

RAZGLEDI**SPREMINJANJE VIŠINE MORSKE GLADINE V KVARTARJU**

AVTORICA

Petra Slavec*Harpha Sea, d. o. o. Koper, Čevljarska ulica 8, SI – 6000 Koper, Slovenija
petra@harphasea.si*

UDK: 551.461.2:551.79(262.3)

COBISS: 1.02

IZVLEČEK

Spreminjanje višine morske gladine v kvartarju

V članku so predstavljeni vzroki in posledice spreminjanja višine morske gladine v kvartarju. Opisani so glavni označevalci tega dogajanja, ugotovljeni tako z izotopskimi študijami, kot tudi z opazovanjem geomorfoloških posebnosti na območju Jadranskega morja. Predstavljeni so tudi nekateri rezultati sonarskih snemanj v slovenskem morju, s pomočjo katerih je bilo mogoče na in pod morskim dnem prepoznati reliefne oblike, nastale pred zadnjo morsko transgresijo.

KLJUČNE BESEDE

kvartar, spreminjanje višine morske gladine, zadnji glacialni višek, sonarske meritve, Jadransko morje

ABSTRACT

Quaternary sea-level changes

Article discusses causes and consequences of Quaternary sea-level changes. It describes all major markers of the process, which have been ascertained with isotopic studies and observations of geomorphologic particularities, with special interest in Adriatic region. Article also presents some results of sonar surveys in the Slovenian sea, which proved to be valuable in research of underwater relief features, formed before the last sea transgression.

KEY WORDS

quaternary, sea-level change, last glacial maximum, sonar survey, Adriatic Sea

Uredništvo je prispevek prejelo 22. decembra 2010.

1 Uvod

Obdobje kvartarja so zaznamovale številne poledenitve. Izotopske študije globokomorskih sedimentov, ki so pomembne za rekonstrukcijo podnebnih sprememb v preteklosti, so pokazale, da so se v zadnjih 2,6 milijona let izmenjala kar 103 toplejša in hladnejša obdobja (Cohen in Gibbard 2010). V kombinaciji z nekaterimi tektonskimi premiki, ki so vplivali na potek morskih tokov in razporeditev padavin, so takšna podnebna nihanja med drugim povzročila napredovanje oziroma umikanje ledenikov ter posledično tudi kolebanje morske gladine. Slednje je zelo kompleksen pojav, saj do sprememb višine morske gladine prihaja v različnih prostorskih in časovnih razsežnostih, pri čemer ni vedno jasno, kdaj gre za vzrok in kdaj za posledico sprememb v okolju. Relativna višina morske gladine, torej višina, merjena glede na določeno točko na Zemlji, se tako lahko spremeni zaradi različno spodbujenih navpičnih premikov morja, kopnega ali obojega, njen obseg pa je odvisen tudi od krajevnih reliefnih razmer. Z gledišča geologije se je celoten razvoj človeške civilizacije zgodil med enim samim visokim stadijem morske gladine, ta pa v zgodovini glacio-evstatičnih kolebanj morske gladine pomeni izjemno kratko obdobje (Matthews 1990).

2 Podnebje v kvartarju

Kvartar je v nasprotju z večino geoloških obdobj, ki so določena na podlagi evolucije, definiran klimatokronološko, saj je že od leta 1948 veljal splošni dogovor, da mora biti meja postavljena ob prvem znaku večje podnebne ohlادتve. Leta 2009 je bil začetek pleistocena (prve epohe oziroma serije kvartarja) tudi formalno potrjen pri 2,58 milijonih let pred sedanjostjo, določen pa je bil tudi njegov GSSP (ang. *Global Stratotype Section and Point*) pri Monte San Nicola v južni Italiji, ki je zamenjal do tedaj veljavno GSSP pleistocensko bazo pri Vrici, prav tako v južni Italiji (Cohen in Gibbard 2010). Začetek kvartarja je tako postavljen na mejo med geomagnetnima kronoma Gauss in Matuyama, kar ustreza oceanski kisikovi izotopski stopnji (ang. *Marine Isotope Stage – MIS*) 103, sovпада pa tudi z mejo gelasij/piacenzij v sredozemski stratigrafiji (od tod tudi omenjeni GSSP) (Bavec 2007; Cohen in Gibbard 2010).

Glavno vodilo klimatskih sprememb, ki so sprožile zaporedje kvartarnih glacialov in interglacialov, so spremembe v Zemljini orbitalni geometriji. O tako imenovani astronomski teoriji je že leta 1842 ugibal francoski matematik Adh mar, za njim jo je razvijal James Croll, kasneje pa ji je fizikalne parametre dodal srbski astronom Milutin Milankovi . Ugotovil je, da na spreminjanje intenzivnosti osone nja Zemlje vplivajo tri astronomske komponente – nagib Zemljine osi, ki se spreminja od 21,5  do 24,5  v približno 41.000 let dolgih ciklih, ekscentričnost Zemljine orbite od kroţnici podobne do elipsaste v 100.000 let trajajočih ciklih in precesija Zemljine osi s cikli med 19.000 in 23.000 leti (Lowe s sodelavci 1997; Bavec 2002). Milankovi eva teorija je še danes predmet razprav, saj se pod tem imenom pojavljajo številne različice, med katerimi Roe (2006) izpostavlja fizikalno utemeljeno domnevo, da poletna osone nost igra osrednjo vlogo pri obsegu in prostornini kontinentalnih ledenih pokrovov (kriosfere) na severni Zemljini polobli.

Informacije o temperaturi in času, potrebne za potrditev hipoteze o vplivu orbitalnih sprememb na temperaturo Zemlje, so raziskovalci pridobili s pomočjo izotopskih študij. Gre predvsem za radiouaktivne ogljikove izotope (¹⁴C), s čimer lahko določimo starost hišic foraminifer v morskih sedimentih za zadnjih 40.000 let, in (še pogosteje) za razmerje med stabilnima izotopoma kisika (¹⁸O in ¹⁶O), s katerim je mogoče določiti temperaturo vode še za bistveno dlje nazaj (Broeckner 2010). Emiliani (1955), ki je med prvimi skušal potrditi Milankovi evo teorijo, je z analizo morskih sedimentov ugotovil, da je na izotopsko sestavo kisika v foraminiferah ne vpliva le temperatura morja, temveč tudi količina ledu, ki v določenem obdobju pokriva Zemljo. Z ohlajanjem podnebja in širjenjem kriosfere se količina »teţjega« ¹⁸O v primerjavi z ¹⁶O v morju ve a. Izotopske krivulje kisika, nastale na podlagi analiz sedimentov v globokomorskih vrtninah, so se ujemale z orbitalnimi krivuljami. Tako so bile spremembe v Zemljini

orbitalni geometriji potrjene kot sprožilec vrste kvartarnih ohladitev, pri čemer se je kot dominanten v zadnjih 500.000 letih izkazal 100.000-letni cikel (Emiliani 1955; Hays 1976; Shackleton 2000; EPICA 2004). Broeckner (2010) kot temperaturno razliko med glacialnimi in interglacialnimi stadiji navaja podatek $2,5^{\circ}\text{C}$ za površinske vode tropskih morij.

Pomemben vir informacij o kvartarnem podnebnju so tudi izvrtana jedra ledu z Antarktike in Grenlandije. Izotopske krivulje atmosferskega ^{18}O , ujetega v zračne mehurčke, so v primerjavi s krivuljami morskega ^{18}O obrnjene na glavo in tako sledijo podnebnim ciklom (Bavec 2002). Iz ledenih jeder lahko za nazaj razberemo tudi vsebnost CO_2 v atmosferi. Podatki kažejo, da je bila količina CO_2 v zraku med viški glacialov kar za 30 % nižja kot med viški interglacialov (Broeckner 2010). Med kontinentalnimi klimatostratigrafskimi zapisi je treba omeniti še nanose puhlice na Kitajskem, iz katerih se da razbrati ponavljajoče epizode intenzivnejšega preperevanja, ki se ujemajo z interglaciali, ter sekvenco iz vrtine Bajkalskega jezera, kjer se obdobja povišane bioproduktivnosti (na primer obilnejše cvetenje diatomejskih alg) prav tako ujemajo z interglaciali (Cohen in Gibbard 2010).

V zapisih morskih in ledenih vrtina obstajajo tudi dokazi za kratkotrajnejša hladnejša obdobja z vmesnimi 7000 do 10.000-letnimi intervali, ki se s periodičnostjo Milankovičevih ciklov ne ujemajo (Bond s sodelavci 1992). Heinrich je leta 1988 poročal o pojavljanju posameznih plasti v sedimentih severnega Atlantika, bogatih z apnenčevimi in dolomitnimi delci, a neobičajno revnih s planktonskimi foraminiferami. Sklenil je, da te plasti, ki so se odlagale v zadnjem glacialnem obdobju med 14.000 in 70.000 leti pred sedanostjo, skupaj s pojavom polarne vrste foraminifer *Neogloboquadrina pachyderma* in za zelo hladne vode značilne vrednosti $\delta^{18}\text{O}$, odražajo posamezne, nekaj stoletij trajajoče epizode ohlajanja oceana (Bond s sodelavci 1992; Williams s sodelavci 2003). V tem obdobju naj bi se predvsem z območja današnje vzhodne Kanade odrgalo večje število ledenih gor, ki so v Atlantski ocean poleg sladke vode prinašale tudi omenjene kamnite delce (ang. *ice rifted debris* – IRD). Zaradi nizkih temperatur morja je taljenje potekalo počasi in ledene gore so kamnito gradivo odložile na širokem območju med 45° in 60° severne geografske širine (Williams s sodelavci 2003).

Še pogosteje kot zgoraj opisani Heinrichovi dogodki (v Atlantiku so jih zasledili šest, kot sedmega pa Bond in sodelavci (1993) omenjajo tudi mlajši drias), so se med zadnjim glacialom z vmesnimi intervali od 2000 do 3000 let odvijali Dansgaard-Oeschgerjevi dogodki (Dansgaard s sodelavci 1993; Bond in Lotti 1995). Gre za zelo hitra, nekaj desetletij trajajoča interglacialna obdobja, ki se začnejo z nenadno otoplitvijo za $\sim 7^{\circ}\text{C}$, nato pa sledi bolj postopno ponovno ohlajanje ozračja (Williams s sodelavci 2003). Dansgaard-Oeschgerjeve dogodke so najprej razbrali v vrtini grenlandskega ledu, leta 1993 pa so Bond in sodelavci odkrili njihov zapis tudi v morskih sedimentih severnega Atlantika. Ugotovili so, da lahko vsa takšna nihanja temperatur povežejo v 1000 do 1500 let trajajoče cikle in jih imenovali Bondovi cikli. Vsak cikel kulminira z glacialom, med katerim pride do Heinrichovega dogodka, nato pa se do naslednjega viška odvijajo nekaj hladnejših interglacialov – Dansgaard-Oeschgerjevih dogodkov (Bond s sodelavci 1993).

Ker so si tovrstne ohladitve in otoplitve sledile v hitrejšem ritmu, kot bi ga lahko narekovali tudi najkrajši Milankovičevi cikli, je bilo treba vzroke zanje iskati drugje. Tudi dejstvo, da so temperaturna nihanja sledila istemu vzorcu na obeh zemeljskih poloblah, se z Milankovičevimi izračuni ni ujemalo (Bavec 2002). Konec osemdesetih let je Broeckner s sodelavci opozoril na vpliv oceana in njegove termohalinske cirkulacije (THC). Spremembe gostote površinskih voda v visokih geografskih širinah, ki jih povzročijo dotok sladke vode iz ledenih pokrovov, lahko vodijo v nenadne reorganizacije globokovodnih oceanskih tokov, kar nadalje vpliva na vsebnost toplogrednih plinov in stopnjo albeda v atmosferi (Broeckner in Denton 1989). Tako je bil na primer po večjih vnosih sladke vode zaradi številnih odlomljenih ledenih gor po Heinrichovih dogodkih THC za nekaj časa ustavljen (Rahmstorf 2006). Na potek morskih tokov vplivajo tudi spremembe v razporeditvi kontinentov, saj začetek poledenitev na severni polobli povezujejo z dokončnim zaprtjem Panamske ožine, kar naj bi okrepilo kroženje tokov v severnem Atlantiku ter hkrati transport toplejše in bolj slane vode proti Zemljinim polom. Posledica je bila povečana količina padavin in z njo rečnega odtoka z območja severozahodne Evrope, kar je povzročilo

znižanje slanosti in širjenje ledenega pokrova v Arktičnem oceanu, s tem pa povišanje albeda (Sarthein s sodelavci 2009).

Zapletene povezave vseh omenjenih in tudi nekaterih drugih dejavnikov (na primer rastlinskega pokrova, ognjeniških izbruhov), ki so imeli vpliv na kvartarno podnebje, še vedno ostajajo velik izziv raziskovalcem. Pri rekonstruiranju preteklih in napovedovanju prihodnjih dogodkov si pomagajo tudi z računalniškimi modeli, ki upoštevajo vse do sedaj znane vplive, vendar mehanizmi nenadnih podnebnih sprememb še vedno ostajajo predmet številnih polemik (Rahmstorf 2005).

3 Vzroki za spreminjanje višine morske gladine

Podnebje in spreminjanje višine morske gladine sta neposredno povezana, saj se z večanjem ledenih pokrovov ob glacialih manjša količina vode v oceanih in obratno. Pravimo, da prihaja do morskih transgresij in regresij. Kadar pa gre za globalno spreminjanje višine morske gladine zaradi spreminjanja količine vode v oceanskih kotanjah ali zaradi tektonskega krčenja oziroma širjenja morskega dna, spremembam pravimo evstatične. Termin evstatičen (ang. *eustatic*) je leta 1906 za poimenovanje globalnih sprememb višine morske gladine uvedel geolog Eduard Suess v delu *The face of the Earth*, kjer je pojasnil, da lahko na evstatične spremembe sklepamo z opazovanjem razširjenosti morskih sedimentov na kontinentih ali s primerjanjem globin, na katerih so bili posamezni sedimenti najdeni v vrtninah (Hallam 1984). Izračunamo jih tako, da razliko v prostornini oceanskih voda delimo s površino oceanov. Glavne elemente kvartarnega spreminjanja gladine morske vode lahko ob zanemarjenju nekaterih težko določljivih spremenljivk (običajno krajevnege značaja) strnemo v enačbo $\Delta\zeta(\varphi, \lambda; t) = \Delta\zeta^e(t) + \Delta\zeta^l(\varphi, \lambda; t) + \Delta\zeta^v(\varphi, \lambda; t)$, ki izraža višino gladine morja na določenih geografskih koordinatah (φ, λ), ob določenem času (t); $\Delta\zeta^e$ je evstatična sprememba gladine, $\Delta\zeta^l$ sprememba količine ledu in $\Delta\zeta^v$ sprememba količine morske vode (Williams s sodelavci 2003).

Pri zgoraj opisanih glacio-evstatičnih nihanjih, ki je imela prevladujočo vlogo pri kvartarnem spreminjanju višine morske gladine, gre izključno za izmenjavo mase med kriosfero in hidrosfero, brez vsakršnih deformacij in gravitacijskih posledic, kar pa ne velja za glacio-izostazijo, torej razporeditev mase med oceanskimi kotanjami in kontinenti glede na prisotnost oziroma odsotnost ledenega pokrova. V tem primeru se območje, ki je bilo zaradi ledenega pokrova pogreznjeno, prične dvigati, da bi doseglo prvotno stanje izostazijskega ravnotežja. To povzroči regionalno znižanje gladine morja. Ker pa pri pogrezanju okrog tonečega območja zaradi izpodrinjene mase (po zgledu Arhimedovega zakona) nastane izboklina, se ta med dviganjem zopet pogrezne in pospeši post-glacialno zvišanje morske gladine (Williams s sodelavci 2003; Stocchi 2007). Spremembe višine morske gladine zaradi glacio-evstazijskih nihanj lahko z upoštevanjem vseh naštetih dejavnikov povežemo v dokaj enakomerna območja, imenovana tudi Clarkove cone (Stocchi in Spada 2007).

Transgresija, do katere pride po evstatičnem dvigu morske gladine, lahko povzroči precejšnjo obtežitev kontinentalnega šelfa z morsko vodo. Kontinentalna skorja, na kateri leži šelf, se tako na zunanem delu bolj, na obalnem pa manj upogiba pod novo obremenitvijo in povzroča manjše hidro-izostatične spremembe višine morske gladine (Williams s sodelavci 2003).

Prerazporejanje mase med hidrosfero in kriosfero vpliva tudi na ekvipotencialno ploskev Zemljinega gravitacijskega polja, ki sovпада s srednjo gladino oceanov. Med taljenjem ledenih pokrovov se s taljenjem ledu manjša tudi njegova gravitacijska privlačnost, kar vpliva na spremembo višine gladine morja – ob ledenih pokrovih se gladina nekoliko zniža, na krajih, ki so od ledenih plošč oddaljeni, pa zviša. Riva in sodelavci (2010) so izračunali, da evstatična višina morske gladine zaradi zmanjšane gravitacijske privlačnosti ob taljenju ledu narašča za $1,0 \pm 0,4$ mm na leto. Ne gre torej za izostazijsko spremembo, ampak za spremembo v višini oceanske gladine zaradi gravitacijske privlačnosti ledenih gmot. Do znižanja relativne višine morske gladine ob deglaciaciji tako ne pride le zaradi izostazijskega dviga, ampak tudi zaradi motenj v gravitacijskem polju, sploh v bližini

območij, prekritih z ledom (Mörner 1976: po Williams s sodelavci 2003, 112; Williams s sodelavci 2003; Stocchi 2007).

Najpostopnejše, a hkrati tudi največje (po nekaterih ocenah do ± 500 m (Williams s sodelavci 2003)) spremembe višine morske gladine nastanejo zaradi delovanja tektonike, ki z razmikanjem ali krčenjem morskega dna vpliva na prostornino oceanskih kotanj. Ker je zanje potrebnih nekaj deset milijonov let, jih, vsaj največjih, ne moremo šteti med neposredne povzročitelje kvartarnih kolebanj gladine morja, so pa zato opazne krajevne spremembe, ob aktivnih stikih tektonskih plošč. Prav tako imata z globalnega vidika manjšo vlogo pri kvartarnem kolebanju morske gladine oblika obale in obalna sedimentacija, ki pa lahko prispevata k nekaterim krajevnim višinam morske gladine (na primer na območju izliva reke Pad (Italija) zaradi odlaganja rečnih sedimentov prihaja do ugrezanja) (Carbognin s sodelavci 2002; Williams s sodelavci 2003).

4 Spreminjanje višine morske gladine v kvartarju

V zadnjih 900.000 letih pleistocena so se na kontinentih severne poloble v približno 100.000-letnih ciklih izmenjevali glaciali in interglaciali. Tekom vsakega glaciala se je gladina morja postopoma znižala za ~ 120 m, saj se je voda iz oceanov shranjevala na območjih višjih geografskih širin v obliki snega in ledu. Med približno 90.000 let trajajočo fazo glaciacije se je sneg pod lastno težo spremenil v led in do začetka faze deglaciacije ponekod dosegel debelino tudi do 4 km (Peltier 1999).

Najzanesljivejši podatki o kvartarnih višinah morske gladine obstajajo le za del zgornjega kvartarja do približno 400.000 let pred sedanostjo (Williams s sodelavci 2003). Gre predvsem za tektonsko stabilne (Bermudi, Bahami, zahodna Avstralija) in počasi dvigajoče se obale s stopnjo dviganja okrog 2 m/100.000 let (na primer Havaji in nekateri deli Sredozemlja), pa tudi za nekatera manj stabilna območja, kot je na primer Barbados s stopnjo dviganja 20 m/100.000 let (Hearty s sodelavci 2007), kjer lahko sledove glacio-evstatičnih sprememb višine morske gladine opazujemo *in situ*. Starejši podatki, na podlagi katerih lahko sklepamo na spreminjanje višine morske gladine, so vezani na stratigrafske in izotopske raziskave, katerih korelacija kaže na nekatere globalno sinhrono podnebne dogodke (Hallam 1984; Williams s sodelavci 2003). Najgloblje izvrtana vrtna na Antarktiki (Dome C) razpolaga s podatki o koncentraciji atmosferskega CO₂ za zadnjih 800.000 let (Lüthi s sodelavci 2008), dobrih 1,8 milijona let nazaj segajo podatki o biogenem kremenu iz sekvence Bajkalskega jezera, za obdobje celotnega kvartarja pa so na voljo še podatki o MIS in sekvencah puhlice na Kitajskem (Cohen in Gibbard 2010). Za ugotavljanje nekdanjih višin morja se največkrat uporablja $\delta^{18}\text{O}$, pri čemer je treba upoštevati, da do temperaturnih sprememb pride od ~ 3000 do 5000 let pred spremembo $\delta^{18}\text{O}$ (Lea s sodelavci 2002). Tudi arheološki, mareografski in geodetski podatki so pomemben prispevek k rekonstrukciji nekdanjih višin morske gladine, vendar se, sploh zadnji, nanašajo na zelo recentno obdobje (Surić 2009).

Medsebojno dobro ujemajoči se podatki o $\delta^{18}\text{O}$ iz vrtn in v Norveškem morju, Vostoku in na oceanskem grebenu Kokos v Pacifiku kažejo, da so bile visoke morske gladine (primerljive z današnjim) prisotne med MIS 5,5 (5e) (pred ~ 125.000 leti), MIS 7,1 (pred ~ 190.000 do 200.000 leti) in MIS 7,5 (pred ~ 230.000 leti), nizke morske gladine (~ -120 m) med zadnjim glacialnim viškom (ZGV) (pred ~ 20.000 leti), MIS 6,2 (pred ~ 130.000 leti), MIS 8,2 (pred ~ 250.000 leti) in MIS 10,2 (pred ~ 340.000 leti), srednje (-30 ± 20 m) pa med glacialnim obdobjem MIS 6,5 (pred ~ 170.000 leti) (Lea s sodelavci 2002). S fosilnih koralnih grebenov konstantno dvigajočega se (0,5–3 mm na leto) polotoka Huon na Papui Novi Gvineji se da nad današnje morsko gladino razbrati sledove zadnjih dveh postglacialnih transgresij. Med zadnjim interglacialom naj bi bila tako gladina morja za 6 m višja od današnje, kar se ujema tako s podatki s tektonsko stabilnih Bermudov, kot tudi z obdobjem visoke poletne osončenosti, predvidene z Milankovičevo hipotezo. Po koncu zadnjega interglaciala se je trend spreminjanja višine morja z izjemo nekaj kratkih interstadialov obrnil navzdol, kar je pomenilo nastop obdobja zadnje večje kvartarne poledenitve (Würm v Alpah oziroma Wisconsin v ZDA) (Williams s sodelavci 2003).

Podatki o nekdanjih višinah gladine morja z območij kot sta Papua Nova Gvineja ali Bermudi so pomembni predvsem z vidika evstatične komponente spreminjanja višine morske gladine. Kot območji, odmaknjeni od ledenih pokrovov, sta namreč (ko pri prvi odštejem še vpliv enakomernega tektonskega dvigovanja) bistveno manj podvrženi glacio-izostazijskim popravkom kot območja pod ali v bližini nekdanjih ledenih pokrovov in zato primerni za rekonstrukcijo spreminjanja globalne višine morske gladine (Fleming s sodelavci 1998; Clark in Mix 2002; Williams s sodelavci 2003).

Spreminjanje višine morske gladine v Jadranskem morju je mogoče oceniti iz višine označevalcev MIS 5e (zadnji interglacial, ~12.500 let pred sedanostjo), ki se v Sredozemskem morju zaradi prepletanja regionalnih in krajevnih tektonskih procesov nahajajo v precejšnjem višinskem razponu (med 175 in -125 m nad/pod gladino) (Ferranti s sodelavci 2006). Surić in sodelavci (2009) so tako z mineraloško in $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ analizo dveh stalagmitov, najdenih na globinah -14,5 in -18,8 m ob obali otoka Krka, ugotovili povezavo med prekinjeno rastjo stalagmitov in transgresijo pred ~8400 in pred ~7700. Na podlagi izločenega kalcita in analizo $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ so sklenili, da je bila višina morske gladine nižja od -18,8 m med >9300 in ~9000, ~8200 in ~7700 in od ~6400 in 5400 pred sedanostjo. K današnji višini najdenih stalagmitov je najverjetneje prispevalo dolgoročno tektonsko dvigovanje s hitrostjo 0,15–0,25 mm na leto (Surić s sodelavci 2009). Na zahodni jadranski obali, še posebej v osrednjih in severnih delih, je v enakem obdobju prišlo do izrazitega ugrezanja, saj so bili označevalci MIS 5a najdeni le v vrtnah na globinah od 100 do 120 m pod današnjo gladino (Amorosi s sodelavci 1999; po Lambeck s sodelavci 2004).

5 Dinamika morske vode po zadnjem glacialnem višku

Z vidika raziskovanja Zemljine geodinamike in (paleo)klimatskih sprememb je ugodno, da je od ZGV, ki je pomenil zaključek zadnjega kvartarnega 100.000-letnega orbitalnega cikla, minilo geološko malo časa (Peltier 2004). V večini literature je ZGV postavljen med 20.000 in 21.000 let pred sedanostjo, Peltier in Fairbanks (2006) pa sta pri študiju izotopskih podatkov globokomorske vrtnice z Barbadosa ugotovila, da bi do tega utegnili priti že 5000 let prej. V vsakem primeru je celotno obdobje znotraj dosega radiokarbonskega (^{14}C) datiranja, s katerim se da zelo natančno določiti kronologijo posledic deglaciacije, podatke pa nato vključiti v izračune matematičnih modelov globalnega izostazijskega prilagajanja (ang. *Global Isostatic Adjustment* – GIA) (Peltier 2004). Čeprav se je proces deglaciacije v glavnem zaključil med 6000 in 7000 leti pred sedanostjo, se namreč spreminjanje višine gladine morske vode še ni povsem umirilo (Fleming s sodelavci 1998; Peltier 1999). Vzrok za to je Zemljin zapoznel viskozno-elastični odziv na deglaciacijsko prerazporeditev mase na njenem površju, kar v nekdam poledenelih območjih kot sta Kanada in severozahodna Evropa še vedno povzroča nižanje relativne višine morske vode tudi za več kot 1 cm na leto (Peltier 1999). Fleming s sodelavci (1998) dodaja, da je v omenjenih zadnjih 6000–7000 letih količina vode v oceanih kljub zaključeni deglaciaciji narasla 3–5 m.

Po koncu ZGV so se v oceane začele stekati velike količine vode iz talečih se ledenih pokrovov in postopoma dvignile višino gladine morja. Fairbanks (1989) je s pomočjo navpične sekvence indikatorske vrste *Acropora palmata* na koralnem grebenu Barbadosa ugotovil, da je ta dvig znašal $\sim 121 \pm 5$ m. Samo zmanjšanje prostornine ledu na Antarktiki naj bi k transgresiji prispevalo 25 m (Clark in Lingle 1979; po Williams s sodelavci 2003, 120). V poteku spreminjanja evstatične krivulje višine morske gladine po ZGV lahko izpostavimo tri bistvene intervale: (1) obdobje ZGV, ko je višina gladine doseгла najnižjo točko ($\sim 121 \pm 5$ m) in zatem naraščala v povprečju za 6 m/1000 let, (2) obdobje med ~15.000 in 7000 leti pred sedanostjo (pozni glacial), ko je višina gladine naraščala za okrog 10 m/1000 let in (3) postglacialno obdobje od ~7000 let do sedanosti, ko se je evstatična krivulja v primerjavi z ostalima obdobjema umirila in se je gladina morja (večinoma zaradi taljenja ledu) dvignila za že omenjenih 3–5 m (Fleming s sodelavci 1998).

Pomembno odstopanje od teh povprečij sta dva sunka povečanega dotoka ledeniške vode (ang. *melt-water pulse* – MWP) pred in po obdobju mlajšega driasa, ko je bila stopnja naraščanja gladine morja

najnižja (Fairbanks 1989). Po nekaterih izračunih naj bi 40 % količine vode prvega sunka (MWP 1a) med 13.000 in 11.000 leti pred sedanostjo prispevalo zmanjšanje severnoameriškega ledenega pokrova s približno 14,9 milijonov km² na 11,5 milijonov km², kar 60 % količine vode drugega (MWP 1b) pa zmanjšanje istega pokrova s približno 10,5 milijonov km² na 4,2 milijonov km² med 10.500 in 8500 leti pred sedanostjo (Dyke 2009). Med MWP 1a naj bi v manj kot 1000 letih višina morske gladine narasla za ~24 m, med MWP 1b pa za ~28 m (Fairbanks 1989).

6 Globalno segrevanje in kolebanje morske gladine

Dandanes, ko 10 % svetovnega prebivalstva živi manj kot 10 m nad morskno gladino (McGranahan s sodelavci 2007), vlada za spreminjanje višine morske gladine še posebej veliko zanimanje. Povezano je s podnebnimi spremembami, zaradi katerih je med letoma 1961 in 2003 globalna temperatura oceanov do globine 700 m narasla za 0,1 °C (Bindoff s sodelavci 2007).

Obstajata dve tehniki za spremljanje recentnega kolebanja višine morske gladine – meritve na mareografskih postajah in satelitska altimetrija. Prvi kažejo spremembe višine gladine morje na mestu, kjer so mareografi nameščeni, pri čemer pa moramo odšteti vse vertikalne premike tal zaradi GIA ali tektonskega delovanja. Med januarjem 1870 in decembrom 2004 (135 let) je globalna srednja višina morske gladine po podatkih mareografov narasla za 195 mm, torej v povprečju za 1,44 mm na leto; pospeševanje dviganja gladine za enako obdobje pa je $0,013 \pm 0,006$ mm na leto (Church in White 2006). Altimetrični podatki pa so merjeni glede na Zemljino masno težišče in vertikalni premiki tal nanje ne vplivajo, razen če gre za deformacije oceanskih bazenov zaradi GIA v velikem obsegu (Bindoff s sodelavci 2007; Church in White 2006). Po podatkih satelitov TOPEX/Poseidon in Jason-1, katerih meritve pokrivajo Zemljo med 66° severne geografske širine in 66° južne geografske širine, je v obdobju med 1993 in 2003 srednja višina morske gladine naraščala za $2,8 \pm 0,4$ mm na leto (Cazenave in Nerem 2004). Zaradi uporabe različnih metod in GIA modelov za različna časovna obdobja, je na voljo mnogo izračunov. Upoštevajoč te rezultate so Bindoff in sodelavci (2007) ocenili, da je bil dvig morske gladine v 20. stoletju $1,7 \pm 0,5$ mm na leto, med letoma 1961 in 2003 pa $1,8 \pm 0,5$ mm na leto. Spreminjanje višine morske gladine je tudi med posameznimi desetletji precejšnje, saj prej omenjeni podatek s satelitov občutno odstopa od stoletne vrednosti. Vzroki za to so med drugimi pojav južne oscilacije in izbruhi vulkanov (Church s sodelavci 2005; Bindoff s sodelavci 2007).

Po ocenah mednarodne skupine Združenih narodov za ugotavljanje podnebnih sprememb IPCC (ang. *Intergovernmental Panel in Climate Change*) bo dvigovanje višine morske gladine v 21. stoletju potekalo hitreje kot med letoma 1961 in 2003 kar za 4 mm na leto. Kot je veljalo v preteklosti, bo tudi v prihodnje gladina morja kolebala različno glede na geografski položaj obal (na primer oddaljenost od ledenih pokrovov) in ta odstopanja naj bi se gibala okrog $\pm 0,15$ mm na leto (Bindoff s sodelavci 2007). Na konferenci o podnebnih spremembah v Kopenhagnu leta 2009 so znanstveniki opozorili na najnovejše satelitske podatke, ki kažejo, da gladina morja od leta 1993 narašča kar za 3 mm (morda celo več) na leto, to pa bi ob že potrjenem pospešenem taljenju antarktičnega in grenlandskega ledu, nadaljnjem segrevanju in širjenju oceanov ter taljenju gorskih ledenikov, lahko prispevalo k dvigu gladine za več kot meter do leta 2100 (University of Copenhagen 2009).

7 Spreminjanje višine morske gladine v Jadranskem morju v zadnjih 20.000 letih

Zaradi majhne amplitude plimovanja ter prisotnosti nekaterih geoloških in arheoloških označevalcev so obale Sredozemlja zelo primerne za rekonstrukcijo nekdanjih višin morske gladine (Stocchi in Spada 2007). Med ZGV je Sredozemsko morje ostalo povezano z Atlantskim oceanom, zato lahko tudi pri rekonstrukciji gladine Jadranskega morja uporabimo evstatično krivuljo, dopolnjeno s podatki

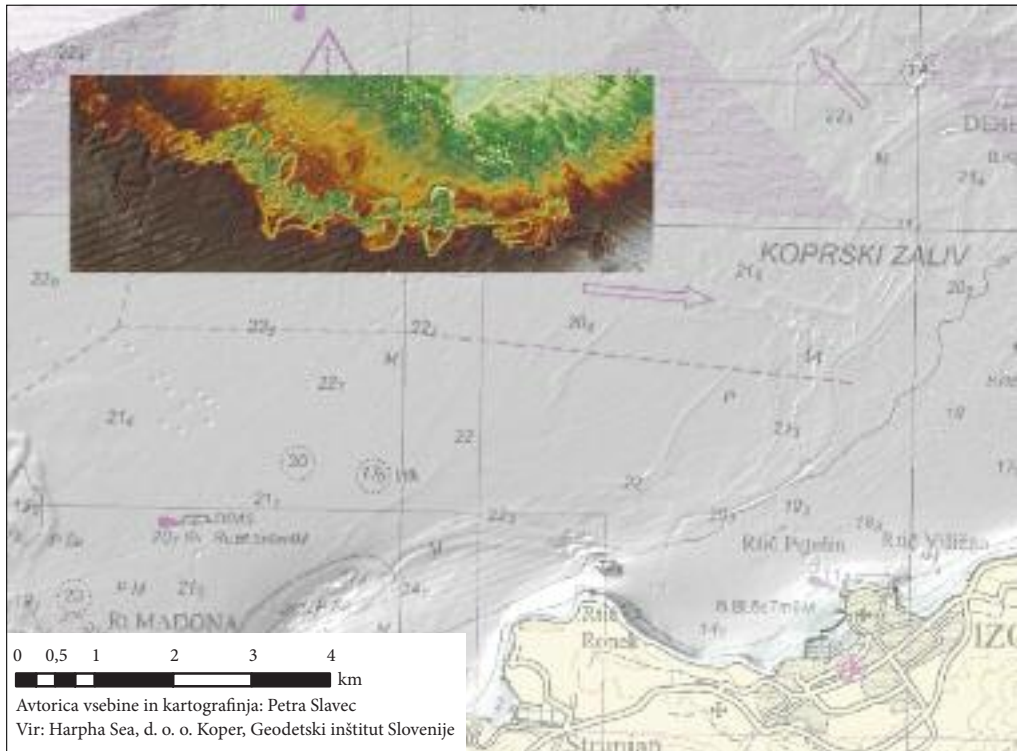
o izostaziji in krajevnem ugrezanju, sedimentaciji in kompakciji (Storms s sodelavci 2008). Pirazzoli (2005) sicer piše, da lahko za zadnjih 6000 radiokarbonskih let (zaradi odsotnosti ledenih plošč na severni polobli) v celotnem Sredozemlju vpliv evstatičnih sprememb zanemarimo. Znotraj jadranskega bazena sta pomembna elementa spreminjanja poznokvartarne višine morske gladine še kratkoročne spremembe v dotoku vode ter spremembe v stopnji povezanosti bazena s preostalim delom Sredozemskega morja (Trincardi s sodelavci 1996).

Med ZGV je bila pod vodo le sedmina današnjega jadranskega bazena. S Sredozemskim morjem je bil povezan prek plitvega pragu z manj kot 50 m globine, ki najverjetneje ni dovoljeval popolne izmenjave vodnih mas, ustje reke Pad pa je bilo severno od Srednjejadrske kotanje, severozahodno od polotoka Gargano. Vse večje progradacijske enote na zahodni jadranski obali so se napajale predvsem iz sedimentov porečja reke Pad in nekaj manjših porečij z Apeninov ter med procesi dvigovanja in padanja gladine morja oblikovale obali vzporedne kliniforme (Trincardi s sodelavci 1996; Ridente s sodelavci 2008). Storms in sodelavci (2008) so v študiji obalne dinamike ob hitrem dvigu morske gladine na severu jadranskega bazena odkrili tudi dva pregradna lagunska sistema, nastala pred 14.300 (današnja globina ~90 m) oziroma 10.500 leti (današnja globina 42 m). Stratigrafske raziskave (Trincardi s sodelavci 1996; Ridente s sodelavci 2008; Trincardi s sodelavci 2004; Storms s sodelavci 2008) kažejo, da se obstoj paleodelte reke Pad na ~120 m pod današnjo gladino morja dobro ujema s podatkom o evstatični višini morske gladine $\sim 121 \pm 5$ m med ZGV. Na podlagi prisotnosti foraminifer in vulkanskega pepela so Trincardi in sodelavci (1996) iz sekvenc vrtnin identificirali in datirali še nekatere posamezne dogodke (na primer nastop mlajšega driaša), ki se prav tako ujemajo z evstatično krivuljo. Surić (2009) z območja Jadranskega morja navaja še ugotovitve Šegote (1968), ki je glede na ostanke lehnjaka v paleostrugi dalmatinske Krke ocenil 14 m nižjo gladino morja od današnje pred 6900 leti.

Plimne zarez (ang. *tidal notches*), ki nastanejo na kamnitih obalah zaradi bioerozijske dejavnosti, veljajo kot ene najboljših indikatorjev krajevnih sprememb višine morske gladine (Pirazzoli 1986; po Benac s sodelavci 2004, 22). Najdemo jih na vzhodni jadranski obali med Zadrom in Trstom med 0 in 2,8 m nadmorske višine, kar naj bi razkrivalo kompleksnost tamkajšnjih tektonskih premikov (Furlani s sodelavci 2010b). Dobro ohranjena oblika zarez naj bi označevala relativno dolgo mirovanje višine morske gladine, do nenadne potopitve pa naj bi prišlo med tektonskim pogrezanjem v obdobju med 4. in 6. stoletjem našega štetja (Surić 2009; Benac s sodelavci 2004). Podobne plimne zarez najdemo tudi med Sesljanom in Devinom na globinah med 2,8 in 1 m (Furlani s sodelavci 2010). Za območje severnega Jadrana so Antonioli in sodelavci (2007) iz podatkov o globinah potopljenih arheoloških najdišč iz rimskih časov in plimnih zarez ugotovili, da so k dvigu relativne višine morske gladine v Jadranskem morju v zadnjih 2000 letih največ prispevali tektonski premiki – jadranske obale Hrvaške in Italije so se od rimskih časov na tem območju pogreznile za ~1,5–1,6 m s povprečno stopnjo 0,75 mm na leto.

8 Raziskovanje sprememb višine morske gladine v Koprskem zalivu

Z namenom rekonstrukcije paleookolja v Koprskem zalivu so Ogorelec in sodelavci (1997) raziskali več vrtnin v notranjosti Koprškega zaliva. Vrtini V-3 in V-1/95, izvrtani na območju Luke Koper blizu današnjega izliva reke Rižane, sta flišno podlago dosegli približno 40 oziroma 50 m globoko. Pri obeh sta bili identificirani dve sedimentacijski okolji – rečno (spodnjih 20 oziroma 24 m), sestavljeno iz nanosov Rižane z izmenjavajočimi se plastmi peska, proda in mulja, ter morsko (zgornjih 19 oziroma 25 m), sestavljeno iz temno sivega mulja enotne zrnatosti in mineralne sestave s številnimi foraminiferami, školjkami, mehkužci ter delci morskih ježkov. V vrtini V-1/95 sta bila na globini 29 in 31 m pod današnjim morskim dnom identificirana dva tanjša horizonta temnega glinastega mulja z visoko vsebnostjo organskih delcev (listja, delov stebel in korenin), ki najverjetneje predstavljata močvirnato okolje (šotišče) na nekdanjem ustju reke Rižane. Najstarejši holocenski sediment je bil najden v vrtini MK-6 pred obalo Žusterne, ki jo je dvigajoče se morje pred ~10.000–11.000 leti najprej doseglo, medtem ko

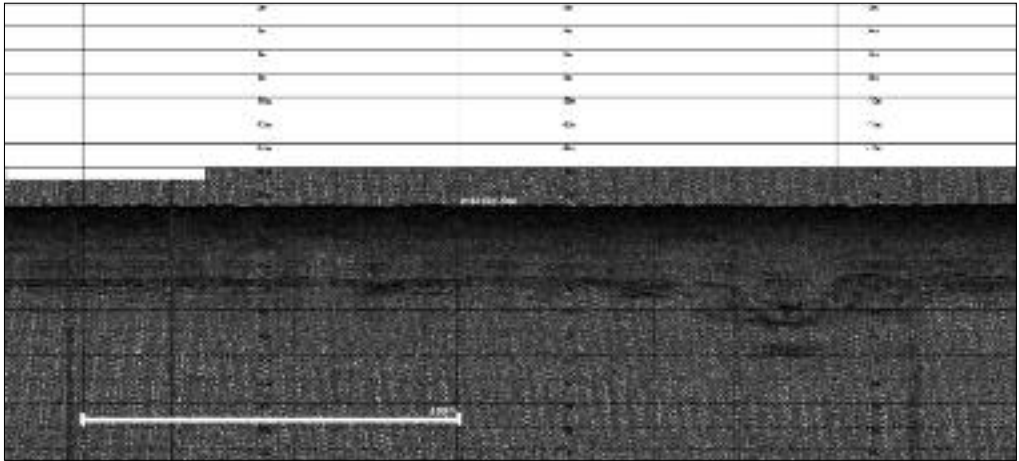


Slika 1: Prostorsko umeščen izsek rezultatov snemanja z večsnopnim sonarjem, na katerih je vidna paleostruga reke Rižane.

se je na območju ostalih dveh vrtin (nekoliko proti severozahodu) še vedno odlagal sediment Rižane. Dokončna prevlada morskih sedimentov nad brakičnimi se v vseh vrtinah nahaja 26 m pod današnjo morsko gladino. To naj bi se zgodilo 9180 ± 120 let pred sedanostjo (Ogorelec s sodelavci 1997; Ogorelec s sodelavci 1981).

V slovenskem morju že nekaj let potekajo snemanja z različnimi sonarskimi napravami. Rezultat snemanja z večsnopnim sonarjem je natančen digitalni batimetrični model morskega dna, katerega podrobnejša interpretacija še poteka. Na podlagi posnetkov se zlahka prepozna nekatere reliefne oblike, na primer sledi rečnih meandrov (slika 1) ali ostanke nekdanjega površinskega toka reke Rižane. Surić (2009, 184) piše o podobnih paleostrugah ob hrvaški obali, na primer sledovi nekdanjega toka reke Krke med otokom Zlarin in kopnim, Neretve po dnu Neretvanskega in Korčulskega preliva ali Cetine vzdolž Braškega preliva. Prerezi, pridobljeni s podpovršinskim ali geo-sonarjem, omogočajo tudi vpogled v plasti sedimentov in nekatere z njimi zasute reliefne oblike. Če prereze ustrezno prostorsko umestimo, lahko tudi na mestih, kjer struga na batimetričnem modelu ni sledljiva (zasuta s kvartarnimi sedimenti) opazimo nekatere anomalije (slika 2), ki bi lahko kazale na prisotnost paleostruge reke Rižane. Za potrditev tega bo treba še zgostiti količino podatkov (zdajšnji prerezi so bili merjeni po 500-metrski mreži) ter skušati povezati izliv Rižane s paleostrugo na batimetričnem modelu preko že obstoječih in morebitnih na novo odkritih anomalij.

Sonarske meritve so v tujini sicer zelo razširjene tudi za raziskovanje kvartarnega površja (na primer Demirbağ s sodelavci 1999; Duncan s sodelavci 2000; Cattaneo s sodelavci 2004; McMullen s sodelavci 2008), sploh, če jih uspemo korelirati s podatki iz vrtin in jim s tem dodati še časovno dimenzijo.



Slika 2: Anomalija (desna stran slike) na prerezu iz Koprškega zaliva v smeri jugozahod–severovzhod.

V našem primeru so vrtine in prerezi podpovršinskega sonarja med seboj sicer nekoliko oddaljeni, vendar je na globini med 24 in 28 m pod današnjim dnom jasno zaznati ločnico med sicer precej homogenima plastema (slika 2), za katera predvidevamo, da bi lahko označevala katerega od dlje trajajočih stadijev višine morske gladine. To bi veljalo ob predpostavki, da se debelina sedimentov proti notranjosti zaliva zmanjšuje, lahko pa bi šlo tudi za prej omenjeno mejo med morskimi in brakičnimi sedimenti. Obe dve hipotezi bo mogoče potrditi ob večji zgotovitvi podatkov.

9 Sklep

Kolebanje gladine morja je ena glavnih značilnosti obdobja kvartarja. Danes lahko s pomočjo izotopskih študij zelo natančno rekonstruiramo evstatično krivuljo, ki se je v postglacialnem obdobju od ~7000 let do sedanosti umirila. Na ravni tisočletij ali manj so kot glavni vzroki za spreminjanje višin morske gladine v ospredju tektonski premiki in globalno segrevanje ozračja s svojimi posledicami. Z identificiranjem nekdanjih višin gladine morske vode s pomočjo različnih metod je mogoče rekonstruirati nekatera paleookolja in prispevati k poznavanju lokalne podvodne geomorfologije in sedimentacije.

Zahvala

Izvedbo meritev delno financira Evropska unija, in sicer iz Evropskega socialnega sklada.

10 Viri in literatura

- Antonoli, F., Anzidei, M., Lambeck, K., Auriemma, R., Gaddi, D., Furlani, S., Orru, P., Solinas, E., Gaspari, A., Karinja, S., Kovačić, V., Surace, L. 2007: Sea-level change during the Holocene in Sardinia and in the northeastern Adriatic (central Mediterranean Sea) from archaeological and geomorphological data. *Quaternary Science Reviews* 26. Oxford. DOI: 10.1016/j.quascirev.2007.06.022
- Bavec, M. 2002: Podnebne spremembe v kvartarju. *Ujma* 16. Ljubljana.
- Bavec, M. 2007: Po kvartarju ... kvartar. *Geologija* 50-2. Ljubljana. DOI: 10.5474/geologija.2007.024

- Benac, C., Juračić, M., Bakran-Petricioli, T. 2004: Submerged tidal notches in the Rijeka Bay, NE Adriatic Sea: indicators of relative sea-level change and of recent tectonic movements. *Marine Geology* 212. Amsterdam. DOI: 10.1016/j.margeo.2004.09.002
- Benac, C., Juračić, M., Blašković, I. 2008: Tidal notches in Vinodol Channel and Bakar Bay, NE Adriatic Sea: indicators and recent tectonics. *Marine Geology* 248. Amsterdam. DOI: 10.1016/j.margeo.2007.10.010
- Bindoff, N. L., Willebrand, J., Artale, V., Cazenave, A., Gregory, J., Gulev, S., Hanawa, K., Le Quéré, C., Levitus, S., Nojiri, Y., Shum, C. K., Talley, L. D., Unnikrishnan, A. 2007: Observations: oceanic climate change and sea level. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. Cambridge.
- Bond, G., Broecker, W., Johnsen, S., McManus, J., Labeyrie, L., Jouzel, J., Bonani, G. 1993: Correlations between climate records from North Atlantic sediments and Greenland ice. *Letters to Nature* 365. London. DOI: 10.1038/365143a0
- Bond, G., Heinrich, H., Broecker, W., Labeyrie, L., McManus, J., Andrews, J., Huon, S., Jantscik, R., Clasen, S., Simet, C., Tedesco, K., Klas, M., Bonani, G., Ivy, S. 1992: Evidence for massive discharges of icebergs into the North Atlantic ocean during the last glacial period. *Nature* 360. DOI: 10.1038/360245a0
- Bond, G., Lotti, R. 1995: Iceberg discharges into the North Atlantic on millennial time scales during the last glaciation. *Science* 267. New York. DOI: 10.1126/science.267.5200.1005
- Broecker, W. 2010: *The Great Ocean Conveyor: Discovering the Trigger for Abrupt Climate Change*. Princeton.
- Broecker, W., Denton, G. 1989: The role of ocean-atmosphere reorganizations in glacial cycles. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 53. New York. DOI: 10.1016/0016-7037(89)90123-3
- Carbognin, L., Tosi, L. 2002: Interaction between climate changes, eustasy and land subsidence in the North Adriatic region, Italy. *Marine Ecology* 23. Berlin. DOI: 10.1111/j.1439-0485.2002.tb00006.x
- Cattaneo, A., Correggiari, A., Marsset, T., Thomas, Y., Marsset, B., Trincardi, F. 2004: Seafloor undulation pattern on the Adriatic shelf and comparison to deep-water sediment waves. *Marine Geology* 213. Amsterdam. DOI: 10.1016/j.margeo.2004.10.004
- Cazenave, A., Nerem, R., S. 2004: Present-day sea level change: observations and causes. *Reviews of Geophysics* 42. Washington. DOI: 10.1029/2003RG000139
- Church, J. A., White, N. J. 2006: A 20th century acceleration in global sea-level rise. *Geophysical Research Letters* 33. Washington. DOI: 10.1029/2005GL024826
- Church, J. A., White, N., J., Arblaster, J. M. 2005: Significant decadal-scale impact of volcanic eruptions on sea level and ocean heat content. *Nature* 438. London. DOI: 10.1038/nature04237
- Clark, P. U., Mix, A. C. 2002: Ice sheets and sea level of the Last Glacial Maximum. *Quaternary Science Reviews* 21. Oxford. DOI: 10.1016/S0277-3791(01)00118-4
- Cohen, K. M., Gibbard, P. 2010: Global chronostratigraphical correlation table for the last 2.7 million years, v. 2010. Medmrežje: [http://www.quaternary.stratigraphy.org.uk/charts/chartversions/POSTERSTRAT_v2010\(2\).jpg](http://www.quaternary.stratigraphy.org.uk/charts/chartversions/POSTERSTRAT_v2010(2).jpg) (10. 11. 2010).
- Dansgaard, W., Johnsen, S. J., Clausen, H. B., Dahl-Jensen, D., Gundestrup, N. S., Hammer, C. U., Hvidberg, C. S., Steffensen, J. P., Sveinbjörnsdottir, A. E., Jouzel, J., Bond, G. 1993: Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. *Letters to Nature* 364. London. DOI: 10.1038/364218a0
- Demirbağ, E., Goökaşan, E., Oktay, F. Y., Simsek, M., Yüce, H. 1999: The last sea level changes in the Black Sea: evidence from the seismic data. *Marine Geology* 157. Amsterdam. DOI: 10.1016/S0025-3227(98)00158-3
- Duncan, C. S., Goff, J. A., Austin Jr., J. A., Fulthorpe, C. S. 2000: Tracking the last sea-level cycle: seafloor morphology and shallow stratigraphy of the latest Quaternary New Jersey middle continental shelf. *Marine Geology* 170. Amsterdam.

- Dyke, A. S. 2009: Laurentide ice sheet. *Encyclopedia of Paleoclimatology and Ancient Environments*. Dordrecht. DOI: 10.1007/978-1-4020-4411-3
- Emiliani, C. 1955: Pleistocene temperatures. *Journal of Geology* 63. Chicago. DOI: 10.1086/626295
- EPICA community members, 2004: Eight glacial cycles from an Antarctic ice core. *Nature* 429. London.
- Fairbanks, R. G. 1989: A 17.000-year glacio-eustatic sea level record: influence of glacial melting rates on the Younger Dryas event and deep-ocean circulation. *Nature* 342. London.
- Ferranti, L., Antonioli, F., Mauz, B., Amorosi, A., Dai Pra, G., Mastronuzzi, G., Monaco, C., Orru, P., Pappalardo, M., Radtke, U., Renda, P., Romano, P., Sanoso, P., Verrubbi, V. 2006: Markers of the last interglacial sea-level high stand along the coast of Italy: Tectonic implications. *Quaternary International* 145-146. Oxford. DOI: 10.1016/j.quaint.2005.07.009
- Fleming, K., Johnston, P., Zwartz, D., Yokoyama, Y., Lambeck, K., Chappell, J. 1998: Refining the eustatic sea-level curve since the Last Glacial Maximum using far- and intermediate-field sites. *Earth and Planetary Science Letters* 163. Amsterdam. DOI: 10.1016/S0012-821X(98)00198-8
- Furlani, S., Biolchi, S., Cucchi, F., Antonioli, F., Buseti, M., Melis, R. 2010a: Tectonic effects on Late Holocene sea level changes in the Gulf of Trieste (NE Adriatic Sea Italy). *Quaternary International* 232. Oxford. DOI: 10.1016/j.quaint.2010.06.012
- Furlani, S., Cucchi, F., Biolchi, S., Odorico, R. 2010b: Notches in the Northern Adriatic Sea: Genesis and development. *Quaternary International* 232. Oxford. DOI: 10.1016/j.quaint.2010.06.010
- Geodetski inštitut Slovenije, 2005: Tržaški zaliv 1 : 100.000. Ljubljana.
- Hallam, A. 1984: Pre-Quaternary sea-level changes. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 12. Palo Alto. DOI: 10.1146/annurev.earth.12.1.205
- Hays, J. D., Imbrie, J., Shackleton, N. J. 1976: Variations in the Earth's Orbit: Pacemaker of the Ice Ages. *Science* 194. New York.
- Hearty, P. J., Hollin, J. T., Neumann, A. C., O'Leary, M. J., McCulloch, M. 2007: Global sea-level fluctuations during the Last Interglaciation (MIS 5e). *Quaternary Science Reviews* 26. Oxford. DOI: 10.1016/j.quascirev.2007.06.019
- Lambeck, K., Antonioli, F., Purcell, A., Silenzi, S. 2004: Sea-level change along the Italian coast for the past 10,000 yr. *Quaternary Science Reviews* 23. Oxford. DOI: 10.1016/j.quascirev.2004.02.009
- Lea, D. W., Martin, P. A., Pak, P. A., Spero, H. J. 2002: Reconstructing a 350 ky history of sea level using planktonic Mg/Ca and oxygen isotope records from a Cocos Ridge core. *Quaternary Science Reviews* 21. Oxford, New York.
- Lowe, J. J., Walker, M. J. C. 1997: *Reconstructing Quaternary Environments*. Harlow.
- Lüthi, D., Le Floch, M., Bereiter, B., Blunier, T., Barnola, J.-M., Siegenthaler, U., Raynaud, D., Jouzel, J., Fischer, H., Kawamura, K., Stocker, T. F. 2008: High resolution carbon dioxide concentration record 650,000-800,000 years before present. *Nature* 453. London. DOI: 10.1038/nature06949
- Matthews, R. K. 1990: *Quaternary sea-level change. Studies in Geophysics: Sea-Level Change*. Washington
- McGranahan, G., Balk, D., Anderson, B. 2007: The rising tide: assessing the risks of climate change and human settlements in low elevation coastal zones. *Environment and Urbanization* 19. London. DOI: 10.1177/0956247807076960
- McMullen, K. Y., Poppe, L. J., Twomey, E. R., Danforth, W. W., Haupt, T. A., Crocker, J. M. 2008: *Sidescan Sonar Imagery, Multibeam Bathymetry, and Surficial Geologic Interpretations of the Sea Floor in Rhode Island Sound, off Sakonnet Point, Rhode Island*. U. S. Geological Survey Open-File Report. Reston.
- Ogorelec, B., Mišič, M., Šercelj, A., Cimermen, F., Faganeli, J., Stegnar, P. 1981: Sediment sečoveljske soline. *Geologija* 24-2. Ljubljana.
- Ogorelec, B., Faganeli, J., Mišič, M., Čermelj, B. 1997: Reconstruction of palaeoenvironment in the bay of Koper (Gulf of Trieste, Northern Adriatic). *Annales* 11. Koper.
- Peltier, W. R. 1999: Global sea level rise and glacial isostatic adjustment. *Global and Planetary Change* 20. Amsterdam. DOI: 10.1016/S0921-8181(98)00066-6

- Peltier, W. R., Fairbanks, R. G. 2006: Global glacial ice volume and Last Glacial Maximum duration from an extended Barbados sea level record. *Quaternary Science Reviews* 25. Oxford. DOI: 10.1016/j.quascirev.2006.04.010
- Peltier, W. R. 2004: Global glacial isostasy and the surface of the ice-age Earth: The ICE-5G (VM2) model and GRACE. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 32. Palo Alto. DOI: 10.1146/annurev.earth.32.082503.144359
- Pirazzoli, P. A. 2005: A review of possible eustatic, isostatic and tectonic contributions in eight late-Holocene relative sea-level histories from the Mediterranean area. *Quaternary Science Reviews* 24. Oxford. DOI: 10.1016/j.quascirev.2004.06.026
- Podatki sonarskih snemanj na območju slovenskega morja, 2006–2010. Harpha Sea, d. o. o. Koper.
- Rahmstorf, S. 2005: Abrupt Climate Change. Weather catastrophes and climate change. München.
- Rahmstorf, S. 2006: Thermohaline ocean circulation. *Encyclopedia of Quaternary Sciences*. Amsterdam.
- Ridente, D., Trincardi, F., Piva, A., Asioli, A., Cattaneo, A. 2008: Sedimentary response to climate and sea level changes during the past ~400 ka from borehole PRAD1-2 (Adriatic margin). *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 9. Washington. DOI: 10.1029/2007GC001783
- Riva, R. E. M., Bamber, J. L., Lavalée, D. A., Wouters, B. 2010: Sea-level fingerprint of continental water and ice mass change from GRACE. *Geophysical Research Letters* 37. Washington. DOI: 10.1029/2010GL044770
- Roe, G. 2006: In defense of Milankovitch. *Geophysical Research Letters* 33. Washington. DOI: 10.1029/2006GL027817
- Sarnthein, M., Bartoli, G., Prange, M., Schmittner, A., Schneider, B., Weinelt, M., Andersen, N., Garbe-Schönberg, D. 2009: Mid-Pliocene shifts in ocean overturning circulation and onset of Quaternary-style climates. *Climate of the Past* 5. Katlenburg-Lindau. DOI: 10.5194/cp-5-269-2009
- Shackleton, N. J. 2000: The 100.000-year ice-age cycle identified and found to lag temperature, carbon dioxide, and orbital eccentricity. *Science* 289. New York. DOI: 10.1126/science.289.5486.1897
- Stocchi, P. 2007: Glacial isostasy and sea level change in the Mediterranean: near and far-field effects on a millennium to century time-scale. Doktorsko delo, Univerza v Bologni. Medmrežje: http://amsdottorato.cib.unibo.it/361/1/Tesi_Paolo_Stocchi.pdf (10. 11. 2010).
- Stocchi, P., Spada, G. 2007: Glacio and hydro-isostasy in the Mediterranean Sea: Clark's zones and role of remote ice sheets. *Annals of Geophysics* 50. Bologna.
- Storms, J. E. A., Weltje, G. J., Terra, G. J., Cattaneo, A., Trincardi, F. 2008: Coastal dynamics under conditions of rapid sea-level rise: Late Pleistocene to Early Holocene evolution of barrier-lagoon systems on the northern Adriatic shelf (Italy). *Quaternary Science Reviews* 27. Oxford. DOI: 10.1016/j.quascirev.2008.02.009
- Surić, M. 2009: Reconstructing sea-level changes on the eastern Adriatic sea (Croatia) – an overview. *Geoadria* 14. Zadar.
- Surić, M., Richards, D. A., Hoffmann, D., Tibljaš, D., Juračić, M. 2009: Sea-level change during MIS 5a based on submerged speleothems from eastern Adriatic Sea (Croatia). *Marine Geology* 262. Amsterdam.
- Trincardi, F., Cattaneo, A., Asioli, A., Correggiari, A., Langone, L. 1996: Stratigraphy of the late-Quaternary deposits in the central Adriatic basin and the record of short-term climatic events. *Palaeoenvironmental Analysis of Italian Crater Lake and Adriatic Sediments (PALICLAS)*. *Memorie dell'Istituto Italiano di Idrobiologia* 55. Verbania.
- Trincardi, F., Cattaneo, A., Correggiari, A., Ridente, D. 2004: Evidence of soft sediment deformation, fluid escape, sediment failure and regional weak layers within the late Quaternary mud deposits of the Adriatic Sea. *Marine Geology* 213. Amsterdam. DOI: 10.1016/j.margeo.2004.10.003
- University of Copenhagen, 2009: Rising sea levels set to have major impacts around the world. Medmrežje: http://climatecongress.ku.dk/newsroom/rising_sealevels/ (15. 11. 2010).
- Williams, M., Dunkerley, D., de Deckker, P., Kershaw, P., Chappell, J. 2003: *Quaternary Environments*. London.

11 Summary: Quaternary sea-level changes

(translated by Ana Tominc)

Sea-level changes are one of the main characteristics of the Quaternary period but the entanglement of causes and consequences makes them difficult to explain. Moreover, their spatial and temporal extensions add to the complexity of the studies. Relative sea-level is affected by vertical movements of sea-bottom, sea-surface or both, while local geomorphology adds its share. The key factor of Quaternary sea-level changes was glacio-eustasy with the exclusive exchange of mass between the cryosphere and hydrosphere. The main cause of climate change, which triggered succession of glacials and interglacials, was orbital geometry. Research into climate change in Earth's history is based on analysis of oxygen and radioactive carbon isotopes in the sequences of deep buried ocean sediments and of ice in both hemispheres. During the last glacial maximum, the eustatic curve was $\sim 121 \pm 5$ m below the current sea-level. Nowadays, however, and in relation to a length of a human life, the causes of sea-level changes are mostly tectonic or consequences of global warming.