perioda rasta kupole između 1981. i 1986. godine „izbacilo” je blo-



Slika 323. Tefra

kove lave prečnika od 1 m na udaljenosti 2–3 km od kupole. Veliki broj termina se koristi za opisivanje raspona fragmenata stena koje vulkani bacaju u vazduh. Klasifikuju se prema veličini, obliku ili načinu na koji se formiraju i putuju. Oblak tefre i gasova koji se formira niz vetar od vulkana koji eruptira naziva se **erupcijski oblak** ili oblak erupcije. Vertikalni stub od tefre i gasova koji se uzdiže direktno iznad otvora je erupciona kolona.

Erupcijski oblaci su često tamne boje – smeđe do sive, ali mogu biti i beli, veoma slični „vremenskim” oblacima. Oblaci erupcije se kreću hiljadama kilometara niz vetar i često se sve više šire na većoj površini sa povećanjem udaljenosti od kratera. Veliki erupcijski oblaci mogu „obići” celu planetu za nekoliko dana.

VULKANSKI PEPEO

Vulkanski pepeo se sastoji od stena, minerala i fragmenata vulkanskog stakla prečnika manjeg od 2 mm, što je nešto veće od veličine glave čiode (slika 324). Vulkanski pepeo nije isto što i meki pahuljasti pepeo koji nastaje sagorevanjem drveta, lišća ili papira. Tvrd je, ne rastvara se u vodi i može biti izuzetno mali – čestice pepela manje od 0,025 mm u prečniku su uobičajene. Pepeo je izuzetno abrazivan, sličan fino usitnjenom prozorskom staklu, blago korozivan i električno provodljiv, posebno kada je mokar. Vulkanski pepeo nastaje tokom eksplozivnih erupcija razbijanjem čvrstih stena i „nasilnim” odvajanjem magme (otopljene stene) na sitne komade. Vulkanski pepeo je vruć u blizini vulkana, ali je hladan kada padne na većim udaljenostima. Svež vulkanski pepeo nije toksičan, ali može izazvati probleme kod beba, starijih osoba i osoba sa respiratornim oboljenjima. Male čestice pepela mogu oštetiti prednji deo oka pod vetrovitim i „pepeljastim” uslovima.

Vulkanski pepeo može da pokrije skoro sve, infiltrira se u većinu otvora i može „zamračiti” sunčevu svetlost i smanjiti vidljivost na nulu. Često je praćen munjom.

Pepeo je klizav, posebno kada je mokar, a putevi, autoputevi i aerodromske piste mogu biti neprohodni. Automobilski i mlazni motori mogu se zaustaviti zbog vazdušnih filtera začepljenih pepelom, a pokretni delovi se mogu oštetiti od abrazije, uključujući ležajeve, kočnice i menjače. Pepeo kontaminira i začepљуje ventilaciju, dovode, vode i odvođe. On takođe izaziva i električne kratke spojeve u dalekovodima (posebno kada je mokar), u računarima i mikroelektronskim uređajima. Struja često nestaje tokom i nakon padanja pepela. Dugotrajno izlaganje



Slika 324. Vulkanski pepeo; gore desno: detalj

vlažnom pepelu može korodirati metal.

Pepeo se akumulira poput velikih snežnih padavina, ali se ne topi. Težina pepela može dovesti do urušavanja krovova. Mokri pepeo je klizav. Vetar ponovo suspenduje pepeo, a ljudska aktivnost može da poremeti živote mesecima nakon erupcije.

SKORIJA

Skorija (scoria) jeste vezikularna (mehurasta) staklasta lava, stena bazaltnog do andezitskog sastava izbačena iz otvora tokom eksplozivne erupcije (slika 325). Prvobitno, *skorija* je bio naziv za silikatnu šljaku koja je ostala pri topljenju rude. Reč skorija, u stvari, potiče od grčke reči za otpad ili smeće. Mehurasta priroda skorije je posledica izlaska vulkanskih gasova tokom erup-



Slika 325. Skorija; veličina uzorka 15 cm

cije. Uglavnom je tamno sive do crne boje i ima visok sadržaj gvožđa. Površina nekih skorija može imati plavu boju, a oksidacija daje crvenkasto-braon boju. Pošto je skorija tvrda i porozna, često se koristi za gradnju puteva. Veoma prošireni oblik skorije naziva se **retikulit**, kod kog su zidovi mehurića ispucali, ostavljajući trodimenzionalnu mrežu delikatnih staklenih niti. Pošto je retikulit toliko proširen, neki ga nazivaju bazaltnim plovućcem. Nastao je tokom „eksplozivne” erupcije bazaltne lave u kojoj su skoro svi zidovi mehurića gasa ispucali, ostavljajući strukturu nalik saću. Iako je manje gust od plovućca, retikulit ne pluta po vodi zbog otvorene mreže mehurića. Delikatne staklene niti između mehurića su toliko krhke da ga je veliki američki mineralog Džejms Dejna prvi put nazvao „čipka skorija”. Takođe se naziva limu.

PUMICE (PLOVUĆAC)

Pumice (plovućac) jeste lagana, porozna vulkanska stena koja „pliva” po vodi (po čemu je dobila i ime). Podseća na sunder jer se sastoji od mreže gasnih mehurića zamrznutih usred krhkog vulkanskog stakla i minerala (slika 326). Ova stena je slična tečnoj peni koja se stvara kada se otvori boca sode pod pritiskom, kada se smanjuje pritisak i omogućava rastvorenom gasu da „pobegne”. Sve vrste magme (bazaltska, andezitska, dacitska, riolitska itd.) formiraće plovućac. On se formira tokom eksplozivnih erupcija kada se urušava stub erupcije. Najniži deo erupcionog stuba naziva se



Slika 326. Plovućac

oblast gasnog potiska. Ovde je gustina erupcionog stuba veća od gustine okolnog vazduha. Stub nastavlja da raste zbog potiska izazvanog oslobađanjem i brzim širenjem vulkanskog gasa. Povremeno, oblast gasnog potiska može postati toliko puna sitnih čestica da njegova visoka gustina „ne može biti podržana” potiskom gasova koji se šire. Stub se tada „urušava” pod dejstvom gravitacije kao masa plovućca, koji brzo napreduje niz bokove vulkana. Iako su i *nuee ardentes* i tokovi plovućca fluidizovani (bogat gasovima), energičniji su i pokretniji. Ovo se delimično pripisuje njihovoj nižoj gustini, ali i većoj „zalihi” kinetičke energije, koju stvaraju vertikalni padovi do nekoliko kilometara iznad vrha vulkana. Što dalje padaju, veća je njihova kinetička energija i brže horizontalno kretanje. Jedna gasna erupcija može da generiše stotine tokova plovućca. Pojedinačni tokovi mogu biti dužine od nekoliko kilometara do nekoliko desetina kilometara. Oni su, međutim, minijturni, u poređenju sa masivnim tokovima plovućca nastalim urušavanjem kaldere. Ove ogromne erupcije izbacuju hiljade kubnih kilometara materijala iz prstenastih fraktura za samo nekoliko sati. Poslednja takva erupcija na Zemlji dogodila se u Tobu, u Indoneziji, pre oko 74.000 godina, kada se istaložio ignimbrit zapremine preko 2000 kubnih kilometara. Slične erupcije u Sjedinjenim Državama dogodile su se pre manje od dva miliona godina u kalderama Duga dolina (Long Valley), Vales (Valles) i Jeloustoun (Yellowstone).

NUEE ARDENTES

Francuski geolog Alfred Lakroa (Alfred Lacroix) dao je naziv *nuee ardente* („sjajni oblak”, slika 327) za piroklastični tok sa planine Pele koji je uništio grad Sen Pjer 1902. godine. Tok je nastao usled eksplozivnog kolapsa rastuće kupole lave na vrhu vulkana koji se potom „obrušio” na grad. Stoga se erupcije *nuee ar-*



Slika 327. Erupcija *nuee ardentes*

dentes često nazivaju „Pele erupcije”. Međutim, ovaj termin se ne može tako usko definisati kao drugi tipovi erupcija, jer se erupcije *nuee ardentes* često povezuju i sa gasovitim erupcijama. Pojedini autori termin *nuee ardente* primenjuju na sve piroklastične tokove nastale urušavanjem kupole, zbog čega treba biti oprezan sa njegovim korišćenjem. Precizniji termin bio bi *užarena lavina*. Oni se značajno razlikuju od visoko vezikularnih ignimbrita koji nastaju usled kolapsa erupcionih stubova. Naslage *nuee ardentes* sadrže blokove u finostrukturnoj matrici pepela. Oni su gušći od ignimbrita i obično su manje zastupljeni.

* * *

Na kraju prikaza eksplozivnih (piroklastičnih) erupcija prikazaćemo i ukratko objasniti „širok” izbor termina, imena za opis pomenutih procesa i nastalih stena.

Tok pepela ili **oblak pepela** je piroklastični tok koji se sastoji prvenstveno od čestica veličine pepela, uključujući komadiće stakla i fragmente minerala.

Blok i tok pepela su piroklastični tokovi koji se sastoje od pepela i velikih fragmenata lave s mehurićima gasa, koji se obično formiraju kao posledica kolapsa toka lave ili kupole.

Base surge je turbulentni tok male gustine stena (očvršle lave) i vode i/ili pare koji se kreće velikom brzinom. Bazni udari mogu nastati kada dođe do eksplozivne erupcije unutar jezera kratera ili okeana.

Tok plovućca je piroklastični tok koji se sastoji pretežno od fragmenata koji sadrže mnogo mehurića gasa.

Piroclastic surge je turbulentni oblak niske gustine usijanih komada stena (lave) i gasova koji se kreće izuzetno velikom brzinom. Pošto je male gustine, ima tendenciju širenja na velikim površinama i lako se kreće i preko grebena. Nasuprot tome, piroklastični tokovi su velike guste mase vrućih komada stena i gasova koje se obično zadržavaju u dolinama.

Tefra je opšti naziv za sve fragmente stena koje vulkan izbacuje u vazduh. Različiti se termini koriste za opisivanje veličine, oblika, sastava ili načina na koji se formiraju i putuju.

Ash tefra su fragmenti manji od 2 milimetra, lapili su između 2 i 64 milimetara, a blokovi su veći od 64 milimetara.

Litični fragmenti su ostaci i komadi stena u piroklastičnim naslagama koji su nastali padom tefre ili piroklastičnim tokom.

Akrecioni lapili su čestice veličine lapila koje se formiraju kao vlažni agregati pepela u oblacima erupcije, obično kišom koja pada kroz suve oblake erupcije.

Balistički fragment je eksplozivno izbačen fragment stene koji prati lučnu balističku putanju.

Bombe se izbacuju iz kratera i očvršćavaju tokom leta ili ubrzo nakon sletanja. Bombe se nazivaju prema obliku, npr. bombe sa trakom, bombe sa vretenom, bombe od kravljeg balega i sferoidne bombe.

Ispucala (engl. *breadcrust*) bomba je eksplozivno izbačen fragment stene s „izlomljenom” površinskom teksturom (prisustvom pukotina). Pukotine se razvijaju iz unutrašnjosti stene prema njenim površinama.

Pepeo je opšti termin za delimično vezikularne fragmente lave izbačene tokom eksplozivne erupcije; ekvivalentan je skori. Pepeo je obično bazalnog ili andezitnog sastava.

Ejecta je opšti termin za čestice stena koje je vulkan izbacio u vazduh.

Krhotine stakla su sićušni komadi ohlađene lave nastali tokom njenog raspršivanja tokom eksplozivne erupcije. Različitog su oblika, od blago zakrivljenih, tankih staklenih ploča slomljenih od velikih sfernih sa tankim zidovima do šupljih igala slomljenih od „istezanja” gasa.

MIRNE ERUPCIJE

Lave koje sadrže malo fluida (gasova), na primer bazalti, imaju „mirne” erupcije bez eksplozija, grmljavine i opasnosti po čoveka i prostor na kojem živi. One su i dalje „dramatične”, posebno na Havajima, gde je boginja vulkana Pele napravila spektakl kojem možete prisustvovati, uživati i istražiti različite stilove mirnih erupcija: reke lave, fontane ili „debele” slivove koji se lagano kreću nizbrdo.

Mirne erupcije mogu nastati i sporim izdizanjem magme (lave) kiselijeg sastava prema površini, kada fluidi (gasovi) imaju vremena da se „polako” izdvoje i erupcija neće biti eksplozivna. Važan je, naravno, i hemijski sastav magme, tj. viskoznost i količina rastvorenih fluida.

Sa vremenom, zaostali gasovi se sporije izdvajaju, lava se hladi i stvara šupljikavu teksturu. Visoko vezikularni bazalt (skorija) obično nastaje usled brze vezikulacije, izdvajanja gasova tokom erupcije. Jako viskozne magme, poput riolita, obično sadrže više fluida, koji, kada se ohlade, stvaraju mehuriće koji ostaju „zarobljeni” stvarajući „sunderastu, poroznu, laku stenu koja pliva po vodi. Ovo „penasto” staklo obično je svetle boje. Kada se šupljine naknadno (posle hlađenja lave) ispune sekundarnim mineralima, nazivaju se mandolama ili, kada su krupnije, amigdalama (detaljnije u poglavlju Piroklastične stene).

U nekim vulkanima, fluidi (gasovi) „ćute” i izlaze duž pukotina, kada se delimično i kondenzuju, stvarajući fumarole s temperaturom iznad 100 °C.

HIDROVULKANSKE ERUPCIJE

Hidrovulkanske erupcije nastaju oko vulkanskog kanala koji prolazi kroz stene zasićene vodom ili kada je lava (najčešće bazičnog sastava) u kontaktu s „okolnom” vodom, posebno kada se izlije na dno okeana, mora i jezera ili „naleti” ispod snežnog pokrivača. Stvaraju se velike eksplozije jer topla magma pretvara vodu u paru, koja naglo ekspandira i raspršava još nepotpuno očvrslu lavu.

„Izbacuju” se uglavnom sitni fragmenti ili se stvara slabo vezikularan, „staklasti pepeo”. Eksplozivne hidrovulkanske erupcije bazaltne lave ponekad se nazivaju surtsejanske (engl. Surtseyan), erupcije, nakon erupcije kod Islanda 1963. godine

(slika 328). Ove erupcije se smatraju „vlažnim” ekvivalentima erupcija strombolijskog tipa, iako su mnogo eksplozivnije. Ova visoka eksplozivnost je obeležje hidrovulkanske aktivnosti. Kako se voda zagreva, ona se pretvara u paru i eksplozivno se širi, fragmentirajući lavu u fini, sitnozrni pepeo. Kada



Slika 328. Surtsejska erupcija

je vulkansko ostrvo Surtsej (Surtsey) „rođeno” u Atlantiku, prve hidrovulkanske erupcije bile su „spektakularno” eksplozivne. Međutim, kako je vulkan rastao, lava koja se digla u centralnom otvoru je u manjem stepenu bila u interakciji sa vodom, tako da su faze erupcije u opadanju postale više strombolijskog karaktera. Hidrovulkanske erupcije nisu ograničene na podvodni razvoj okeanskih ostrva. Mnogi eksplozivni događaji nastaju na kopnu uzdižućim kanalima (dijapirima) bazaltne magme koji stupaju u interakciju sa slojevima koji nose vodu (npr. akviferi) na plitkim nivoima ispod površine. Hidrovulkanske eksplozije stvaraju **maar** i tufne prstenove. To su velika kružna udubljenja sa niskim ivicama izbačenih ostataka. **Maar** se „ukopava” u podlogu, mada kada se duž zidova „otkrivaju” starije stene. Smatra se da nastaju eksplozijom pare (freatske erupcije; slika 329). Tuf prstenovi su „iznad” podloge i smatra se da su nastali kombinacijom zagrejjane podzemne vode i vezikulirajuće magme.



Slika 329. Ukinrek maar, Aljaska

Freatske erupcije su eksplozije izazvane parom koje nastaju kada se podzemna voda ili voda na površini zagreva magmom, lavom, vrućim stenama ili novim vulkanskim naslagama (na primer, tefra i naslage piroklastičnog toka; slika 330). Sreću se i na „visoko” smeštenim vulkanima na severnom ili južnom delu naše planete ili blizu polova, gde je lava često u „kontaktu” sa snegom ili lednicima. Topla bazaltna lava (oko 1200 °C) može dovesti do ključanja vode i prelaska u paru, kada se stvara eksplozivna mešavina, a toplota se transformiše u kinetičku energiju.

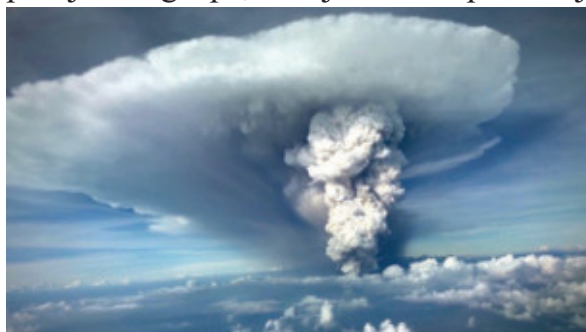
Stvaraju se „oblaci” finog pepela iz kojih se talože sitnozrnasti piroklastiti, koji mogu biti velike debljine, posebno ako su deponovani u vodenoj sredini. U mnogim slučajevima, proces freatskih erupcija je, zbog transporta, daleko od izvora, mesta izlivanja. Kada se lava utisne ili izlije u nekonsolidovan sediment blizu površine Zemlje, voda koja se nalazi u poroznim prostorima se širi, stvarajući složene fizičke mešavine sa sedimentom i nastaje stena **peperit**. To je heterogena stena izgrađena od fragmenata tamnog bazalta i svetlog sedimenta (detaljnije u delu opisa *pillow* lava). Voda se može sakupiti i u vulkanskom krateru nakon prestanka erupcije. Kada dođe nova topla lava, ona reaguje sa vodom stvarajući eksplozivne erupcije. Pojedine lave koje „dodiruju” vodu ne izazivaju erupciju. Na primer, lava koja ulazi u vodu okeana na dubinama manjim od nekoliko desetina metara duž obale Havaja proizvodi jastuke (*Moore, 1975*) i malu eksplozivnu aktivnost. Verovatno da i drugi faktori kontrolišu intenzitet hidromagmatskih eksplozija.



Slika 330 Freatska erupcija, Havaji

GASOVITE ERUPCIJE

Gasovite (nazivaju se i plinijevske) erupcije su veliki eksplozivni događaji koji formiraju ogromne tamne stubove tefre i gasa i izbacuju ih visoko (čak do 40 km) u stratosferu. Ove vrste eksplozivnih erupcija nazvane su po Pliniju Mlađem, rimskom državniku, koji je napisao „objektivan” (realan) izveštaj o erupciji vulkana Vezuv 79. godine nove ere. Plinijev ujak, kralj Plinije (Plinije Stariji), bio je veoma cenjeni prirodnjak i admiral u rimskoj mornarici, a nastradao je tokom erupcije. Da bi pravilno zabeležio okolnosti smrti svog cenjenog strica, Plinije Mlađi je napisao dva pisma istoričaru Tacitu u kojima je opisao erupciju Vezuva. Erupcija je ubila hiljade ljudi i zatrpala rimske gradove Pompeju i Herkulanum pod ogromnim količinama tefre, piroklastičnih tokova i lahara. Pompeja je ležala zakopana više od 1700 godina, dok nije slučajno ponovo otkrivena tokom iskopavanja kanala za vodu. Otkrivanje ostataka Pompeje nije samo proširilo naše razumevanje erupcija plinijevskog tipa, već je takođe pružilo jedinstveno razumevanje života običnih



Slika 331 Gasovita erupcija, Filipini

ljudi tokom rimskog doba. Pri ovim erupcijama bogatim gasovima stvarala se kolona, pečurka poznata pod imenom Plinijev stub, koji je visine preko 30 km (slika 331). Vazduh se „uvlači” u stub i oblak, zagreva sa vrućim česticama pepela i meša sa vrelim vulkanskim gasovima, zbog čega se, uprkos težini čestica pepela,

„penje”, sve dok ne dostigne visinu gde se njegova gustina ne izjednači sa okolnim vazduhom, atmosferom. U atmosferu izbačene, vruće turbulentne mešavine pepela, gasa i tefre mogu vazdušnim strujanjima „obići” celu planetu. Kada se ohlade, dolazi do kondenzacije i pada „blatnjava” kiša, koja može da napravi „čuda”: da izazove poplave, devastira zemljišta i ugrozi živote ljudi. Ovi eksplozivni vulkani stvaraju i jedan od najstrašnijih i najopasnijih oblaka na planeti. Nuee ardentess (koje smo već pominjali) jesu vrući „sjajni” oblaci gustog gasa i pepela temperature blizu 1000 °C koji se kreću brzinom od više stotina kilometara na sat i mogu otputovati više stotina kilometara od vulkana. Pojedini autori ih svrstavaju u vrstu piroklastičnog toka, koji uključuje razne mešavine vulkanskih blokova, pepela, gasa i lapila. Kada se talože, obično su dobro sortirani.

Gasovite erupcije ponekad prethode „glavnoj” erupciji.

Neke vulkanske gasovite erupcije počinju „eksplozijama” pare i kasnije evoluiraju u toplu vodu. Traju od nekoliko desetina minuta do nekoliko dana, ali i kontinuirano tokom nekoliko desetina pa i stotina godina. Pojedini autori ih vezuju za aktivne geotermalne sisteme. Neke od najrazornijih erupcija zabeleženih u istoriji počele su sa gasom, uključujući pomenutu „davu” erupciju Vezuva (Pompeja i Herkulanium, 79. godine), Krakataua (1883), Svete Jelene (1980) i druge.

Magma sadrži rastvorene gasove koji se oslobađaju u atmosferu tokom erupcija. Najčešći gas koji oslobađa magma je vodena para (H_2O), zatim CO_2 (ugljen-dioksid), SO_2 (sumpor-dioksid), HCl (hlorovodonik) i dr. Najznačajniji uticaji velikih gasovitih erupcija su prelazak sumpor-dioksida (SO_2) u sumpornu kiselinu (H_2SO_4), koja se brzo kondenzuje u stratosferi i formira fine sulfatne aerosole. Aerosoli povećavaju refleksiju zračenja Sunca nazad u svemir i tako hlade donji deo Zemljine atmosfere ili troposferu. Velike gasovite erupcije ponekad rezultiraju povlačenjem veće količine magme ispod vulkana, kada se krater urušava i formira veliku depresiju, kalderu.

Ove spektakularno eksplozivne erupcije vezane su za dacitske do riolitske lave bogate fluidima (gasovima), koje se obično izlivaju iz stratovulkana. Trajanje ovih erupcija je promenljivo, od nekoliko sati do nekoliko dana.

„Najduže” erupcije su vezane za kisele magme, ali se povremeno javlja i bazaltna lava, kada se u njihovim magmatskim komorama vrši diferencijacija, zornost i stvaranje kiselih (kiselijih) magmi (erupcija Hekle na Islandu 1947–1948 godine).

Region akumulacije piroklastičnog pada je generalno asimetričan oko vulkana jer se eruptivni stub u orijentiše u pravcu preovlađujućeg vetra.

Regioni koji okružuju gasovite erupcije nisu samo podložni velikim količinama padavina plovuća (od 0,5 km³ do 50 km³), već su podložni i najopasnijim vrstama vulkanskih fenomena: piroklastičnim tokovima i laharima. Povremeni kolaps eruptivnog stuba će stvoriti vruće, piroklastične tokove koji napreduju niz bokove vulkana brzinom uragana. Pored toga, velike količine vode se često stvaraju topljenjem snežnih obala i alpskih glečera tokom erupcije. Mešanje ove vode sa

nekonsolidovanom tefrom može stvoriti vulkanske tokove blata (lahare). Ove karakteristike imaju konzistenciju vlažnog betona, ali mogu napredovati niz kosine istom brzinom kao i piroklastični tokovi. Ljudska tragedija povezana sa gasnom erupcijom Vezuva 79. godine nove ere u velikoj meri se pripisuje pomenutim fenomenima. Pompeja se nalazila na jugoistoku, na strani vulkana niz vetar. Ne samo da je bila podvrgnuta razornoj sili nekoliko piroklastičnih tokova, već je bila i zatrpana pod ogromnom debljinom tefre. Iako je selo Herkulanum takođe uništeno erupcijom, ono se nalazilo zapadno od vulkana i nije bilo podvrgnuto istoj količini tefre iz vazduha koja je zatrpana Pompeju. Umesto toga, Herkulanum je bio u velikoj meri zatrpan piroklastičnim tokovima i masivnim laharima koji su napredovali niz zapadnu stranu vulkana.

Neke gasovite erupcije „ubrizgavaju” velike količine aerosola (malih tečnih kapljica) u stratosferu, uzrokujući manju površinsku temperaturu na Zemlji.

Pomenimo nekoliko „nedavnih“ erupcija koje su smanjile temperaturu: erupcija vulkana Pinatubo 1991. godine na Filipinima i erupcija vulkana El Čičon (El Chichón) u Meksiku 1982. godine. Smatra se da je erupcija vulkana Tambora u Indoneziji 1815. godine izazvala „godinu bez leta” 1816 itd.

Sulfatni aerosoli takođe „promovišu” složene hemijske reakcije, uzrokuju i promenu sadržaja hlora i azota koji uništavaju ozon (O^3).

Vulkanski gasovi koji predstavljaju najveću potencijalnu opasnost za ljude, životinje, poljoprivredu i imovinu su sumpor-dioksid, ugljen-dioksid i fluorovodoničnik. Lokalno, gas sumpor-dioksid može dovesti do kiselih kiša i zagađenja vazduha „niz vetar” od vulkana. Na globalnom nivou, velike eksplozivne erupcije koje „ubrizgavaju” ogromnu količinu sumpornih aerosola u stratosferu mogu dovesti do nižih površinskih temperatura i promovisati oštećenje Zemljinog ozonskog omotača. Pošto je gas ugljen-dioksid teži od vazduha, gas može da teče u nižim predelima i sakuplja se u zemljištu. Koncentracija gasa ugljen-dioksida u ovim oblastima može biti smrtonosna za ljude, životinje i vegetaciju. Nekoliko istorijskih erupcija oslobodilo je dovoljno jedinjenja fluora da deformišu ili ubiju životinje koje su pasle na vegetaciji obloženoj vulkanskim pepelom; jedinjenja fluora imaju tendenciju da se koncentrišu na sitnozrnaste čestice pepela, koje životinje mogu progutati.

INDEKS VULKANSKE AKTIVNOSTI

Indeks vulkanske eksplozivnosti, ili **VEI**, predložen je 1982. godine kao način da se opiše relativna veličina ili magnituda eksplozivnih vulkanskih erupcija. To je indeks povećanja eksplozivnosti od 0 do 8 (tabela 10) i dodeljuju se erupcijama koje se kreću od „neeksplozivnih” do „megakolosalnih” tipova. Svako povećanje broja predstavlja povećanje za faktor deset. **VEI** koristi nekoliko faktora za dodeljivanje broja, uključujući zapreminu eruptiranog piroklastičnog materijala (na primer, padavine pepela, piroklastične tokove i druge efekte), visinu stuba erupcije, trajanje u satima i kvalitativne opisne termine.

VEI ima neke sličnosti sa Rihterovom skalom magnitude koja se koristi za merenje zemljotresa (tabela 10). Nema poznatih eksplozivnih događaja sa **VEI** većim od 8. Eksplozivnost je direktno povezana sa količinom gasa (uglavnom pare)

Tabela 10 Indeks vulkanske aktivnosti

VEI	Opis	Visina oblaka	Volumen oblaka	Učestalost	Primer
0	Neeksplozivna	<100 m	< 10.000 m ³	dnevna	Manua Loa
1	Blaga	100–1000 m	> 10.000 m ³	dnevna	Stromboli
2	Eksplozivna	1–5 km	> 1.000 000 m ³	nedeljna	Galeras (1993)
3	Žestoka	3–15 km	>10.000 000 m ³	godišnja	Nevado del Ruiz (1985)
4	Kataklizmična	10–25 km	> 0.1 km ³	10 godina	Soufriere Hills (1995)
5	Paroksizmalna	>25 km	> 1 km ³	50 godina	Sv. Jelena (1980)
6	Kolosalna	>25 km	> 10 km ³	100 godina	Pinatubo (1991)
7	Superkolosalna	>25 km	> 100 km ³	1000 godina	Tambora (1815)
8	Megakolosalna	>25 km	> 1.000 km ³	10000 godina	Toba (73.000 BP)

koju magma nosi i kada se približi površini, gasovi se oslobađaju. Magma srednjeg do kiselog sastava (andeziti, rioliti) obično sadrže veću količinu fluida, gasova (uglavnom vode), koji su tu još od njihovog „nastajanja” ili su „uzete” iz okolnih stena (meteorska voda). Vulkanolozi su razvili **VEI** kako bi pomogli u proceni klimatskih uticaja vulkanskih erupcija. Međutim, ubrzo su saznali da je količina gasa sumpor-dioksida ubrizganog visoko u atmosferu (koja nije nužno povezana sa veličinom erupcije) bila kritičan faktor u određivanju klimatskog uticaja vulkanskih erupcija. Danas se **VEI** prvenstveno koristi za procenu relativne veličine eksplozivne erupcije. Velike eksplozivne erupcije se javljaju mnogo ređe od malih. Do 1994. godine, evidencija vulkanskih erupcija u proteklih 10.000 godina koju je vodio Globalni vulkanski program Instituta *Smithsonian* pokazuje da su se dogodile 4 erupcije sa **VEI** od 7, 39 erupcija sa **VEI** 6, 84 sa **VEI** 5, 278 sa **VEI** 4, 868 sa **VEI** 3 i 3477 eksplozivnih erupcija sa **VEI** 2.

MONITORING GASOVA

Kako se zaštititi od gasovitih, vodenih erupcija i ne samo od njih?

Praćenje vulkanskih gasova može biti od pomoći u predviđanju erupcija. Na primer, povećanje sadržaja CO₂ i SO₂ koji se emituju iz fumarola može ukazati na povećanu magmatsku aktivnost ispod vulkana. Sastav i relativne zapremine ovih isparljivih materija mogu se meriti na različite načine.

Direktno merenje. Gasovi koji izlaze iz fumarola mogu se sakupljati u bocama i analizirati u geohemijskim laboratorijama. Na ovaj način je prikupljeno mno-

go korisnih podataka, ali postoje poteškoće u prikupljanju uzoraka zbog visokih temperatura, teškog pristupa mestu merenja itd.

COSPEC merenje uključuje daljinsko ispitivanje pojedinih gasova pomoću korelacionog spektrometra, uređaja koji je razvijen 70-ih godina 20. veka za praćenje SO_2 i drugih gasova iz fabričkih dimnjaka. U vulkanski aktivnim oblastima, postavljanje COSPEC-a na helikoptere omogućava katalogizaciju i praćenje koncentracija SO_2 na dnevnoj ili nedeljnoj osnovi. Najnoviji COSPEC su infracrveni spektrometri koji mere količinu infracrvene svetlosti koju apsorbuju CO_2 i drugi gasovi.

TOMS merenja. Na regionalnoj skali, distribucija i količina sumpor-dioksida koji se oslobađa u stratosferu usled vulkanskih erupcija mogu se meriti spektrometrom za mapiranje totalnog ozona (**TOMS**), koji je prvobitno poslat u „nebo” (atmosfera) 1979. godine na brodu Nimbus-Satellites 7 i Meteor-3. Poboljšani TOMS instrumenti poslani u niže orbite 1997. godine dramatično su poboljšali naše mogućnosti detekcije pomenutih gasova i omogućili tačnije predviđanje erupcija.

V.4.2.1.3 PODELA VULKANA PREMA MORFOLOGIJI

UVOD

Vulkanski oblici i pejzaži su lepi, plodni, ali neki su „pusti”, bez života, „marsovski” i neplodni.

Izlivanjem lave i gasova stvara se veliki broj oblika, od ogromnih štitastih vulkana i kaldera do fumarola i malih hornita bez korena. Iznenadjujuće je da među vulkanolozima ne postoji konsenzus o tome kako definisati aktivni vulkan. Životni vek vulkana može varirati od nekoliko meseci do nekoliko miliona godina. Definiciju aktivnih vulkana „komplikuju” „nemirni” vulkani koji imaju povremene erupcije (tabela 11).

Većina istraživača smatra da je **aktivan vulkan** onaj koji trenutno izbacuje lavu, tj. ima erupciju. Drugi, međutim, smatraju da je vulkan aktivan ako je imao erupcije u istorijskom vremenu (na Mediteranu je to oko 3000 godina, na pacifičkom severozapadu Sjedinjenih Država „samo” 300 godina unazad, a na Havajima nešto više od 200 godina).

Uspavani vulkani su oni koji trenutno nisu aktivni, ali mogu postati nemirni, tj. ponovo aktivni. U području Jeloustouna česti su slabi zemljotresi, aktivan geotermalni sistem i brze stope podizanja tla, zbog čega veliki broj istraživača smatra da je vulkan aktivan.

Ugašeni vulkani su oni za koje se smatra da je malo verovatno da će ponoviti erupciju. Teško je utvrditi, reći, dokazati da li je vulkan zaista ugašen.

Tabela 11. Podela vulkana prema morfologiji.

Tip	Karakteristike
Island	Erupcije duž pukotina, raseda, pukotina. Bazaltna lava slobodno teče; mirne erupcije, lava siromašna gasom; ogromne količine lave teku preko velikih površina i grade plateoe.
Havaji	Erupcije duž pukotina, kaldera i pit kratera. Pokretne lave sa malo gasa; Mirne do umereno aktivne erupcije: povremene brze emisije lave bogate gasom stvaraju fontane; uglavnom bazalti; male količine pepela.
Stromboli	Stratovulkani (kompozitni) sa kraterima na vrhu: umerene, ritmične do skoro neprekidne eksplozije, koje su rezultat oslobađanja gasova; izbačeni komadi lave stvaraju bombe i skoriju; periodična intenzivnija aktivnost sa izlivanjem lave; svetlo obojeni oblaci, uglavnom pare, dosežu umerene visine.
Vulkano	Stratovulkani: centralni otvori; povezane lave viskoznije; kora (čep) lave preko otvora (kratera) između erupcija, omogućavaju nakupljanje gasa ispod površine; erupcije se povećavaju tokom dugog perioda mirovanja dok se kora ne razbije, pročišćavajući otvor i izbacujući bombe, plovuac i pepeo; lava teče sa vrha nakon glavne eksplozivne erupcije; tamni oblaci napunjeni pepelom, uvijeni i u obliku pečurke (karfiola); dižu se manje-više vertikalno do umerenih visina, odlažući pepeo duž bokova vulkana (napomena: drugi tipovi, kao što su Havaji, mogu proizvesti slične efekte kada pretrpe smetnje sa podzemnim vodama i freatske erupcije kada nastaju veliki parni oblaci koji nose fragmentarni materijal.
Vezuv	Paroksizmalniji od gornja dva: izuzetno eksplozivno izbacivanje magme bogate gasom iz stratokonskog otvora; erupcija se javlja nakon dugog intervala mirovanja ili slabe aktivnosti: krater ima tendenciju da se isprazni do značajne dubine: lava se izbacuje eksplozivno sa gasom stvarajući pečurke (oblik karfiola) koje dostižu velike visine i talože pepeo.
Plinijan	Opasniji oblik erupcije od Vezuva: poslednja glavna faza je nabijanje gasa koji nosi oblak vertikalno naviše kao stub kilometarske visine; on je u osnovi uzak, ali se širi na većim visinama; oblak je uglavnom sa malo pepela.
Pele	Zbog lave visokog viskoziteta i odložene eksplozivnosti, dovodni kanal stratovulkana je obično blokiran čepom; gas (i deo lave) izlazi iz bočnih (parazitskih) kanala ili se uništava/podiže čep; gas, pepeo i blokovi se kreću velikom brzinom u jednoj ili više eksplozija kao nuees ardentess ili užarene lave, stvarajući piroklastične naslage.

U literaturi se sreće veliki broj podela vulkana, klasifikovanih prema prirodi erupcije koju smo opisali. Odabrali smo podelu u kojoj četiri imena potiču iz južne Italije, oblasti klasične studije koja se može nazvati „mestom rođenja vulkanologije”, dok Island, Havaji i Martinik „daju“ preostala imena.

Većina vulkana, međutim, nije u „saglasnosti” sa pomenutim klasičnim definicijama. Nijedan drugi vulkan na našoj planeti, na primer, ne odgovara vulkanu Stromboli, gde se eksplozivne erupcije javljaju svakih 10 minuta, a aktivnost je kontinuirana već 2500 godina.

Drugi vulkani mogu biti dugo „mirni”, bez eksplozija stotinama godina. Pele na Martiniku nije bio aktivan vekovima. „Javio” se tek 1902. godine iznenadnom i jakom „eksplozijom”, koja je ostavila nesagledive posledice.

Na osnovu oblika, morfologije, odnosno geometrijske forme i relativne veličine, razlikujemo nekoliko vrsta, tipova vulkana:

1. **štitaste vulkane;**
2. **stratovulkane (kompozitne vulkane);**
3. **brdovite (engl. *cinder cone*) vulkane;**
4. **maar vulkane;**
5. **prstenaste tufove (engl. *tuff rings*) i**
6. **konusne, brdovite tufove (engl. *tuff cone*)**
7. **linijske, rasedne vulkane,**
8. **vulkanske kupe i**
9. **krater vulkane.**

ŠTITASTI VULKANI

Štitasti vulkani (engl. *shield volcano*) jesu „niski” vulkani koji imaju „široke” vulkanske kupe, blage padine i obično velike, široke kratere. To su vulkani sa „niskim” profilom (nisu visoki), prečnika oko 1/20 njihove širine. Naziv su dobili jer podsećaju na odbrambene štitove drevnih ratnika kada se polože na zemlju. Prečnika su i nekoliko desetina kilometara i karakteristični su za bazaltne lave. Za njihovo stvaranje potrebne su duge vremenske erupcije kojima su stvorene velike količine „slojeva” (izliva) lava (slika 332). Zbog niskog viskoziteta pokrivaju veliku površinu, sa blagim nagibom padina vulkana (manje od 10° i obično oko 2–3°). Iako mnogi tokovi u štitastim vulkanima dolaze iz centralnog otvora, mogu se javiti i marginalne bočne erupcije. Pukotine su najčešće dominantni eruptivni centri za plato bazalte. Primer ovog tipa je i najveći vulkan na Zemlji, dobro nam poznat, Mauna Loa na Havajima. Mnogi starosedeoci Havaja imaju snažno religiozno verovanje u vezi sa Peleom, havajskom boginjom vatre. Prema legendi, njen duh boravi u krateru Halemaumau u vulkanu Kilauea. Jedno vreme je imala kratak i „nasilan” brak sa Kamapuaom, bogom vode. Pele je iz njihovog doma izbacila Kamapua, koji je „otišao” potocima lave u more. Često izlivanje bazaltne lave iz Kilauee je „dokaz” vernicima da je boginja Pele „živa i zdrava”.



Slika 332. Vulkan Kilauea na Havajima
je štitasti vulkan

Vulkan Mauna Loa se uzdiže 4100 metara iznad nivoa mora, a kada se meri od dna okeana visok je 10.099 metara i viši je i od Mont Everesta (8850 m). Ove „gigantske građevine” su submarinskim erupcijama sa okeanskog dna „rasle” sve dok nisu izbile na površinu, što je „zahtevalo” više desetina hiljada, a po nekim au-

torima i stotine hiljada godina. Po genezi su vezane za tople tačke i izlivanje velikih količina lava iz centralnog otvora, kratera, ali i iz pukotina. Vulkani istog morfološkog oblika (štitasti vulkani) nalaze se i na Islandu, ali su mnogo manji. Razlike se uglavnom „pripisuju” monogenetskim erupcijama istog tipa, načina stvaranja iz jedne „tačke” (kratera) i malog volumena erupcije. Simetrični štitasti vulkani javljaju se i na Galapagosu. Imaju strmije padine (>10 stepeni) i ravne vrhove sa velikim i dubokim kalderama. Smatra se da su nastali erupcijama „prstenastih” struktura. Erupcije na štitastim vulkanima su relativno mirne, „neeksplozivne” jer su lave malo viskozne, fluidne i sa malo gasova. Takvi tokovi lave mogu da putuju nekoliko desetina kilometara kao reke, a kada očvrsnu, nastaju karakteristične teksture. Erupcije su „blago šumeće”, a tokovi, zbog male viskoznosti lave, mogu se kretati brzinom od više kilometara na sat. Prilikom izlivanja, lava gubi relativno malo toplote koja se prenosi u vazduh. Akumulacijom lave u depresiji, može se formirati i „jezero lave”, koje se često javlja i u samom krateru.

Pojedinačni tokovi lave su, zbog malog viskoziteta (velike pokretljivosti), prešli do 50 km od izvora, kratera vulkana, a obično su debeli 5–10 m. Havajske erupcije, osim pomenutih vulkanskih kupa, stvaraju i impresivne fontane lava visine nekoliko desetina, pa i stotina metara (detaljnije u poglavlju Morfologija lave).

STRATOVULKANI ILI KOMPOZITNI VULKANI

Stratovulkani ili kompozitni vulkani su najfotogeničniji, ali i najsmrtonosniji (najopasniji) tip vulkana. Često su markantni i lako prepoznatljivi morfološki oblici i obično su prikazani u velikom broju udžbenika kao ilustracija pravog vulkana.

Stratovulkani su uzvišene kupe sa strmim obodima (i do 30°) i visoke su i do par hiljada metara (slika 333). Morfološki strato (kompozitni) tip vulkana izgleda simetrično, ali su njihovi oblici složeniji zbog intenzivne erozije, uključujući i glacijalnu.



Slika 333. Etna na Siciliji je stratovulkan

Mnogi poznati vulkani imaju klasičan oblik stratovulkana, kao što su Fudži u Japanu, Majon na Filipinima i Agua u Gvatemali, Sveta Jelena u SAD-u, Pinatubo na Filipinima itd. Oblici stratovulkana variraju i zbog razlika u stilu erupcije i sastava lave. Na vrhu je iznenađujuće mali krater, neki od njih imaju i više kratera, kalderu ili amfiteatar kao rezultat bočne eksplozije (npr. Sveta Jelena).

Vremenom se eroduju, smanjuju, retko i nestaju. Lokalno, lava se može izliti iz bočnih otvora, formirajući parazitske kupe, krater. Lava koja je očvrsla u dovodnim kanalima ili kosim pukotinama, rasedima (engl. *feeder dikes*) na obodu ojačava vulkansku kupu.

Uglavnom su izgrađeni od bazalta, andezita, dacita, riolita itd. izliveni iz centralnog kratera sa velikim brojem jezika lave koji se mešaju sa piroklastitima. Zanimljivo je da su erupcije različitog sastava lava (magne) čak i na jednom lokalitetu, što je za vulkanologe još uvek nepoznanica.

Erupcije su uglavnom eksplozivne, sa puno piroklastita, jer su ove magme (lave) bogate fluidima (dominira voda). Pojedini autori smatraju da se sa izdizanjem andezitsko-dacitskih magmi često asimilira i voda iz okolnih stena ili iz narastajućeg klina.

Lava koja očvrсне u krateru stvara čep koji „sprečava” novi dotok lave. Izraz „čep” je potpuno prikladan, jer ima istu ulogu kao čep u kadi ili na flaši, sprečavajući oslobađanje fluida i lave. Kada unutrašnji pritisak nadjača spoljašnji, čep se razara i stvara nova, često i jaka, eksplozivna erupcija.

Stratovulkani (kompozitni vulkani) najvećim delom se javljaju u zonama subdukcije i čine deo vulkanskog luka (Andi). Lave ovih vulkana velikim delom su nastale stapanjem kontinentalne kore, zbog čega imaju dacitsko-andezitski sastav. Često su izgrađeni od slojeva tufova i tefre koji se smenjuju sa lavama, koje su intermedijarnog sastava, najčešće andezitima i dacitima i bazaltima. Stratovulkani se javljaju duž kontinentalnih margina oko Tihog okeana, što ih svrstava u opisani „paciifički vatreni prsten”. Obično se protežu na velikim površinama i karakteriše ih sporadična aktivnost koja traje hiljade pa i milione godina, tokom kojih se stvaraju vulkanski kompleksi.

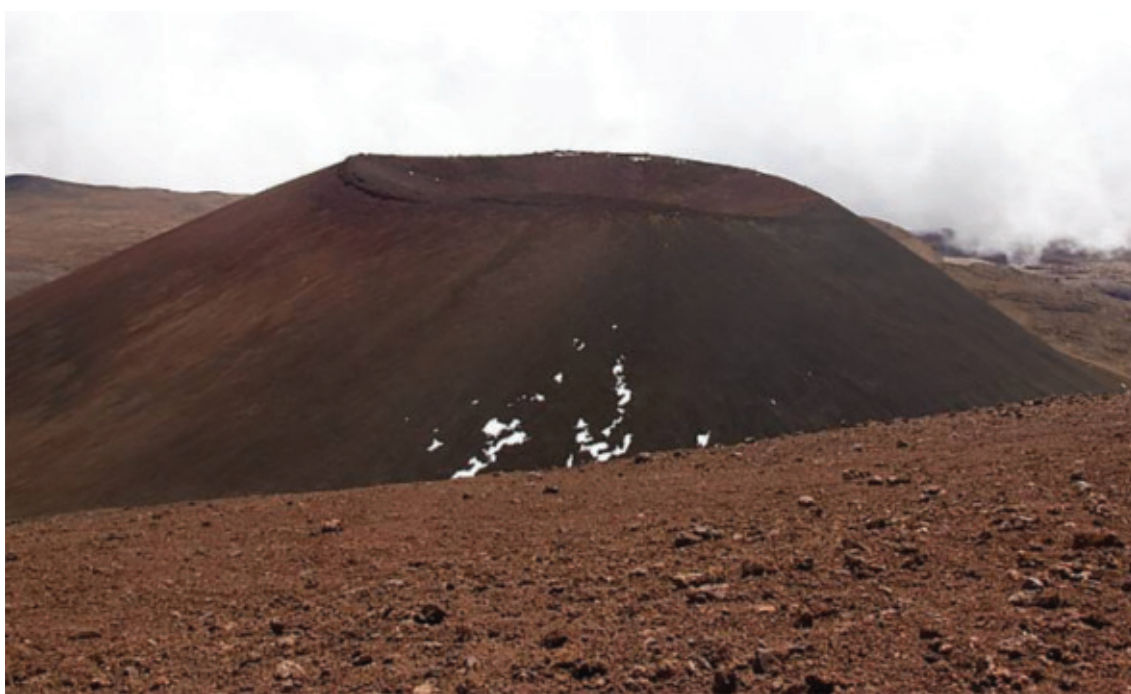
BRDOVITI VULKANI

Brdoviti (engl. *cinder cone*) ili konusni vulkani su niskog, strmog profila i izgrađeni uglavnom od pepela i sitnih fragmenata očvrсле lave koja je izbačena iz kratera i obično se akumulira niz vetar. Sličan materijal nalazi se i na bokovima štitastih vulkana, stratovulkana i kaldera. Širina im je oko 1 km, a visina do nekoliko stotina metara. Dok štitasti vulkani obuhvataju velike površine i visine preko 4 km nadmorske visine, konusni vulkani (nazivaju ih i piroklastični konusni vulkani jer su izgrađeni od piroklastita) „skromnih” su razmera i mogu se razvijati tokom godina. Relativno su mali, obično obuhvataju područja manja od 20 km² i visine uglavnom ispod 500 m (slika 334). Imaju strme padine, do 35 stepeni, iako su „stariji” (zbog erozije) „blaži” sa nagibima od 15 do 20 stepeni.



Slika 334. Brdoviti (konusni) vulkan Sanset, Arizona

Pojedini autori u ovu grupu svrstavaju i **skorija konuse** (engl. *scoria cones*) vulkane (slika 335), koji su tipični za eksplozivnije bazaltne erupcije u kojima vezikularna (šupljikava) magma prolazi kroz fragmentaciju i očvršćava pre nego što padne na zemlju.



Slika 335. Skorija konus, Havaji

Fragmenti stena koji grade skorija konuse po veličini odgovaraju uglavnom pesku i pepelu, sadrže staklo i brojne mehuriće gasa „zamrznute” dok se lava brzo hladila u vazduhu. Skorija konusi imaju ravne strane i veoma velike kratere na vrhu, u odnosu na njihova relativno „mala zdanja”. Često su simetrični, ali mogu biti i asimetrični zbog nagomilavanja tefre na boku, koja se nalazi „niz” vetar, ili izduženja vulkana zbog curenja bazaltne lave sa strane itd.

Skorija konusi uglavnom nastaju „strombolijskim” erupcijama, kada se stvaraju i bazaltne tefre visoke nekoliko stotina metara. Mnogi od njih su monogenetski (imaju isti sastav lave), za razliku od štitastih vulkana i stratovulkana.

MAAR

Maar je niži i relativno veliki krater (slika 336). Nastao je eksplozivnom interakcijom vruće magme sa podzemnom vodom (hidromagmatske ili freatske erupcije). Imajmo na umu da se snaga eksplozivnih erupcija vezuje najvećim delom za okolnu vodu, a ne vodu koja dolazi iz same magme. Geolozi ovu vodu „sa strane” nazivaju meteorska voda, dok juvenilna voda vodi poreklo iz magme, lave. Maar je u stvari prsten od tufa. Karakterističan je po negativnom reljefu (depresija) jer se hidromagmatskom ili freatskom erupcijom „iskopava” krater. Proces se dešava neposredno ispod površine, kada se stvaraju piroklastiti bogati fragmentima različitih stena. Oni se obično formiraju jednom fazom eksplozivnog vulkanizma koja može trajati i do nekoliko godina. Uglavnom su izgrađeni od blokova, prašine i pepela bazične (mafične) ili intermedijarnih (dacita, andezita) lava. Često su slojeviti. U pojedinim udžbenicima, maar je široki vulkanski krater niskog reljefa



Slika 336. Maar, Oregon

nastao plitkim eksplozivnim erupcijama. Eksplozije su obično uzrokovane zagrevanjem i ključanjem podzemne vode, kada magma prodre u podzemne vode. Maar se često puni vodom i formira jezero.

PRSTENASTI TUFOVI

Tufni prstenovi takođe nastaju interakcijom lave i vode. Stvaraju se kada se, obično bazaltna, lava izdiže blizu površine, a potom reaguje sa plitkom podzemnom ili površinskom vodom, pre eksplozivne erupcije. Tada se formira prsten uglavnom od pepela koji ima blage padine, dok su nataloženi piroklastiti slojevi „udubljeni” prema unutra.

KONUSNI TUFOVI

Konusni tufovi (engl. tuff cone) obično se nalaze na bokovima štitastih vulkana, stratovulkana i kaldera ili kao „diskretni vulkani” na poljima bazaltne lave. Na bokovima štitastog vulkana Mauna Kea, na Havajima, javlja se oko 100 konusa od pepela. Istorijski najaktivniji konus od pepela je Cero negro (Cerro Negro) u Nikaragvi. Deo je grupe od četiri mlade „pepeljaste” kupe severozapadno od vulkana Las Pilas.

LINIJSKI, PUKOTINSKI (RASEDNI) VULKANI

Kod linijskih, pukotinskih ili rasednih vulkana (engl. *fissure volcanoes*), lava se izliva duž raseda, pukotina, obično bez eksplozivnih erupcija jer sadrži malo gasa. Pukotina je obično širine nekoliko metara, a dužine nekoliko kilometara (slika 337).



Slika 337. Pukotinski vulkan, Havaji

VULKANSKE KUPE

Pojedini autori izdvajaju i definišu vulkanske kupe kao „standardne” oblike vulkana (slika 338). One nastaju relativno sporim uzdizanjem lave koja je viskozna (rioliti, andeziti, daciti) i obično imaju krater prečnika od 100 m pa do nekoliko kilometara. Najvećim delom se javljaju u kasnoj fazi eruptivnog ciklusa, posle faze eksplozivne aktivnosti. Viskoznost, brzina i način dovoda magme (lave) i način njenog izlivanja, hlađenja su važni faktori koji utiču na konačan oblik vulkanskih kupa. Visine variraju od nekoliko stotina metara do nekoliko kilometara, a nagib im je veliki.



Slika 338. Vulkanska kupa, Aljaska (SAD)

Većina stratovulkana ima oblik vulkanske kupe. Postoji definicija da je vulkanska kupa zaobljena „humka” sa strmim stranama, a izgrađena je od viskozne lave, obično dacita ili riolita, koja je „previše” gusta (otporna na protok) da bi se mnogo udaljila od kratera, pre nego što se ohladi i kristališe. Vulkanske kupe su obično izgrađene od jednog ili više pojedinačnih tokova lave, a u literaturi se sreće i izraz „vulkanska doma”. Neke od vulkanskih kupa su „naduvane” ispod površine i nazivaju se **kriptodome**. One stvaraju „spektakularnu” ispupčenost na boku vulkana, a primer za to je vulkan Sveta Jelena (Mt. Helens), koji je imao erupciju 1980. godine.

KALDERE

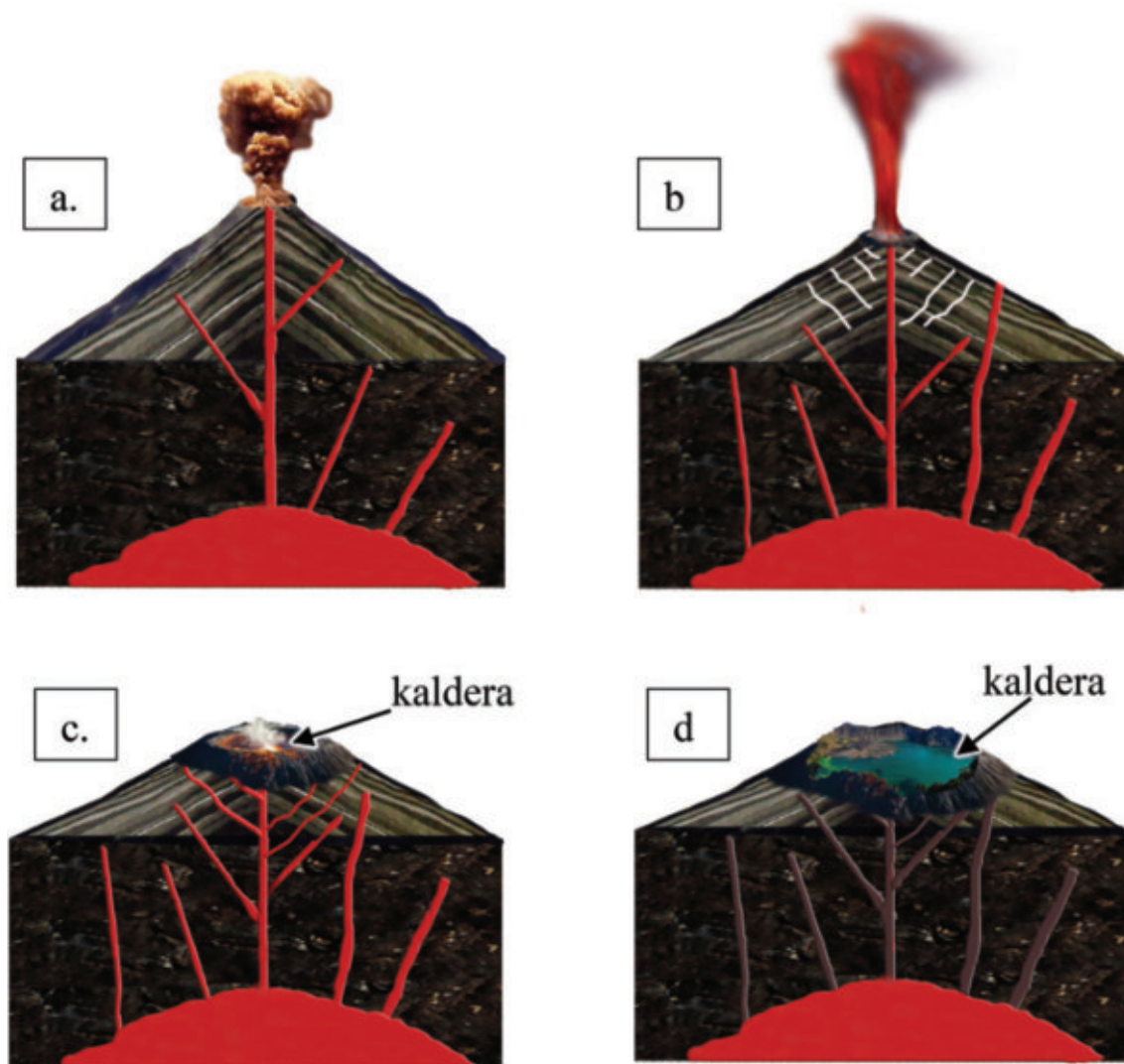
Kaldere nastaju kolapsom stena iznad magmatske komore u kasnoj fazi erupcije (slika 339 a). To su ogromne kružne depresije, često prečnika više kilometara, koje nastaju kada veća količina magme u geološki kratkom vremenu (brzo) kreće nagore i „isprazni” rezervoar (magmačku komoru) tokom erupcije (339b, bele strelice), stvarajući ogromne prazne prostore ispod površine.

Stene iznad se uruše, stvarajući topografsku depresiju poznatu kao kaldera („kotoa” na španskom), koja se ponekad napuni vodom (slike 339c i 339d).

U većini slučajeva kaldere se razlikuju od kratera, koji su mnogo manji i, naravno, drugačije geneze. Kaldere se javljaju kod izlivanja lave različitog sastava, od bazičnih do kiselih, iako se mehanizmi stvaranja razlikuju. Magma može da se izliva i kao bočna erupcija ili da se kreće kroz pukotine koje razdvajaju blokove urušenog krova. Na bazaltnim štitovima, kaldera se može ispuniti magmom stvarajući jezero lave.

Gubitak magme može biti uzrokovan njenim povlačenjem iz plitko smeštene komore u neka druga područja ili usled snažnih „kataklizmičnih” erupcija koje „prazne” magmatski rezervoar. U oba slučaja, povlačenje ili odlazak magme iz komore uzrokuje nestabilnost stena iznad, koje se „urušavaju” u nastali „prazni” prostor, stvarajući kalderu.

U donjem delu pojedinih kaldera sreću se žice, dajkovi i „zrnaste” stene, kao i ksenoliti, komadi okolnih stena koje su zahvaćene tokom formiranja kaldera. Neke



Slika 339. Nastanak kaldere

kaldere, prema pojedinim autorima, nastaju eksplozivnim vulkanskim erupcijama, kada se „izbacuje” ogromna količina vulkanskog materijala i stvara velika depresija. Čuvena kaldera Kratersko jezero (Crater Lake), koja se sreće u mnogim udžbenicima iz geologije i petrologije, prečnika je 8 km, a dubina jezera je oko 1,6 km.

Eksplozivne erupcije i stvaranje kaldera javljaju se i u morima i okeanima, uprkos visokom hidrostatičkom pritisku. Neke kaldere su uočene i u submarinskim vulkanima vezanim za zone subdukcije.

Tačan način kolapsa kaldera je teško utvrditi zbog nepotpune izloženosti i erozije. Neki delovi krova padaju (propadaju) kao ploče ili klipovi unutar kružnog raseda, a drugi se prelamaju, savijaju ili spuštaju duž raseda. Kaldera ima, zbog pomenutih procesa, visoke, strme i nestabilne zidove.

Veruje se da su stene krova, koje su gušće od lave, pokretačka sila za nastanak i akumulaciju veće količine lave. Veće kaldere imaju tendenciju kolapsa, kada se stvaraju strme strane sa vertikalnim složenim pomeranjem i do oko 1 km.

Značajni podaci o nastanku i razvoju kaldera i eksplozivnih erupcija dobijeni su proučavanjem velikog broja „starih” kaldera (Kratersko jezero, Oregon, SAD, i Santorini, Grčka).

Pomenimo neke od klasifikacija kaldera koje se javljaju u pojedinim udžbenicima.

Kaldere tipa kratera – jezera. Ovaj tip kaldere nastaje nakon glavne faze gasovitih (plinskih) erupcija, kada dolazi do kolapsa stratovulkana i stvaranja praznine usled „ispražnjene” magmatske komore. Erupcija može biti „pojačana” duž prstenastih fraktura koje okružuju masu koja se urušava. Ovi tokovi formiraju debele naslage ignimbrita. Kratersko jezero u Oregonu pripada ovom tipu kalde-re. Dubina vode je preko 600 m, a najdublje je slatkovodno jezero u Severnoj Americi. Zidovi kaldere se uzdižu iznad nivoa jezera dodatnih 600 m. Ova velika depresija nastala je od jake erupcije i kolapsa stratovulkana pre oko 6800 godina, kada je stvoreno oko 30 km piroklastičnog materijala koji je „iscrpeo” magmat-sku komoru ostavljajući njen „krov” bez potpore. Stvorena kaldera bila je mesto nekoliko malih erupcija koje su prekrile delove dna kaldere sa andezitskom i ri-olitskom lavom. Najobimnija od ovih erupcija „izgradila” je vulkanski konus na zapadnoj strani jezera, ostrvo Vizard. Erupcije su prestale pre oko 2000 godina. Dve „istorijski” nove erupcije povezane sa stvaranjem kaldera jezera dogodile su se u Indoneziji: kolosalna erupcija Tambore 1815. godine i jednako spektakularna erupcija Krakataua 1883. godine.

Kaldere štitastih bazaltnih vulkana. Vrhovi mnogih aktivnih štitastih vulka-na obeleženi su kalderama. Havajski primeri uključuju kalderu Mokuaveoveo (Mo-kuaweoweo) na Mauna Loi i kalderu Kilauea na Kilauei. Druge uključuju kalderu Erta Ale u Etiopiji, kalderu na vrhu Piton de la Furnez (Piton de la Fournaise) na ostrvu Reunion i spektakularne bazaltne kaldere na štitastim vulkanima ostrva Gala-

pagos. Većina kaldera na Zemlji ima prečnik od 1–5 km, dok su one na Marsu znatno veće. Kaldera Olympus Mons (Olympus Mons) ima prečnik veći od 60 km!

„**Obnovljene kaldere**”. Kaldere koje se ponovo pojavljuju su, smatra se, najveće vulkanske strukture na Zemlji. Genetski su vezane za „masivne” erupcije piroklastičnih tokova u razmerama koje još nisu „zabeležene” u istorijsko doba.

Najmlađa od ovih je kaldera Toba, stara 74.000 godina, na indonežanskom ostrvu Sumatra. Erupcija Tobe je proizvela 2800 puta više piroklastičnog materijala nego umerena plinijska erupcija planine Svete Jelene 1980. godine!

Osim njihove ogromne veličine, karakteristika obnovljenih kaldera je i široka topografska depresija. Dno kaldere je obično ispunjeno riolitskim lavama, tokovima opsidijana i kupolama, a uzdignuti centri često sadrže izdužene pukotine stvarajući grabene.

ZAKLJUČIMO! Kaldera može biti relativno stabilna desetinama ili stotinama hiljada godina. Dolaskom nove magme u komoru, ona uzrokuje „naduvavanje” stena, naročito u gornjem delu, kada može doći do katastrofalne vulkanske erupcije.

Najveće kaldere, prečnika preko 100 km, povezane su sa ogromnim piroklastičnim erupcijama. Neke od njih su toliko velike da su utvrđene analizom satelitskih snimaka. Čuveni Jeloustoun park ima nekoliko delimično preklapajućih kaldera (nazivaju se kompleksi kaldera).

Kaldere su genetski najvećim delom vezane sa bazičnim vulkanima, kao na Havajima. Veoma su mlade i ukazuju na to da se „podmlađuju” (procesi stvaranja se obnavljaju) u intervalima od nekoliko vekova, za razliku od „starijih”, gde je proces znatno duži, hiljadama (pa i više) godina. Proučavanja su pokazala da zapremine kaldera sa bazičnim lavama nemaju „očiglednu” vezu sa količinom izlivenih lave.

V.4.2.1.4 MORFOLOGIJA TOKA LAVE

Lava je „rastopljena” stena (delom i očvrtnula), koja se izlila na površinu Zemlje za vreme vulkanske erupcije. Najvažniji faktori koji utiču na morfologiju (oblik) toka lave su: hemijski sastav lave, viskozitet, prisustvo fluida, vrsta izlivanja, brzina i dužina izlivanja i hlađenja, morfologija terena itd.

Hemijski sastav i viskozitet magme „diktiraju” da li se lava izliva kao širok, tanak „sloj”, ili „plitki” potok, što je karakteristično za većinu bazalta, ili kao „balonasta kupola”, „brdovita” masa, kao što je slučaj kod kiselih lava.

Brzina izlivanja lave iz kratera ili pukotine takođe utiče na morfologiju sliva, tj. odnos širine i visine. Brzo kretanje (izlivanje) smanjuje efekte hlađenja na pokretljivost lave i produžava tok. Tu su i prečnik otvora i zapremina magme.

Podsetimo da su bazaltne lave manje viskozne (više pokretljive) od kiselih, od kojih generalno imaju manji broj slivova. One često stvaraju ogromne provincije pločastih bazalta.

Bazaltni izlivi lave su obično debljine od nekoliko desetina metara i mogu „otputovati” i desetine kilometara od otvora, gradeći štitne vulkane ili „debele” plato bazalte. Pomenimo da su neki izlivi trahitskih i fonolitskih magmi sa malim sadržajem silicijuma (SiO_2) takođe, po pokretljivosti, slični bazaltima.

Lave bogate silicijumom su viskozne i slabo pokretljive, zbog čega imaju „guste” tokove koji na mestu izliva formiraju vulkanske kupe.

Neke lave pronalaze svoj put u depresijama, kao što su kanjoni, gde se kreću kao „ograničen” tok. Ako su površine, prostori gde se izliva lava „ravni”, lava se kreće „nepovezano”. Zbog veće površine i, naravno, uticaja atmosfere, brže se hladi, pa su izlivi male debljine (bazaltne lave). Ponekad se izlivi spajaju pokrivajući još veće i „deblje” površine.

Bazalti su najrasprostranjenije i najviše zastupljene stene na Zemlji, a bazaltne lave se izlivaju na više od polovine svetskih vulkana. Bazalti grade najveći deo okeanske kore, koja pokriva oko tri četvrtine Zemlje, i ogromne kontinentalne bazaltne plate, kao i manje lokalne oblasti. Bazalta ima u gotovo svim tektonskim sredinama. Slede ih andeziti, daciti i rioliti. Bazaltne lave, to znamo, male su viskoznosti, uglavnom bez fluida, zbog čega su njihove erupcije i izlivi „mirni” i „pokretljivi”. Tokovi lava su „brzi”, kreću se nekoliko desetina kilometara na sat i uglavnom ne ugrožavaju ljude. Ponekad ruše kuće i devastiraju zemljište, zbog čega nisu uvek „dobrodošli” na prostoru gde se živi. Bazalti grade uglavnom „tanke” slivove i potoke lava. Setimo se vremena iza nas kada su nastali bazaltni platoi koji pokrivaju hiljade kvadratnih kilometara, a debljine su i preko 1 km. Danas su to široke visoravni i vulkani sa blago nagnutim stranama (po obliku pripadaju štitastim vulkanima).

Prema načinu izlivanja, obliku (morfologiji) i dinamici smeštaja bazalta, pojedini autori izdvajaju više vrsta tokova lava koji su izliveni na površini. Navedimo neke od njih.

KASKADE LAVE

Kaskada vode, vodopad, nastaje kada se voda spušta preko stena. Na sličan način, kaskada lave se „spušta” preko „litice”, već očvrsle lave ili stena na putu duž koje se izliva (slika 340). Na Havajima, kaskade lave se obično javljaju kada se lava izlije preko ivice kratera, raseda ili morske litice u okean. Na prikazanoj slici, lava se izliva preko ivice Aloj kratera u „blistavoj” kaskadi lave visine oko 1925 metara tokom erupcije Mauna Ulu, koja



Slika 340. Kaskade lave

se dogodila 1969–1971. godine na istočnoj zoni raseda vulkana Kilauea na Havajima. Fontana lave u pozadini je visoka oko 30 metara.

DRAPERIJA LAVE

Draperija lave je ohlađena, zgusnuta stena na „licu” litice, kratera, nastala izlivanjem lave ili kaskadom preko njihovih ivica (slika 341).



Slika 341. Draperija lave



Slika 342. Lučna fontana

LUČNA FONTANA

Lučna fontana nastaje kada se lava iz kratera izliva, izbacuje u vazduh u obliku luka, a ne vertikalno, kako je „normalno” (slika 342). Visina lučnih fontana varira od nekoliko do par desetina metara, retko i više.

FONTANE LAVE

Fontane lave su mlazevi lave raspršeni u vazduhu (izbačeni u vazduh), sa brzim formiranjem i širenjem mehurića gasa u rastopljenoj steni. Visina fontane je obično od 10 m do 100 m, a povremeno dostiže i više od 500 m. Fontane lave izbijaju iz izolovanih kratera, duž pukotina, unutar aktivnih jezera lave, često i zbog „mešanja” sa vodom (eksplozivna erupcija) ili kada lava ulazi u more (slika 343). Havajske erupcije sa centralnim kraterom poznate su po svojim spektakularnim „prskanjima” tečne lave nalik mlazu, zvanim vatrene fontane. Mogu se pojaviti u kratkim naletima i trajati satima. Jedan od najspektakularnijih događaja sa fontanama



Slika 343. Fontana lave

ikada zabeležen na Kilauei proizveo je prskanje lave visine 580 m na otvoru Kilauea Iki 1959. godine. Međutim, ovo je manje od „vatrene” fontane od 1600 m, koju je stvorila havajska erupcija na japanskom ostrvu Ošima 1986. godine. Vrh fontane se često nosi niz vetar, da bi se stvorila vazдушna zavesa od svetlećih fragmenata koja „pljušti” nadole. Oni se brzo hlade zračeći svoju toplotu u atmosferu. Kada se „vrata” na Zemlju, od njih nastaje skrama, o kojoj će biti više reči u poglavlju Morfologija lave.

KUPOLASTA FONTANA

Kupolasta fontana nastaje kada je pritisak magme iz kanala ispod približno u ravnoteži sa masom lave koja se izliva (slika 344). Fontane sa kupolom mogu dostići visinu i do nekoliko desetina metara, a obično se javljaju u lavama koje su siromašne fluidima (gasovima). Fontana sa kupolom koja je ovde prikazana je visoka oko 20 m i nastala je tokom erupcije Mauna Ulu vulkana Kilauea na Havajima 1969–1971. godine.



Slika 344. Kupolasta fontana

KANALI LAVE

Kanali lave nastaju kada se fluidni bazalti uglavnom kreću niz padinu sa blagim nagibom stvarajući „sopstvene” kanale (slika 345). To su uski, zakrivljeni ili pravi otvoreni putevi kroz koje se lava kreće po površini. Količina lave varira tako da kanal može biti pun ili „preliven”, a u drugim slučajevima skoro prazan. Tokom prelivanja, deo lave se zgušnjava i hladi duž bokova toka, kada se formiraju „prirodne obale”, koje omogućavaju lakše kretanje lave.



Slika 345. Kanali lave

TALASI LAVE

Talasi lave jesu povremeni skokovi ili ubrzanja u napredovanju lave. Javljaju se kada se dotok lave na frontu naglo poveća ili front toka popusti (slika 346). „Snabdevanje” lavom može da se poveća i usled većeg „ispuštanja” lave iz kratera, iznenadne promene njegove geometrije (na primer, usled urušavanja), kada velika

količina lave ode. „Nalet” lave može biti praćen tankim, kratkotrajnim izbijanjem lave iz glavnog kanala i fronta toka. Na slici je prednji deo „A-a” toka na vulkanu Kilauea, na Havajima. Svetleći deo talasa je visok 6–7 m. Front protoka je napredovao brzinom od 33 m/min, u poređenju sa 1,5 m/min pre talasa.



Slika 346. Talas lave



Slika 347. Stojeći talasi

PRELIV LAVE

Prelivi lave su izlivi, ograničeni kanali lave na stranama vulkanskog konusa ili štita koji se formiraju kada lava prelije obod otvora (slika 348).

JEZERA LAVE

Jezera lave su velike količine rastopljene lave, obično bazaltne, koje se nalaze u otvoru, krateru ili širokoj depresiji (slika 349). Najčešća su kod havajskih erupcija. Naučnici koriste ovaj izraz da opišu i jezera lave koja su potpuno „tečna” ili delimično do potpuno očvrsla. Jezera lava se mogu formirati 1) iz jednog ili više otvora u krateru iz kojih izbija dovoljno lave da delimično ispuni krater; 2) kada se lava izlije u široku depresiju i 3) na vrhu novog kratera koji neprekidno izbacuje lavu u periodu od nekoliko nedelja ili više i „polako” stvara jezero. Slika prikazuje pogled iz vazduha na jezero lave na vrhu kratera Kupaianaha na istočnoj zoni raseda vulkana Kilauea na Havajima. Dim koji se diže s kraja uskog dela jezera lave označava početak izliva. Pomenimo da se aktivna jezera lave obično sastoje od delimično učvršćene sjajne sive kore jer se njena površina konstantno hladi atmosferom.



Slika 348. Preliv lave



Slika 349. Jezero lave

Kora je debela od 5 do 30 centimetara, retko i više, „stara” nekoliko minuta ili sati. Neprestano se „uništava” (ponovo stapa) i obnavlja. „Obrazac” kretanja na površini jezera lave često se upoređuje s vrstom kretanja velikih razmera koja se dešavaju između ogromnih tektonskih ploča koje čine Zemljinu koru, uključujući subdukciju, širenje i kretanje u pokretu. Smatra se da je „najdugovečnije” jezero lave u „istorijskim vremenima” bilo u krateru Halemaumau tokom većeg dela stogodišnjeg perioda između 1823. i 1924. godine. Ovo jezero lave „uništeno” je 1924. godine jakom hidrovulkanskom erupcijom. Trenutno aktivna jezera lave se nalaze na samo nekoliko lokacija: planina Erebus na Antarktiku, Erta’ Ale u Etiopiji i Niragongo (Nyiragongo) u Kongu. Vulkan Kilauea ima bogatu istoriju stvaranja jezera lave u svojim brojnim kraterima.

KIPUKA

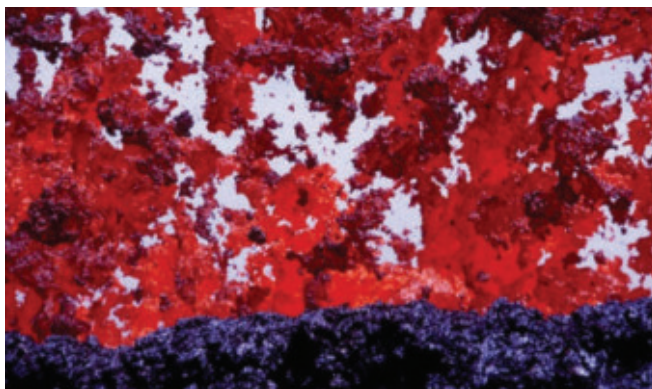
Kipuka je havajski izraz za „ostrvo” zemlje potpuno okruženo sa jednim ili više mlađih tokova lave (slika 350). Kipuka se formira kada lava okruži brdo ili blagi uspon u zemlji dok se kreće niz padinu ili preko relativno ravnog tla. Pošto su okružene novijim tokovima, kipuke su često prekrivene „zrelom” vegetacijom. Ova kipuka je nastala tokom erupcije Pu’u ’O’o Kupaianaha na istočnoj zoni raseda vulkana Kilauea, na Havajima. Reč *kipuka* je varijacija havajske reči *puka*, što znači „rupa”.



Slika 350. Kipuka

PRSKANJE

Veoma tečni fragmenti rastopljene lave izbačeni iz otvora koji se izravnavaju i zgušnjavaju na tlu nazivaju se prskanje (slika 351). Oni obično grade zidove očvršćene lave oko jednog otvora da bi se formirao bedem od prskanja, uglavnom sa obe strane izliva ili konus prskanja koji je kružnog oblika.



Slika 351. Prskanje

PRSKAJUĆI BEDEMI

Prskajući bedemi (engl. *spatter rampart*) jesu fontane lave koje izbijaju iz izdužene pukotine i grade prskajuće bedeme duž obe strane pukotine ili raseda (slika 352). Sreću se i prskajući konusi, koji su uglavnom kružnog oblika.



Slika 352. Prskajući bedemi

KONUS PRSKANJA

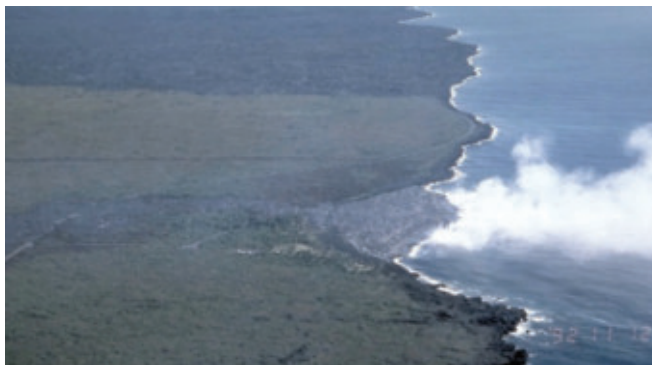
Konus prskanja su niska „brda” sa strmom stranom ili gomilama „zavarenih” fragmenata lave koji se formiraju duž linearne pukotine ili oko centralnog otvora (slika 353). Fragmenti lave koji se izbacuju u vazduh često nemaju vremena da se potpuno ohlade pre nego što se vrate na tlo. Oni „prskaju” dok slete i vezuju se za fragmente lave koji su još vrući i ponekad cure niz stranu konusa.



Slika 353. Konus prskanja

DELTA LAVE

Kada lava uđe u okean na „duži” vremenski period, stvara se platforma u obliku lepeze poznata kao **delta lave**. Difuzna „perjanica” bele pare na prednjoj ivici delte ukazuje na to da se nekoliko malih tokova lave sliva u okean (slike 354 i 354a).



Slika 354. Delta lave

Nebrojene delte su se formirale duž obale tokom erupcije Kilauee. Slika prikazuje pogled iz vazduha na deltu lave (u sredini, levo od vulkanskog isparenja) koja raste prema moru u Kamoamoi na vulkanu Kilauea, na Havajima. Ako se fragmenti lave akumuliraju, na relativno strmoj podmorski padini, prednja ivica delte lave će se često urušiti i formirati niz podmorskih klizišta.

Lava koja ulazi u okean obično je „debeli” 1–5 m. Kako talasi prskaju lavu koja napreduje, površina rastopljenog toka se brzo hladi i razbija u male, staklaste fragmente. Pošto morska voda ne ostaje zarobljena ili zatvorena unutar lave, ek-



Slika 354a.
Delta lave, detalj

splozije se retko dešavaju. Iz tog razloga, prvih nekoliko sati novog ulaska u okean je najbezbednije vreme da se izbliza vidi lava koja ulazi u more.

Lava koja dospeva do okeana se brzo hladi nadolazećim talasima, „zamrzava“, formira staklo i često „razbija“ u fragmente veličine od peska do blokova, koji se akumuliraju duž podmorske padine, tik uz obalu.

Za vreme ovih procesa cela delta lave može polako da tone dok se gomila stvorenih fragmenata pomera pod težinom tokova lave iznad njih.

TUNELI I CEVI U LAVI

Tuneli i cevi u lavi su „prirodni“ tuneli kroz koje lava putuje ispod površine očvrslе lave. Uglavnom se sreću kod bazaltnih izliva. Izlivanjem lave male viskoznosti i siromašne fluidima na njenoj površini formira se „kruta korica“ koja obezbeđuje izolaciju zbog svoje male toplotne provodljivosti. U unutrašnjem delu



Slika 355. Tunel lave

rastopljena lava nastavlja da teče. Stvaraju se „tuneli“ i cevi (slika 355). To su prirodni vodovi kroz koje lava putuje ispod površine očvrslе toka lave koji ostaje relativno vruć i izoluje lavu od daljeg hlađenja. U „širokom polju“ toka lave razvijaju se sistemi tunela i cevi koji se dalje dele u niz manjih grana, duž kojih lava može da se kreće i više kilometara, naročito ako je tok na nagibu, padini. Prečnici tunela i cevi kreću se od desetak centimetara do (u izuzetnim slučajevima) par metara, a dužine i do neverovatnih desetak kilometara. Tuneli i cevi u lavi obično imaju glatke zidove, uglavnom sa ravnim podovima i mnogo stalaktita lave koji vise sa krova. Pošto cevi od lave ostaju „zakopane“, često ostaju neprepoznate na površini. Međutim, mnoge od njih su na površini

„ocrtane“ linearnim ili krivolinijskim nizom udubljenja duž ose cevi, koja se nazivaju krovni prozori. Na aktivnim cevima lava, krovni prozori pružaju jedinstven pogled na užarenu lavu koja aktivno teče u sistemu cevi lava. Prikazani primer je iz „svetlarnika“ koji se razvio iznad aktivne cevi lave povezane sa erupcijom Kupaianaha 1989. godine na istočnom sistemu „rascepa“ većeg vulkana Kilauea, na Havajima. Cevi lava generalno su ograničene na pahoehoe izlive lave (prikazani detaljno u posebnom poglavlju Morfologija lave), ali se mogu formirati u nekim debelim A'a tokovima, poput onih koji se javljaju na planini Etna. Morfologija cevi pruža veoma efikasan mehanizam kretanja tokova bazaltne lave na velike udaljenosti od svog izvora, bez značajnog gubitka toplote. Njihov bočni opseg je veoma promenljiv. Cevi lava su obično dugačke <1 km, mada mogu da premaše nekoliko kilometara, kao što pokazuje cev od lave u Kvinslendu, u Australiji, koja je duga > 100 km. Prečnici cevi lava su takođe veoma promenljivi, od < 1 m do čak 15 m. Tuneli i cevi su retki u silicijumom bogatim lavama.

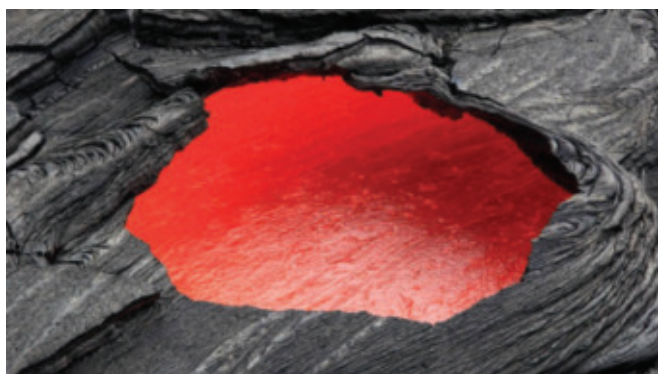
DRVO LAVE

Tečna bazaltna lava može sačuvati oblike drveća i drugih predmeta tako što se učvršćuje (hladi) oko njih. Struktura koja je ostala često se naziva drvo lave (slika 356).

Stabla drveća zahvaćena i spaljena lavom ostavljaju cilindrične šupljine, odnosno kalupe drveća, u koje se lava uliva i hladi. Kalupi često čuvaju originalnu površinsku teksturu drveta. Sreću se u tokovima pahoehoe lave, ponekada i u „A-a” tokovima.



Slika 356. Drvo lave



Slika 357. Svetlarnik

SVETLARNIK

Svetlarnik (engl. *skylight*) jeste otvor na krovu cevi od lave. Krovni prozori se obično formiraju kada se deo krova uruši u cev, ali se javljaju i tamo gde krov nije uspeo da ostane preko kanala lave (slika 357). Ako je cev aktivna, ispod se može videti mlaz užarene lave.

HORNITO

Hornito je mali konus prskanja bez korena koji se formira na površini toka bazaltne lave (obično pahoehoe). Hornito se razvija kada se lava probija kroz otvor na ohlađenoj površini toka, a zatim se akumulira oko otvora. Tipično, hornito ima strme strane i formira „upadljive” vrhove ili gomile (slika 358). Oni su „bez korena” jer se napajaju lavom iz osnovnog toka, umesto iz dubljeg kanala magme.



Slika 358. Hornito



Slika 359. Brežuljak

BREŽULJAK

Brežuljak (engl. *hummock*) jeste zaobljeni ili konusni dajk unutar lave. Neki brežuljci sadrže ogromne blokove, prečnika od jedne desetine do stotine metara, koji su uglavnom razbijeni. U drugim brežuljcima ostaci, blokovi stena se mešaju sa lavom (slika 359). Veliki brežuljak iz 1980. godine sa planine Sveta Jelena stoji iznad močvarnog područja (u prvom planu).



Slika 360. Litoralni konus

LITORALNI KONUS

Litoralni konus je izgrađen od fragmenata lave na površini toka lave koji se izliva u vodu, obično u okean. Naziv *litoralni konus* (engl. *litoral*) odnosi se na obalu. Lava koja ulazi u okean zagreva i ključa morsku vodu, često stvarajući eksplozije pare koje bacaju tefru na obalu, uključujući prskanje, bombe, blokove, pepeo, lapile itd. (slika 360). Kako se različita tefra akumulira na obali, može se stvoriti dobro razvijen konus.

PAHOEHOE TOKOVI

Pahoehoe (izgovara se kao „paho’-eho’-e”) jeste havajski izraz za bazaltnu lavu koja ima glatku, grbavu ili vijugavu površinu (slika 361). Tokovi su relativno tanki (1–2 m) i veoma pokretljivi zbog niskog viskoziteta lave. Ako je brzina izliva dovoljno velika, lava će formirati veliki pljosnati izliv, sloj sa glatkom „uvijetnom” površinom. Na prednjem delu toka koji je obično tanak (< 20 cm), nastaje užareni rezanj već nakon par metara kretanja lave. On usporava tok i stvara



Slika 361. Pahoehoe tok

novi režanj koji ga delom „preklopi” itd. Sa daljim kretanjem, na vrhu i bočnim stranama toka stvaraju se serije režnjeva koji leže jedan naspram drugog, kada površina pahoehoe dobije „bizarne” oblike, koji se često nazivaju i *skulpture od lave*. Pahoehoe lava je dobro razvijena na štitastim vulkanima, ali se može javiti i kod drugih lava niskog, malog viskoziteta. Pahoehoe lave se javljaju kao „potoci” i uglavnom su bogatiji gasom, vreliji i manje viskozni od ostalih. Najvećim delom nastaju u ranim fazama bazaltne erupcije, kao na primer na Havajima.

ROPI PAHOEHOE

Ropi pahoehoe je „gruba” površinska tekstura pahoehoe tokova (slika 362). Izgledaju kao režnjevi, presavijene tkanine ili isprepleteni konopci i, važno je, ne fragmentiraju se. Brojni nabori i bore („konopci”) koji su karakteristični za ropi pahoehoe nastaju kada se tanka, delimično očvrsnuta kora toka uspori ili zaustavi (na primer, ako kora naiđe na prepreku ili koru koja se sporije kreće). Pošto lava ispod kore nastavlja da se kreće napred, ona ima tendenciju da vuče koru. Kora se tada ponaša kao harmonika koja je stisnuta zajedno – kora je dovoljno fleksibilna da razvije bore ili niz malih grebena i udubljenja dok se sabija i pomera napred. „Nabori” su obično manji od 2 cm i usmereni na tok kretanja lave. Sa daljim hlađenjem, viskoznost se povećava, tokovi se kreću sporije i razvijaju deblju, „ukočenu” koru. Pahoehoe lava je teška za hodaње. Unutrašnjost pahoehoe lave je obično vezikularna (gasovita), sadrži više od 20% vezikula. Na nekim površinama ima „brojnih” mehurića, koji stvaraju penastu (sunderastu) teksturu, ili su to nagomilane ploče (tanki komadi ohlađene lave), verovatno nastale usled pukotina hlađenja.



Slika 362. Ropi pahoehoe

PAHOEHOE ENTRAIL

Ime je dobio po teksturi životinjskih creva. „Najbolje” se formira kada pahoehoe teče niz strmu padinu. Obično se nalazi na stranama otvora bez korena, kao što su hornitosi i puknuti tumuli (slika 363). Na južnom krilu Kilauee najupečatljiviji primeri se



Slika 363. Pahoehoe entrail

javljaaju tamo gde je pahoehoe „curio” niz strme skarpe u sistemu raseda Hilina.

PAHOEHOE PLIKOVI

Plikovi su mehurići od bazaltnog stakla sa tankim zidovima koji nastaju oslobađanjem vulkanskog gasa sa površine pahoehoe toka. Poput duvaljke za staklo, gas koji se oslobađa iz lave stvara tanku staklenu koru, kada se formira veliki mehur (slika 364). Javljaaju se na većini pahoehoe tokova.



Slika 364. Pahoehoe plikovi



Slika 365. Zavojnice lave

ZAVOJNICE LAVE

Zavojnice lave (engl. *pahoehoe lava coil*) jesu spiralni oblici koji se formiraju duž sporih zona u toku; na primer, duž ivica malog kanala. Pravac toka se može odrediti iz „namotaja” lave. Lava na desnoj strani fotografije kreće se prema vrhu u odnosu na lavu na levoj strani (slika 365).

PAHOEHOE PRSTI

Ako je kretanje lave sporije, tokovi će napredovati kroz izbočine malih reznjeva na prednjem delu toka, koji se nazivaju „pahoehoe prsti” (engl. *pahoehoe toe*). Slika prikazuje „izbijanje” i napredovanje pahoehoe prstiju duž bočnih strana talasastog toka lave pahoehoe.



Slika 366. Pahoehoe prsti

Površina lave se hladi, a tanka koža postaje viskozija, kada dolazi do progresivnog zbijanja. Tamo gde pahoehoe prsti brzo napreduju, obično niz strmije padine, mogu se pojaviti izdužene izbočine (slika 366). Pahoehoe prsti su „uobičajeni” duž ivica i prednjeg toka aktivnog pahoehoe toka koji se kreće preko ravnih ili blagih padina. Tok se širi kada mali prsti rastu i spajaju da bi formirali širi front. Daljim kretanjem nastaje nova „serija” „debelih” prstiju, koja će krenuti

napred i započeti proces iznova.

„A-a” TOKOVI

Naziv „A-a” ili „A-a” je havajski. Izgovara se „ah-ah”. Hodajući bosim nogama po ovim tokovima u bolu uzvikujemo „a! a!”. Imaju hrapavu površinu, koja se sastoji od slomljenih blokova lave zvanih klinkeri (slika 367). Iako su ovi tokovi lave često viskoziji i tipično deblji od



Slika 367. „A-a” tok

pahoehoe lave, oni imaju tendenciju da napreduju većom brzinom. Nastaju, smatra se, brzim kretanjem lave, zbog „jake” erupcije ili lokalno strmog nagiba, kada se ohlađena lava razbija u komade, blokove, stvarajući „A-a” izlive.

„A-a” tokovi su izlivi, „gromade” slobodnih, nepravilno oblikovanih komada očvršle lave sa oštrim ivicama i grubom šupljikavom površinom. Krupniji ohlađeni komadi prelaze u blokove. Na čelu toka su obično strmi nagibi, kod većih protoka može se formirati masivniji tok iza „čela” od blokova.

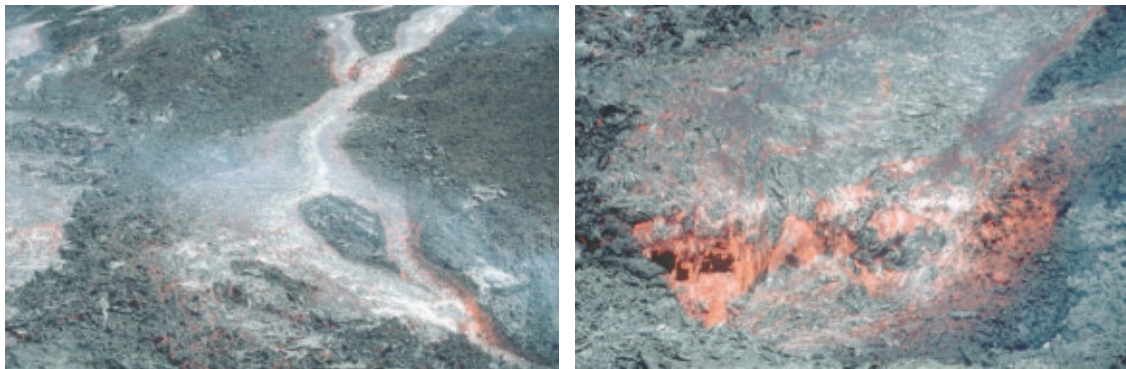
Front „A-a” toka je debljine od par metara do čak dvadesetak metara. Na njegovom strmom prednjem delu ohlađeni komadi se odvajaju od lave i „padaju” napred, često ga zatrpavaju i sprečavaju ili otežavaju dalje kretanje „A-a” toka. U njegovom središnjem delu stvara se „bodljikava površina”, koja je vrlo teška, spora i opasna za kretanje i hodanje. Unutrašnji delovi su uglavnom delimično stopljeni. Zbog prisustva fluida (uglavnom zarobljene morske vode) koja „želi” da izađe napolje, ohlađena kora se raspada, puca u komade i blokove, koji se kreću, pomeraju, uzdižu ili spuštaju. Sliv, tok lave nalik je „ruševinama” koje se kreću.

Opisani pahoehoe i „A-a” tokovi lave mogu biti generisani iz istog vulkanskog izvora. „A-a” tokovi se odlikuju nezaobljenim fragmentima i njihovim „grubim” površinama, dok pahoehoe imaju glatke površine. „A-a” tokovi su često šupljikavi, donji deo (podina) kompaktniji je i čvršći.

Napredovanje toka je brže od napredovanja pahoehoe toka. Gubitak toplote je veći i diskontinuiran u odnosu na pahoehoe tokove, što dovodi do povećanja stepena iskristalisalosti u donjem delu, po čemu se jasno razlikuje od „staklastog” izliva pahoehoea. Zbog većeg stepena iskristalisalosti, stvara se više vezikula (šupljina), pa lava dobija šljakast izgled.

Brojni bazaltne tokovi počinju kao pahoehoe izlivi i završavaju kao „A-a” tokovi, posebno na strmijim padinama. Na Havajima se pojavljuju spektakularni prelazni pahoehoe do „A-a” bazaltne tokovi zbog prelaska lave po „neravnini”.

Kritični faktor koji određuje da li će se formirati pahoehoe ili „A-a” je odnos između viskoznosti lave (otpor protoku) i količine unutrašnjeg poremećaja ili smicanja koji se javljaju dok se lava širi (izlazi, teče) od kratera ili pukotina, raseda



Slika 368. Formiranje pahoehoe i „A-a” tokova

niz padinu (slika 368).

Generalno, ako je pahoehoe viskoznost visoka (relativno hladna lava), niska stopa smicanja ili poremećaja može uzrokovati prelazak u „A-a” tok. Na primer, sporo pokretni pahoehoe tok koji se dovoljno ohladio može da se transformiše u „A-a” dok tok nastavlja da napreduje. Kada „tečni” pahoehoe prelazi preko strme padine, on povećava svoju brzinu i stvara uslove pogodne za formiranje „A-a” toka. Smatra se da se „A-a” tok počinje formirati kada su brzine izliva $>5-10$ kubnih metara u sekundi, što se povećava kada lava kreće niz strmije padine. Pahoehoe tok se može pretvoriti u „A-a”, ali se **obrnuto nikada ne dešava**. Pahoehoe tokovi su „ograničeni” na bazaltnu lavu, dok se „A-a” tokovi mogu javiti i kod viskoznijih lava, andezita, dacita itd.

TUMULUS

Površine pahoehoe tokova na ravnim ili blagim padinama često pokazuju eliptične, kupolaste strukture visine od 2 do 10 m koje se nazivaju tumulusi (slika 369). Stvaraju se kada pritisak rastopljene lave koja se sporo kreće „gurne” koru koja se nalazi iznad. Pošto je čvrsta kora krhka, obično se lomi da bi



Slika 369. Tumulus

se prilagodila „naduvanom” jezgru toka. Takvi prelomi se generalno prostiru duž celog tumulusa i često su praćeni manjim nepravilnim pukotinama na bočnim stranama. Ove strukture ponekad prelaze u izdužene oblike zvane grebeni pritiska, koje se obično razvijaju subparalelno sa smerom protoka na marginama protoka, ili upravno na smer protoka u centralnim delovima toka.

AKRECIONE KUGLE LAVE

Akrecione kugle lave su sfernog oblika i formiraju se na površini „A-a” toka. Prečnika su nekoliko centimetara do nekoliko metara (slika 370). Kugle lave rastu kada se mali fragment očvrsnute lave kotrlja duž površine aktivnog toka i lava se zalepi ili naraste na njegovu površinu. Rast kugle lave je sličan rastu grudve, kada se meki, lepljivi sneg zalepi za njenu površinu dok se kotrlja niz padinu.



Slika 370. Akreciona kugla

VULKANSKI BLOKOVI

Vulkanski blok je čvrsti fragment stene veći od 64 mm u prečniku koji je izbačen iz vulkana tokom eksplozivne erupcije. U literaturi (udžbenicima) za vulkanski blok sreće se i izraz **blok lava**. (slika 371).

Blokovi se obično sastoje od očvrslih komada starih tokova lave koji su bili deo vulkanske kupe. Ovaj blok na slici je izbačen u vazduh eksplozijom izazvanom kolapsom aktivne delte lave na vulkanu Kilauea, na Havajima. Ona može da „klizne” u okean kada se meša sa vodom, što može uzrokovati eksploziju vruće lave i stvoriti sitnije blokove veličine nekoliko desetina centimetara.



Slika 371. Vulkanska blok lava

Blokovi ohlađene lave mogu biti veliki i nekoliko metara. Smatra se da nastaju procesom u kojem je lava skoro očvrsla, a stvoreni blokovi bukvalno izbačeni iz kratera se dalje kotrljaju niz padinu. U većim masivnijim tokovima, obično na čeonom delu sliva, može se formirati front od blokova. Blokovi lave podsećaju na „A-a” tok, ali imaju omotač od poliedarskih delova umesto nazubljenog, visoko vezikularnog, „ukočenog” klinkera. Blokovski tokovi se javljaju od bazičnih, preko intermedijarnih do kiselih lava, opsidijana. Blokovi lave su krupniji od „A-a” fragmenata i obično se formiraju od lava koje su bogatije silicijumom nego „A-a” i pahoehe lave. Postoje i prelazi između pomenutih tipova, mada se i u toku jedne erupcije može javiti više vrsta izliva lava. Blok lave je obično deblji od „A-a” lave, ponekad više od 100 m fragmentiranog materijala, i može predstavljati celokupnu debljinu, čineći veći procenat protoka nego u „A-a” toku.

VULKANSKA BOMBA

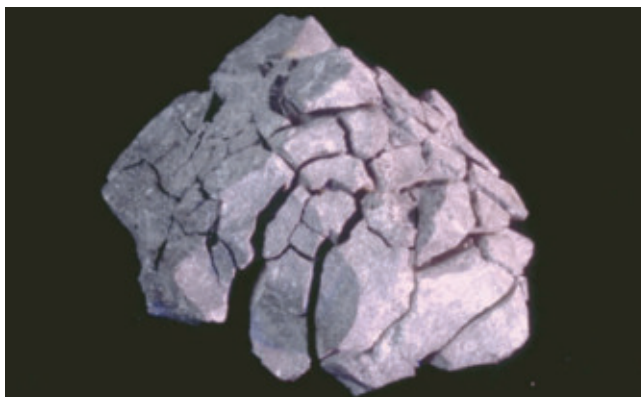
Vulkanske bombe su fragmenti lave koji su izbačeni dok su bili tečni (delimično rastopljeni) i veći od 64 mm u prečniku (slika 372). Mnoge dobijaju zaobljene aerodinamičke oblike tokom putovanja kroz vazduh. Vulkanske bombe po teksturi obuhvataju bombe sa „korom hleba“, bombe sa trakama, bombe sa vretenom (sa uvrnutim krajevima), sferoidne bombe itd.



Slika 372. Vulkanska bomba

ISPUCALA BOMBA

Ispucala (engl. breadcrust) bomba je vulkanska bomba sa napuknutom i „kariranom“ površinom, koja ponekad podseća na površinu vekne hleba (slika 373). Pukotine se razvijaju kada se spoljna površina delimično rastopljenog fragmenta lave ohladi, a zatim puca.



Slika 373. Ispucala bomba

PELEINA KOSA

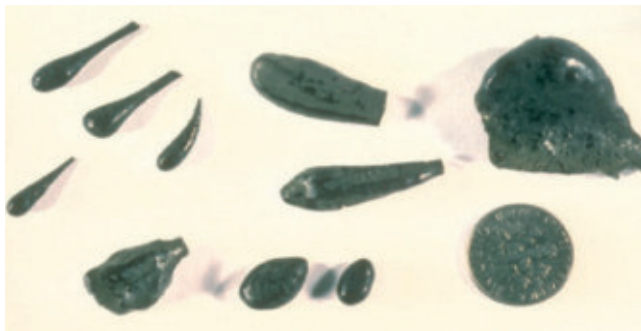
Tanke duge niti vulkanskog stakla izvučene iz rastopljene lave zovu se Peleina kosa, a nazvane su po havajskoj boginji vulkana Pele. Jedna nit, prečnika manjeg od 0,5 mm, može biti duga i do 2 m (slika 374). Pramenovi se formiraju rastezanjem ili izduvavanjem rastopljenog bazaltnog stakla iz lave, obično iz fontana lave, slapova lave i snažnih tokova lave (na primer, dok pahoehoe lava uranja preko male litice i na prednjoj strani „A-a“ toka. Peleina kosa se često „nosi“ visoko u vazduh, a vetar može da raznese staklene niti nekoliko desetina kilometara od otvora.



Slika 374. Peleina kosa

PELEINE SUZE

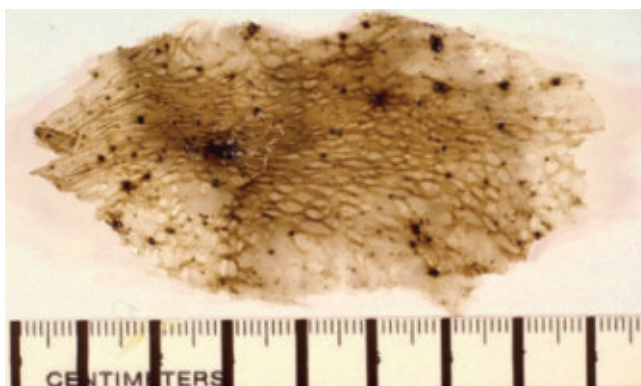
Mali komadi rastopljene lave koji su se brzo ohladili i očvrstnuli u obliku sfera ili suza nazivaju se Peleine suze, po pomenutoj havajskoj boginji vulkana (slika 375). One su crne boje i često se nalaze na jednom kraju pramena Peleine kose.



Slika 375. Peleine suze

LIMU

Limu o Pele (havajski izraz za „Peleine alge”), sastoji se od tankih pahuljica bazalnog stakla, koje se ponekad formiraju kada se pahoehoe lava izlije u okean (slika 376). Dok talasi zapljuskuju otvorene potoke lave, nešto vode može ostati zarobljeno i proključati, što rezultira delikatnim mehurićima lave ispunjenim parom (gasom). Naglo hlađenje i kontinuirano širenje delikatnih zidova mehurića formiraju tanke ploče i razbijene komade braonkasto-zelenog do skoro prozirnog stakla. Limu je tek nedavno primećena kako se formira kada su tokovi pahoehoe „ušli” u okean tokom erupcije vulkana Kilauea. Reč *limu* se povremeno koristila u 19. i ranom 20. veku za opisivanje retikulita, vrste bazalnog plovuća.



Slika 376. Limu

HIJALOKLASTIT

Naglim hlađenjem i fragmentacijom bazaltnih lava nastaju ugaoni, staklasti fragmenati veličine od 0,25 do 2 cm, koji se nazivaju hijaloklastiti. Fragmenti su obično „okruženi” matriksom žuto-braon palagonita, supstancom nalik vosku koja nastaje hidratacijom i izmenom sideromelana (slika 377). Pomenimo i palagonitski tuf, koji sadrži mešavinu komadića sideromelana i krupnozrnih fragmenata bazaltne stene u matrici palagonita. Fragmentacija bazalta može nastati i eksplozivnom erupcijom, stvaranjem *pillow* lava (njihovih marginalnih delova) usled „termičkog udara”



Slika 377. Hijaloklastit, Pribojska banja

(kontakt lave sa morskom vodom). Kada se u bazaltnom staklu javljaju veoma sitni kristali gvožđe-oksida, ono se naziva **tahilit**. Pomenimo da se izraz *hijaloklastit* sreće i u okviru piroklastičnih stena, koje ćemo detaljno prikazati u odeljku o sedimentnim stenama.

PILLOW LAVE I SUBMARINSKI TOKOVI

Mnogo je veća vulkanska aktivnost koju „uživo” ne vidimo jer je nekoliko kilometara ispod nivoa mora (okeana) u područjima razmicanja ploča, riftnim zonama. Po obliku i morfologiji, izlivi se razlikuju od onih na kopnu.



Slika 378. Pillow lave, Bistrica (kod Prijepolja)

Najprepoznatljiviji oblik su *pillow* lave (slika 378), koje liče na gomile vezanih jastuka, po čemu su i dobile ime. To su zapravo preseči interkonektivnih cevi lave koje napreduju „novim probijanjem, stvaranjem” jastuka. Bazaltna lava, ohlađena okolnom vodom i pod nagibom, formira duktilni (plastični) balon, koji se „nagubljava” pod pritiskom nove lave. Koža se „razbija” i formira sledeći jastuk, takođe sa glatkom, staklastom površinom, koji se smešta između dva „starija” jastuka.

Sa povećanjem pritiska, nova porcija bazalta se probija poput paste za zube, formirajući još jedan jastuk. Formiranje jastuka na ravnim padinama nije primećeno. Sa hlađenjem u unutrašnjosti jastuka nastaju pukotine koje su upravne na rashladnu površinu.

Ovaj proces se nastavlja sve dok se ne stvori „debela” sekvenca, izlivi debljine od nekoliko pa do preko 100 m.

Većina *pillow*-a ima koncentričnu zonarnu strukturu zbog sporijeg hlađenja prema središnjem delu jastuka. Obodi su, kako smo pomenuli, zbog brzog hlađe-

nja staklasti (izgrađeni od bazalnog stakla), a središnji delovi su zrnasti, ponekad sa ofitskom strukturom.

Sa izlivanjem *pillow* lava, one se obično „spljošćavaju” i oblikuju naslanjajući se jedna na drugu, što omogućava utvrđivanje gornjeg, odnosno donjeg dela sliva, posebno u tektonski preoblikovanim područjima (ofiolitskom melanžu). Ovo su korisni indikatori za terenske geologe, koji mogu odrediti uspon ili pad izliva. Česte su i radijalne do zrakaste pukotine unutar *pillow* lave zbog brzog hlađenja u morskoj vodi.

Pillow lave (jastuci) obično su vezane vulkanskim staklom, koje je nestabilno i reaguje sa morskom vodom, prelazeći u palagonit. Između jastuka se može pojaviti i deo mekanih (nekonsolidovanih) sedimenta, kao što su glina i rožnaci, koji su se normalno taložili na morskom dnu tokom izlivanja ili tokom mirovanja vulkanske aktivnosti.

Kada se fragmentirano bazaltno staklo deponuje u vlažnim karbonatnim sedimentima, formiraju se **peperiti** bez značajnije „eksplozije”. Odlomci lave bazalta su obično zaobljeni, veličine od par do desetak centimetara, retko i više.

Ove stene sam prvi put „video” u ofiolitima Kurdistan, gde sam radio na prospekciji bakrove mineralizacije.

Veoma „lepih”, klasičnih izdanaka peperita ima i u Crnoj Gori. Prema našem saznanju, peperiti su formirani in situ (na mestu) nakon izlivanja lave andezitskog i spilitskog sastava srednje trijaskke starosti (anizikladin) u vlažan sitnozrni karbonatni mulj Buloških krečnjaka (slika 379a i slika 379b). Oko okruglastih do uglastih fragmenata lave, prosečne veličine oko desetak cm, zbog njihove toplote, stvoren je oreol od rekristalisalog belog kalcita širine nekoliko milimetara. Pomenimo da pojedini autori ove stene svrstavaju u piroklastite.

Eksplzivni karakter ovog tipa izlivanja bazalta je nepoznat jer okolna voda sprečava ovakvu vrstu erupcije, tj. odlazak gasova, koji su ionako malo prisutni.

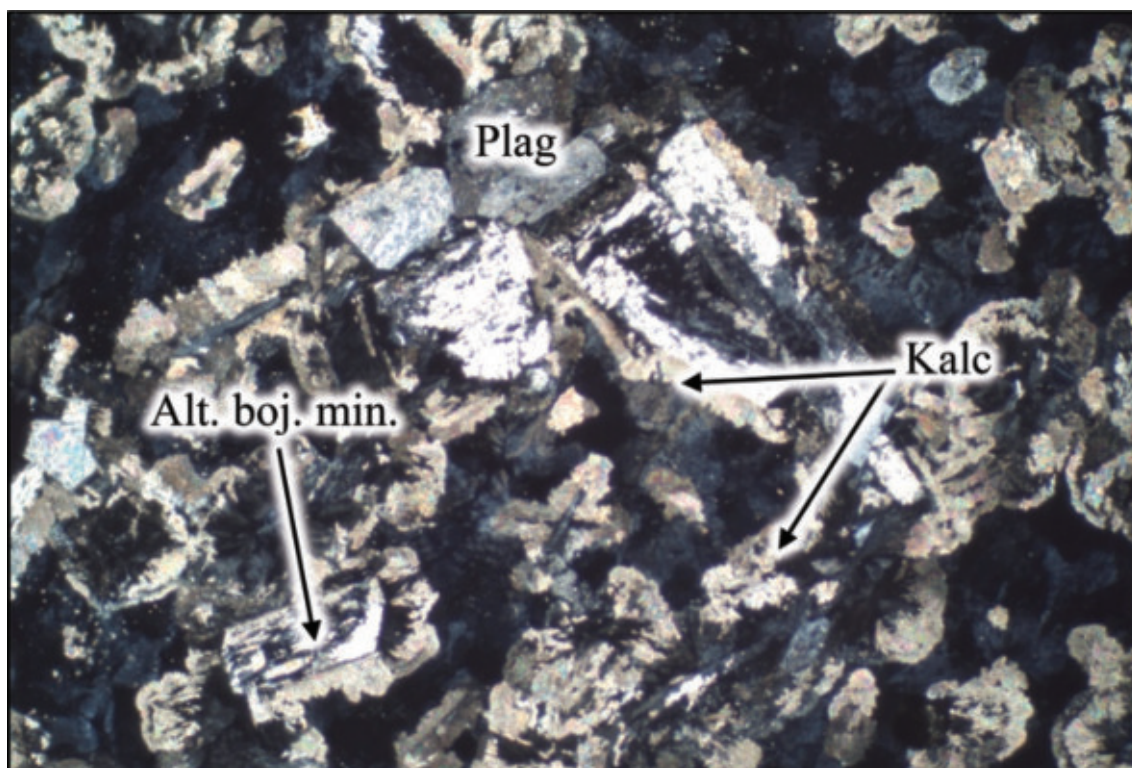
Kada na terenu otkrijemo jastučaste bazalte, znamo da su izliveni pod vodom, uglavnom morskom.

Pillow lave se mogu naći i u kontinentalnim sredinama. Submarinskim izlivanjem bazalta retko se javljaju i listovi, tanke ploče, obično debljine do nekoliko desetina centimetara, za koje se smatra da su nastale na višim nivoima izliva u odnosu na one u kojima se formiraju *pillow* lave.

Prepoznatljiva karakteristika *pillow* izliva je pojava hidrotermalnih otvora, **crnih dimnjaka**, o kojima smo već govorili u poglavlju o tektonici ploča. Podsetimo se, ukratko. Cirkulacijom morske vode kroz pukotine koje je stvorio rift, voda se zagreva, rastvara imobilne elemente u steni (bazalte), prelazi u gasovito stanje, postaje lakša i ponovo se vraća na dno okeana, gde se rastvoreni elementi (uglavnom sulfidi metala) deponuju. Temperature mogu biti čak do 350 °C. Čestice, mulj i koloidni rastvor su crne boje, pa se popularno nazivaju „crni dimnjaci”. Obično su okruženi organizmima kao što su školjke, rakovi i crvi, koji žive i opstaju bez „pomoći” Sunca, koristeći energiju iz Zemlje. Neki autori čak smatraju da je ovde nastao život na našoj planeti.



Slika 379a. Izdanak peperita, jugoistočna Crna Gora; gore desno: detalj stene



Slika 379 b. Mikrosnimak peperita iz Crne Gore; plag = plagioklas, kalc = kalcit; alt. boj. min. = alterisani bojani mineral; N+, 60x

V.4.2.1.5 HIDROTHERMALNI SISTEMI

Pomenimo i „nuspojave” koje su najvećim delom vezane za izlive lave, odnosno završnu fazu vulkanske aktivnosti. Rasedi i pukotine koje nastaju utiskivanjem ili izlivanjem magme, kao i tektonski procesi u okolnim stenama, stvaraju povoljno okruženje za deponovanje metalnih i ostalih minerala iz hidrotermalnih rastvora koji su u stvari, kako smo već pomenuli, „zaostala” fluidna faza sa rastvorenim inkompatibilnim elementima. Hidrotermalni rastvori (zaostali fluidi) evoluiraju kroz hemijsku (i izotopsku) razmenu sa silikatnim rastopom i/ili čvrstim delom plutona ili lave. Oni takođe reaguju sa okolnim stenama, uz brojne hemijske, mineralne i teksturne promene, zavisno od temperature, poroznosti, hemijskog sastava okolnih stena i trajanja aktivnosti hidrotermalnog sistema. Ova raznolikost odražava se i na stvaranje velikog broja minerala sa zonarnim rasporedom, koji zavise od sastava i temperature.

Hidrotermalnim procesima su stvorene značajne količine rudnih minerala kao što su zlato, srebro, bakar, olovo, cink, molibden itd. Prema pojedinim autorima, hidrotermalni rastvori mogu delimično poticati i iz okolnih stena.

Istraživanja ukazuju na to da i meteorska voda igra veliku ulogu u hidrotermalnoj aktivnosti. Toplota magme (ili lave) zagreva podzemnu vodu, povećavajući njenu rastvorljivost i učešće u hidrotermalnim procesima. Kao rezultat toga, formiraju se ležišta metala, ali i fumarole i topli izvori na površini. Ovaj proces je cikličan. Topla voda se hladi, ponire, ponovo se zagreva, da bi se, zbog manje gustine, vratila na površinu, zatvarajući tako ciklus i cirkulaciju vode. Hidrotermalni sistemi u području plitkih intruzija mogu biti snažni i intenzivni. Takođe smo pomenuli i crne dimnjake kao jednu od zanimljivih pojava hidrotermalne aktivnosti.

FUMAROLE

Fumarole su otvori iz kojih vulkanski gas izlazi u atmosferu. Javljaju se duž „malih” pukotina ili na površinama tokova lave i debelih naslaga piroklastičnih materijala. Mogu trajati decenijama ili vekovima, ali mogu nestati i u roku od nekoliko nedelja ili meseci ako se pojave na vrhu brzo hlađenog toka. Najčešće su žute boje zbog prisustva iskristalalog elementarnog sumpora (slika 380). Na nekim vulkanima



Slika 380. Fumarola, Vulkano, Italija

ima dovoljno sumpora da se eksploatiše kao ekonomski resurs. H_2S se ponekad naziva „kanalizacioni gas” zbog mirisa pokvarenih jaja. To je podmukli otrov koji iritira oči, nos i grlo. S druge strane, SO_2 je gas koji peče i izaziva gušenje, oseti se odmah nakon paljenja šibice.

Kada se ova dva gasa pojave zajedno, brzo reaguju (za nekoliko minuta) i formiraju sulfate i vodenu paru.

Mnogi gejziri, topli izvori i fumarole su povezani sa podzemnim vodama koje cirkulišu do određene dubine. One se zagrevaju putem magme ili lave i mešaju (delimično i rastvaraju) fluide (gasove), a zatim se, zajedno sa njima, vraćaju na površinu kroz pukotine. Najčešće se emituje vodena para, H_2S , HF , HCl , CO_2 itd. Ako dominiraju jedinjenja sa sumporom, nazivaju se solfatare. Fumarole i solfatare se često javljaju zajedno.

GEJZIR

Većina gejzira su vreli izvori koji povremeno izbijaju kao „fontane” vrele vode i pare. Erupcije nastaju zagrevanjem podzemne vode do temperature ključanja u zatvorenom prostoru usled prisustva tople stene, lave, magme (slika 381). Zagrejana vodena para, stvorena zbog većeg pritiska, tera vodu kroz pukotine i izliva se na površinu. Gejzir je islandska reč koja znači „probijati ili juriti napred”.

Najveća svetska polja gejzira nalaze se na Islandu, Novom Zelandu i u Nacionalnom parku Jeloustoun, Vajoming (Wyoming) itd. Neki gejziri izbijaju iz hladnih ili toplih izvora i napajaju se pritiskom gasa umesto stvarnog ključanja vode. Većina svetskih gejzira nalazi se u blizini oblasti vulkanske aktivnosti, koje obezbeđuju toplotu potrebnu za ključanje plitke podzemne vode.



Slika 381. Gejzir, park Jeloustoun

BLATNI VULKAN

U vulkanskim regionima, blatni vulkani su obično male „kupe” od blata u obliku vulkana, visine manje od 1 m. Blato se formira kada kiseli gasovi reaguju sa stenom i pretvaraju je u glinu, koja se meša sa zagrejanom podzemnom vodom, i izbijaju na površinu (slika 382). Blatni vulkani „eruptiraju” pod pritiskom geotermalne pare i gasova. Mogu se formirati i u nevulkanskim područjima gde su slojevi bogati vodom (muljem) pod pritiskom, uz akumulaciju ugljovodoničnih gasova. Pod pritiskom, sediment se gura prema gore, izbijajući na površinu zemlje i formirajući konusne gomile blata ili čak blatasta jezera ako erupcija traje dovoljno dugo. Ovi blatni vulkani su povezani sa nižim temperaturama i manjom količinom gasova.



Slika 382. Blatni vulkan, Rumunija

ZAKLJUČIMO!

Većina vulkanskih erupcija na planeti vezana je za granice tektonskih ploča, riftne zone ili aktivne kontinentalne margine, zone subdukcije, a česte su i u područjima toplih tačaka.

U područjima **razmicanja ploča** (srednjeokeanski grebeni), svake godine se „izbaci” najveća količina bazaltne magme na planeti. Ove erupcije su „mirne” jer su bazaltne lave siromašne fluidima. Većina njih se javlja na dubinama od nekoliko kilometara ispod nivoa mora. U submarinskim erupcijama na okeanskom morskom dnu, česta su izlivanja u obliku jastučastih (*pillow*) lava, koje smo opisali. One se mogu i „direktno” posmatrati kada se grebeni javljaju iznad nivoa mora, kao što je to slučaj na Islandu. Erupcije bazalta mogu biti i opasne. Vulkan Hekla, takođe na Islandu, tokom erupcije je bio ispod lednika koji je lava naglo stopila, pretvorila u paru i stvorila ogroman oblak s prašinom, što je, između ostalog, izazvalo „pometnju” u avio-saobraćaju itd.

Ali, uprkos pomenutim opasnostima, vulkanska aktivnost na ovom prostoru daje „čistu” geotermalnu energiju, koja se uveliko koristi u različitim vidovima neophodnim za ljude koji žive na pomenutom prostoru.

U **aktivnim kontinentalnim marginama**, subdukcionim zonama sa kompresionim „stresnim” stanjima, nastaju lave (stene) bogatije silicijom. Dominiraju andeziti i daciti. Bazalta je malo jer su „zaustavljeni” u donjoj do srednjoj kontinentalnoj kori (zbog iste gustine). Ove bazične magme su, smatra se, imale „priliku” da se diferenciraju, asimiliraju, kontaminiraju itd., dajući silicijumom bogatije

rastope, iz kojih su kristalisale pomenute stene. Kisele magme, lave su viskozne, „spore”, obično bogate fluidima, zbog čega imaju eksplozivne erupcije.

„Najopasniji” vulkani na planeti su povezani s konvergentnim granicama ploča, tj. zonama subdukcije. Pomenimo „Pacifički vatreni prsten” s velikim brojem vulkana koji su „smešteni” iznad zone subdukcije oko Pacifika. On se „proširuje” kroz zapadnu Ameriku, Aljasku, Kamčatku, Japan, jugoistočnu Aziju i Indoneziju. Erupcije su uglavnom eksplozivne i „opasne” za ljude, ali i devastiraju prostor oko sebe, utiču na klimu itd. Ima vulkana koji nisu vezani za granice ploča, već za **tople tačke** koje se javljaju unutar okeanskih i kontinentalnih ploča.

Klasičan primer tople tačke unutar okeanske kore su nam dobro poznati Havaji. Pacifička ploča se kreće preko tople tačke, kada se stvaraju nizovi vulkana. Neki od njih su ugašeni i neaktivni već više miliona godina.

Lava, smatra se, dolazi s velikih dubina, po pojedinim autorima čak iz „sloja D”, koji se nalazi na granici spoljašnjeg jezgra i donjeg omotača. Lave su bazaltnog sastava, slabo viskozne i siromašne fluidima. Erupcije su „spektakularne”, ali ne i eksplozivne, zbog čega veliki broj ljudi želi da „doživi” lepotu i strast vulkana, bez veće opasnosti.

Mauna Loa je ogromni štitasti vulkan koji se odlikuje veoma blagim nagibom od nekoliko stepeni od osnove do vrha. Stvoren je tečenjem lave niskog viskoziteta (velike pokretljivosti), zbog čega ona dugo teče desetinama kilometara pre nego što očvrsne. Neke erupcije uključuju i opisane „fontane” lava (podsećaju na fontane sa vodom, po čemu su i dobile ime) ili dugačke tokove. Retko se javljaju i komadi bazaltne lave izbačeni nekoliko stotina metara u vazduh ili kao stubovi crnih staklastih fragmenata. Kada tokovi lave stignu do obale, prednji, frontalni delovi se hlade morskom vodom.

Kontinentalni riftovi su genetski vezani sa uzdizanjem magme iz gornjeg omotača i uglavnom su bazaltnog sastava. Pomenuli smo dobro poznati Istočnoafrički rift, koji daje put magmama koje hrane velike afričke vulkane. Erupcije su bile veoma intenzivne kada su stvoreni ogromni plato bazalti. Jedan od najvećih i najpoznatijih je Dekan u Indiji. Debljina sliva je oko kilometar i pokriva površinu od pola miliona kvadratnih kilometara.

U ovu grupu spadaju i bazalti Kolumbija u SAD. Pomenimo i velike vulkane koji se nalaze na kontinentima, kao što su Kilimandžaro, Niragongo i mnogi drugi.

Podsetimo se da se deo magme ne izliva na površinu, već ostaje u dubini, gde se lagano hladi i kristališe. Nastaju plutoni ili dajkovi, silovi, žice, koji su genetski vezani za magme smeštene na malim dubinama, gde su se hladile i kristalisale.

V.4.2.1.6 VULKANSKI RESURSI, HAZARDI, GLOBALNI UTICAJI

Vulkanizam pruža spektakularan primer vitalnosti naše mlade Zemlje. Vulkanska aktivnost značajno je „ojačala” našu planetu na globalnom nivou. Površinskim razaranjem, pre svega atmosferilijama (kiša, sneg), od vulkanskih, delom i dubinskih stena, nastale su ogromne površine obradivog zemljišta. S njima je došlo i mnogo metala koji su nam potrebni, poput bakra, zlata, srebra, olova, cinka itd. Ali, postoje i mračne strane: uprkos medijskoj pažnji koja je data uglavnom za gađanju vazduha, vulkanske erupcije su bile glavni „krivci” za iznenadne propasti velikog broja životinjskih i biljnih vrsta, planetarnih razmera. Pomenimo da nije dan čovek do sada nije svedočio o žestokoj i destruktivnoj prirodi ogromnih izliva plato bazalta ili kompleksa riolitских kaldera. Posledice takvih masovnih erupcija po život su iznad ljudskih iskustava na Zemlji.

OPASNOSTI OD LAVE

Bazaltni tokovi lave, iako su najmanje viskozni i imaju najbrži protok, retko su opasni za ljude. Oni su praktično nezaustavljivi, pa postavljanje barijera daje male rezultate. Na svom putu, bazaltne lave devastiraju zemljište, razaraju puteve, kuće itd.

Najpoznatije vulkanske erupcije praćene su snažnim eksplozijama. Neke od njih, koje smo opisali, odgovorne su za smrt desetina hiljada ljudi. One, takođe, devastiraju zemlju, vodu, ruše sve pred sobom na znatno većoj površini. Oblaci pepela i prašine ometaju avio-saobraćaj, uzrokuju promenu klime. Taloženjem s vodom stvaraju se ogromne blatne reke, koje menjaju, uništavaju širok prostor i ugrožavaju živote velikog broja ljudi, uništavaju floru i faunu, koje su nam životno značajne.

Najveće eksplozivne erupcije na Zemlji nazivaju se **supererupcije**. Uključuju ogromnu količinu lave od nekoliko hiljada km³. Brz, nagli odlazak lave (magma) iz komore uzrokuje razaranje i kidanje stena koje se nalaze iznad. Pomenimo da velike vulkanske erupcije mogu uzrokovati i promenu klime, koja može biti katastrofalna za veći deo flore i faune, uključujući i čoveka, na našoj planeti.

PREDVIĐANJE ERUPCIJA

Razumevanje opasnosti povezanih s vulkanima je važno radi što veće zaštite od budućih erupcija, posebno ugrožavanja života ljudi. Godišnje na planeti, prema statistici, ima oko 60 aktivnih vulkana. Desetina erupcija traje samo jedan dan, a neke traju danima, mesecima, retko i godinama, prosečno nekoliko nedelja. Kako se mogu predvideti erupcije? Svaki od vulkana se analizira i ulazi u procenu rizika od erupcija na drugom mestu.

Jedna od metoda procene erupcija je proučavanje postojećih podataka, ako za to ima dovoljno informacija. Neke erupcije izbijaju iznenada, nakon zatišja koje

se meri desetinama pa i stotinama godina. Erupcije mogu biti opasne jer izbijaju i stvaraju veliku količinu prašine i pepela, obično praćenu s malo lave.

Kako da ih predvidimo? Imajmo poverenja u znanje pojedinih geologa, bolje reći vulkanologa, koji su posvetili svoj život vulkanima. Tu su i računari u kojima sabiramo sve postojeće podatke, zatim statistička obrada podataka, teorija verovatnoće itd. Napomenimo da su na osnovu geoloških karata i saznanja napravljene i karte opasnosti za veliki broj lokaliteta, posebno tamo gde se javljaju opasni vulkani.

Jedan od najboljih načina da se zaštitimo od aktivnog vulkana je proučavanje njegove istorije. Ono počinje se s aktuelnim podacima: vreme, karakter, intenzitet i mesto erupcije. Treba odrediti i mineralni, hemijski sastav stena (lava), njihovu teksturu i strukturu, način izlivanja, morfologiju sliva itd.

Pomenuti podaci su važni, presudni za procenu rizika za svaki pojedinačni vulkan. Do sada postoje podaci o riziku od erupcija za oko 600 aktivnih vulkana raspoređenih na celoj planeti. Oni pomažu ljudima koji žive blizu vulkana kako bi se predvidele erupcije.

Sistemi upozorenja o erupciji vulkana baziraju se i na praćenju vremenskih satelita koji imaju i specijalne radare, instrumente za prepoznavanje vulkanskih erupcija, prisustva oblaka s prašinom, povećane temperature itd.

Satelitski snimci se često koriste za osmatranje vulkana, praćenje erupcija sa širokim elektromagnetnim spektrom osmatranja. Neki sateliti koriste radarsku tehnologiju koja je u stanju da vidi kroz oblake i pepeo, što je veoma korisno za praćenje vulkana u udaljenim nenaseljenim područjima ili lošim vremenskim uslovima itd.

NEPOSREDNI PREKURSORI ERUPCIJA

Znakovi da bi vulkan mogao krenuti s erupcijom mogu se utvrditi samo ako se vulkani pažljivo i neprekidno posmatraju. Vulkanski monitoring je usmeren na otkrivanje fenomena koji prethode erupciji. Postavljen je na velikom broju odabranih vulkana u Sjedinjenim Državama, na Aljasci i Havajima.

Vulkanskim erupcijama ponekad prethodi niz fenomena, upozorenja kada će se javiti. Promene u temperaturi površine vulkana (kupe) prate se termičkim infra-crvenim satelitskim snimcima, a nadgledaju se i druge promene, kao što su smene i promene u sastavu emitovanih gasova, fizička svojstva stena, električna svojstva, magnetizam itd.

Indikatori početka erupcije mogu biti i promene u sastavu gasova i fluida iz vulkanskih otvora (kratera) ili fumarola. Oni ukazuju na promene stope degazacije magme ispod vulkana i interakciju magme s okolnom vodom iz stena u koje je utisnuta. Pomenuli smo stvaranje izbočina na padini vulkanske kupe, promene njenog oblika koje se na pojedinim vulkanima neprekidno i precizno mere s tačnošću od 1 cm.

Jedan od najpouzdanijih prekursora erupcije su harmonični rojevi malih zemljotresa (seizmički talasi) koji reaguju (nastaju) usled kretanja magme u vulkanskom kanalu.

Oni se razlikuju od tektonskih zemljotresa koji su vezani za dublja područja i znatno su većeg intenziteta. Mali zemljotresi obično počinju danima, ponekad i sedmicama pre erupcije i stalno menjaju intenzitet i vreme trajanja. Ovi podaci omogućavaju tačnije predviđanje vulkanskih erupcija.

Detalji geofizičkog monitoringa vulkana su složeni i proteklih godina su značajno unapređeni. Jedna od uobičajenih tehnika je korišćenje gustog niza ili grupe veoma osetljivih seizmografa koji mogu otkriti različite vrste zemljotresa. Širokopojasni seizmometri mogu otkriti seizmičke talase sa frekvencijama od 0,1 do 100 sekundi, što je značajno poboljšanje u odnosu na ranije kratkotrajne seizmometre.

Analizom seizmičkih podataka radi se trodimenzionalna slika područja ispod vulkana i nadgleda se položaj i kretanje magme ispod vulkana.

Ipak, neke uočene opservacije nisu dovoljno jasne. To su električna i magnetna polja koja pokazuju promene na mnogim vulkanima, naročito s bazaltnom magmom bogatom magnetnim mineralima. Ove promene se mogu odnositi na kretanje magme (i magnetnih minerala), promene u zagrevanju, kretanju gasova ili druge uzroke itd.

Zaključimo da su sve tačnije prognoze i predviđanja erupcija usmereni na spasavanje života ljudi i imovine, ali i da se s vulkanima treba i mora živeti. Dok postoje vulkani, mi ćemo postojati i opstati.