

## STATUS IN BODOČE USMERITVE UMETNEGA VPLIVA NA VREME V ZDA

Vreme na planetu Zemlja je pomemben in mnogokrat odločujoč dejavnik v obnašanju človeštva. Že zdavnaj je poskušalo kontrolirati ali zmanjšati uničujoče posledice vremena. V zadnjih desetletjih je sposobnost opazovanja in napovedovanja različnih tipov vremenskih sistemov silovito narasla. Toda v istem časovnem obdobju se je zelo zmanjšalo raziskovanje v zvezi z umetnim vplivom na vreme. Nerealna pričakovanja skupaj z neuspešnimi poskusi, da bi znanstveno dokazali uspešnost, so najpomembnejši vzroki za upad raziskovalnih naporov. Zanimivo je, da je že prvo poročilo o umetnem vplivu na vreme, ki ga je Ameriška akademija znanosti objavila leta 1964, vsebovalo spoznanje, da ni bilo mogoče znanstveno dokazati učinkovitosti zasejavanja oblakov (z redkimi izjemami, kot je na primer razbijanje podhlajene megle). Tedanje poročilo je hkrati priporočalo, da je potrebno razširiti raziskave in jih usmeriti v razrešitev osnovnih znanstvenih neznank, preden bi širili operativno uporabo metod umetnega vpliva na vreme. Toda, naperi v tovrstna znanstvena raziskovanja so izostali.

Ameriška akademija znanosti je leta 2000 z namenom, da oceni stanje na področju umetnega vpliva na vreme imenovala poseben Odbor, sestavljen iz najboljših strokovnjakov, z nalogo, da pripravi posodobljeno oceno možnosti umetnega vpliva na vreme za zagotavljanje ugodnih učinkov za vodno gospodarstvo in zmanjšanje posledic vremensko pogojenih ujm. Proučiti je moral nove tehnologije, kot so prizemni (in situ) in satelitski sistemi detekcije, pa tudi nove reagente, uporabljene pri zasejavnaju ter metode zasejavanja. Odbor je moral prav tako proučiti napredek v numeričnem modeliranju v mezo in mikro skali ter kako lahko napredek računalniških zmogljivosti uporabijo pri umetnem vplivu na vreme. Študija ni bila namenjena morebitnim posledicam pri kreiranju politike umetnega vpliva na vreme; osredotočila se je le na znanstvena raziskovanja in operativne probleme. Odbor je bil posebno zadolžen, da:

- prouči trenutno stanje znanosti v zvezi z umetnim vplivom na vreme in vlogo napovedovanja vremena pri umetnem vplivu na vreme s posebnim poudarkom na tehnološkem in metodološkem razvoju v zadnjih desetih letih;
- identificira kritične šibke točke, ki omejujejo napredek razumevanja procesov pri umetnem vplivu na vreme in njegovi operativni uporabi;
- identificira smeri bodočega razvoja raziskovanja umetnega vpliva na vreme in operativne uporabe za izboljšanje vodnega gospodarstva ter zmanjšanje škodljivih posledic vremensko pogojenih ujm, in
- predlaga aktivnosti za identifikacijo morebitnih učinkov umetnega vpliva na vreme na lokalni ravni na vremenske vzorce večjih razsežnosti ali klimo.

Odbor je delo končal leta 2003 in rezultate objavil v posebni študiji. Povzetek študije v angleškem jeziku (Executive Summary) je brezplačno dostopen na spletnem naslovu <http://www.nap.edu/catalog/10829.html>. V nadaljevanju je slovenski prevod povzetka.

# **POVZETEK ŠTUDIJE O STATUSU IN BODOČIH USMERITVAH UMETNEGA VPLIVA NA VREME V ZDA**

## **PROBLEMI IN TRENDI UMETNEGA VPLIVA NA VREME**

### Motivacija

Vse večje povpraševanje po vodi odpira možnosti za pomembna področja raziskovanja, povezana s povečanjem vodnih virov, shranjevanjem vode in recikliranjem sladke vode. Opustošenje in izguba življenj zaradi vremensko pogojenih ujm, ki se povečujejo z rastjo prebivalstva in spreminjanjem demografskih razmer, zahtevajo, da raziščemo poti, kako zmanjšati uničujoče posledice vremena. Dovolj je pokazatelj, da človekova aktivnost, kot je na primer industrijsko onesnaževanje zraka, vpliva na procese v ozračju ter jih spreminja in to od lokalnih padavinskih vzorcev pa vse do sprememb globalnega podnebja. Ti nenamerni vplivi na vreme in podnebje zahtevajo poglobljen raziskovalni napor, kajti raziskovalci so večinoma spregledali dejstvo, da so mnoge znanstvene osnove nenamerne in namerne vpliva na vreme enake.

### Sedanje operativne in raziskovalne dejavnosti

Operativni programi umetnega vpliva na vreme, ki prvenstveno zajemajo zasejavanje oblakov z namenom stimulacije padavin ali zmanjševanjem toče, potekajo v več kot 24 državah; samo v ZDA izvajajo najmanj 66 operativnih programov v desetih zveznih državah. Nobenega od teh programov ne financirajo iz zveznega proračuna. Kljub velikemu številu operativnih programov umetnega vpliva na vreme je bilo v svetovnem merilu izvedenih le nekaj raziskovalnih programov. Potem ko je financiranje raziskovalnih programov v ZDA doseglo vrh v poznih 70. tih letih prejšnjega stoletja z okrog 20 milijonov dolarjev na leto, se je le-to kasneje skrčilo na manj kot pol milijona dolarjev na leto.

### Paradoks

V teh razhajajočih trendih vidimo jasen paradoks: medtem ko zvezna vlada ne vlaga sredstev v raziskovanje, da bi spoznali učinkovitost tehnologij umetnega vpliva na vreme, mnogi vlagajo sredstva za uporabo tehnologij, za katere ne obstajajo dokazi o njihovi učinkovitosti. Vzrok za ta paradoks tiči v neuspehu znanstvenih poskusov v preteklosti, da bi pojasnili učinkovitost umetnega vpliva na vreme. Tako se srečujemo s tipično catch-22 situacijo, v kateri nezmožnost, da bi poiskali sprejemljivo znanstveno osnovo, povzroča škodo celotnemu področju. To se kaže predvsem v zmanjšanem interesu po raziskovanju, ki edino lahko pripelje do boljših ocen in rezultatov.

## Omejitve in problemi

Dvom na področju umetnega vpliva na vreme torej ostaja. Vemo, da človekova aktivnost lahko vpliva na vreme in vemo tudi, da zasejavanje povzroča določene spremembe v oblaku. Kljub temu pa še vedno ne vemo, kako tako povzročene spremembe v oblaku vplivajo na spremembo padavin, padanje toče ali snega na tleh. Prav tako ne poznamo metode, s katero bi dosegli vnaprej določeno spremembo padavin v več ponavljanjih. Med vzroke, ki so pripeljali do popolnega neuspeha pri ugotavljanju učinkov zasejavanja oblakov, so tudi taki kot nedoločljivost naravne spremenljivosti padavin, pa nesposobnost, da bi lahko merili veličine, potrebne za odkrivanje učinkov zasejavanja s potrebno natančnostjo in prostorsko ločljivostjo in ne nazadnje potreba po randomiziranju in ponavljanju poskusov.

## ZAKLJUČKI

Odbor je zaključil, da še vedno ne obstaja prepričljiv znanstveni dokaz o učinkovitosti umetnega vpliva na vreme. V nekaterih primerih obstajajo jasni pokazatelji, da umetno delovanje na vreme povzroča določene spremembe, toda ti primeri niso bili statistično testirani in jih ni bilo mogoče ponoviti. Tako početje ne vzpodbuja potrebnega zanimanja za raziskovanje, s katerim bi se povečala znanstvena baza umetnega vpliva na vreme. Posledica je pomanjkanje ustreznega razumevanja ključnih procesov v ozračju. Zaradi tega so bila neuspešna prizadevanja, da bi zagotovili predvidljive in izmerljive rezultate, ki jih lahko verificiramo. Vprašanja, kot so prenosljivost posameznih tehnik zasejavanja oblakov na različna področja ali mogočega zmanjšanja padavin na nekem področju zaradi zasejavanja na drugem, lahko rešimo samo s pomočjo nepretrganega raziskovanja na osnovi skrbno izbranih hipotez in fizikalnimi ter statističnimi poskusi.

Kljub pomanjkanju znanstvenega dokaza o učinkovitosti umetnega vpliva na vreme je Odbor zaključil, da je od zadnjega poročila Akademije znanosti (1964) znanstveno razumevanje napredovalo na mnogih področjih in da se je v tem času kljub vsemu zgodil obetaven razvoj. Na primer, novi materiali za zasejavanje imajo mnogo večjo sposobnost tvorbe zrn ledu. Nedavni poskusi, ko so uporabili higroskopični material v oblakih, ki so vsebovali vodo in led (mešana faza), so dali ohrabrujoče rezultate povečanja padavin na način, da se je povečala življenjska doba oblačnega sistema. Obstajajo tudi jasne indikacije pozitivnih učinkov zasejavanja zimskih orografskih sistemov (torej oblačnih sistemov nad goratimi področji). S satelitskim opazovanjem lahko ugotavljamo vlogo visokih koncentracij aerosolov v oblakih na dež in strele, torej pripeljemo namerno in nenamerno vplivanje na vreme na skupni imenovalac. Ta in druga raziskovanja so v bližnji preteklosti poudarila kritično vlogo, ki jo imajo mikrofizikalni procesi pri nastanku padavin, pri prenosu in razprševanju materialov v oblaku, s katerimi zasejavamo, na učinke zasejavanja in dinamičen razvoj oblaka ter kako učinki na nivoju razsežnosti nevihtnega oblaka vplivajo na porazdelitev padavin v širšem področju. V bodočnosti bi se raziskovalni naporji morali osredotočiti na ta ključna vprašanja, saj sedaj predstavljajo osnovni vzrok za zaviranje napredka umetnega vpliva na vreme.

Napredek na področju opazovanja, računalništva in statističnih metod, ki se je zgodil v zadnjih dveh ali treh desetletjih je potrebno uporabiti tudi na področju umetnega vpliva na vreme. To se nanaša predvsem na (1.) odkrivanje in vrednotenje relevantnih veličin v časovni in prostorski skali, kar prej ni bilo mogoče; (2.) zbiranje, shranjevanje in obdelavo ogromnih količin podatkov; in (3.) iskanje vzrokov nezanesljivosti in vzpostavljanje celovitih časovnih in prostorskih vzročnih zvez. Računsko sposobnejši računalniki so omogočili razvoj modelov ozračja v prostorski skali od razsežnosti posameznega oblaka do celotnega planeta. Simulacije, narejene s pomočjo modelov in preizkušane s pomočjo meritev, kadar koli je to mogoče, so lahko zelo koristne za raziskovanje umetnega vpliva na vreme in morebitnih učinkov na širše območje. Toda zelo malo teh orodij so do sedaj uporabili, da bi odpravili kritične neznanke na področju umetnega vpliva na vreme. Mnoge omenjene metodološke izboljšave na žalost niso doprinesle ničesar k boljšemu razumevanju znanstvenih osnov, na katerih temelji umetni vpliv na vreme. To se ni zgodilo, ker znanost ne bi bila sposobna, ampak zaradi pomanjkanja podpore specifičnemu področju raziskovanja v preteklih desetletjih. Zaradi tega še vedno nimamo znanstvenega dokaza učinkovitosti umetnega vpliva na vreme, četudi nekateri primeri kažejo na visoke verjetnosti sprememb zaradi zasejavanja oblakov. Ne glede na pomanjkanje znanstvenega dokaza se število operativnih programov umetnega vpliva na vreme z namenom stimulacije padavin, povečanja snežne zaloge in preprečevanja nastanka toče na osnovi stroškovnih analiz z upoštevanjem stroškov izvedbe in verjetnosti nastalih škod v svetovnem merilu povečuje.

## PRIPOROČILA

### **Priporočilo:**

**Odbor priporoča obnovitev raziskovanj, s katerimi bi poglobili osnovno poznavanje procesov v ozračju, ki so pomembni tako za namerno in nenamerno vplivanje na vreme, zaradi naslednjih vzrokov:**

- **ker lahko umetni vpliv na vreme zmanjša pomanjkanje vode in omili učinke vremensko pogojenih ujm,**
- **ker so programe umetnega vpliva na vreme izvajali ne glede na pomanjkanje znanstvenih dokazov o učinkovitosti,**
- **ker so spremembe v ozračju zaradi nenamernega vplivanja realnost,**
- **in ker obstoja cela vrsta novih orodij in metod, ki jih lahko uporabimo na tem področju.**

Rezultati takih raziskovanj bodo pomembni mnogo širše od umetnega vpliva na vreme. Vzdržna uporaba atmosferskih vodnih virov in zmanjšanje posledic vremensko pogojenih ujm sta pomembna cilja, ki si zaslužita trajni raziskovalni napor.

### **Priporočilo:**

**Odbor priporoča vzpostavitev vsedržavnega programa, na osnovi katerega bi trajno raziskovali mikrofiziko oblakov in deževnih sistemov, dinamiko oblakov, modeliranje oblakov in zasejavanje oblakov; raziskave, namenjene zmanjševanju ključnih neznank, naštetih v Okvirju ES.1, je potrebno izvesti na način, da bodo medsebojno usklajeni modeliranje, laboratorijske analize in meritve na terenu.**

Program se ne sme osredotočiti samo na kratkoročne programe umetnega vpliva na vreme; raje naj se usmeri na ključna vprašanja, kjer bodo raziskovanja prinesla napredek v razumevanju namernega in nenamernega delovanja na vreme. Ker tukaj ne moremo naštetih vseh specifičnih vprašanj, ki naj jih raziskave zajamejo, jih je potrebno pripraviti za vsak program v okviru vsedržavnega programa posebej. Taka vprašanja so lahko:

- Kakšno je ozadje koncentracij aerosolov v različnih krajih in v različnih časovnih obdobjih leta? Do kakšne mere so lahko operativni programi umetnega vpliva na vreme odvisni od koncentracij ozadja?
- Kakšna je spremenljivost lastnosti oblaka ali celice (vključujoč strukturo, intenziteto, razvoj in življenjsko dobo) znotraj večjih oblačnih sistemov (klustrov) in kakšen je vpliv oblakov in celic na sisteme v širši prostorski skali? Kakšen je vpliv lokalnega zasejavanja na večje sisteme, v katere so oblaki vpeti?
- Kako zanesljive so meritve radarske odbojnosti, ko merijo razliko med akumuliranimi padavinami v primerih zasejanih in nezasejanih oblakov? Kako zasejavanje vpliva na porazdelitev velikosti kapljic, ki določa zvezo med radarskimi parametri in dežjem na tleh?

#### **OKVIR ES.1**

**Povzetek ključnih negotovosti, oziroma neznank**  
Izjave v krepkem tisku predstavljajo najvišjo prioriteto

*Problemi, povezani z mikrofiziko oblakov in padavinskih sistemov*

- **Koncentracija ozadja, velikost in kemična sestava aerosolov, ki sodelujejo pri nastanku oblakov;**
- **Procesi nukleacije v odvisnosti od kemijske sestave, velikosti in koncentracije higroskopičnih delcev;**
- **Nukleacija ledu (primarna in sekundarna);**
- **Razvoj spektra kapljic v oblaku in procesi, ki prispevajo k širjenju spektra ter začetek združevanja kapljic v večje kapljice;**
- **Relativna pomembnost pršenja (šibkega dežja) v padavinskih procesih.**

*Problemi, povezani z dinamiko oblakov*

- **Medsebojno vplivanje oblaka na oblak in vpliv na procese v mezoskali, ki se nanašajo na strukture toka zraka navzgor in toka navzdol ter razvoj in življenjsko dobo oblaka;**
- **Medsebojni dinamični vpliv posameznih delov oblaka, ki se nanaša na količino**

- padavin in na spekter velikosti hidrometeorjev;
- Mikrofizikalna, termodinamična in dinamična interakcija v oblakih.

*Problemi, povezani z modeliranjem oblakov*

- **Skrbno pripravljene testi in eksperimenti najboljših modelov oblaka v kombinaciji s sodobnimi sistemi opazovanja;**
- Razširitev obstoječih in razvoj novih modelov oblaka za potrebe umetnega vpliva na vreme;
- Uporaba modelov za kratkoročno napoved, vključujoč napoved padavin in asimilacijo podatkov skupaj z metodologijo za določanje akcije, oziroma ne-akcije pri poskusih z naključno izbiro delovanja;
- Ocena modelov za napovedovanje vremena pri napovedovanju vremensko pogojenih ujm in vzpostavitev sistema napovedi z uporabo obstoječih možnosti skupaj z napovedjo verjetnosti;
- Dodaten razvoj modelov oblaka, da bodo simulirali trajektorije disperzije materialov, s katerimi jih zasejemo;
- Uporaba modelov oblaka za raziskovanje učinkov zasejavanja izven področja zasejavanja;
- Uporaba modelov oblaka skupaj s statističnimi metodami za ugotavljanje učinkov zasejavanja.

*Problemi, povezani z zasejavanjem*

- **Določitev področja zasejavanja v oblaku, disperzije in transporta materialov zasejavanja in širjenje učinkov zasejavanja po celotnem volumnu oblaka;**
- **Sposobnosti meritev in omejitve programske opreme za spremljanje oblačnih celic; razvoj radarske in drugih tehnologij za opazovanje učinkov zasejavanja;**
- Analize nedavnih opazovanj visokih koncentracij ledenih kristalov z novimi instrumenti;
- Modeliranje in napovedovanje pogojev za zasejavanje;
- Mehanizmi prenosa učinkov na nivoju oblaka na padavinski sistem širših razsežnosti ter spremljanje eventualne spremembe toka zraka navzdol v posameznih celicah, skupini oblakov in razsežnosti spreminjanja celic.

Naloge, povezane z raziskovanjem umetnega vpliva na vreme, spadajo v delokrog različnih ustanov in je zato potrebna skrbna koordinacija.

**Priporočilo:**

**Odbor predlaga, da naj tak koordiniran raziskovalni program vsebuje:**

- **Uporabo najnovejših orodij za meritve na daljavo ter na tleh za raziskovalne poskuse, ki se nanašajo na oblačne in nevihtne sisteme** (na primer: Dopplerjeve lidarje in radarje na letalih, mikrovalovne radiometre, polarimetrične radarje z

milimetersko valovno dolžino, GPS in programsko opremo za spremljanje oblačnih celic, itd.). Začetne študije na terenu se naj osredotočijo na področja, ki jih lahko dovolj dobro numerično simuliramo in uporabimo tri-dimenzionalna opazovanja, ki omogočajo testiranje jasno postavljenih fizikalnih hipotez. Področja, kjer si lahko obetamo pomemben napredek, so (brez navajanja prioritete):

- **Zasejavanje s higroskopičnimi materiali za stimulacijo padavin.** Poskusi na manjših področjih, kombinirani s takimi na širših področjih, kot jih je predlagal Mazatlan na delavnici o higroskopskem zasejavanju (SMO, 2000) lahko predstavljajo začetek takih aktivnosti. Randomiziran program zasejavanja, ki ga spremljajo ustrezne meritve (časovno ne manj kot tri leta), lahko pomaga raziskovalcem ali potrditi ali pa zavrniti rezultate nedavnih poskusov.
- **Zasejavanje orografsko pogojenih oblakov za stimulacijo padavin.** Program je lahko zasnovan na iskušnjah operativnih aktivnosti v goratih področjih na zahodu ZDA. Randomiziran program, ki bi vključeval sodobna računalniška orodja in opazovanja, lahko pomembno izboljša razumevanje učinkov zasejavanja in zimskih orografskih padavin.
- **Raziskovanje posebnih učinkov zasejavanja.** Take študije lahko vključujejo raziskovanje rasti vodnih kapljic in posledičen nastanek pršenja ali dežja, povezanega s higroskopskim zasejavanjem; ali pa vlogo večjih delcev ( $>1 \mu\text{m}$ ) pri zmanjšanju koncentracije vodnih kapljic v onesnaženih področjih, kjer je količina padavin manjša zaradi prevelike koncentracije kondenzacijskih jeder.
- **Izboljšanje fizike oblakov in padavin v modelih.** Posebna pozornost je potrebna pri modeliranju kondenzacijskih jeder, procesu zmrzovanja, pa rasti, koliziji in koagualaciji vodnih kapljic in delcev ledu. Taka raziskovanja bi morala biti zasnovana na meritvah fizike oblakov v laboratorijih, preizkušana in prilagajana s pomočjo modelov ter nazadnje potrjena z opazovanji na terenu.
- **Izboljšanje in uporaba obstoječih računalniških modelov ter metod asimilacije podatkov.** Potreben je napredek, ki bi omogočil hitro procesiranje velikih količin podatkov, pridobljenih z novimi tehnologijami opazovanj in boljša simulacija vlage v oblaku ter padavinskih procesov. Take modele bi lahko uporabljali kot orodja za planiranje in diagnostiko v bodočih raziskovalnih programih umetnega vpliva na vreme in za razvoj tehnik za ocenjevanje učinkov zasejavanja.
- **Uporaba obstoječe opreme na terenu ter razvoj partnerstva med raziskovalnimi skupinami in izbranimi operativnimi programi.** Raziskovanje umetnega vpliva na vreme mora v celoti izkoristiti možnosti, ki jih ponujajo raziskovalni programi na terenu in operativni programi. V obstoječe operativne

programe lahko z relativno majhnimi napori vključijo določene raziskovalne aktivnosti, naštete zgoraj. Državni center za raziskovanje ozračja (National Center for Atmospheric Research – NCAR) in Državna administracija za oceane in ozračje (National Oceanic and Atmospheric Administration – NOAA), Laboratorij za tehnologijo okolja (NOAA/ETL) so lahko ključne točke za raziskovanje umetnega vpliva na vreme.

Za raziskovanje umetnega vpliva na vreme je potrebno finančno in kolegialno podpreti obetajoče mlade znanstvenike in jim omogočiti, da bodo lahko razširili bazična znanja o metodah za izboljšanje koriščenja naravnih virov ter za zmanjšanje škode zaradi vremensko pogojenih ujm. Potrebno je poudariti, da so problemi, povezani z umetnim vplivom na vreme, mnogo širši od fizikalne znanosti. Ti problemi zadevajo družbo kot celoto in znanstveno raziskovanje umetnega vpliva na vreme morajo spremljati vzporedne raziskave na socialnem, političnem, ekonomskem, okoljskem in pravnem področju.

Odbor je posebej poudaril, da je potrebno umetni vpliv na vreme smatrati kot osnoven in legitimen del znanosti, povezane z ozračjem in okoljem. Upoštevajoč vse večje zahteve po pitni vodi in vse večje škode in izgube življenj zaradi vremensko pogojenih ujm, pa operativne aktivnosti brez znanstvene podlage in realnost podnebnih sprememb, je raziskovalna skupnost pred izzivom in odgovornostjo, da oceni potencialno učinkovitost in vrednost tehnologij umetnega vpliva na vreme.

## **SESTAVA ODBORA**

MICHAEL GARSTANG (*chair*), Distinguished Emeritus Research Professor in the Department of Environmental Sciences at the University of Virginia, Charlottesville

ROSCOE R. BRAHAM, JR., Professor and scholar-in-residence in the Department of Marine, Earth and Atmospheric Sciences at North Carolina State University, Raleigh

ROELOF T. BRUINTJES, Scientist in the Research Applications Program at the National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado

STEVEN F. CLIFFORD, Research associate at the Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences at the University of Colorado, Boulder

ROSS N. HOFFMAN, Vice president for Research and Development at Atmospheric & Environmental Research, Inc., Lexington, Massachusetts

DOUGLAS K. LILLY, Professor emeritus in the Department of Meteorology at the University of Oklahoma, Norman

ROBERT J. SERAFIN, Director Emeritus of the National Center for Atmospheric Research, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado



PAUL D. TRY, Senior vice president and program manager at Science & Technology Corporation, Silver Spring, Maryland

JOHANNES VERLINDE, Associate professor of meteorology at Pennsylvania State University, University Park

Pripravi: Jožef Roškar  
Lektorirala: Ave Roškar

Julij 2009