

Szkoła Główna Handlowa w Warszawie
Kolegium Analiz Ekonomicznych

Jan Gąska

Wpływ zmian klimatu na polską gospodarkę

Autoreferat rozprawy doktorskiej
przygotowanej pod kierunkiem
naukowym prof. dr hab. Marka Góry

Warszawa, sierpień 2020 r.

Przedmiot, cel i zakres pracy

Celem pracy jest zbadanie wpływu zmian klimatycznych na polską gospodarkę. W szczególności, na podstawie zebranych i przeanalizowanych informacji określę wpływ zmian klimatycznych na gospodarkę poprzez zmiany częstotliwości i intensywności ekstremalnych zjawisk klimatycznych - powodzi rzecznych, burz i powodzi błyskawicznych, zmian poziomu morza, fal chłodu i upałów. Ponadto, uwzględnię oddziaływanie zmian klimatycznych na poziom szeroko rozumianego kapitału ludzkiego poprzez wpływ zmian klimatu na migrację, produktywność pracy i śmiertelność.

Rozprawa stanowi wartość dodaną dla literatury przedmiotu w trzech obszarach. Po pierwsze, na podstawie modeli empirycznych szacuję przyszłe skutki finansowe zmian klimatycznych – w szczególności określę wartość oczekiwaną strat spowodowanych ekstremalnymi zjawiskami klimatycznymi. O ile w przypadku powodzi rzecznych, straty te zostały już oszacowane np., w pracy Alfieri et al. (2015), to w przypadku szkód spowodowanych przez wiatr i burze, oszacowania w mojej pracy stanowią kontrybucję do literatury. Straty te stanowią następnie wkład do modelu makroekonomicznego równowagi ogólnej, który służy do przełożenia zmian w zasobie kapitału fizycznego na zmiany na gospodarkę. Tego typu oszacowanie dla Polski nie zostało jeszcze pokazane w literaturze, a również dla innych krajów wykorzystywane są głównie standardowe modele CGE, a nie zastosowany w pracy model nakładających się pokoleń (OLG) klasy DSGE. Po drugie, na podstawie przeszłych danych, estymuję panelowy model grawitacyjny w celu oceny wpływu zmian klimatycznych na migrację. Po trzecie, w modelu równowagi ogólnej oceniam również wpływ spowodowanych przez zmiany klimatu zmian zdrowotnych na gospodarkę i rynek pracy. Tak kompleksowe oszacowania dla Polski i na polskich danych są rzadkością w literaturze przedmiotu.

Choć literatura opisująca wpływ polityki klimatycznej na gospodarkę jest stosunkowo obszerna, to zazwyczaj koncentruje się ona na negatywnych skutkach krótkookresowych, takich jak spadek PKB związany ograniczeniami emisji gazów cieplarnianych. Wpływ redukcji emisji na zdrowie i kapitał ludzki jest opisany w znacznie węższym zakresie. Z drugiej strony, istnieją liczne publikacje opisujące wpływ zmian klimatycznych na wysokość strat spowodowanych ekstremalnymi zjawiskami klimatycznymi, ale brakuje oszacowań dotyczących zmian w gospodarce indukowanych przez te straty. Ponadto, choć stosunkowo dobrze opisany jest wpływ zmian klimatycznych na zdrowie, oczekiwaną długość życia i oczekiwaną długość życia w zdrowiu, to brakuje literatury analizującej wpływ tych zmian na gospodarkę. Rozprawa doktorska przyczynia się do wypełnienia tych luk.

Celem rozprawy doktorskiej jest więc sformułowanie i przetestowanie następującej głównej hipotezy badawczej i hipotez pomocniczych:

Hipoteza główna:

Zmiany klimatyczne będą oddziaływać na polską gospodarkę w kilku wymiarach. Będą prowadzić do strat PKB, zmian struktury sektorowej gospodarki i zmian zatrudnienia.

Hipotezy pomocnicze:

1. Zmiany klimatu przyczynią się do wzrostu częstotliwości ekstremalnych zjawisk klimatycznych (powodzi i burz), co spowoduje wzrost wartości oczekiwanej strat oraz przyczyni się do zmian stopy deprecjacji kapitału.
2. Zmiany klimatu doprowadzą do wzrostu poziomu morza, prowadząc do przesiedleń ludzi i zniszczenia kapitału zlokalizowanego w strefach przybrzeżnych.
3. Zmiany klimatu zintensyfikują migracje, oddziałując na dostępność kapitału ludzkiego i zasobów siły roboczej.
4. Wzrost częstotliwości i intensywności fal upałów będzie oddziałował na śmiertelność, a zwiększenie się temperatury powietrza ograniczy produktywność pracy.
5. Łączny wpływ wszystkich efektów wymienionych powyżej będzie istotnie większy niż suma pojedynczych kanałów wpływu.

Tło literaturowe

Zmiany klimatyczne wywierają coraz większą presję na globalną gospodarkę poprzez ekstremalne zjawiska klimatyczne oddziałujące na produktywność rolnictwa, wywołujące straty kapitału i wpływające na zdrowie społeczne. Wpływ ten będzie się nasilać, stąd liczba oszacowań wpływu zmian klimatycznych na gospodarkę jest bardzo duża, istotne jest również zróżnicowanie wyników i szerokość przedziałów ufności wokół oszacowań wpływu poszczególnych kanałów. Czwarty raport IPCC (Kunreuther et al., 2014) wskazuje, że istnieją cztery kanały niepewności wokół oszacowań wpływu zmian klimatycznych na gospodarkę. Po pierwsze, nie wiadomo dokładnie jaka jest w rzeczywistości emisja gazów cieplarnianych – obecnie jest ona przybliżana na podstawie danych o aktywności, ale prawdziwa wielkość emisji jest wciąż nieznaną. Po drugie, zależność pomiędzy zmianami klimatu, a koncentracją gazów cieplarnianych nie jest do końca zrozumiana, a niepewność wokół różnych kanałów wpływu czy punktów zwrotnych jest tak duża, że Weitzmann (2009) wskazuje, że przy nawet minimalnym prawdopodobieństwie zagłady ludzkości, każda wielkość wydatków na redukcję emisji będzie uzasadniona. Wielkie straty spowodowane przez relatywnie rzadkie i mało prawdopodobne zjawiska stanowią istotną część zmian wartości oczekiwanej kosztów i nawet niewielkie zmiany ich prawdopodobieństwa mogą odwrócić wnioski analiz typu *cost-benefit*. Te stosunkowo mało prawdopodobne, lecz potencjalnie katastrofalne skutki powinny być motywacją dla ludzkości do ograniczenia zmian klimatu. Trzecim źródłem niepewności jest skala adaptacji i sposób, w jaki zmiany klimatu przełożą się na gospodarkę. Przykładowo, walka z emisją gazów cieplarnianych powinna przyczynić się do zmian struktury produkcji rolnej w kierunku plonów wymagających mniej energii i wody. Ponieważ wpływ zmian klimatu na produktywność produkcji mięsa, pszenicy, żyta czy ryżu jest inny, od zmian struktury produkcji rolnej zależy łączne oddziaływanie zmian klimatycznych na produktywność rolnictwa. Ponadto, związek częstotliwości susz i indeksów klimatycznych ze zmianami plonowania jest wciąż stosunkowo słabo zbadany i opisany (Piniewski et al., 2018). Innym przykładem są powodzie – w tym przypadku adaptacja pozwala na zmniejszenie wartości oczekiwanej strat spowodowanych przez powódź stuletnią o 42%. (Alfieri et al., 2015). Czwartym źródłem niepewności jest dokładność modelu, który przekłada straty wyestymowane metodami ekonometrycznymi na gospodarkę (w przypadku niniejszej rozprawy jest to *dynamiczny, stochastyczny model równowagi ogólnej* (DSGE)).

Pierwszym kanałem, przez który zmiany klimatyczne będą oddziaływać na gospodarkę, jest wpływ na produktywność rolnictwa. Według Schlenkera i Robertsa (2009) lub Lobella i Burke (2008), negatywny wpływ temperatury na uprawy dominuje nad pozytywnym wpływem zwiększonych opadów deszczu ze względu na znaczenie ekstremalnych temperatur w określonej fazie cyklu wzrostu roślin (Welch et al., 2010). Co więcej, chociaż opady oddziałują w nieco słabszym stopniu na uprawy, ekstremalne zjawiska w ciągu sezonu mogą znacząco je uszkodzić, szczególnie jeśli obfite opady są skoncentrowane w ciągu stosunkowo niewielkiej liczby dni (Fishman, 2016). Dla Polski, wraz ze szczegółową analizą odpowiednich produktów rolnych, tego typu badania zostały niedawno opublikowane przez zespół Kundzewicz et al. (2017). Zgodnie z ich wynikami, choć wpływ wzrostu temperatur na plony może być pozytywny, to zostanie zniwelowany przez negatywne konsekwencje wzrostu częstotliwości ekstremalnych zjawisk klimatycznych, takich jak powodzie czy susze. Niemniej jednak, mimo że adaptacja w rolnictwie jest ważnym elementem adaptacji do zmian klimatu jako takiej, jej wpływ na PKB i zatrudnienie byłby stosunkowo niewielki. Ponadto ostateczny kierunek wpływu zmian klimatu na uprawy w Polsce jest trudny do określenia, uwzględniając to, że inne kraje będą nieco mocniej dotknięte przez zmiany klimatu i polskie rolnictwo może skorzystać z przeniesienia produkcji z innych krajów.

Drugim istotnym kanałem oddziaływania jest wpływ coraz dłuższych fal upałów na intensywność pracy i zdolności poznawcze (Graff Zivin et al., 2018). Sudarshan et al. (2015), korzystając z danych z indyjskiego sektora produkcyjnego, pokazuje, że produktywność w środowisku o wysokiej temperaturze spada o 3% na 1 stopień Celsjusza wzrostu temperatury, głównie poprzez zmniejszenie wydajności pracowników i zwiększone prawdopodobieństwo absencji. Hsiang (2010) pokazał, że efekt

ten można podnieść na poziom całej gospodarki, ponieważ wzorce reakcji w całej gospodarce są zgodne z mikroekonomicznymi związkami pomiędzy temperaturą i wydajnością pracy. Podobne wyniki pokazuje Park i Heal (2014), którzy dodatkowo zauważają, że ta prosta zależność fizjologiczna może determinować rozkład globalnego bogactwa. W tym kontekście zmiany klimatyczne mogą pogłębiać nierówności między krajami, ponieważ będą dotkliwiej odczuwane w biedniejszych rejonach świata. Ponadto, zmiany klimatu mogą zwiększyć nierówności dochodowe wewnątrz krajów, ponieważ mniej produktywna siła robocza zostanie zastąpiona energią i kapitałem.

Trzeci kanał oddziaływania zmian klimatycznych na gospodarkę związany jest z zapotrzebowaniem na energię. Chociaż istotnie spodziewać się można pewnego spadku zapotrzebowania na ogrzewanie, zwłaszcza w chłodniejszym klimacie, zostanie ono skompensowane przez wzrost zużycia energii na klimatyzację (Davis i Gertler, 2015). Ponadto, linie przesyłowe będą tracić wydajność podczas pracy w wyższych temperaturach (Jaglom et al., 2014). Ciepłe wody rzeczne wpłyną na możliwości chłodzenia elektrowni jądrowych, oddziałując na ceny energii (Linnerud et al., 2011), a susze mogą doprowadzić do spadku wydajności elektrowni wodnych i przejścia na bardziej emisyjne źródła energii (Muñoz i Sailor, 1998). Zważywszy, że sektor energetyczny jest jednym z najważniejszych emitentów gazów cieplarnianych i odgrywa główną rolę przy dekarbonizacji, problemy te należy uwzględnić przy planowaniu transformacji energetycznej.

Zmiany klimatu oddziaływać będą również na handel międzynarodowy. Pomimo tego, że w dzisiejszych czasach prędkość i kierunek wiatru oraz prądy morskie nie odgrywają tak istotnej roli w określaniu kosztów transportu jak kiedyś (Feyrer i Sacerdote, 2009), zmiany klimatyczne będą oddziaływać na strukturę produkcji, ponieważ przewaga komparatywna w sektorze rolnictwa przesunie się na północ, co przyczyni się do złagodzenia negatywnego oddziaływania suszy na PKB w rolnictwie w takich krajach jak Polska. Dodatkowo, zmiany klimatyczne będą oddziaływać na migracje. Częstsze i bardziej dotkliwe ekstremalne zjawiska klimatyczne wpłyną na strukturę handlu zagranicznego, ponieważ produkty potrzebne do odbudowy zniszczonej infrastruktury zazwyczaj są pozyskiwane w kraju (Hsiang i Jina, 2014).

Kolejnym, być może najważniejszym w krajach takich jak Polska, kanałem wpływu zmian klimatu na gospodarkę będzie zmiana częstotliwości ekstremalnych zjawisk klimatycznych. Zmiany ryzyka powodzi oblicza się wprost na podstawie symulacji modelowych. Punktem wyjścia są modele globalne (tzw. *GCM – General Circulation Models*), które zapewniają warunki brzegowe do modeli regionalnych (tzw. *RCM – Regional Climate models*). Modele regionalne pozwalają na dokładne odzwierciedlenie rzeźby terenu, co jest ważnym czynnikiem, kształtującym lokalny mikroklimat i w znaczący sposób wpływa na projekcje (Rummukainen, 2010). Przykłady wykorzystania tego typu danych do szacowania zmian prawdopodobieństwa ekstremalnych zjawisk można znaleźć w pracach Trambly et al. (2012) czy Goodess et al. (2003). Knutson et al. (2008) użyli tego typu danych do pokazania zmian prawdopodobieństwa huraganów w Stanach Zjednoczonych. Literatura dotycząca wpływu zmian klimatycznych na ekstremalne zjawiska w Europie jest również stosunkowo obszerna. Przykładem tego typu prac jest np. Rojas et al. (2012), którzy wykorzystują dwanaście par modeli typu GCM-RCM, połączonych z modelem hydrologicznym LISFLOOD. Na podstawie dziennych przepływów w rzekach estymują oni rozkład Gumbela w odniesieniu do przepływów. Wskazują oni, że w Polsce można spodziewać się redukcji ryzyka powodzi, które można przypisać wyższym temperaturom zimowym i wiosennym, które zmniejszą ryzyko powodzi roztopowych. Jednak latem ryzyko powodzi wzrośnie ze względu na wyższe opady. Z tego powodu zmiany ryzyka powodziowego zależą od regionu – tam, gdzie częstsze i bardziej dotkliwe są powodzie wiosenne, powinno ono spaść, z kolei tam, gdzie częściej występują powodzie letnie – może rosnąć. Podobne wyniki przedstawiają we wcześniejszych badaniach Dankers i Feyen (2008) – ponieważ północna część Polski jest bardziej zagrożona przez powodzie roztopowe, a południowa - przez powodzie letnie, prawdopodobieństwo powodzi wzrośnie w południowej części Polski i zmniejszy się w północnej. Alfieri et al. (2015) pokazuje, że ze względu na nakładanie się różnych zjawisk hydrologicznych maksymalne roczne przepływy w rzekach wzrosną w Europie Środkowej i Wschodniej, a spadną w Hiszpanii, Skandynawii i krajach bałtyckich. W Polsce

częstotliwość dzisiejszego przekroczenia 100-letniego wzrośnie do 2070 r. o 80-90 %, co oznacza, skrócenie okresu powrotu takiego zdarzenia do około 50 lat. Podobne badanie przeprowadzone przez Roudier et al. (2016) pokazuje, że należy spodziewać się zarówno wzrostu częstotliwości intensywnych opadów (o 20-30 %), jak i podobnego zwiększenia się prawdopodobieństwa obecnych powodzi 100-letnich. Generalnie w całej Europie spodziewany jest wzrost częstotliwości powodzi, gdzie są one spowodowane intensywnymi opadami letnimi, i spadek tam, gdzie dominują powodzie roztopowe- w Skandynawii, Finlandii, północnej części Rosji i Alpach. Wyniki te są również zgodne z podobnymi badaniami dla Polski przeprowadzonymi przez Piniewskiego et al. (2017), gdzie obszary górskie były jedynymi częściami Polski, gdzie należy spodziewać się spadku częstotliwości i intensywności powodzi.

Następnym zjawiskiem, wiążącym się ze zmianami klimatu i oddziałującym na rynek pracy poprzez zdrowie są zmiany częstotliwości fal chłodu i upałów. W tym przypadku, prognozowanie zmian jest nieco łatwiejsze, ponieważ wynikają one bezpośrednio z symulacji modeli klimatycznych – nie ma więc potrzeby przekładania zmian klimatu na prawdopodobieństwo powodzi (zalania) określonych obszarów. Zgodnie z przewidywaniami modeli klimatycznych, częstotliwość fal upałów do 2100 roku wzrośnie czterokrotnie w stosunku do lat 1971-2000, ponadto wzrośnie ich długość i dokuczliwość (Lhotka et al., 2017). Reasumując, liczba kanałów, przez które zmiany klimatu wpłyną na gospodarkę, jest bardzo duża i trudno je wszystkie wymienić. Carleton i Hsiang (2016) w syntetyczny sposób podsumowują różne kanały oddziaływania zmian klimatycznych na gospodarkę i społeczeństwo

Poza analizami sektorowymi, istotną rolę w literaturze odgrywają modele, które pozwalają w zintegrowany sposób uwzględnić wpływ zmian klimatycznych na gospodarkę. Przykładowo, Berrittella et al. (2007) uwzględnia wodę jako czynnik produkcji w obliczeniowym modelu równowagi ogólnej (ang. *Computable General Equilibrium Model, CGE*) i pokazuje, że spadek dostępności wody na skutek zmian klimatycznych może zmniejszyć PKB o 3,5% PKB w północnej Afryce. Z kolei, Koopman et al. (2017) pokazuje, że choć przemysł może dostosować się do zmian klimatycznych przez zastosowanie bardziej efektywnych technologii, to w przypadku rolnictwa nie jest to możliwe. W konsekwencji rolnictwo w Holandii straci 2,2% swojej produkcji rolnej w 2050 r. Robinson et al. (2012) korzystają z dynamicznego modelu CGE w połączeniu z modelami sektorowymi do oceny wpływu zmian klimatu na gospodarkę Etiopii i wskazują, że w przypadku braku inwestycji adaptacyjnych gospodarka Etiopii będzie w 2050 r. ok. 10% mniejsza niż w scenariuszu odniesienia (bez zmian klimatu). Chalise i Naranpanawa (2016) używają modelu CGE do zbadania ekonomicznych skutków zmiany użytkowania gruntów w Nepalu w odpowiedzi na zmiany klimatyczne i twierdzą, że zmiana struktury upraw na odporniejsze może znacząco zredukować negatywny wpływ prognozowanych zmian klimatycznych na gospodarkę. Bosello et al. (2012) wskazuje, że wzrost temperatury o 1,9°C doprowadzi do około 0,5% zmniejszenia się światowego PKB, przy znacznych wahaniach regionalnych.

Analizując modele ekonomiczne używane do oceny wpływu zmian klimatycznych na gospodarkę, nie sposób pominąć tzw. zintegrowanych modeli oceny wpływu (ang. *Integrated Assessment Model – IAM*), zapoczątkowanych przez Williama Nordhousa, który za prace te otrzymał w 2018 roku Nagrodę Nobla z ekonomii. Modele tego typu łączą straty spowodowane przez ekstremalne zjawiska z gospodarką poprzez tzw. funkcję strat (ang. *damage function*) (Nordhaus, 1992). Przykładami nowszych prac rozwijających tego typu modele są Hope(2006) czy Rehdanz i Maddison(2005), którzy wskazują, że wpływ globalnego ocieplenia o skali 2,5°C i 1°C w 2050 roku wyniesie odpowiednio ok. 0,9% PKB i 0,4% PKB, ale niepewność wokół tych wyników jest ogromna (Tol, 2012). Istotna liczba prac koncentruje się również na ocenie tylko jednego kanału wpływu zmian klimatycznych na gospodarkę. Przykładowo, wpływ wzrostu poziomu morza przy podniesieniu globalnej temperatury o 3°C bez adaptacji jest szacowany na 4% PKB (głównie w Azji Południowo-Wschodniej) (Schinko et al., 2020), rolnictwa na 3% PKB (Nelson et al., 2014), a ekstremalnych zjawisk na 0,5% PKB (Stern, 2006). Łączny wpływ wszystkich zjawisk na gospodarkę może być estymowany przez włączenie oddziaływania poszczególnych kanałów wpływu do globalnego modelu równowagi ogólnej. W takim przypadku straty globalne są równe mniej więcej 3% PKB, a w przypadku Polski jest to ok. 0,5% PKB (Kompas et al.,

2018). Rozbieżności powyższych oszacowań wskazują jak duża jest niepewność wokół tego typu wyników.

Metodyka badań

W rozprawie doktorskiej wykorzystuję szereg narzędzi pozwalających na osiągnięcie określonych powyżej celów i zweryfikowanie hipotez badawczych.

W pierwszej kolejności dokonuję przeglądu istniejącej literatury dotyczącej przewidywanych zmian klimatycznych i ich wpływu na gospodarkę. Przegląd ten stanowi podstawę i uzasadnienie hipotez badawczych, a także stanowi podstawę dalszych rozważań. W pierwszym rozdziale staram się pokazać różnorodność narzędzi używanych przez ekonomistów do oceny współzależności pomiędzy zmianami klimatu, a gospodarką, aby uzasadnić hipotezę główną i hipotezy pomocnicze, a także wprowadzić czytelnika w świat badań dotyczących związków zmian klimatycznych i gospodarki. Rozdział drugi opisuje zmiany klimatyczne w Europie Środkowej, ze szczególnym uwzględnieniem Polski na podstawie istniejącej literatury. Prezentuję w nim sposób, w jaki zmiany klimatyczne wpłyną na częstotliwość ekstremalnych zjawisk, takich jak powodzie rzeczne czy burze. Ponadto, pokazuję, że pomimo wzrostu częstotliwości i intensywności susz rolniczych, wpływ zmian klimatu na wartość dodaną w sektorze rolniczym jest niejasny - w Polsce zmiany klimatu będą relatywnie bardziej umiarkowane niż w krajach położonych bliżej równika, a więc polskie rolnictwo może zyskać przewagę komparatywną, dzięki czemu wzrośnie eksport płodów rolnych. Ponadto, ostateczny wpływ zmian klimatu na sektor rolny zależy od zmian struktury produkcji rolnej i spożycia - w mojej rozprawie doktorskiej nie ma miejsca na szczegółową analizę tego sektora, więc prezentuję jedynie dotychczasowe wyniki literaturowe z pracy IFPRI (2019). Ponadto, opisuję dotychczasowe badania dotyczące częstotliwości i intensywności fal upałów, wskazując, że zgodnie z wcześniejszymi badaniami powinny one wzrosnąć. W rozdziale trzecim przywołuję dotychczasowe badania dotyczące związku zmian klimatycznych i gospodarki, aby uzasadnić, że pokazane w rozdziale drugim zmiany klimatyczne istotnie wpłyną na strukturę sektorową, zatrudnienie i PKB.

Następnym krokiem jest wykorzystanie informacji o zmianach klimatu do oszacowania bezpośrednich strat ekonomicznych z nich wynikających. Uwzględniam następujące wymiary zmian:

1. Straty wynikające ze zmian częstotliwości występowania powodzi rzecznych¹: na podstawie danych historycznych określiam rozkład strat wynikających z tych powodzi. Oszacowanie zmiany częstotliwości wynika z modelu hydrologicznego i wyników Piniewski et. al (2017), którzy na podstawie modeli klimatycznych szacują jak zmienią się dzienne przepływy w rzekach na skutek zmian klimatu.
2. Straty wynikające ze zmian częstotliwości występowania podtopień (tzw. flash floods), burz i spowodowane przez wiatr²: zgodnie z metodą zaproponowaną przez Pardowitz (2015), na podstawie symulacji modeli klimatycznych obliczyłem wielkość sześcianu przekroczeń maksymalnej dziennej prędkości wiatru ponad 98 percentyl dla danej lokalizacji. Metoda ta pozwoliła na ustalenie zmian wartości oczekiwanej strat spowodowanych przez wiatr i burze.
3. Straty wynikające ze zmian poziomu morza – w tym przypadku oparłem się na badaniach Paprotnego i Terefenko (2017), którzy określają wielkość strat dla zadanej wielkości wzrostu poziomu morza. Połączyłem te dane z danymi odnośnie przewidywanego wzrostu poziomu morza z pracy Jackson i Jevrejeva (2018).

¹ Powódź rzeczna to powódź wywołująca duże straty i obejmująca znaczące obszary, wynikająca z przechodzącej fali powodziowej i zalania obszarów przez wezbrane rzeki. Wezbranie może być zarówno skutkiem długotrwałych opadów, jak też topnienia śniegu wiosną.

² Podtopienia (and. *Flash floods*) to lokalne zalania infrastruktury wynikające z krótkotrwałych lecz gwałtownych opadów.

4. Wpływ zmian klimatu na migracje: W tym przypadku estymuję panelowy model grawitacyjny z wskaźnikami klimatycznymi w zbiorze zmiennych objaśniających. Następnie wykorzystuję ten model i przewidywane zmiany indeksów klimatycznych w celu oceny wpływu zmian klimatycznych na migracje.
5. Zmiana śmiertelności na skutek wzrostu intensywności i długości fal upałów oraz straty produktywności na skutek wzrostu temperatury zostały określone na podstawie wcześniejszych prac Goslinga et al. (2018) i Kendrovskiego et al. (2017).

Oszacowania bezpośrednich strat wywołanych przez zmiany klimatu wraz z ich rozkładem przestrzennym zostały przedstawione w czwartym rozdziale rozprawy doktorskiej (straty materialne wywołane zwiększeniem częstotliwości ekstremalnych zjawisk i wzrostem poziomu morza) i piątym (zmiany kapitału ludzkiego i zasobów siły roboczej wywołane przez zmiany klimatyczne).

Kolejnym etapem prac jest określenie, w jaki sposób, opisywane powyżej procesy przełożą się na gospodarkę jako całość przy pomocy modelu równowagi ogólnej. W literaturze ekonomicznej dotyczącej oszacowania wpływu polityki klimatycznej na gospodarkę tego typu narzędzia są wykorzystywane bardzo często – model CGE jest powszechnym narzędziem wykorzystywanym do oceny w jaki sposób limity emisji gazów cieplarnianych czy zmiany struktury sektora energetycznego wpłyną na PKB, zatrudnienie itp. Tego typu narzędzia są często łączone z modelami optymalizacyjnymi sektora energetycznego czy transportowego, żeby otrzymać bardziej spójne i dokładniejsze oszacowania. Z powodu powszechności tego typu badań, swoją rozprawę doktorską zdecydowałem się w całości poświęcić skutkom gospodarczym zmian klimatycznych – tego typu analiz opublikowano w literaturze znacznie mniej, niż w przypadku polityki klimatycznej jako takiej. O ile istnieje literatura poświęcona stratom wynikającym ze skutków ekstremalnych zjawisk w ujęciu modeli równowagi ogólnej czy modeli zintegrowanej oceny wpływu, to literatura, w której uwzględniono by również straty w kapitale ludzkim wynikającym ze zmian częstotliwości fal chłodu i upałów jest znacznie mniej obszerna i ogranicza się do kilku prac, w których zmiany te modelowane są przy pomocy standardowych modeli CGE (np. Hasegawa et al. 2016 czy Bosello et al. 2006). Zgodnie z moją wiedzą, nie są dotychczas dostępne tego typu oszacowania dla polskich danych.

W rozprawie doktorskiej do oceny skutków ekonomicznych wykorzystałem model nakładających się pokoleń (ang. *Overlapping generations – OLG*) zbudowany wg. metodologii dynamicznego stochastycznego modelu równowagi ogólnej. Model ten jest przystosowany jest do analiz polityki klimatycznej w następujący sposób:

1. Zawiera dwa rodzaje kapitału fizycznego, pozwalające na różnorodne odzwierciedlenie przyspieszonej deprecjacji kapitału fizycznego wynikającej ze zwiększonej częstotliwości ekstremalnych zjawisk. Podejście to jest inspirowane pracą Hallegatte et al. (2007), która uzasadnia, że ekstremalne zjawiska niszczą nie tylko kapitał o krańcowej produktywności, lecz raczej ten o średniej produktywności.
2. Zawiera rozbudowany model rynku pracy z poszukiwaniem pracy zgodnie z klasyczną pracą Mortensen, Pissarides (1994).
3. Struktura nakładających się pokoleń (OLG) pozwala na inne uwzględnienie migracji (które dotyczą głównie generacji pracujących) i śmiertelności wynikającej ze wzmożonej intensywności fal upałów (dotyczących głównie najstarszych pokoleń i emerytów).

Model skalibrowany został na podstawie danych makroekonomicznych publikowanych przez GUS (tablica przepływów międzygałęziowych) i Eurostat (dane makroekonomiczne). Źródłem danych dla kalibracji parametrów behawioralnych jest literatura przedmiotu, natomiast wielkość szoków wywołanych przez klimat określona została na podstawie wyników czwartego i piątego rozdziału.

Model równowagi ogólnej (DSGE) został szczegółowo opisany w rozdziale szóstym, natomiast wyniki oszacowań modelowych przedstawione zostały w siódmym rozdziale rozprawy doktorskiej.

Główne wyniki

Wyniki opisane w rozprawie dotyczą oddziaływania zmian klimatu na gospodarkę, zarówno bezpośredniego – poprzez zwiększenie wartości strat, jak i pośredniego. W szczególności:

1. Oczekiwana wartość strat wywołanych przez powodzie rzeczne wzrośnie do 2050 r. w niemal całym kraju, zarówno w scenariuszu RCP4.5³, jak i RCP8.5⁴, przy czym w tym drugim zmiana jest znacznie większa. Po 2050 roku oczekiwana wartość strat nieznacznie spada ze względu na zwiększone parowanie, lecz wciąż są one wyższe niż w scenariuszu bazowym *bez zmian klimatu*. Na poziomie kraju straty wyrażone jako odsetek PKB wzrosną o 47% w RCP4.5 i 83% w RCP8.5 do 2050 r. Pod koniec wieku wzrosty te wyniosą odpowiednio 32% i 51%. Zmiana wartości strat w ujęciu bezwzględny jest silnie zależna od założeń odnośnie wzrostu PKB (i równoległego zwiększenia się wartości aktywów).
2. Średnia prędkość wiatru w Polsce wzrośnie, podobnie jak straty spowodowane przez burze i huragany. W przeciwieństwie do powodzi cały kraj będzie dotknięty we względnie podobnym stopniu, przy czym w nieco większym zakresie ucierpią obszary górskie i przybrzeżne. Wzrost wartości szkód na poziomie kraju jest znacznie mniejszy niż w przypadku powodzi rzecznych - 6% i 16% do 2050 r. oraz 29% i 32% do 2100 r. w scenariuszach RCP4.5 i RCP8.5 odpowiednio. Wyniki te są jednak w dużym stopniu zależne od zastosowanych modeli klimatycznych, a przedziały ufności wokół tych liczb są bardzo szerokie.
3. Oddziaływanie wzrostu poziomu morza będzie miało podobny charakter do wpływu zwiększenia się częstotliwości zdarzeń ekstremalnych, choć ich skala będzie znacznie mniejsza – 0,01% PKB w scenariuszu RCP4.5. i 0,02% PKB w RCP8.5 w 2100 roku. Pomimo to, liczby te są jednymi z największych w Europie (Hinkel et al. 2010). Straty te można nadal zminimalizować poprzez stosunkowo mało kosztowne działania adaptacyjne (Paprotny i Terefenko, 2017).
4. Wzrost temperatury w strefie klimatu umiarkowanego może zwiększyć liczbę imigrantów, prowadząc do wzrostu PKB, ponieważ wysokie temperatury latem w krajach południowych staną się bardzo uciążliwe, zwłaszcza pod koniec wieku (2080-2100) w scenariuszu RCP8.5. W rezultacie w scenariuszu RCP8.5 przewiduje się stały wzrost liczby imigrantów do poziomu 500 tys. w 2100 r. W przypadku bardziej umiarkowanego scenariusza RCP4.5, negatywny wpływ zmian opadów przeważa nad pozytywnym oddziaływaniem temperatury i saldo migracji będzie ujemne, prowadząc do zmniejszenia się zasobu siły roboczej. Zmiany te są jednak stosunkowo niewielkie - poniżej 100 tysięcy na przestrzeni całego stulecia.
5. Oddziaływanie na wydajność pracy jest negatywne, ale bardzo niepewne (0,1% -0,9% w RCP4.5 i 0,5% - 4% w RCP8.5 w 2080 r.). Spadek ten będzie się przyczyniał do negatywnego wpływu zmian klimatycznych na polską gospodarkę.
6. Wpływ zwiększonej śmiertelności spowodowanej falami upałów na gospodarkę będzie stosunkowo niewielki – zjawisko to dotyczy głównie osób starszych, nie biorących udziału w rynku pracy. Nie uwzględniłem jednak wpływu na sektor ochrony zdrowia, a jedynie na liczebność populacji.
7. Na skutek zmian częstotliwości ekstremalnych zjawisk klimatycznych (włączywszy w to wzrost poziomu morza, zwiększenie się częstotliwości powodzi rzecznych oraz wzrost prędkości wiatru) PKB będzie niższe średnio o 1,2% w RCP4.5 i 2% w RCP8.5 w okresie 2051-2100 od scenariusza *bez zmian klimatu*. Przełoży się to głównie na niższą konsumpcję - zmniejszy się ona w porównaniu do scenariusza bazowego średnio o 6% w scenariuszu RCP8.5 i 4% w scenariuszu RCP4.5 w drugiej połowie wieku. Spadek inwestycji i konsumpcji publicznej w

³ Scenariusz klimatyczny, w którym wartość *wymuszenia radiacyjnego* sięga w 2100 roku 4.5W/m². Jest to scenariusz z grubsza odpowiadający ograniczeniu wzrostu globalnej temperatury do 2°C.

⁴ Scenariusz klimatyczny, w którym wartość *wymuszenia radiacyjnego* sięga w 2100 roku 8.5W/m². Jest to mniej więcej scenariusz *biznes-jak-zwykle*. Scenariusze RCP4.5 i RCP8.5 są powszechnie używane w literaturze dotyczącej zmian klimatu i używam ich również w mojej rozprawie.

wyniku wzrostu częstotliwości ekstremalnych zjawisk klimatycznych jest mniejszy i wynosi około 4% dla RCP8.5 i około 2,5% dla scenariusza RCP4.5.

8. Wpływ migracji klimatycznych na gospodarkę jest nieco mniejszy niż zmian częstotliwości ekstremalnych zjawisk. W wyniku dodatkowej imigracji w scenariuszu RCP8.5, PKB wzrośnie w 2050 r. o 0,1% i 0,8% w 2100 r. PKB *per capita* spadnie odpowiednio o 0,1% i 1,1%. W scenariuszu RCP4.5 oczekiwane oddziaływanie migracji jest bardzo małe i nie przekracza 0,1% w przypadku PKB i 0,2% w przypadku PKB *per capita* na przestrzeni całego analizowanego okresu.
9. Maksymalny wpływ spadku wydajności pracy i wzrostu śmiertelności to 0,5% PKB w scenariuszu RCP8.5 i 0,1% w scenariuszu RCP4.5. Ponadto, pod koniec XXI wieku wpływ tych zmian na PKB *per capita* staje się dodatni, ponieważ liczba ludności jest niższa niż w scenariuszu odniesienia.
10. Łącznie zmiany klimatyczne zmniejszą PKB średnio o 0,5% w latach 2021-2050 i o 1,5% w latach 2071-2100 w scenariuszu RCP4.5. W RCP8.5 liczby te wynoszą odpowiednio 0,8% i 3,2%. Zmiany w konsumpcji będą jeszcze większe - ponieważ Polska jest umiarkowanie dotknięta zmianami klimatycznymi, bilans handlowy powinien się poprawić, zmniejszając obserwowany spadek PKB. Ponadto, ze względu na dodatnie migracje netto wynikające ze zmian klimatycznych, podaż pracy będzie wyższa w scenariuszu RCP8.5 niż w scenariuszu bazowym (brak zmian klimatycznych) i RCP4.5. Łączne oddziaływanie wszystkich kanałów wpływu jest więc silniejsze niż suma tych kanałów uwzględnionych z osobna ze względu na interakcje pomiędzy poszczególnymi efektami.

W rozprawie doktorskiej wykazałem hipotezę główną oraz wszystkie hipotezy pomocnicze. Praca ta jest jedną z pierwszych tak kompleksowych ocen wpływu zmian klimatu na polską gospodarkę. Choć w porównaniu z krajami położonymi w cieplejszych strefach klimatycznych, Polska będzie relatywnie umiarkowanie dotknięta zmianami klimatycznymi, to ich wpływ na PKB i konsumpcję będzie znaczący. Liczby cytowane powyżej są większe niż koszty transformacji niskoemisyjnej (wg najnowszego opracowania McKinsey & Company (2020) ok. 1-2% PKB). Ponieważ straty konsumpcji będą bardziej znaczące niż PKB, polityka klimatyczna opłaca się z punktu widzenia analizy kosztów i korzyści, nawet bez uwzględnienia strat w rolnictwie i wpływu na bioróżnorodność. Po uwzględnieniu tych dwóch dodatkowych kanałów oddziaływania zmian klimatycznych wniosek ten byłby jeszcze silniejszy.

Wynikające stąd zalecenia dla polityki są stosunkowo proste - zmiany klimatyczne będą wywierać presję na gospodarkę i należy podjąć działania adaptacyjne. Najważniejsze jest przygotowanie do większej częstotliwości powodzi rzecznych, burz i huraganów, ponieważ ich skutki mogą znacząco spowolnić akumulację kapitału. Ponadto napływ migrantów w scenariuszu RCP8.5 może prowadzić do napięć społecznych, gdyż będzie miał negatywny wpływ na konsumpcję i PKB *per capita*. Dodatkowo, należy pamiętać, że potencjalnie istotny wpływ zmian klimatycznych na sektor rolnictwa nie został uwzględniony w mojej rozprawie ze względu na ograniczenia danych i niepewność co do skali potencjalnej adaptacji w rolnictwie i zmian struktury upraw. Zmiany klimatyczne mogą jednak wpływać na produkcję rolną zarówno bezpośrednio - poprzez zmiany długości sezonu wegetacyjnego, temperatury i opadów, jak i pośrednio poprzez zmiany przewagi komparatywnej niektórych obszarów. Z tego powodu, zmiany klimatyczne mogą nawet doprowadzić do wzrostu produkcji w Polsce w związku z koniecznością zastąpienia produkcji w krajach bardziej nimi dotkniętych (Robinson et al., 2015).

Uwagi końcowe

Celem mojej rozprawy doktorskiej była ocena wpływu zmian klimatu na polską gospodarkę. W pierwszej kolejności oszacowałem bezpośredni wpływ – pomimo zastosowania różnych metod, udało mi się uzyskać porównywalne wyniki, które posłużyły do określenia wielkości szoku w modelu równowagi ogólnej. Model ten został następnie wykorzystany do oceny ogólnego wpływu

oczekiwanych zmian na PKB, zatrudnienie, strukturę sektorową i wykazania hipotezy głównej pokazującej wpływ zmian klimatu na polską gospodarkę oraz piątej hipotezy pomocniczej. Ponadto, oddziaływanie takich zjawisk jak zmiany strat powodziowych, wzrost wartości strat spowodowanych przez burze i koszty podnoszenia poziomu morza zostały obliczone w sposób umożliwiający porównanie znaczenia poszczególnych kanałów i zweryfikowanie pierwszej i drugiej hipotezy pomocniczej. Ponadto, uwzględniłem w takim modelu wpływ zmian klimatu na zasób kapitału ludzkiego poprzez migracje, zmiany śmiertelności i spadek produktywności pracy, co pozwoliło na wykazanie prawdziwości trzeciej i czwartej hipotezy pomocniczej.

Praca wzbogaca literaturę przedmiotu w kilku obszarach. Po pierwsze, poprzez dodanie rozkładu przestrzennego wartości dodanej do dotychczasowych oszacowań wpływu wzrostu częstotliwości powodzi na gospodarkę, doprecyzowuję istniejące oszacowania strat powodziowych spowodowanych zmianami klimatu. Po drugie, szacuję zmiany szkód spowodowanych przez burze i gwałtowny wiatr na podstawie polskich danych o stratach i symulacji modeli klimatycznych dla Polski. Po trzecie, stosuję panelowy model grawitacyjny do oceny wpływu zmian klimatycznych na migrację na poziomie poszczególnych krajów. Po czwarte, zaprezentowany w rozdziale szóstym model DSGE w nowatorski sposób łączy ze sobą różne rodzaje kapitału fizycznego, strukturę sektorową produkcji i wiele gospodarstw domowych w strukturze nakładających się pokoleń (OLG), co pozwala w kompleksowy sposób przeanalizować związki pomiędzy zmianami klimatu, a gospodarką.

Ze względu na ograniczenie objętości rozprawy, kompleksowość zagadnień i stosunkowo odległy związek z jej pozostałymi częściami, kilka ważnych problemów zdecydowałem się pominąć. W szczególności, ciekawym tematem osobnej rozprawy lub książki byłby wpływ zmian klimatycznych na rolnictwo w Polsce. Na podstawie wcześniejszej literatury, można ocenić, że zmiany klimatyczne będą oddziaływać na polskie rolnictwo nie tyle poprzez zmiany częstotliwości występowania susz czy opadów, co poprzez międzynarodową konkurencyjność i zmiany nawyków żywieniowych indukowanych polityką klimatyczną. Te dwa czynniki mogą wręcz podnieść wartość dodaną polskiego rolnictwa - zgodnie z pracą IFPRI(2019), zmiany klimatyczne wpłyną na zwiększenie polskiej produkcji rolniczej. Ponadto, nie oceniam w tej pracy wpływu polityki klimatycznej na gospodarkę - głównie dlatego, że temat ten jest już obszernie omówiony w pracach Bukowskiego i Kowala (2010), Boehringera i Rutherforda (2013) czy Zachłód-Jelec i Boratyńskiego (2016). Zgodnie z ich wynikami, koszty redukcji emisji gazów cieplarnianych są mniejsze niż straty spowodowane przez zmiany klimatyczne pomimo tego, że te drugie dotkną polską gospodarkę w umiarkowanym stopniu. Ponadto, używany w tej pracy model równowagi ogólnej jest modelem małej gospodarki otwartej, a więc wpływ zmian klimatu na inne kraje nie jest w nim uwzględniony. W związku z tym, że inne kraje (zwłaszcza te położone w cieplejszych strefach klimatycznych) będą znacznie silniej dotknięte zmianami klimatu, pozycja konkurencyjna Polski na arenie międzynarodowej może się poprawić, nieco łagodząc negatywne skutki wzrostu częstotliwości ekstremalnych zjawisk klimatycznych na PKB. W rozprawie doktorskiej koncentruję się również na gospodarczej stronie zmian klimatycznych. Ekonomia polityczna i wpływ zarówno polityki klimatycznej, jak też samych zmian klimatu i adaptacji do nich na społeczeństwo są niezwykle interesującym tematem dalszych badań.



Literatura

- Alfieri, L., Burek, P., Feyen, L., & Forzieri, G. (2015). Global warming increases the frequency of river floods in Europe. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(5), 2247–2260.
- Berrittella, M., Hoekstra, A. Y., Rehdanz, K., Roson, R., and Tol, R. S. (2007). The economic impact of restricted water supply: A computable general equilibrium analysis. *Water research*, 41(8):1799–1813.
- Böhringer, C. and Rutherford, T. F. (2013). Transition towards a low carbon economy: A computable general equilibrium analysis for Poland. *Energy Policy*, 55:16–26.
- Bosello, F., Eboli, F., and Pierfederici, R. (2012). Assessing the Economic Impacts of Climate Change- An Updated CGE Point of View.
- Bosello, F., Roson, R., and Tol, R. S. (2006). Economy-wide estimates of the implications of climate change: Human health. *Ecological Economics*, 58(3):579–591.
- Bukowski, M. & Kowal, P. (2010). Large scale, multi-sector DSGE model as a climate policy assessment tool. *Instytut Badań Strukturalnych, Warszawa*,
- Carleton, T. A. and Hsiang, S. M. (2016). Social and economic impacts of climate. *Science*, 353(6304)
- Chalise, S. and Naranpanawa, A. (2016). Climate change adaptation in agriculture: A computable general equilibrium analysis of land-use change in Nepal. *Land Use Policy*, 59:241–250.
- Dankers, R. and Feyen, L. (2008). Climate change impact on flood hazard in Europe: An assessment based on high-resolution climate simulations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D19).
- Davis, L. W. and Gertler, P. J. (2015). Contribution of air conditioning adoption to future energy use under global warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, page 201423558.
- Feyrer, J. and Sacerdote, B. (2009). Colonialism and Modern Income: Islands as Natural Experiments. *The Review of Economics and Statistics*, 91(2):245–262.
- Fishman, R. (2016). More uneven distributions overturn benefits of higher precipitation for crop yields. *Environmental Research Letters*, 11(2):024004.
- Goodess, C., Hanson, C., Hulme, M., and Osborn, T. (2003). Representing Climate and Extreme Weather Events in Integrated Assessment Models: A Review of Existing Methods and Options for Development. *Integrated Assessment*, 4(3):145–171.
- Gosling, S. N., Zaherpour, J., Ibarreta, D., et al. (2018). *PESETA III: Climate change impacts on labour productivity*. Publications Office of the European Union.
- Graff Zivin, J., Hsiang, S. M., and Neidell, M. (2018). Temperature and human capital in the short and long run. *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, 5(1):77–105.
- Hallegatte, S., Hourcade, J.-C., and Dumas, P. (2007). Why economic dynamics matter in assessing climate change damages: illustration on extreme events. *Ecological economics*, 62(2):330–340.
- Hasegawa, T., Fujimori, S., Shin, Y., Takahashi, K., Masui, T., and Tanaka, A. (2016). *Global Assessment of Agricultural Adaptation to Climate Change using CGE Model*, chapter 8, pages 247–272.
- Hinkel, J., Nicholls, R. J., Vafeidis, A. T., Tol, R. S., and Avagianou, T. (2010). Assessing risk of and adaptation to sea-level rise in the European Union: an application of DIVA. *Mitigation and adaptation strategies for global change*, 15(7):703–719.

- Hope, C. (2006). The marginal impact of CO₂ from PAGE2002: An integrated assessment model incorporating the IPCC's five reasons for concern. *Integrated assessment*, 6(1).
- Hsiang, S. M. (2010). Temperatures and cyclones strongly associated with economic production in the Caribbean and Central America. *Proceedings of the National Academy of sciences*, page 201009510.
- Hsiang, S. M. and Jina, A. S. (2014). The causal effect of environmental catastrophe on long-run economic growth: Evidence from 6,700 cyclones. Technical report, National Bureau of Economic Research.
- IFPRI (2019). IMPACT Projections of Food Production, Consumption, and Net Trade to 2050, With and Without Climate Change: Extended Country-level Results for 2019 GFPR Annex Table 6.
- Jackson, L. P. and Jevrejeva, S. (2018). A probabilistic approach to 21st century regional sea-level projections using RCP and High-end scenarios. *Global and Planetary Change*, 146:179–189.
- Jaglom, W. S., McFarland, J. R., Colley, M. F., Mack, C. B., Venkatesh, B., Miller, R. L., Haydel, J., Schultz, P. A., Perkins, B., Casola, J. H., et al. (2014). Assessment of projected temperature impacts from climate change on the US electric power sector using the integrated planning model. *Energy Policy*, 73:524–539.
- Kendrovski, V., Baccini, M., Martinez, G. S., Wolf, T., Paunovic, E., and Menne, B. (2017). Quantifying projected heat mortality impacts under 21st-century warming conditions for selected European countries. *International journal of environmental research and public health*, 14(7):729.
- Knutson, T. R., Sirutis, J. J., Garner, S. T., Vecchi, G. A., and Held, I. M. (2008). Simulated reduction in Atlantic hurricane frequency under twenty-first-century warming conditions. *Nature Geosci*, 1(6):359–364.
- Kompas, T., Pham, V. H., and Che, T. N. (2018). The effects of climate change on GDP by country and the global economic gains from complying with the Paris climate accord. *Earth's Future*, 6(8):1153–1173.
- Koopman, J. F., Kuik, O., Tol, R. S., and Brouwer, R. (2017). The potential of water markets to allocate water between industry, agriculture, and public water utilities as an adaptation mechanism to climate change. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 22(2):325–347.
- Kundzewicz, Z. W., Hov, Ø., and Okruszko, T. (2017). *Zmiany klimatu i ich wpływ na wybrane sektory w Polsce*. Ridero.
- Kunreuther, H., Gupta, S., Bosetti, V., Cooke, R., Dutt, V., Ha-Duong, M., Held, H., Llanes-Regueiro, J., Patt, A., Shittu, E., et al. (2014). Integrated risk and uncertainty assessment of climate change response policies. In *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change: Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, pages 151–206. Cambridge University Press.
- Lhotka, O., Kysely, J., and Farda, A. (2018). Climate change scenarios of heat waves in Central Europe and their uncertainties. *Theoretical and applied climatology*, 131(3-4):1043–1054.
- Linnerud, K., Mideksa, T. K., and Eskeland, G. S. (2011). The impact of climate change on nuclear power supply. *The Energy Journal*, pages 149–168.
- Lobell, D. B. and Burke, M. B. (2008). Why are agricultural impacts of climate change so uncertain? The importance of temperature relative to precipitation. *Environmental Research Letters*, 3(3):034007.
- McKinsey&Company (2020). Neutralna emisyjnie Polska 2050. Jak wyzwanie zmienić w szansę?

- MŚ (2013). *Strategiczny Plan Adaptacji do Zmian Klimatu*. Ministerstwo Środowiska, Rzeczpospolita Polska
- Mortensen, D. T., & Pissarides, C. A. (1994). Job creation and job destruction in the theory of unemployment. *The review of economic studies*, 61(3), 397-415.
- Mortensen, D. T., Pissarides, C. A., et al. (1999). New developments in models of search in the labor market. *Handbook of Labor Economics*, 3:2567–2627.
- Muñoz, J. R. and Sailor, D. J. (1998). A modelling methodology for assessing the impact of climate variability and climatic change on hydroelectric generation. *Energy Conversion and Management*, 39(14):1459–1469.
- Nelson, G. C., Valin, H., Sands, R. D., Havlík, P., Ahammad, H., Deryng, D., Elliott, J., Fujimori, S., Hasegawa, T., Heyhoe, E., et al. (2014). Climate change effects on agriculture: Economic responses to biophysical shocks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(9):3274–3279.
- Nordhaus, W. D. (1992). An optimal transition path for controlling greenhouse gases. *Science*, 258(5086):1315–1319.
- Paprotny, D. and Terefenko, P. (2017). New estimates of potential impacts of sea-level rise and coastal floods in Poland. *Natural Hazards*, 85(2):1249–1277.
- Pardowitz, T. (2015). *Anthropogenic Changes in the Frequency and Severity of European Winter Storms: Mechanisms, Impacts and their Uncertainties*. PhD thesis.
- Park, J. and Heal, G. (2014). Feeling the heat: Temperature, physiology & the wealth of nations. No. w19725. *National Bureau of Economic Research*.
- Piniewski, M., Szcześniak, M., Kundzewicz, Z. W., Mezghani, A., and Hov, Ø. (2017). Changes in low and high flows in the Vistula and the Odra basins: Model projections in the European-scale context. *Hydrological Processes*, 31(12):2210– 2225.
- Piniewski, M., Szcześniak, M., Marcinkowski, P., O’Keeffe, J., Okruszko, T., and Nieróbca, A. (2018). Projekcje wpływu zmian klimatu na rośliny jare do roku 2050 w oparciu o symulacje modelu. *Zmiany klimatu i ich wpływ na wybrane sektory w Polsce*.
- Rehdanz, K. and Maddison, D. (2005). Climate and happiness. *Ecological Economics*, 52(1):111–125.
- Robinson, S., Mason-D’Croz, D., Sulser, T., Islam, S., Robertson, R., Zhu, T., Gueneau, A., Pitois, G., and Rosegrant, M. W. (2015). The international model for policy analysis of agricultural commodities and trade (IMPACT): model description for version 3.
- Robinson, S., Willenbockel, D., and Strzepek, K. (2012). A dynamic general equilibrium analysis of adaptation to climate change in Ethiopia. *Review of Development Economics*, 16(3):489–502.
- Rojas, R., Feyen, L., and Watkiss, P. (2013). Climate change and river floods in the European Union: Socio-economic consequences and the costs and benefits of adaptation. *Global Environmental Change*, 23(6):1737–1751.
- Rojas, R., Feyen, L., Bianchi, A., and Dosio, A. (2012). Assessment of future flood hazard in Europe using a large ensemble of bias-corrected regional climate simulations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D17).
- Roudier, P., Andersson, J. C., Donnelly, C., Feyen, L., Greuell, W., and Ludwig, F. (2016). Projections of future floods and hydrological droughts in Europe under 2 C global warming. *Climatic Change*, 135(2):341–355.

- Rummukainen, M. (2010). State-of-the-art with regional climate models. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 1(1):82–96.
- Schinko, T., Drouet, L., Vrontisi, Z., Hof, A., Hinkel, J., Mochizuki, J., Bosetti, V., Fragkiadakis, K., Van Vuuren, D., and Lincke, D. (2020). Economy-wide effects of coastal flooding due to sea level rise: A multi-model simultaneous treatment of mitigation, adaptation, and residual impacts. *Environmental Research Communications*, 2(1):015002.
- Schinko, T., Drouet, L., Vrontisi, Z., Hof, A., Hinkel, J., Mochizuki, J., Bosetti, V., Fragkiadakis, K., Van Vuuren, D., and Lincke, D. (2020). Economy-wide effects of coastal flooding due to sea level rise: A multi-model simultaneous treatment of mitigation, adaptation, and residual impacts. *Environmental Research Communications*, 2(1):015002.
- Schlenker, W. and Roberts, M. J. (2009). Nonlinear temperature effects indicate severe damages to US crop yields under climate change. *Proceedings of the National Academy of sciences*, 106(37):15594–15598.
- Stern, N. (2006). Stern Review: The economics of climate change. *London, England: HM Treasury*, pages 686–702.
- Sudarshan, A., Somanathan, E., Somanathan, R., Tewari, M., et al. (2015). The impact of temperature on productivity and labor supply-evidence from Indian manufacturing. Technical report.
- Tol, R. S. (2012). On the uncertainty about the total economic impact of climate change. *Environmental and Resource Economics*, 53(1):97–116.
- Tramblay, Y., Badi, W., Driouech, F., Adlouni, S. E., Neppel, L., and Servat, E. (2012). Climate change impacts on extreme precipitation in Morocco. *Global and Planetary Change*, 82–83:104 – 114.
- Weitzman, M. (2009). On Modeling and Interpreting the Economics of Catastrophic Climate Change. *Review of Economics and Statistics*, 91(1):1–19.
- Welch, J. R., Vincent, J. R., Auffhammer, M., Moya, P. F., Dobermann, A., and Dawe, D. (2010). Rice yields in tropical/subtropical Asia exhibit large but opposing sensitivities to minimum and maximum temperatures. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(33):14562–14567.
- Zachłód-Jelec, M. and Boratyński, J. (2016). How large and uncertain are costs of 2030 GHG emissions reduction target for the European countries? Sensitivity analysis in a global CGE model. In *MF Working Paper No. 24-2016*. Republic of Poland Ministry of Finance.