

Kako meteorološki radari pomažu meteorolozima: Od prvog odraza do upozorenja na nevrijeme

Bojan Lipovščak



Lipovscak/Lakos

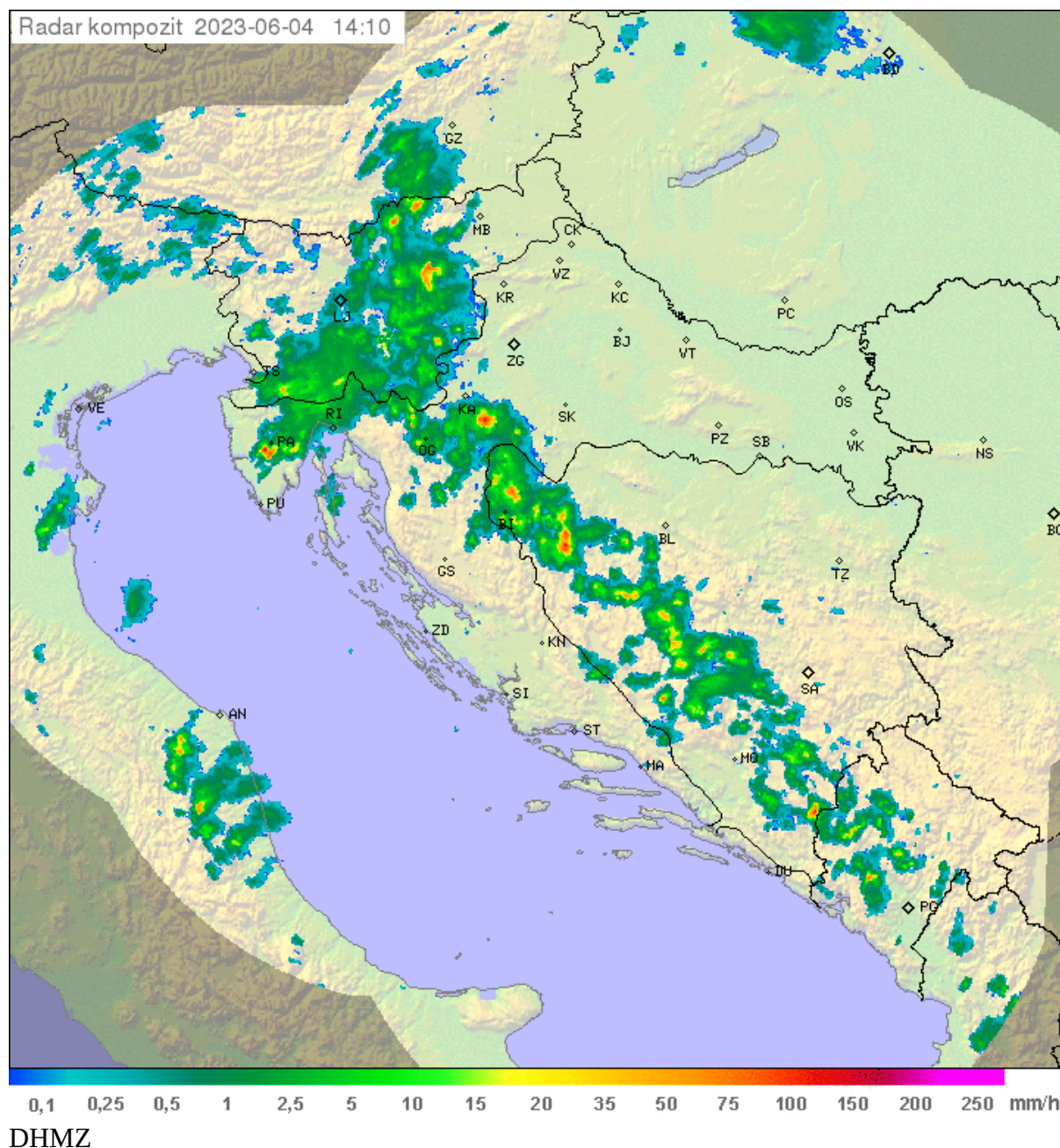
Sigurno ste čuli izraz "prošlo je ispod radara", ali tu nije riječ o meteorološkim radarima.

Meteorološki radar jedan je od najvažnijih alata za praćenje oborina, oluja i frontalnih sustava. On meteorolozima omogućuje da vide **gdje se oborina nalazi**, koliko je intenzivna, na kojoj se visini razvija i kamo se premješta — često mnogo prije nego što nevrijeme stigne do određenog područja.

Radar ne "snima" kišu, nego mjeri odraz

Riječ radar akronim je engleskog izraza Radio Detecting And Ranging. Osnovni princip rada temelji se na refleksiji elektromagnetskog zračenja. Radar u prostor šalje kratke impulse radiovalova, a zatim **osluškuje njihov povratni odraz**.

U atmosferi se radarski valovi odbijaju od kapljica kiše, pahuljica snijega, ledenih kristala i zrna tuče. Kada se signal vrati do radara, iz vremena potrebnog za njegov odlazak do cilja i povratak **može se izračunati udaljenost oborinske zone**. Budući da se elektromagnetski valovi šire približno brzinom svjetlosti, udaljenost se određuje iz polovice izmjenjenog vremena putovanja signala.



Radar istodobno određuje i smjer iz kojeg je signal stigao te se tako određuje položaj oborine u odnosu na radar. Meteorolozi na taj način dobivaju **preciznu sliku prostornog rasporeda oborinskih zona**. Iz uzastopnih mjerenja određuju se smjer i brzina premještanja oborinskih zona.

Što meteorolozi mogu doznati iz radarskih mjerenja?

Meteorološki radari mjere ili se iz njihovih podataka izračunavaju parametri ključni za analizu i prognozu vremena:

- vrstu oborine;
- intenzitet oborine;
- položaj i rasprostranjenost oborinskih zona;
- smjer i brzinu njihova premještanja;
- visinu oborinskih zona;
- brzinu i smjer vjetera iz uzastopnih mjerenja;
- brzinu i smjer gibanja čestica unutar oborinske zone upotrebom Dopplerova efekta;
- položaj izoliranih oluja, linija nestabilnosti, fronti i mogućih tornada.

Radarska antena okreće se oko vertikalne osi i tako mijenja azimut, odnosno smjer promatranja. Istodobno se može zakretati i po horizontalnoj osi, mijenjajući elevaciju, odnosno **visinu radarskog snopa**. Na taj se način ne promatra samo jedna ravnina, nego čitav volumen atmosfere iznad i oko radara.

Prostor koji radar promatra može se zamisliti kao valjak polumjera približno jednakog radnom dometu radara. Uobičajen domet meteoroloških radara je oko 230 kilometara, dok visina promatranog prostora može sezati do približno 20 kilometara. Računalnom obradom iz tog volumena izrađuju se horizontalni i vertikalni [presjeci atmosfere i oborinskih zona](#), a mogu se napraviti i trodimenzionalni prikazi oborinskog sustava.

PPI: radarska karta iz ptičje perspektive

Najpoznatiji prikaz radarskih podataka je PPI, odnosno Plan Position Indicator. Na takvom se prikazu radar nalazi u središtu slike, a oborinske zone raspoređene su oko njega u polarnom koordinatnom sustavu.

Gornji dio slike najčešće je **usmjeren prema sjeveru, poput kompasa**. Koncentrični krugovi pokazuju udaljenost od radara, dok se položaj oborine određuje kombinacijom udaljenosti i azimuta.

Intenzitet odraza prikazuje se skalom boja. Hladnije boje označavaju slabije odraze i manji intenzitet oborine, dok toplije boje upućuju na jače odraze. Na radarskim prikazima mogu se koristiti **vrijednosti refleksivnosti izražene u dBZ** ili preračunate vrijednosti radarske refleksije u količine oborine izražene u milimetrima na sat. Za sve meteorološke fanove: jedna litra kiše na površini od jednog četvornog metra je sloj vode debljine jedan milimetar, pa se u meteorologiji milimetri koriste za prikaz količine oborine.

Radarski se snop udaljavanjem od radara postupno podiže, odnosno udaljava od površine Zemlje zbog geometrije snopa, zakrivljenosti Zemlje i utjecaja atmosfere. Zato se na većim udaljenostima može dogoditi da **radar „gleda“ oborinu na većoj visini**, dok se oborina koja se nalazi pri tlu nalazi ispod radarskog snopa. Da bi se izbjegle takve grube pogreške, da ne kažemo da je oborina „prošla ispod radara“, koristi se mreža radarskih uređaja kojom je područje dvostruko i višestruko pokriveno te je gruba pogreška mjerenja na taj način svedena na minimum.

RHI i CAPPI otkrivaju visinu oborine

PPI prikazuje raspored oborine u približno horizontalnoj ravnini, ali u prognozi i analizi vremena važno je znati kako je oborina raspoređena po visini.

Za to se koristi **RHI, odnosno Range Height Indicator**. Antena ostaje usmjerena prema određenom azimutu, ali se mijenja elevacija, odnosno nagib antene. Tako nastaje vertikalni presjek oborinske zone. Na njemu se mogu analizirati udaljenost od radara, visina oborine te promjena intenziteta oborine po visini.

Takav prikaz posebno je koristan kod snažnih konvektivnih oblaka. Procjenjuje se koliko se visoko razvija oblak, **gdje se nalazi njegova najjača jezgra** i postoji li izraženo uzlazno strujanje te je li oblak tučonosan.

Da bi se radarska mjerenja više radara mogla usporediti, koristi se tehnika CAPPI, odnosno Constant Altitude Plan Position Indicator. To je prikaz oborine na jednoj odabranoj visini, [najčešće oko 1000 ili 2000 metara iznad tla](#). CAPPI je važan za izradu kompozitnih radarskih slika, u kojima se podaci više radara spajaju u jednu sliku na zaslonu računala.

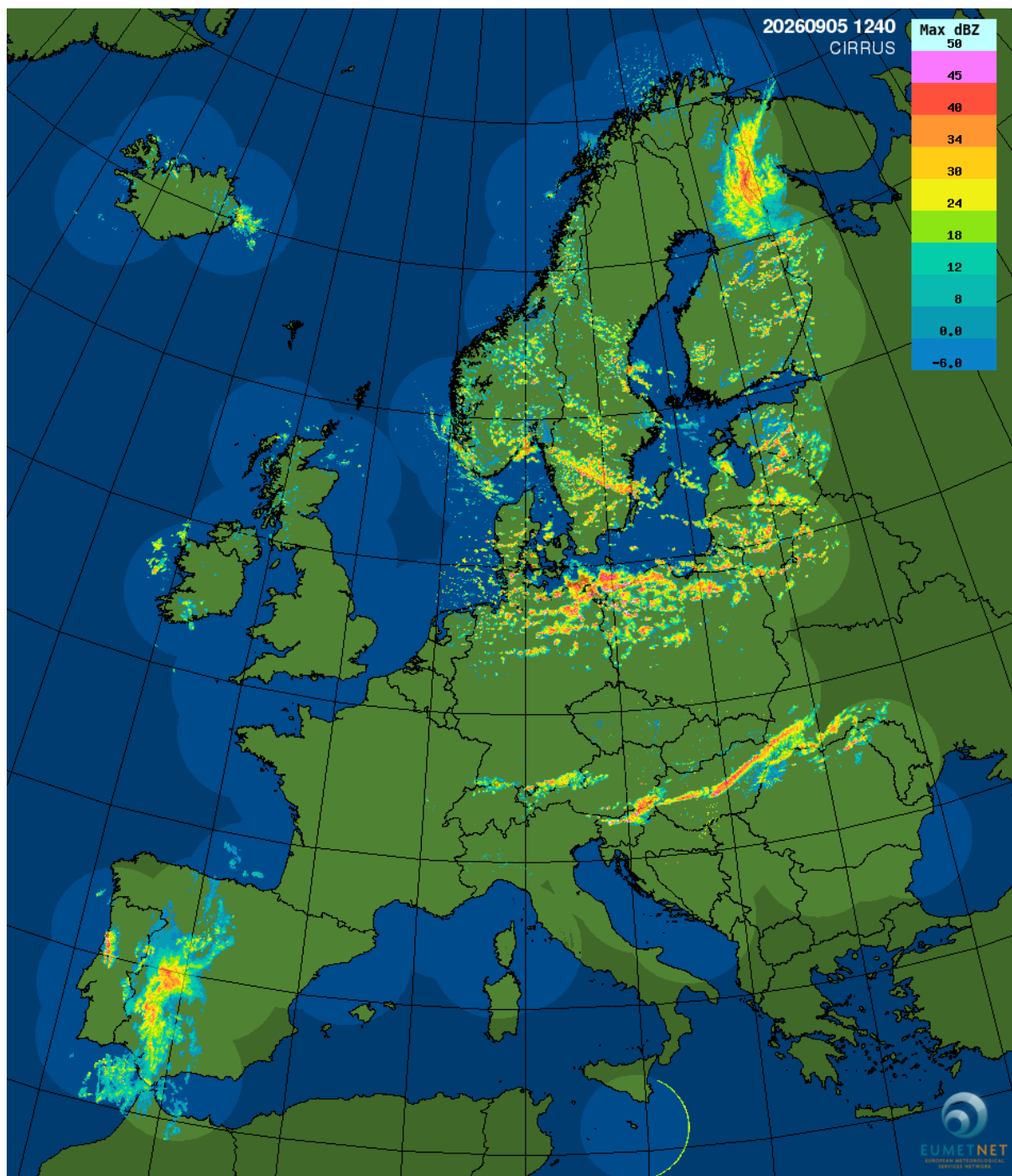
Kod CAPPI prikaza česta je pojava koncentričnih krugova oko radara koji nastaju kao posljedica računske operacije **svođenja intenziteta radarskog signala** na istu zadanu CAPPI visinu. Neupućeni korisnici ponekad tu pojavu pogrešno povezuju s nadnaravnim ili pseudoznanstvenim uzrocima, što dovodi do

raznih teorija zavjere.

Radarska slika pokazuje razvoj vremena

Radar ne služi samo za prikaz trenutnog rasporeda i intenziteta oborine nad područjem doseg radarskog promatranja. Uspoređivanjem uzastopnih mjerenja meteorolozi prate **kako se oborinska zona pomiče i mijenja**.

Ako se položaj oborinskog sustava bilježi tijekom vremena, mogu se odrediti smjer i brzina njegova premještanja. Oborinske zone povezane s hladnim frontama često se premještaju **brzinama od 70 do 90 kilometara na sat**. U iznimno snažnim i brzim premještanjima linije nestabilnosti ili hladne fronte brzina može premašiti i 120 kilometara na sat.



EUMETNET Odyssey

Brzina i smjer premještanja oborinskih zona posebno su važni pri izdavanju upozorenja jer se iz mjerenja procjenjuje kada će **oborinski sustav, linija pljuskova ili grmljavinsko nevrijeme** stići do određenog

područja. Takva se procjena koristi u kratkoročnim prognozama vremena i integrirana je u sustav upozorenja za javnost.

Topla i hladna fronta na radarskom ekranu

Izgled i raspored oborina na radarskom ekranu upućuju na to kakav se frontalni sustav približava. Na temelju radarske slike mogu se prepoznati karakteristike frontalnog sustava koji je radarom izmjeren.

Oborina uz toplu frontu najčešće je povezana sa slojevitim, stratiformnim oblacima. Radarski odraz može zauzimati veliku površinu, imati slabije definirane rubove i biti **prostorno raširen ispred same fronte**. Takva oborina može se protezati i stotinama kilometara ispred fronte pri tlu. Stratiformna oborina, karakteristična za dugotrajnu kišu i tople fronte, obično se prikazuje kao kompaktnija masa nepravilnih rubova. Unutar nje mogu postojati linije jačeg odraza koje upućuju na područja intenzivnije oborine pri tlu.

Hladna fronta, s druge strane, povezana je s oblacima vertikalnog razvoja. Na radarskoj slici može izgledati kao **niz zaobljenih ili eliptičnih oborinskih zona**. Te zone podsjećaju na niz perli ili krumpira, s prazninama između pojedinih konvektivnih ćelija.

Takav raspored odražava činjenicu da se hladna fronta sastoji od kumulusnih i kumulonimbusnih oblaka u različitim fazama razvoja. Praćenjem njihova gibanja procjenjuje se i **brzina napredovanja hladnog zraka** te opasnost od naglog pogoršanja vremena.

Pljuskovite oborine povezane su s oblacima vertikalnog razvoja, osobito s kumulonimbusima i snažnim kumulusima. Na radarskoj slici često imaju izražene rubove i jači odraz u središnjem dijelu. Oblik može podsjećati na polumjesec, mahunu graška ili nepravilnu jezgru.

Vrijednosti odraza iznad 50 dBZ obično se smatraju pragom za određivanje jakih pljuskova i tuče. **Kod superćelijskih kumulonimbusa** jezgra može prelaziti 60 dBZ. U najjačoj fazi razvoja radarom su mjerene visine vrha oblaka koje su probile tropopauzu te dosegle i visine iznad 18 kilometara.

Posebno važan znak na radarskoj slici može biti oblik kuke ili udice na stražnjem desnom rubu oluje, u odnosu na smjer njezina gibanja. Takav oblik upućuje na snažnu rotaciju u oluji i **moguću pojavu tornada ili trombe**. Na vertikalnom RHI presjeku snažna uzlazna struja može se očitovati kao svod ili oblik nalik ručki kišobrana.

Zašto radar nije dovoljan sam po sebi?

Iako je meteorološki radar iznimno koristan, njegovo mjerenje ima ograničenja.

Radarske zrake kroz atmosferu nisu potpuno ravne. Na njihovu putanju utječu temperatura, tlak i vlažnost zraka, odnosno promjene indeksa loma. Zbog zakrivljenosti Zemlje i atmosferskih uvjeta visina radarskog snopa raste s udaljenošću od radara.

U praktičnom radu često se koristi aproksimacija da se snop širi pravocrtno i da je brzina njegova širenja konstantna. U stvarnoj atmosferi to nije potpuno točno, pa se radarski podaci moraju tumačiti uz poznavanje konfiguracije terena i trenutačnih atmosferskih uvjeta.

Dodatni problem predstavljaju odrazi koji nisu meteorološke prirode. Planine mogu stvarati stalne odraze, a **radar može registrirati i refleksije od tla**, valova na moru, vjetroelektrana, jata ptica, zrakoplova i brodova. Takvi se neželjeni signali filtriraju računalnim alatima, ali pri interpretaciji podataka mora se razlikovati stvarna oborina od mogućih smetnji.

Gdje radar može pogriješiti?

Meteorološki radar iznimno je vrijedan za praćenje oborine i oluja u stvarnom vremenu, ali njegova slika nije doslovna fotografija stanja pri tlu. Radar mjeri elektromagnetski **odraz od kapljica, snježnih pahulja, ledenih kristala i tuče u atmosferi**, a zatim se iz jačine tog odraza procjenjuju intenzitet i vrsta oborine. Zbog toga radarska procjena može odstupati od količine kiše koju bi u istom trenutku izmjerio kišomjer.

Najvažniji izvori nesigurnosti su:

Visina radarskog snopa: S udaljenošću od radara snop se podiže iznad tla zbog zakrivljenosti Zemlje i loma elektromagnetskih valova u atmosferi. Tako radar na većim udaljenostima može registrirati oborinu nekoliko kilometara iznad tla, dok ona pri spuštanju ispari ili se pak pojača prije nego što dosegne površinu.

Promjenjiva atmosfera: Putanja radarskog snopa ovisi o temperaturi, tlaku i vlažnosti zraka, odnosno o promjenama indeksa loma. Atmosfera gotovo nikada nije idealno homogena, pa stvarna visina snopa i položaj odraza mogu odstupati od pojednostavljenog izračuna koji se koristi u obradi podataka.

Sjenjenje terenom: Brda i planine mogu djelomično ili potpuno zakloniti dio radarskog snopa. U takvim područjima radar može slabije registrirati oborinu ili je uopće ne "vidjeti", osobito ako se nalazi nisko u atmosferi.

Slabljenje signala u jakoj oborini: Snažni pljuskovi, tuča ili vrlo intenzivna kiša mogu oslabiti radarski signal. U takvim slučajevima radar može podcijeniti oborinu koja se nalazi iza najjače jezgre oluje jer do nje dopire manje energije radarskog snopa.

Različite vrste oborine: Ista količina kiše, snijega, susnežice ili tuče ne daje nužno jednak radarski odraz. Veličina i oblik kapljica ili ledenih čestica, kao i njihova koncentracija, mijenjaju refleksivnost. Zato se veza između dBZ-a i oborine u milimetrima na sat mora promatrati kao procjena, a ne kao potpuno izravno mjerenje.

Nemeteorološki odrazi: Radar može registrirati i ciljeve koji nemaju veze s oborinom: reljef, valove na moru, objekte na tlu, vjetroelektrane, jata ptica, zrakoplove i brodove. Takvi se signali programskim postupcima filtriraju, ali ponekad mogu ostati vidljivi ili otežati tumačenje slike.

Meteorolozi pri analizi vremenske situacije radarsku sliku uvijek uspoređuju s podacima kišomjera, satelitskim snimkama, mjerenjima munja, automatskim meteorološkim postajama i prognostičkim modelima. Radar je nezamjenjiv za odgovor na pitanje [gdje se oborina nalazi i kamo ide](#), ali procjena koliko je kiše stvarno palo na pojedinoj lokaciji zahtijeva kombinaciju više izvora podataka.

Radar kao produženo oko meteorologa

Meteorološki radar ne zamjenjuje meteorologa, ali mu daje prostornu i vremensku informaciju koju nijedan pojedinačni mjerni instrument ne može pružiti. Kišomjer mjeri oborinu na jednoj točki, meteorološka postaja opisuje stanje na svojoj lokaciji, a radar **istodobno promatra veliki prostor oko sebe**.

Njegova je najveća vrijednost u praćenju razvoja vremena u stvarnom vremenu: dolaska hladne fronte, jačanja pljuskova, razvoja kumulonimbusa, širenja oborinske zone i premještanja olujnih sustava.

Za meteorologe radar je zato svojevrsno produženo oko — uređaj koji ne vidi samo ono što se događa iznad jedne postaje, nego **prati cijeli oborinski sustav u prostoru**. Upravo ta sposobnost omogućuje ranije prepoznavanje opasnih pojava i pravodobnije upozoravanje stanovništva, pomoraca i službi zaštite.