

## Oscilacije inercijalnog perioda u sjevernom Jadranu

*Nenad Leder, Marijan Ferenčak i Zoran Vučak*

*Hidrografski institut JRM, Split, Jugoslavija*

*Primljeno 13. lipnja 1986., u konačnom obliku 20. ožujka 1987.*

Od 1978. godine Hidrografski institut JRM organizira kontinuirana mjerenja morskih struja na bušačkoj platformi za istraživanje nafte „Panon”. Postojanje oscilacija inercijalnog perioda zapaženo je samo u ljetnoj sezoni kada se subtropski pojas visokog tlaka povlači zbog intenzivnih ciklonalnih poremećaja koji putuju prema Jadranskom moru. Inercijalne oscilacije su neuravnotežena gibanja u stratificiranom moru. Pojavljuju se izvan obalnog rubnog pojasa, a nastaju pod utjecajem nestacionarnog vjetra. U ovom radu ispitivane su inercijalne oscilacije u kolovozu 1985. godine, kada je platforma „Panon” bila locirana u sjevernom Jadranu. Na podatke morskih struja primijenjena je rotaciona spektralna analiza. Maksimumi energije u spektru nalaze se na lokalnoj inercijalnoj frekvenciji u anticiklonalnom dijelu spektra na tri dubine. Energija maksimuma u površinskom sloju je za skoro red veličine veća od maksimuma u srednjem i pridnenom sloju. Fazni pomak od oko  $180^\circ$  između površinskog i dubljih slojeva uočen je u svim slučajevima kada su se pojavile inercijalne oscilacije. Promjena faze dešava se vjerojatno u termoklini. Dok puše olujni vjetar, srednje satne brzine struja dostižu vrijednosti od oko  $60 \text{ cms}^{-1}$ .

### Inertial – period oscillations in the North Adriatic

Since 1978, Hydrographic Institute of the Yugoslav Navy has organised continuous meteorological and oceanographic measurements at the oil-drilling platform „Panon”. The existence of inertial-period oscillations was observed only in summer season when sub-tropical high pressure disappears and cyclonic disturbances travel towards the Adriatic Sea. Inertial oscillations are unbalanced motions in stratified sea. They are generated by the temporal variations of the wind and occur outside the coastal boundary layer during geostrophic adjustment process. In this paper inertial oscillations were examined in August, 1985, when the platform „Panon” was located in the North Adriatic. Current data were subjected to the rotary spectral analysis. The most prominent peaks are centered at the local inertial frequency in the clockwise part of the spectrum at three depths. The inertial peak in the surface layer was almost one order of magnitude larger than the peaks at 25 and 63 meters depth. The  $180^\circ$  phase-lag between the surface and deeper layers was observed. Zero-crossing was probably in the termocline. During the outset of the stormy wind, mean hourly current speed reached value of about  $60 \text{ cms}^{-1}$ .

## 1. Uvod

Napredak tehnike, posebno elektronike, omogućio je da se u redovnoj oceanografskoj praksi upotrebljavaju elektronski strujomjeri s velikom autonomnošću registracije podataka. Njihova upotreba omogućila je primjenu spektralne analize na duže vremenske nizove podataka morskih struja. Na taj način došlo se do karakteristika spektra strujnog polja u široj frekvencijskoj domeni. Iz spektra strujnog polja može se zaključiti kakav je odgovor strujnog polja na različite procese koji generiraju struje, a pri tom je veoma važno ispitati utjecaj vjetra.

Usporedba spektara strujnog polja obalnog rubnog pojasa i otvorenog Jadranskog mora je pokazala da se u obalnom području energija od vjetra većim dijelom pretvara u dugoperiodičke kvazigeostrofičke oscilacije, dok se u području otvorenog mora veći dio energije primljene od vjetra pretvara u inercijalne oscilacije (Gačić, 1983).

Obalni rubni pojas definirao je Csanady (1975). Dimenzije tog pojasa određene su vertikalnom raspodjelom gustoće (baroklini radijus deformacije) odnosno dubinom (barotropni radijus deformacije). Proračunom barotropnog i baroklinog radijusa deformacije izlazi da je ljeti, kada je more stratificirano, obalni rubni pojas reda veličine 10 km, a zimi kada je more vertikalno homogeno reda veličine 100 km. Očekuje se da se inercijalne oscilacije u Jadranskom moru javljaju samo ljeti, jer zimi obalni rubni pojas ima dimenzije koje odgovaraju dimenzijama Jadranskog mora. Ove teorijske pretpostavke eksperimentalno je potvrdio Vučak (1985).

Inercijalne oscilacije su vezane za ravnotežu ubrzanja i Coriolisovog člana u jednadžbama gibanja. Dakle, one nastaju na otvorenom moru dok se nije uspostavio horizontalni gradijent tlaka, odnosno, one su prijelazna faza od stanja mirovanja prema uspostavljanju geostrofičkog strujanja. Proces između stanja mirovanja i uspostavljanja geostrofičke ravnoteže naziva se geostrofičko uravnotežavanje.

Postojanje inercijalnih oscilacija je zapaženo ne samo u područjima svjetskih oceana, nego i u uzemnim morima i velikim jezerima (Pollard, 1970; Gonella, 1971). Inercijalne oscilacije su opažene u nekoliko navrata i u Jadranskom moru (Gačić, 1980; Gačić i Vučak, 1982; Vučak, 1985).

Eksperimentalni rezultati pokazuju da je signal na inercijalnoj frekvenciji u spektru strujnog polja mora izrazito jak (Gonella, 1971; Millot i Crépon, 1981).

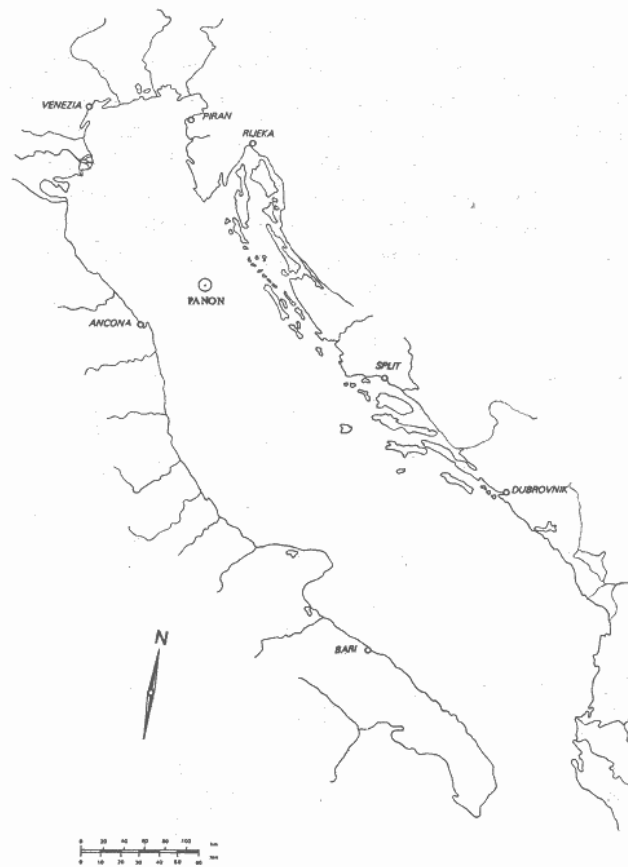
Nestacionarni vjetar je osnovni uzrok nastanka inercijalnih oscilacija (Pollard, 1970; Gonella, 1971; Pollard, 1980). Raspodjela energije dobivene od vjetra između geostrofičkog strujanja i inercijalnih oscilacija, kao i amplituda inercijalnih oscilacija, zavise o karakterističnoj vremenskoj skali promjena u polju vjetra (Veronis, 1956). Ako vjetar djeluje na more u obliku trenutačnog impulsa, oko 75 % energije dobivene od vjetra troši se na inercijalne oscilacije, a kada je vremenska skala promjena u polju vjetra reda veličine polovine inercijalnog perioda oko 51 % energije vjetra apsorbira se inercijalnim oscilacijama (Veronis, 1956).

Nekoliko procesa djeluje na gušenje inercijalnih oscilacija: utjecaj lokalnog vjetra, horizontalna i vertikalna disperzija inercijalnih valova i pretvaranje inercijalnih oscilacija u oscilacije kraćih perioda pod utjecajem turbulencije (Pollard, 1980).

Cilj ovog rada je utvrđivanje karakteristika inercijalnih oscilacija u sjevernom Jadranskom moru s obzirom na njihovu važnost u dinamici tog akvatorija.

## 2. Materijali i metode

U kolovozu 1985. godine platforma „Panon” bila je locirana u sjevernom Jadranu (slika 1). Morske struje su se mjerile u intervalima od 10 minuta autonomnim elektronskim strujomjerima „Aanderaa RCM-4” na dubinama 5, 25 i 63 m. Dubina do dna iznosila je 68 m.



Slika 1. Položaj platforme „Panon” u kolovozu 1985. godine.

Figure 1. Location of the oil-drilling platform „Panon” in August, 1985.

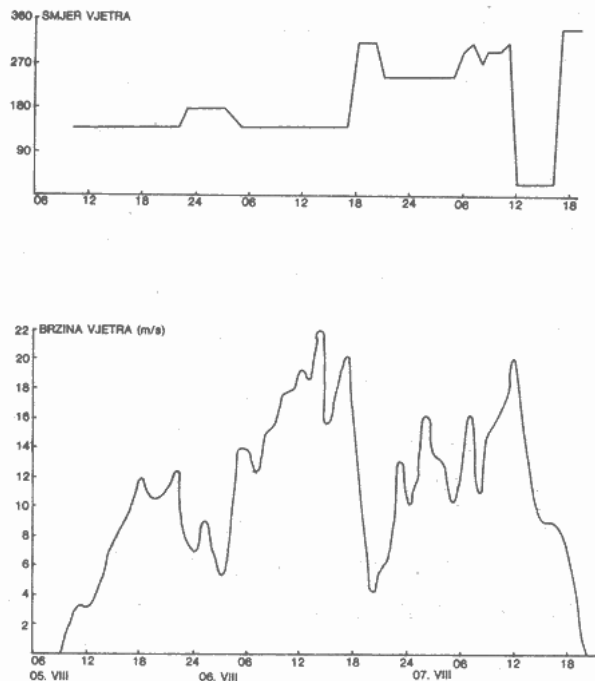
Vektor se vjetra registrirao kontinuirano anemografom SIAP VT-1450 koji se nalazio na visini otprilike 35 m iznad mora. Vertikalni profil temperature mora mjerio se tri puta dnevno u klimatološkim terminima.

Na podatke morskih struja primijenjena je rotaciona spektralna analiza (Gonella, 1972). Procjena spektra snage je računata za 8 stupnjeva slobode upotrebom Blackman-

-Tukey metode. Da bi se dobile detaljnije karakteristike morskih struja, računane su satne rezultante koje su bile osnova za prikazivanje vremenskih nizova vektora morskih struja u točki, na pravcu i u obliku hodograma (progresivni vektorski dijagram) na svim dubinama. Također su se računale sjeverna (N) i istočna (E) komponenta satnih vektora morskih struja.

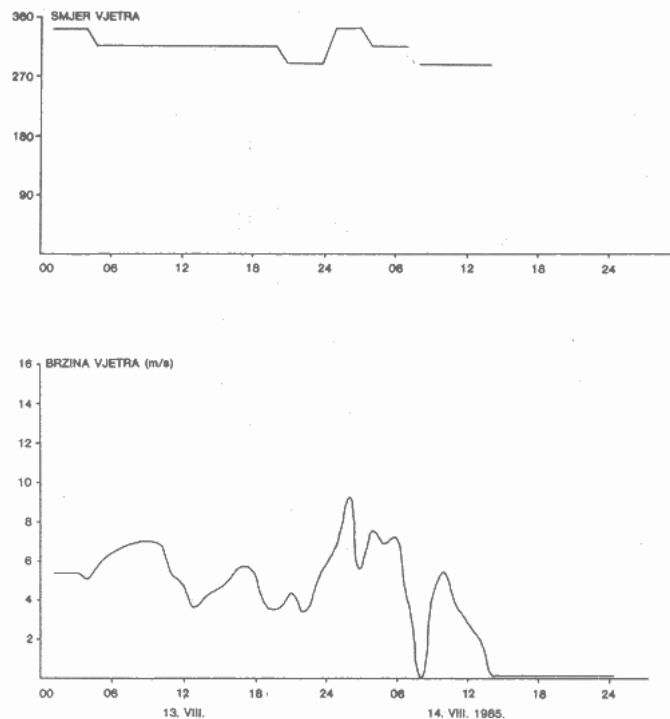
### 3. Rezultati

Obilježje vremenskih prilika na području sjevernog Jadrana u kolovozu 1985. godine čine dva intenzivna ciklonalna prodora, početkom i koncem mjeseca. Za vrijeme ovih ciklonalnih prodora brzine vjetra su dostizale veoma velike vrijednosti, tako da je maksimalni trenutačni udar 6. 08. 1985. godine iznosio  $37,5 \text{ ms}^{-1}$ , a 27. 08. 1985. godine  $39,7 \text{ ms}^{-1}$ , što su ekstremne vrijednosti brzine vjetra izmjerene na platformi „Pannon” u 1985. godini. Osim velike brzine, karakteristike vjetra bile su i oscilacije različitih perioda koje su se najčešće dešavale s naglom promjenom smjera vjetra (slike 2a i 2c).



Slika 2a. Vremenski niz smjera i brzine vjetra za vremensko razdoblje 5 – 7. 08. 1985. godine kada su opažene najjače inercijalne oscilacije.

Figure 2a. Wind speed and direction time series for the period from 5 to 7 August, 1985, when the strongest inertial oscillations were observed.



Slika 2b. Vremenski niz smjera i brzine vjetra za vremensko razdoblje 13 – 14. 08. 1985. godine.

Figure 2b. Wind speed and direction time series for the period from 13 to 14 August, 1985.

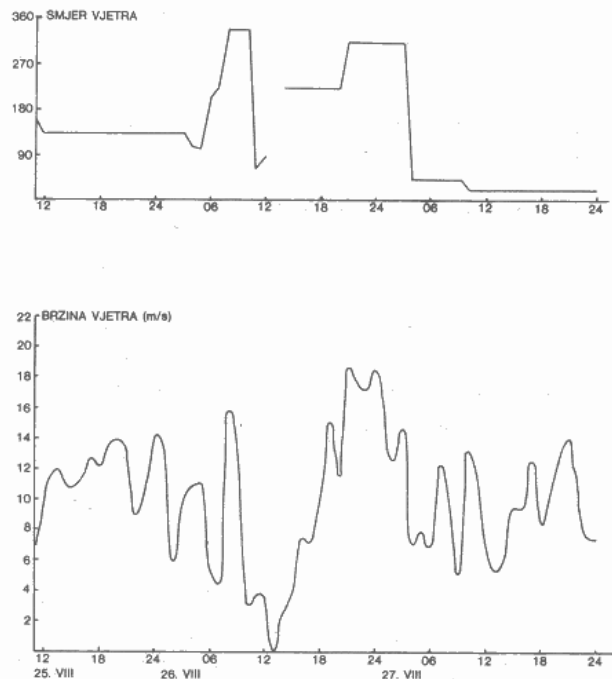
Kao što je već prethodno istaknuto, vjetar ovakvih karakteristika je osnovni uzrok nastanka inercijalnih oscilacija u strujnom polju u moru. Prisustvo inercijalnih oscilacija u strujnom polju sjevernog Jadrana u kolovozu 1985. godine vidi se iz slika 3 i 4 gdje su prikazani N i E komponenta i hodogram morskih struja za vremensko razdoblje od 27. 07. 1985. do 06. 09. 1985. godine. Osim inercijalnih oscilacija prisutne su i plimne oscilacije u vremenu između dva ciklonalna prodora. Anticiklonalna rotacija vektora morskih struja (u smjeru kazaljke na satu) za vrijeme oscilacija inercijalnog perioda najbolje se vidi iz hodograma (slika 4).

Na slici 5 prikazani su rotacioni spektri vremenskog niza morskih struja od 1. 08. 1985. do 15. 08. 1985. godine za sve tri dubine. Negativna frekvencija odnosi se na anticiklonalnu, a pozitivna na ciklonalnu rotaciju vektora morskih struja. Najveća energija nalazi se na lokalnoj inercijalnoj frekvenciji (0,0580 cph) u anticiklonalnom dijelu spektra na svim dubinama. Energija se smanjuje s dubinom zbog toga što je uzrok nastajanja vjetar. U spektru se također uočavaju maksimumi na plimnim frekvencijama, ali su oni znatno manje energije nego oscilacije na inercijalnim frekvencijama. Plimne oscilacije javljaju se na pozitivnim i negativnim frekvencijama za razliku od inercijalnih oscilacija koje se

javljaju samo na negativnim frekvencijama. Oko frekvencije nula javlja se također dosta izraziti maksimum koji, međutim, nema fizikalnog značenja jer iz vremenskog niza nije oduzet trend.

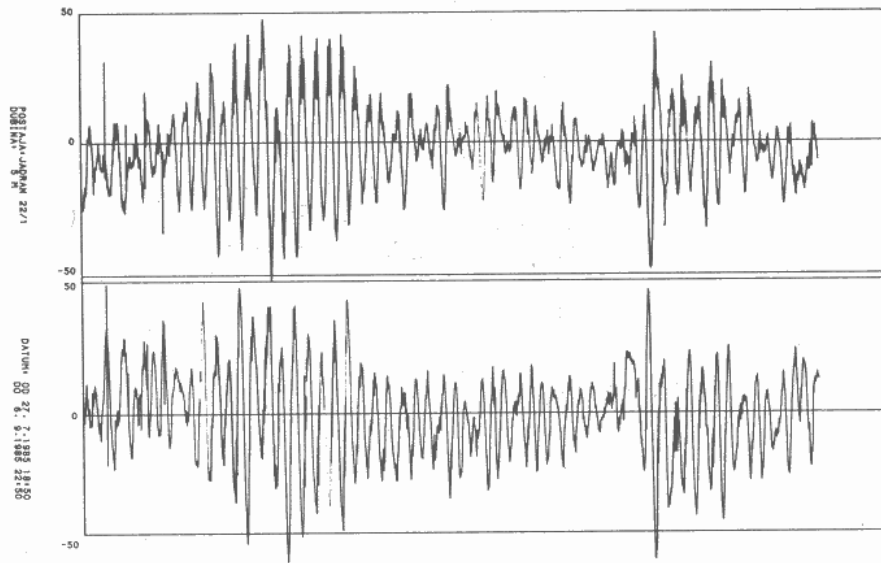
Za vrijeme prvog ciklonalnog prodora, početkom kolovoza, nestacioniran vjetar impulsivnog karaktera počeo je puhati 2. 08. 1985. godine, što je odmah uzrokovalo inercijalne oscilacije (slika 6). Vjetar ovakvih karakteristika je nastavio puhati sve do 7. 08. 1985. godine s najjačim impulsima 6. i 7. 08. 1985. godine (slika 2a). Amplituda inercijalnih oscilacija povećava se s povećanjem brzine vjetra, tako da na početku te situacije iznosi oko  $25 \text{ cms}^{-1}$ , a na kraju oko  $60 \text{ cms}^{-1}$  (slika 6 i 7). Od 8. do 25. 08. 1985. godine vjetar je pretežno malih brzina, osim kratkotrajnih jačih impulsa 10. i 11. 08. 1985. i relativno konstantnog vjetra (i po smjeru i po brzini) 13. i 14. 08. 1985. godine (slika 2b). Međutim, inercijalne oscilacije su se zadržale u površinskom sloju sve do 16. 08. 1985. godine (slike 6, 7, 8 i 9).

O karakteristikama vjetra i intenzitetu termokline ovisi koliko brzo i koliko duboko će se proširiti inercijalne oscilacije. Na početku situacije 2. 08. 1985. godine inercijalne oscilacije su se za vrijeme od oko 10 sati proširile do dubine 25 m, ali ne i do 63 m.



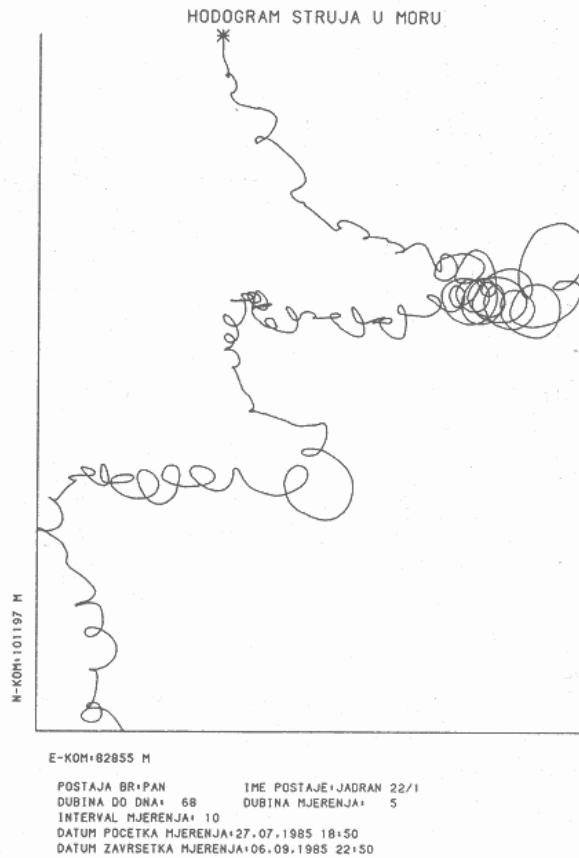
Slika 2c. Vremenski niz smjera i brzine vjetra za vremensko razdoblje 25 – 27. 08. 1985. godine.

Figure 2c. Wind speed and direction time series for the period from 25 to 27 August, 1985.



Slika 3. Sjeverna (N) i istočna (E) komponenta srednjih satnih vektora morskih struja na dubini 5 m za vremensko razdoblje 27. 7 – 6. 9. 1985. godine. Inercijalne oscilacije dominiraju početkom i koncem kolovoza.

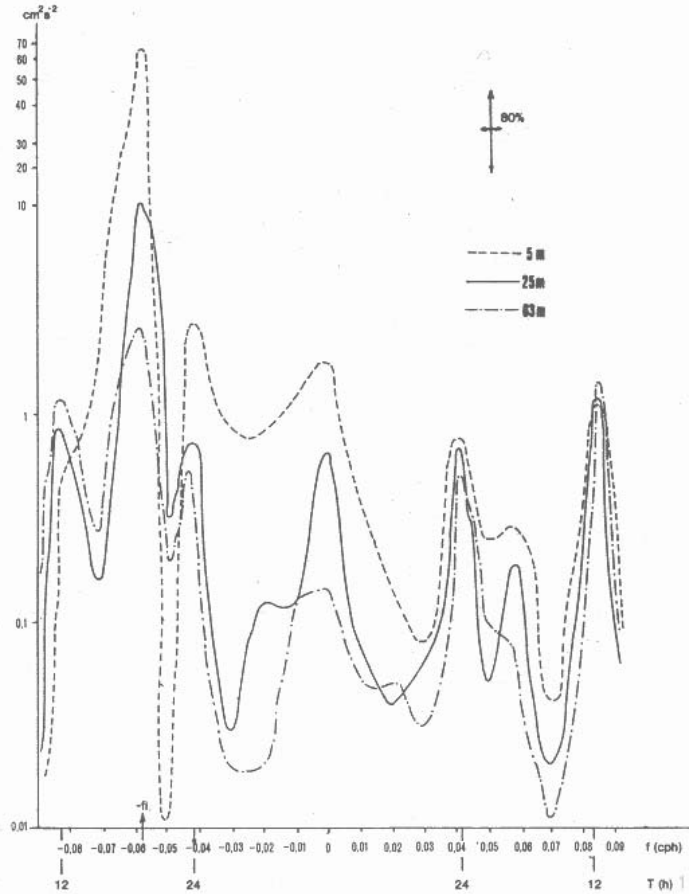
Figure 3. North (N) and east (E) components of the mean hourly current vector time series from July 27 to September 6, 1985, at the depth of 5 meters. Inertial oscillations can be seen dominating the record in the beginning and in the end of August.



Slika 4. Hodogram morskih struja na dubini 5 m za vremensko razdoblje 27. 7 – 6. 9. 1985. godine.

Figure 4. Progressive vector diagram at the depth of 5 meters for the period from July 27 to September 6. 1985.





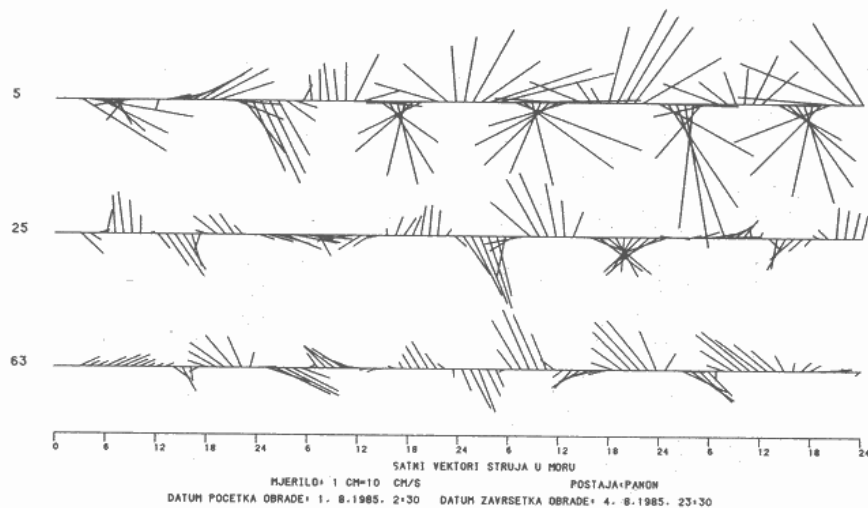
Slika 5. Rotacioni spektri vektora morskih struja za dubinu 5, 25 i 63 m u vremenskom razdoblju 1 – 15. 08. 1985. godine.

Figure 5. Rotary current spectra for time-series from August 1 to August 15, 1985, at depths of 5, 25 and 63 meters.

Jaki impulsi vjetra su 5. 08. 1985. godine proširili već postojeće inercijalne oscilacije u površinskom sloju do dubine 25 m za vrijeme od oko 2–3 sata. Još jači impulsi vjetra 6. i 7. 08. 1985. godine (slika 2a) su proširili već postojeće inercijalne oscilacije u površinskom i srednjem sloju za vrijeme od oko 1–2 sata do dubine 63 m (slike 6 i 7).

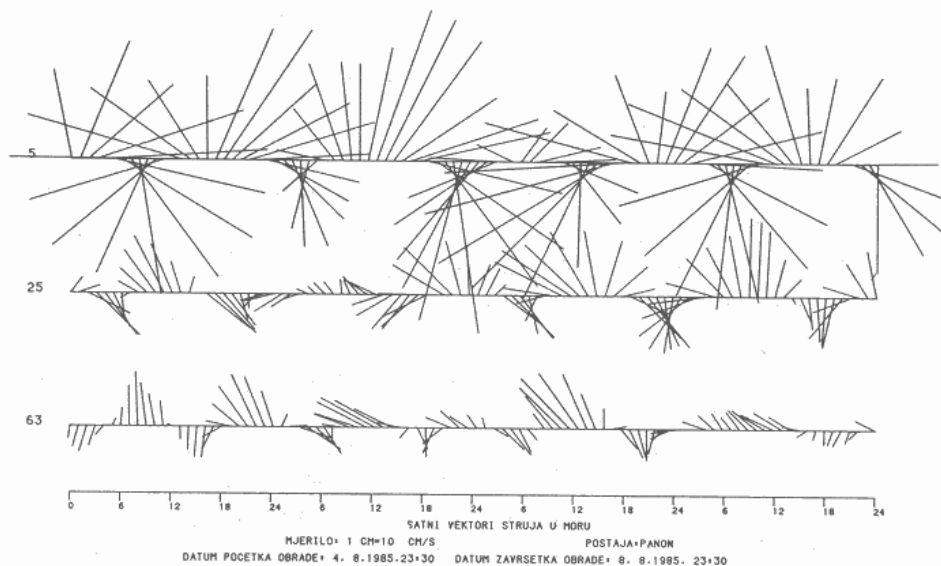
Maksimalne amplitude inercijalnih oscilacija u površinskom sloju (5 m) iznose oko  $60 \text{ cm s}^{-1}$ , u srednjem sloju (25 m) oko  $40 \text{ cm s}^{-1}$ , a u pridnom sloju (63 m) oko  $25 \text{ cm s}^{-1}$ .

U vremenskom razdoblju od 13. do 16. 08. 1985. godine brzine struja su u srednjem sloju najčešće veće od onih u površinskom sloju, najvjerojatnije zbog toga što je 13. i 14. 08. 1985. godine puhao umjeren vjetar konstantan po smjeru i brzini (slika 2b) koji je uzrokovao gušenje inercijalnih oscilacija u površinskom sloju. Istovremeno u pridnom



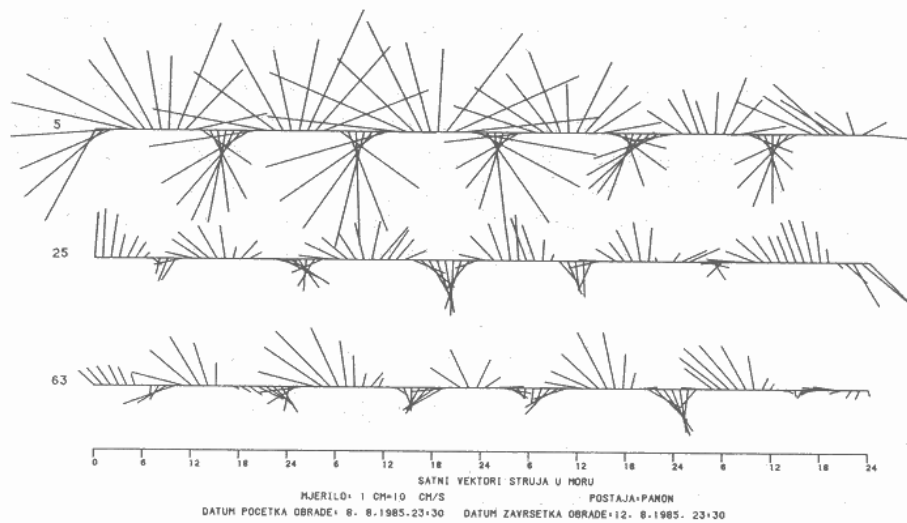
Slika 6. Srednji satni vektori morskih struja za vremensko razdoblje 1 – 4. 08. 1985. godine.

Figure 6. Mean hourly current vector time-series for the period from August 1 to August 4, 1985.



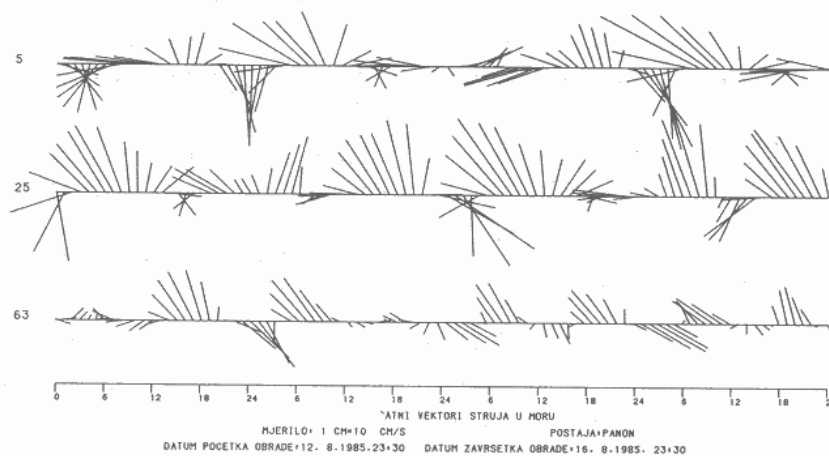
Slika 7. Srednji satni vektori morskih struja za vremensko razdoblje 4 – 8. 08. 1985. godine.

Figure 7. Mean hourly current vector time-series for the period from August 4 to August 8, 1985.



Slika 8. Srednji satni vektori morskih struja za vremensko razdoblje 8 – 12. 08. 1985. godine.

Figure 8. Mean hourly current vector time-series for the period from August 8 to August 12, 1985.

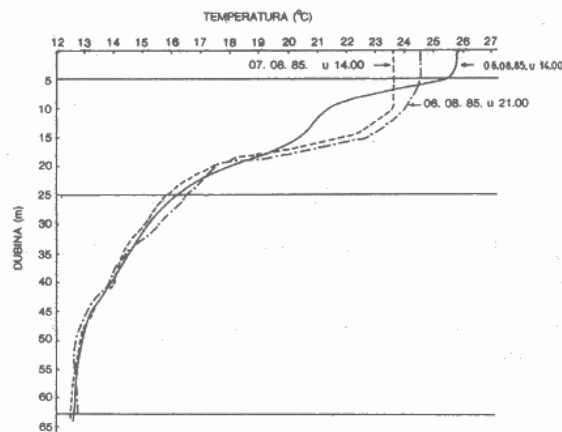


Slika 9. Srednji satni vektori morskih struja za vremensko razdoblje 12 – 16. 08. 1985. godine.

Figure 9. Mean hourly current vector time-series for the period from August 12 to August 16, 1985.

sloju prevladavaju plimne oscilacije, jer su se inercijalne oscilacije ugušile vjerojatno zbog utjecaja trenja u dno.

Na slikama 6, 7, 8 i 9 može se uočiti fazni pomak inercijalnih oscilacija između površinskog i dubljih slojeva. Inercijalne oscilacije na dubinama 25 i 63 m su najčešće u fazi, a ponekad i među njima postoji mali fazni pomak. Između površinskog i dubljih slojeva postoji fazni pomak od oko  $180^{\circ}$ . To znači da se inercijalne oscilacije mogu opisati dvo-slojnim modelom. Promjena faze dešava se na dubini između 5 i 25 m. Pretpostavlja se da se promjena faze dešava u sloju termokline (slika 10) koja u to doba godine oštro odvaja



Slika 10. Vertikalni profili temperature mora za vrijeme najjačih inercijalnih oscilacija. Dubine mjerenja struja označene su horizontalnim linijama.

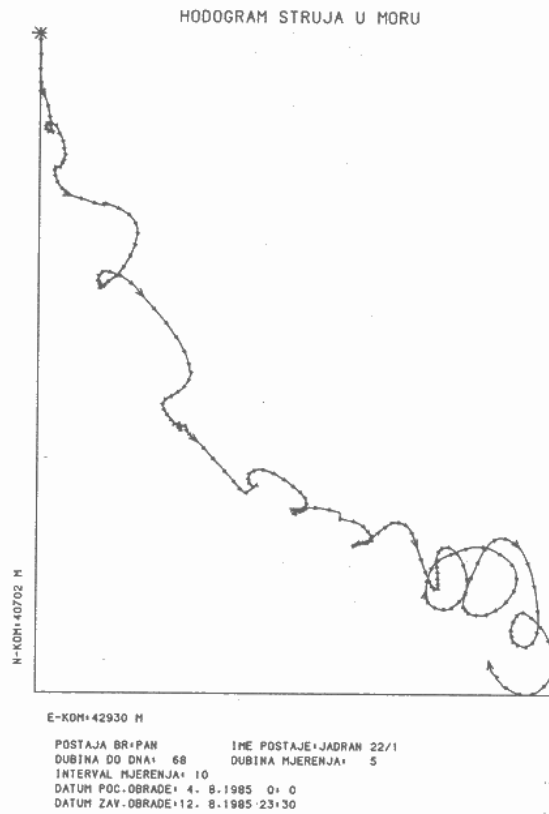
Figure 10. Vertical temperature profiles for the period with the strongest inertial oscillations. Current measurement depths are denoted by horizontal lines.

topli površinski miješani sloj od pridnenog hladnog sloja. Slika 10 također pokazuje tonjenje miješanog sloja i smanjenje gradijenta temperature u termoklini kao rezultat djelovanja vjetra.

Hodogrami morskih struja su nacrtani za različita vremenska razdoblja. Vidi se da dominira anticiklonalna rotacija vektora struja superponirana na srednje strujanje. Dok je utjecaj vjetra jak, prevladava translatorno gibanje nad rotacionim, a kad vjetar oslabi prevladava rotaciono gibanje nad translatornim (slike 11 i 12).

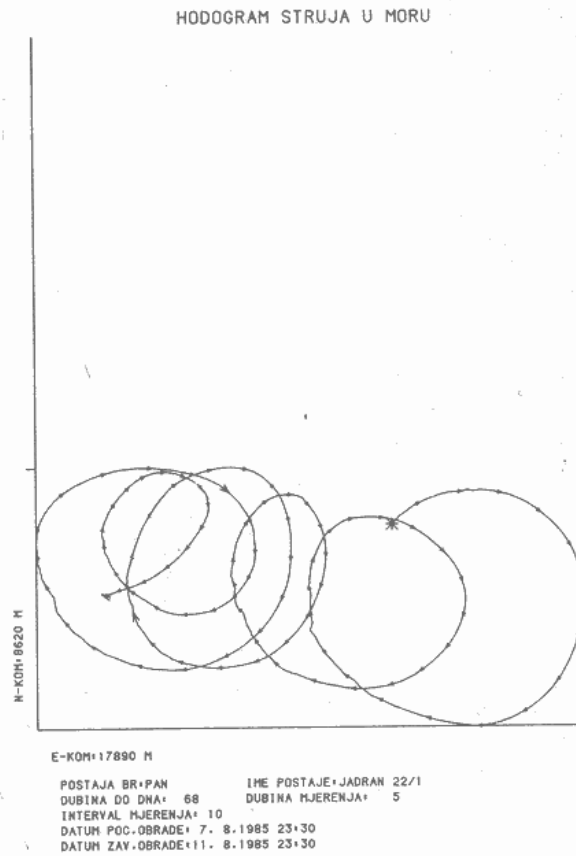
Vremenski niz satnih rezultanti morskih struja iz razdoblja najintenzivnijih inercijalnih oscilacija prikazan u točki (polarni dijagram) pokazuje da je rotacija vektora struje u površinskom sloju pravilna, dok su u srednjem i pridnenom sloju oscilacije polarizirane (slika 13).

Ciklonalni poremećaj koncem kolovoza je uzrokovao vjetar drugačijih karakteristika od onog početkom kolovoza (slika 2 c). Vjetar je bio manjih brzina i kraćih perioda što je uzrokovalo inercijalne oscilacije manjih amplituda u površinskom i srednjem sloju (slika 14). Pri tome se inercijalni impuls pojavio u pridnenom sloju veoma kratko.



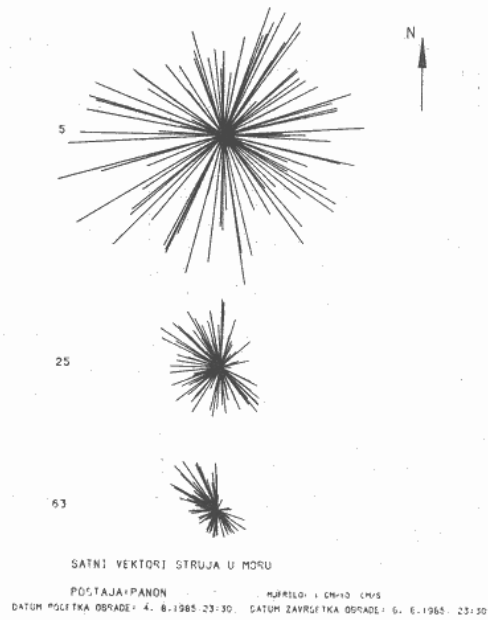
Slika 11. Hodogram morskih struja na dubini 5 m za vremensko razdoblje 4 – 12. 08. 1985. godine. Translatorno gibanje dominira kada je utjecaj vjetrova jak.

Figure 11. Progressive vector diagram at the depth of 5 meters for the period from August 4 to August 12, 1985. Translatory motion dominates when the wind influence is strong.



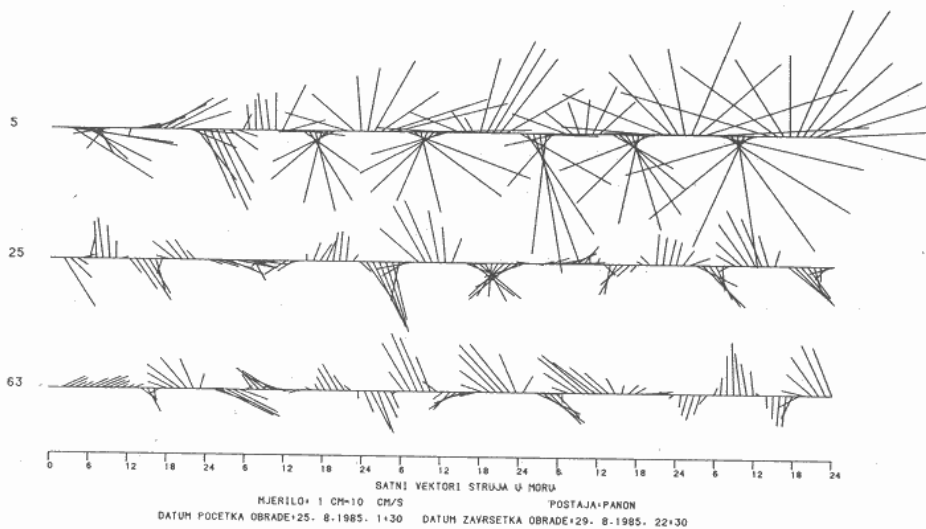
Slika 12. Hodogram morskih struja na dubini 5 m za vremensko razdoblje 7 – 11. 08. 1985. godine. Rotaciono gibanje dominira kada je utjecaj vjetra slab.

Figure 12. Progressive vector diagram at the depth of 5 meters for the period from August 7 to August 11, 1985. Rotary motion (clockwise) dominates when the wind influence is weak.



Slika 13. Vremenski niz srednjih satnih vektora struja prikazan u točki za vrijeme najjačih inercijalnih oscilacija.

Figure 13. Mean hourly current vector time-series presented in the point for the period with strongest inertial oscillations.



Slika 14. Srednji satni vektori morskih struja za vremensko razdoblje 25 – 29. 08. 1985. godine.

Figure 14. Mean hourly current vector time-series for the period from August 25 to August 29, 1985.

Ako se usporede karakteristike vjetra kod prvog i drugog ciklonalnog prodora i karakteristike generiranih inercijalnih oscilacija, može se zaključiti da vjetar kraćih perioda i manjih brzina uzrokuje inercijalne oscilacije manjih amplituda do manjih dubina.

#### 4. Zaključak

U ovom radu je pokazano da nestacionaran vjetar impulsivnog karaktera na vremenskoj skali od nekoliko sati u pravilu uzrokuje u ljetnom periodu jake inercijalne oscilacije u području otvorenog mora sjevernog Jadrana.

Nestacionaran vjetar impulsivnog karaktera, koji uzrokuje inercijalne oscilacije, posljedica je ciklonalnih prodora koji na područje Jadranskog mora dolaze nakon dužeg utjecaja azorske anticiklone. Maksimum na inercijalnoj frekvenciji je veći od bilo kojeg maksimuma u spektru strujnog polja.

Dubina do koje se prenose inercijalne oscilacije, brzina prijenosa kao i njihova amplituda ovise o brzini vjetra i karakterističnoj vremenskoj skali u polju vjetra. Vjetar kraćih perioda i manjih brzina uzrokuje inercijalne oscilacije manjih amplituda koje će se sprije prenijeti do manjih dubina.

Dok je utjecaj vjetra jak, kod inercijalnih oscilacija prevladava translatorno gibanje nad rotacionim, a kad vjetar oslabi prevladava rotaciono gibanje nad translatornim.

Razlika faza između inercijalnih oscilacija na površini i inercijalnih oscilacija u sloju ispod termokline iznosi oko  $180^{\circ}$ . Promjena faze javlja se u termoklini koja se nalazi u sloju između 5 i 25 m.

Gušenje inercijalnih oscilacija uzrokovano je djelovanjem lokalnog vjetra stacioniranih karakteristika i trenja o dno.

#### Literatura

- Csanady, G. T. (1975): Circulation, diffusion and frontal dynamics in the coastal zone, *Journal of Great Lakes Research*, *1*, 18–32.
- Gačić, M. (1980): Some characteristics of the response of the Adriatic Sea coastal region to the atmospheric forcing. *Acta Adriatica*, *21*, 239–254.
- Gačić, M. (1983): Dugoperiodičke oscilacije u strujnom polju u Jadranu, Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, PMF, Beograd, 102 pp.
- Gačić, M. and Z. Vučak (1982): Note on inertial oscillations in the North Adriatic, *Bilješke-Notes*, No. 46, Institut za oceanografiju i ribarstvo, Split, 1–7.
- Gonella, J. (1971): A local study of inertial oscillations in the upper layers of the ocean, *Deep-Sea Research*, *18*, 775–788.
- Gonella, J. (1972): A rotary-component method for analysing meteorological and oceanographic vector time series, *Deep-Sea Research*, *19*, 833–846.
- Millot, C. and M. Crepon (1981): Inertial oscillations on the continental shelf of the Gulf of Lions – Observations and theory, *Journal of Physical Oceanography*, *11*, 639–657.



- Pollard, R. T. (1970): On the generation by winds of inertial waves in the ocean, *Deep-Sea Research*, *17*, 795-812.
- Pollard, R. T. (1980): Properties of Near-Surface Inertial Oscillations, *Journal of Physical Oceanography*, *10*, 385-398.
- Veronis, G. (1956): Partition of energy between geostrophic and non-geostrophic oceanic motions, *Deep-Sea Research*, *3*, 157-177.
- Vučak, Z. (1985): *Strujanje u Sjevernom Jadranu u vidu uzroka i posljedica*, Doktorska disertacija, Univerza Edvarda Kardelja u Ljubljani, Filozofska fakulteta, 272 pp.