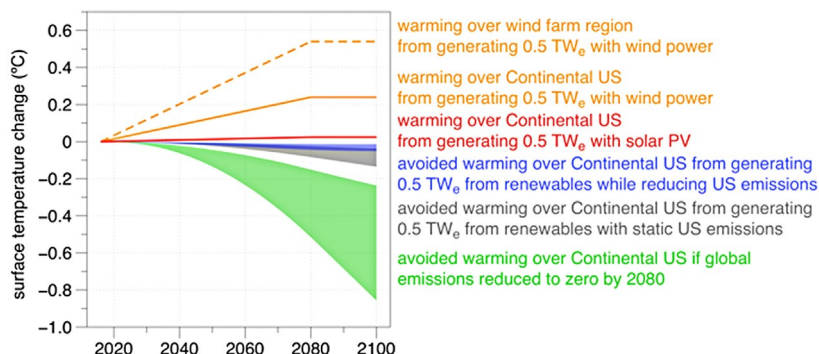
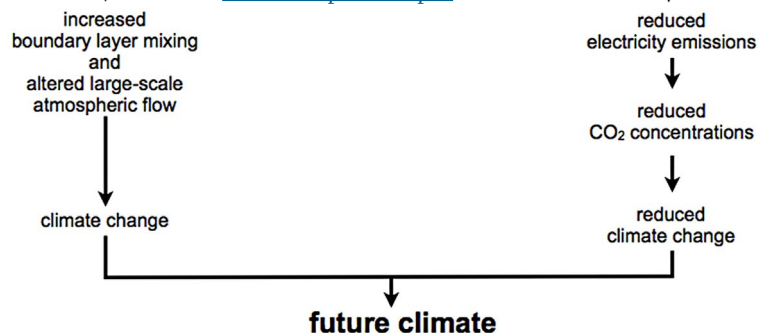


wind power

Subscribe to DeepL Pro to edit this

Visit www.DeepL.com/pro for more information.



Lee M. Miller, David W. Keith

lmiller@seas.harvard.edu (L.M.M.)

david_keith@harvard.edu (D.W.K.)

VYSVĚTLENÍ

Větrná energie snižuje emise a zároveň způsobuje klimatické dopady, například vyšší teploty.

Oteplovací efekt je nejsilnější v noci, kdy se teplota zvyšuje s výškou.

Noční oteplování pozorované u 28 provozovaných větrných elektráren v USA

Oteplování způsobené větrem může překročit oteplování, kterému by se dalo zabránit snížením emisí, na celé století.

Kontext a měřítko

Větrná energie může ovlivnit klima změnou atmosférické mezní vrstvy, přičemž nejméně 40 prací a 10 pozorovacích studií nyní spojuje větrnou energii s klimatickými dopady. Poprvé porovnáváme klimatické dopady velkých větrných elektráren s pozorováními v měřítku jednotlivých lokalit a zjišťujeme, že oteplování způsobené větrnými turbínami je největší v noci. Vliv větrných elektráren na klima se bude i nadále rozšiřovat s tím, jak se jich bude instalovat více.

Mají tyto dopady význam? Jaké jsou tyto dopady v porovnání s přínosy snížení emisí pro klima? Nabízíme politicky relevantní srovnání: dopady větrných elektráren na klima jsou přibližně desetkrát větší než dopady solárních fotovoltaických systémů na jednotku vyrobené energie. Zkoumáme časový kompromis mezi klimatickými dopady větrné energie a přínosy pro klima, které přináší díky snižování emisí při vytlačování fosilních paliv. Kvantitativní porovnání nízkouhlíkových zdrojů energie by mělo sloužit jako podklad pro výběr energie při přechodu na bezuhlíkový energetický systém.

Článek

Klimatické dopady větrné energie

Vítr je lepší než fosilní, ale větrná energie má nezanedbatelné dopady na klima. Tato studie prohlubuje práci o dopadech větrné energie na klima tím, že: (1) poskytuje mechanistické vysvětlení dopadů větrných turbín na klima porovnáním numerických simulací s pozorováními, (2) vyplňuje současnou mezeru mezi malými a velmi rozsáhlými simulačními studiemi větrné energie, (3) provádí první kvantitativní srovnání dopadů větrné energie na klima a jejích přínosů a (4) používá stejný rámec pro kvantitativní srovnání se solární energií.

SHRNUTÍ

Zjistili jsme, že při výrobě elektřiny, která dnes v USA odpovídá poptávce po elektřině (0,5 TW_e), by se teplota povrchu kontinentální části USA oteplila o 0,24 °C. Oteplení částečně způsobují turbíny, které přerozdělují teplo promícháváním mezní vrstvy. Modelované denní a sezónní teplotní rozdíly zhruba odpovídají nedávným pozorováním oteplování u větrných elektráren, což odráží ucelené mechanistické chápání toho, jak větrné turbíny mění klima. Účinek oteplování je: malý ve srovnání s prognózami oteplování v 21. století, přibližně stejný jako snížení oteplování dosažené dekarbonizací globální výroby elektřiny a velký ve srovnání se snížením oteplování dosaženým dekarbonizací elektřiny v USA pomocí větrné energie. Při stejné míře výroby jsou dopady solárních fotovoltaických systémů na klima přibližně desetkrát menší než u větrných systémů. Celkové dopady větru na životní prostředí jsou jisté

menší než dopady fosilní energie. Přesto by se při dekarbonizaci energetického systému mělo rozhodování mezi větrnou a solární energií opírat o odhady jejich dopadů na klima.

ÚVOD

Všechny obnovitelné zdroje energie musí pro získávání energie měnit přirozené toky energie, takže dopady na klima jsou nevyhnutelné, ale jejich rozsah a charakter se značně liší. Větrné turbíny vyrábějí elektřinu získáváním kinetické energie, která zpomaluje vítr a mění výměnu tepla, vlhkosti a hybnosti mezi povrchem a atmosférou. Pozorování ukazují, že větrné turbíny mění místní klima,^{1–10} a modely ukazují změny klimatu v místním až globálním měřítku způsobené velkoplošným získáváním energie z větrných elektráren.^{11–15} Předchozí studie hodnotily dopady vodní energie,¹⁶ biopaliv,¹⁷ a solárních fotovoltaických systémů (FVE) na klima.¹⁸ Rychlé rozšíření výroby energie z obnovitelných zdrojů je základem úsilí o omezení změny klimatu dekarbonizací světového energetického systému. Kromě přínosů pro klima snižují větrná a solární energie také emise kriteriálních znečišťujících látek (NO_x , SO_x a $\text{PM}_{2.5}$) a toxických znečišťujících látek, jako je rtuť, které mají významné dopady na veřejné zdraví.^{19,20} Dopady větrné a solární energie na klima jsou ve srovnání s dopady fosilních paliv, která nahrazují, malé, ale nejsou nutně zanedbatelné. Lepší pochopení environmentálních kompromisů mezi obnovitelnými zdroji energie by pomohlo při výběru mezi nízkouhlíkovými zdroji energie. Vzhledem k tomu, že růst větrné a solární fotovoltaiky značně převyšuje ostatní obnovitelné zdroje,²¹ kombinujeme přímá pozorování dopadů větrné energie na pevnině s modelem v kontinentálním měřítku a porovnáváme je s předchozími odhady dopadů fotovoltaiky, abychom posoudili relativní dopady větrné a solární energie na klima v přepočtu na jednotku vyrobené energie.

Klimatické dopady způsobené těžbou větrné energie byly nejprve studovány pomocí modelů všeobecné cirkulace (GCM). Tyto studie zjistily statisticky významné klimatické dopady v rámci větrné farmy i dálkových telekonektorů, přičemž dopady mimo větrnou farmu jsou někdy stejně velké jako dopady uvnitř větrné farmy.^{11–13,22} Všimněte si, že tyto dopady jsou na rozdíl od oteplování způsobeného skleníkovými plyny (GHG), protože v některých případech mohou klimatické dopady větrné energie působit proti těmto skleníkovým plynům.

oteplování - nejméně čtyři studie zjistily, že těžba větrné energie ve středních zeměpisných šířkách může Arktidu ochladit.^{11,12,23,24} Tyto studie však často používaly idealizované nebo nerealistické rozložení turbín instalovaných v nerealistickém měřítku. Modelové simulace geometricky jednoduchých, izolovaných větrných elektráren v menších měřítkách 3 000–300 000 km^2 (10 až 1 000krát větších než dnešní větrné elektrárny) ve větrných lokalitách zjistily podstatné snížení rychlosti větru a změny tloušťky atmosférické mezní vrstvy (ABL), jakož i rozdíly v teplotě,^{11,13,14,24} srážkách,^{14,25} a vertikální výměně atmosféry.^{15,26}

Chceme posoudit dopady větrné energie na klima v přepočtu na jednotku vyrobené energie, avšak dopady větrné energie na klima závisí na místní meteorologii a na nelokálních klimatických telekonexích. Tyto dvojí závislosti znamenají, že dopady větrné energie jsou silně závislé na množství a místě těžby větrné energie, což znemožňuje vývoj jednoduché metriky dopadů.

Jako krok směrem k lepšímu porozumění relevantnímu pro politiku zkoumáme klimatické dopady výroby 0,46 TW_e elektřiny z větrných elektráren na území kontinentálních USA.

Joule 2, 1–15, 19. prosince 2018 © 2018 Elsevier Inc. Toto měřítko vyplňuje mezeru mezi menšími izolovanými větrnými elektrárnami a globálním měřítkem GCM. Modelujeme rovnoměrnou hustotu turbín v největrnější třetině kontinentálních USA a parametricky měníme hustotu.

Náš referenční scénář 0,46 TW_e představuje 18násobek výroby větrné energie v USA v roce 2016.²¹ Zamýšlíme jej jako věrohodný rozsah výroby větrné energie, pokud bude větrná energie hrát hlavní roli v dekarbonizaci energetického systému v druhé polovině tohoto století. Pro představu, míra výroby elektřiny podle referenčního scénáře činí pouze 14



% současné spotřeby primární energie v USA,²⁵ přibližně stejně jako spotřeba elektřiny v USA,²⁷ a je asi 2,4krát větší než předpokládaná míra výroby větrné energie v USA v roce 2050 podle centrální studie v nedávné studii Ministerstva energetiky (DOE) Wind Vision.²⁸ A konečně, je to méně než jedna šestina technického potenciálu větrné energie na přibližně stejných větrných oblastech USA, jak odhaduje DOE.^{28,29}

Modelovací rámec

Používáme regionální model WRF v3.3.1 s vysokým rozlišením³⁰ s doménou, která zahrnuje kontinentální USA, vynucenou okrajovými podmínkami ze Severoamerické regionální analýzy.³¹ Oblast větrných elektráren je od hranic modelu vzdálena více než 500 km a zahrnuje pouze 13 % domény (znázorněno na [obrázku 1A](#)). Konfigurace modelu využívala dynamickou vlhkost půdy a 31 vertikálních úrovní, přičemž 3 úrovně protínají rotor turbíny a 8 úrovní představuje nejspodnější kilometr. Model je spuštěn na celý rok po jednoměsíčním roztočení s použitím horizontálního rozlišení 10 a 30 km. Parametrizace větrných turbín byla původně vydána s modelem WRF v3.3,³² a představuje větrné turbíny jako zdroj hybnosti i turbulentní kinetické energie (TKE). Aktualizovali jsme parametrizaci větrné turbíny tak, aby využívala koeficienty tahu, výkonu a TKE z turbíny Vestas V112 3 MW. Toto zpracování větrného výkonu je velmi podobné předchozím modelovým studiím.^{14,15,24}

Výhodou regionálního modelu je, že můžeme použít horizontální a vertikální rozlišení, které je podstatně vyšší než u předchozích globálních modelových studií,^{11–13,22,23,26,33,34}

což umožňuje lépe zobrazit interakce větrných turbín s ABL. Nevýhodou použití předepsaných okrajových podmínek je, že naše simulace podhodnotí klimatickou odezvu v globálním měřítku na těžbu větrné energie ve srovnání s globálním modelem s ekvivalentním rozlišením, který by umožnil globální atmosféře reagovat na zvýšený povrchový odpor nad USA a odhalil by klimatické telekonexe.

¹Škola technických a aplikovaných věd,
Harvardova univerzita, Cambridge, MA 02139,
USA

²Harvard Kennedy School, Cambridge, MA
02138, USA³

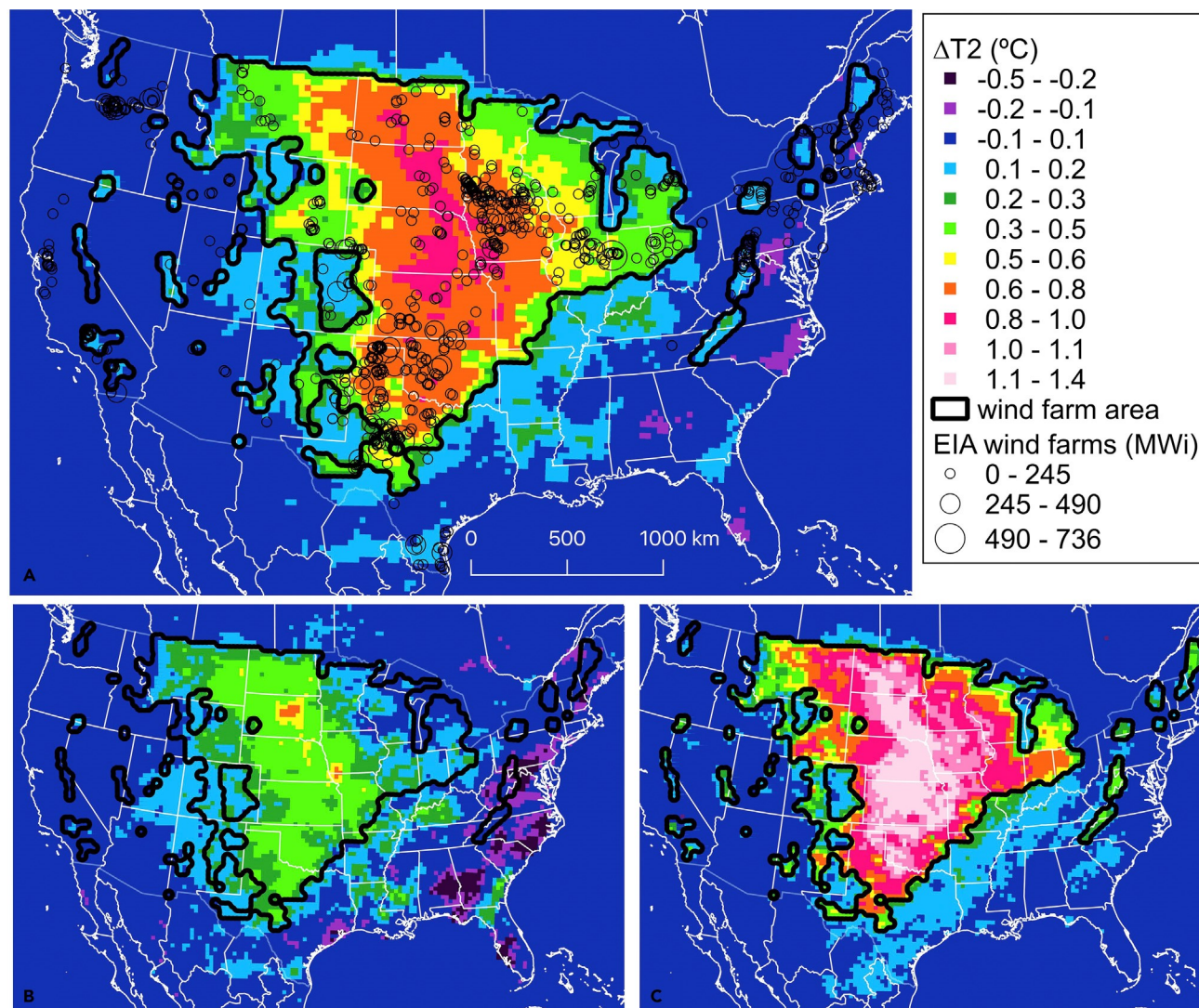
Vedoucí kontakt

*Korespondence:

lmiller@seas.harvard.edu (L.M.M.),

david_keith@harvard.edu (D.W.K.)

<https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.09.009>



Obrázek 1. Teplotní odezva na referenční nasazení větrné energie ($0,5 \text{ MW km}^{-2}$)

(A-C) Mapy představují tříletý průměr narušené teploty minus tříletý průměr kontrolní teploty vzduchu ve výšce 2 m, zobrazující (A) celé období, (B) denní a (C) noční dobu. Oblast větrných elektráren je zakreslena černě a pro srovnání jsou v současnosti provozované větrné elektrárny zobrazeny jako otevřené kruhy v (A).

Závislost na horizontálním rozlišení jsme testovali porovnáním simulací na vzdálenost 10 a 30 km s hustotou turbín $3,0 \text{ MW km}^{-2}$ s příslušnými kontrolami z roku 2012. Rozdíly v průměrné roční teplotě vzduchu ve 2 m byly malé, jak ukazuje [obrázek S1](#). Následující výsledky používají rozlišení 30 km (přibližně jedna devítina výpočetních nákladů) a simulační období 2012, 2013 a 2014, aby se snížil vliv meziroční proměnlivosti. Používáme čtyři hustoty turbín ($0,5$, $1,0$, $1,5$ a $3,0 \text{ MW km}^{-2}$) v oblasti větrných farem, abychom prozkoumali, jak zvýšená míra těžby větrné energie mění klimatické dopady.

VÝSLEDKY A DISKUSE

[Obrázek 1](#) ukazuje dopady referenčního scénáře na klima ($0,5 \text{ MW km}^{-2}$). V oblasti větrné farmy dochází k vyšším průměrným teplotám ([obrázek 1A](#)), přičemž v noci je vliv oteplení přibližně dvojnásobný ve srovnání s denním oteplením ([obrázky 1B a 1C](#)). Oteplení bylo obecně silnější blíže ke středu regionu větrné farmy, ale možná proto, že telekonekce jsou



potlačeny vynucenými okrajovými podmínkami. Klimatická odezva se soustřeďuje v oblasti větrných elektráren, ale existují oblasti daleko mimo oblast větrných elektráren, kde se klimatická odezva rovněž projevuje. Nejzřetelnějším příkladem je zde oblast podél východního pobřeží během dne, kde jsou průměrné denní teploty o 0,1 až 0,5 °C nižší (obr. 1B).

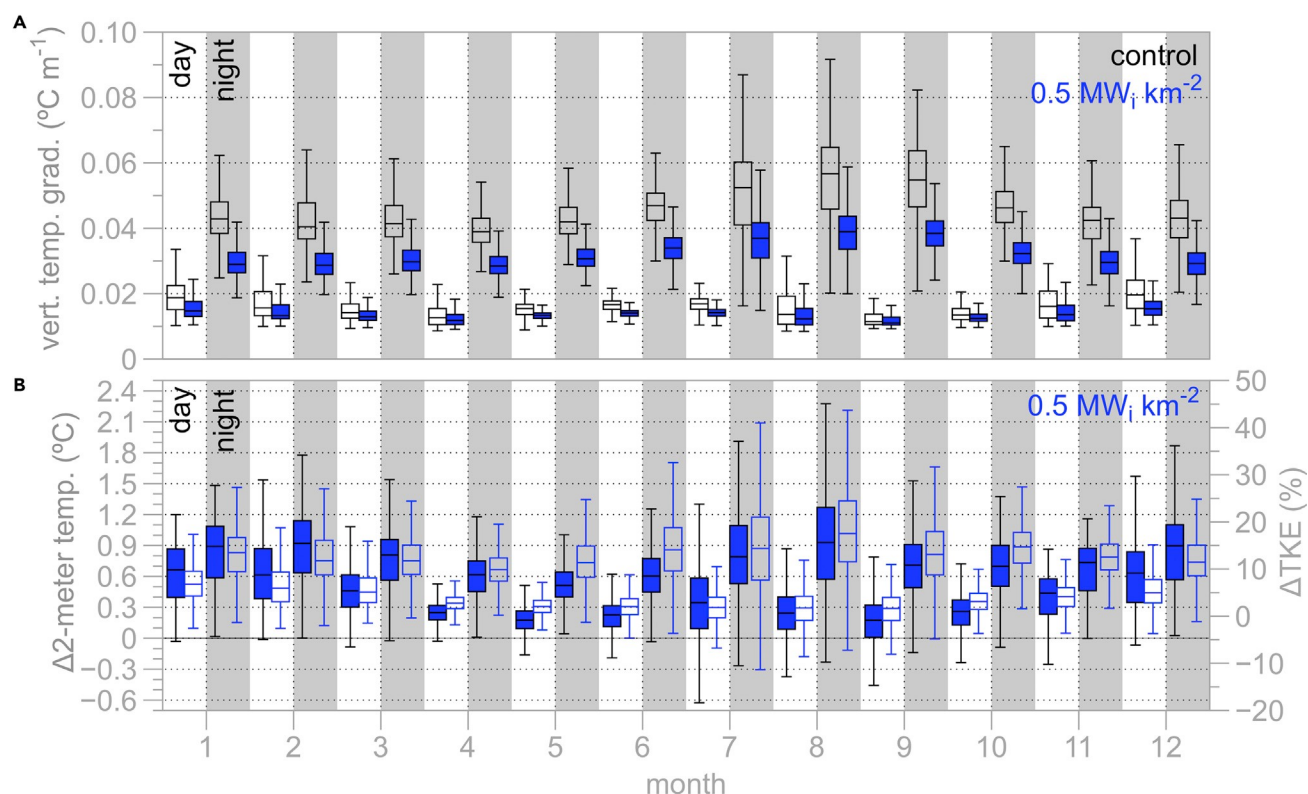
Abychom oddělili místní přímé dopady mezní vrstvy od změn klimatu v mezoměřítku, provedli jsme diagnostickou simulaci s "dírou" o průměru 250 až 250 km poblíž středu oblasti větrných elektráren a zjistili jsme, že v roce 2014 došlo v "díře" k přibližně polovičnímu oteplení než v původním srovnávacím scénáři "bez díry" (tabulka S1 a obrázek S2). To naznačuje, že přibližně polovina vlivu oteplení je připisována lokálním změnám v míchání atmosféry a druhá polovina změnám v mezoměřítku, což však vyžaduje další studium.

Změny srážek jsou malé a nevykazují jasnou prostorovou korelaci (obrázek S3). Oteplení je největší v severojižním koridoru poblíž středu soustavy větrných turbín, možná v důsledku interakce mezi větrnými turbínami a nočním nízkofrekvenčním prouděním (LLJ). LLJ je rychlý noční vítr v nízkých výškách ($>12 \text{ m s}^{-1}$ ve výšce 0,5 km), který je běžný na středozápadě USA a který vzniká, když se atmosféra oddělí od povrchového tření, což má za následek strmý vertikální teplotní gradient³⁵ - meteorologické podmínky, které by mohly být citlivé na narušení větrnými turbínami. V naší kontrolní simulaci jsme kvantifikovali přítomnost LLJ, ale nezjistili jsme silnou prostorovou korelaci mezi pravděpodobností výskytu LLJ a nočním oteplením (obr. S4). Abychom prozkoumali mechanismy, zkoumáme vertikální teplotní gradient, rozptyl atmosféry a rychlost větru (obrázek S5) a poté zkoumáme vztah mezi oteplením a těmito proměnnými pomocí rozptylových grafů (obrázek S6). Zjistili jsme určitý soulad mezi rychlostí disipace regulace a oteplovacím účinkem větrných turbín, ale korelace je slabá.

Obrázek 2 zkoumá vztah mezi změnami vertikálního teplotního gradientu, rozptylem atmosféry a simulovaným oteplením. Větrné turbíny snižují vertikální gradienty mícháním. Během dne jsou vertikální teplotní gradienty při povrchu malé v důsledku konvekce poháněné slunečním zářením a turbíny je snižují jen nepatrně. V noci jsou gradienty větší, zejména v létě, a snížení gradientů způsobené mícháním vyvolaným turbínami je větší. K největšímu oteplení dochází v době, kdy je snížení gradientu nejsilnější a kdy je proporcionální nárůst TKE největší.

S rostoucí hustotou turbín se oteplování a výroba energie sytí (obrázek 3). Teplotní nasycení je prudší, takže poměr změny teploty na jednotku vyrobené energie se s rostoucí hustotou turbín snižuje. To naznačuje, že dopady větrné energie na klima v přepočtu na jednotku vyrobené energie mohou být poněkud větší při nižších hodnotách celkové výroby větrné energie.

Zdá se, že výroba energie se blíží mezní hodnotě výroby větrné energie při hustotě turbín poněkud vyšší, než je námi zkoumané maximum ($3,0 \text{ MW km}^{-2}$). Hustota výkonu $1,5 \text{ MW km}^{-2}$ zhruba odpovídá hustotě výkonu větrných elektráren v USA instalovaných v roce 2016,³⁶ a hustota výkonu této simulace $0,46 \text{ W m}^{-2}$ je velmi blízká hustotě výkonu $0,50 \text{ W m}^{-2}$ pozorované u větrných elektráren v USA během roku 2016.³⁶ Nejvyšší hustota turbín dává plošnou (povrchovou) hustotu výkonu $0,5 \text{ MW km}^{-2}$, v souladu s některými předchozími studiemi,^{15,22,24,26,33} ale poloviční oproti $1,4 \text{ W m}^{-2}$ předpokládanému možnému do roku 2050 ze stejné hustoty turbín $3,0 \text{ MW km}^{-2}$ do větrných oblastí podle DOE.²⁸ Ačkoli jsme zde nepočítali maximální míru výroby větrné energie, extrapolace



Obrázek 2. Měsíční odezva denního a nočního klimatu na referenční scénář

(A a B) Průměrné měsíční denní a noční hodnoty nad oblastí větrné farmy pro (A) vertikální teplotní gradient mezi dvěma nejnižšími modelovými úrovněmi (0-56 a 56-129 m) pro kontrolní a referenční scénář ($0,5 \text{ MW}_i \text{ km}^{-2}$) a (B) rozdíly mezi referenčním a kontrolním scénářem v teplotě vzduchu ve 2 m (plná modrá pole) a turbulentní kinetické energii (TKE) v nejnižší modelové úrovni (průhledná pole). V obou případech rozsah svislé čáry ukazuje standardní 1,5, mezikvartilové rozpětí a box představuje 25., 50. a 75. percentil.

Z obrázku 3 vyplývá, že se jedná přibližně o 2 TW_e , což je výrazně méně než $3,7 \text{ TW}_e$ technického potenciálu odhadovaného DOE^{28,29} na menší ploše. Je zřejmé, že při odhadech technického potenciálu větrné energie je třeba brát v úvahu interakce větrných turbín s klimatem.

Výklad

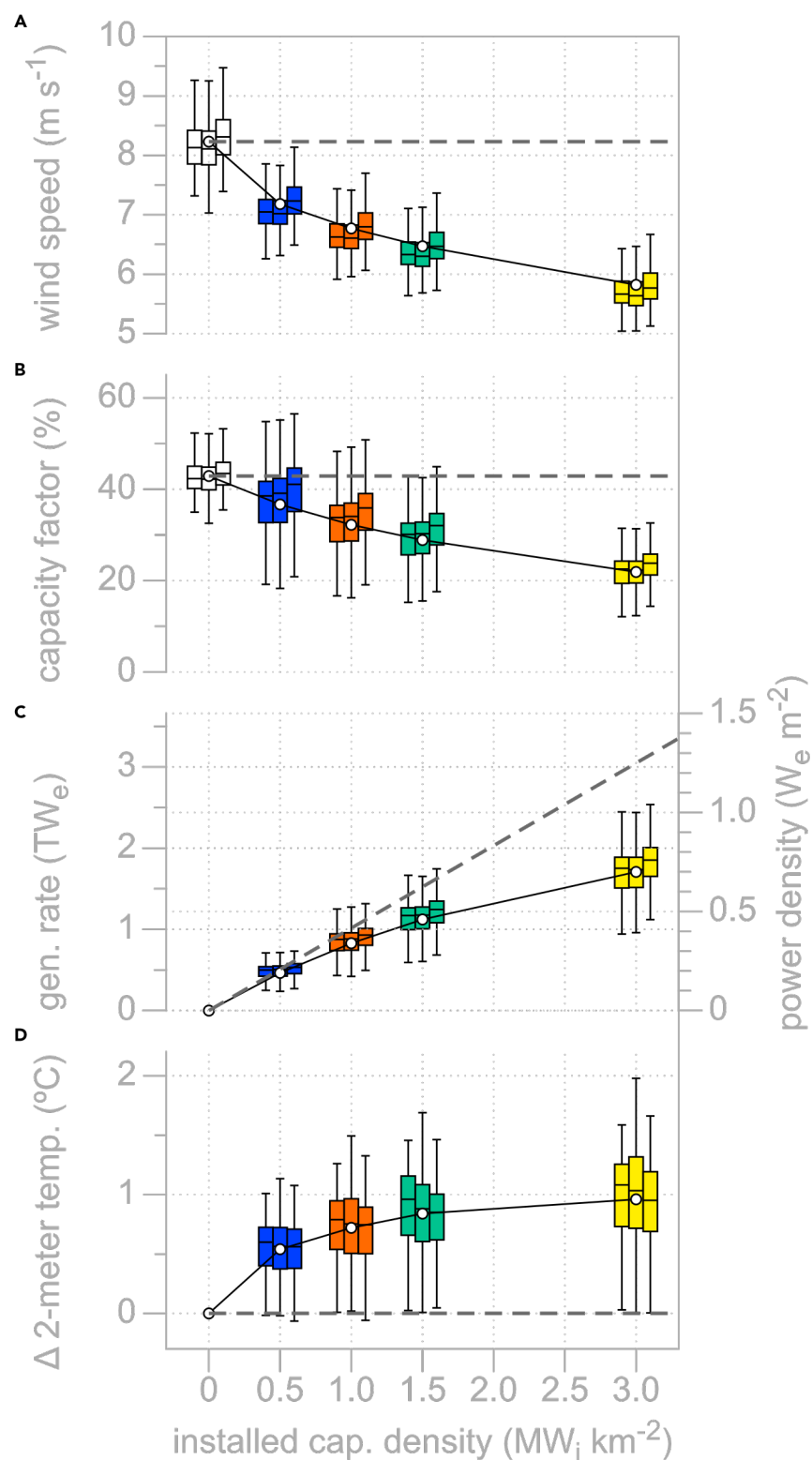
Klimatické dopady větrné energie mohou být neočekávané, protože větrné turbíny pouze přerozdělují teplo v atmosféře a ohřev $1,0 \text{ W m}^{-2}$ v důsledku rozptylu kinetické energie v nižších vrstvách atmosféry představuje pouze asi 0,6 % denního průměru radiačního toku. Klimatické dopady větru však nejsou způsobeny dodatečným ohřevem ze zvýšeného rozptylu kinetické energie. Dopady vznikají proto, že interakce mezi turbínami a atmosférou mění toky v přízemní vrstvě atmosféry, což vyvolává klimatické dopady, které mohou být mnohem větší než přímý dopad samotného rozptylu.

Protože větrné turbíny odebírají kinetickou energii z atmosférického proudění a zpomalují rychlost větru, vertikální gradient rychlosti větru se zkracuje a zvyšuje se jeho unášení směrem dolů.¹⁵ Tyto interakce zvyšují promíchávání vzduchu shora a vzduchu při povrchu. Síla těchto interakcí závisí na meteorologii a zejména na denním cyklu ABL.

Během dne se atmosféra vlivem sluneční konvekce promíchává do výšek.



1-3 km.³⁵



Obrázek 3. Změny průměrné odezvy na změny hustoty instalovaného výkonu

(A-D) Společná osa x představuje instalovaný výrobní výkon elektrické energie na jednotku plochy. Všechny hodnoty jsou průměry za oblast větrných farem. (A) rychlost větru ve výšce náboje osmdesáti čtyř metrů, (B) kapacita [Obrázek 3](#).

[Pokračování](#)

faktor, tj. poměr realizovaného elektrického výkonu a výrobní kapacity, (C) výkon jako součet a na jednotku plochy a (D) rozdíl dvoumetrových teplot vzduchu. Pro každou hodnotu jsou zobrazeny tři různé roky údajů (2012-2014 zleva doprava) jako tři krabicové grafy (1,5, mezikvartilové rozpětí s 25., 50. a 75. percentilem). Barvy pomáhají seskupit shodné hustoty instalovaného výkonu. Třiletý průměr je zobrazen pomocí bílých bodů a spojovacích plných čar. Čárkované čáry znázorňují očekávané výsledky, pokud by klima nereagovalo na rozmístění větrných turbín.

Větrné turbíny pracující během dne jsou obklopeny tímto již dobře promíchaným vzduchem, takže klimatické dopady, jako jsou denní teplotní rozdíly, jsou obecně poměrně malé. V noci má radiační ochlazování za následek stabilnější podmínky na povrchu, přičemž přibližně 100-300 m stabilního vzduchu odděluje vliv povrchového tření od větrů ve výšce.³⁵ Větrné turbíny pracující v noci, jejichž fyzický dosah je 100-150 m a výška vlivu v noci dosahuje 500 m a více,¹⁵ mohou unášet teplejší (potenciální teplota) vzduch shora dolů do dříve stabilního a chladnějšího (potenciální teplota) vzduchu u povrchu, čímž dochází k oteplení povrchových teplot. Kromě přímého míchání vlivem turbínových kmitů snižují turbíny gradient rychlosti větru pod svými rotory, a tím zosťrují gradient ve výšce. Tento ostrý gradient pak může vytvářet další turbulence a vertikální míchání.

Toto vysvětlení je v podstatě v souladu s výrazným kontrastem mezi dnem a nocí v našem srovnávacím scénáři ([obrázky 1B a 1C](#)). V oblasti větrných farem dochází během dne ve většině lokalit k vyšším teplotám vzduchu, ačkoli 15 % lokalit vykazuje v červenci až září účinek denního ochlazení. V noci v období červenec-září vykazuje ochlazovací účinek méně než 5 % lokalit a oteplovací účinek v noci ve všech měsících je mnohem větší než ve dne. Tento denní a noční oteplovací efekt je také větší s vyšší hustotou turbín ([obr. S7](#)). A konečně, teplotní perturbace ve srovnávacím scénáři vykazuje silnou korelaci s rozdíly v TKE v nejnižší modelové úrovni od 0 do 56 m ([obrázek 2B](#)), přičemž tyto nárůsty TKE po větru od turbín byly dříve pozorovány v lowě⁴ a na moři v Německu,³⁷ a podporují naše vysvětlení, že teplotní odezva je způsobena zvýšeným vertikálním mícháním ([obrázek 2](#)).

Pozorovací důkazy o klimatických vlivech

Zatímco četné pozorovací studie spojují větrnou energii se snížením rychlosti větru a zvýšenou turbulencí v křídlech turbín,^{1,4,7,38,39} deset studií kvantifikovalo klimatické dopady vyplývající z těchto změn ([tabulka 1](#)).

Tři pozemní studie měřily rozdíly v povrchové teplotě^{1,5,7} a výparu.⁵ Obecně tato pozemní pozorování ukazují minimální klimatické dopady během dne, ale zvýšené teploty a míru výparu v noci.

Sedm satelitních studií kvantifikovalo rozdíly v povrchové (kožní) teplotě. Buď porovnáním časových úseků před a po nasazení turbín, nebo porovnáním oblastí proti větru, uvnitř a po větru od turbín byl zjištěn prostorový rozsah a intenzita oteplování u 28 provozovaných větrných elektráren v Kalifornii,⁴⁰ Illinois, Iowa,^{6 2} a Texasu⁸⁻¹⁰. Mezi těmito satelitními pozorováními existuje značná shoda, a to navzdory různorodosti místní meteorologie a měřitek rozmístění větrných farem. Rozdíly denních teplot byly malé a mírně teplejší a chladnější, zatímco rozdíly nočních teplot byly větší a téměř vždy teplejší ([tab. 1](#)). Interpretaci družicových dat ztěžuje pevně stanovená doba přeletu a mraky, které někdy zakrývají povrch.

[Tabulka 1. Přehled pozorovacích studií, které dávají do souvislosti rozdíly teplot vzduchu s větrnými elektrárnami](#)

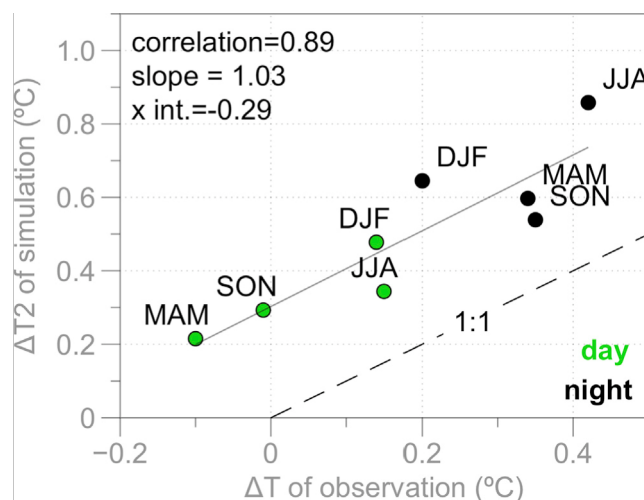
Odkaz	SAT nebo GND	Období	Stát	Poznámky: Klimatické vlivy v rámci provozované větrné farmy nebo v její těsné blízkosti
Baidya Roy a Traiteur, ¹ 2010	GND	53 dní	CA	ráno; mírné ochlazení během léta; zvýšení teploty vzduchu v 5 m po větru o 1C v noci až do začátku léta.
Walsh-Thomas et al. ⁴⁰ 2012	SAT	-	CA	o 2C vyšší teploty pokožky do vzdálenosti asi 2 km po větru, s viditelnými teplotními rozdíly do vzdálenosti 12 km po větru.
Zhou et al. ⁹ 2012	SAT	9 let	TX	oteplení je prostorově konzistentní s rozmístěním větrných turbín JJA noc = +0,72C, DJF noc = +0,46C; JJA den = +0,04C; DJF den = +0,23C;
Zhou et al. ¹⁰ 2013	SAT	6 let	TX	Hodnoty QA1: DJF noc = +0,22C, MAM noc = +0,29C, JJA noc = +0,35C, SON day = SON noc = 0,40, 0,04 C, DJF den = +0,11C, MAM den = 0,11C, JJA den = +0,17C,
Zhou et al. ¹⁰ 2013	SAT	2 roky	TX	SON noc = 0,47QA1 hodnoty: DJF noc = CC, DJF den = +0,140.01C, MAM noc = +0,42C, MAM den = C, JJA noc = +0,670.42C, JJA den = +1,52C, C, SON den = +0,12
Xia et al. ⁸ 2016	SAT	7 let	TX	DJF noc = +0,26C, MAM noc = +0,40C, JJA noc = +0,42C, SON noc = +0,27C, roční noc = +0,31C, den SON = 0,02C, roční den = C, den DJF = +0,180,09C, den MAM = CO,25C, JJA den = 0,26
Harris et al. ² 2014	SAT	11 let	IA	MAM noc = +0,07C, JJA noc = +0,17C, SON noc = +0,15C
Rajewski et al. ⁴ 2013	GND	122 dní	IA	nižší teploty (0,07 podél okraje velké větrné farmy přímo po větru) s denními obdobími, která byla o 0,7513 turbíny; obecně chladnější a nočními obdobími, která byla o 1,0-1,5C teplejší.
Rajewski et al. ⁵ 2014	GND	122 dní	IA	podél okraje velké větrné farmy po větru od 13 turbín umístěných společně s kukuřicí a sójou; noční tepelný tok a respirace CO ₂ se zvýší 1,5-2krát a rychlost větru se sníží o 25-50 %; denní toky H ₂ O a CO ₂ se zvýší 5krát 3-5 průměrů po větru.
Slawsky et al. ⁶ 2015	SAT	11 let	IL	DJF noc = +0,39C, MAM noc = +0,27C, JJA noc = +0,18C, SON = +0,26C; Roční = +0,26C
Smith et al. ⁷ 2013	GND	47 dní	důvěrné	Jaro; noční oteplení o 1,9C po větru od větrné farmy s 300 turbínami

SAT - družicová pozorování; GND - pozemní pozorování. Všimněte si, že měření označená jako stejný stav byla provedena nad stejnými větrnými elektrárnami.

Ačkoli se náš referenční scénář co do rozsahu a rozmístění turbín velmi liší od provozních větrných elektráren, je přesto poučné porovnat naši simulaci s pozorováním. Porovnáváme výsledky na jediném místě v Texasu (100,2W, 32,3N), kde se nachází jedno z největších světových seskupení provozních větrných turbín (200 km², sestávající z otevřeného prostoru a nejednotné hustoty turbín 3,8-4,7 MW km⁻²)²⁴¹ bylo ve třech pozorovacích studiích v [tabulce 1](#) spojeno s rozdíly v povrchové teplotě. Při vážení pozorování počtem pozorovaných let je v texaské lokalitě o 0,01 °C tepleji ve dne a o 0,29 °C tepleji v noci (údaje v [tabulce S2](#)). Náš referenční scénář s jednotnou hustotou turbín 0,5 MW km² je v této lokalitě o 0,33C teplejší ve dne a o 0,66C teplejší v noci. Abychom prozkoumali kvantitativní korelaci mezi sezónní a denní odezvou, bereme 8 sezónních denních a nočních hodnot jako nezávislé dvojice ([tabulka S2](#)) a zjišťujeme, že pozorování a simulace spolu silně korelují ([obrázek 4](#)). Tato shoda poskytuje silný důkaz, že fyzikální mechanismy, které jsou modifikovány rozmístěním větrných turbín, jsou naším modelem zachyceny. Tento mechanismus by mohl být testován přímo, kdyby byla k dispozici pozorování teploty proti větru a po větru od velké soustavy turbín s vysokým časovým rozlišením (<3 hod.).

Omezení modelového rámce

Reakce na klima částečně souvisí s výběrem a umístěním větrné turbíny (větrných turbín). Modelovali jsme konkrétní turbínu o výkonu 3,0 MW, ale v budoucnu může dojít k přesunu k větrným turbínám s vyšší výškou náboje a větším průměrem rotoru. Předpokládali jsme také, že



Obrázek 4. Srovnání pozorování a simulací pro lokalitu Texas (tabulka 1) Srovnáváme denní a noční odezvu ve čtyřech ročních obdobích. Pozorování představují rozdíly povrchových (kožních) teplot. Simulace jsou rozdíly teplot vzduchu ve výšce 2 m mezi referenčním scénářem ($0,5 \text{ MW km}^2$) a kontrolou. Všimněte si, že zatímco korelace v osmi bodech je vysoká, simulovaná odezva je větší, pravděpodobně kvůli mnohem větší narušené ploše a rozdílu mezi teplotou pokožky a 2 m vzduchu.

že turbíny jsou v oblasti větrné farmy rozmístěny rovnoměrně, ale skutečné rozmístění turbín je nerovnoměrnější, což může také změnit interakce mezi turbínou a atmosférou a povrchem.

Okrajové podmínky modelu jsou předepsané a nereagují na změny způsobené větrnými turbínami. Přesto předchozí práce prokázaly, že nelokální klimatické reakce na větrnou energii mohou být významné,⁴² což naznačuje, že simulace našeho referenčního scénáře pomocí globálního modelu (bez okrajových podmínek obnovujících výsledky podle klimatologie) by umožnila posoudit možné klimatické dopady mimo USA. Odstranění okrajových podmínek by také mohlo zvýšit oteplení v oblasti větrných elektráren. Tříleté simulační období bylo rovněž ukončeno v jednoletých blocích, takže nesimulujeme odezvu dlouhodobější dynamiky klimatu ovlivňovanou proměnnými, jako je vlhkost půdy. A konečně, rozlišení modelu ovlivnilo odhadované klimatické dopady. Simulace s horizontálním rozlišením 10 km a nejvyšší hustotou turbín $3,0 \text{ MW km}^2$ způsobily o 18 % menší oteplení než simulace s horizontálním rozlišením 30 km (+0,80C a +0,98C). Simulace využívající globální model s nerovnoměrně rozmístěnou sítí s vysokým rozlišením nad USA by mohly některé z těchto nejistot vyřešit.

Srovnání klimatických dopadů a klimatických přínosů

Dopady energetických technologií na životní prostředí se často porovnávají v přepočtu na jednotku vyrobené energie.⁴² Protože hlavním přínosem nízkouhlíkových energií, jako je větrná a solární energie, je snížení změny klimatu, jsou pro veřejnou politiku důležitá bezrozměrná srovnání dopadů a přínosů snížení emisí na klima.

Dopady na klima budou samozřejmě záviset na celé řadě klimatických proměnných, které by bylo třeba prozkoumat v rámci komplexního posouzení dopadů. V této analýze nicméně používáme jako jedinou metriku změny klimatu teplotu vzduchu 2 m vzhledem k tomu, že (1) že existují důležité přímé dopady teploty, (2) že změna teploty je silně korelována s dalšími důležitými klimatickými proměnnými a (3) že použití teploty jako zástupného



ukazatele pro jiné dopady je při hodnocení dopadů klimatu běžné. Omezení a výhrady naší analýzy jsou uvedeny v následujícím pododdíle.

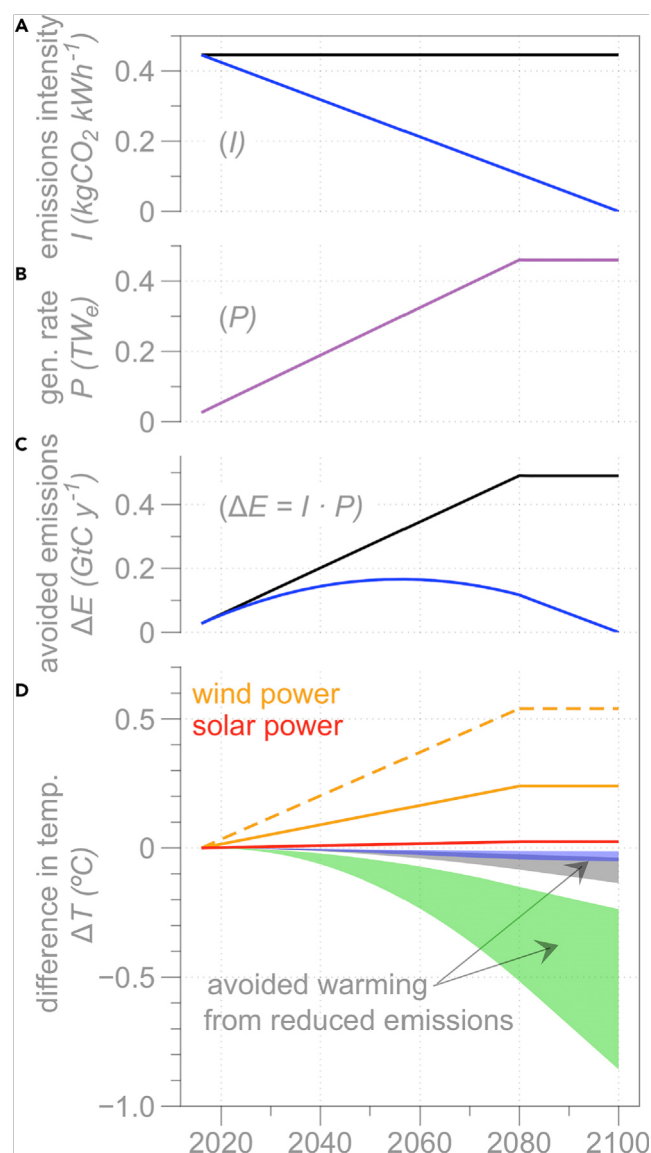
Když větrná (nebo solární) energie nahradí fosilní energii, sníží emise CO_2 , čímž omezí globální změnu klimatu způsobenou skleníkovými plyny, a zároveň způsobí klimatické dopady, jak je popsáno výše i jinde.^{1–15,22–26,34,40,43–45} Klimatické dopady se liší (přínejmenším) ve dvou důležitých rozměrech. Za prvé, přímý klimatický dopad větrné energie je okamžitý, ale zmizel by, kdyby byly turbíny odstraněny, zatímco klimatický přínos snížení emisí roste s kumulativním snížením emisí a přetrvává po tisíceletí. Za druhé, přímé klimatické dopady větrné energie jsou převážně lokální v regionu větrné farmy, zatímco přínosy snížení emisí jsou globální. K těmto rozdílům se vracíme a rozvádíme je v systematickém seznamu výhrad na konci této podkapitoly.

Jako krok k porovnání dopadů větrné energie na klima a přínosů pro klima porovnáváme oteplení nad USA. Začneme předpokladem, že výroba větrné energie v USA lineárně vzroste ze současné úrovně na 0,46 TW_e v roce 2080 a poté bude konstantní. Související oteplení odhadujeme lineárním škálováním teplotních rozdílů našeho referenčního scénáře s výrobou větrné energie. Množství zamezených emisí - a tedy přínos pro klima - závisí na emisní náročnosti elektřiny, kterou větrná energie nahradí. Nejistoty v časovém vývoji uhlíkové náročnosti výroby elektřiny v USA při absenci větrné energie zohledňujeme pomocí dvou vývojových tendencí. Jedna cesta předpokládá statickou intenzitu emisí na úrovni roku 2016 (0,44 $\text{kgCO}_2 \text{ kWh}^{-1}$), zatímco u druhé cesty intenzita emisí lineárně klesá až na nulu v roce 2100, což zhruba odpovídá modelu GCAM⁴⁶, který odpovídá scénáři IPCC RCP4.5. Obě emisní cesty se pak snižují o (nulovou emisní) míru výroby větrné energie v té době (obr. 5C). První cesta pravděpodobně přehání snížení emisí větrné energie, zatímco druhá odráží snížený přínos větrné energie pro klima při přechodu na bezuhlíkovou síť, která by mohla být napájena solární nebo jadernou energií.

Je nepravděpodobné, že by USA provedly hluboké snížení emisí, zatímco zbytek světa by pokračoval v dosavadním vývoji, proto jsme zahrnuli třetí cestu, která funguje stejně jako první cesta, s tím rozdílem, že celosvětová (nikoliv pouze americká) intenzita emisí elektřiny klesne na nulu (obrázek S8).

Snížení globálního oteplování větrem odhadneme tak, že na funkci odezvy emisí na klimatický impuls aplikujeme dvě americké a jednu globální cestu emisí.⁴⁷ Tyto globální výsledky převedeme na odhad oteplování v USA pomocí poměru oteplování v USA a globálního oteplování 1,34:1 z průměrů souborů IPCC RCP4.5 a RCP8.5 (obrázek S9,).⁴⁸

Oteplení podle referenčního scénáře o 0,24 °C v kontinentální části USA a o 0,54 °C v oblasti větrných elektráren je v závislosti na výchozím scénáři malé až velké. Klimatické dopady jsou malé, pokud je porovnáme s prognózami teploty v USA - historické a probíhající globální emise by měly způsobit, že kontinentální USA budou do roku 2030 teplejší o 0,24C než dnes (obrázek S8). Za předpokladu, že dojde ke globálnímu snížení emisí, pak klimatické dopady větrné energie ovlivňující USA v roce 2100 přibližně odpovídají oteplení, kterému by se zabránilo v důsledku snížení globálních emisí (zelená oblast na obrázku 5D). Klimatické dopady jsou velké, pokud jsou USA jedinou zemí, která v tomto století sníží emise (modře a šedě stínované oblasti na obrázku č. 2).



Obrázek 5. Dopady oteplování klimatu v porovnání s přínosy snížení emisí pro klima (A) Dva scénáře pro USA, statická (černá) a klesající (modrá) intenzita emisí I z elektrické energie v USA.

(B) Scénář, ve kterém se výkon P z větrné nebo solární energie do roku 2080 zvýší na 0,46 TWe podle našeho referenčního scénáře.

(C a D) Zamezené emise vypočtené jako $\Delta E = I \cdot P$ (C) a výsledné 2m teplotní rozdíly v oblasti větrných farem (tečkované čáry) a v kontinentálních USA (plné čáry) (D). Hodnoty pro větrnou energii lineárně škálované z našeho referenčního scénáře, zatímco hodnoty pro solární energii jsou odvozeny z Nemetu.¹⁸ Pro srovnání je uvedeno zamezení oteplení kontinentálních USA v důsledku snížení emisí pro statický scénář USA (šedá barva) a scénář klesajícího stavu USA (modrá barva). Zelená plocha ukazuje, jakému oteplení se kontinentální USA vyhnou, pokud budou globální emise elektřiny do roku 2080 nulové. Rozsah zamezeného oteplení pro každou cestu je odhadnut na základě minimálních a maximálních hodnot v rámci funkce impulsní odezvy emisí na klima.

Obrázek 5D). Na časovém měřítku záleží, protože dopady na klima jsou okamžité, zatímco přínosy pro klima rostou pomalu s kumulací snížení emisí. Čím delší je časový horizont, tím méně významné jsou dopady větrné energie ve srovnání s jejími přínosy (rámeček 1).



Rámeček 1. Omezení použití těchto výsledků k porovnání klimatických dopadů větrné energie se změnou klimatu způsobenou dlouhodobými skleníkovými plyny

Z výše uvedeného srovnání vyplývá, že pokud by poptávka po elektřině v USA byla pokryta větrnou energií z USA, musely by soustavy větrných elektráren fungovat více než sto let, než by byl efekt oteplování nad kontinentální částí USA způsobený interakcí turbín a atmosféry menší než efekt snížení oteplování v důsledku snížení emisí. Tento závěr je podmíněn řadou výhrad, včetně následujících:

V porovnání s větrnou energií způsobují vyšší teploty v důsledku změny klimatu zásadně odlišné mechanismy. Zvýšená koncentrace skleníkových plynů snižuje radiační tepelné ztráty do vesmíru, čímž se v atmosféře zachytí více tepla a způsobí vyšší teploty povrchu. Větrná energie nepřidává do atmosféry více tepla - větrné turbíny přerozdělují teplo mícháním a mění velkoplošné proudění, což obojí může změnit klima.

Naše srovnání bylo založeno pouze na rozdílech teplot vzduchu při povrchu. Větrné turbíny i skleníkové plyny mění řadu vzájemně souvisejících klimatických proměnných. Použití povrchové teploty jako jediného ukazatele dopadů na klima může zkreslit výsledný poměr dopadů a přínosů oběma směry. Klimatické dopady referenčního scénáře budou pravděpodobně větší a rozsáhlejší, pokud bychom nepoužili vynucené okrajové podmínky, které zabraňují jakýmkoli zpětným vazbám z velkoplošné cirkulace.

Výsledky závisí na míře výroby elektřiny z větru, což je v souladu s předchozími pracemi.¹¹ Naše výsledky (obr. 3) naznačují, že teplotní odezva je zhruba lineární v závislosti na míře výroby a hustotě výkonu. V míře, v jaké pozorujeme odchylky od linearitu (obr. S7), jsou dopady na klima na jednotku výroby větší u nižších hustot turbín.

Výsledky závisí na prostorovém rozmístění a hustotě větrných turbín. Předpokládali jsme, že budou využívány nejvíce větrné oblasti a že developeři budou využívat nízké hustoty turbín, aby maximalizovali výrobu na jednu turbínu. Na základě simulovaných výsledků s vyšší hustotou turbín (obr. 3) by zdvojnásobení hustoty turbín na území o polovinu větším, než je referenční scénář, mohlo přinést téměř stejný výkon jako referenční scénář, zatímco oteplení v této menší oblasti by se zvýšilo jen asi o třetinu.

Naše srovnávací metrika ignoruje mnoho možných přínosů a nevýhod dopadů na klima způsobených využíváním větrné energie, včetně:

- Arktické ochlazování zobrazené ve většině rozsáhlých modelových studií větrné energie.^{11,23,24,45}
- Vyšší minimální denní teploty snižují výskyt a závažnost mrazů a prodlužují vegetační období. V porovnání s kontrolou bylo vegetační období v regionu větrných farem v našem srovnávacím scénáři delší o 8 dní a s 3,0 MW_k km² o 13 dní.
- V některých lokalitách jsou v létě průměrné teploty nižší (obrázek 2B), což je v souladu s pozorováním,^{1,4} a mohlo by to snížit tepelný stres.
- Bylo zjištěno, že vyšší minimální denní teploty snižují výnosy plodin.⁴⁹
- Vyšší minimální teploty by mohly neznámým způsobem ovlivnit životní cyklus hmyzu.⁵⁰

Srovnání závisí na vážení plochy. Použili jsme rovnoměrné vážení, ale je možné zvážit vážení například podle počtu obyvatel nebo zemědělské produkce.

Srovnání velmi silně závisí na časovém horizontu. Zkoumali jsme časový horizont století, který je v souladu s potenciálem globálního oteplování, ale pro časové diskontování neexistuje jediná správná odpověď.^{51,52}

A konečně, výsledky závisí na porovnání dopadů a přínosů na úrovni USA a na globální úrovni: náš modelový rámec neumožňuje analýzy na globální úrovni, ale za předpokladu, že by se podstatná část oteplovacího účinku projevila tam, kde fungují větrné turbíny v USA, globální přínosy vážené rozlohou by kompenzovaly klimatické dopady dříve, než kdyby se dopady a přínosy kvantifikovaly pouze na území USA (jak je tomu zde).

Důsledky pro dekarbonizaci energetického systému

Vítr překonává fosilní paliva v jakémkoli rozumném měřítku dlouhodobých dopadů na životní prostředí v přepočtu na jednotku vyrobené energie. Hodnocení dopadů větrné energie na životní prostředí je důležité, protože stejně jako všechny zdroje energie má i větrná energie dopady na klima. Jak společnost dekarbonizuje energetické systémy s cílem omezit změnu klimatu, budou tvůrci politik čelit kompromisům mezi různými nízkouhlíkovými energetickými technologiemi, jako jsou větrná, solární, biopaliva, jaderná a fosilní paliva se zachycováním uhlíku. Každá z těchto technologií je přínosná pro globální klima tím, že snižuje emise uhlíku, ale každá z nich také způsobuje místní dopady na životní prostředí.

Naše analýza umožňuje jednoduché srovnání přínosů a dopadů větrné energie na klima v měřítku celého kontinentu. Protože větrná a solární energie jsou rychle rostoucí zdroje nízkouhlíkové elektřiny, porovnáváme poměr přínosů a dopadů větrné a solární energie na klima.

Vliv fotovoltaických elektráren na klima vyplývá ze změn absorpce slunečního záření (albedo). Dřívější studie odhadla, že radiační síla na jednotku produkce se zvýší o 0,9 mWm²/TW_e ve scénáři, v němž účinnost modulů dosáhne v roce 2100 28 % s instalacemi na

20 % střech, 40 % travnatých ploch a 40 % pouští.¹⁸ Za předpokladu, že klimatický dopad je lokalizován na oblast nasazení, a při použití citlivosti klimatu $0,8\text{K/Wm}^2$,⁵³ by výroba $0,46\text{ TW}_e$ fotovoltaických článků ohřála kontinentální USA o $0,024\text{C}$. Tento vliv na oteplení je desetkrát menší než vliv větrné energie ($0,24\text{C}$, obr. 5D) při stejné míře výroby energie. Tento rozdíl souvisí s rozdíly v hustotě výkonu, a tedy i s plošnou stopou na jednotku energie - americké solární farmy v současnosti vyrábějí asi $5,4\text{ W m}_e^{-2}$, zatímco americké větrné farmy vyrábějí asi $0,5\text{ W m}_e^{-2}$.³⁶ Předpokládáme, že dopady fotovoltaických elektráren na klima by se mohly snížit výběrem míst s nízkým albedem, aby se dopady snížily, nebo změnou spektrální odrazivosti panelů. Snížení klimatických dopadů větrných elektráren může být obtížnější, ale mohlo by se změnit zvýšením výšky rotoru turbíny nad vzdáleností od povrchu, aby se snížila interakce mezi turbulentním prouděním a zemí, nebo zapínáním či vypínáním turbín v závislosti na meteorologických podmínkách.

V souladu s pozorováními a předchozími modelovými analýzami bude větrná energie v USA pravděpodobně mít nezanedbatelné dopady na klima. Přestože se tyto dopady v mnoha důležitých ohledech liší od dopadů skleníkových plynů na klima, neměly by být opomíjeny. Dopady větrné energie na klima jsou ve srovnání s fotovoltaickými elektrárnami velké. Podobné studie jsou potřebné pro větrnou energii na moři, pro jiné země a pro další technologie obnovitelných zdrojů. Neexistuje jednoduchá odpověď ohledně nejlepší technologie obnovitelných zdrojů, ale volba mezi obnovitelnými zdroji energie by měla být podložena systematickou analýzou jejich výrobního potenciálu a jejich dopadů na životní prostředí.

DOPLŇUJÍCÍ INFORMACE

Doplňující informace obsahují devět obrázků a dvě tabulky a jsou k dispozici spolu s tímto článkem na adrese <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.09.009>.

PODĚKOVÁNÍ

Děkujeme A. Karmalkarovi za poskytnutí údajů o průměrné povrchové teplotě pro projekce IPCC RCP4.5 a RCP8.5,⁴⁸ S. Leroyovi a N. Brunsellovi za technickou pomoc a J. Holdrenovi, S. Pacalovi a třem anonymním recenzentům za konstruktivní připomínky k rukopisu. Tato práce byla podpořena Fondem pro inovativní výzkum klimatu a energetiky.

PŘÍSPĚVKY AUTORŮ

Konceptualizace, L.M.M. a D.W.K.; Metodologie, L.M.M.; Šetření, L.M.M. a D.W.K.; Psaní - původní návrh, L.M.M. a D.W.K.; Psaní - recenze a úpravy, L.M.M. a D.W.K.; Vizualizace, L.M.M. a D.W.K.; Získání finančních prostředků, D.W.K.

PROHLÁŠENÍ O ZÁJMECH

D.W.K. je zaměstnancem, akcionářem a členem výkonné rady společnosti Carbon Engineering (Squamish, BC). Společnost Carbon Engineering vyvíjí projekty na výrobu elektřiny z obnovitelných zdrojů na paliva a připravuje smlouvy na nákup větrné a solární energie.

Přijato: 4. května 2018

Revidováno: srpen 16, 2018

Přijato: září 2018

Vydáno: 4. října 2018



ODKAZY

- Baidya Roy, S. a Traiteur, J. (2010). 2. Harris, R.A., Zhou, L. a Xia, G. (2014). 3. Hasager, C.B., Vincent, P., Badger, J., Impacts of wind farms on surface air. Satelitní pozorování dopadů větrných elektráren na Badger, M., Di Bella, A., Penˆ a A., Husson, teploty. Proc. Natl. Acad. Sci. USA nocturnal land surface temperature in Iowa. R. and Volker, P. (2015). Using satellite 107, 17899-17904. Rem. Sens. 6, 12234-12246. SAR k charakterizaci proudění větru v okolí
- větrné farmy na moři. Energies 8, 5413- 5439.
- Rajewski, D.A., Takle, E.S., Lundquist, J.K., Oncley, S., Prueger, J.H., Horst, T.W., Rhodes, M.E., Pfeiffer, R., Hatfield, J.L., Spoth, K.K., et al. (2013). Crop wind energy experiment (CWEX): Observations of surface-layer, boundary layer, and mesoscale interactions with a wind farm (Experiment s větrnou energií v plodinách - pozorování interakcí v přízemní vrstvě, mezní vrstvě a mezoměřítu s větrnou farmou). Bull. Am. Meteorol. Soc. 94, 655-672.
- Rajewski, D.A., Takle, E.S., Lundquist, J.K., Prueger, J.H., Pfeiffer, R.L., Hatfield, J.L., Spoth, K.K., and Doorenbos, R.K. (2014). Změny toků tepla, H₂O a CO₂ způsobené velkou větrnou farmou. Agric. For. Meteorol. 194, 175-187.
- Slawsky, L.M., Zhou, L., Baidya Roy, S., Xia, G., Vuille, M., and Harris, R.A. (2015). Pozorované tepelné dopady větrných elektráren nad severním Illinois. Sensors (Basel) 15, 14981-15005.
- Smith, C.M., Barthelmie, R.J. a Pryor, S.C. (2013). In situ pozorování vlivu velké pobřežní větrné farmy na přízemní profily teploty, intenzity turbulence a rychlosti větru. Environ. Res. Lett. 8, 034006.
- Xia, G., Zhou, L., Freedman, J. a Baidya Roy, S. (2016). Případová studie vlivu turbulence mezní vrstvy atmosféry, rychlosti a stability větru na změny teploty vyvolané větrnou elektrárnou s využitím pozorování z terénu. Clim. Dyn. 46, 2179-2196.
- Zhou, L., Tian, Y., Baidya Roy, S., Thorncroft, C., Bosart, L.F., and Hu, Y. (2012). Impacts of wind farms on land surface temperature [Vliv větrných elektráren na teplotu zemského povrchu]. Nat. Clim. Chang. 2, 539-543.
- Zhou, L., Tian, Y., Baidya Roy, S., Dai, Y. a Chen, H. (2013). Diurnal and seasonal variations of wind farm impacts on land surface temperature over western Texas (Denní a sezónní změny vlivu větrných elektráren na teplotu zemského povrchu nad západním Texasem). Clim. Dyn. 41, 307-326.
- Keith, D.W., Decarolis, J.F., Denkenberger, D.C., Lenschow, D.H., Malyshev, S.L., Pacala, S. a Rasch, P.J. (2004). The influence of large-scale wind power on global climate (Vliv velkých větrných elektráren na globální klima). Proc. Natl. Acad. Sci. USA 101, 16115-16120.
- Kirk-Davidoff, D. a Keith, D.W. (2008). On the climate impact of surface roughness anomalies (Vliv anomáli drsnosti povrchu na klima). J. Atmos. Sci. 65, 2215-2234.
- Wang, C. a Prinn, R.G. (2010). Potenciální klimatické dopady a spolehlivost velmi rozsáhlých větrných elektráren. Atmos. Chem. Phys. 10, 2053-2061.
- Vautard, R., Thais, F., Tobin, I., Breˆ on, F.M., Deveziaux de Lavergne, J.G., Colette, A., Yiou, P. a Ruti, P.M. (2014). Simulace regionálních klimatických modelů naznačují omezené
- klimatické dopady provozovaných a plánovaných evropských větrných elektráren. Nat. Commun. 5, 3196.
- Miller, L.M., Brunsell, N.A., Mechem, D.B., Gans, F., Monaghan, A.J., Vautard, R., Keith, D.W. a Kleidon, A. (2015). Dvě metody odhadu limitů pro velkokapacitní výrobu větrné energie. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 112, 11169-11174.
- Deemer, B.R., Harrison, J.A., Li, S., Beaulieu, J.J., Delsontro, T., Barros, N., Bezerra-Neto, J.F., Powers, S.M., Dos Santos, M.A. a Arie Vonk, J. (2016). Emise skleníkových plynů z vodních ploch nádrží: nová globální syntéza. BioScience 66, 949-964.
- Searchinger, T., Heimlich, R., Houghton, R.A., Dong, F., Elobeid, A., Fabiosa, J., Tokgoz, S., Hayes, D. a Yu, T.H. (2008). Využívání orné půdy v USA pro biopaliva zvyšuje emise skleníkových plynů v důsledku změny využití půdy. Science 319, 1238-1240.
- Nemet, G.F. (2009). Čistý radiční vliv rozsáhlého nasazení fotovoltaiky. Environ. Sci. Technol. 43, 2173-2178.
- Siler-Evans, K., Lima, I., Morgan, M.G. a Apt, J. (2013). Regionální rozdíly v přínosech výroby elektřiny z větrných a solárních elektráren pro zdraví, životní prostředí a klima. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 110, 11768-11773.
- Millstein, D., Wiser, R., Bolinger, M. a Barbose, G. (2017). Přínosy větrné a solární energie pro klima a kvalitu ovzduší ve Spojených státech. Nat. Energy 2, 17134.
- Správa energetických informací USA (2017). Electric Power Monthly (publikace EIA). www.eia.gov/electricity/monthly/pdf/epm.pdf.
- Miller, L.M., Gans, F. a Kleidon, A. (2011). Odhad maximální globální extrahovatelnosti energie větru na zemském povrchu a související klimatické důsledky. Earth Syst. Dynam. 2, 1-12.
- Marvel, K., Kravitz, B. a Caldeira, K. (2012). Geofyzikální limity globální větrné energie. Nat. Clim. Chang. 2, 1-4.
- Adams, A.S. a Keith, D.W. (2013). Jsou odhady globálních zdrojů větrné energie nadhodnocené? Environ. Res. Lett. 8, 015021.
- Fiedler, B.H. a Bukovsky, M.S. (2011). Vliv obří větrné farmy na srážky v regionálním klimatickém modelu. Environ. Res. Lett. 6, 045101.
- Miller, L.M. a Kleidon, A. (2016). Snížení rychlosti větru při velkoplošném nasazení větrných turbín snižuje účinnost turbín a stanovuje nízké limity výroby. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 113, 13570-13575.
- Správa energetických informací USA (2017). U.S. Primary Energy Consumption by Source and Sector, 2016 (publikace EIA). www.eia.gov/totalenergy/data/monthly/pdf/flow/css_2016_energy.pdf.
- Ministerstvo energetiky USA (2015). Wind Vision: A New Era for Wind Power in the United States (publikace DOE). www.energy.gov/sites/prod/files/WindVision_Report_final.pdf.
- Lopez, A., Roberts, B., Heimiller, D., Blair, N., and Porro, G. 2012. U.S. renewable energy technical potentials : a GIS-based analysis (Technické potenciály obnovitelných zdrojů energie v USA : analýza založená na GIS). DOE Tech. Rep. TP-6A20-51946. www.nrel.gov/docs/fy12osti/51946.pdf.
- Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D.M., Duda, M.G., Huang, X., Wang, W., and Powers J.G. A Description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR technical note NCAR/TN-475+STR. National Center for Atmospheric Research.
- Mesinger, F., DiMego, G., Kalnay, E., Mitchell, K., Shafran, P.C., Ebisuzaki, W., Jovi c, D., Woollen, J., Rogers, E. a Berbery, E.H. (2006). Severoamerická regionální reanalýza. Bull. Am. Meteorol. Soc. 87, 343-360.
- Fitch, A.C., Olson, J.B., Lundquist, J.K., Dudhia, J., Gupta, A.K., Michalakes, J., and Barstad, I. (2012). Local and mesoscale impacts of wind farms as parameterized in a mesoscale NWP model (Místní a mezoměřítkové dopady větrných elektráren parametrizované v mezoměřítkovém modelu NWP). Mon. Weather Rev. 140, 3017-3038.
- Jacobson, M.Z. a Archer, C.L. (2012). Saturační potenciál větrné energie a jeho důsledky pro větrnou energii. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 109, 15679-15684.
- Barrie, D.B., a Kirk-Davidoff, D.B. (2010). Reakce počasí na řízení velké soustavy větrných turbín. Atmos. Chem. Phys. 10, 769-775.
- Garratt, J.R. (1994). The Atmospheric Boundary Layer (Cambridge University Press).
- Miller, L.M. a Keith, D.W. (2018). Kapacitní faktory a hustoty výkonu solární a větrné energie založené na pozorování. ERL. Zveřejněno online 4. října 2018. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aae102>.
- Platis, A., Siedersleben, S.K., Bange, J., Lampert, A., Baˆ rfuss, K., Hankers, R., Canˆ adillas, B., Foreman, R., SchulzStellenfleth, J., Djath, B., et al. (2018). První in situ důkazy o vlivech ve vzdáleném poli za větrnými elektrárnami na moři. Sci. Rep. 8, 2163.
- Hirth, B.D., Schroeder, J.L., Gunter, W.S. a Guynes, J.G. (2012). Měření kmitání turbíny v užítkovém měřítku pomocí mobilních výzkumných radarů TTUKA. J. Atmos. Ocean. Technol. 29, 765-771.
- Iungo, G.V., Wu, Y. a Porteˆ -Agel, F. (2013). Terénní měření kmitů větrných turbín pomocí lidarů. J. Atmos. Ocean. Technol. 30, 274-287.

40. [Walsh-Thomas, J.M., Cervone, G., Agouris, P. a Manca, G. \(2012\). Další důkazy o dopadech velkých větrných elektráren na teplotu zemského povrchu. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 16, 6432-6437.](#)
41. Denholm, P., Hand, M., Jackson, M. a Ong, S. 2009. Land-use requirements of modern wind power plants in the United States (Požadavky moderních větrných elektráren na využití půdy ve Spojených státech). DOE Tech. Rep. NREL/TP-6A2-45834. www.nrel.gov/docs/fy09osti/45834.pdf.
42. [Deschênes, O., a Greenstone, M. \(2011\). Změna klimatu, úmrtnost a adaptace: důkazy z ročních výkyvů počasí v USA. *Am. Econ. J. Appl. Econ.* 3, 152-185.](#)
43. [Christiansen, M.B. a Hasager, C.B. \(2005\). Wake effects of large offshore wind farms identified from satellite SAR. *Remote Sens. Environ.* 98, 251-268.](#)
44. [Jacobson, M.Z., Archer, C.L. a Kempton, W. \(2014\). Zkročení hurikánů pomocí soustav větrných turbín na moři. *Nat. Clim. Chang.* 4, 195-200.](#)
45. [Possner, A. a Caldeira, K. \(2017\). Geofyzikální potenciál větrné energie nad otevřenými oceány. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 114, 11338-11343.](#)
46. [Moss, R.H., Edmonds, J.A., Hibbard, K.A., Manning, M.R., Rose, S.K., van Vuuren, D. P., Carter, T.R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T. a další \(2010\). Další generace scénářů pro klima výzkumu a hodnocení změny klimatu. *Nature* 463, 747-756.](#)
47. [Ricke, K.L. a Caldeira, K. \(2014\). K maximálnímu oteplení dochází přibližně jedno desetiletí po emisi oxidu uhličitého. *Environ. Res. Lett.* 9, 124002.](#)
48. [Karmalkar, A.V. a Bradley, R.S. \(2017\). Důsledky globálního oteplení o 1,5C a 2C pro regionální změny teploty a srážek v přilehlých Spojených státech. *PLoS One* 12, e0168697.](#)
49. [Hatfield, J.L., Boote, K.J., Kimball, B.A., Ziska, L.H. a Izaurralde, R.C. \(2011\). Climate impacts on agriculture: implications for crop production \(Dopady klimatu na zemědělství: důsledky pro rostlinnou výrobu\). *Agron. J.* 103, 351.](#)
50. [Chen, S., Fleischer, S.J., Saunders, M.C. a Thomas, M.B. \(2015\). The influence of diurnal temperature variation on degree-day accumulation and insect life history \(Vliv denních teplotních výkyvů na akumulaci stupňů a životní historii hmyzu\). *PLoS One* 10, e0120772.](#)
51. [Kirschbaum, M.U.F. \(2014\). Potenciály dopadu změny klimatu jako alternativa k potenciálu globálního oteplování. *Environ. Res. Lett.* 9, 034014.](#)
52. [Ocko, I.B., Hamburg, S.P., Jacob, D.J., Keith, D.W., Keohane, N.O., Oppenheimer, M., Roy-Mayhew, J.D., Schrag, D.P. a Pacala, S.W. \(2017\). Odhalení časových kompromisů v debatách o klimatické politice. *Science* 356, 492-493.](#)
53. [Rahmstorf, S. \(2008\). Antropogenní změna klimatu: přehodnocení faktů. In *Globální*](#)

[oteplování: Zedillo, ed. \(Brookings Institution Press\), s. 34-53.](#)