

dr Mikołaj Piniewski
Katedra Inżynierii Wodnej
Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie
ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa
mpiniewski@levis.sggw.pl

Autoreferat

1. Imię i nazwisko	2
2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/ artystyczne – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.....	2
3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych/artystycznych.	2
4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2016 r. poz. 882 ze zm. w Dz. U. z 2016 r. poz. 1311.):.....	2
4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego/artystycznego,	2
4.2. Autor/autorzy, tytuł/tytuły publikacji, rok wydania, nazwa wydawnictwa, recenzenci wydawniczy.....	2
4.3. Omówienie celu naukowego/artystycznego ww. pracy/prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania.	3
5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych.....	18
6. Podsumowanie dorobku.....	21
6.1. Działalność naukowo-badawcza.....	21
6.2. Działalność dydaktyczna i popularyzatorska	22
6.3. Działalność organizacyjna	22

1. Imię i nazwisko

Mikołaj Piniewski

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/ artystyczne – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.

- 2012: stopień **doktora nauk technicznych** w zakresie inżynierii środowiska (z wyróżnieniem) uzyskany w Instytucie Meteorologii i Gospodarki Wodnej - Państwowym Instytucie Badawczym. Tytuł pracy doktorskiej: „Impacts of natural and anthropogenic conditions on the hydrological regime of rivers: A Narew River Basin case study”. Promotor: prof. dr hab. Tomasz Okruszko. Praca wyróżniona przez Radę Naukową IMGW-PIB na mocy uchwały numer 7/2012/VII.
- 2007: tytuł **magistra matematyki** w zakresie matematyki stosowanej uzyskany na Wydziale Matematyki, Informatyki i Mechaniki Uniwersytetu Warszawskiego. Tytuł pracy magisterskiej: „Globalna dynamika w równaniach podwójnej dyfuzji”. Promotor: prof. dr hab. Grzegorz Łukaszewicz.

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych/artystycznych.

- 1.10.2013 – dziś: **adiunkt** w Katedrze Inżynierii Wodnej SGGW (przerwa na urlop bezpłatny między 1.10.2014 a 30.09.2017)
- 1.10.2014 – 30.09.2017: **post-doc** w Potsdam Institute for Climate Impact Research (Niemcy) w ramach stypendium Fundacji Alexandra von Humboldta
- 1.10.2011-30.09.2013: **asystent** w Katedrze Inżynierii Wodnej SGGW

4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2016 r. poz. 882 ze zm. w Dz. U. z 2016 r. poz. 1311.):

4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego/artystycznego,

Makroskalowe analizy zasobów wodnych Polski w warunkach zmian klimatu

4.2. Autor/autorzy, tytuł/tytuły publikacji, rok wydania, nazwa wydawnictwa, recenzenci wydawniczy

Na osiągnięcie naukowe składa się seria następujących 11 artykułów (w nawiasach kwadratowych znajdują się kody artykułów stosowane w dalszej części tekstu, a w nawiasach okrągłych wartości wskaźnika Impact Factor czasopism wg roku publikacji oraz procentowy wkład udziału pracy habilitanta w poszczególnych artykułach):

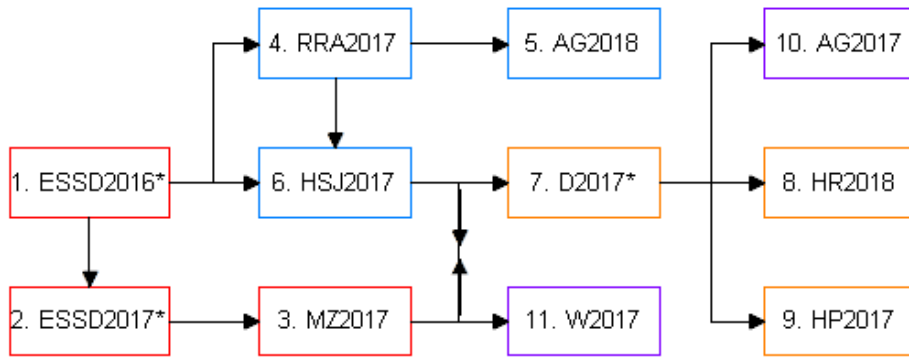
1. [ESSD2016] Berezowski, T., Szcześniak, M., Kardel, I., Michałowski, R., Okruszko, T., Mezghani, A., **Piniewski, M.** 2016. CPLFD-GDPT5: high-resolution gridded daily precipitation and temperature data set for two largest Polish river basins. *Earth System Science Data* 8, 127-139, 2016, doi: 10.5194/essd-8-127-2016 (IF¹ 6.696, wkład 30%).
2. [ESSD2017] Mezghani, A., Dobler, A., Haugen, J. E., Benestad, R. E., Parding, K. M., **Piniewski, M.**, Kardel, I., Kundzewicz, Z. W. 2017. CHASE-PL Climate Projection dataset over Poland – Bias adjustment of EURO-CORDEX simulations. *Earth Syst. Sci. Data.* 9, 905-925, doi: 10.5194/essd-9-905-2017 (IF 8.792, wkład 10%).
3. [MZ2017] **Piniewski, M.**, Mezghani, A., Szcześniak, M., Kundzewicz, Z.W. 2017. Regional projections of temperature and precipitation changes: Robustness and uncertainty aspects. *Meteorologische Zeitschrift* 26(2), 223-234, doi: 10.1127/metz/2017/0813 (IF 1.436, wkład 60%).

¹ IF – Impact Factor wg roku publikacji

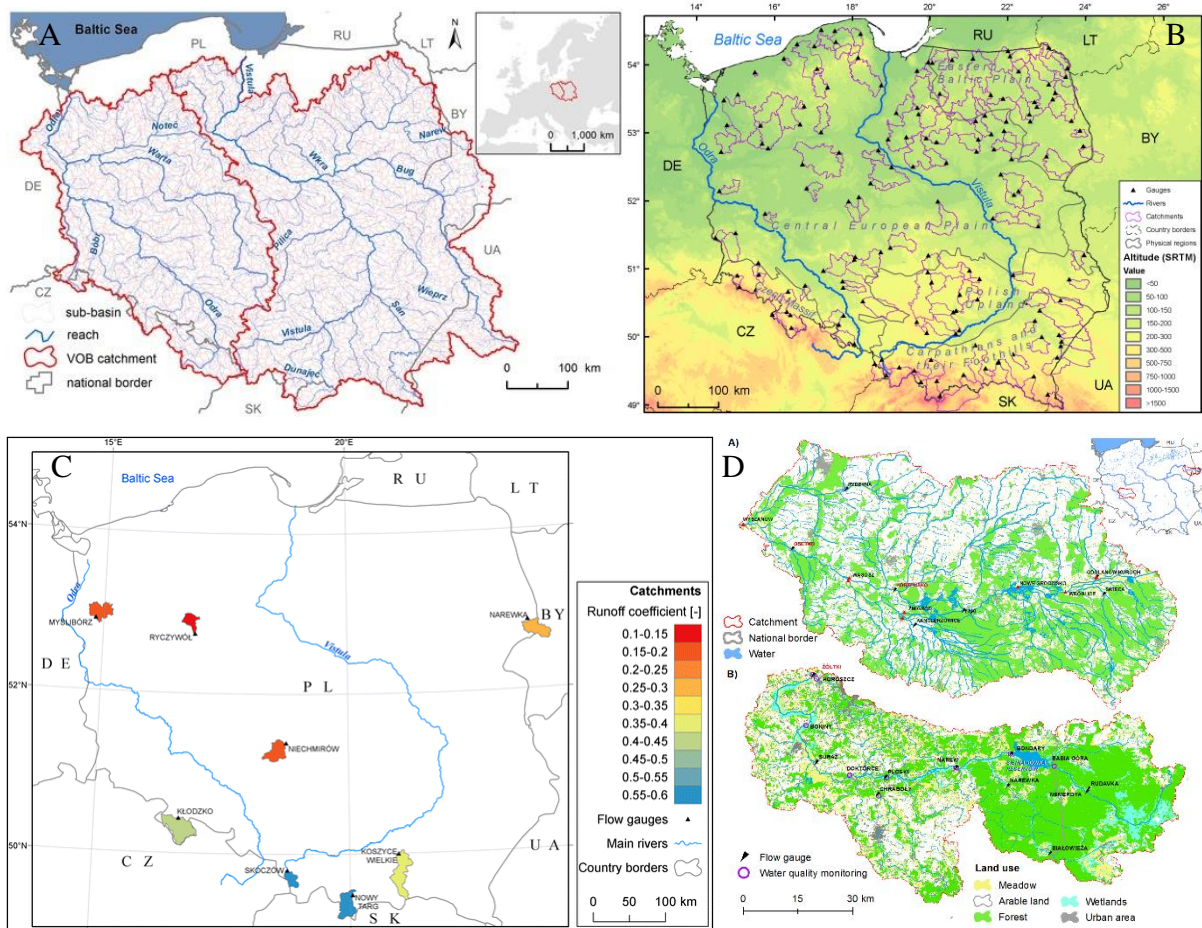
4. [RRA2017] **Piniewski, M.** 2017. Classification of natural flow regimes in Poland. *River Research and Applications*, 33(7), 1205-1218, doi: 10.1002/rra.3153 (IF 2.067, wkład 100%).
5. [AG2018] **Piniewski, M.**, Marcinkowski, P., Kundzewicz, Z.W. 2018 Trend detection in river flow indices in Poland, *Acta Geophysica* 66(3), 347-360, doi: 10.1007/s11600-018-0116-3 (IF 0.709, wkład 70%)
6. [HSJ2017] **Piniewski, M.**, Szcześniak, M., Kardel, I., Berezowski, T., Okruszko, T., Srinivasan, R., Vikhamar-Schuler, D., Kundzewicz, Z.W. 2017. Hydrological modelling of the Vistula and Odra river basins using SWAT. *Hydrol. Sci. J.* 62(8), 1266-1289, doi: 10.1080/02626667.2017.1321842 (IF 2.061, wkład 50%).
7. [D2017] **Piniewski, M.**, Szcześniak, M., Kardel, I. 2017. CHASE-PL—future hydrology data set: Projections of water balance and streamflow for the Vistula and Odra basins, Poland. *Data* 2(2), 14, doi: 10.3390/data2020014 (IF -, wkład 70%).
8. [HR2018] **Piniewski, M.**, Szcześniak, M., Huang, S., Kundzewicz, Z.W. 2018 Projections of runoff in the Vistula and the Odra river basins with the help of the SWAT model. *Hydrology Research*, 49(2), 303-317, doi:10.2166/nh.2017.280 (IF 1.801, wkład 60%).
9. [HP2017] **Piniewski, M.**, Szcześniak, M., Kundzewicz, Z.W., Mezghani, A., Hov, Ø. 2017. Changes in low and high flows in the Vistula and the Odra basins: model projections in the European-scale context. *Hydrol. Processes* 31(12), 2210–2225, doi: 10.1002/hyp.11176 (wkład 50%, IF 3.181).
10. [AG2017] **Piniewski, M.**, Meresa, H.K., Romanowicz, R., Osuch, M., Szcześniak, M., Kardel, I., Okruszko, T., Mezghani, A., Kundzewicz, Z.W. 2017. What can we learn from the projections of changes of flow patterns? Results from Polish case studies. *Acta Geophysica*, doi: 10.1007/s11600-017-0061-6 (IF 0.709, wkład 40%).
11. [W2017] Marcinkowski, P., **Piniewski, M.**, Kardel, I., Szcześniak, M., Benestad, R., Srinivasan, R., Ignar, S., Okruszko, T., 2017. Effect of climate change on hydrology, sediment and nutrient losses in two lowland catchments in Poland. *Water*, 9(3) 156; doi: 10.3390/w9030156 (IF 2.069, wkład 30%).

4.3. Omówienie celu naukowego/artystycznego ww. pracy/prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania.

Celem badań przeprowadzonych w ramach opisywanej serii artykułów było wykonanie kompleksowych, makroskalowych analiz zasobów wodnych Polski w zmieniających się warunkach klimatycznych z wykorzystaniem nowoczesnych narzędzi do modelowania matematycznego i najnowszej generacji scenariuszy zmian klimatycznych. Niniejsza seria składa się z 11 powiązanych tematycznie i logicznie artykułów opublikowanych w recenzowanych czasopismach naukowych. Wszystkie artykuły zostały opublikowane w periodykach naukowych indeksowanych w *Web of Science*. Układ wzajemnych zależności między publikacjami przedstawiono na Ryc. 1. Artykuły zostały podzielone na cztery grupy tematyczne oznaczone literami A, B, C i D i omówione poniżej. Pierwsza grupa obejmuje prace klimatologiczne, a trzy kolejne grupy dotyczą zagadnień hydrologicznych. Inny podział publikacji dotyczy tych, które obejmują okres historyczny [ESSD2016, RRA2017, AG2018, HSJ2017] oraz tych, które dotyczą przyszłych zmian klimatu i ich konsekwencji (pozostałe artykuły). Prezentowane tu prace dotyczą różnych domen przestrzennych. W większości przypadków przedmiotem badań jest połączony obszar dorzeczy Odry i Wisły, w dalszej części tekstu oznaczony symbolem DOW (Ryc. 2A). Dwa artykuły dotyczą zbioru 147 quasi-naturalnych zlewni rzecznych (Ryc. 2B). Jeden artykuł dotyczy ośmiu zlewni cząstkowych usytuowanych wewnątrz obszaru DOW (Ryc. 2C), a jeden – dwóch (innych) tego typu zlewni (Ryc. 2D).



Ryc. 1 Schemat blokowy ilustrujący logiczną sekwencję artykułów stanowiących osiągnięcie naukowe (symbolem * oznaczono publikacje danych naukowych). Ramkami w kolorze czerwonym (zbiór A) oznaczono artykuły dotyczące klimatu (zarówno w okresie historycznym jak i w przyszłych scenariuszach), niebieskim (zbiór B) artykuły dotyczące zasobów wodnych w okresie historycznym, pomarańczowym (zbiór C) artykuły o zasobach wodnych w warunkach zmian klimatu w ujęciu makroskalowym, a fioletowym (zbiór D) podobne artykuły jak w zbiorze C tylko w ujęciu mezoskalowym.



Ryc. 2 Domeny przestrzenne analiz w publikacjach składających się na osiągnięcie naukowe: A. obszar DOW i jego podział na zlewnie cząstkowe [ESSD2016, MZ2017, HSJ2017, D2017, HR2018, HP2017]; B. zbiór 147 zlewni quasi-naturalnych w Polsce [RRA2017, AG2018]; C. zbiór ośmiu zlewni w obszarze DOW [AG2017]; zbiór dwóch zlewni (Baryczy i Górnej Narwi) w obszarze DOW [W2017].

Opis osiągnięcia naukowego rozpoczyna się od opisu artykułów z grupy A i kończy na artykułach z grupy D.

A. Makroskalowe dane klimatyczne wysokiej rozdzielczości: obserwacje, projekcje oraz niepewność

Pierwsza grupa obejmuje artykuły dotyczące makroskalowych danych klimatycznych w okresie historycznym [ESSD2016] oraz dla przyszłych horyzontów czasowych [ESSD2017, MZ2017], oznaczone w czerwonych ramkach na Ryc. 1.

Zbiór danych „CHASE-PL Forcing Data–Gridded Daily Precipitation & Temperature Dataset–5 km (CPLFD-GDPT5)” składa się z minimalnych i maksymalnych dobowych temperatur powietrza oraz dobowych sum opadów atmosferycznych interpolowanych w siatce o rozdzielczości 5 km dla okresu 1951-2013 [ESSD2016]. Opracowany został – podobnie jak inne opisane w tym opisie zbiory danych – w ramach polsko-norweskiego projektu badawczego CHASE-PL (*Climate Change Impact Assessment for Selected Sectors of Poland*). Swoim zasięgiem zbiór pokrył sumę obszaru Polski i obszaru DOW. Celem artykułu [ESSD2016] oraz towarzyszącego mu zbioru CPLFD-GDPT5 było uzupełnienie luki w przestrzeni publicznej, jaką był brak dostępnych bezpłatnie zbiorów danych, o wysokiej rozdzielczości dla analizowanego obszaru. Zbiór ten jest lepszą alternatywą jako dane wejściowe dla modelowania hydrologicznego niż łatwo dostępne globalne zbiory danych, takie jak E-OBS (Haylock *et al.* 2008), ze względu na wyższą rozdzielczość przestrzenną i gęstszą sieć stacji wykorzystanych do interpolacji. Można oczekiwać, że niższe błędy w opadach przełożą się na mniejsze błędy w symulowanym przez modele hydrologiczne bilansie wodnym oraz przepływie.

Do interpolacji wykorzystano takie techniki geostatystyczne jak: *kriging with external drift* (temperatura), *indicator kriging* oraz *universal kriging* (opady). Surowe dane obejmowały wyniki obserwacji meteorologicznych Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej (IMGW-PIB, polskie stacje), Deutscher Wetterdienst (DWD, niemieckie i czeskie stacje), European Climate Assessment and Dataset (ECAD), National Oceanic and Atmospheric Administration–National Climatic Data Center (NOAA-NCDC) (stacje słowackie, ukraińskie i białoruskie). Liczba dostępnych stacji meteorologicznych zmieniała się w czasie, od około 100 dla temperatury i 300 dla opadów w latach 1950-ych aż do około 180 dla temperatury i 700 dla opadów w latach 1990-ych. Sumy opadów zostały skorygowane w celu uwzględnienia efektu systematycznego niedoszacowania przez przyrządy pomiarowe za pomocą metody Richtera (Richter, 1995), co jest istotne z punktu widzenia modelowania hydrologicznego na północ od równoleżnika 45°N (Tian *et al.*, 2007).

Wyniki walidacji krzyżowej krigingu ujawniły niskie wartości błędu średniokwadratowego wyrażonego jako ułamek odchylenia standardowego: 0,54 i 0,47 odpowiednio dla minimalnej i maksymalnej temperatury oraz 0,79 dla opadów. Współczynniki korelacji wynosiły 0,84 dla minimalnych temperatur, 0,88 dla maksymalnych temperatur, i 0,65 dla opadów. Bezpośrednie porównanie z danymi klimatycznymi z lat 1971-2000 opublikowanymi przez IMGW-PIB wykazało wysoki stopień zgodności przestrzennej. Przydatność zbioru CPLFD-GDPT5 została dodatkowo potwierdzona poprzez udane wykorzystanie do rozmaitych celów: (1) jako zbiór danych treningowych do korekty błędu systematycznego regionalnych modeli klimatycznych w artykule [ESSD2017]; (2) jako dane wsadowe do obliczeń charakterystyk klimatologicznych zlewni w artykule [RRA2017]; (3) jako dane wejściowe modelu Soil & Water Assessment Tool (SWAT) opracowanego dla obszaru DOW w artykule [HSJ2017].

Regionalne projekcje dotyczące zmian klimatu dla wszystkich lądowych regionów świata zostały udostępnione badaczom klimatu w ramach inicjatywy CORDEX. W ramach europejskiej części tej inicjatywy znanej pod nazwą EURO-CORDEX udostępniono również wiązkę (*ensemble*) regionalnych projekcji klimatycznych modeli RCM (*Regional Climate Models*) o wysokiej rozdzielczości dla obszaru Europy. Umożliwiło to wykorzystanie modelowych projekcji klimatycznych w regionalnych badaniach nad konsekwencjami zmian klimatu i adaptacją do nich (Giorgi *et al.* 2008). Symulacje te cechuje jednak występowanie błędu systematycznego (*bias*) związanego (i) z niedoskonałą reprezentacją modelu procesów fizycznych lub zjawisk w modelach RCM oraz (ii) z parametryzacją i nieprawidłową inicjalizacją modeli RCM. Aby zmniejszyć systematyczne odchylenia występujące w modelach klimatycznych, przed ich wykorzystaniem np. w

badaniach hydrologicznych (Teutschbein *et al.*, 2012) dane te poddaje się tzw. korekcie błędu systematycznego (*bias correction*) za pomocą rozmaitych technik.

W artykule [ESSD2017] stwierdzono, że badania nad oddziaływaniami zmian klimatycznych wykorzystujące najnowszą generację modeli klimatycznych są w Polsce niezwykle rzadkie, co było motywacją do opracowania i publicznego udostępnienia kolejnego po CPLFD-GDPT5 zbioru danych o nazwie „CHASE-PL Climate Projections - Bias Corrected Daily Precipitation and Temperature dataset 5 km (CPLCP-GDPT5)”. Do korekty błędu systematycznego zastosowano nieparametryczną metodę mapowania kwantyli (*quantile mapping*), która w przeszłości dawała dobre wyniki nie tylko w odtwarzaniu średnich i odchyłeń standardowych, ale również innych właściwości statystycznych, takich jak kwantyle (Gudmundsson *et al.*, 2012). Zbiór danych obejmował tę samą domenę przestrzenną, co poprzedni zbiór tj. sumę przestrzenną obszaru DOW i obszaru Polski. Wybrana wiązka symulacji składała się z dziewięciu kombinacji czterech modeli ogólnej cyrkulacji atmosfery (GCM) i czterech modeli RCM napędzanych dwoma różnymi scenariuszami regionalnych trajektorii stężeń dwutlenku węgla w atmosferze (RCP – *representative concentration pathways*): RCP4.5 oraz RCP8.5. Scenariusze RCP są obecnie powszechnie stosowaną koncepcją określającą drogi do osiągnięcia konkretnych docelowych trajektorii wymuszania radiacyjnego, w efekcie polityki klimatycznej – ograniczania emisji gazów cieplarnianych do atmosfery i zwiększania sekwestracji dwutlenku węgla (Moss *et al.*, 2010). Dwa spośród czterech istniejących scenariuszy RCP wykorzystanych w artykule [ESSD2017] oraz innych artykułach w niniejszej serii czyli RCP4.5 i 8.5, odpowiadające wartościom wymuszania radiacyjnego odpowiednio $4,5 \text{ W m}^{-2}$ i $8,5 \text{ W m}^{-2}$ w roku 2100, są często wykorzystywanymi scenariuszami RCP w badaniach nad oddziaływaniem zmian klimatu na świecie. W artykule [ESSD2017], jak również w kolejnych artykułach z niego wynikających (patrz: Ryc. 1), analizy dotyczyły trzech wspólnych odcinków czasu obejmujących okres 1971-2000 (okres kontrolny/historyczny) oraz dwa przyszłe horyzonty 2021-2050 (bliska przyszłość) i 2071-2100 (daleka przyszłość).

Błąd systematyczny w wartościach średnich rocznych, uśrednionych po wszystkich dziewięciu tzw. surowych symulacjach modeli klimatycznych symulacji, wyniósł $15,5 \pm 4,39 \text{ mm / miesiąc}$ dla opadów i $1,09 \pm 0,65 \text{ °C}$ i $1,64 \pm 0,45 \text{ °C}$ odpowiednio dla minimalnej i maksymalnej temperatury. W przypadku średnich sezonowych największy błąd wynoszący $26,4 \pm 8,61 \text{ mm / miesiąc}$ odnotowano w przypadku opadów letnich, głównie z powodu niedoskonałego sposobu reprezentacji procesu konwekcji w modelach klimatycznych. Tę samą tendencję, tj. wysoki błąd w lecie w porównaniu z pozostałymi porami roku, stwierdzono również dla dobowej temperatury maksymalnej. Ogólnie rzecz biorąc, błędy systematyczne w maksymalnych dobowych temperaturach były o $0,5$ do 1 °C wyższe od tych występujących w temperaturach minimalnych. Jak pokazano w artykule [ESSD2017], metoda mapowania kwantyli pozwoliła zachować zarówno momenty niższego jak i wyższego rzędu, jednocześnie nie zmieniając kierunku i wielkości sygnału zmiany klimatu. W rezultacie rozkład przestrzenny sygnału zmian klimatu był spójny we wszystkich skorygowanych symulacjach.

Opracowany zbiór skorygowanych projekcji klimatycznych został udostępniony w celu darmowego wykorzystania przez naukowców oraz przez szersze grono odbiorców (uczniów i studentów, interesariuszy, władz publicznych) poprzez dedykowany serwis mapowy (geoportal) CHASE-PL <http://climateimpact.sggw.pl>. Jest to ważne, bo poziom rozpowszechnienia wiedzy i danych o zmianach klimatycznych jest w Polsce niższy niż np. w krajach Europy Zachodniej (Kundzewicz i Matczak, 2012). Geoportal przechowuje w sumie 180 map trzech zmiennych (opady, temperatura minimalna i maksymalna) dla dwóch horyzontów czasowych (bliskiej i dalekiej przyszłości), w ramach dwóch scenariuszy RCP (4,5 i 8,5), dla pięciu okresowych poziomów agregacji czasowej (rocznego i sezonowych – dla czterech pór roku) oraz trzech typów statystyk wiązki symulacji (5-ty percentyl, mediana i 95-ty percentyl). Poprzez uwzględnienie tych statystyk, geoportal informuje użytkowników końcowych zarówno o wielkości, jak i o rozrzucie zmian (niepewność modelu klimatycznego). Do funkcji geoportalu należą: (1) przeszukiwanie meta-danych; (2) wyszukiwanie według lokalizacji; (3) identyfikacja wybranych wartości na mapie; (4) pobieranie danych w formatach NetCDF i GeoTIFF.

Zbiór projekcji klimatycznych opracowany w artykule [ESSD2017] wykorzystano do oceny zmian temperatury i opadów w obszarze DOW w artykule [MZ2017]. Mimo że wykorzystanie wiązek modeli klimatycznych, a nie pojedynczych symulacji, jest obecnie uznawane za standard w nauce o zmianach klimatycznych, agregacja map projekcji pochodzących od poszczególnych modeli wchodzących w skład wiązki, często liczonych w dziesiątkach, w jedną, przydatną i interesującą dla odbiorców mapę, zawsze stanowiła duże wyzwanie. Analizując projekcje klimatyczne z wielu modeli dla danej lokalizacji, można ocenić dwie właściwości: poziom zgodności między modelami i istotność statystyczną zmian według każdego modelu. Połączenie tych dwóch właściwości często określa się w literaturze mianem „odporności” (*robustness*; Knutti i Sedláček, 2013). W artykule [MZ2017] zaadaptowano metodę „odporności” Knuttiego i Sedláčka (2013) do warunków polskich. Zaproponowana metoda holistycznie uwzględnia wielkość zmiany, jej kierunek (znak), naturalną zmienność i rozrzut między modelami. Projekcje zmian oparte na wiązce modeli klimatycznych są oceniane jako „odporne” (i oznaczane na mapach ilustrujących sygnał zmiany przez kropkowanie), jeśli modele są względnie zgodne co do wielkości zmiany oraz zmiany te są dla większości modeli statystycznie istotne. Kiedy różne modele przewidują zmianę istotną statystycznie, jednak różniącą się znacznie pod względem wielkości (a czasami nawet kierunku), mamy do czynienia z „brakiem odporności” lub „niezgodnością” projekcji, a odpowiadające tym zmianom obszary na mapach są oznaczone na biało. Gdy większość modeli sugeruje zmianę, która jest nieistotna statystycznie, obszary na mapach są kreskowane w celu oznaczenia „zgodności co do braku istotności”.

Stosując powyższą metodykę, w artykule [MZ2017] stwierdzono „odporny” wzrost średniej rocznej dziennej temperatury minimalnej i maksymalnej, o 1-1,4 °C w bliskiej przyszłości i o 1,9-3,8 °C w dalekiej przyszłości (uśrednione przestrzennie średnie z wiązki). Gradient zmian przebiegał z południowego zachodu w kierunku północnego wschodu. Sezonowe projekcje obu zmiennych charakteryzowały się niższą „odpornością” i sugerowały najwyższy wzrost temperatur zimą, szczególnie w dalekiej przyszłości w scenariuszu RCP8.5. Jednak zmiany rocznych sum opadów charakteryzowały się większym stopniem niepewności niż zmiany temperatur i w żadnym z analizowanych przypadków nie były „odporne”, mimo że modele klimatyczne zgadzały się co do wzrostu opadów. Wzrost wahał się od 5,5% w bliskiej przyszłości w scenariuszu RCP4.5 do 15,2% w dalekiej przyszłości w RCP8.5, choć zmiany były silnie zróżnicowane przestrzennie. W większości przypadków analizowane projekcje zmian opadów rocznych i sezonowych nie wykazywały się jednak „odpornością”.

Zdolność do rozróżniania między „odpornością”, brakiem zgodności i brakiem statystycznie istotnych zmian w sposób przestrzennie jednoznaczny, przejrzysty i przyjazny dla użytkownika jest wartością dodaną w porównaniu z wszystkimi wcześniejszymi opracowaniami dotyczącymi zmian klimatycznych w Polsce na podstawie wiązek modeli klimatycznych. Zaproponowaną w artykule [MZ2017] metodę określania „odporności” przyjęto później w celu oceny projekcji hydrologicznych dla obszaru DOW w artykułach [HR2018] i [HP2017].

B. Makroskalowe analizy zasobów wodnych: okres historyczny

Drugi zbiór artykułów składających się na przedmiotową serię, oznaczony w niebieskich ramkach na Ryc. 1, obejmuje szeroką gamę metod i narzędzi do oceny zasobów wodnych w warunkach historycznych: klasyfikację za pomocą technik analizy skupień i modeli drzew decyzyjnych [RRA2017], wykrywanie trendów [AG2017] i makroskalowe modelowanie hydrologiczne [HSJ2017].

Stopień zmienności przestrzennej i czasowej reżimów przepływów rzecznych można uznać za bardzo silny. Skala czasowa zmienia się od minut (gwałtowne powodzie) do lat (wieloletnie susze), podczas gdy zmienność przestrzenna jest kontrolowana przez charakterystyki zlewni związane z topografią, pokryciem terenu, glebami i geologią. Celem klasyfikacji hydrologicznych jest uproszczenie tej czasowo-przestrzennej zmienności za pomocą ścisłych kryteriów dyskryminacji. W pracy [RRA2017] wykorzystano nadrzędne ramy metodyczne klasyfikacji hydrologicznych zaproponowane przez Oldena *et al.* (2012) w celu sklasyfikowania quasi-naturalnych reżimów rzek Polski. Zastosowano rozumowanie indukcyjne, w którym podobieństwa między rzekami są charakteryzowane zgodnie z zestawem diagnostycznych wskaźników hydrologicznych, które są przestrzennie silnie zróżnicowane. Podejście indukcyjne składa się z kilku etapów (Olden *et al.*,

2012): (1) pozyskiwanie i ocena danych hydrologicznych; (2) wybór licznego zbioru wskaźników hydrologicznych; (3) obliczanie wskaźników hydrologicznych; (4) przeprowadzenie klasyfikacji i (5) interpretacja i modelowanie przestrzenne opracowanej klasyfikacji.

Wiele krajów (np. Kanada, Wielka Brytania, USA) posiada sieci posterunków wodowskazowych z długimi i nieprzerwanymi seriami przepływów ze zlewni o niewielkim stopniu aktywności antropogenicznej - czasem określane jako referencyjne sieci hydrometryczne (Burn *et al.*, 2012). Chociaż Polska nie utrzymuje sieci tego typu, w artykule [RRA2017] podjęto próbę wytypowania zbioru stacji pomiarowych o charakterystykach podobnych do sieci RHN. Wybrano posterunki zamykające małe i średnie zlewnie z nieznacznie zmodyfikowanymi warunkami przepływu. Zlewnie te charakteryzowały się dobrym rozkładem geograficznym i wystarczającą długością i kompletnością serii pomiarowych przepływu rzeki. Przeprowadzono kompleksową analizę dostępnych danych GIS w celu wykluczenia zlewni podejrzewanych o umiarkowany lub wysoki stopień zakłócenia reżimu przepływu. Hydrogramy przepływów dobowych dla wszystkich posterunków zostały skontrolowane w celu identyfikacji możliwych zakłóceń przepływu. Ostateczny wybór obejmował 147 posterunków wodowskazowych o średniej powierzchni zlewni wynoszącej 856 km² (Ryc. 2B). W artykule wyrażono przekonanie, że pewien stopień modyfikacji przepływów w większości wybranych zlewni jest nieunikniony, jednak musi on być tolerowany (patrz Murphy *et al.*, 2013), a ponadto podjęto starania, aby ostateczny wybór obejmował najmniej zmodyfikowane reżimy przepływów w Polsce.

Klasyfikację przeprowadzono przy użyciu technik k-średnich i k-medoidów. Spośród siedmiu wyróżnionych klas, cztery (oznaczone P1-P4) były rozproszone po Niżu Polskim, jedna (U5) była ograniczona do pasa wyżyn, natomiast dwie klasy (M6 i M7) – do obszarów górskich na południu kraju. Różnice w wartościach wskaźników hydrologicznych pomiędzy klasami były na ogół spore, chociaż klasy P1 i P3 nie były pod tym względem łatwo rozróżnialne. Wśród wskaźników hydrologicznych, które najsilniej ukształtowały otrzymaną klasyfikację należy wymienić: wskaźnik udziału odpływu podziemnego (*baseflow index*), wielkość niskich przepływów, wskaźnik przewidywalności przepływu Colwella, wielkość wysokich przepływów oraz współczynnik zmienności przepływów. W drugim etapie opracowano drzewo klasyfikacyjne za pomocą techniki lasów losowych (*random forest*) w celu prognozowania przynależności do klasy na podstawie cech klimatycznych i fizjograficznych zlewni. Średnia dokładność predykcji opracowanego drzewa wynosiła 79%, co można uznać za wysoką wartość w porównaniu z innymi tego typu badaniami w innych krajach.

Jeśli chodzi o możliwość bezpośredniego zastosowania wyników badań opublikowanych w artykule [RRA2017] w praktyce gospodarki wodnej, wydają się one stanowić solidną podstawę hydrologiczną do opracowania ram tzw. przepływów środowiskowych dla polskich rzek, co jest obecnie wymagane na mocy prawodawstwa wodnego UE. Opracowany model predykcji przynależności do klasy mógłby zostać zastosowany w całej sieci polskich rzek, co pozwoliłoby wygenerować krajową mapę typów quasi-naturalnych reżimów przepływu w Polsce, o wysokiej rozdzielczości, która byłaby sama w sobie cennym zasobem.

Kwestia wykrywania trendów w długich szeregach czasowych przepływów rzecznych, będąca tematem pracy [AG2018], jest bardzo ważnym zadaniem o dużym znaczeniu teoretycznym i praktycznym (Kundzewicz *et al.*, 2005). Gospodarka wodna opiera się na założeniu stacjonarności, stąd ważne jest, aby regularnie i z wykorzystaniem najbardziej aktualnych danych sprawdzać, czy założenie to jest uzasadnione, to znaczy, czy właściwości statystyczne szeregów przepływów mogą być uznane za względnie stacjonarne (w przybliżeniu).

Przeływ rzeczny jest zintegrowanym wynikiem czynników naturalnych, takich jak opady, retencja zlewni i parowanie, a także praktyki zarządzania zlewniami i inżynieria rzeczna, które zmieniają system rzeczny na przestrzeni czasu. To komplikuje problem wykrycia sygnału zmian klimatu w szeregach przepływów rzecznych (Kundzewicz *et al.*, 2005). W celu oceny klimatycznie wymuszonych zmian hydrologicznych, dane powinny być pozyskane, w miarę możliwości, z prawie dziewięciu zlewni, które nie mogą być w znacznym stopniu pod wpływem działalności człowieka (urbanizacja, wylesianie, zbiorniki, systemy odwodnień, pobory wody, inżynieria rzeczna,

itp.). Zlewnie, w których w okresie analiz wystąpiły znaczące zmiany pokrycia terenu lub regulacji rzek, nie są odpowiednie.

Zbiór 147 quasi-naturalnych zlewni zidentyfikowanych w artykule [RRA2017] został następnie wykorzystany w artykule [AG2018] do wykrywania długoterminowych trendów w wybranych wskaźnikach przepływów rzecznych, opisujących warunki średnie roczne, średnie sezonowe, a także ekstremalne. Specjalną uwagę poświęcono analizie przestrzennej trendów, którą przeprowadzono na podstawie obszernego i reprezentacyjnego zbioru posterunków wodowskazowych. Przeprowadzono dwie oddzielne analizy dla dwóch podzbiorów oryginalnego zestawu danych. Jeden podzbiór (A) obejmował 57 wskaźników z danymi dobowymi dostępnymi przez okres 61 lat (1956-2016), podczas gdy drugi podzbiór (B) składał się ze 144 wskaźników z danymi dotyczącymi przepływu rzeki dostępnymi w przedziale czasu wynoszącym 36 lat (1981-2016). Podzbiór (A) został wybrany, aby zmaksymalizować długość szeregów czasowych, podczas gdy podzbiór (B) został wybrany, aby zmaksymalizować liczbę stacji i zasięg geograficzny. Do detekcji trendów monotonicznych wykorzystano nieparametryczny test sumy rang Manna-Kendalla. W badaniach skupiono się na kierunku i wielkości trendów oraz ich zróżnicowaniu przestrzennym, a nie na istotności statystycznej. Spadki Sena, które są dość odporne na tzw. wartości odstające, zostały obliczone w celu oszacowania wielkości trendu dla każdego wskaźnika i każdej zlewni.

Wyniki pokazały, że procesem przepływu rządzi silny czynnik losowy – wielkości trendów były na ogół niskie, a przestrzenne zróżnicowanie dość złożone. Jednocześnie stwierdzono, że dla różnych wskaźników można zauważyć dość wyraźny podział przestrzenny kraju na trzy strefy. Najwyższe wartości trendu spadkowego odnotowano dla wskaźnika niskich przepływów dla podzbioru B, zwłaszcza w strefie wokół równoleżnika 53 °N. Trendy malejące różnych wskaźników dominowały w północnej części kraju, a trendy rosnące występowały częściej w południowej części. Poza tym zauważono, że wielkości trendów spadkowych były na ogół wyższe od wartości trendów rosnących. Dla posterunków zlokalizowanych w centralnej części kraju najczęstszym wynikiem był brak trendu. Przeprowadzenie analiz w dwóch oknach czasowych wykazało silną wrażliwość procesu przepływu rzeczno-ego na wybór tego okresu. Przestrzenny gradient był silniej widoczny dla danych z okresu 1981-2016, niż dla tych z okresu 1956-2016. Bardziej aktualny okres jest też bardziej istotny z punktu widzenia praktycznego wykorzystania wyników w gospodarce wodnej.

Stwierdzono również, że niektóre właściwości zlewni wykazywały dość silną korelację ze wartościami spadków Sena dla różnych wskaźników przepływu. Najsilniejszym predyktorem okazał się wskaźnik odległości geograficznego środka zlewni od wybrzeża Morza Bałtyckiego. Fakt ten był zgodny z wcześniej stwierdzonym wyraźnym podziałem kraju na dwie lub trzy strefy charakteryzujące się dość jednolitymi kierunkami i wartościami trendów, w zależności od szerokości geograficznej i odległości od wybrzeża.

Przedmiotem trzeciego artykułu z grupy B [HSJ2017] było makroskalowe modelowanie bilansu wodnego i przepływu w obszarze DOW przy użyciu modelu *Soil & Water Assessment Tool* (SWAT; Arnold *et al.*, 1998). Podobnie jak w dwóch wcześniejszych artykułach, ten również dotyczył okresu historycznego. Model SWAT jest narzędziem uwzględniającym opis procesów fizycznych w zlewni, o parametrach częściowo rozłożonych. Na przestrzeni ostatnich lat model ten stał się popularnym i często używanym narzędziem do oceny zasobów wodnych w dużych dorzeczach i regionach. W artykule [HSJ2017] zdefiniowano termin „modelowania dopasowanego do danej zlewni” (*tailored modelling*) w odniesieniu do zastosowań tego typu modeli w skali makro. Modelowanie takie powinno spełniać dwie funkcje: (1) dane wejściowe nie są ograniczone do łatwo dostępnych zbiorów danych globalnych lub kontynentalnych, lecz obejmują również bardziej szczegółowe dane w skali kraju; (2) kalibracja i weryfikacja modelu obejmuje wystarczającą liczbę posterunków wodowskazowych, aby uwzględnić heterogeniczność danych wejściowych oraz przestrzenną zmienność procesów hydrologicznych w domenie przestrzennej objętej modelowaniem. Przegląd literatury wykazał, że brak jest zastosowań modeli hydrologicznych, które można by było określić jako „dopasowane do obszaru DOW”. Stwierdzono, że kilka istniejących prac przeprowadzonych z wykorzystaniem modeli o skali kontynentalnej miało istotne ograniczenia z punktu widzenia możliwości wykorzystania ich wyników do oceny zasobów wodnych w obszarze DOW. W związku z tym, potrzeba opracowania nowego modelu „dopasowanego do obszaru DOW” wydawała się dobrze uzasadniona.

Wśród danych wejściowych o wysokiej rozdzielczości, wykorzystanych do modelowania należy podkreślić zwłaszcza zbiór danych klimatycznych CPLFD-GDPT5 [ESSD2016], a także inne krajowe zbiory danych charakteryzujących się wyższą rozdzielczością i/lub jakością w porównaniu z łatwo dostępnymi danymi globalnymi. Modelowanie przebiegało z krokiem dobowym, a średnia wielkość najmniejszej w strukturze modelu jednostki przestrzennej (10 km²) była niska w zestawieniu z porównywalnymi badaniami przeprowadzonymi do tej pory. Największe wyzwania związane z modelowaniem makroskalowym wiążą się jednak z procesem kalibracji modelu.

Strategia kalibracji w odniesieniu do modelowania w skali makro powinna rozwiązać problem polegający na tym, że przepływy obserwowane w posterunkach wodowskazowych są często zmodyfikowane w związku z działalnością człowieka w zlewni, a działalności tej nie da się uwzględnić w modelu z rozmaitych powodów. Może tak być skutek braku dostępu do odpowiednich danych lub skutek nieuwzględnienia danego aspektu w strukturze modelu. Pomimo to, takie zmodyfikowane przez działalność człowieka przepływy są często wykorzystywane do kalibracji modeli, co może prowadzić do obniżenia jakości symulacji oraz do niepożądanego odchylenia wartości parametrów wykorzystanych do kalibracji. Aby rozwiązać ten problem, w artykule [HSJ2017] opracowano nowe podejście do symulacji naturalnego (tj. niezmodyfikowanego przez działalność człowieka) przepływu rzecznoego w całej domenie modelu, które można podsumować w następujących krokach:

1. Wybór dużego i reprezentatywnego zbioru małych, niezależnych od siebie, zlewni o względnie naturalnym reżimie przepływu (zbiór zlewni "wzorcowych", *benchmark*) do kalibracji wielopunktowej (przestrzennej). Ten etap był podobny jak w artykule [RRA2017], chociaż ostatecznie wybrane zlewnie były nieco inne ze względu na różne domeny przestrzenne (Polska vs. obszar DOW) i różne dodatkowe kryteria.
2. Klasyfikacja zlewni wzorcowych z wykorzystaniem analizy skupień, zgodnie z podejściem nakreślonym w artykule [RRA2017], w celu uzyskania jednorodnych obszarów kalibracji.
3. Opracowanie podejścia do regionalizacji (transferu parametrów) oraz wybór dużego zbioru zlewni do weryfikacji przestrzennej.
4. Przeprowadzenie kalibracji modelu w uzyskanych obszarach jednorodnych stanowiących grupy zlewni wzorcowych, a następnie weryfikacja czasowa dla innego okresu.
5. Przeprowadzenie transferu optymalnych wartości parametrów z obszarów jednorodnych do pozostałych zlewni cząstkowych, przy użyciu podejścia opartego na podobieństwie hydrologicznym oraz przestrzenna weryfikacja modelu w zlewniach niewykorzystanych podczas kalibracji.

Kalibracja i weryfikacja modelu wykazała zadowalające wyniki we wszystkich ośmiu obszarach jednorodnych, na które podzielono zbiór 80 zlewni wzorcowych. Z kolei weryfikacja przestrzenna dla 30 posterunków pokazała, że opracowane podejście do regionalizacji dało dobre wyniki (mediana wartości wskaźnika *Kling-Gupta Efficiency*, KGE, wyniosła 0,76; zob. Gupta *et al.* 2009). Mediany z wartości KGE obliczone dla posterunków wzorcowych wchodzących w skład poszczególnych obszarów jednorodnych osiągały wartość powyżej 0,5 zarówno w okresie kalibracji jak i weryfikacji. Bezpośrednie porównanie jakości opracowanego modelu dla obszaru DOW z istniejącymi pracami przeprowadzonymi przy użyciu różnych modeli w skali kontynentalnej (np. mHM przez Rakovec *et al.*, 2016, SWAT przez Abbaspoura *et al.*, 2015, HYPE przez Donnelly *et al.*, 2016) wyraźnie pokazało, że symulacje modelu SWAT opracowanego w artykule [HSJ2017] cechują się większą wiarygodnością. Zasugerowano, że wykorzystanie danych wejściowych o wysokiej rozdzielczości, a w szczególności zbioru CPLFD-GDPT5, pomogło osiągnąć wyższe wartości miar dopasowania niż te, które zostały opisane w dotychczasowych badaniach modelowych.

Wyniki modelu SWAT (zbiór danych CHASE-PL Natural Hydrology - CPL-NH) zostały udostępnione do wykorzystania, podobnie jak dwa poprzednie zbiory danych CPLFD-GDPT5 oraz CPLCP-GDPT5. Wśród potencjalnych zastosowań tego zbioru danych można wymienić: analizy przestrzenne zmiennych hydrologicznych (np. regionalizacja), analizy czasowe (np. detekcja trendów). Serie naturalnych przepływów mogą okazać się przydatne do oceny stopnia zmodyfikowania przepływu w zlewniach silnie zmienionych przez działalność człowieka, co jest

istotne z punktu widzenia wyznaczania przepływów środowiskowych (Piniewski, 2016). Skalibrowany model można również wykorzystać do oceny wpływu zmian klimatu na zasoby wodne, co zostanie omówione w dwóch kolejnych częściach tego opisu.

C. Makroskalowe analizy zasobów wodnych w warunkach zmian klimatu

W przeciwieństwie do północnej i południowej części Europy, przewidywane zmiany warunków opadowych w Europie Środkowo-Wschodniej są mniej wyraźne i bardziej niepewne (Jacob *et al.*, 2014). Wielkość średnich odnawialnych zasobów wodnych jest w tej części Europy niska, wobec czego uzasadnione jest pytanie o spodziewany wpływ zmian klimatycznych na odpływ rzek w tym regionie. Projekcje dotyczące przyszłego bilansu wodnego i warunków odpływu można uzyskać przez zastosowanie scenariuszy zmian klimatu jako danych wejściowych w modelach hydrologicznych. W istocie, modelowanie matematyczne jest obecnie jedynym racjonalnym sposobem opracowania projekcji wpływu zmian klimatycznych na zasoby wodne. Prawa fizyki i równania fizyki matematycznej słuszne są w dawnym, obecnym i przyszłym klimacie, więc fizycznie uzasadnione modele o parametrach rozłożonych są najbardziej obiecujące w kwestii projekcji na przyszłość, zarówno dla rozwoju nauki, jak i dla uzyskania praktycznie użytecznych informacji (Krysanova *et al.*, 2016). Takie projekcje są szczególnie ważne w skali makro (np. dla krajów, czy dorzeczy wielkich rzek), gdyż w takiej właśnie skali opracowuje się i wdraża polityki wodne.

W serii trzech artykułów opisanych w tym rozdziale i przedstawionych w pomarańczowych ramkach na Ryc. 1, wykorzystano model hydrologiczny SWAT [HSJ2017] napędzany wiązką skorygowanych projekcji klimatycznych EURO-CORDEX [MZ2017], w celu wygenerowania projekcji hydrologicznych dla obszaru DOW w bliskiej i dalekiej przyszłości, według scenariuszy RCP4.5 i 8.5. W pierwszym z artykułów, [D2017], opisany został zbiór danych CHASE-PL - Future Hydrology (CPL-FH) obejmujący zbiór symulacji przyszłego bilansu wodnego i przepływów dla obszaru DOW. Artykuł ten stworzył podstawy dla przygotowania dwóch kolejnych artykułów badawczych, z których jeden dotyczy analizy wpływu zmian klimatu na średni roczny i sezonowy odpływ rzeczny (HR2018), a drugi na ekstrema hydrologiczne (HP2017). Należy zauważyć, że ponieważ model SWAT opracowany w artykule [HSJ2017] nie obejmował aspektów gospodarki wodnej w swojej konfiguracji, omówione tutaj projekcje przedstawiają czyste oddziaływanie zmian klimatu, nie modyfikowane przez oddziaływanie gospodarki wodnej.

Zbiór danych CPL-FH opiera się na trzech wcześniej opisanych, przestrzennych zbiorach danych hydrometeorologicznych o wysokiej rozdzielczości: wymuszeniu klimatycznym w okresie historycznym (CPLFD-GDPT5, [ESSD2016]); symulacjach hydrologicznych w okresie historycznym (CPL-NH, [HSJ2017] oraz wymuszeniu klimatycznym w przyszłości (CPLCP - GDPT5 [ESSD2017]. Zbiór danych CPL-FH, opisany w artykule [D2017], jest zatem brakującym ogniwem w łańcuchu makroskalowych zbiorów danych hydrometeorologicznych przedstawionych w niniejszym tekście.

Omawiany zbiór danych składa się z trzech części: (1) danych wejściowych modelu; (2) surowych wyników symulacji; (3) zagregowanych wyników symulacji. Pierwsza z nich pozwala użytkownikom samodzielnie odtworzyć wyniki symulacji lub opracować nowe, przy zmienionych założeniach. Druga zawiera symulowane szeregi czasowe 10 zmiennych: opadów atmosferycznych, topnienia śniegu, ewapotranspiracji wskaźnikowej, ewapotranspiracji rzeczywistej, uwilgotnienia gleby, perkolacji, spływu powierzchniowego, odpływu podziemnego, odpływu całkowitego i natężenia przepływu, symulowane przez model SWAT napędzany danymi wejściowymi ze zbioru projekcji klimatycznych. Łącznie przeprowadzono 46 różnych symulacji będących kombinacjami modeli klimatycznych, scenariuszy RCP i horyzontów czasowych. Wyróżniono dwa typy zmiennych wyjściowych: zmienne na poziomie zlewni cząstkowych (bilans wodny) i zmienne na poziomie odcinków cieków (natężenie przepływu). Te pierwsze zostały zagregowane do skali miesięcznej, ze względu na dużą liczbę zmiennych i ograniczeń przestrzeni dyskowej, a te ostatnie były przechowywane w oryginalnej skali dobowej. Trzecia część zbioru danych składa się z ze statystyk wiązki symulacji klimatycznych obejmujących średnie roczne i sezonowe wartości analizowanych zmiennych opracowane w formacie GIS. Dane statystyczne obejmują: 5-ty percentyl, medianę i 95-ty percentyl, obliczone na podstawie względnych zmian wartości średnich wieloletnich analizowanych

zmiennych między poszczególnymi przyszłymi horyzontami (tj. bliską lub daleką przyszłością) a historycznym okresem odniesienia. Statystyki zostały obliczone dla wszystkich zlewni cząstkowych oraz dla obu scenariuszy RCP. Zagregowane wyniki modelu można również analizować wizualnie we wcześniej wspomnianym (przy okazji artykułu [ESSD2017]) geoportalu projektu CHASE-PL: <http://climateimpact.sggw.pl>. Ten sposób rozpowszechnienia wyników powinien być przedmiotem zainteresowania interesariuszy i decydentów w sektorze gospodarki wodnej, w kontekście adaptacji do zmian klimatu.

W artykule [HR2018] omówiono mapy projekcji zmian średniego rocznego i sezonowego odpływu oraz średnich miesięcznych hydrogramów przepływu rzek Wisły i Odry w ich punktach ujściowych, na podstawie wyników symulacji modelowych z artykułu [D2017]. Niepewność wynikająca z modeli klimatycznych została uwzględniona przy użyciu podejścia do oceny „odporności” projekcji zastosowanego wcześniej w artykule dotyczącym przyszłych zmian temperatury i opadów w obszarze DOW [MZ2017]. Stwierdzono, że w analizowanym obszarze, dominowały wzrosty średniego rocznego odpływu, bez względu na scenariusz RCP i przyszły horyzont czasowy. Uśredniona przestrzennie średnia z wiązki symulacji napędzanych różnymi modelami klimatycznymi wskazywała na wzrosty odpływu od 15,8% (dla RCP4.5 w bliskiej przyszłości) do 41,6% (RCP8.5 w dalekiej przyszłości). Zmiany odpływu były sezonowo zróżnicowane: najwyższe wzrosty były przewidywane w okresie zimowym, a najniższe na wiosnę. Z kolei zróżnicowanie przestrzenne również było znaczne, przy czym najwyższe wzrosty wystąpiły w wewnętrznej, nizinnej części obszaru DOW, a najniższe w jego południowej, górskiej części. W kontekście oceny „odporności” projekcji stwierdzono, że przy niskim poziomie ocieplenia dominował brak istotności statystycznej zmian. Poza jednym wyjątkiem (odpływ zimowy w RCP8.5 w dalekiej przyszłości), w żadnym z analizowanych przypadków nie wystąpiły zmiany, które można by uznać za „odporne”. Zmiany odpływu na obszarze dorzecza obu rzek znalazły odzwierciedlenie w zmienionych hydrogramach przepływu w ich ujściach: zaobserwowano przyspieszenie występowania maksymalnych przepływów (od kwietnia w okresie historycznym do marca lub nawet lutego w RCP8.5 w dalekiej przyszłości), a także znaczny wzrost przepływu w miesiącach styczniu i lutym. Głównym mechanizmem prowadzącym do wzrostu odpływu i przepływu rzeczno-geologicznego było zwiększenie infiltracji oraz odpływu podziemnego i podpowierzchniowego, podczas gdy wzrost spływu powierzchniowego był na ogół niski. Znaczny spadek topnienia śniegu w marcu i kwietniu uznano za przyczynę zmniejszenia spadku wartości spływu powierzchniowego na wiosnę.

Średnie warunki, w ujęciu rocznym i sezonowym, nie odzwierciedlają pełnej złożoności zasobów wodnych. Ponieważ w ostatnich latach w Polsce wystąpiły liczne susze (np. w 1992, 1994, 2006, 2008, 2015) i niszczące powodzie (np. w 1997, 2001, 2010), istnieje uzasadnione przypuszczenie, że przyszłe zagrożenia związane z ekstremami hydrologicznymi mogą wzrosnąć w przyszłości. W związku z tym, wiedza o spodziewanych w przyszłości zmianach niskich i wysokich przepływów, szczególnie w kontekście zmian sezonowych jest bardzo cenna. W artykule [HP2017] opracowano projekcje niskich i wysokich przepływów w rzekach DOW. Obliczono wskaźnik przepływów niskich QL, będący średnią wieloletnią z 10-tych percentyli dobowych przepływów rzecznych, oraz wskaźnik przepływów wysokich QH, będący średnią wieloletnią z 90-tych percentyli dobowych przepływów. Pomimo znacznego rozrzutu projekcji QL i QH, głównym wnioskiem z tych symulacji było stwierdzenie przeważającego występowania wzrostów przepływów – zarówno niskich, jak i wysokich. Wielkość wzrostu wskaźnika QL była znacznie wyższa (w ujęciu względnym) niż wskaźnika QH, co sugeruje, że przyszłe susze hydrologiczne mogą być mniej dotkliwe niż obecnie, natomiast zagrożenie powodzią może wzrosnąć. Należy jednak podkreślić, że w wielu przypadkach miała miejsce zgodność symulacji co do braku statystycznie istotnych zmian. Zwłaszcza południowy pas górski obszar DOW charakteryzował się najmniejszą skalą zmian, szczególnie dla wysokich przepływów. Natomiast w środkowej, nizinnej części dorzecza symulowane zmiany były na ogół najwyższe. Symulowane zmiany uznano za „odporne” tylko w przypadku ok. 3% obszaru DOW, tylko i wyłącznie dla scenariusza RCP8.5 w dalekiej przyszłości, zarówno dla QL jak i QH.

W szerszej perspektywie, w artykule [HP2017] odnotowano również ogólną zgodność projekcji dla obszaru DOW z projekcjami ekstremów hydrologicznych uzyskanych zarówno z modeli działających w skali globalnej i kontynentalnej (Roudier *et al*, 2016; Papadimitriou *et al*, 2016; Alfieri *et al*,

2015) jak i z modeli konceptualnych małych zlewni (Meresa *et al.*, 2016; Osuch *et al.*, 2016). Należy przy tym podkreślić, że w przywoływanych pracach również zastosowano projekcje klimatyczne z rodziny EURO-CORDEX. W przypadku badań modelowych przy użyciu innych wymuszeń klimatycznych zgodność była mniejsza.

Symulowana mniejsza dotkliwość suszy hydrologicznej w Polsce byłaby dobrą wiadomością w kontekście gospodarki wodnej, zwłaszcza w przeciwdziałaniu skutkom suszy oraz adaptacji do zmian klimatu. Wzrost wysokich przepływów oznacza jednak wyzwanie dla gospodarki wodnej, która musi doprowadzić do redukcji ryzyka powodzi i do adaptacji do zmian klimatycznych, gdyż obecnie obowiązujące środki ograniczające ryzyko powodzi mogą się okazać niewystarczające. Jednak przy interpretacji tych wyników należy zachować ostrożność, zarówno w przypadku przepływów niskich, jak i wysokich. Po pierwsze, wybrane wskaźniki QL i QH nie reprezentują najbardziej ekstremalnych zdarzeń, takich jak 100-letnie powódzie lub susze, ale "przeciętne" ekstrema. Jak pokazano w pracy Wyżgi *et al.* (2018), wykorzystując ten sam model SWAT, napędzany przez tę samą wiązkę projekcji klimatycznych, znaleziono ujemną korelację rozrzutu projekcji przepływów powodziowych Górnej Wisły i ich prawdopodobieństwa przewyższenia. Po drugie, różne rodzaje susz (np. susze rolnicze czy hydrogeologiczne) mogą zachowywać się inaczej niż susze hydrologiczne.

D. Uszczegółowienie analiz zasobów wodnych w warunkach zmian klimatu po przejściu ze skali makro do skali mezo

Wszystkie poprzednie artykuły dotyczyły albo klimatu (grupa A) albo zasobów wodnych (grupy B i C) w ujęciu makroskalowym. Domeną przestrzenną analiz był najczęściej obszar DOW, ewentualnie powiększony o część kraju nie należącą do DOW, lub też zbiór reprezentatywnych zlewni dla obszaru Polski jak w artykułach [RRA2017, AG2018] (por. Ryc. 2A,B). Chociaż skala makro ma duże znaczenie z punktu widzenia gospodarki wodnej, w pewnych okolicznościach rozwiązywanie niektórych konkretnych problemów dotyczących zasobów wodnych w skali makro jest problematyczne. W czwartej, zamykającej niniejszą serię grupie artykułów (przedstawionej w fioletowych ramkach na Ryc. 1) przedstawiono dwa rodzaje zagadnień, które przy obecnym stanie wiedzy mogą być łatwiej poruszane w mezo-skali niż w skali makro. Pierwszym z nich jest niepewność projekcji przepływów wynikająca z wyboru modelu hydrologicznego, a drugim - wpływ zmian klimatu na jakość wód. W pierwszym przypadku motywacja wiąże się ze spostrzeżeniem istnienia dynamicznie rosnącej liczby badań nad wpływem zmian klimatu na przepływy rzeczne, uzyskanych za pomocą różnych modeli hydrologicznych. Obecne rozpoznanie wpływu wyboru modelu hydrologicznego na projekcje przepływów jest ograniczone. Czołowym przykładem światowych inicjatyw skupiających się na porównaniach projekcji hydrologicznych uzyskanych z różnych modeli w kilku dużych dorzeczach na sześciu kontynentach jest projekt ISI-MIP (Eisner *et al.*, 2017). W Polsce tak szeroko zakrojone badania nie były jak dotąd wykonywane, jednak w artykule [AG2017] przeprowadzono porównanie projekcji hydrologicznych uzyskanych z modelu SWAT oraz modelu HBV w ośmiu małych zlewniach częściowych w dorzeczach Odry i Wisły (Ryc. 2C).

W drugim przypadku, nie ulega wątpliwości, że ocena wpływu zmian klimatu na jakość wód może być co najmniej tak samo istotna dla decydentów, jak ocena wpływu na ilość wód. Jednak zastosowanie fizycznie uzasadnionych modeli jakości wody o parametrach rozłożonych jest niezwykle rzadkie w skali makro, ze względu na fakt, że w dużej mierze opiera się na trudnych do uzyskania (w odpowiedniej rozdzielczości i/lub jakości) danych dotyczących presji człowieka (np. dawki nawożenia, punktowe źródła zanieczyszczeń). Struktura modelu SWAT zawiera komponent erozji gleb i transportu rumowiska, a także transportu składników odżywczych, które umożliwiają śledzenie rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w ciekach wodnych. Jednak zastosowanie tego komponentu w całym obszarze DOW, a zwłaszcza jego kalibracja w tak dużym i heterogenicznym obszarze, wydawały się niemożliwe do wykonania. W związku z tym, w artykule [W2017] do badania wpływu zmian klimatu na jakość wód wybrano dwie średniej wielkości zlewnie częściowe w dorzeczech Wisły i Odry (Ryc. 2D).

W artykule [AG2017] analizy bazowały na istniejących wynikach projekcji hydrologicznych modelu SWAT [D2017], wyodrębnionych z makroskalowego modelu SWAT obszaru DOW dla jego ośmiu

zlewni cząstkowych oraz na danych wyjściowych uzyskanych z modelu HBV opracowanego dla tychże zlewni w ramach projektu CHIHE (*Climate Change Impacts on Hydrological Extremes*; Romanowicz *et al.*, 2016). Wybrany zbiór zlewni charakteryzował się zróżnicowaniem fizjograficznym i klimatycznym. Cztery zlewnie miały charakter górski: Nysa Kłodzka, (górna) Wisła, Dunajec i Biała Tarnowska, a cztery charakter nizinny: Oleśnica, Myśla, Flinta i Narewka. W artykule omówiono projekcje przepływu w tych ośmiu zlewniach dla dwóch przyszłych horyzontów czasowych, przy założeniu scenariusza RCP8.5. Projekcje klimatyczne wykorzystane w obu modelach, stanowiące wiązkę siedmiu symulacji, pochodziły ze zbioru EURO-CORDEX, ale nie były identyczne, m. in. z powodu różnych podejść do korekty błędu systematycznego. Główną różnicą pomiędzy zastosowaniami modeli SWAT i HBV był fakt, że struktura modelu HBV została stworzona dla każdej z ośmiu zlewni indywidualnie, natomiast w przypadku SWAT, struktura modelu została stworzona dla obszaru DOW, którego powierzchnia przekraczała powierzchnie wybranych zlewni o dwa-trzy rzędy wielkości (por. Ryc. 2A,C). Kolejną ważną różnicą było inne wymuszenie klimatyczne w okresie historycznym. W przypadku SWAT wykorzystano zbiór danych CPLFD-GDPT5 [ESSD2016], podczas gdy w przypadku modelu HBV zastosowano interpolację metodą wieloboków Thiessena na podstawie danych z kilku posterunków zlokalizowanych w każdej ze zlewni lub w jej sąsiedztwie.

Oba modele hydrologiczne były zgodne co do przeważającego kierunku wzrostowego symulowanych zmian średniego przepływu rocznego we wszystkich zlewniach i w obu rozważanych horyzontach czasowych. Wyjątek stanowiły cztery zlewnie górskie w bliskiej przyszłości, kiedy to kierunki były zmienne w zależności od modeli klimatycznych. Generalnie, zgodność co do wielkości zmian była stosunkowo wysoka w bliskiej przyszłości i dość niska w dalekiej przyszłości. Zarówno wielkość symulowanych zmian przepływu, jak i rozrzut wynikający z wiązki modeli klimatycznych rosły z czasem dla większości zlewni. Najwyższe rozbieżności odnotowano dla zlewni nizinnych. W przypadku przepływów sezonowych, podobnie jak dla średnich rocznych, zgodność modeli była wysoka w bliskiej przyszłości i niska w dalekiej. W sezonie zimowym wzrosty dominowały we wszystkich możliwych kombinacjach zlewni, modeli klimatycznych i horyzontów czasowych. W siedmiu z 16 przypadków, projekcje przepływu zimowego uzyskane z modelu SWAT były w sposób statystycznie istotny wyższe od projekcji uzyskanych z modelu HBV. Symulacje tego ostatniego wskazały na wzrosty przepływów wiosennych w każdej zlewni w dalekiej przyszłości, podczas gdy według modelu SWAT wzrost ten miał miejsce tylko w zlewniach nizinnych. Przepływy letnie i zimowe również różniły się znacznie między modelami w dalekiej przyszłości. Wzrosty przepływu letniego, symulowane przez model SWAT dla zlewni nizinnych, były znacząco niższe (nawet dwu- lub trzykrotnie), w porównaniu z odpowiadającymi im wartościami wzrostów, w wyniku modelu HBV. Dla zlewni Dunajca, projekcje przepływów letnich w dalekiej przyszłości różniły się na ogół kierunkiem zmian (spadki wg SWAT i wzrosty wg HBV). Z drugiej strony, istnieje dość duża zgodność między modelami co do wzrostów przepływów jesiennych w zlewniach górskich oraz w zlewni Narewki. Wyniki pokazały również, że im niższy był współczynnik odpływu zlewni, tym większa była zmiana średniego rocznego przepływu obu modeli oraz tym większa była różnica średnich rocznych zmian przepływu między dwoma modelami. Część tej różnicy wyjaśniono nieco niższym wzrostem opadów, które występowały w danych wejściowych SWAT, w porównaniu do danych wejściowych HBV.

Próbując wyjaśnić różnice między projekcjami uzyskanymi z obu modeli, wskazano na różnice w sposobie reprezentacji procesów hydrologicznych w modelach oraz różnice w zastosowanych danych klimatycznych. Choć dane te pochodziły z tych samych modeli klimatycznych, różniły się jednak wskutek różnych procedur korekty błędu systematycznego oraz różnych danych historycznych. Tym niemniej, przyczyny istnienia bardzo dużych różnic projekcji przepływów rocznych i sezonowych między modelami HBV i SWAT, często przekraczające 100% dla nizinnych zlewni Myśli, Flinty i Oleśnicy, w horyzoncie czasowym 2071-2100, nie zostały wyjaśnione i wymagają dalszych badań. Nie ulega wątpliwości, że modelowanie tego typu zlewni, z przeważającym udziałem odpływu podziemnego i wysokim udziałem ewapotranspiracji w bilansie wodnym jest trudniejsze niż modelowanie zlewni górskich. Występujące różnice w ocenie wpływu zmian klimatycznych na przepływy stwarzają poważne problemy interpretacyjne dla praktyków zajmujących się adaptacją do zmian klimatu i gospodarką wodną.

Modelowanie wpływu zmian klimatycznych na jakość wód przeprowadzono w zlewniach górnej Narwi i Baryczy w pracy [W2017]. Te dwie zlewnie zostały wybrane, ponieważ reprezentują dwa typy warunków charakterystycznych dla Niżu Polskiego: niższą antropopresję zasobów wodnych na wschodzie (Górna Narwa) i wyższą antropopresję na zachodzie (Barycz). Zlewnie te umiarkowanie różnią się pod względem warunków klimatycznych i pokrycia terenu, natomiast różnią się zasadniczo warunkami glebowymi i hydrologicznymi. Rolnictwo w zlewni Baryczy jest znacznie bardziej intensywne, gęstość zaludnienia i presja miejska są znacznie wyższe, a w górnej zlewni występuje duża liczba stawów rybnych. Obserwowane stężenia azotu całkowitego (TN) i fosforu (TP) w wodach powierzchniowych zlewni Baryczy znacznie przewyższają progi dobrego stanu ekologicznego.

W opracowanych modelach obu zlewni wykorzystano wymuszenia klimatyczne pochodzące z prac [ESSD2016] (okres historyczny) oraz [MZ2017] (przyszłość) i niektóre dane wejściowe i parametry pochodzące z modelu makroskalowego opracowanego dla obszaru DOW [HSJ2017]. Analizy przeprowadzono dla scenariusza RCP4.5. Zmiany jakości wody kwantyfikowano za pomocą trzech wskaźników: erozji gleb, strat azotu (TN) i fosforu (TP) wyrażonych w kg ha^{-1} , uśrednionych przestrzennie w granicach zlewni.

W obu zlewniach wyniki symulacji wskazywały na spodziewany wzrost średniej rocznej erozji gleb. Zmiany te nawiązują w dużym stopniu do zmian spływu powierzchniowego, pokazując wzrost erozji w okresie zimowym i letnim w zlewni Górnej Narwi, a także spadek w zimie i wzrost w lecie w zlewni Baryczy.

Średnie roczne straty TN w okresie historycznym były prawie trzy razy wyższe w zlewni Baryczy ($5,6 \text{ kg ha}^{-1}$) niż w zlewni Górnej Narwi ($1,9 \text{ kg ha}^{-1}$), co było prawdopodobnie związane z różnymi poziomami antropopresji w obu zlewniach. Średni dla wiązki modeli klimatycznych wzrost strat TN o 35% był przewidywany dla zlewni Baryczy w dalekiej przyszłości, natomiast wzrost o 45% przewidywany był dla zlewni Górnej Narwi. W obu zlewniach, ale szczególnie w zlewni Baryczy, największy wzrost przewidywany był w sezonie zimowym. Zostało to wyjaśnione przez symulowany wysoki wzrost infiltracji i zasilania podziemnego w zimie. Wyniki projekcji sugerowały również, że sezonowe maksimum strat TN w zlewni Baryczy zostanie przyspieszone z wiosny do zimy.

Wyniki projekcji wskazały na umiarkowany wzrost strat TP w zlewni górnej Narwi i wysoką niepewność zmian w zlewni Baryczy. Bardziej zróżnicowane były jednak zmiany sezonowe. W zlewni Baryczy, najbardziej wyraźny sygnał był przewidywany w okresie letnim, co można powiązać ze wzrostem opadów w tym sezonie. Natomiast w miesiącach zimowych, straty TP mogą się zmniejszać. W zlewni Górnej Narwi, wzrosty widoczne były głównie zimą i latem, natomiast małe spadki występowały na wiosnę. Zauważono duży rozrzut wyników modeli w sezonie jesiennym.

Chociaż symulacje jakości wody nie zostały wykonane dla scenariusza RCP8.5, można się spodziewać że wraz z wyższym wzrostem wielkości zimowych odpływów związanych z tym scenariuszem (omówionym w artykule [HR2018]), straty TN mogłyby być nawet wyższe niż dla RCP4.5. Jest to związane ze sprostowaniem istnienia silnej korelacji między odpływem i transportem TN (w szczególności azotanów) w polskich rzekach nizinnych. Wynika to z dużej mobilności azotanów, które nie są przyswajane przez rośliny w okresie poza-wegetacyjnym, co zwiększa ich wymywanie wraz z odpływem podpowierzchniowym i podziemnym.

W kontekście ochrony jakości wód w Polsce, wnioski płynące z artykułu [W2017] są zróżnicowane. W zlewni Baryczy, charakteryzującej się większą podatnością gleb na wymywanie azotanów niż zlewnia Górnej Narwi, spodziewane są znaczne wzrosty zanieczyszczeń azotem pochodzenia rolniczego. Zmiany klimatyczne mogą zatem wymagać dodatkowych działań dostosowawczych w intensywnie użytkowanych zlewniach, mających na celu łagodzenie zanieczyszczeń obszarowych. Wybór optymalnych kombinacji działań ochronnych powinien być przedmiotem przyszłych badań, jednak ze względu na największy symulowany wzrost strat TN w sezonie zimowym można oczekiwać, że jednym z bardziej skutecznych działań może być utrzymywanie pokrywy roślinnej na polach uprawnych w zimie (Piniewski *et al.*, 2014).

Podsumowanie

W ramach przedstawionego osiągnięcia naukowego rozwiązano następujące zagadnienia:

- opracowano cztery unikalne zbiory danych hydrometeorologicznych o wysokiej rozdzielczości przestrzennej, pokrywające obszar dorzeczy Odry i Wisły (DOW): (1) zbiór danych klimatycznych dla okresu historycznego; (2) zbiór danych klimatycznych pochodzący ze skorygowanych regionalnych modeli klimatycznych; (3) zbiór wyników symulacji hydrologicznych dla okresu historycznego; (4) zbiór wyników symulacji hydrologicznych dla przyszłych horyzontów czasowych.
- przeprowadzono pierwszą tego typu klasyfikację quasi-naturalnych reżimów przepływu rzek Polski oraz opracowano model predykcji przynależności do klasy na podstawie parametrów zlewni.
- przeprowadzono, wykorzystując najnowsze dane pomiarowe sięgające roku 2016, detekcję trendów w wybranych charakterystykach przepływu w licznych i reprezentatywnym zbiorze zlewni rzek Polski.
- zbudowano, skalibrowano i zweryfikowano model hydrologiczny o parametrach rozłożonych i uwzględniający opis procesów fizycznych dla obszaru DOW, co było pierwszym tego typu opracowaniem dla obu dorzeczy.
- opracowany model hydrologiczny wykorzystano do oceny wpływu spodziewanych zmian klimatu na odpływ rzeczny w warunkach przeciętnych i ekstremalnych oraz na wielkość erozji gleb i strat azotu i fosforu (na przykładzie dwóch mniejszych zlewni).
- w opracowanych mapach projekcji klimatycznych (opadu i temperatury) oraz hydrologicznych (odpływu rzeczny, przepływów ekstremalnych) zastosowano metodę oceny „odporności” projekcji pozwalającą uwzględnić na mapach poziom zgodności między projekcjami uzyskanymi za pomocą szeregu modeli wchodzących w skład wiązki oraz istotność statystyczną zmian.
- przeprowadzono porównanie projekcji hydrologicznych uzyskanych z modelu SWAT z projekcjami z modelu HBV, co pozwoliło na pierwszą tego rodzaju w Polsce ocenę modelowania hydrologicznego jako źródła niepewności w określaniu wpływu zmian klimatu na odpływ rzeczny.

Można spodziewać się praktycznego wykorzystania powyższych wyników, w szczególności poprzez:

- wykorzystanie opracowanych zbiorów danych rozpowszechnionych w publicznie dostępnych repozytoriach naukowych oraz w serwisach mapowych do różnorodnych celów, m.in. związanych z adaptacją różnych sektorów, a zwłaszcza gospodarki wodnej, do zmian klimatu.
- wykorzystanie opracowanego, skalibrowanego i zweryfikowanego modelu SWAT dla obszaru DOW jako narzędzia do oceny aktualnych i przyszłych zasobów wodnych, nie tylko w kontekście zmian klimatu, ale również zmian użytkowania ziemi, gospodarowania wodą, itp.
- wykorzystanie opracowanej klasyfikacji reżimów przepływu oraz modelu predykcji przynależności do klasy w celu utworzenia szczegółowej mapy quasi-naturalnych reżimów rzek Polski.

Jeśli chodzi o pierwszy z trzech wyżej wymienionych punktów, część opracowanych zbiorów danych tj. wyniki projekcji przepływów wysokich są obecnie wykorzystywane w aktualizacji Wstępnej Oceny Ryzyka Powodziowego realizowanej przez firmę SWECO oraz Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej na zlecenie Krajowego Zarządu Gospodarki Wodnej.

Literatura

- Abbaspour, K.C., Rouholahnejad, Vaghefi, E.S., Srinivasan, R., Yang, H., Kløve, B. 2015. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology*, 524, 733–752.
- Alfieri, L., Burek, P., Feyen, L., Forzieri, G. 2015. Global warming increases the frequency of river floods in Europe. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 19, 2247–2260.
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., Williams, J. R. 1998 Large-area hydrologic modeling and assessment: Part I. model development. *Journal of the American Water Resources Association* 34(1), 73–89.
- Burn, D.H., Hannaford, J., Hodgkins, G.A., Whitfield, P.H., Thorne, R., Marsh, T. 2012. Reference hydrologic networks II. Using reference hydrologic networks to assess climate-driven changes in streamflow. *Hydrological Sciences Journal* 57(8), 1580-1593.

- Eisner, S., Flörke, M., Chamorro, A., Daggupati, P., Donnelly, C., Huang, J., Hundecha, Y., Koch, H., Kalugin, A., Krylenko, I., Mishra, V., Piniewski, M., Samaniego, L., Seidou, O., Wallner, M., Krysanova, V. 2017 An ensemble analysis of climate change impacts on streamflow seasonality across 11 large river basins. *Climatic Change*, 141(3), 401-417.
- Donnelly, C., Andersson, J.C.M., Arheimer, B. 2016. Using flow signatures and catchment similarities to evaluate the E-HYPE multi-basin model across Europe. *Hydrological Sciences Journal*, 61(2), 255-273.
- Giorgi, F., Lionello, P. 2008. Climate change projections for the Mediterranean region, *Global Planet. Change*, 63, 90–104.
- Gudmundsson, L., Bremnes, J. B., Haugen, J. E., EngenSkaugen, T. 2012. Technical Note: Downscaling RCM precipitation to the station scale using statistical transformations – a comparison of methods, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16, 3383–3390.
- Gupta, H.V., Perrin, C., Blöschl, G., Montanari, A., Kumar, R., Clark, M., Andréassian, V. 2014. Large-sample hydrology: a need to balance depth with breadth. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18 (2), 463–477.
- Haylock, M. R., Hofstra, N., Klein Tank, A. M. G., Klok, E. J., Jones, P. D., New, M. 2008. A European daily high-resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950–2006, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 113, D20119.
- Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O. B., Bouwer, L., Braun, M. A., Colette, A., Déqué, M., Georgievski, G., Georgopoulou, E., Gobiet, A., Menut, L., Nikulin, G., Haensler, A., Hempelmann, N., Jones, C., Keuler, K., Kovats, S., Kröner, N., Kotlarski, S., Kriegsman, A., Martin, E., Van Meijgaard, E., Moseley, Ch., Pfeifer, S., Preuschmann, S., Radermacher, Ch., Radtke, K., Rechid, D., Rounsevell, M., Samuelsson, P., Somot, S., Soussana, J. F., Teichmann, C., Valentini, R., Vautard, R., Weber, B., Yiou, P. 2014 EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change*, 14(2), 563-578.
- Knutti, R., Sedláček J. 2013. Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections. *Nat. Clim. Chan.*, 3, 369-373.
- Krysanova, V., Kundzewicz, Z.W., Piniewski, M. 2016. Assessment of climate change impacts on water resources W: V.P. Singh (Ed.) Handbook of applied hydrology, Nowy Jork : McGraw-Hill Education, s. 148.1-148.12.
- Kundzewicz, Z.W., Graczyk, D., Maurer, T., Pińskwar, I., Radziejewski, M., Svensson, C., Szwed, M. 2005. Trend detection in river flow series: 1. Annual maximum flow. *Hydrol. Sci. J.* 50(5):797–810.
- Kundzewicz, Z. W., Matczak, P. 2012. Climate change regional review: Poland: climate change regional review: Poland, *WIREs Clim. Change*, 3, 297–311.
- Meresa, H.K., Osuch, M., Romanowicz, R. 2016. Hydro-meteorological drought projections into the 21-st century for selected Polish catchments. *Water*, 8(5), 206.
- 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., Meehl, G. A., Mitchell, J. F. B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S. J., Stouffer, R. J., Thomson, A. M., Weyant, J. P. & Wilbanks, T. J. 2010 The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463(7282), 747-756.
- Olden, J.D., Kennard, M.J., Pusey, B.J. 2012. A framework for hydrologic classification with a review of methodologies and applications in ecohydrology. *Ecohydrology* 5, 503–518.
- Osuch, M., Lawrence, D., Meresa, H.K., Napiórkowski J. J., Romanowicz, R. J. 2016. Projected changes in flood indices in selected catchments in Poland in the 21st century. *Stoch Environ Res Risk Assess.*
- Papadimitriou, L. V., Koutroulis, A. G., Grillakis, M. G., Tsanis, I. K. 2016. High-end climate change impact on European runoff and low flows – exploring the effects of forcing biases, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 20, 1785-1808.
- Piniewski, M. 2016. Natural streamflow simulation for two largest river basins in Poland: a baseline for identification of flow alterations, *Proc. IAHS*, 373, 101-107.
- Piniewski, M., Kardel, I., Giełczewski, M., Marcinkowski, P., Okruszko, T. 2014. Climate change and agricultural development: adapting Polish agriculture to reduce future nutrient loads in a coastal watershed. *Ambio*, 43(5), 644-660.
- Rakovec, O., Kumar, R., Mai, J., Cuntz, M., Thober, S., Zink, M., Attinger, S., Schäfer, D., Schrön, M., Samaniego, L. 2016. Multiscale and multivariate evaluation of water fluxes and states over European river basins. *Journal of Hydrometeorology*, 17, 287–307.
- Richter, D. 1995. Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Messfehlers des Hellmannniederschlagsmessers, Vol. 194, Berichte des Deutschen Wetterdienstes.
- Romanowicz, R. J., Bogdanowicz, E., Debele, S. E., Doroszkiewicz, J., Hisdal, H., Lawrence, D., Meresa, H. K., Napiórkowski, J. J., Osuch, M., Strupczewski, W. G., Wilson, D., Wong, W. K. 2016. Climate change impact on hydrological extremes: preliminary results from the Polish-Norwegian Project, *Acta Geophys.*, 64, 477–509.

Roudier, Ph., Andersson, J. C. M., Donnelly, Ch., Feyen, L., Greuell, W., Ludwig, F. 2016. Projections of future floods and hydrological droughts in Europe under a +2°C global warming. *Climatic Change*, 135, 341-355.

Teutschbein, C., Seibert, J. 2012. Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: review and evaluation of different methods, *J. Hydrol.*, 456, 12–29.

Tian, X., A. Dai, D. Yang, Xie, Z. 2007. Effects of precipitation-bias corrections on surface hydrology over northern latitudes, *J. Geophys. Res.*, 112, D14101.

Wyźga, B. Kundzewicz, Z.W., Konieczny, R., Piniewski, M., Zawiejska, J., Radecki-Pawlik, A. 2018. Comprehensive approach to the reduction of river flood risk: Case study of the Upper Vistula Basin. *Science of The Total Environment* 631, 1251-1267.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych

Moja wrażliwość naukowa oraz podejmowana tematyka badań zostały w dużej mierze ukształtowane już w trakcie studiów w Kolegium Międzywydziałowych Indywidualnych Studiów Matematyczno-Przyrodniczych (MISMaP) na Uniwersytecie Warszawskim. Od początku tych studiów najbardziej interesowały mnie kwestie zastosowania narzędzi matematycznych do opisu zjawisk przyrodniczych, a zwłaszcza procesów i systemów hydrologicznych. Jednak dopiero po uzyskaniu tytułu magistra i rozpoczęciu studiów doktoranckich w SGGW mogłem rozpocząć systematyczną i długoletnią pracę nad modelowaniem hydrologicznym – początkowo w ramach europejskiego projektu SCENES, w którym byłem jednym z głównych wykonawców. Mój pierwszy istotny artykuł z owego okresu [28]², dotyczący wielopunktowej kalibracji i weryfikacji modelu SWAT w zlewni Narwi, był, jak się okazało, jednym z pierwszych, w którym dyskutowano kwestie właściwego sposobu kalibracji dużych zlewni przy wykorzystaniu danych ze znacznej liczby posterunków wodowskazowych. Znalazło to swoje odzwierciedlenie w sporej liczbie cytowań w bazie Web of Science (17 wg stanu na lipiec 2018).

Modelowanie hydrologiczne, zwłaszcza z wykorzystaniem modeli o parametrach rozłożonych i bazujących na procesach, takich jak SWAT, pozostało od okresu studiów doktoranckich do dziś dominującym obiektem moich zainteresowań badawczych. W kolejnej pracy dotyczącej zlewni Narwi [15] analizowałem wpływ skali przestrzennej działania modelu na wyniki projekcji hydrologicznych na przykładzie „dokładnego”, zlewniowego modelu SWAT i „mało dokładnego”, kontynentalnego modelu WaterGAP. Wyniki symulacji tego ostatniego modelu zostały uzyskane dzięki współpracy z Center for Environmental Systems Research (CESR) Uniwersytetu w Kassel (Niemcy).

Mniej więcej w tym samym okresie rozpocząłem prace nad opracowywaniem struktury oraz kalibracją modeli jakości wody. W pierwszym zakończonym sukcesem zastosowaniu modelu SWAT w tym zakresie [49], prace modelowe prowadzono w małej zlewni Redy na Pomorzu. Kolejny przykład dotyczył większej od Redy zlewni Pilicy [19], a następny zlewni Górnej Narwi oraz Baryczy [50]. We wszystkich tych zlewniach modelowaniem objęto co najmniej jedną z form azotu (najczęściej TN, NO₃-N) oraz fosforu (najczęściej TP, PO₄-P). W większości przypadków wskaźniki oceny jakości modelu wskazywały na większą wiarygodność symulacji form azotu niż fosforu, co można było interpretować większą mobilnością i wyższą korelacją z przepływem azotu oraz niedoskonałym opisem transportu fosforu w zlewni w modelu SWAT. Opracowane modele były później wykorzystywane do różnych celów, co zostanie omówione w dalszej części tekstu.

Równocześnie, pracując z modelem SWAT opracowanym dla zlewni Pilicy, podjąłem temat wpływu sposobu interpolacji danych opadowych na wyniki modelowania. Opublikowany artykuł [20] był rozszerzeniem pracy magisterskiej mgr Mateusza Szcześniaka, przygotowanej pod moim kierunkiem, która uzyskała pierwsze miejsce w VI edycji Konkursu im. Kazimierza Dębskiego na najlepszą pracę dyplomową z hydrologii w 2014 r. Zarówno w pracy magisterskiej jak i artykule wykazano, że zastosowanie prostych (metoda wielokątów Thiessena, metoda IDW), jak i bardziej złożonych (kriging) metod interpolacji danych opadowych prowadzi do lepszych wyników symulacji przepływu niż domyślny sposób stosowany w modelu SWAT.

² W nawiasach kwadratowych [X] numerem X oznaczono pozycję z listy publikacji w Załączniku 3.II

W kolejnych latach (2015-2017) moja praca naukowa była w przeważającej większości związana z udziałem w polsko-norweskim projekcie CHASE-PL (współpraca z Instytutem Środowiska Rolniczego i Leśnego Polskiej Akademii Nauk oraz Met Norway) oraz równoległym pobycie na stypendium Fundacji Alexandra von Humboldta w Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK) w Poczdamie. Artykuły wchodzące w skład dzieła opisanego w punkcie 4 nie były jedynymi, które powstały w ramach tego projektu i pobytu na stażu: dwa inne związane pośrednio z modelowaniem hydrologicznym artykuły [23,25] opublikowane zostały w wysoko punktowanych czasopismach *Environemtnal Science & Policy* (IF 3,751) oraz *Science of the Total Environment* (IF 4,9). W pierwszym [23], poświęconym niepewności w ocenie wpływu zmian klimatu na zasoby wodne artykule, w sposób systematyczny omówiono rozmaite źródła niepewności oraz sposoby jej ograniczenia w trzech obszarach: (1) danych i informacjach; (2) modelach klimatycznych oraz (3) modelach hydrologicznych. W drugim [25], wielowątkowym artykule poświęconym holistycznemu podejściu do redukcji zagrożenia powodziowego w zlewni Górnej Wisły, mój udział polegał na opracowaniu projekcji zmian wybranych kwantyli powodziowych.

Moje doświadczenia z modelowaniem hydrologicznym nie ograniczały się do zlewni rzek polskich. W 2013 r. zgłosiłem akces do oddolnej inicjatywy środowiska użytkowników modeli hydrologicznych zajmujących się wpływem zmian klimatu na odpływ pod nazwą *Regional Model Intercomparison Project* (RegMIP). Inicjatywa ta, w której udział wzięło kilkadziesiąt osób z ośrodków naukowych na całym świecie, była częścią projektu ISIMIP (*Intersectoral Model Intercomparison Project*) koordynowanego przez PIK. Opracowany przeze mnie wraz ze współpracownikami z Uniwersytetu w Sydney model SWAT opracowany dla dorzecza rzeki Darling w Australii został w tym projekcie wykorzystany do oszacowania wpływu zmian klimatu na przepływ rzeczny. Wyniki te zostały wykorzystane w kilku artykułach zeszytu specjalnego periodyku *Climatic Change* (IF 3,496), a w szczególności w artykule dotyczącym sezonowości odpływu 12 wielkich rzek na sześciu kontynentach, którego byłem współautorem [22]. Sam model matematyczny zlewni Darling został opracowany w ramach pracy magisterskiej realizowanej pod moim kierunkiem.

Kończąc wątek badań z wykorzystaniem modeli hydrologicznych, chciałbym podkreślić jedną szczególną publikację, której jestem współautorem, a mianowicie rozdział w książce *Handbook of Applied Hydrology, Second Edition* pod redakcją Vijaya P. Singha [39]. To liczące 1440 stron i 156 rozdziałów dzieło jest kontynuacją książki uznawanej za kamień milowy w hydrologii, tj. wydanej w 1964 r. *Handbook of Applied Hydrology* pod redakcją Ven Te Chowa. Rozdział, którego jestem współautorem dotyczy oceny wpływu zmian klimatu na zasoby wodne i porusza takie zagadnienia jak opis metodyki takiej oceny, kwestię wyboru odpowiedniego narzędzia (modelu), przegląd powszechnie stosowanych modeli w skali dorzecza lub regionu oraz metody oceny niepewności i sposoby jej redukcji.

Dotychczasowy opis skupiał się na osiągnięciach ściśle związanych z głównym nurtem moich zainteresowań badawczych, czyli modelowaniem hydrologicznym, jednak zagadnienia te nie wyczerpują całości moich zainteresowań. Jak widać z listy publikacji (Załącznik 3.II), tych dodatkowych nurtów jest dość dużo, jednak można wśród nich wyodrębnić dwa wyróżniające się: jeden związany z ekohydrologią, a drugi z rolnictwem.

W ramach wspomnianego już wyżej projektu SCENES realizowanego równoległe z okresem moich studiów doktoranckich w SGGW, zająłem się kwestią przepływów środowiskowych, a w szczególności wymagań niektórych gatunków ryb oraz nadrzecznych zbiorowisk mokradłowych co do charakterystyki reżimu przepływów [12]. W kolejnych pracach (których część wyników trafiło do mojej rozprawy doktorskiej) analizowałem wpływ zmian klimatu na wybrane wskaźniki przepływów środowiskowych z wykorzystaniem modeli SWAT i WaterGAP [16] oraz na stopień zaspokojenia potrzeb (w zakresie przepływu) biot traktowanych podobnie jak inni użytkownicy wód. We wszystkich wymienionych artykułach ściśle współpracowałem z kolegami z Centre for Ecology & Hydrology (CEH) w Wallingford, a same artykuły powstały również dzięki częstym krótkoterminowym stażom w CEH odbytym przeze mnie w tamtym okresie.

Dzięki pracy w polsko-norweskim projekcie Kampinos koordynowanym przez SGGW w latach 2008-2011 i współpracy z Uniwersytetem w Oslo brałem udział w opracowaniu prostego modelu opartego

na danych GIS i wynikach modelowania hydrogeologicznego, którego celem była ocena skuteczności wybranych działań renaturyzacyjnych przeciwdziałających procesowi degradacji mokradeł na terenie Kampinoskiego Parku Narodowego. Opracowane podejście pozwalało na predykcję zmiany stanu degradacji gleb i roślinności za pomocą prawdopodobieństw warunkowych uzależnionych od głębokości do zwierciadła wód podziemnych. Wyniki zostały opublikowane w postaci monografii [31] oraz artykułu w periodyku *Ecological Engineering* (IF 2,958) [14].

Zagadnienie degradacji mokradeł i jej uwarunkowań hydrologicznych było również motywem przewodnim mojego udziału w opracowaniu Planu Ochrony Narwiańskiego Parku Narodowego (NPN) w 2014 r. Opracowano wówczas prosty, konceptualny model bilansu wodnego dla obszaru mokradeł NPN i przeanalizowano wpływ możliwych wariantów związanych z działaniem czynników zewnętrznych (zmiany klimatu, zmiana sterowania zbiornikiem Siemianówka) oraz wewnętrznych (zmiany roślinności w NPN) na długookresowe zmiany tego bilansu. Wyniki wskazywały na dominujący wpływ czynnika klimatycznego, co przedstawiono w późniejszej publikacji naukowej [26]. Badania nad wpływem zmian klimatu na hydrologiczne aspekty funkcjonowania mokradeł były kontynuowane w skali makro (dorzecza Odry i Wisły) w ramach polsko-norweskiego projektu CHASE-PL [38]. Obecnie jest realizowana w SGGW praca doktorska poświęcona tym zagadnieniom, w której pełnię funkcję promotora pomocniczego (patrz Zał. 3K).

Kończąc wątek badań ekohydrologicznych, chciałbym zwrócić uwagę na publikację, którą uważam za najistotniejszą w tej grupie, dotyczącą roli susz hydrologicznych i powodzi w kształtowaniu wybranych wskaźników biologicznych kwantyfikujących stan ryb i bezkręgowców [21]. Publikacja ta była owocem mojego udziału w europejskim projekcie REFORM oraz kontynuowanej współpracy z CEH. W pracy w sposób systematyczny przeszukano naukowe bazy danych pod kątem znalezienia artykułów opisujących w sposób ilościowy wpływ hydrologicznych zdarzeń ekstremalnych na ryby i bezkręgowce w rzekach Europy. Porównano reakcje ryb i bezkręgowców na zdarzenia danego typu (susza lub powódź), a także różnice między odpowiedzią biot na susze i powodzie. Badania te można uznać za pionierskie, co znalazło odzwierciedlenie w prestiżowej Nagrodzie Publikacyjnej im. Ignacia Rodriguez-Iturbe przyznanej zespołowi autorskiemu przez redakcję periodyku *Ecohydrology* (IF 2,852) za najlepszy artykuł naukowy opublikowany w tym czasopiśmie w roku 2017.

Analizując mój dorobek dotyczący drugiego z dodatkowych wątków badań (rolnictwo), można zauważyć, że początkowo moje prace dotyczyły przede wszystkim oceny efektywności działań ochronnych mających za zadanie redukcję zanieczyszczeń obszarowych azotem i fosforem w zlewniach o charakterze rolniczym, tj. zlewnia Redy czy zlewnia Pilicy. Wśród analizowanych działań ochronnych były: unikanie nawożenia w obszarach wysokiego ryzyka, stosowanie okrywy gleb w sezonie jesienno-zimowym (poplony), konstrukcja stref buforowych oraz konstrukcja sztucznych mokradeł. W przypadku zlewni Redy opracowano również – częściowo w ramach projektu Baltic COMPASS – dwa scenariusze przyszłego rozwoju rolnictwa w zlewni: jeden bazujący na ekstrapolacji historycznych trendów, a drugi oparty na założeniu silnej intensyfikacji rolnictwa na wzór zachodni [18]. W przypadku zlewni Pilicy skupiono się na strefach buforowych (ekotonowych), dla których dysponowano pomiarami terenowymi w kilku transektach w zlewni, wykonywanymi przez pracowników Europejskiego Regionalnego Centrum Ekohydrologii Polskiej Akademii Nauk (ERCE PAN) pod auspicjami UNESCO [19]. Do kwantyfikacji opracowanych scenariuszy oraz oszacowania efektywności działań ochronnych w obu zlewniach wykorzystano opracowany we wcześniejszych pracach [20,49] model SWAT. Opracowane wyniki miały duże znaczenie praktyczne, m.in. posłużyły do opracowania programu działań mających na celu ograniczenie zanieczyszczeń obszarowych w zlewni Pilicy przez Regionalny Zarząd Gospodarki Wodnej w Warszawie.

Drugim aspektem rolniczego nurtu moich badań był temat modelowania zjawiska suszy rolniczej. Model SWAT dla obszaru DOW, opracowany w ramach projektu CHASE-PL, wykorzystano do symulacji występowania ekstremalnie niskich stanów uwilgotnienia gleb pod głównymi rodzajami upraw jarych w Polsce: zbożami jarymi, ziemniakami i kukurydzą [39]. Symulacje zweryfikowano w oparciu o tzw. indeksy pogodowe plonu obliczone przez współpracowników z Instytutu Upraw Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowego Instytutu Badawczego w Puławach. Opracowano również projekcje występowania suszy glebowej w bliskiej przyszłości według scenariuszy RCP4.5 i 8.5.

Ostatnim przykładem pochodzącym z rolniczego wątku moich badań był artykuł dotyczący wpływu zmian klimatu na terminy siewu i zbioru jęczmienia jarego i kukurydzy w Polsce [24]. W pracy wykorzystano projekcje zmian klimatu opracowane w ramach projektu CHASE-PL. Do oceny zmian terminu siewu i zbioru wykorzystano metodę sum temperatur efektywnych zaimplementowaną w uproszczonej wersji modelu EPIC stanowiącego komponent wzrostu roślin w modelu SWAT. Model został pozytywnie zweryfikowany pod kątem odtworzenia czasowo-przestrzennej zmienności terminów siewu i zbioru jęczmienia i kukurydzy w okresie historycznym.

6. Podsumowanie dorobku

6.1. Działalność naukowo-badawcza

Podsumowując moją listę osiągnięć naukowo-badawczych, stwierdzam, że w latach 2008-2018 byłem autorem lub współautorem 51 publikacji naukowych, których łączna liczba punktów według kryteriów MNiSW wynosi 933. W 25 pracach byłem pierwszym autorem. Aż 43 spośród 51 prac wartych w sumie 853 punktów zostało opublikowanych po uzyskaniu stopnia doktora (listopad 2012). Publikacje ujęte w *Web of Science Core Collection* stanowią przeszło połowę mojego dorobku publikacyjnego w sensie liczbowym i przeszło 90% w sensie punktowym (Tabela 1). Analizując wybrane wskaźniki bibliometryczne według bazy *Web of Science* (Tabela 2), chciałbym stwierdzić, że wartość indeksu Hirscha wynosi obecnie 7, i ma silny potencjał wzrostowy. Łączna liczba cytowań moich prac wg *Web of Science* wynosi 154 (z czego 90 bez autocytań), a sumaryczny *Impact Factor* ma wartość 60,489. Wyniki moich badań zostały przedstawione na konferencjach naukowych w formie 29 referatów lub posterów (z czego 23 o zasięgu międzynarodowym; patrz Zał. 3L).

Tabela 1 Podsumowanie działalności publikacyjnej (wg stanu na lipiec 2018).

Rodzaj publikacji	Liczba ogółem	Liczba po uzyskaniu stopnia doktora	Punkty MNiSW ogółem	Punkty MNiSW po uzyskaniu stopnia doktora
Publikacje ujęte w <i>Web of Science Core Collection</i>	28 (30)*	24 (26)	794	730
Publikacje w pozostałych czasopismach	5	3	39	28
Monografie	1	0	25	25
Rozdziały w monografiach (język angielski)	9	8	45	40
Rozdziały w monografiach (język polski)	6	6	30	30
Suma	49 (51)	41 (43)	933	853

* Uwzględniając prace opublikowane w roku 2018, ale nie ujęte do dnia 29.06.2018 w *Web of Science Core Collection*.

Tabela 2 Wykaz wskaźników bibliometrycznych autora według bazy *Web of Science Core Collection* (wg stanu na lipiec 2018).

Wskaźnik	Wartość
Liczba publikacji	28
w tym indeksowane w:	
- Science Citation Index Expanded (SCIE)	24
- Emerging Sources Citation Index (ESCI)	1
- Book Science Citation Index (BSCI)	2
- Conference Proceedings Citation Index (CPCI)	1
Liczba prac opublikowanych lub przyjętych do druku w roku 2018, nie ujętych do dnia 31.07.2018 w <i>Web of Science Core Collection</i>	2
Liczba cytowań	154
w tym:	
- bez autocytań	90
Indeks Hirscha	7
Sumaryczny Impact Factor	60,489

6.2. Działalność dydaktyczna i popularyzatorska

W okresie mojej pracy zawodowej w SGGW prowadziłem zajęcia dydaktyczne z 10 przedmiotów realizowanych na 3 kierunkach (patrz Zał. 3I):

- Hydrologia Inżynierska, Hydrologia inżynierska 2, Systemy geoinformacyjne na kierunku Budownictwo (studia I stopnia);
- Hydrologia I, Hydrologia II, Informatyczne Podstawy Projektowania, Systemy Informacji Przestrzennej na kierunku Inżynieria Środowiska (studia I stopnia) oraz Modelowanie zasobów wodnych i Modelowanie w hydrologii (studia II stopnia);
- Geoinformacja w ochronie środowiska na kierunku Ochrona Środowiska (studia I stopnia).

Jestem koordynatorem przedmiotów: Modelowanie zasobów wodnych (kierunek Inżynieria Środowiska, studia II stopnia) oraz Modelowanie zanieczyszczeń obszarowych (kierunek Inżynieria i Gospodarka Wodna, studia II stopnia). Jestem autorem sylabusów do obu tych przedmiotów oraz współautorem sylabusu do przedmiotu Planowanie w gospodarce wodnej (kierunek Inżynieria i Gospodarka Wodna, studia II stopnia).

W latach 2013 i 2015 byłem opiekunem dwóch prac magisterskich zrealizowanych na kierunku Ochrona Środowiska (Zał. 3J). Pierwsza z tych prac autorstwa mgr Mateusza Szcześniaka została wyróżniona w 2014 roku I nagrodą w VI edycji Konkursu im. Kazimierza Dębskiego na najlepszą pracę dyplomową z hydrologii organizowanym przez Stowarzyszenie Hydrologów Polskich. Obecnie jestem opiekunem jednej pracy magisterskiej realizowanej na kierunku Ochrona Środowiska. W roku 2018 pełniłem funkcję recenzenta zewnętrznego w pracy dyplomowej (poziom Master) zrealizowanej na kierunku Geospatial Information Science na Flinders University w Australii.

W ramach działalności popularyzatorskiej, byłem autorem dwóch wykładów popularno-naukowych: w roku 2010 r. w ramach Wszechnicy Absolwentów I Liceum Ogólnokształcącego im. Jana Kasprowicza w Inowrocławiu; w roku 2013 w trakcie konferencji „GIS Day – GIS w Stolicy Człowiek – Środowisko – Technika”.

W roku 2013 przeprowadziłem dwa wykłady szkoleniowe: pierwszy podczas szkolenia specjalistycznego dla pracowników Łódzkiego Ośrodka Doradztwa Rolniczego pt.: „Strefy buforowe i inne działania dla ograniczenia zanieczyszczeń obszarowych z terenów rolniczych”; drugi podczas XXIII Ogólnopolskiej Szkoły Gospodarki Wodnej „Modelowanie w planowaniu i zarządzaniu zasobami wodnymi”.

Dwukrotnie brałem udział w dyskusjach panelowych związanych z wydarzeniami naukowymi: po raz pierwszy podczas konferencji „French-German-Polish Conference Water and Climate Change” w 2015 r. w Lipsku, gdzie tematem dyskusji była ochrona zasobów wodnych przed oddziaływaniem zmian klimatu; po raz drugi w trakcie warsztatów „CLIPC final demonstration and evaluation workshop” w 2016 r. w Brukseli, gdzie tematem przewodnim były perspektywy dalszego rozwoju usług *climate services* w Europie.

W ramach polsko-norweskiego projektu CHASE-PL byłem zaangażowany w opiekę merytoryczną nad powstaniem pierwszego polskiego interaktywnego serwisu mapowego (geoportala) dotyczącego zmian klimatu: <http://climateimpact.sggw.pl>. Jednym z celów opracowania tego serwisu była chęć upublicznienia wiarygodnych danych dotyczących obserwacji, projekcji i oddziaływań zmian klimatycznych w Polsce. Portal został nagrodzony drugim miejscem w konkursie na Internetową Mapę Roku 2016/2017 przez Stowarzyszenie Kartografów Polskich.

6.3. Działalność organizacyjna

Znaczna część mojej działalności organizacyjnej w okresie zatrudnienia w SGGW polegała na organizacji różnego rodzaju wydarzeń naukowych: konferencji, seminariów, warsztatów i szkoleń. Wraz z dr hab. Jarosławem Chormańskim, prof. SGGW oraz prof. Raghavanem Srinivasanem z Texas A&M University organizowałem cztery edycje międzynarodowych warsztatów Central Eastern European SWAT Workshop w latach 2011, 2014, 2015 i 2016. W warsztatach tych wzięło udział łącznie ok. 100 osób i można powiedzieć że wydarzenia te przyczyniły się wydatnie do podniesienia

kwalifikacji w dziedzinie modelowania hydrologicznego wielu młodych naukowców i praktyków z Europy Środkowo-Wschodniej. Ponadto w latach 2015 i 2016 organizowałem międzynarodowe seminaria naukowe Central Eastern European SWAT User Seminar. W roku 2017 byłem współprzewodniczącym komitetu organizacyjnego międzynarodowej konferencji naukowej 2017 International SWAT Conference, która odbyła się w Warszawie i zgromadziła przeszło 160 uczestników z ponad 40 krajów. W roku 2018 byłem z kolei organizatorem szkolenia Collaboration for Environmental Evidence (CEE) Systematic Review Methodology Course, które zostało zorganizowane w ramach projektu BONUS RETURN.

Przed uzyskaniem stopnia doktora, w roku 2009 pełniłem funkcję organizatora warsztatów „The Red Bog Project International Workshop” zorganizowanych w ramach projektu Czerwone Bagno. Z kolei w roku 2010 byłem sekretarzem naukowym warsztatów „Modelowanie procesów hydrologicznych w zlewni Narwi” zorganizowanych w ramach projektu SCENES przez Zakład Hydrologii i Zasobów Wodnych SGGW i Instytut Geofizyki PAN. W tym samym roku brałem również udział w pracach komitetu organizacyjnego pierwszego Krajowego Kongresu Hydrologicznego, w którym wzięło udział ponad 200 osób.

Moja działalność organizacyjna na Wydziale Budownictwa i Inżynierii Środowiska SGGW polegała m.in. na członkostwie w Komisji ds. Rozwoju w latach 2012-2016, gdzie pełniłem funkcję sekretarza zespołu ds. strategii i kierunków rozwoju wydziału. W roku 2013 brałem natomiast udział w pracach komisji konkursowej do oceny wniosków w ramach dotacji celowej MNiSW na prowadzenie w 2013 r. badań naukowych lub prac rozwojowych oraz zadań z nimi związanych służących rozwojowi młodych naukowców oraz uczestników studiów doktoranckich, finansowanych w wewnętrznym trybie konkursowym.

W roku 2011 byłem członkiem European Geosciences Union (EGU), a od 2018 r. jestem członkiem International Association of Hydrological Sciences (IAHS).

