

REKONSTRUIRANJE PROMJENA MORSKE RAZINE NA ISTOČNOJ OBALI JADRANA (HRVATSKA) – PREGLED

RECONSTRUCTING SEA-LEVEL CHANGES ON THE EASTERN ADRIATIC SEA (CROATIA) – AN OVERVIEW

MAŠA SURIĆ

Odjel za geografiju, Sveučilište u Zadru / *Department of Geography, University of Zadar*

UDK 551.46(497.58)(210.5)(262.3)

Primljeno / *Received*: 2009-06-30

Pregledni članak

Review

Stjenovita okršena obala, male amplitude morskih mijena, razvedena obala s brojnim otocima, različite priobalne biocenoze, mnoštvo paleontoloških, arheoloških i historijskih ostataka, dovoljan broj mareografskih postaja te razvoj GPS mreže – sve to nudi optimalne preduvjete za istraživanja promjena morske razine na hrvatskoj obali. Različitim metodološkim pristupima (geomorfološkim, biostratigrafskim, arheološkim, historijskim, mareografskim, geodetskim, radiometrijskim), većina ovih pogodnosti bila je korištena s ciljem rekonstruiranja relativnih pomaka morske razine i kopna. Međutim, proizašli rezultati bili su točkasti i nerijetko pogrešni, i takvi su često bili nekritički korišteni kao temelj novih istraživanja. Multidisciplinarnim pristupom tek su posljednjih godina djelomično rekonstruirane promjene relativne morske razine, a brojne pogodnosti istočne obale Jadrana nesumnjivo će omogućiti razmjerno brz napredak istraživanja.

Ključne riječi: promjena morske razine, Jadransko more, Hrvatska

Rocky karstified coast, low tidal range, indented shoreline with numerous islands, diverse coastal biocenoses, abundant palaeontological, archaeological and historical evidence, relatively dense tide-gauge stations and developing GPS network – all these facts offer optimal prerequisite for the sea-level changes studies on the Croatian coast. Through various methodological approaches (geomorphological, biostratigraphical, archaeological/historical, mareographic, geodetic, radiometric), most of these issues have been used in order to reconstruct relative sea and land motions, yielding scattered and sometimes erroneous results. Unfortunately, some of them have been often uncritically used as the basis for the subsequent research. Only recently, with multidisciplinary approach, sequences of relative sea-level variations have been successfully revealed, but opportunities that eastern Adriatic coast offers will, undoubtedly, ensure relatively rapid research progress.

Key words: sea-level change, Adriatic Sea, Croatia

Uvod

Problematika promjene morske razine stoljećima je privlačila interes znanstvenika – od antičkih prirodoslovaca kao što je bio grčki geograf Strabon (63? BC–AD 21?), preko srednjovjekovnih učenjaka poput Dantea Alighierija (1265.-1321.) do Charlesa Darwina (1809.-1882.), Edouarda Suessa (1831.-1914.) i mnogih drugih (PIRAZZOLI, 2000.). U posljednje vrijeme, ne samo zbog znanstvene znatiželje, već i zbog gospodarskih i strateških ciljeva potrebno je na svim obalama svijeta rekonstruirati promjene morske razine, posebno fluktuacije tijekom mlađega kvartara, kako bi se predvidjele promjene koje će uslijediti.

Introduction

Problems regarding sea-level changes have occupied scientists for centuries – from the ancient naturalists such as Greek geographer Strabo (63? BC–AD 21?), over Middle Ages scholars like Dante Alighieri (1265-1321) to Charles Darwin (1809-1882), Edouard Suess (1831-1914) and many others (PIRAZZOLI, 2000). Recently, not only the scientific curiosity but also economic and strategic objectives, demand reconstruction of sea-level changes on every particular coast around the globe, especially the fluctuations during the Late Quaternary period, with the main goal of predicting changes to come.

Globalna (eustatska) morska razina je mjera udaljenosti između površine mora i fiksne točke za koju se obično uzima središte Zemlje (COE, CHURCH, 2005.). Eustatske promjene morske razine s amplitudama od nekoliko stotina metara, koje se javljaju u rasponu vremena od milijunâ godina, uglavnom su uvjetovane tektonikom ploča, dok su kvartarna kolebanja prvenstveno uzrokovana periodičkom izmjenom masa između ledenih pokrova i oceana tj. cikličkim rastom i smanjivanjem ledenih pokrova (LAMBECK, CHAPPELL, 2001.). Globalne promjene morske razine, koje obuhvaćaju cijelu Zemlju, mogu se rekonstruirati samo na tektonski relativno stabilnim područjima (Bermuda, Bahami i sl.). U ostalim, tektonski aktivnim područjima, gdje se obalna crta mijenja ili pomacima kopna ili razine mora, te se promjene nazivaju relativnim promjenama morske razine – promjenama položaja razine mora u odnosu na kopno (LOWE, WALKER, 1998.). Relativna promjena morske razine je zbroj eustatskih, tektonskih i glacio-hidro-izostatskih utjecaja za svako određeno mjesto (ANTONIOLI I DR., 2007.). Hrvatska se obala smatra tektonski aktivnim područjem (PRELOGOVIĆ I DR., 2003.), te je moguće rekonstruirati jedino krivulju relativne promjene morske razine, a usporedbom s globalnom krivuljom morske razine mogu se razlučiti lokalni ili regionalni tektonski pomaci.

S obzirom na to da su dokazi starijih razina mora uglavnom uništeni naknadnim fluktuacijama i različitim geološkim procesima, najčešće se istražuju promjene koje su se odvijale tijekom nekoliko posljednjih stotina tisuća godina, a među njima su najbolje sačuvani dokazi o promjenama od posljednjega glacijalnog maksimuma (Last Glacial Maximum – LGM) do danas. Konvencionalni i najčešće korišteni podatak o LGM veže se za 21 ka BP (tisuće godina prije sadašnjosti) s razinom mora 121 ± 5 m nižom od današnje (FAIRBANKS, 1989.). Međutim, ako se LGM definira kao razdoblje trajanja najvećeg volumena ledenih pokrova, tad ono obuhvaća period duži od 10 tisuća godina. Naime, morska se razina naglo spustila prije oko 30 ka, a globalno otapanje ledenih pokrova počelo je prije oko 19 ka (LAMBECK, CHAPPELL, 2001.; LAMBECK I DR., 2002.). Najniža morska razina je vjerojatno bila prije 26 ka, i to oko 135 m niža od današnje (PELTIER, FAIRBANKS, 2006.). Brzo i neujednačena intenziteta, otapanje je trajalo do prije 7 ka, kad su oceani dosegli današnji volumen (LAMBECK, CHAPPELL, 2001.). Procijenjena brzina porasta morske razine u zadnjih tisuću godina, ali prije 20. stoljeća, iznosi manje od 0,2 mm/god,

Global (eustatic) sea-level is a measure of the distance between the sea-surface and a fixed datum, usually taken as the centre of the Earth (COE, CHURCH, 2005). Eustatic sea-level changes with amplitudes of several hundred meters which occur on time scale of millions of years are generally induced by plate tectonics while the Quaternary sea-level changes were primarily induced by periodic exchange of mass between ice sheet and oceans i.e. of the cyclic growth and decay of ice sheets (LAMBECK, CHAPPELL, 2001). Global sea-level changes are worldwide changes that could be reconstructed only in relatively tectonically stable areas (Bermuda, Bahamas etc.). Elsewhere, in tectonically dynamic regions, where changes of the shoreline take place either through land or through sea-level movements, they are referred to as relative sea-level changes – change in the position of the sea relative to the land (LOWE, WALKER, 1998). The relative sea-level change is the sum of eustatic, tectonic and glacio-hydro-isostatic factors for each particular location (ANTONIOLI ET AL., 2007). Croatian coast is considered as tectonically active region (PRELOGOVIĆ ET AL., 2003), thus only the relative sea-level curve can be constructed, and with respect to the global sea-level curve, local or regional tectonics could be revealed.

Given that the evidences of the older sea levels are mostly destroyed by subsequent sea-level fluctuations and different geological processes, the changes in the last few hundred thousand years are the most studied, and among them, the best recorded are those from the Last Glacial Maximum (LGM) to the present. Conventional and the most used timing of LGM is 21 ka before present (BP) with the sea level 121 ± 5 m below present one (FAIRBANKS, 1989). But, if the LGM is defined as the period of the maximum global ice volumes, it encompasses more than 10 ka. Sea level fell rapidly toward the LGM lowstand about 30 ka BP, and the onset of the global melting was about 19 ka ago (LAMBECK, CHAPPELL, 2001; LAMBECK et al, 2002). The lowest sea stand appears to be at 26 ka BP and it could have been as low as -135 m relative to the present (PELTIER, FAIRBANKS, 2006). Rapid and of irregular rate, melting lasted until 7 ka BP, when the oceans approached their present day volumes (LAMBECK, CHAPPELL, 2001). Estimated rate of global (eustatic) sea-level rise for the last thousand years prior to 20th c. is less than 0.2 mm/a, while the instrumentally recorded (1950-

dok je instrumentalno zabilježen (1950.-2000.) suvremeni porast globalne morske razine $\sim 1.8 \pm 0.3$ mm/god (CHURCH I DR., 2004.).

Prethodna istraživanja s različitim metodološkim pristupima

Istraživanja morske razine na hrvatskoj obali provodila su se različitim metodama, koristeći pritom neposredne i posredne pokazatelje razine mora – geomorfološke i biološke indikatore, arheološke i historiografske dokaze, te podatke o pomacima kopna i mora dobivene mareografskim i geodetskim mjerenjima. Svaka od tih metoda ima svojih prednosti, no i nedostataka. Biostratigrafska i geomorfološka metoda koriste se vrlo dobrim pokazateljima, međutim daju tek relativne starosti pojedinih događaja. S druge strane, vrlo dobro datirani arheološki i historiografski, a posebno mareografski i geodetski podaci, pokrivaju razmjerno kratak period. Tek kombinacijom tih metoda, zajedno s radiometrijskim datiranjem, moguće je doći do prihvatljivih rezultata.

Geomorfološki pristup

Tipični obalni oblici kao što su marinske terase, klifovi, plimske i valne potkapine, plaže, morske spilje itd., danas izdignuti ili potopljeni, omogućuju određivanje prijašnje morske razine. Među geomorfološkim indikatorima morske razine na hrvatskoj obali najviše su proćavane plimske potkapine (Sl. 1.), posebno na sjeveroistočnom Jadranu (BENAC, ŠEGOTA, 1990; BENAC, 1996a, 1996b; BENAC, JURAČIĆ, 1998; FAIVRE, FOUACHE, 2003; FOUACHE ET AL., 2000; 2004; BENAC I DR., 2004; 2008; ANTONIOLI I DR., 2007.). Njihov trenutni položaj u većini je slučajeva oko 0,5 m ispod današnje razine mora što upućuje na njihovo istovremeno formiranje i to vjerojatno tijekom rimskog razdoblja (FAIVRE, FOUACHE, 2003; FOUACHE ET AL., 2000; 2004.). Ipak, različita dubina, od 0,4 do 1,15 m ispod današnje morske razine upućuje na kompleksnost tektonskog sklopa tog područja. Nadalje, njihova dobra očuvanost upućuje na razmjerno dugo razdoblje stagnacije morske razine nakon koje je vjerojatno uslijedilo naglo potapanje koje Benac i dr. (2008.) pripisuju tektonskom (koseizmičkom) spuštanjem kopna u periodu 4.-6. st.

Oblici slični plimskim potkapinama su valne potkapine i morske spilje oblikovane marinskom erozijom u području djelovanja

2000) contemporary trend of global sea-level rise is $\sim 1.8 \pm 0.3$ mm/a (CHURCH ET AL., 2004).

Previous investigations using different methodological approaches

Studies concerning sea-level changes along the Croatian coast included several methods using both direct and indirect indicators of the sea level – geomorphic and biological indicators, archaeological and historical evidences, and data of sea and land motions obtained by mareographic and geodetic measurements. Each of these methods showed good potential but also suffered from particular disadvantages. While biostratigraphical and geomorphological methods offer good evidences, they yield only relative ages of particular events. On the other hand, datable archaeological/historical and specially mareographic and geodetic records cover quite recent period. Only by combining these methods, along with radiometric dating, acceptable results can be obtained.

Geomorphological approach

Typical coastal landforms such as marine terraces, cliffs, tidal and abrasion notches, beaches, sea caves etc. currently uplifted or submerged, enable determination of former coastline. Among geomorphological indicators of the sea level along the Croatian coast, tidal notches (Fig. 1) were the most observed, particularly in NE Adriatic region (BENAC, ŠEGOTA, 1990; BENAC, 1996a, 1996b; BENAC, JURAČIĆ, 1998; FAIVRE, FOUACHE, 2003; FOUACHE ET AL., 2000, 2004; BENAC ET AL., 2004; 2008; ANTONIOLI ET AL., 2007). Their present position is mostly approximately 0.5 m below mean sea level (b.m.s.l.) suggesting their coeval formation, probably during the Roman times (FAIVRE, FOUACHE, 2003; FOUACHE ET AL., 2000, 2004). Yet, different elevation, from 0.4 to 1.15 m b.m.s.l., also revealed complexity of tectonic movements in this region. In addition, their well preserved forms suggest relatively long period of relative sea-level stagnation and presumed subsequent rapid submersion ascribed by Benac et al. (2008) to tectonic (coseismic) subsidence during the period 4th-6th c.

Similar features to the tidal notches are the abrasion notches and sea caves both formed by marine erosion in the range of wave action, but none of these forms have been studied in the light of the sea-level changes on the Croatian coast.



Slika 1. Potopljena plimska potkapina na otoku Krku (Č. Benac)
Figure 1 Submerged tidal notches on Krk Island (photo by Č. Benac)

valova, no na hrvatskoj se obali nisu proučavali s ciljem rekonstrukcije promjena morske razine. Za abrazijsku terasu smještenu na dubini 50-60 m ispred riječke luke smatra se da je nastala tijekom posljednjeg interglacijala (Riss – Würm) kad je razina mora bila nekoliko metara viša od današnje. Njezin današnji položaj interpretiran je kao posljedica spuštanja kopna brzinom od 0,6 mm/god (BENAC, ŠEGOTA, 1990.).

Osim indikatora koji su izravno vezani za razinu mora, postoji još niz geomorfoloških oblika koji prema svom nastanku mogu biti isključivo terestričkog podrijetla, te njihov trenutni položaj ispod morske razine upućuje na nižu relativnu morsku razinu tijekom njihova formiranja. Takve su npr. spilje koje nastaju otapanjem karbonatnih stijena podzemnom vodom (PALMER, 2007.). Sige pronađene u takvim, sada potopljenim, spiljama, dodatno upućuju na nekadašnje subaerske uvjete (Sl. 2.). Na hrvatskoj su obali i otocima do kraja 2006. registrirana 234 potopljena speleološka objekta od kojih je više od 140 sadržavalo sige (SURIĆ, 2006.). Trenutno, najdublji nalaz sige nalazi se na dubini od 71 m (GARAŠIĆ, 2006.), no prema najnižoj morskoj razini dosegnutoj tijekom LGM slični se nalazi mogu očekivati do dubine od ~130 m. Zahvaljujući sigama kao akumulacijskim oblicima koji se mogu precizno apsolutno datirati, bilo je moguće prilično točno odrediti određene promjene morske razine (vidi tekst u nastavku).

Nepobitni dokazi o nekadašnjoj nižoj morskoj razini, koje je batimetrijski moguće pratiti do dubine od ~100 m, jesu paleokorita i kanjoni rijeka: Krke između Zlarina i kopna (JURAČIĆ, PROHIĆ, 1991; JURAČIĆ, 1992.), Rječine (BENAC,

Abrasion terrace located at 50-60 m b.m.s.l. in front of Rijeka harbour was presumed to be of last interglacial age (Riss – Würm) when the sea-level was few meters higher than today. Its present position is interpreted as the consequence of land subsiding with the rate of 0.6 mm/a (BENAC, ŠEGOTA, 1990.).

Beside the indicators that are directly connected to the level of the sea surface, there are many different geomorphic features which, by their origin, could only be continental, so their present positions below the sea level suggest lower relative sea stands during their formation. One of such are solution caves which are formed by the dissolving action of groundwater (PALMER, 2007). Speleothems found in such submerged caves additionally prove former subaerial environment (Fig. 2). By the end of 2006, on the Croatian coast and islands, there were 234 submerged caves registered, with more than 140 of them containing speleothems (SURIĆ, 2006). Currently, the deepest speleothem is recorded at 71 m b.m.s.l. (GARAŠIĆ, 2006), but, according to the lowest sea stand during the LGM, they could be probably found down to ~130 m b.m.s.l. Thanks to the speleothem as datable depositional features, quite accurate timing of sea-level changes could have been obtained (see text below).

Indisputable evidence of former lower sea level which could be traced with the bathymetric techniques down to the depths of ~100 m are palaeoriver-beds and canyons of Krka River between Zlarin Island and mainland (JURAČIĆ, PROHIĆ, 1991; JURAČIĆ, 1992), of Rječina River (BENAC, ŠEGOTA, 1990), of Neretva River on the bottom of Neretva and Korčula Channels (ALFIREVIĆ, 1965),



Slika 2. Potopljena siga na dubini od 56 m na otoku Braču (M. Garašić)
Figure 2 Submerged speleothems at 56 m b.m.s.l. on Brač Island (photo by M. Garašić)

ŠEGOTA, 1990.), Neretve po dnu Neretvanskog i Korčulanskog kanala (ALFIREVIĆ, 1965.), Cetine duž Bračkog kanala (BAUČIĆ, 1967.) te Zrmanje, čije se paleokorito proteže Novigradskom morem, Masleničkim ždrilom, Velebitskim kanalom (FRITZ, 1972.), te vjerojatno dalje između Paga i Raba, južno od Cresa, Lošinja i Premude do sutoka s paleorijekom Po (BELIJ, 1985.). Ovdje je situacija slična kao i kod spilja – naime, erozijski oblici kao što su korita rijeka ne mogu se datirati, no, akumulacijske forme poput sedre, mogu. Iako je datiranje teretričkih nalaza sedre u Hrvatskoj učestalo (npr. HORVATINČIĆ I DR., 2003.), nalazi iz podmorja do sada još nisu bili analizirani. Na temelju položaja sedrenih barijera u morem potopljenom koritu Krke procijenjeno je da je razina mora prije 6900 godina bila 14 m niža od današnje (ŠEGOTA, 1968.). Nalaz sedre na otoku Lavsi u Kornatskom otočju naveden je na Osnovnoj geološkoj karti i procjenjuje se da bi mogao datirati iz donjeg kvartara (MAMUŽIĆ, NEDELA – DEVIDÉ, 1963.), no taj bi podatak trebalo temeljito preispitati jer bi postojanje sedre na tako malom i udaljenom otoku zahtijevalo ne samo značajnu promjenu morske razine, već i bitne tektonske pomake.

Biostratigrafska metoda

Nesumnjivo, najbolji biološki indikatori morske razine su endolitski i epilitski organizmi prilagođeni životu u intertidalnoj zoni, čije se ljuštore sačuvaju *in situ*. Takvi su organizmi npr. prstaci (*Lithophaga lithophaga*), koji znaju biti dobro očuvani, obično žive u prvih nekoliko metara ispod površine mora i nakon preplavlivanja se prvi naseljavaju

of Cetina River along Brač Channel (BAUČIĆ, 1967) and palaeobed of Zrmanja River in Novigrad Sea, Masleničko Ždrilo Strait, Velebit Channel (FRITZ, 1972) and probably further between Pag and Rab Islands, southern from the Cres, Lošinj and Premuda Islands till the confluence with the palaeoPo River (BELIJ, 1985). Here we encounter similar situation as with solution caves – erosional feature i.e. riverbed formation cannot be dated, but the depositional form, which is tufa in this case, can. Although the continental tufas have been regularly dated (e.g. HORVATINČIĆ ET AL., 2003.), still none of submarine tufa deposits has been analysed. Based on position of tufa barrier in submerged part of palaeoKrka River, an estimation of 14 m lower sea level some 6900 years ago has been done (ŠEGOTA, 1968). Appearance of tufa deposits on Lavsa Island (Kornati Archipelago) registered on the Basic Geological Map and estimated to be of Lower Quaternary age (MAMUŽIĆ, NEDELA – DEVIDÉ, 1963) should be rigorously re-examined since its existence on such small and remote island would require not only substantial sea level change, but also considerable tectonic displacements.

Biostratigraphic methods

Undoubtedly, the best biological indicators of sea level are the endo- and epilithic organisms adapted to the life in the intertidal zone whose shells could be preserved *in situ*. One of such is date-shell (*Lithophaga lithophaga*) which can be well-preserved, usually lives in first several meters below the sea level and is recognized as the first colonizer after the submersion (ANTONIOLI, OLIVERIO, 1996).

u toj zoni (ANTONIOLI & OLIVERIO, 1996). Položaji tragova ubušavanja prstaca na 4 m iznad morske razine na Prviću i +2 m na Korčuli interpretirani su kao posljedica postglacijalnog izdizanja Velebita (MARJANAC, MARJANAC, 2000.).

Biostratigrafska istraživanja obuhvatila su brojne fosilne ostatke pleistocenske faune na otocima Cresu, Lošinju, Susku, Ugljanu, Ižu, Ravi, Dugom otoku, Murteru, Zlarinu, Braču, Hvaru, Korčuli i duž obale (TEŠIĆ, 1958; KOCHANSKY-DEVIDÉ, 1964; MALEZ, BOŽIČEVIĆ, 1965; MALEZ I DR., 1979; MALEZ, 1981; MALEZ, RABEDER, 1984; PAUNOVIĆ, RABEDER, 1996, 2000; PAUNOVIĆ I DR., 2001; ČEČUK, RADIĆ, 2005.), iako prvotna namjera nije bila rekonstruiranje promjena morske razine. Svi ti nalazi dokaz su nekadašnjih nižih morskih razina kad su postojale kopnene veze između otoka i obale, omogućujući migracije i život velikih pleistocenskih životinja na prostoru koji je današnjom visokom morskom razinom bitno reduciran (PAUNOVIĆ ET AL., 2001.). Nažalost, ovim istraživanjima ne može se precizno odrediti položaj morske razine u određenom razdoblju. Osim gore navedenih terestričkih nalaza, veoma je zanimljiv jedinstven skeletni materijal nađen na morskom dnu (-80 m) između Raba i Paga koji pripada vrsti *Mammuthus meridionalis adriacus* n. ssp iz mindelskog glacijala (MALEZ, LENARDIĆ-FABIĆ, 1988.). Iako slučajno pronađen, takav materijal nudi bolje mogućnosti za rekonstrukciju rasporeda mora i kopna i procjenu nižih morskih razina.

Arheološki nalazi i historiografski podaci

Arheološki se ostaci mogu prilično točno datirati, stoga brojni rimski nalazi duž hrvatske obale, smješteni uz obalnu crtu ili pod morem, pružaju dobru mogućnost za rekonstrukciju relativnih promjena morske razine, barem u zadnjih 2100 godina. Jedna od takvih lokacija prikazana je na slici 3. – djelomično potopljena *villa rustica* u tjesnacu Mala Proversa (Dugi otok) koja datira iz 1. st. (SUIĆ, 1952.). Desetljećima su se arheolozi koristili podatkom o 2 m nižoj morskoj razini prije 2000 godina, iako ta procjena često nije imala bibliografsko uporište. Kako bi rekonstruirali holocensku promjenu morske razine, Šegota i Filipčić (1991.) dali su pregled različitih geoloških i arheoloških podataka na temelju kojih su i oni potvrdili već uvriježen podatak da je prije 2000 godina morska razina bila 2 m niža od današnje, te da je holocenski porast morske razine bio razmjerno pravilan. Međutim,

Position of some date-shell borings found 4 m above mean sea level (a.m.s.l.) on Prvić Island and 2 m a.m.s.l. on Korčula Island were interpreted as the consequence of post-glacial rebound of the Mt. Velebit (MARJANAC, MARJANAC, 2000).

The subject of numerous biostratigraphic researches were the widespread fossil remnants of the Pleistocene fauna found on Croatian islands Cres, Lošinj, Susak, Ugljan, Iž, Rava, Dugi otok, Murter, Zlarin, Brač, Hvar, Korčula and along the coast (TEŠIĆ, 1958; KOCHANSKY-DEVIDÉ, 1964; MALEZ, BOŽIČEVIĆ, 1965; MALEZ ET AL., 1979; MALEZ, 1981; MALEZ, RABEDER, 1984; PAUNOVIĆ, RABEDER, 1996, 2000; PAUNOVIĆ ET AL., 2001; ČEČUK, RADIĆ, 2005), although with no direct intention of reconstructing the sea-level changes. All of these findings are evidences of the periods of former low sea levels when the subaerial connection between the islands and mainland existed enabling migration and life of large Pleistocene animals in the area that is by the present high sea level quite reduced (PAUNOVIĆ ET AL., 2001). Unfortunately, these studies could not provide precise estimations of the sea level in particular periods. Apart from the aforementioned terrestrial findings, of special interest is unique skeletal material found on the sea bottom (-80 m) between the islands of Rab and Pag belonging to the *Mammuthus meridionalis adriacus* n. ssp of the Mindel glaciation age (MALEZ, LENARDIĆ-FABIĆ, 1988). Although found accidentally, such submarine findings offer better potential for reconstruction of the former land distribution and estimation of low sea-level shorelines.

Archaeological remnants and historical data

Archaeological remnants usually can be quite accurately dated, so the abundance of Roman outcrops along the Croatian coast, and their locations close to the shoreline and under the sea are promising for the reconstruction of the relative sea-level changes at least for the last 2100 years. One of such numerous archaeological sites is shown on Figure 3 – partially submerged ruins of Roman *villa rustica* in Mala Proversa strait (Dugi otok Island) dating from the AD 1st c. (SUIĆ, 1952). For the decades, an estimation of 2 m lower sea level during the Roman times had been used by the archaeologists, often unsupported by bibliographic sources. In order to reconstruct Holocene sea-level changes on the eastern Adriatic coast, an overview of diverse geological and archaeological data had been done by Šegota and Filipčić (1991). Obtained result supported already used value of sea-level of

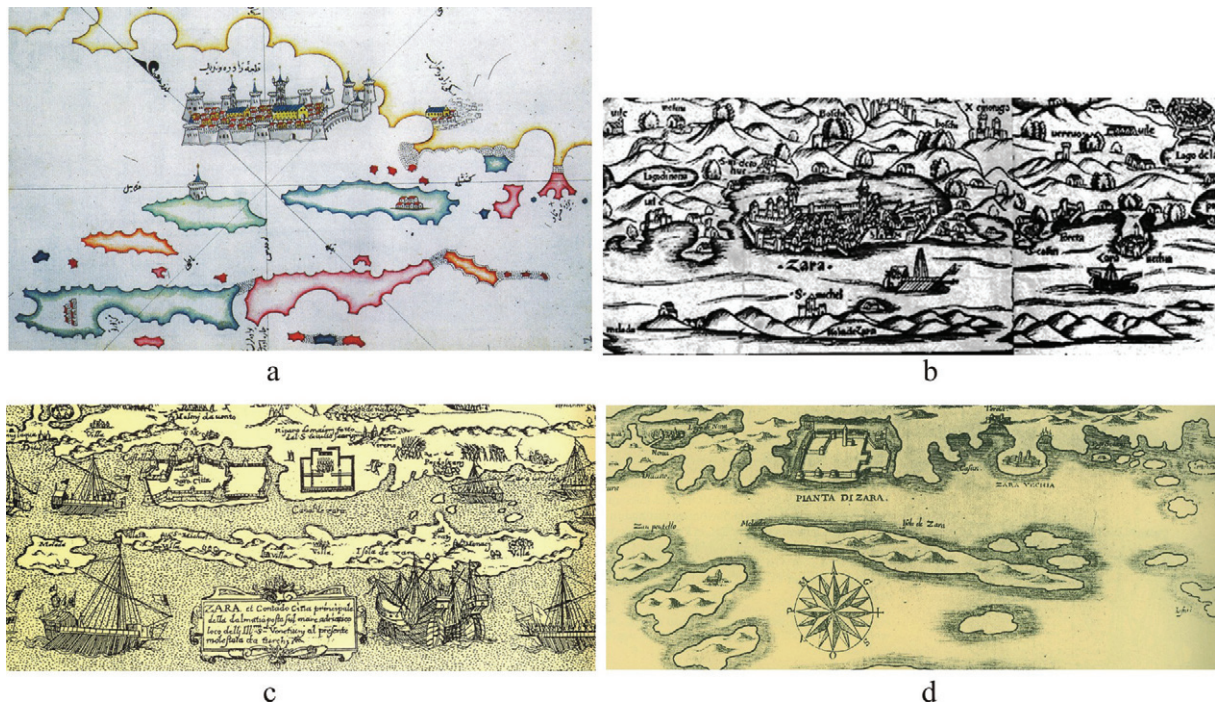


Slika 3. Djelomično potopljeni ostaci rimske vile rustike u tjesnacu Mala Proversa (Dugi otok) sagrađene u 1. st. (SURIĆ, 1952.). Ovaj objekt svakako upućuje na nekadašnju nižu morskú razinu, no ne smije poslužiti kao indikator relativne promjene morske razine s obzirom da su za to pouzdani samo objekti vezani izravno za razinu mora.

Figure 3 Partially submerged ruins of Roman *villa rustica* in Mala Proversa Strait (Dugi otok Island, Croatia), built in AD 1st c. (SURIĆ, 1952). Such objects are surely the evidence of the former lower relative sea level, but must not be used as indicator of the relative sea-level changes since only the facilities connected directly to the sea-level can be regarded as reliable ones.

metodološki pristup obradi tih podataka trebalo bi preispitati, jer su korišteni podaci o različitim objektima kao što su pločnici, grobnice, ostaci brodoloma, podni mozaici, pehari itd. što nije u potpunosti ispravno. Naime, u obzir bi se trebali uzeti samo objekti koji su izravno vezani za obalnu crtu kao npr. brodski navozi, solane, dokovi, bazeni za ribe, lučke konstrukcije i sl. (PIRAZZOLI, 2000.). Držeći se ovoga kriterija, Faivre i Fouache (2003.), te Fouache i dr. (2000; 2004.) usporedili su geomorfološke (plimske potkapine) i arheološke markere (bazene za ribe, gatove, pristaništa, kamenolome) kojima se može odrediti starost, nađene uglavnom na području Istre i Kvarnera na dubinama 0,5-0,6 m. Ti autori također podržavaju ranije spomenutu ideju o stagnaciji morske razine tijekom formiranja plimskih potkapina, ali kao uzrok brzog dislokaciji morske razine u odnosu na kopno odbacuju koseizmičko tonjenje koje sugeriraju Benac i dr. (2004.). Nadalje, potopljeni arheološki ostaci iz 1. i 2. st. u području Zadra i Šibenika koji upućuju na tadašnju morskú razinu oko 1,5 m nižu od današnje, te nepostojanje fosilnih i recentnih plimskih potkapina u području južno od Zadra, Faivre i Fouache (2003.) te Fouache i dr. (2005.) pripisuju različitoj regionalnoj tektonskoj aktivnosti. Rezultati geomorfoloških i arheoloških istraživanja na talijanskoj, slovenskoj i hrvatskoj obali sjevernog Jadrana ukazuju da je prije 1900 ± 100 godina morska razina bila niža 2,08 ± 0,60 m, pri čemu na tektonsko spuštanje kopna otpada

-2 m two thousand years ago and suggested uniform sea-level rise. But methodological approach of that study should be reconsidered, since a lot of different data has been taken into account – pavements, tombs, shipwreck remnants, floor mosaics, goblet, etc. - which should not have been the case. Namely, only the facilities directly connected to the coastline such as slipways, salt pans, docks, fish-ponds and harbour constructions, should be taken into consideration (PIRAZZOLI, 2000). Following this criterion, Faivre and Fouache (2003), and Fouache et al. (2000, 2004) correlated geomorphological (tidal notches) and archaeological markers (fish-ponds, jetties, harbours, quarries) of estimative age, mostly found in Istria and Kvarner region at the depth of 0.6-0.5 m b.m.s.l. These authors also suggest aforementioned sea-level stagnation during the formation of tidal notches, but discard coseismic subsidence (suggested by Benac et al., 2004) as possible cause of rapid dislocation of the sea surface relative to the land. Furthermore, submerged archaeological findings from 1st and 2nd century in Zadar and Šibenik region point to the then sea level 1.5 m lower than today, and absence of fossil and present-day tidal notches southern from Zadar Faivre and Fouache (2003) and Fouache et al. (2005) attributed to different regional tectonic activity. Results of geomorphological and archaeological investigation of northern Adriatic coast (Italy, Slovenia and Croatia) undertaken by Antonioli et al. (2007) indicated that 1900 ± 100 years BP relative sea level was up to 2.08 ± 0.60 m



Slika 4. Otoki Ugljan i Pašman prikazani na starim kartama različitih autora: a) Reis (1526.); b) Pagano (cca. 1530.); c) Pinargenti (1573.); d) Merian (1647.). (preuzeto iz FARIĆIĆ, 2006.). Autori karata *a* i *b* jasno izdvajaju dva zasebna otoka ispred Zadra – Ugljan i Pašman, dok su na kartama *c* i *d* oni prikazani kao jedan dugi otok.

Figure 4 Ugljan and Pašman Islands presented on the old maps made by: a) Reis (1526); b) Pagano (ca 1530); c) Pinargenti (1573); d) Merian (1647) (from FARIĆIĆ, 2006). Authors of maps *a* and *b* clearly distinguished two separate islands, Ugljan and Pašman off Zadar with Mali Ždrelac Strait between them, whilst on the maps *c* and *d* they were designed as one long island.

~1,5-1,6 m, dok se ostatak pripisuje izostatskim procesima (ANTONIOLI I DR., 2007.)

Historiografski podaci koji mogu ukazivati na promjenu morske razine pokrivaju razmjerno kratak period – u najboljem slučaju posljednjih 2000-3000 godina, no obično tek nekoliko zadnjih stoljeća, i uglavnom se temelje na reinterpetaciji podataka koji se ne odnose izravno na morsku razinu (PIRAZZOLI, 2000.). Već je talijanski prirodoslovac i opat Fortis u svojoj knjizi *Put po Dalmaciji* (*Viaggio in Dalmazia*, 1774.), među ostalim iznimnim opservacijama o promjenama morske razine (SURIĆ I DR., 2007.), raspravljao o natpisu uklesanom na stijeni uz obalu mora koji opisuje posjed rimskog cara Licinija s obližnjim izvorom korištenim za navodnjavanje. No već u doba Fortisovih istraživanja more je već potopilo sve objekte i dijelom abradiralo i sam natpis (FORTIS, 1774.). S druge strane, neki historiografski podaci poput starih karata, mogu navesti i na krive zaključke, i to zbog generalizacije, nepreciznosti, ali i zbog utjecaja ljudske percepcije sadržaja koji se bilježi na kartu. Dobar primjer za to je serija starih karata iz 16. i 17. st. koje su izradili Camocio

b.m.s.l., but from this value they separated tectonic subsidence of the region of ~1.5-1.6 m, and the rest was addressed to the isostatic processes.

Historical data regarding sea-level changes cover relatively short period – 2000 to 3000 years in the best case, but usually only the last few centuries, and they are generally based on reinterpetation of data which do not correspond to the sea-level directly (PIRAZZOLI, 2000). Italian naturalist and abbot Fortis in his work *Viaggio in Dalmazia* (1774), among other outstanding observations on sea-level changes (SURIĆ ET AL., 2007), discussed an inscription carved in the coastal rock. It described the manor of Roman emperor Licinius with adjacent spring used for the irrigation, but at the time of Fortis' expeditions, rising sea had already submerged all of these features, abrading even the inscription itself (FORTIS, 1774). On the other hand, some historical data could sometimes be misleading, for instance old maps, because of the generalization and imprecision, but also due to the impact of human perception. Series of maps from the 16th and 17th c. made by Camocio (1571), Pinargenti (1573) (Fig. 4c) and Merian (1647)

(1571.), Pinargenti (1573.) (Sl. 4c) i Merian (1647.) (Sl. 4d) na temelju originalnih karata Kolunića i Bonifačića (FARIČIĆ, 2006; 2007.), a koje prikazuju otoke Ugljan i Pašman kao jedinstvenu cjelinu sugerirajući da je morska razina bila toliko niska da je između otoka bila uspostavljena kopnena veza. Međutim, starije karte različitih kartografa iz prve polovice 16. st. jasno predočavaju tjesnac Mali Ždrelac između ta dva otoka (Sl. 4 a,b) (FARIČIĆ, 2007.), što je, sudeći prema najnovijim istraživanja trenda promjene morske razine, zapravo bila ispravna interpretacija.

Mareografski podaci

Mareografske postaje tj. mareografi, primarno se koriste za bilježenje morskih mijena, no na temelju niza podataka dužega (višegodišnjeg) perioda mogu se dobiti i podaci o relativnoj promjeni razine mora. U Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL) u Proudman Oceanographic Laboratory, Merseyside, UK, pohranjeni su podaci mjesečnih i godišnjih mjerenja 18 mareografa koji su radili ili još rade duž hrvatske obale, i prema tim zapisima, u razdoblju od 1960. do 1980. godine, četiri su mareografa (Bakar, Rovinj, Split – Marjan i Split – Luka) zabilježila relativno sniženje morske razine (TSIMPLIS, BAKER, 2000.). Na istočnoj obali Jadrana kontinuirani nizovi mareografskih podataka dostupni su tek za posljednjih 50 godina, iako su prva mjerenja počela u Trstu još 1859., a u Bakru 1929. godine. Podaci bakarskog mareografa za razdoblje 1930.-1971. (iako je kontinuirani niz bio samo od 1949. do 1971.) desetljećima su bili interpretirani tako da su sugerirali tonjenje istočne obale Jadrana brzinom od 0,6069 mm/god (ŠEGOTA, 1976; 1982.). No, uzimajući u obzir duži mjerni period (1956.-1996.) i filtriranjem podataka za vrijednosti tlaka zraka, pokazano je da se područje Bakra čak izdiže brzinom od 0-2,4 mm/god, vjerojatno usljed relaksacije terena nakon ranijeg intenzivnog spuštanja (ORLIĆ & PASARIĆ, 1994). Isti autori, na temelju podataka mareografa u Rovinju, Bakru, Splitu i Dubrovniku, pretpostavljaju suvremeni trend relativne promjene razine mora od +1 mm/god u sjevernom Jadranu (s iznimkom područja oko Bakra koje karakteriziraju nepravilni pomaci), i 0 mm/god u južnom dijelu, odnosno izdizanje južnog dijela hrvatske obale vrijednosti jednake globalnom izdizanju morske razine (ORLIĆ, PASARIĆ, 2000.).

(Fig. 4d) based on the original maps of Kolunić and Bonifačić (FARIČIĆ, 2006, 2007), present the islands of Ugljan and Pašman off Zadar as integral entity what can suggest that the sea level was as low as the land connection could have been established between these islands. But, older maps, made by different cartographers in the first half of 16th c., clearly designated the Mali Ždrelac strait between these islands (Fig. 4 a,b) (FARIČIĆ, 2007), which was, according to the recent studies on sea-level trend (CHURCH ET AL., 2004), most probably correct interpretation.

Mareographic records

Mareographic stations i.e. tide-gauge facilities are primarily used to measure tidal oscillations, but if used over an extended period they can also show longer-term variations of the relative sea-level. Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL) in Proudman Oceanographic Laboratory, Merseyside, UK, archives month and annual data sets from 18 tide-gauges that had worked or still work along the Croatian coast and islands, and, according to their records, in the period 1960-1980 four tide-gauges (Bakar, Rovinj, Split-Marjan and Split Harbour) recorded relative sea-level fall (TSIMPLIS, BAKER, 2000). Continuous tide-gauge records on the eastern Adriatic coast are available for only about last 50 years, although the first measurements began in 1859 in Trieste (Italy) and in 1929 in Bakar (Croatia). Bakar station is also the one whose data from the period 1930-1971 (although the continuous data set was from 1949 to 1971) has been for decades interpreted suggesting that eastern Adriatic coast is subsiding by the rate of 0.6069 mm/a (ŠEGOTA, 1976; 1982). Yet, re-examined data filtered for the atmospheric values (air pressure), and taken for extended period (1956-1996) showed that Bakar region uplifts 0-2.4 mm/a probably due to the relaxation after the previous intensive submergence (ORLIĆ, PASARIĆ, 1994). The same authors, on the basis of Rovinj, Bakar, Split and Dubrovnik tide-gauge records assume present relative sea-level trends of +1 mm/a in the north Adriatic (with the exception of Bakar region characterised by anomalous crustal movements) and 0 mm/a in the southern part, i.e. uplift of southern Croatian coast with the same rate as the global sea-level rises (ORLIĆ, PASARIĆ, 2000).

Geodetska mjerenja

Geodetskim mjerenjima moguće je odrediti relativne pomake među dvjema točkama na velikoj udaljenosti (ALTINER, 1999.), te se očekivalo da će se CRODYN GPS (Global Positioning System) mrežom uspostavljenom 1994., u okviru tri kampanje (1994., 1996. i 1998.), a na temelju 41 GPS postaje u području Jadrana i susjednih regija, razriješiti vertikalna komponenta regionalnih pomaka Zemljine kore (ALTINER I DR., 2006a; 2006b.). Nažalost, dobiveni su prilično nejasni rezultati, ponekad čak i različita smjera i magnitude za istu lokaciju. Jedan od mogućih uzroka takvih rezultata je manja točnost mjerenja vertikalnih pomaka koja može biti i 2 do 4 puta slabija od točnosti mjerenja horizontalnih pomaka, koja je ± 2 mm/god (ALTINER I DR., 2006a; 2006b.). Svakako, neki vertikalni pomaci, posebno oni koji upućuju na izdizanje, moraju biti ili vrlo recentni ili čak pogrešni, jer brojni danas potopljeni arheološki nalazi (FOUACHE I DR., 2000; ANTONIOLI I DR., 2007.) nikako nisu u skladu s tako intenzivnim izdizanjem.

Podaci dobiveni radiometrijskim analizama

U ovom su poglavlju obučeni podaci koji su se mogli obraditi i u poglavljima o biostratigrafskim i geomorfološkim pokazateljima, no ujedinjeni su ovdje jer se odnose na apsolutno datiranje pojedinih događaja radiometrijskim metodama.

Pionirski rad o rekonstruiranju promjena morske razine na hrvatskoj obali radiometrijskim metodama (ŠEGOTA, 1968.) još se uvijek vrlo često citira kad je u pitanju morska razina tijekom LGM-a, a prema kojem je ona bila 96,4 m niža od današnje. Međutim, kako je i navedeno u tom radu (ŠEGOTA, 1968.), krivulja promjene morske razine rekonstruirana je na temelju 147 podataka o ^{14}C starosti uzoraka iz čitavog svijeta, i kao takva ne može biti primjenjiva niti za jednu obalu zbog različitih relativnih pomaka kopna na različitim obalama. Osim toga, krivulja (parabola) je matematički konstruirana, a poznato je da postglacijalno izdizanje morske razine nije bilo pravilno, već je bilo više oscilacija i stagnacija (FAIRBANKS, 1989; BLANCHON, SHAW, 1995; ANTONIOLI I DR., 2001).

^{14}C datiranje provedeno je i na slatkovodnim sedimentima iz jezgre uzete u kanalu Soline na Mljetu. Njihova starost od 4810-4410 cal BP upućuje da je tek ~4 ka BP more dosegulo

Geodetic measurements

Geodetic measurements enable to determine relative motions between points far away from each other (ALTINER, 1999), so CRODYN GPS (Global Positioning System) network established in Adriatic Sea area in 1994, within three campaigns (1994, 1996 and 1998) was expected to resolve vertical component of regional crust movement based on 41 GPS stations within Adriatic and adjacent regions (ALTINER ET AL., 2006a; 2006b). Unfortunately, they yielded rather ambiguous data, sometimes of different directions and magnitudes for the same locations. One of the possible reasons is that accuracy of the vertical movement derived by GPS is 2 to 4 times poorer than the accuracy for the horizontal displacement (which is ± 2 mm/a) (ALTINER ET AL., 2006a; 2006b). However, obtained vertical velocities, specially some that recorded uplift, must be of the very recent time, or even erroneous, since the numerous presently submerged archaeological evidences (FOUACHE ET AL., 2000; ANTONIOLI ET AL., 2007) could not support such intensive uplift.

Data obtained by radiometric analyses

The following section comprises the data that could have been discussed in previous chapters concerning geomorphological and biostratigraphical issues, but they are all gathered here since they all deal with absolute dating of particular events by the means of radiometric methods.

Pioneer work on reconstructing sea-level changes on the Croatian coast by radiometric methods (ŠEGOTA, 1968) is in Croatian literature still oft-cited reference for the LGM sea-level stand, suggesting that it was 96.4 m below the present one. But, as quoted in that work (ŠEGOTA, 1968), the sea-level curve had been reconstructed on the basis of the ^{14}C data from all around the world, so it could not be ascribed to any particular coast because of the different relative movement of the sea and land on different coasts. Besides, the curve was mathematically constructed (parabola), and it is known that postglacial sea-level was not uniform, but it had several oscillations and stagnations (FAIRBANKS, 1989; BLANCHON, SHAW, 1995; ANTONIOLI ET AL., 2001).

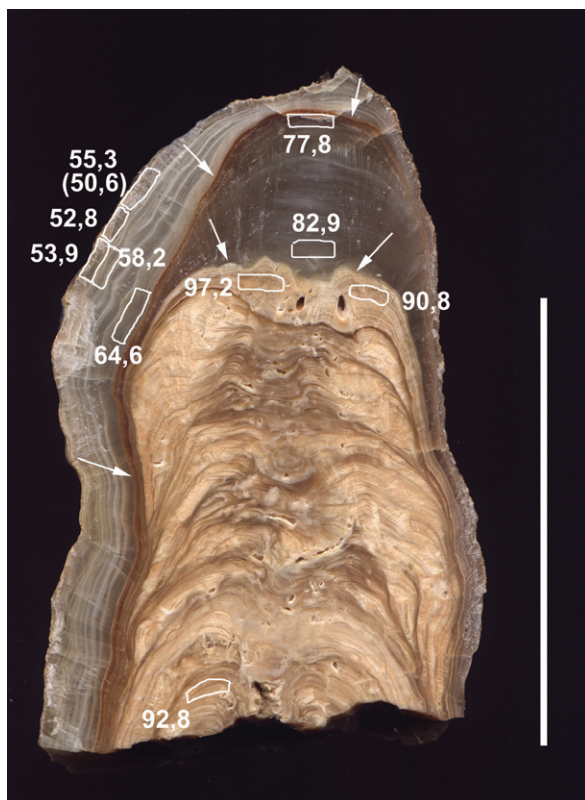
Radiocarbon dating was obtained on freshwater sediments from the core sampled in the Soline Channel on Mljet Island. Their age of 4810-4410

današnjih – 0,5-1,0 m (GOVORČIN I DR., 2001.). Prema Wunsamu i dr. (1999.), taj isti događaj zbio se 5-4 ka BP.

Prva radiometrijska datiranja morem potopljenih siga provedena su na stalagmitu iz Medvjede spilje na Lošinju s dubine od 0,45 m i prema ^{14}C starosti najmlađeg dijela sige koja je iznosila 620 ± 30 BP značilo bi da je tijekom taloženja sige more bilo ispod razine sige (MALEZ I DR., 1979). ^{14}C starosti najmlađeg dijela stalagmita uzetog s dubine od 41,5 m iz Vrulje Zečice kraj Starigrada iznosila je 9840 ± 165 BP (SURIĆ I DR., 2004.) upućujući da je razina mora početkom holocena bila više od 41 m ispod današnje razine. Tri sige iz jame pokraj Galijole (JJZ od Ista) datirana su metodom U-Th (VRHOVEC I DR., 2001.) kako bi se odredila promjena morske razine još veće amplitude. Nažalost, starost uzorka s -15 m nije se mogla odrediti, a također su upitne starosti uzoraka s -30 m ($263,55 + 211 - 76$ ka) zbog blizine granici metode i uzorka s -60 m ($155,61 + 35 - 27$ ka) zbog vjerojatne mobilizacije U i Th iona (VRHOVEC I DR., 2001.). Posljednja istraživanja potopljenih siga obuhvatila su 17 uzoraka uzetih s dubina od 1,5 do 41,5 m iz 7 potopljenih speleoloških objekata (Jama U vode na Krku, Medvjeda spilja na Lošinju, Spilja u uvali Tihovac na Pagu, Vrulja Zečica kraj Starigrada, Jama kod Iškog Mrtovnjaka, Jama Zmajevu uho kraj Rogoznice i Jama u uvali Lučice na Braču) (SURIĆ I DR. 2005; 2009; SURIĆ, 2006.). Na temelju U-Th i ^{14}C starosti siga i ^{14}C starosti marinskoga biogenog obraštaja, djelomično je rekonstruirana krivulja promjene relativne morske razine za posljednjih 220 ka (Sl. 5.). Naime, sige bilježe razdoblja nižih morskih razina, dok inkrustrirajući marinski organizmi koji često prekrivaju sige ili mineralne vrste vezane za regresivnu marinsku fazu upućuju na razdoblja kad su speleološki objekti bili potopljeni zbog visokih morskih razina (SURIĆ I DR., 2009.). Rezultati dobiveni ovim istraživanjima generalno se podudaraju s krivuljom globalne morske razine (LAMBECK I DR., 2002; POTTER, LAMBECK, 2004.), iako još treba provesti korelaciju s izostatiskim modelima. Vrlo dobru korelaciju s krivuljom globalne morske razine pokazali su rezultati analiza siga iz Jame U vode na Krku, i to posebno s tzv. *double peak* događajem iz marinskog izotopnog stadija (MIS) 5a. Naime, hijatusi obilježeni marinskom mineralnom asocijacijom iz razdoblja od ~87 do ~82 ka, te od ~77 do ~64 ka, podudaraju se s globalno registriranim visokim razinama mora,

cal years BP suggests that sea level did not reach the altitude of present 0.5-1.0 m b.m.s.l. prior to ~4 ka BP (GOVORČIN ET AL., 2001). Wunsam et al. (1999) placed the same event at 5-4 ka BP.

First radiometric dating of the submerged speleothem was undertaken on the stalagmite from Medvjeda spilja Cave (Lošinj Island) from 0.45 m b.m.s.l., and the obtained ^{14}C age of the youngest part was 620 ± 30 BP meaning that the sea-level was below the speleothem during its deposition (MALEZ ET AL., 1979). ^{14}C age of the youngest part of stalagmite from 41.5 m b.m.s.l. from Vrulja Zečica near Starigrad was 9840 ± 165 BP (SURIĆ ET AL., 2004) suggesting Early Holocene sea level lower than -41 m. Three speleothems from the Pit near Galijola Islet (SSW from Ist Island) had been dated using U-Th method (VRHOVEC ET AL., 2001) in order to determine sea-level changes with larger amplitude. Unfortunately, the age of sample from 15 m b.m.s.l. was not determinable, while the ages of the stalagmites from 30 m b.m.s.l. ($263.55 + 211 - 76$ ka) and from 60 m b.m.s.l. ($155.61 + 35 - 27$ ka) were also questionable due to the closeness to the method limit and probable mobilisation of U and Th ions, respectively (VRHOVEC ET AL., 2001). The latest research on the submerged speleothems encompassed 17 speleothem samples collected from 1.5 to 41.5 m b.m.s.l. from 7 submerged caves (U vode Pit on Krk Island, Medvjeda spilja Cave on Lošinj Island, Cave in Tihovac Bay on Pag Island, Vrulja Zečica near Starigrad, Pit near Iški Mrtovnjak Islet, Zmajevu uho Pit near Rogoznica and Pit in Lučice Bay on Brač Island) (SURIĆ ET AL. 2005; SURIĆ, 2006). Relative sea-level curve was partially reconstructed for the last 220 ka, based on the U-Th and ^{14}C ages of spelean calcite and ^{14}C ages of marine biogenic overgrowth (Fig 5). Namely, while the speleothems mark the periods of lower sea levels, encrusting marine organisms which often cover the speleothems in submerged caves or suite of the mineral connected to regression period, point to the flooding of the cave by the rising sea (SURIĆ ET AL., 2009). Acquired results from these studies are in general agreement with the global sea-level curves (LAMBECK ET AL., 2002; POTTER, LAMBECK, 2004), although the correlation to isostatic prediction is still to be done. Records from the speleothems from U vode Pit (Krk Island) showed very good correlation with global sea-level curve, particularly for so-called 'double-peak' event from marine isotope stage (MIS) 5a. Namely, hiatuses marked with marine mineral association from ~87 to ~82 ka and from ~77 to ~64 ka match



Slika 5. Primjer potopljene sige datirane U-Th metodom: uzdužni presjek stalagmita K-18 iz Jame U vode (Krk) s dubine od 18,8 m. Starosti datiranih poduzoraka (bijeli pravokutnici) dani su u ka (1000 god). Hijatusi označeni strelicama upućuju na razdoblja viših morskih razina kada je subaersko taloženje sige bivalo prekidano. Grafičko mjerilo 10 cm (preuzeto iz SURIĆ, 2006.).

Figure 5 An example of U-Th dated submerged speleothem: longitudinal section of stalagmite K-18 from the U Vode Pit (Krk Island) from 18.8 m b.m.s.l. Ages of dated subsamples (white rectangles) are given in ka. Hiatuses marked with arrows appoint to the periods of higher sea levels which ceased subarial speleothem deposition. Scale bar 10 cm (from SURIĆ, 2006)

dok današnji položaj sige vjerojatno upućuje na dugotrajno regionalno tektonsko izdizanje brzinom od 0,15-0,25 mm/god (SURIĆ I DR., 2009.).

Rasprava

Uz iznimku koraljnih grebena (koji su jedni od najčešće korištenih markera morske razine, posebno pri rekonstrukcijama eustatskih promjena na stabilnim obalama), na hrvatskoj se obali mogu koristiti gotovo svi drugi indikatori i metode rekonstrukcije morske razine. Među geomorfološkim pokazateljima najbolje su istražene potopljene plimske potkapine u smislu njihova trenutnog položaja, međutim pitanje njihova apsolutnog datiranja ostaje otvoreno. Naime, za razliku od akumulacijskih oblika, erozijski,

the globally recorded high sea-levels, and present elevation of the speleothems probably appoint to the long term regional tectonics uplift of 0.15-0.25 mm/a (SURIĆ ET AL., 2009).

Discussion

With the exception of coral reefs (one of the most used markers of sea-level changes, especially for the reconstructions of eustatic changes on stable coasts), almost all other indicators and methods of sea-level reconstructions can be employed on the Croatian coast. Among geomorphic indicators, submerged tidal notches i.e. their present position appear to be the best explored, although the problem of absolute dating will stay unsolved. Namely, unlike the depositional features, erosional structures could not be dated (i.e. it is hard do date



Slika 6. Selektivna erozija na Borovniku (Kornatski arhipelag) koja nalikuje izdignutoj plimskoj potkapini
 Figure 6 Differential weathering on Borovnik Islet within Kornati Archipelago resembling uplifted tidal notch

odnosno destruktivski oblici ne mogu biti datirani (teško je odrediti starost nečemu što nestaje ili je nestalo). Slična je situacija i sa spiljama – samo se sedimentima kao što su sige može odrediti starost. Što se tiče plimskih potkapina, iznimno bi zanimljiv bio nalaz potkapine koja bi ukazivala na maksimalnu razinu mora iz posljednjeg interglacijala (prije 125 ka) ili naknadno izdizanje ili tonjenje. Oblici slični takvoj potkapini mogu se naći na nekoliko otoka u Kornatskom arhipelagu (Sl. 6.), no njihov je nastanak zapravo vezan za selektivnu eroziju manje otpornih slojeva. Na takvoj potkapini najbitniji bi dokaz bili ostaci intertajdalnih organizama, posebno prstaca (*Lithophaga lithophaga*), no do sada su pronađena jedino mjesta ubušavanja koja se pripisuju prstacima (MARJANAC, MARJANAC, 2000.).

U posljednje se vrijeme potopljene spilje sve intenzivnije istražuju, no s obzirom na njihovu brojnost (više od 230 registriranih od kojih preko 140 sadrži sige), još se puno posla treba obaviti. Iako se drži da potopljene sige sadrže jako dobre podatke o promjeni kontinentalnog okoliša u marinski, rekonstrukcija je obično iznimno složena. Konkretno, najmlađi dio sige daje maksimalnu

something that is disappearing, or is gone). The same problems appear with the dating of the caves – only the deposits as speleothems can be dated. As for the tidal notches, of exceptional interest would be the finding of the notch which could appoint to the maximum sea-level of the last interglacial (~125 ka BP) or to the subsequent uplift or subsidence. Features similar to the emerged notches could be found on several islands in Kornati Archipelago (Croatia) (Fig. 6), but the fact is that their real origin is differential weathering of less resistant strata. In emergent notches essential evidence would be datable remnants of intertidal organisms, especially date-shell (*Lithophaga lithophaga*), but until now, only the borings ascribed to date-shells were found (MARJANAC, MARJANAC, 2000).

Recently, submerged caves have been explored more intensively, but due to their abundance (over 230 recorded, with more than 140 comprising speleothems), a lot of work is still to be done. Although submerged speleothems seem to archive very good records of transition of continental environment to the marine one, the reconstruction is usually very complex. Specifically, the youngest part of the spelean calcite of submerged speleothem

starost transgresije mora na određenoj dubini, dok najstariji dio marinskog obraštaja daje minimalnu starost uspostave marinskih uvjeta. No, treba napomenuti da rast sige može biti prekinut i prije potapanja morem zbog niza drugih razloga, a isto tako i početak obraštanja može biti odgođen, tako da vremenski razmak između ova dva bitna događaja može onemogućiti preciznu rekonstrukciju.

Potopljene su spilje zanimljive također i s paleontološkog i arheološkog stajališta. Naime, kao i na kopnu, i potopljene speleološki objekti mogu sadržavati artefakte i fosilne ostatke prapovijesnih ljudi i životinja kojima se može odrediti starost. To bi prvenstveno bile spilje (ne jame) s pogodnim okolišem za život tijekom niskih morskih razina. Jedna takva, već dijelom istražena, mogla bi biti Y-spilja u uvali Brbinjšćica na Dugom otoku (JURACIĆ I DR., 2002.).

Unatoč opsežnim arheološkim istraživanjima provedenim duž istočne obale Jadrana, još su uvijek arheološka nalazišta premalo iskorištena u smislu rekonstrukcije promjena morske razine, uz iznimku rimskih nalaza u sjevernom Jadranu, stoga bi suradnja geoznanstvenika i arheologa u tom pitanju trebala biti imperativ.

Od sofisticiranih geodetskih mjerenja očekivalo se da će biti prekretnica za rekonstrukciju neotektonskih pokreta, no ranije spomenuta nesuglasja između GPS podataka i datiranih npr. arheoloških nalaza, unijela su još više zabune. Izgleda da će trebati pričekati gušću mrežu GPS postaja i mnogo dužu seriju mjerenja. Do tada će mnogo pouzdaniji biti podaci temeljeni na apsolutno datiranim, dobro definiranim indikatorima razine mora koreliranim s globalnim (eustatskim) trendom morske razine.

Budući da je relativna morska razina zbroj eustatskih, tektonskih i glacio-hidro-izostatskih čimbenika, i ove posljednje treba uključiti u rekonstrukciju promjene razine mora, posebno za razdoblje nakon LGM. Za područje sjevernog Jadrana potrebno je uzeti u obzir (de)glacijacije najvećih ledenih pokrova, ali isto tako i Alpa sve do zadnjeg interglacijala prema predloženim matematičkim modelima Lambecka i Purcella (2005.) te Lambecka i dr. (2006.).

provides a maximum age constraint for the marine transgression on particular depth, whereas the oldest part of marine overgrowth provides a minimum age constraint for the established marine conditions. But it should be mentioned that speleothem growth can cease prior to the sea flooding due to the various causes, and also the marine biogenic overgrowth can be postponed, so sometimes this gap can be too large for precise reconstruction.

Additionally, submerged caves are interesting from the palaeontological and archaeological point of view, as well. Namely, just like on the land, submerged caves can keep the artefacts and fossil assemblage of prehistoric humans and animals that can be dated. That would be primarily the caves (not pits) with suitable environment for the living during the low sea-level stands. One of such, already partially explored, might be the Y-Cave in Brbinjšćica Bay on Dugi otok Island (Croatia) (JURACIĆ ET AL., 2002).

In spite of extended archaeological investigations undertaken along eastern Adriatic coast, archaeological sites are still underutilized for the purpose of sea-level reconstruction with exception of Roman period in northern part, so the collaboration between geoscientists and archaeologists on this issue is imperative.

Sophisticated geodetic measurements were expected to be a turning point for the neotectonic movements' reconstructions, but aforementioned discrepancies between obtained GPS records and dated records, for instance archaeological, introduced even more confusion. Apparently, we should wait for denser GPS stations' network and longer data sets. Until then, more reliable data of crust movements would be those based on absolutely dated well-defined indicators of the sea level correlated with the global (eustatic) sea-level trends.

Since the relative sea-level change is the sum of eustatic, tectonic and glacio-hydro-isostatic factors, in order to obtain accurate data, the latter should be incorporated in all reconstructions of sea-level changes specially for the period since LGM. For the north Adriatic region, (de)glaciations of major ice sheets and Alps back to the last interglacial should be taken into consideration according to mathematical models proposed e.g. by Lambeck and Purcell (2005) and Lambeck et al. (2006).

Zaključak

Hrvatska obala, stjenovita i okršena, s izrazito velikom rezvedenošću, malim amplitudama morskih mijena, raznolikim priobalnim biocenozama, brojnim paleontološkim i arheološkim ostacima te bogatom historiografskom građom, razmjerno gustom mareografskom i rastućom GPS mrežom, u svjetskim je razmjerima jedna od rijetkih obala koja nudi mogućnost korištenja gotovo svih etabliranih metoda pri istraživanju promjena morske razine. Ipak, rezultati još uvijek puno zaostaju za onima iz sličnih područja, uglavnom zbog prostorno ograničenih i usko specijaliziranih studija. No, određen je napredak ipak vidljiv posljednjih 20-ak godina, i s multidisciplinarnim pristupom i međunarodnom suradnjom moguće je do značajnijih rezultata doći u razmjerno kratkom vremenu. Ohrabruje i činjenica da se na temelju najnovijih apsolutno datiranih indikatora morske razine uspješno pojašnjava povijest relativnih pomaka kopna i razine mora. Dodatni izazov znanstvenicima je i činjenica da tako tektonski aktivna obala kao što je istočnojadranska neće dati svoj prilog rekonstrukciji globalnih (eustatskih) fluktuacija morske razine, već će najveći doprinos biti rekonstrukciji lokalnih neotektonskih pomaka i uz njih vezanoj promjeni lokalne relativne morske razine.

Od ranije navedenih rezultata dobivenih različitim pristupima tek se neki mogu izdvojiti kao pouzdani: relativna stagnacija i naknadan porast morske razine potpomognut tektonskim spuštanjem sjevernog Jadrana tijekom zadnjih ~2000 godina, dok je na području južnog dijela hrvatske obale ravnotežom između izdizanja kopna i suvremenoga globalnog porasta morske razine uspostavljeno stanje stagnacije. Osim tih holocenskih i recentnih vrijednosti, u području Kvarnera se vjerojatno može govoriti i o dugotrajnom regionalnom izdizanju kopna u posljednjih ~85 ka.

Zahvala

Zahvaljujem Č. Bencu i M. Garašiću na ustupljenim fotografijama, te recenzentima čije su korisne i konstruktivne sugestije poboljšale ovaj rad.

Conclusion

Croatian coast, with its karstified rocky and highly indented shoreline, low tidal range, diverse coastal biocenosis, numerous palaeontological and archaeological remnants, historical data, relatively dense tide-gauge stations and developing GPS network, appears to be, on global scale, one of the few regions which offers opportunity of employing almost all established methods in sea-level research. Yet, the results are still well beyond those of the similar regions mostly because of the scattered and narrowly focused studies. Still, certain progress during the last two decades is evident, and with multidisciplinary approach and international collaboration, it is quite possible to achieve significant results in relatively short time period. The most encouraging fact is that the newest absolutely dated sea-level markers successfully reveal the history of relative sea and land movements. An additional jeopardy to the scientists is the fact that such tectonically active coast as eastern Adriatic coast is, will not contribute to the reconstruction of global (eustatic) sea-level fluctuation - main benefit of the researches to come will probably be the reconstruction of local neotectonic movements and associated local relative sea-level changes.

From all aforementioned results obtained by different scientific approaches only few can be regarded as reliable: relative sea-level stagnation and subsequent rise enhanced by tectonic subsidence in northern Adriatic during last two millennia, while at southern Croatian coast equilibrium of crustal uplift and contemporary global sea-level rise established steady-state. Apart from these Holocene and recent values, long term regional tectonic uplift probably took place during the last ~85 ka in the Kvarner region.

Acknowledgement

I would like to thank Č. Benac and M. Garašić for providing submarine photographs, and the reviewers for helpful and constructive suggestions which improved the manuscript.

LITERATURA / LITERATURE

- ALFIREVIĆ, S. (1965): Geologija Jadrana, Matica hrvatska Split, Split, pp 247.
- ALTINER, Y. (1999): Analytical surface deformation theory for detection of the Earth's crust movements, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, pp 100.
- ALTINER, Y., BAČIĆ, Ž., BAŠIĆ, T., COTICCHIA, A., MEDVED, M., MULIĆ, M., NURČE, B. (2006a): Present-day tectonics in and around the Adria plate inferred from GPS measurements. In Dilek, Y., Pavlides, S., (Eds): Postcollisional tectonics and magmatism in Mediterranean region and Asia, Geological Society of America Special Paper 409, 43-55, doi: 10.1130/2006.2409(03).
- ALTINER, Y., MARJANOVIĆ, M., MEDVED, M., RASIĆ, LJ. (2006b): Active deformation of the Northern Adriatic region: result from the CRODYN geodynamical experiment. In: Pinter, N. et al. (Eds.), The Adria Microplate: GPS Geodesy, Tectonics and Hazards. Springer, Dordrecht, 257-268.
- ANTONIOLI, F., OLIVERIO, M. (1996): Holocene Sea-Level Rise Recorded by a Radiocarbon-Dated Mussel in a Submerged Speleothem beneath the Mediterranean Sea, Quaternary Research, 45, 241-244, doi:10.1006/qres.1996.0024.
- ANTONIOLI, F., SILENZI, S., FRISIA, S. (2001): Tyrrhenian Holocene paleoclimate trends from spelean serpulids, Quaternary Science Reviews, 20/15, 1661-1670, doi:10.1016/S0277-3791(01)00012-9 .
- ANTONIOLI, F., ANTIDEI, M., LAMBECK, K., AURIEMMA, R., GADDI, D., FURLANI, S., ORRÙ, 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, 2463-2486, doi:10.1016/j.quascirev.2007.06.022
- BAUČIĆ, I. (1967): Cetina – razvoj reljefa i cirkulacije vode u kršu, Radovi Geografskog instituta Sveučilišta u Zagrebu, 6, p. 161.
- BELIJ, S. (1985): Glacijalni i periglacijalni reljef južnog Velebita, Posebna izdanja Srpskog geografskog društva, 61, 68 str.
- BENAC, Č. (1996a): Morfološka evolucija Riječkog zaljeva: utjecaj klimatskih i glacioeustatičkih promjena, Acta Geografica Croatica, 31, 69-84.
- BENAC, Č. (1996b): Rast morske razine i promjene reljefa na obalama Kvarnera, Pomorski zbornik, 34, 345-359.
- BENAC, Č., ŠEGOTA, T. (1990): Potopljena ris-virmska abrazijska terasa u podmorju ispred Rijeke, Geološki vjesnik, 43, 43-52.
- BENAC, Č., JURAČIĆ, M. (1998): Geomorphological Indicators of Sea Level Changes during Upper Pleistocene (Würm) and Holocene in the Kvarner Region (NE Adriatic Sea), Acta Geographica Croatica, 33, 27-45.
- BENAC, Č., 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, 21-33, doi: 10.1016/j.margeo.2004.09.002
- BENAC, Č., JURAČIĆ, M., BLAŠKOVIĆ, I. (2008): Tidal notches in Vinodol Channel and Bakar Bay, NE Adriatic Sea: Indicators of recent tectonics, Marine Geology, 248, 3-4, 151-160, doi:10.1016/j.margeo.2007.10.010 .
- BLANCHON, P., SHAW, J. (1995): Reef drowning during the last deglaciation: Evidence for catastrophic sea-level rise and ice-sheet collapse, Geology, 23, 1; 4-8.
- CHURCH, J.A., WHITE, N.J., COLEMAN, R., LAMBECK, K., MITROVICA, J.X. (2004): Estimates of the regional distribution of sea level rise over the 1950-2000 period, Journal of Climate, 17 (13), 2609-2625.
- COE, A.L., CHURCH, K.D. (2005): Sea-level change. In: The Sedimentary Record of Sea-Level Change ed. Coe, A.L., Cambridge University Press, Cambridge, 34-55.
- ČEČUK, B., RADIĆ, D. (2005): Vela spila – višeslojno pretpovijesno nalazište – Vela Luka, otok Korčula, Centar za kulturu "Vela Luka", Vela Luka, pp 299.
- 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, 637-642, doi:10.1038/342637a0.

- FAIVRE, S., FOUACHE, E., (2003): Some tectonic influences on the Croatian shoreline evolution in the last 2000 years, *Zeitschrift für Geomorphologie*, N. F., 47/4, 521-537.
- FARIČIĆ, J. (2006): Otok Pašman na starim kartama. In: *Toponimija otoka Pašmana*, V. Skračić (ed.), 87-112.
- FARIČIĆ, J. (2007): Otok Ugljan na starim geografskim i pomorskim kartama. In: *Toponimija otoka Ugljana*, V. Skračić (ed.), 133-157.
- FORTIS, A. (1774): *Viaggio in Dalmazia dell'abate Alberto Fortis*, Presso Alvise Milocco, all'Apolline, Venice, Italy.
- FOUACHE, E., FAIVRE, S., DUFAURE, J.J., KOVAČIĆ, V. (2000): New observations on the evolution of the Croatian shoreline between Poreč and Zadar over the past 2000 years, *Zeitschrift für Geomorphologie*, N. F., suppl.-Bd. 122, 33-46.
- FOUACHE, E., FAIVRE, S., DUFAURE, J.J., KOVAČIĆ, V., TASSAUX, F., TRONCHE, P. (2004): Morska razina u rimsko doba na području Istre, *Vjesnik arheološkog muzeja u Zagrebu*, 3.s., XXXVII, 173-190.
- FOUACHE, E., FAIVRE, S., GLUŠČEVIĆ, S., KOVAČIĆ, V., TASSAUX, F., DUFAURE, J.J. (2005): Evolution of the Croatian shore line between Poreč and Split over past 2000 years, *Archaeologia Maritima Mediterranea*, 2, 116-134.
- FRITZ, F. (1972): Razvitak gornjeg toka rijeke Zrmanje, *Krš Jugoslavije*, 8, 1-16.
- GARAŠIĆ, M., 2006. Pronađeni i snimljeni najdublji speleothemi u moru (*Found and documented deepest speleothems in the sea*), *Spelaologia Croatica*, 7, p. 58.
- GOVORČIN, D. P., JURAČIĆ, M., HORVATINČIĆ, N., ONOFRI, V. (2001): Holocene sedimentation in the Soline Channel (Mljet Lakes, Adriatic Sea), *Natura Croatica*, 10/4, 247-258.
- HORVATINČIĆ, N., KRAJCAR BRONIĆ, I., OBELIĆ, B. (2003): Differences in the ^{14}C age, $\delta^{13}\text{C}$ i $\delta^{18}\text{O}$ of the Holocene tufa and speleothems in the Dinaric karst, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 193, 139-157, doi:10.1016/S0031-0182(03)00224-4.
- JURAČIĆ, M. (1992): Sedimentation in some Adriatic karstic river mouths (Are they estuaries or rias?), *Proceedings of the international symposium "Geomorphology and sea"*, Mali Lošinj, September 22-26 1992, Zagreb, 55-63.
- JURAČIĆ, M., PROHIĆ, E. (1991): Mineralogy, source of particles, and sedimentation in the Krka River estuary (Croatia), *Geološki vijesnik*, 44, 195-200.
- JURAČIĆ, M., BAKRAN-PETRICIOLI, T., PETRICIOLI, D. (2002): Cessation of Karstification Due to the Sea-level Rise? Case Study of the Y-Cave, Dugi otok, Croatia. U: *Evolution of Karst: From Prekarst to Cessation*, F. Grabovšek (ur.), Založba ZRC, Postojna – Ljubljana, 319-326.
- KOCHANSKY – DEVIDÉ, V. (1964): *Paleozoologija*, Školska knjiga, Zagreb, pp 452.
- LAMBECK, K., CHAPPELL, J. (2001): Sea level change through the Last Glacial Cycle, *Science*, 292, 679-686, doi: 10.1126/science.1059549.
- LAMBECK, K., PURCELL, A. (2005): Sea-level change in Mediterranean Sea since the LGM: model predictions for tectonically stable areas, *Quaternary Science Reviews*, 24, 1969-1988, doi:10.1016/j.quascirev.2004.06.025.
- LAMBECK, K., ESAT, T.M., POTTER, E.K. (2002): Links between climate and sea level for the past three million years, *Nature*, 419, 199-206, doi:10.1038/nature01089.
- LAMBECK, K., PURCELL, A., FUNDER, S., KJÆR, K.H., LARSEN, E., MÖLLER, P. (2006): Constraints on the Late Saalian to early Middle Weichselian ice sheet of Eurasia from field data and rebound modelling, *Boreas*, 35, 539-575, doi: 10.1080/03009480600781875.
- LOWE, J.J., WALKER, M.J.C., (1998): *Reconstructing Quaternary environments*. 2nd ed., Longman, Essex, pp 446.
- MALEZ, M. (1981): Ambroz Haračić i današnja istraživanja spilja na otoku Lošinju, *Zbornik radova o prirodoslovcu Ambrozu Haračiću*, Zagreb, 129-149.
- MALEZ, M., BOŽIČEVIĆ, S. (1965): The Medvjeda pećina (Bear Cave) on Lošinj island, A rare case of submerged cave. *International Speleological Conference, Brno, 1964, Problems of Speleological Research*, Prague, 211-216.

- MALEZ, M., RABEDER, G. (1984): Neues Fundmaterial von Kleinsäugetern aus der altpleistozänen Spaltenfüllung Podumci 1 in Norddalmatien (Kroatien, Jugoslawien), *Beiträge zur Paläontologie*, 11, 439-510.
- MALEZ, M., LENARDIĆ-FABIĆ, J. (1988): New subspecies of the southern elephant (*Mammuthus meridionalis adriacus* n. ssp.) from the bottom of the Adriatic Sea (Croatia, Yugoslavia), *Palaeontologia Jugoslavica*, 37, 1-36.
- MALEZ, M., SLIPEČEVIĆ, A., SRDOČ, D. (1979): Određivanje starosti metodom radioaktivnog ugljika kvartarnim naslagama na nekim lokalitetima u Dinarskom kršu, *Rad JAZU*, 383, Razred za prirodne znanosti, 18, 227-271.
- MAMUŽIĆ, P., NEDELA – DEVIDE, D. (1963): Osnovna geološka karta SFRJ 1:100000, list Biograd (Basic geological map of SFRJ 1:100000, Biograd Sheet).– Inst. za geol. istraž., Zagreb, Sav. geol. zavod, Beograd.
- MARJANAC, T., MARJANAC, LJ. (2000): Glacioisostatic rebound of external Dinarides, *Abstracts PANCARDI 2000*, Dubrovnik, *Vijesti Hrvatskog geološkog društva*, 37/3, 77-78.
- ORLIĆ, M., PASARIĆ, M. (1994): Vodostaj Jadranskog more i globalne klimatske promjene, *Pomorski zbornik*, 32, 481-501.
- ORLIĆ, M., PASARIĆ, M. (2000): Sea-level changes and crustal movement recorded along the east Adriatic coast, *Il Nuovo Cimento*, 23, C, 351-364.
- PAUNOVIĆ, M., RABEDER, G. (1996): Die altpleistozänen Kleinsäugerfaunen Razvodje und Tatinja draga in Süd-Kroatien, *Beiträge zur Paläontologie*, 21, 69-84.
- PAUNOVIĆ, M., RABEDER, G. (2000): Paleoecological Analysis of the Pleistocene Vertebrate Fauna from Razvodje and Tatinja draga (Croatia), *Beiträge zur Paläontologie*, 25, 87-94.
- PAUNOVIĆ, M., JAMBREŠIĆ, G., BRAJKOVIĆ, D., MALEZ, V., MAUCH LENARDIĆ, J. (2001): Last Glacial Settlement of Croatia: Catalogue of fossil sites dated to the OIS 2 & 3, *Acta Geologica*, 26/2, 27-70.
- 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, 3322-3337, doi:10.1016/j.quascirev.2006.04.010 .
- PIRAZZOLI, P.A. (2000): *Sea-Level Changes – The Last 2000 Years*, Wiley & Sons Ltd, Chichester, pp 211.
- POTTER, E.K., LAMBECK, K. (2004): Reconciliation of sea-level observations in the West North Atlantic during the last glacial cycle. *Earth and Planetary Science Letters*, 217 (1-2), 171-181, doi:10.1016/S0012-821X(03)00587-9.
- PRELOGOVIĆ, E., PRIBIČEVIĆ, B., IVKOVIĆ, Ž., DRAGIČEVIĆ, I., BULJAN, R., TOMLJENIĆ, B. (2003): Recent structural fabric of the Dinarides and tectonically active zones important for petroleum-geological exploration in Croatia, *Nafta*, 55 (4), 155-161.
- SUIĆ, M. (1952): Iskanjanja rimske vile u Maloj Proversu, *Vjesnik za arheologiju i historiju dalmatinsku*, LIV, 174-188.
- SURIĆ, M. (2006): Late Pleistocene – Holocene palaeoenvironmental changes – records from submerged speleothems from the Eastern Adriatic Sea (Croatia). PhD thesis, Faculty of Science, University of Zagreb, pp 213, Zagreb, (in Croatian).
- SURIĆ, M., JURAČIĆ, M., HORVATINČIĆ, N. (2004): Comparison of ^{14}C and $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ dating of speleothems from submarine caves in the Adriatic Sea (Croatia), *Acta Carsologica*, 33/2, 239-248.
- SURIĆ, M., JURAČIĆ, M., HORVATINČIĆ, N., KRAJCAR BRONIĆ, I. (2005a): Late Pleistocene - Holocene sea-level rise and the pattern of coastal karst inundation – records from submerged speleothems along the Eastern Adriatic Coast (Croatia), *Marine Geology*, 214, 163-175, doi:10.1016/j.margeo.2004.10.030.
- SURIĆ, M., LONČARIĆ, R., ČUKA, A., FARIČIĆ, J. (2007): Geological issues in Alberto Fortis' *Viaggio in Dalmazia* (1774), *Comptes rendus – Geoscience*, 339/9, 640-650, doi: 10.1016/j.crte.2007.07.006.
- SURIĆ, M., RICHARDS, D.A., HOFFMANN, D.L., TIBLJAŠ, D., JURAČIĆ, M. (2009): Sea-level change during MIS 5a based on submerged speleothems from the eastern Adriatic Sea (Croatia), *Marine Geology*, 262, 62-67, doi: 10.1016/j.margeo.2009.03.005.
- ŠEGOTA, T. (1968): Morska razina u holocenu i mlađem dijelu Würma, *Geografski glasnik*, 30, 15-39.

- ŠEGOTA, T. (1976): Promjena razine Jadranskog mora prema podacima mareografa u Bakru i Splitu, *Geografski glasnik*, 38, 301-312.
- ŠEGOTA, T. (1982): Razina mora i vertikalno gibanje dna Jadranskog mora od ris-virmskog interglacijala do danas, *Geološki vjesnik*, 35, 93-109.
- ŠEGOTA, T., FILIPČIĆ, A. (1991): Arheološki i geološki pokazatelji holocenskog položaja razine mora na istočnoj obali Jadranskog mora, *Rad HAZU* 458/25, 149-172.
- TEŠIĆ, M. (1958): O postdiluvijalnom pozitivnom pomeranju obalske linije na istočnoj obali Jadranskog mora, *Hidrografski godišnjak 1956.-1957.*, 153-162.
- TSIMPLIS, M.N., BAKER, T.F. (2000): Sea level drop in the Mediterranean Sea: An indicator of deep water salinity and temperature changes?, *Geophysical Research Letters*, 27, 12, 1731-1734.
- VRHOVEC, T., MIHEVC, A., LAURITZEN, S.E., LUNDBERG, J. (2001): O starosti potopljenih stalaktitov v jami pri otočku Galiola, Dalmacija, Hrvatska, *Naše jame*, 43, 31-36.
- WUNSAM, S., SCHMIDT, R., MÜLLER J. (1999): Holocene lake development on two Dalmatian lagoons (Malo and Veliko Jezero, Isle of Mljet) in respect to changes in Adriatic sea level and climate, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 146, 251-281.

