INSPEKCJA OCHRONY ŚRODOWISKA

ZINTEGROWANY MONITORING ŚRODOWISKA PRZYRODNICZEGO

Współczesne przemiany naturalne i antropogeniczne środowiska przyrodniczego zlewni rzecznych i jeziornych

Biblioteka Monitoringu Środowiska
Vol. XXXII
Poznań 2022

Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu
Stacja Bazowa Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego „Parsęta”
Centrum Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego UAM
Główny Inspektorat Ochrony Środowiska

ZINTEGROWANY MONITORING ŚRODOWISKA PRZYRODNICZEGO

WSPÓŁCZESNE PRZEMIANY NATURALNE I ANTROPOGENICZNE ŚRODOWISKA PRZYRODNICZEGO ZLEWNI RZECZNYCH I JEZIORNYCH

pod redakcją
Andrzeja Kostrzewskiego, Józefa Szpikowskiego
i Mikołaja Majewskiego

Vol. XXXII

Biblioteka Monitoringu Środowiska
Storkowo 2022

Redaktor serii: Andrzej Kostrzewski

Redaktorzy tomu: Andrzej Kostrzewski, Józef Szpikowski, Mikołaj Majewski

Recenzenci:
prof. dr hab. Janina Borysiak
prof. UAM dr hab. Julian Chmiel
prof. IGiPZ PAN dr hab. Małgorzata Kijowska-Strugała
prof. UAM dr hab. Maciej Major
prof. dr hab. inż. Marek Marciniak
prof. UAM dr hab. Jacek Tylkowski

Fotografie na okładce i wewnątrz tomu: archiwum Stacji Geoekologicznej UAM w Storkowie

© Copyright by Stacja Geoekologiczna UAM w Storkowie 2022

Wydanie I

ISBN 978-83-7986-448-5

Przygotowanie publikacji:
Bogucki Wydawnictwo Naukowe
ul. Górna Wilda 90, 61-576 Poznań
e-mail: biuro@bogucki.com.pl

Spis treści

Przedmowa 7

Założenia metodologiczne i metodyczne realizacji programu Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego 13

Andrzej Kostrzewski
Koncepcja organizacji i realizacji programu Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego w latach 1992–2022 14

Monika Okońska, Marek Marciniak
Modelowanie migracji znacznika w warstwie wodonośnej na podstawie doświadczenia terenowego 25

Małgorzata Jóźwiak
Rozwój soraliów wargowych w plechach porostu *Hypogymnia physodes* eksponowanych na zanieczyszczenia w obszarach o zróżnicowanej antropopresji 40

Janina Borysiak, Małgorzata Stępniewska
Fitoindykatory siedlisk przyrodniczych Natura 2000 jako miejsc koncentracji wiązki usług ekosystemów w dolinie rzeki Dębnicy (Pomorze Zachodnie) 48

Andrzej Kostrzewski, Marek Marciniak, Józef Szpikowski, Mikołaj Majewski, Tomasz Szeląg
Założenia i realizacja problematyki monitoringu środowiska przyrodniczego w dydaktyce uniwersyteckiej 59

Robert Kruszyk
Wybrane procedury kontroli jakości danych pomiarowych w programie ZMŚP na poziomie Centralnej Bazy Danych 72

Realizacja programu Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego w zlewniach eksperymentalnych 85

Józef Szpikowski, Andrzej Kostrzewski, Grażyna Szpikowska, Monika Domańska
Klimatyczne i hydrologiczne zagrożenia i trendy zmian środowiska geograficznego zlewni górnej Parsęty na podstawie badań w ramach Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego 86

Józef Szpikowski, Grażyna Szpikowska, Monika Domańska
Zjawiska ekstremalne w zlewni górnej Parsęty i ich wpływ na funkcjonowanie środowiska geograficznego 100

Janina Borysiak, Monika Domańska, Józef Szpikowski
Geobotaniczne aspekty występowania kenofitów w zlewni górnej Parsęty (Pomorze Zachodnie) 120

Adam Olszewski, Anna Andrzejewska, Agnieszka Gutkowska
Wpływ warunków pogodowych na defoliację sosny zwyczajnej i olszy czarnej w zlewni badawczej Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego Kampinos (Kampinoski Park Narodowy) 133

Maciej Major, Maria Chudzińska, Mikołaj Majewski
Obieg materii rozpuszczonej w zlewni Różanego Strumienia w Poznaniu w roku hydrologicznym 2021 148

Aleksandra Czuchaj, Mikołaj Majewski, Marek Marciniak
Koncepcja stanowiska do badań spływu powierzchniowego i spłukiwania w zlewni Różanego Strumienia 163

Marek Jóźwiak, Małgorzata Jóźwiak
Ocena stanu środowiska przyrodniczego w centralnej części Gór Świętokrzyskich – podsumowanie 26 lat działalności Stacji Bazowej ZMŚP Łysogóry 180

Mariusz Klimek, Paweł Krzaklewski, Anita Bokwa
Zmienność warunków termicznych i opadowych na Stacji Bazowej ZMŚP Pogórze Karpackie w latach 1991–2020 w perspektywie zmiany klimatu . 192

Monitoring w zróżnicowanych warunkach środowiska przyrodniczego 205

Janina Borysiak, Małgorzata Stępniewska
Florystyczna różnorodność przesłanką rewaloryzacji poniemieckich cmentarzy dorzecza Parsęty (Pomorze Zachodnie) i ich kulturowych usług ekosystemowych 206

Janina Borysiak
Adaptacyjne strategie roślin naczyniowych klifu wybrzeża Bałtyku Południowego w Wolińskim Parku Narodowym 216

Andrzej Kostrzewski, Grzegorz Rachlewicz
Monitoring środowiska przyrodniczego strefy polarnej – założenia i organizacja 228

Funkcjonowanie Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego w latach 1992–2022 238

Contents

Foreword 7

Methodological assumptions and research methods for the implementation of the Integrated Monitoring of the Natural Environment program 13

Andrzej Kostrzewski
The concept of organization and implementation of the Integrated Monitoring of the Natural Environment program in the years 1992–2022 14

Monika Okońska, Marek Marciniak
Modelling tracer transport in an aquifer based on a field experiment 25

Małgorzata Jóźwiak
Development of labial soralia in the thallus of the lichen *Hypogymnia physodes* exposed to pollution in areas with different anthropopressure . . 40

Janina Borysiak, Małgorzata Stępniewska
Phytoindicators of Natura 2000 natural habitats as places of concentration of ecosystem services in the Dębnica River valley (Western Pomerania) 48

Andrzej Kostrzewski, Marek Marciniak, Józef Szpikowski, Mikołaj Majewski, Tomasz Szeląg
Assumptions and implementation of the issues of monitoring the natural environment in university didactics 59

Robert Kruszyk
Selected procedures for quality control of measurement data in the IMNE programme at Central Data Base level 72

Implementation of the Integrated Monitoring of the Natural Environment program in experimental catchments 85

Józef Szpikowski, Andrzej Kostrzewski, Grażyna Szpikowska, Monika Domańska
Climatic and hydrological threats and trends of changes in the geographical environment of the upper Parsęta catchment basing on the Integrated Monitoring of the Natural Environment 86

Józef Szpikowski, Grażyna Szpikowska, Monika Domańska
Extreme phenomena in the upper Parsęta catchment and their impact on the functioning of the geographical environment 100

Janina Borysiak, Monika Domańska, Józef Szpikowski
Geobotanical aspects of the occurrence of kenophytes in the upper Parsęta catchment (Western Pomerania) 120

Adam Olszewski, Anna Andrzejewska, Agnieszka Gutkowska
The influence of climatic conditions on the defoliation of Scots pine and black alder in the Integrated Monitoring of the Natural Environment catchment in Kampinos (Kampinoski National Park) 133

Maciej Major, Maria Chudzińska, Mikołaj Majewski
Cycling of dissolved matter in the Różany Strumień catchment in Poznań in the 2021 hydrological year 148

Aleksandra Czuchaj, Mikołaj Majewski, Marek Marciniak
The concept of surface runoff and soil loss testing plot in the Różany Strumień catchment 163

Marek Jóźwiak, Małgorzata Jóźwiak
Assessment of the natural environment condition in the central part of the Świętokrzyskie Mountains – a summary of 26 years of activity of the Łysogóry Monitoring Base Station 180

Mariusz Klimek, Paweł Krzaklewski, Anita Bokwa
Variability of thermal and precipitation conditions at the IMNE Base Station Pogórze Karpackie in the years 1991–2020 in the perspective of climate change 192

Monitoring in various natural environment conditions 205

Janina Borysiak, Małgorzata Stępniewska
Floristic diversity as a premise for the revalorization of post-German cemeteries of the Parsęta River basin (Western Pomerania) and their cultural ecosystem services 206

Janina Borysiak
Adaptive strategies of vascular plants of the South Baltic coast cliff in the Wolin National Park 216

Andrzej Kostrzewski, Grzegorz Rachlewicz
Monitoring of the natural environment of the polar zone – assumptions and organization 228

Functioning of the Integrated Monitoring of the Natural Environment in the years 1992–2022 238

Przedmowa

Foreword

30 lat funkcjonowania Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego

Obserwowane zmiany klimatu i narastająca różnokierunkowa antropopresja mają znaczący wpływ na aktualny stan i przemiany środowiska przyrodniczego Polski. Zmiany obejmują poszczególne elementy środowiska przyrodniczego, m.in.: rzeźbę terenu, warunki pogodowe, wody powierzchniowe i podziemne, gleby i roślinność, jak również poszczególne geoekosystemy i ich zróżnicowanie przestrzenne. Takie spojrzenie na przeobrażenia środowiskowe musi opierać się na wieloletnich danych pomiarowych, uzyskanych w ramach zorganizowanego, planowego monitoringu środowiska przyrodniczego. Powyższe funkcje realizuje Państwowy Monitoring Środowiska i jego podsystemy. Doskonalenie metod kompleksowych badań współczesnych geoekosystemów w zakresie ich aktualnego stanu, zachodzących przemian i zagrożeń jest podstawowym zadaniem Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego (ZMŚP) jako podsystemu Państwowego Monitoringu Środowiska.

Powołanie Państwowego Monitoringu Środowiska w Polsce ustawą o Państwowej Inspekcji Środowiska z dnia 20 lipca 1991 r. było wydarzeniem o znaczeniu historycznym, uregulowano organizację i realizację monitoringu środowiska przyrodniczego. Należy podkreślić duży wkład pracy, inicjatywę, zaangażowanie i konsultacje ze środowiskiem naukowym ówczesnego Ministra Ochrony Środowiska, Zasobów Naturalnych i Leśnictwa prof. dr. hab. Stefana Kozłowskiego oraz Głównego Inspektora Ochrony Środowiska mgr. inż. Andrzeja Walewskiego. Koncepcja Państwowego Monitoringu Środowiska, jego struktura i zadania, dyskutowana była w ramach Komitetu Naukowego „Człowiek i Środowisko" przy prezydium PAN, co potwierdzone zostało licznymi publikacjami. Ważnym nurtem dyskusji było wprowadzenie kompleksowego monitoringu środowiska przyrodniczego, obok przyjętych w PMŚ monitoringów specjalistycznych. Wyrazem powyższych dyskusji była przedstawiona przez A. Kostrzewskiego koncepcja Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego, która w oparciu o postępowanie konkursowe, została zatwierdzona zarządzeniem Głównego Inspektora Ochrony Środowiska z dnia 11 maja 1992 r.

Tak więc mija 30 lat działalności Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego, czego efektem są uzyskane wieloletnie serie pomiarowe reprezentatywnych dla krajobrazu Polski geoekosystemów rzecznych i jeziornych. Realizowany program ZMŚP oparty jest na przyjętej koncepcji funkcjonowania geoekosystemu, zarówno w zakresie założeń metodologicznych, jak i metodycznych. Takie postępowanie badawcze umożliwia kompleksową ocenę stanu i przemian środowiska przyrodniczego geoekosystemów w różnych skalach czasowych i przestrzennych. Opracowanie corocznych raportów dotyczących stanu i przemian środowiska przyrodniczego pozwoliło na lepsze rozpoznanie prawidłowości, zagrożeń i rozwoju wybranych geoekosystemów na obszarze Polski.

Program ZMŚP w 2017 r. został włączony do programu europejskiego ICP Integrated Monitoring (Integrated Cooperative Programme on Integrated Monitoring on Air Pollution Effects, ICP/IM). Przyjęcie ZMŚP do programu Integrated Monitoring nakłada specjalne wymogi i zobowiązania w zakresie stosowanych metod badawczych (terenowych i laboratoryjnych) w celu uzyskania wiarygodnych, porównywalnych serii obserwacyjnych. Sytuacja taka daje możliwość porównania uzyskanych obserwacji w zakresie funkcjonowania środowiska przyrodniczego monitorowanych geoekosystemów w Polsce z innymi stacjami europejskimi. Niewątpliwie jest to nowa wartość w dziedzinie interpretacji, stanu i przemian środowiska przyrodniczego Polski na tle przemian kontynentalnych.

Sprawą pierwszorzędnej wagi w realizacji programu ZMŚP jest uwzględnienie nowych osiągnięć merytorycznych nauk przyrodniczych. W badaniach środowiskowych chodzi przede wszystkim o doskonalenie metod badań i kompleksowej oceny stanu i przemian środowiska przyrodniczego z przeznaczeniem dla celów naukowych i praktycznych. Informowanie społeczeństwa o aktualnym stanie środowiska i jego zagrożeniach stanowi priorytet badań monitoringowych. Konieczne jest zwiększenie współpracy z ośrodkami naukowymi, samorządami, oddziałami GIOŚ, wojewódzkimi inspektoratami ochrony środowiska, regionalnymi dyrekcjami ochrony środowiska i innymi instytucjami i szkołami w celu upowszechnienia wyników ZMŚP.

30. Sympozjum Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego „Współczesne przemiany naturalne i antropogeniczne środowiska przyrodniczego zlewni rzecznych i jeziornych" odbyło się w dniach 8–10 czerwca 2022 r. w szczególnych okolicznościach, a mianowicie:

- realizujemy program w okresie zmian organizacji i zarządzania Inspekcji Ochrony Środowiska,
- podsumowujemy 30 lat funkcjonowania programu Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego,
- organizator 30. Sympozjum Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego, Stacja Geoekologiczna w Storkowie, obchodzi 40-lecie działalności,
- Stacja Terenowa Instytutu Geografii i Gospodarki UJ wprowadzona została do sieci ZMŚP pod nazwą Stacja Bazowa ZMŚP Pogórze Karpackie,

- upowszechniamy wyniki ZMŚP w formie corocznych raportów o stanie środowiska przyrodniczego Polski w artykułach i wydaniach książkowych, a także w trakcie organizowanych sympozjów, seminariów i szkoleń ZMŚP,
- rozwijamy współpracę krajową i zagraniczną.

Działalność w zakresie realizacji programu ZMŚP możliwa jest dzięki zawieranym umowom z Głównym Inspektoratem Ochrony Środowiska w ramach Centrum ZMŚP UAM, co umożliwia, przy wsparciu jednostek macierzystych, funkcjonowanie Stacji Bazowych ZMŚP.

Pragnę serdecznie podziękować głównemu inspektorowi ochrony środowiska mgr. Michałowi Mistrzakowi, zastępcy głównego inspektora ochrony środowiska mgr inż. Magdzie Gosk, a także byłym głównym inspektorom ochrony środowiska: mgr. inż. Andrzejowi Walewskiemu, dr. Andrzejowi Jagusiewiczowi, dr. Markowi Haliniakowi, mgr. Pawłowi Ciećko, z kolei dyrektor Departamentu Monitoringu Środowiska mgr Annie Katarzynie Wiech, mgr Barbarze Albiniak, a szczególnie mgr Hannie Kasprowicz za wieloletnią, nieocenioną współpracę. Dziękuję za pomoc i współpracę kierownikom i zespołom pracowników Stacji Bazowych ZMŚP, ekspertom, sekretarzom naukowym (prof. dr hab. Zbigniew Zwoliński, dr Robert Kolander, prof. UAM dr hab. Małgorzata Mazurek, dr Robert Kruszyk, prof. UAM dr hab. Maciej Major, prof. UAM dr hab. Józef Szpikowski, prof. UAM dr hab. Jacek Tylkowski, dr Mikołaj Majewski) i sekretarzom administracyjnym (mgr Grażyna Gałążewska, mgr Marta Sajkowska, mgr Zuzanna Woźniewicz-Szcześniak, lic. Tomasz Szeląg) oraz dr. Robertowi Kruszykowi za wzorowe prowadzenie Centralnej Bazy Danych ZMŚP. Bardzo serdecznie dziękuję za pomoc i ocenę naszej działalności Radzie Programowej Centrum ZMŚP i zespołowi Centrum ZMŚP. Dziękuję kierownikowi Stacji Bazowej ZMŚP Parsęta prof. UAM dr. hab. Józefowi Szpikowskiemu za przygotowanie 30. Sympozjum ZMŚP.

Przekazuję również podziękowania współorganizatorom 30. Sympozjum ZMŚP: mgr inż. Magdzie Gosk – zastępcy głównego inspektora ochrony środowiska, prof. dr. hab. Markowi Degórskiemu – przewodniczącemu Komitetu Nauk Geograficznych PAN, mgr. Łukaszowi Maciejunasowi – dyrektorowi Regionalnej Dyrekcji Lasów Państwowych w Szczecinku, prof. UMK dr. hab. Piotrowi Weckwerthowi – prezesowi Stowarzyszenia Geomorfologów Polskich. Dziękuję prof. dr. hab. Mariuszowi Lamentowiczowi z Pracowni Ekologii Zmian Klimatu Wydziału Nauk Geograficznych i Geologicznych UAM za objaśnienia podczas sesji terenowej i inż. Jackowi Gorskiemu z firmy Geomor-Technik za pomoc organizacyjną i prezentację sprzętu pomiarowego.

Na koniec wyrażam wdzięczność i podziękowanie J.M. Rektor UAM prof. dr hab. Bogumile Kaniewskiej, prorektorowi UAM prof. dr. hab. Przemysławowi Wojtaszkowi oraz dziekanowi WNGiG UAM prof. dr. hab. Grzegorzowi Rachlewiczowi za pomoc w funkcjonowaniu Centrum Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego UAM.

Wyrażam przekonanie, że 30. Sympozjum ZMŚP będzie kolejną możliwością zapoznania się z aktualnym stanem organizacyjnym i merytorycznym ZMŚP, osiągniętymi efektami monitoringu, a także dyskusji dotyczących dalszego funkcjonowania ZMŚP. Zobowiązani jesteśmy sprostać wymogom organizacyjnym

i merytorycznym – stawianym ZMŚP – umocnić indywidualność merytoryczną i organizacyjną ZMŚP w Państwowym Monitoringu Środowiska, a przede wszystkim zabezpieczyć ciągłość realizacji programu ZMŚP.

Koordynator Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego
prof. dr hab. Andrzej Kostrzewski

40 lat pracy Stacji Geoekologicznej UAM w Storkowie

Stacja Geoekologiczna w Storkowie Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu jest jednym z nielicznych w Polsce przykładów terenowych geograficznych placówek badawczych działających przez kilka dziesięcioleci. W przypadku Stacji w Storkowie jest to już ponad 40 lat, ponieważ za oficjalną datę jej utworzenia uznaje się dzień 1 kwietnia 1981 r. Celem utworzenia terenowej placówki badawczej było zintensyfikowanie i udoskonalenie badań współczesnych procesów morfogenetycznych realizowanych przez prof. Andrzeja Kostrzewskiego na Pomorzu Zachodnim już od lat 70. XX w.

Założenia metodologiczne i metodyczne opracowane przez prof. Andrzeja Kostrzewskiego dla zlewni nizinnych klimatu umiarkowanego stały się podstawą głównego problemu badawczego realizowanego w Storkowie i aktualnego do dziś, który brzmi: funkcjonowanie geoekosystemu zlewni górnej Parsęty w warunkach zmian klimatu i różnokierunkowej antropopresji. Podstawowy poligon badawczy, zlewnię górnej Parsęty o powierzchni 74 km^2, zamkniętą profilem wodowskazowym obok Stacji w Storkowie, uznajemy za geoekosystem reprezentujący środowisko geograficzne Pojezierza Drawskiego, a w szerszym zakresie obszar młodoglacjalny Polski północno-zachodniej. Zakres działalności Stacji w ramach głównego celu badań wzrastał wraz z powiększaniem się zespołu i realizacją indywidualnych zadań badawczych.

Metodyczną podstawą funkcjonowania Stacji w Storkowie jest system pomiarowy, w którego skład wchodzą terenowe urządzenia pomiarowe i specjalistyczne laboratoria. Już w pierwszych latach uruchomiono laboratorium hydrochemiczne oraz zaplecze noclegowe dla pracowników i studentów realizujących prace dyplomowe i ćwiczenia terenowe. Od roku 1986 prowadzone są nieprzerwane, systematyczne obserwacje meteorologiczne i hydrologiczne. Stopniowo, wraz z uporządkowaniem spraw własnościowych i pozyskiwaniem środków finansowych, poprawiało się zaplecze laboratoryjno-mieszkalne oraz stan aparatury terenowej i laboratoryjnej. Bardzo dobrze na pracę Stacji Geoekologicznej w Storkowie wpływa stabilność zatrudnienia. Pracuje w niej na stałych etatach 5 osób: prof. UAM dr hab. Józef Szpikowski (kierownik Stacji, od roku 1986), dr Grażyna Szpikowska (chemik, główny specjalista, od roku 1992), mgr Monika Domańska (biolog, starszy specjalista, od roku 2000), Małgorzata Matysiak (pracownik gospodarczy, od roku 2001) i Andrzej Grzegorski (konserwator, od roku 1987).

W oparciu o zaplecze Stacji Geoekologicznej w Storkowie realizowano liczne badania, m.in.:

- aktualny stan i funkcjonowanie środowiska przyrodniczego na wybranych obszarach Pomorza Zachodniego w warunkach zmian klimatu i narastającej antropopresji – program podstawowy Stacji,
- dynamika transportu fluwialnego zlewni górnej Parsęty,
- erozja boczna Parsęty w wieloletnim cyklu obserwacyjnym,
- erozja wodna gleb w oparciu o badania na powierzchniach testowych,
- dynamika i uwarunkowania procesów eolicznych i niweo-eolicznych,
- antropogeniczne przekształcenia rzeźby terenu na Pomorzu Zachodnim,
- wpływ antropopresji na funkcjonowanie zbiorników jeziornych i ich otoczenia na Pojezierzu Drawskim i Szczecineckim,
- hydromorfologia obszarów źródliskowych dorzecza Parsęty,
- uwarunkowania i zmienność denudacji chemicznej w zlewniach młodoglacjalnych różnej wielkości,
- transformacja cech fizykochemicznych wody w profilu atmosfera–strefa aeracji–strefa saturacji,
- postglacjalna ewolucja form erozyjno-denudacyjnych w strefach krawędziowych Pojezierza Drawskiego,
- uwarunkowania fizycznogeograficzne funkcjonowania obszarów bezodpływowych w geoekosystemach młodoglacjalnych dorzecza Parsęty,
- zmiany właściwości fizykochemicznych wód opadowych w geoekosystemie leśnym i ich wpływ na przebieg i natężenie ługowania podłoża,
- zmiany pokrycia terenu i użytkowania ziemi w zlewni górnej Parsęty.

W ramach realizowanych badań zostały dotychczas zebrane materiały, które dały podstawę do 11 rozpraw doktorskich i 4 rozpraw habilitacyjnych oraz kilkuset studenckich prac dyplomowych. Stacja w Storkowie systematycznie przyjmuje wycieczki młodzieży szkolnej w ramach terenowych lekcji przyrody.

Współpracujemy z Regionalną Dyrekcją Ochrony Środowiska w Szczecinie, m.in. poprzez włączenie się do projektu LIFE „Czynna ochrona siedlisk włosieniczników i udrożnienie korytarza ekologicznego zlewni rzeki Drawy w Polsce". Efektem projektu była m.in. udana introdukcja w zlewni Chwalimskiego Potoku krytycznie zagrożonej w Polsce rdestniczki gęstej *Groenlandia densa*. W ramach współpracy z RDOŚ wykonano również dokumentację, powołanego oficjalnie w roku 2022, rezerwatu przyrody „Źródliska Biegały".

Stacja w Storkowie zorganizowała w latach 1995–2009 serię pięciu konferencji naukowych z cyklu „Funkcjonowanie geoekosystemów zlewni rzecznych". Prezentowane tam wyniki badań z całej Polski dotyczyły aktualnego stanu, funkcjonowania oraz tendencji rozwoju dolin rzecznych.

Niewątpliwą cezurą czasową dla Stacji w Storkowie stało się powołanie Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego jako podsystemu Państwowego Monitoringu Środowiska i włączenie do sieci Stacji Bazowych ZMŚP na mocy porozumienia z dnia 29 września 1993 r. między Państwową Inspekcją Ochrony Środowiska a Uniwersytetem im. Adama Mickiewicza. Stacja Geoekologiczna w Storkowie w sieci ZMŚP działa jako Stacja Bazowa Parsęta i reprezentuje

środowisko przyrodnicze strefy młodoglacjalnej Polski. Dostosowała swoje badania i obserwacje do wymogów ZMŚP i realizuje wszystkie wymagane programy pomiarowe oraz program specjalistyczny dotyczący badań erozji wodnej gleb. W roku 2017 Stacja Bazowa Parsęta została włączona do programu europejskiego ICP Integrated Monitoring, a w roku 2018 wyznaczona, wraz ze Stacją Bazową Beskid Niski, do realizacji dyrektywy National Emission Ceilings (NECD) na obszarze Polski.

W Storkowie w roku 1990 i 1991 odbywały się konferencje naukowe, które uznajemy za pierwsze sympozja ZMŚP. Z ustaleń podjętych m.in. na tych konferencjach wyłoniły się podstawowe założenia metodologiczne, organizacyjne i metodyczne systemu Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego. Stacja Bazowa Parsęta była również organizatorem 3. Sympozjum ZMŚP (1992), 4. (1993), 9. (1998), 20. (2011), 25. (2016) i 30. (2022). W Storkowie przeprowadzono też kilka szkoleń dla pracowników Stacji Bazowych ZMŚP: 1. (1992), 5. (1995), 9. (2002) i 18. (2012). Stacja przekazuje dane zbierane w ramach monitoringu do Centralnej Bazy Danych ZMŚP, a na podstawie wyników sporządza coroczne raporty ZMŚP.

Aktualnie Stacja w Storkowie dysponuje zapleczem noclegowym dla 16 osób, które po zakończeniu remontu wzrośnie do 23 miejsc. Poza laboratoriami posiadamy salę konferencyjną dla 80 osób z wyposażeniem multimedialnym, salę seminaryjną dla 20 osób, pracownię komputerową oraz zaplecze kuchenne i socjalne.

40-lecie Stacji w Storkowie jest znakomitą okazją do złożenia serdecznych podziękowań panu prof. dr. hab. Andrzejowi Kostrzewskiemu za powołanie Stacji i opracowanie koncepcji podstawowego profilu badawczego, za prowadzone w dorzeczu Parsęty wcześniejsze i obecne badania naukowe, za merytoryczną opiekę nad pracownikami Stacji, pozyskiwanie środków finansowych i wszelką, nieocenioną pomoc. Wyrażam podziękowanie władzom Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza, władzom Wydziału Nauk Geograficznych i Geologicznych UAM i dyrekcji Instytutu Geoekologii i Geoinformacji UAM za wspieranie Stacji w Storkowie i zapewnienie formalnych i materialnych podstaw jej działania. Bardzo dziękuję kierownictwu Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska, szczególnie pracownikom Departamentu Monitoringu Środowiska i Centralnego Laboratorium Badawczego Oddział w Szczecinie oraz ekspertom ZMŚP wspierającym pracę Stacji Bazowej Parsęta. Serdecznie dziękuję Koleżankom i Kolegom, którzy realizowali i realizują swoje prace w oparciu o Stację w Storkowie, za wieloletnią współpracę, licząc na jej kontynuację i dalsze, owocne efekty. Wyrazy podziękowania składam również Współpracownikom w Storkowie, życząc im i sobie, aby nasze wspólne działania przynosiły jak najlepsze rezultaty i były dla nas zawsze przedmiotem satysfakcji i radości z dobrze wykonywanej pracy.

Kierownik Stacji Geoekologicznej UAM w Storkowie
prof. UAM dr hab. Józef Szpikowski

.

Założenia metodologiczne i metodyczne realizacji programu Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego

Methodological assumptions and research methods for the implementation of the Integrated Monitoring of the Natural Environment program

Koryto górnej Parsęty koło Storkowa

Andrzej Kostrzewski

Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu
anko@amu.edu.pl, https://orcid.org/0000-0001-5407-3617

Koncepcja organizacji i realizacji programu Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego w latach 1992–2022

The concept of organization and implementation of the Integrated Monitoring of the Natural Environment program in the years 1992–2022

Zarys treści: Organizacja i realizacja monitoringu środowiska przyrodniczego oparta jest na założeniach metodologicznych i metodycznych nauk o Ziemi i środowisku. W strukturze Państwowego Monitoringu Środowiska funkcjonują monitoringi specjalistyczne i Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego (ZMŚP), który jest monitoringiem kompleksowym środowiska przyrodniczego.

W opracowaniu przedstawiono etapy rozwoju ZMŚP w okresie 30-lecia (1992–2022). Aktualnie najważniejszym zadaniem ZMŚP jest doskonalenie metod badań laboratoryjnych i terenowych oraz modelowania w zakresie rozpoznania mechanizmów funkcjonowania geoekosystemów rzecznych i jeziornych w warunkach zmian klimatu i narastającej antropopresji. Ważnym zadaniem ZMŚP jest stałe monitorowanie zagrożeń środowiskowych i ich ocena, a w konsekwencji przemian krajobrazowych Polski w różnych skalach czasowych i przestrzennych.

Słowa kluczowe: Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego, mechanizm funkcjonowania geoekosystemów rzecznych i jeziornych, Państwowy Monitoring Środowiska

Abstract: The organization and implementation of monitoring of the natural environment is based on the methodological and methodological assumptions of Earth and environmental sciences. Within the structure of the State Environmental Monitoring, there are specialized monitoring and Integrated Monitoring of the Natural Environment (ZMŚP), which is a comprehensive monitoring of the natural environment.

The study presents the stages of IMNE development over the 30-year period (1992–2022). Currently, the most important task of IMNE is to improve laboratory and field research methods, and modeling in the field of recognizing the mechanisms of functioning of river and lake geoecosystems in the conditions of climate change and increasing anthropopressure. An important task of the IMNE is the constant monitoring of environmental threats and their assessment, and consequently, landscape changes in Poland in various time and spatial scales.

Keywords: Integrated Monitoring of the Natural Environment, mechanism of functioning of river and lake geoecosystems, State Environmental Monitoring

Wprowadzenie

Indywidualnością współczesnego rozwoju systemu Ziemi są relacje o charakterze sprzężeń zwrotnych, które zachodzą pomiędzy podsystemem przyrodniczym i społeczno-gospodarczym zarówno w skali globalnej, jak kontynentalnej i regionalnej. W obserwowanych relacjach dochodzi do sytuacji konfliktowych, wywołanych m.in. naturalnymi procesami katastrofalnymi (powodzie, huragany itd.), migracjami czy wpływem wielkich aglomeracji. Postępujące zmiany systemu Ziemi i jej poszczególnych sfer, łącznie z antroposferą, wymagają ciągłych, systematycznych obserwacji w ramach zorganizowanego, planowego monitoringu środowiska przyrodniczego, w różnych skalach przestrzennych i czasowych. Tak więc sprawą pierwszorzędnej wagi jest organizacja monitoringu środowiska przyrodniczego, opartego na założeniach metodologiczno-metodycznych nauk o Ziemi i środowisku. Taka koncepcja monitoringu środowiska przyrodniczego w naszym kraju realizowana jest w ramach Państwowego Monitoringu Środowiska. Minister Klimatu i Środowiska zatwierdził „Strategiczny program Państwowego Monitoringu Środowiska na lata 2020–2025", który wykonywany jest przez poszczególne monitoringi specjalistyczne.

Podstawowym celem niniejszego opracowania jest przedstawienie powstania i rozwoju koncepcji Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego jako podsystemu Państwowego Monitoringu Środowiska, a także efektów merytorycznych i aplikacyjnych, dotyczących aktualnego stanu i przemian środowiska przyrodniczego.

Koncepcje funkcjonowania środowiska przyrodniczego i ich zastosowanie w organizacji monitoringu środowiska przyrodniczego

Organizacja i realizacja monitoringu środowiska przyrodniczego oparta jest przede wszystkim na założeniach metodologicznych i metodycznych nauk o Ziemi i środowisku. W ostatniej dekadzie widoczny jest wyraźny postęp w rozwoju wymienionych dyscyplin w zakresie rozpoznania prawidłowości funkcjonowania i przemian systemu Ziemi, zachodzących w warunkach zmian klimatu i narastającej antropopresji. Wszystko to sprawia, że pojawiają się nowe koncepcje metodologiczne i metodyczne, które zobowiązują do wprowadzenia odpowiednich zmian w organizacji monitoringu środowiska przyrodniczego i interpretacji uzyskiwanych serii pomiarowych. W organizacji i realizacji monitoringu środowiska przyrodniczego w ujęciu kompleksowym wykorzystujemy założenia następujących koncepcji:

- funkcjonowania geoekosystemu,
- ekosystemu,
- krajobrazu,
- zrównoważonego rozwoju,
- geo- i bioróżnorodności,

- zachowania i ochrony struktury krajobrazowej kraju,
- Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego.

Najszerzej w organizacji Państwowego Monitoringu Środowiska wykorzystana została koncepcja geoekosystemu (Kostrzewski 1993), oparta na założeniach teorii funkcjonowania systemu (Bertalanffy 1984). Inne koncepcje opisu środowiska przyrodniczego – ekosystemu, krajobrazu, zrównoważonego rozwoju, geo- i bioróżnorodności, zachowania i ochrony struktury krajobrazowej kraju – stanowią uszczegółowienie przyjętej w organizacji monitoringu środowiska przyrodniczego koncepcji geoekosystemu.

Geoekosystem jest jednostką przestrzeni geograficznej, obejmuje przyrodę nieożywioną i ożywioną, wraz z człowiekiem i efektami jego działalności (Kostrzewski 1993, 1996, Kostrzewski, Majewski 2021). Wielkość geoekosystemu zależy od przyjętego kryterium podziału. W strukturze geoekosystemu wydzielamy elementy (budowa geologiczna, rzeźba terenu, wody powierzchniowe, wody podziemne, topoklimaty, typy gleb, typy zbiorowisk roślinnych, użytkowanie terenu), zjawiska (procesy fizyczne np. powodzie, huragany itd., procesy społeczne – różne przejawy działalności i zachowań człowieka), obiekty/urządzenia wprowadzone przez człowieka (wały przeciwpowodziowe, zapory wodne itd.).

Z metodologicznego punktu widzenia sprawą pierwszorzędnej wagi jest analiza przyczynowo-skutkowa różnych przejawów funkcjonowania środowiska przyrodniczego i zaobserwowanych efektów w zasięgu analizowanego geoekosystemu, jak również odniesienie otrzymanych wyników monitoringu do roku poprzedniego, a także wielolecia.

Rozwój współczesnych geoekosystemów stymulowany jest uprzednim i aktualnym stanem środowiska przyrodniczego i działalnością człowieka. W analizie procesów określających funkcjonowanie geoekosystemów przeprowadzamy analizę i opis procesów wewnętrznych, warunkowanych ich strukturą, jak również zewnętrznych, które są efektem położenia geograficznego.

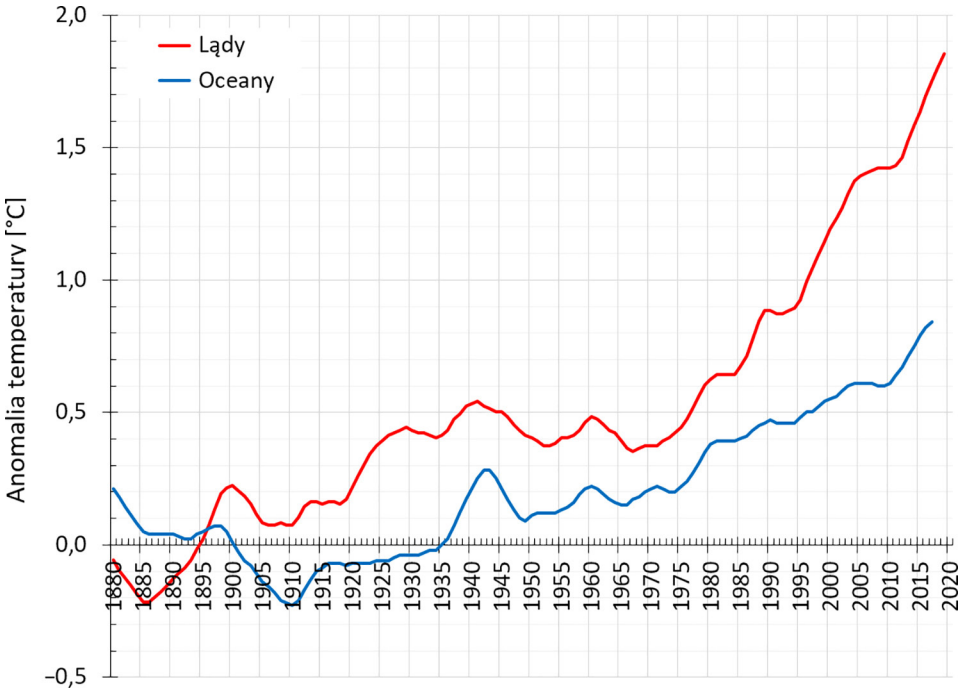
Procesy zewnętrzne i wewnętrzne określają indywidualność goegraficzną analizowanych geoekosystemów, która jest efektem ich położenia geograficznego, struktury wewnętrznej, różnokierunkowej działalności człowieka, jak również ich rozwoju paleogeograficznego (Kostrzewski 2021). Zastosowanie koncepcji funkcjonowania geoekosystemu (Kostrzewski 1993, 1996, 2021) stanowi więc podstawę analizy jakościowej i ilościowej stanu i przemian środowiska przyrodniczego monitorowanych geoekosystemów. Zgodnie z koncepcją funkcjonowania systemu opracowaną przez Bertalanffyego (1984), niezbędnym uzupełnieniem analizy i opisu geoekosystemów jest uwzględnienie właściwości geoekosystemu, a mianowicie – obszaru stanów dozwolonych, stabilności geoekosystemu i jego zakresu, progów przyrodniczych oraz historii geoekosystemu z podaniem prognozy rozwoju (Kostrzewski 1993). Uwzględnienie wymienionych właściwości geoekosystemu, w znaczący sposób zwiększa wykorzystanie wyników monitoringu dla konkretnych rozwiązań praktycznych.

Wstępne badania charakteru, stanu i przemian środowiska przyrodniczego, stanowi podstawę właściwej, uzasadnionej merytorycznie organizacji monitoringu środowiska przyrodniczego geoekosystemów, w zasięgu wytypowanych

zlewni rzecznych i jeziornych, uznanych za reprezentatywne dla danego regionu. Zebrane dane monitoringowe w odpowiednich bazach danych, po ich sprawdzeniu i weryfikacji, stanowią podstawę analizy jakościowej i ilościowej, stanu i przemian środowiska przyrodniczego, wytypowanych do badań geoekosystemów.

Przemiany środowiska przyrodniczego w antropocenie

Aktualny stan i przemiany środowiska przyrodniczego Polski są efektem zachodzących zmian klimatu i narastającej, różnokierunkowej antropopresji (Kostrzewski, Majewski red. 2018). Wszystko to sprawia, że w umiarkowanej strefie klimatycznej zmianom podlega czas trwania sezonów pogodowych, wyraźnie zmienia się charakter i funkcjonowanie systemu morfogenetycznego. Konsekwencją tych przekształceń jest wyraźna zmiana udziału procesów ekstremalnych ze skutkami katastrofalnymi. Odnotowany wzrost temperatury powietrza (ryc. 1) w skali globalnej, kontynentalnej i regionalnej i jego efekty w środowisku przyrodniczym dały podstawę do wprowadzenia nowego okresu geologicznego – antropocenu (Crutzen,



Ryc. 1. Zmiany temperatury nad lądami i oceanami w serii pomiarowej NASA GISS względem okresu bazowego 1880–1910 wygładzone za pomocą algorytmu Lowess z oknem wygładzenia 5 lat (Nauka o klimacie 2019)

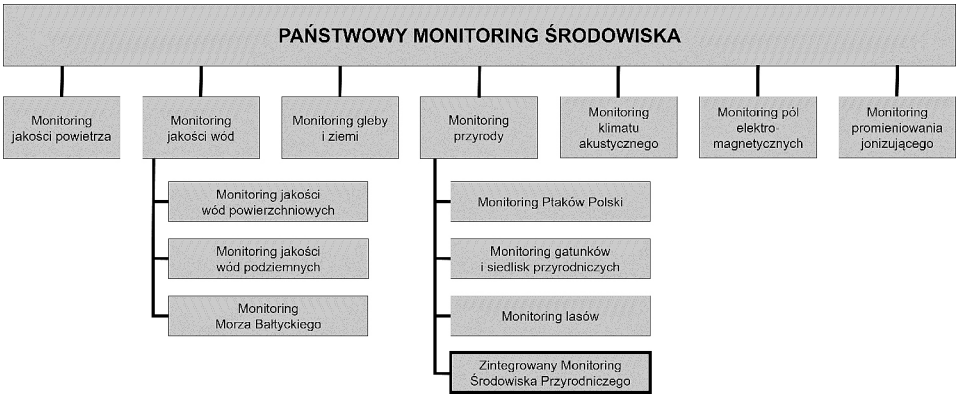
Fig. 1. Changes in temperature over land and oceans in the NASA GISS measurement series, relative to the base period 1880–1910, smoothed using the Lowess algorithm with a smoothing window of 5 years (Climate science 2019)

Stoemer 2000, Birkenmajer 2012). W literaturze nie jest jednoznacznie określony czas trwania antropocenu. W oparciu o tendencje zmian temperatury powietrza jako początek antropocenu podaje się lata 1800 i 1950. Rozwój cywilizacyjny i jego skutki w funkcjonowaniu i stanie środowiska przyrodniczego odnotowane m.in. w formie zmniejszenia zawartości ozonu w atmosferze, zmian morfologii linii brzegowych oceanu światowego, zmniejszenia powierzchni lasu tropikalnego, zmniejszenia zasięgu pustyń, zmian zasięgu wieloletniej zmarzliny – są podstawą do przyjęcia roku 1950 jako początku antropocenu (Birkenmajer 2012).

W analizie i interpretacji wyników obserwacji realizowanego programu Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego proponuję przyjąć nowy okres geologiczny antropocenu przy założeniu jego początku w 1950 r. (Kostrzewski 2020, 2021).

Koncepcja Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego w strukturze Państwowego Monitoringu Środowiska – powstanie, rozwój, program

Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego (ZMŚP) ustanowiony został zarządzeniem Głównego Inspektora Ochrony Środowiska z dnia 11 maja 1992 r. Od początku powstania ZMŚP zmieniało się jego miejsce w strukturze PMŚ, najpierw był samodzielnym systemem, a z kolei podsystemem w ramach systemu Monitoringu Przyrody (ryc. 2). ZMŚP w odróżnieniu od innych monitoringów specjalistycznych jest monitoringiem funkcjonowania geoekosystemów zlewni rzecznych i jeziornych, realizowanym w różnych skalach czasowych



Ryc. 2. Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego w strukturze Państwowego Monitoringu Środowiska (Strategiczny Program Państwowego Monitoringu Środowiska na lata 2020–2025)

Fig. 2. Integrated Monitoring of the Natural Environment in the structure of the State Environmental Monitoring (Strategic Program of the State Environmental Monitoring for 2020–2025)

i przestrzennych. Podstawowym zadaniem ZMŚP jest kompleksowa ocena funkcjonowania środowiska przyrodniczego monitorowanych geoekosystemów. Natomiast podstawowym celem ZMŚP jest m.in. rozpoznanie i ocena mechanizmów obiegu energii i przepływu materii w podstawowych typach geoekosystemów Polski, opis jakościowy i ilościowy zasobów abiotycznych i biotycznych monitorowanych geoekosystemów, określenie charakteru zagrożeń geoekosystemów oraz wskazanie możliwości zapobiegania im, a także opracowanie scenariuszy rozwoju monitorowanych geoekosystemów w warunkach obserwowanych zmian klimatu i narastającej antropopresji.

Mija 30 lat funkcjonowania ZMŚP, tak więc ważna jest ocena efektów realizacji jego programu w nawiązaniu do wymogów PMŚ. Aktualny program ZMŚP jest rezultatem systematycznych zmian i weryfikacji, związanych z postępem metodologicznym i metodycznym nauk o środowisku oraz wymogami merytorycznymi i metodycznymi Głównego Inspektora Ochrony Środowiska (Kostrzewski 1987, 1996, 2011, 2018, 2020, 2021, Kostrzewski, Majewski 2018, 2021).

Koncepcja ZMŚP wraz z programem została przedstawiona do dyskusji w GIOŚ w 1991 r. i obejmowała 5 programów podstawowych: wymiana energii i bilans promieniowania, procesy fizyczne w obiegu materii nieorganicznej i organicznej, procesy geochemiczne w obiegu substancji mineralnych i organicznych, inne, np. obserwacje fenologiczne. Program obejmował 31 podprogramów szczegółowych i podlegał zmianom, przede wszystkim związanym z wymogami PMŚ w latach 1992, 1995, 1998, 2003, 2007, 2010, 2015, 2020. Już w 1992 r. przedstawiona została koncepcja systemu informatycznego PMŚ, stanowiąca podstawę organizacji centralnej bazy danych ZMŚP.

Program ZMŚP (Kostrzewski 2020) przyjęty na lata 2021–2025 obejmuje w zakresie podstawowym 17 programów pomiarowych, 4 programy analityczne oraz 5 programów uzupełniających. Jest corocznie dyskutowany i oceniany przez grono ekspertów merytorycznych, z udziałem przedstawicieli GIOŚ, a także kierowników Stacji Bazowych. W związku z dużą dynamiką przemian środowiska przyrodniczego celowe jest wprowadzenie monitoringu procesów ekstremalnych jako programu podstawowego. W przyjętym programie PMŚ na lata 2020–2025 podkreślono doskonalenie baz danych w ramach programu EKOINFONET i ich przydatność na rzecz programu Natura 2000 oraz jako źródła informacji na potrzeby priorytetowych siedlisk przyrodniczych.

W oparciu o realizowany program ZMŚP dysponujemy bogatą bazą danych pomiarowych. Już w 1991 r. zwrócono uwagę na konieczność organizacji centrum gromadzenia i przetwarzania danych oraz szkolenia personelu Stacji. Aktualnie funkcjonuje baza danych ZMŚP, w której zgromadzono 1 862 615 rekordów dla lat 1995–2021. Funkcje systemu bazy danych to:

- gromadzenie wyników pomiarów, danych słownikowych (metadanych), ograniczeń, statystyk,
- analiza danych – wyznaczanie statystyk na podstawie zgromadzonych danych,
- kontrola integralności i poprawności danych pomiarowych
- udostępnianie i prezentacja danych pomiarowych oraz obliczonych statystyk.

W celu upowszechnienia wyników realizowanego programu ZMŚP wydano 35 publikacji książkowych o charakterze monograficznym w Bibliotece Monitoringu Środowiska, a także liczne artykuły w czasopismach krajowych i zagranicznych. Dobrą możliwością prezentacji, dyskusji i upowszechnienia wyników ZMŚP, było zorganizowanie 30 sympozjów, 28 szkół o charakterze szkolenia metodycznego, 3 seminariów problemowych i jednych warsztatów polarnych.

Tabela 1. Program Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego na lata 2021–2025
Table 1. Integrated Monitoring of the Natural Environment Program for 2021–2025

Kod programu	Program	Częstość realizacji	Liczba parametrów	
			oblig.	rozsz.
	PROGRAMY POMIAROWE			
A1	Meteorologia	co roku	15	7
B1	Zanieczyszczenie powietrza	co roku	2	8
C1	Chemizm opadów atmosferycznych	co roku	11	11
C2	Chemizm opadu podkoronowego	co roku	12	12
C3	Chemizm spływu po pniach	co roku	12	12
D1	Metale ciężkie i siarka w porostach	co roku	8	0
D2	Metale ciężkie i siarka w mchach	co roku	8	0
E1	Gleby	co roku; 1/10 lat	20	13
F1	Chemizm roztworów glebowych	co roku	12	14
F2	Wody podziemne	co roku	14	14
G2	Opad organiczny	co roku	5	12
H1	Wody powierzchniowe – rzeki	co roku	20	13
H2	Wody powierzchniowe – jeziora	co roku	16	13
I1	Hydrobiologia rzek – makrofity i ocena hydromorfologiczna koryta rzecznego	1/3 lata	22	0
J2	Struktura i dynamika szaty roślinnej	1/3 lata	21	5
J3	Gatunki inwazyjne obcego pochodzenia – rośliny	co roku; 1/2 lata	8	2
K1	Uszkodzenia drzew i drzewostanów	co roku	2	6
	PROGRAMY ANALITYCZNE			
	Zmiany pokrycia terenu i użytkowanie ziemi	1/3 lata		
	Świadczenia geoekosystemów	1/3 lata		
	Modelowanie zmian bilansu wodnego i biogeochemicznego dla zlewni reprezentatywnych ZMŚP	1/3 lata		
	Funkcjonowanie geoekosystemów zlewni badawczych ZMŚP w warunkach zmian klimatu i narastającej antropopresji (z uwzględnieniem zjawisk ekstremalnych)	co roku		

Poprawność merytoryczną w zakresie lokalizacji systemu pomiarowego, standaryzacji stosowanej aparatury pomiarowej i interpretacji uzyskiwanych danych pomiarowych, zabezpiecza zespół 17 ekspertów merytorycznych, którzy reprezentują różne dyscypliny nauk przyrodniczych. Bardzo ważną formą działalności ekspertów są szkolenia o charakterze metodycznym, w których biorą udział głównie pracownicy Stacji Bazowych ZMŚP.

Rozwój organizacyjny i merytoryczny ZMŚP wymaga odpowiedniego zabezpieczenia i koordynacji realizowanego programu. Funkcję tę spełnia Centrum Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, powołane zarządzeniem Rektora UAM z dnia 1 czerwca 2010 r. przy współudziale Głównego Inspektora Ochrony Środowiska. Centrum ZMŚP utrzymuje stały kontakt z GIOŚ w zakresie realizacji programu ZMŚP i innych programów, funkcjonowania Stacji Bazowych i upowszechnienia wyników monitoringu.

Ważną formą zabezpieczenia realizacji programu ZMŚP jest Rada Programowa Centrum ZMŚP, w skład której wchodzą m.in. przedstawiciel Rektora UAM, Główny Inspektor Ochrony Środowiska, Główny Konserwator Przyrody, wiceprezes NFOŚiGW, przedstawiciele ekspertów, kierowników Stacji Bazowych. Rada Programowa przyjmuje założenia organizacyjne realizacji programu ZMŚP, sprawozdania roczne oraz przedstawia Rektorowi UAM kandydata na dyrektora Centrum ZMŚP. Możemy więc stwierdzić, że realizacja programu ZMŚP jest zabezpieczona zarówno od strony organizacyjnej, merytorycznej, jak i finansowej przez GIOŚ. Sprawą pierwszorzędnej wagi jest zapewnienie ciągłości realizacji programu ZMŚP oraz stałe doskonalenie metod badawczych i możliwości interpretacyjnych wyników badań z uwzględnieniem celów merytorycznych i aplikacyjnych.

Rola i zadania Stacji Bazowych Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego

Program podstawowy ZMŚP realizowany jest na Stacjach Bazowych. Oprócz tego każda Stacja Bazowa realizuje program specjalistyczny, określony indywidualnością przyrodniczą monitorowanego geoekosystemu. Program ZMŚP z 1991 r. zakładał 2 etapy organizacji sieci Stacji Bazowych, a mianowicie 1 etap – wytypowanie 10 Stacji Bazowych (w oparciu o przeprowadzoną ogólnopolską ankietę stacji terenowych), obejmujących podstawowe typy rzeźby terenu Polski – góry wysokie, średnie i niskie, wyżyny i pogórza, wyżyny i równiny lessowe, wysoczyzny młodoglacjalne, wysoczyzny staroglacjalne, równiny piaszczyste, dna dolin i brzeg morski, 2 etap – zakładał uwzględnienie w wyborze stacji zróżnicowania krajobrazowego naszego kraju (obszary leśne, jeziorne, bagienno-torfowiskowe itd., a także obszary zurbanizowane i przemysłowe). Wybór był trudny, zarówno ze względów organizacyjnych, merytorycznych, jak i personalnych. Aktualnie sieć Stacji Bazowych wraz z terenowymi systemami obserwacyjnymi oraz budynkiem obejmuje 12 stacji (ryc. 3) na obszarze Polski i 1 stację polarną na Spitsbergenie. Podstawą lokalizacji Stacji Bazowych jest powiązanie ich lokalizacji z typami

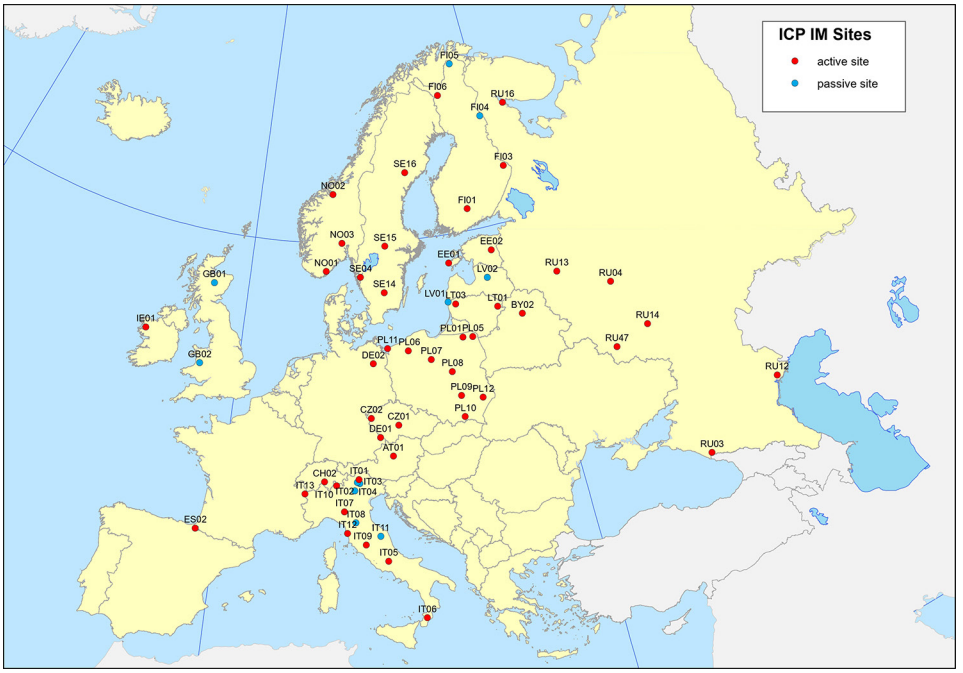
Ryc. 3. Rozmieszczenie Stacji Bazowych na tle stref krajobrazowych (Kostrzewski i in. 2014, zm.)
Fig. 3. Location of Base Stations against the background of landscape zones (Kostrzewski i in. 2014, changed)

krajobrazowymi Polski. Sieć Stacji Bazowych ZMŚP w Polsce ma charakter otwarty, warunkowany względami organizacyjnymi, merytorycznymi i finansowymi.

Podstawowym zadaniem Stacji Bazowych jest uzyskanie wieloletnich serii obserwacyjnych, umożliwiających ocenę aktualnego stanu, przemian krajobrazowych, kierunków zagrożeń i ochrony krajobrazu, a także przedstawienie scenariuszy rozwoju monitorowanych geoekosystemów w warunkach zmian klimatu i narastającej antropopresji. Bardzo ważnym etapem w rozwoju ZMŚP było włączenie w 2017 r. naszych Stacji Bazowych do sieci europejskiej ICP Integrated Monitoring (ryc. 4). Sytuacja taka umożliwia nawiązanie kontaktów pozwalających na prowadzenie porównawczych studiów środowiskowych w skali kontynentalnej. Stacje Bazowe ZMŚP winny systematycznie rozwijać się zarówno pod względem organizacyjnym, jak i merytorycznym.

Podsumowanie

W oparciu o przedstawione etapy rozwoju ZMŚP można stwierdzić, że realizowane są podstawowe cele i zadania, przypisane programowi ZMŚP. Najważniejszym zadaniem programu ZMŚP jest doskonalenie metod badań laboratoryjnych



Ryc. 4. Stacje Bazowe Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego w sieci europejskiej ICP IM (International Cooperative Programme on Integrated Monitoring of Air Pollution Effects on Ecosystems) (https://www.syke.fi)

Fig. 4. Base Stations of Integrated Monitoring of the Natural Environment in the European network of ICP IM (International Cooperative Programme on Integrated Monitoring of Air Pollution Effects on Ecosystems) (https://www.syke.fi)

i terenowych oraz modelowania w zakresie rozpoznania mechanizmów funkcjonowania geoekosystemów rzecznych i jeziornych, w warunkach zachodzących zmian klimatu i narastającej antropopresji. Istotnym zobowiązaniem jest stałe monitorowanie zagrożeń środowiskowych i ich ocena, a w konsekwencji przemian krajobrazowych Polski w różnych skalach czasowych i przestrzennych. Sprawą pierwszorzędnej wagi jest umocnienie pozycji Stacji Bazowych w monitoringu europejskim, zapewnienie ciągłości realizacji programu ZMŚP w celu uzyskania standaryzowanych, wieloletnich serii obserwacyjnych i wypracowanie prawidłowości określających aktualny stan oraz tempo i skutki przemian środowiskowych Polski.

Literatura

Bertallanffy L., 1984. Ogólna teoria systemów. Podstawy, rozwój, zastosowania. PWN, Warszawa.

Birkenmajer K., 2012. Antropocen – nowa epoka geologiczna. Przegląd Geologiczny, 60: 11.

Crutzen P.J, Stoermer E., 2000. The "Anthropocene". Global Change Newsletter, 41: 17–18.
Kostrzewski A., 1993. Geoekosystem obszarów nizinnych. Komitet Badań Środowiska, PAN.
Kostrzewski A., 1996. Pożądany model funkcjonowania monitoringu środowiska przyrodniczego w Polsce. Komitet Naukowy przy Prezydium PAN ,,Człowiek i Środowisko", Lublin.
Kostrzewski A., 1997. Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego i jego znaczenie w rozpoznaniu i ochronie struktury krajobrazowej Polski. Komitet Naukowy przy Prezydium PAN ,,Człowiek i Środowisko", Lublin.
Kostrzewski A., 2011. Znaczenie programu Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego w określeniu aktualnego stanu i przemian krajobrazu Polski. [W:] A. Kostrzewski, M. Samołyk (red.), Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Funkcjonowanie geoekosystemów w warunkach zmian użytkowania terenu i narastającej antropopresji. Biblioteka Monitoringu Środowiska, 27: 11–16.
Kostrzewski A., 2016. Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego – powstanie i rozwój, znaczenie w rozpoznaniu i ocenie współczesnych przemian krajobrazowych. [W:] A. Kostrzewski, J. Szpikowski, M. Domańska (red.), Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Funkcjonowanie, tendencje rozwoju, zagrożenia i ochrona środowiska przyrodniczego Polski. Biblioteka Monitoringu Środowiska, 30: 11–18.
Kostrzewski A., 2020. Indywidualność przedmiotowa Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego – program realizacji na lata 2021–2025. [W:] A. Olszewski, A. Andrzejewska (red.), Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Aktualny stan i przemiany środowiska przyrodniczego geoekosystemów jako cecha wskaźnikowa zmian klimatu. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Izabelin: 9–21.
Kostrzewski A., 2021. Wprowadzenie – koncepcja organizacji i realizacji programu Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego. [W:] A. Kostrzewski, M. Majewski (red.), Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego – organizacja, system pomiarowy, metody badań. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa: 15–20.
Kostrzewski A., Majewski M., 2018. Stan i przemiany środowiska przyrodniczego Polski w latach 1994–2015 w oparciu o realizację programu Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa.
Strategiczny program PMŚ na lata 2020–2025. GIOŚ, Warszawa.

Monika Okońska, Marek Marciniak

Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu
okonska@amu.edu.pl, MO https://orcid.org/0000-0001-9589-8471,
MM https://orcid.org/0000-0002-5377-5585

Modelowanie migracji znacznika w warstwie wodonośnej na podstawie doświadczenia terenowego

Modelling tracer transport in an aquifer based on a field experiment

Zarys treści: Zmienne warunki hydrogeologiczne występujące w obrębie zlewni mogą spowodować, że w warstwach wodonośnych o różnych własnościach, takich jak np. przepuszczalność i porowatość, inaczej będzie przebiegać migracja zanieczyszczeń. W pracy przedstawiono wyniki rozpoznania migracji wybranych zanieczyszczeń w wodach podziemnych fragmentu zlewni Różanego Strumienia. Analizę przeprowadzono metodą modelowania matematycznego dla adwekcyjno-dyspersyjnego równania transportu na podstawie krzywych przejścia zarejestrowanych podczas terenowego doświadczenia znacznikowego. Ponadto w programach Visual MODFLOW i MT3D wykonano dla analizowanego obszaru szereg modeli prognostycznych uwzględniających różne wartości parametrów adwekcyjnych i dyspersyjnych, tj. współczynnika filtracji, współczynnika porowatości, współczynnika grawitacyjnej pojemności wodnej oraz stałej dyspersji i współczynnika dyfuzji molekularnej.

Słowa kluczowe: doświadczenie znacznikowe, wody podziemne, parametry adwekcyjne i dyspersyjne, model numeryczny

Abstract: Changing hydrogeological conditions within the catchment area may cause that in aquifers with different properties, such as permeability and porosity, the transport of pollutants will take place differently. This paper presents the results of a study that focused on the transport of selected pollutants in the groundwater in parts of the Różany Strumień catchment. The analysis was carried out using the mathematical modelling method for the advection-dispersion transport equation on the basis of breakthrough curves recorded during a tracer experiment conducted in the field. In addition, using Visual MODFLOW and MT3D software, a number of prognostic models were generated for the analysed area, taking into account various values of advection and dispersion parameters, i.e. hydraulic conductivity, porosity, storage capacity, dispersivity and diffusion coefficient.

Keywords: tracer test, groundwater, advection and dispersion parameters, numerical model

Wprowadzenie

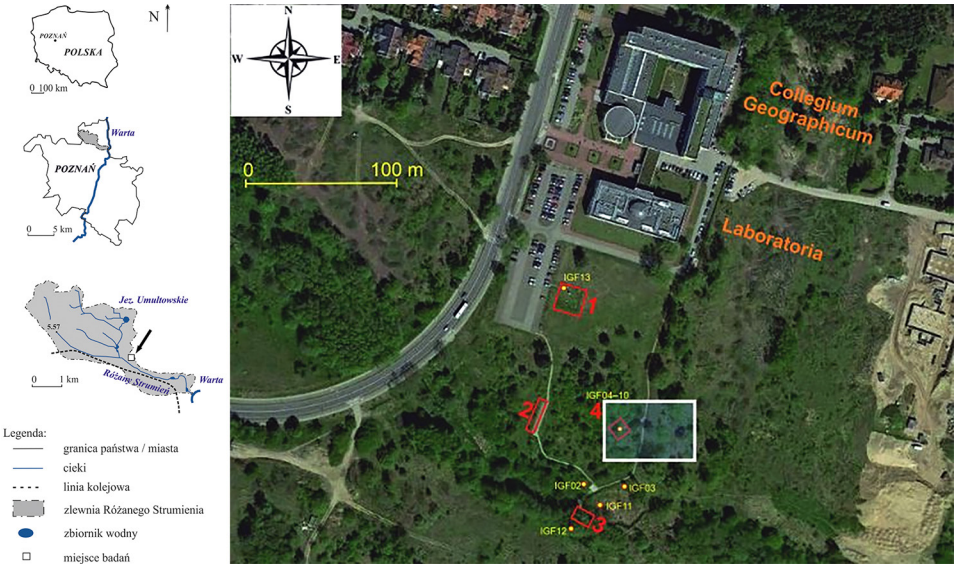
Przy szacowaniu zasobów wodnych dostępnych dla celów pitnych i gospodarczych bierze się pod uwagę nie tylko ilość, ale również jakość wód przeznaczonych do wykorzystania przez człowieka. W celu ochrony jakości zasobów wodnych wykonuje się prognozy migracji zanieczyszczeń w wodach powierzchniowych i podziemnych, a do przeprowadzania symulacji wykorzystuje się modelowanie matematyczne (Małecki i in. 2006, Kulma, Zdechlik 2009, Dąbrowski i in. 2011). W badaniach modelowych najpierw odwzorowuje się aktualny obieg wody w granicach badanego obszaru, na który następnie nakłada się dane hydrochemiczne. Do rozpoznania parametrów warstwy wodonośnej oraz parametrów migracji można wykorzystać badania znacznikowe (Behrens, Seiler 1981, Ptak i in. 2004, Zuber 2007). Dopiero na bazie wykalibrowanego modelu hydrodynamicznego i hydrochemicznego wykonuje się prognozy migracji zanieczyszczeń. Zastosowanie modelowania w badaniach uwarunkowane jest znajomością procesów migracji zanieczyszczeń oraz wartości parametrów występujących w ich opisie matematycznym przedstawionym w postaci ogólnych równań różniczkowych, rozwiązywanych dla określonych warunków granicznych hydrodynamicznych i hydrochemicznych. Podczas migracji wszystkich zanieczyszczeń w wodach podziemnych istotną rolę odgrywa proces adwekcji, a więc transport substancji z prędkością przepływającej wody oraz procesy dyspersyjne, które odpowiadają za zmianę w czasie i przestrzeni stężenia substancji w wodzie podziemnej. Pomiary prowadzone m.in. w sieciach Państwowego Monitoringu Środowiska, w tym w Stacjach Bazowych ZMŚP, dostarczają danych do modeli zarówno hydrodynamicznych, jak i hydrochemicznych (m.in. Major i in. 2017, 2022).

W pracy przedstawiono wyniki rozpoznania migracji zanieczyszczeń w wodach podziemnych w obrębie fragmentu zlewni Różanego Strumienia metodą modelowania matematycznego dla adwekcyjno-dyspersyjnego równania transportu, a także analizę modeli prognostycznych wykonanych dla różnych wartości parametrów występujących w tym równaniu. W obrębie zlewni występować mogą bowiem zmienne warunki hydrogeologiczne, a stopień migracji zanieczyszczeń w warstwie wodonośnej zależny jest m.in. od takich własności ośrodka gruntowego, jak jego przepuszczalność i porowatość.

Podstawy teoretyczne migracji zanieczyszczeń oraz równanie transportu z uwzględnieniem procesów adwekcji i dyspersji, w tym procesów dyfuzji molekularnej i dyspersji hydromechanicznej, przedstawiono w raporcie z realizacji programu badawczo-pomiarowego Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego w Stacji Bazowej Poznań-Morasko w 2020 r. (Marciniak, Okońska 2021).

Obszar badań

Rozpoznanie migracji zanieczyszczeń w warstwie wodonośnej przeprowadzono w rejonie posterunku hydrogeologicznego Stacji Bazowej ZMŚP Poznań-Morasko (ryc. 1), położonego w okolicy gmachu Wydziału Nauk Geograficznych i Geologicznych UAM w północnej części Poznania. Obszar badań należy do fragmentu akumulacyjnej równiny sandrowej (Sandru Naramowickiego), zbudowanego z utworów piaszczysto-żwirowych o bardzo dobrych właściwościach filtracyjnych. W funkcjonującej sieci otworów obserwacyjnych wód podziemnych prowadzone były pomiary poziomu wody, temperatury oraz analizy właściwości fizykochemicznych wody. Do badań modelowych wytypowano obszar o wymiarach 60 m na 40 m. W jego obrębie zlokalizowany jest zespół otworów obserwacyjnych w układzie hydrowęzła krzyżowego przeznaczony do badań znacznikowych. Rozmieszczenie i numerację poszczególnych otworów przedstawiono na rycinie 2B.

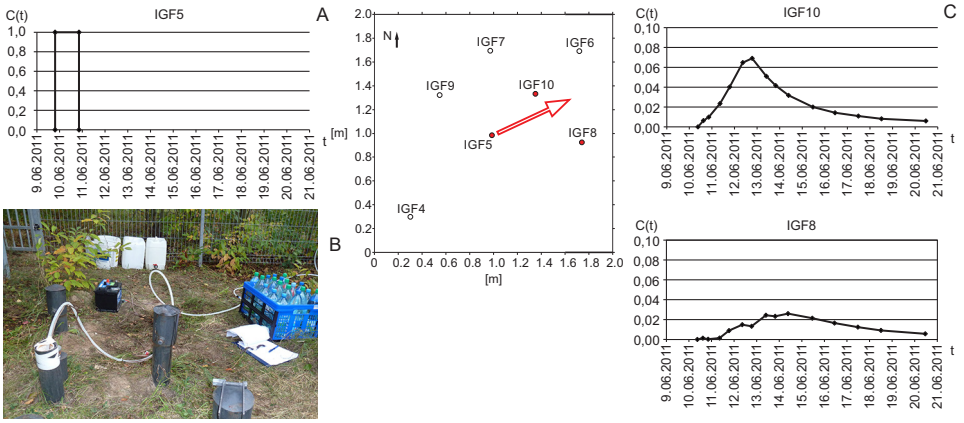


Ryc. 1. Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych UAM z posterunkami obserwacyjnymi Stacji Bazowej ZMŚP Poznań-Morasko: 1 – posterunek meteorologiczny; 2 – posterunek spływu stokowego; 3 – posterunek hydrologiczny; 4 – posterunek hydrogeologiczny; obszar badań modelowych zaznaczono białym prostokątem

Fig. 1. Faculty of Geographical and Geological Sciences of Adam Mickiewicz University with observation posts of the Poznań-Morasko ZMŚP Base Station: 1 – meteorological post; 2 – surface runoff post; 3 – hydrological post; 4 – hydrogeological post; the study area is marked with a white rectangle

Eksperyment terenowy

W celu rozpoznania kierunku migracji zanieczyszczeń w rejonie badań oraz identyfikacji wybranych parametrów migracji w hydrowęźle badawczym przeprowadzono serię doświadczeń znacznikowych. Eksperyment prezentowany na rycinie 2 polegał na iniekcji roztworu ze znacznikiem w otworze hydrogeologicznym IGF5 i obserwacji migracji znacznika w naturalnym strumieniu wód podziemnych w warstwie wodonośnej (otwory IGF6-IGF10). Iniekcję roztworu przeprowadzono w postaci krótkotrwałego pulsu. Do badań wykorzystano jony chlorkowe Cl^- traktowane jako znacznik idealny (konserwatywny), ulegający procesom adwekcyjno-dyspersyjnym. Krzywe przejścia znacznika uzyskano poprzez oznaczenia stężeń jonów chlorkowych w próbkach wód podziemnych pobranych z otworów obserwacyjnych.



Ryc. 2. Terenowe doświadczenie znacznikowe: A – iniekcja roztworu ze znacznikiem; B – układ otworów obserwacyjnych z zaznaczonym kierunkiem migracji znacznika; C – zarejestrowane krzywe przejścia znacznika

Fig. 2. Tracer field test: A – injection of solution with tracer; B – observation wells with tracer migration direction; C – tracer breakthrough curves

Szczegółowy opis przeprowadzonego rozpoznania hydrogeologicznego oraz doświadczenia terenowego, w tym iniekcji znacznika do warstwy wodonośnej i stosowanych metod badań, zamieszczono m.in. w pracach Okońskiej i Wolnego (2011), Okońskiej i Marciniaka (2014) oraz w raporcie z realizacji programu badawczo-pomiarowego Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego w Stacji Bazowej Różany Strumień w 2016 r. (Marciniak, Okońska 2017).

Badania umożliwiły zweryfikowanie kierunku przepływu wód podziemnych w warstwie wodonośnej. Ukształtowanie terenu badań pierwotnie sugerowało lokalny przepływ wód podziemnych w kierunku południowym, w stronę doliny Różanego Strumienia, i drenujący charakter tego cieku. Wykonane pomiary wykazały, że przepływ wody podziemnej w warstwie wodonośnej następuje

w kierunku północno-wschodnim, do doliny Warty, będącej bazą drenażu zarówno dla wód powierzchniowych, jak i wód podziemnych.

Następnie przeprowadzono identyfikację wybranych parametrów hydrogeologicznych warstwy wodonośnej oraz parametrów migracji znacznika na skonstruowanym modelu numerycznym.

Metody badań modelowych

W rezultacie rozpoznania hydrogeologicznego i hydrochemicznego przyjęto dla poligonu obejmującego modelowany obszar badań w zlewni Różanego Strumienia następujące wartości parametrów adwekcyjnych i dyspersyjnych:

- współczynnik filtracji $k_x = k_y = 2{,}9 \cdot 10^{-3}$ m·s^{-1};
- stopień anizotropii ośrodka $k_x/k_z = 10$ dla $k_z = 2{,}9 \cdot 10^{-4}$ m·s^{-1};
- jednostkowy współczynnik sprężystej pojemności wodnej ośrodka $S_s = 1 \cdot 10^{4}$ m^{-1};
- współczynnik grawitacyjnej pojemności wodnej ośrodka $S_y = 0{,}26$;
- współczynnik porowatości efektywnej $n_e = 0{,}36$;
- stała dyspersji podłużnej $\alpha_L = 0{,}09$ m (dla skali hydrowęzła);
- relacja stałej dyspersji poprzecznej do stałej dyspersji podłużnej $\alpha_H / \alpha_L = 0{,}1$;
- relacja stałej dyspersji pionowej do stałej dyspersji podłużnej $a_V / \alpha_L = 0{,}01$;
- współczynnik dyfuzji molekularnej $D_M = 0$ m^2·h^{-1}.

Podczas badań współczynnika filtracji k warstw wodonośnych metodą PARAMEX (Marciniak 1999) w rejonie WNGIG otrzymano wartości parametru od $5{,}60 \cdot 10^{-4}$ do $3{,}88 \cdot 10^{3}$ m·s^{-1}, przy czym w rejonie posterunku hydrogeologicznego od $2{,}39 \cdot 10^{-3}$ do $3{,}88 \cdot 10^{3}$ m·s^{-1} –średnio $2{,}96 \cdot 10^{-3}$ m·s^{-1}.

W przypadku jednostkowego współczynnika sprężystej pojemności wodnej ośrodka S_s, z uwagi na swobodny charakter zwierciadła wód podziemnych przyjęto stałą wartość $1 \cdot 10^{-4}$ m^{-1}. Wartości współczynnika grawitacyjnej pojemności wodnej ośrodka S_y dostosowywano do wielkości współczynnika porowatości efektywnej n_e, z uwagi na zależność porowatości i pojemności wodnej ośrodków gruntowych.

Do analizy migracji zanieczyszczeń w warstwie wodonośnej wykorzystano numeryczny model obszaru badań skonstruowany przy użyciu programu Visual MODFLOW v.4.3.0.154 Pro oraz MT3DMS v.5.2 (Harbaugh i in. 2000). W modelu w pierwszej kolejności odtworzono warunki filtracji wody zarejestrowane w czasie doświadczenia terenowego. W celu odwzorowania położenia zwierciadła wody podziemnej, założono – zgodnie ze współrzędnymi istniejących otworów obserwacyjnych – piezometry kalibracyjne zawierające informację o rzędnej zwierciadła wody. Następnie odwzorowano warunki migracji zanieczyszczeń poprzez utworzenie dodatkowych piezometrów kalibracyjnych z informacjami o obserwowanych stężeniach. Wszystkie piezometry kalibracyjne zafiltrowano w dolnej części modelu, analogicznie do umiejscowienia filtra w otworach obserwacyjnych znajdujących się na stanowisku badawczym.

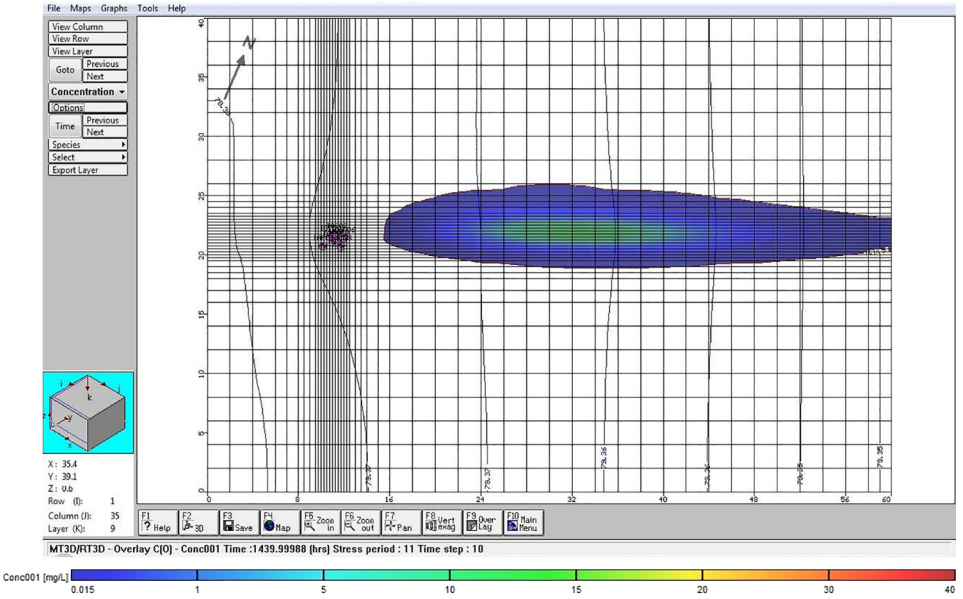
Stały gradient hydrauliczny wymuszający filtrację wody w warstwie wodonośnej zadano za pomocą warunku brzegowego I rodzaju (stałego ciśnienia) na

brzegach modelu. Równanie opisujące model matematyczny procesu filtracji wody rozwiązano za pomocą programu MODFLOW 2000. W następnej kolejności zamodelowano sposób iniekcji zanieczyszczeń za pomocą warunku brzegowego I rodzaju (stałej koncentracji). Warunek zadano w otworze iniekcyjnym, odwzorowując krótkotrwałą iniekcję znacznika. Równanie opisujące model matematyczny procesu migracji zanieczyszczeń rozwiązano przy użyciu programu MT3DMS.

Kalibracja modelu polegała na porównaniu danych obliczonych na modelu numerycznym z danymi zarejestrowanymi podczas doświadczenia. Model tarowano metodą kolejnych przybliżeń. Zgodność wyników obliczeń numerycznych z pomiarami eksperymentalnymi oceniano na podstawie wskaźników takich, jak współczynnik korelacji r oraz znormalizowany błąd RMSE.

Po odwzorowaniu eksperymentu terenowego na modelu numerycznym uzyskano obraz przejścia zanieczyszczeń w sieci otworów obserwacyjnych i ich otoczeniu dla danych parametrów adwekcyjnych i dyspersyjnych (ryc. 3).

W związku ze zmiennością litologii i możliwością zróżnicowania parametrów adwekcyjnych i dyspersyjnych w obrębie zlewni Różanego Strumienia, na wykonanym modelu numerycznym przeprowadzono następnie badanie migracji zanieczyszczeń w warstwie wodonośnej w zmiennych warunkach hydrogeologicznych (Marciniak, Okońska 2022). Wprowadzono do modelu matematycznego



Ryc. 3. Symulacja migracji zanieczyszczeń na modelu numerycznym dla parametrów adwekcyjnych i dyspersyjnych doświadczenia terenowego. Wizualizacja dla czasu $t = 1440$ h od wprowadzenia znacznika do warstwy wodonośnej

Fig. 3. Simulation of pollutant migration on a numerical model for the advection and dispersion parameters of the field experiment. Visualization for time $t = 1440$ h from the injection of the tracer into the aquifer

przedstawione w tabelach 1 i 2 wartości poszczególnych parametrów adwekcji i dyspersji.

W pierwszym etapie przeanalizowano wpływ parametrów adwekcji, tj. współczynnika filtracji k oraz współczynników grawitacyjnej pojemności wodnej S_y i porowatości efektywnej n_e, zakładając zerową wartość parametrów dyspersji, tj. stałej dyspersji podłużnej α_L i współczynnika dyfuzji molekularnej D_M. Przyjęto w przeprowadzonej analizie numerycznej zakresy zmienności poszczególnych parametrów adwekcyjnych zgodnie z m.in. podziałem skał według własności filtracyjnych oraz zakresem porowatości i pojemności wodnej warstw wodonośnych (tab. 1).

Tabela 1. Przyjęte w badaniach modelowych zakresy wartości parametrów adwekcyjnych
Table 1. Ranges of advection parameter values in numerical models

Charakter przepuszczalności	Litologia	Współczynnik filtracji k [m·s^{-1}]		Współczynnik porowatości n [–] ≈ współczynnik porowatości efektywnej n_e [–]		Współczynnik odsączalności μ [–] ≈ współczynnik grawitacyjnej pojemności wodnej S_y [–]	
		wg Pazdro, Kozerski (1990)	w modelu	wg Pazdro, Kozerski (1990)	w modelu	wg Pazdro, Kozerski (1990)	w modelu
Bardzo dobra	żwiry, żwiry piaszczyste, gruboziarniste i równoziarniste piaski	$> 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	0,20–0,55		0,22–0,26	
Dobra	piaski gruboziarniste, nieco ilaste, piaski różnoziarniste, piaski średnioziarniste	10^{-3}–10-4	$1 \cdot 10^{-3}$ $5 \cdot 10^{-4}$	0,20–0,48	0,40 0,35 0,30 0,25	0,19–0,22	0,30 0,25 0,20 0,15
Średnia	piaski drobnoziarniste, równomiernie uziarnione, less	10^{-4}–10^{-5}	$1 \cdot 10^{-4}$ $5 \cdot 10^{-5}$		0,20	0,17	0,10
Słaba	piaski pylaste, gliniaste, mułki	10^{-5}–10^{-6}	$1 \cdot 10^{-5}$			0,12	

W drugim etapie badań przeanalizowano wpływ wartości parametrów dyspersyjnych na rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń w warstwie wodonośnej, tj. stałej dyspersji podłużnej α_L oraz współczynnika dyfuzji molekularnej D_M. Modelowanie przeprowadzono dla dwóch wartości współczynnika filtracji: $k = 1 \cdot 10^{-4}$ m·s^{-1} oraz $k = 5 \cdot 10^{-4}$ m·s^{-1}. Przy analizie parametrów dyspersji założono wartość współczynnika grawitacyjnej pojemności wodnej ośrodka $S_y = 0{,}20$ i wartość współczynnika porowatości efektywnej $n_e = 0{,}30$. Przy zmianach wartości stałej dyspersji podłużnej α_L przyjmowano zerową wartość współczynnika dyfuzji molekularnej D_M. W kolejnym kroku, przy zmianach wartości współczynnika dyfuzji molekularnej D_M, wprowadzano do modelu zerową wartość stałej dyspersji podłużnej α_L. Wartości parametrów dyspersyjnych, tj. stałej dyspersji podłużnej α_L i współczynnika dyfuzji molekularnej D_M, modelowano w zakresie prezentowanym w tabeli 2.

Tabela 2. Przyjęte w badaniach modelowych zakresy wartości parametrów dyspersyjnych
Table 2. Ranges of dispersion parameter values in numerical models

Litologia	Stała dyspersji podłużnej α_L [m]		Współczynnik dyfuzji molekularnej D_M [m^2·s^{-1}]	
	wg danych literaturowych	w modelu	wg danych literaturowych	w modelu
Fluwioglacjalne utwory żwirowo-piaszczyste	Xu, Eckstein (1995): $\alpha_L = 0{,}83(\log x)^{2{,}414}$ dla x = 10–60 m $\alpha_L \approx$ 0,8–3,3 m	8,00	Kleczkowki (1984): $D_M = \chi\, n_e\, D_M^{\,0}$ gdzie $\chi \approx$ 0,5–0,7	$1 \cdot 10^{-4}$
		4,00	dla $\chi = 0{,}7$; $n_e = 0{,}36$;	$1 \cdot 10^{-5}$
		2,00	$D_M^{\,0} = 20{,}3 \cdot 10^{-8}$ m^2·s^{-1} (jony Cl^-, Małecki i in. 2006)	$1 \cdot 10^{-6}$
		1,00	$D_M \approx 5{,}5 \cdot 10^{-8}$ m^2·s^{-1}	$1 \cdot 10^{-7}$
	Małecki i in. (2006): dla x = 3,0–57,3 m $\alpha_L \approx$ 0,03–14,0 m	0,50	Maraqa (2007): $1{,}4 \cdot 10^{-7}$; $2{,}8 \cdot 10^{-7}$; $2{,}8 \cdot 10^{-8}$; $2{,}8 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-8}$
		0,25		$1 \cdot 10^{-9}$
		0,00	Fox, Lee (2008): $1 \cdot 10^{-9}$; $4 \cdot 10^{-9}$; $4 \cdot 10^{-10}$	0,00

Objaśnienia: x – długość drogi migracji [m]; χ – krętość dróg filtracji w ośrodku porowatym [–]; $D_M^{\,0}$ – współczynnik dyfuzji molekularnej w swobodnym roztworze wodnym [m^2·s^{-1}].
Explanations: x – migration distance [m]; χ – tortuosity of filtration paths in the porous medium [–]; $D_M^{\,0}$ – diffusion coefficient in solution [m^2·s^{-1}].

Według Kleczkowskiego (1984), wartości stałej dyspersji poprzecznej dla migracji zanieczyszczeń w kierunkach prostopadłych do kierunku przepływu wody wynoszą 0,05–0,2 wartości stałej dyspersji podłużnej α_L. W modelu numerycznym przyjęto stosunek wartości stałej dyspersji poprzecznej poziomej α_H oraz stałej dyspersji poprzecznej pionowej a_V do stałej dyspersji podłużnej α_L, odpowiednio jako $\alpha_H / \alpha_L = 0{,}1$ oraz $a_V / \alpha_L = 0{,}01$.

Szczegółową analizę stopnia rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń wykonano dla wybranych modeli numerycznych, porównując m.in.:

- maksymalne stężenie substancji zanieczyszczającej C_{max} [mg·dm^{-3}],
- odległość x [m] stężenia C_{max} od otworu iniekcyjnego,

- długość a [m] i szerokość b [m] obszaru zanieczyszczonego wyznaczonego izolinią stężenia $C = 0{,}015$ mg·dm^{-3},
- powierzchnię zanieczyszczonego obszaru P [m^2] oszacowaną w programie Surfer v.13.

Wyniki badań modelowych

Wizualizację wybranych wyników badań modelowych migracji zanieczyszczeń w utworach o zmiennych wartościach parametrów adwekcyjnych, wykonaną dla czasu $t = 1440$ h od wprowadzenia zanieczyszczeń do warstwy wodonośnej, przedstawiono w tabeli 3. Natomiast wybrane wyniki badań parametrów dyspersyjnych, tj. stałej dyspersji podłużnej α_L oraz współczynnika dyfuzji molekularnej D_M, zaprezentowano w tabeli 4. Symulacja ta dotyczy czasu $t = 1440$ h od wprowadzenia zanieczyszczeń do warstwy wodonośnej.

Wizualizacje dla wszystkich badanych własności filtracyjnych i dyspersyjnych znajdują się w raporcie z realizacji programu badawczo-pomiarowego Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego w Stacji Bazowej Poznań-Morasko w 2021 r. (Marciniak, Okońska 2022).

Badanie migracji zanieczyszczeń w wodach podziemnych metodą modelowania matematycznego, przy różnych wartościach parametrów adwekcyjnych i dyspersyjnych, wykazało, że współczynnik filtracji k jest najważniejszym parametrem warunkującym przemieszczanie się zanieczyszczeń w warstwie wodonośnej. W warstwach wykazujących wyższe wartości współczynnika filtracji większa jest powierzchnia obszaru zanieczyszczonego, a substancje migrują na większe odległości od źródła zanieczyszczenia (tab. 5).

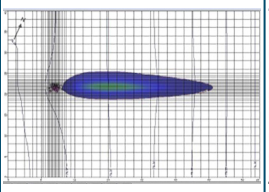
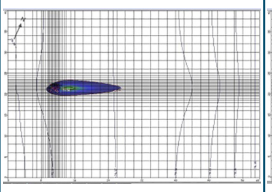
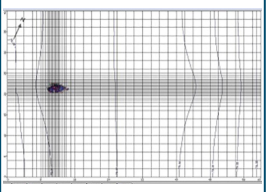
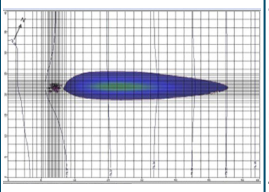
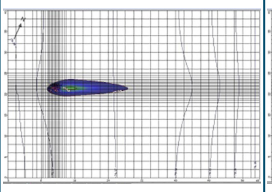
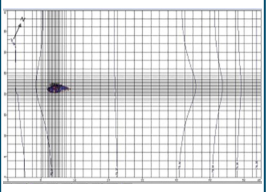
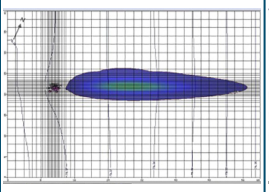
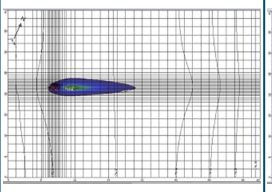
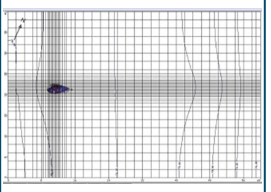
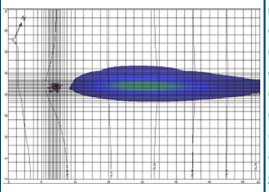
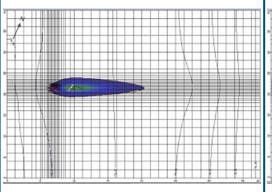
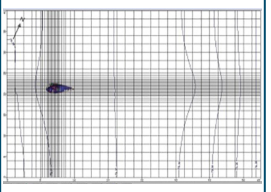
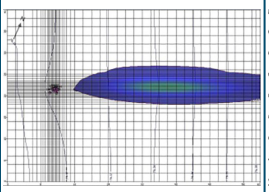
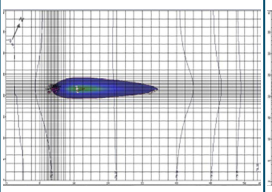
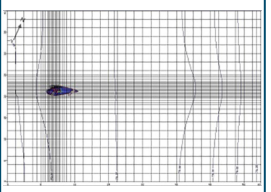
Szczegółowa analiza przeprowadzona w badanym zakresie wartości współczynnika filtracji k, przy wartości współczynnika porowatości efektywnej $n_e = 0{,}30$, wykazała powiększenie długości i szerokości strefy zanieczyszczonej, odpowiednio 15-krotne i 5-krotne, przy wzroście wartości współczynnika filtracji k o ponad dwa rzędy wielkości. Wzrost przepuszczalności warstw wodonośnych powoduje około 100-krotny wzrost powierzchni zanieczyszczonego obszaru. Jednocześnie zanieczyszczenia pokonują 60 razy większą odległość od miejsca wprowadzenia, jednak podczas migracji ich maksymalne stężenia ulegają redukcji o około 60%.

W przypadku zmian współczynnika porowatości efektywnej n_e w badanym zakresie wartości zauważono, że większa porowatość warstwy wodonośnej powoduje nieznaczny spadek powierzchni strefy zanieczyszczonej.

Analiza przeprowadzona dla zmiennej wartości współczynnika porowatości efektywnej n_e, przy wartości współczynnika filtracji $k = 5{\cdot}10^{-4}$ m·s^{-1}, wykazała zmniejszenie długości i szerokości strefy zanieczyszczonej, odpowiednio o 29% i 24%, przy rosnącej porowatości ośrodka gruntowego. Zanotowano prawie 2-krotne zmniejszenie powierzchni zanieczyszczonego obszaru. Jednocześnie wzrost wartości współczynnika porowatości efektywnej n_e warstw wodonośnych powoduje, że zanieczyszczenia migrują na mniejszą odległość od miejsca wprowadzenia (o ok. 50%), jednak wykazują o 36% wyższe maksymalne stężenia.

Tabela 3. Wybrane symulacje migracji zanieczyszczeń w warstwach o różnej przepuszczalności, przy zmiennych wartościach parametrów adwekcyjnych

Table 3. Simulations of pollution migration in aquifers with various permeability, with variable values of advection parameters

Pojemność wodna i porowatość	Własności filtracyjne		
	$k_x = k_y = 2 \cdot 10^{-3}$ m·s^{-1} $k_z = 2 \cdot 10^{-4}$ m·s^{-1}	$k_x = k_y = 5 \cdot 10^{-4}$ m·s^{-1} $k_z = 5 \cdot 10^{-5}$ m·s^{-1}	$k_x = k_y = 5 \cdot 10^{-5}$ m·s^{-1} $k_z = 5 \cdot 10^{-6}$ m·s^{-1}
$S_y = 0{,}30$ $n_e = 0{,}40$ $n = 0{,}40$			
$S_y = 0{,}25$ $n_e = 0{,}35$ $n = 0{,}35$			
$S_y = 0{,}20$ $n_e = 0{,}30$ $n = 0{,}30$			
$S_y = 0{,}15$ $n_e = 0{,}25$ $n = 0{,}25$			
$S_y = 0{,}10$ $n_e = 0{,}20$ $n = 0{,}20$			

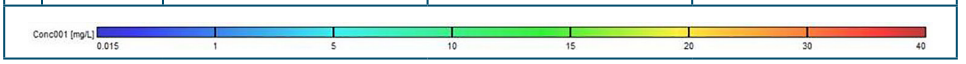


Tabela 4. Wybrane symulacje migracji zanieczyszczeń w warstwie o dobrej przepuszczalności ($k_x = k_y = 5{\cdot}10^{-4}$ m·s^{-1}, $k_z = 5{\cdot}10^{-5}$ m·s^{-1}), przy zmiennych wartościach stałej dyspersji podłużnej α_L i współczynnika dyfuzji molekularnej D_M

Table 4. Simulations of pollution migration in good permeability aquifers ($k_x = k_y = 5{\cdot}10^{-4}$ m·s^{-1}, $k_z = 5{\cdot}10^{-5}$ m·s^{-1}), with variable values of longitudinal dispersivity α_L and diffusion coefficient D_M

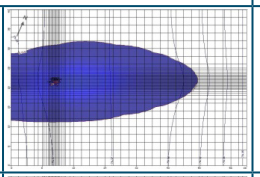
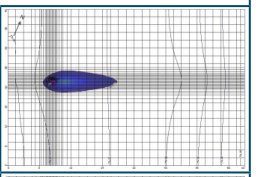
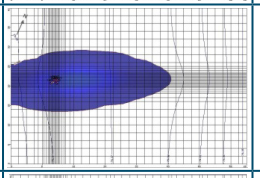
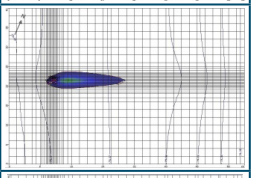
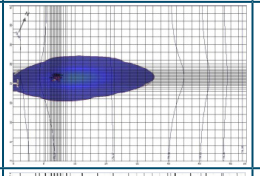
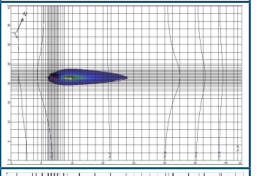
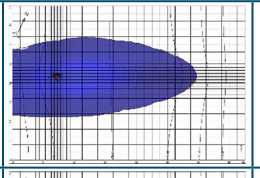
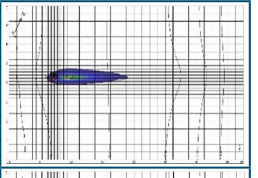
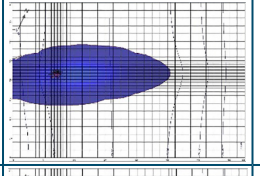
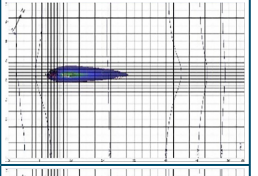
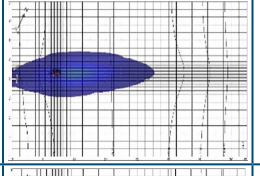
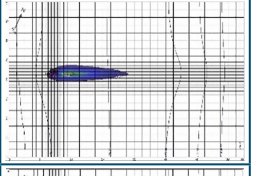
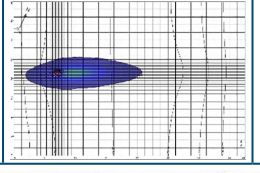
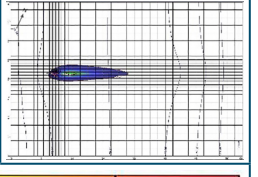
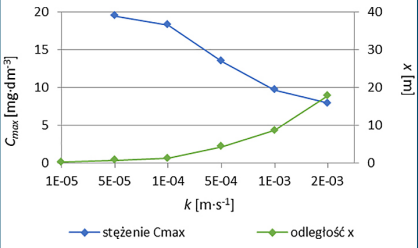
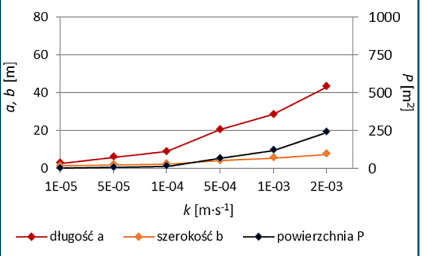
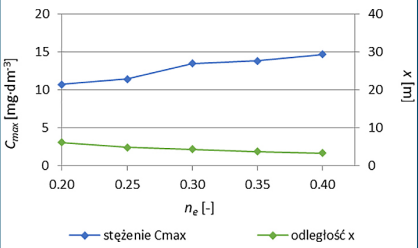
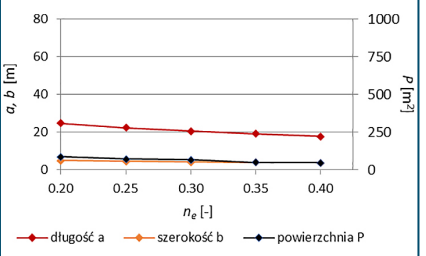
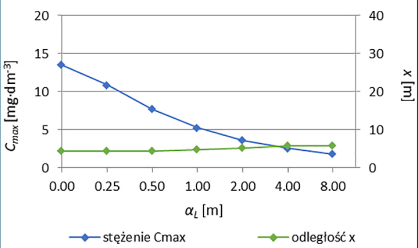
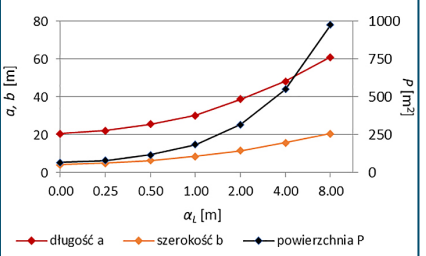
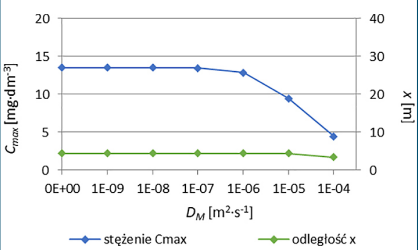
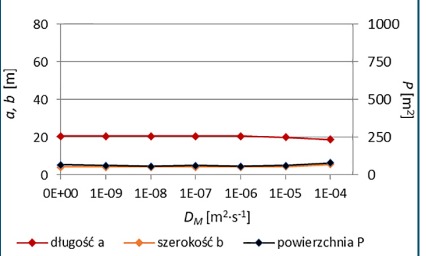
Dyspersja hydromechaniczna		Dyfuzja molekularna	
α_L = 8,00 m		$D_M = 1{\cdot}10^{-4}$ m^2·h^{-1}	
α_L = 4,00 m		$D_M = 1{\cdot}10^{-5}$ m^2·h^{-1}	
α_L = 2,00 m		$D_M = 1{\cdot}10^{-6}$ m^2·h^{-1}	
α_L = 1,00 m		$D_M = 1{\cdot}10^{-7}$ m^2·h^{-1}	
α_L = 0,50 m		$D_M = 1{\cdot}10^{-8}$ m^2·h^{-1}	
α_L = 0,25 m		$D_M = 1{\cdot}10^{-9}$ m^2·h^{-1}	
α_L = 0,00 m		D_M = 0 m^2·h^{-1}	

Tabela 5. Parametry strefy zanieczyszczonej
Table 5. Parameters of the contaminated zone

	Odległości od źródła zanieczyszczenia	Powierzchnia obszaru zanieczyszczonego
Współczynnik filtracji k (dla $n_e = 0{,}30$)		
Współczynnik porowatości efektywnej n_e (dla $k = 5{\cdot}10^{-4}$ m·s^{-1})		
Stała dyspersji podłużnej α_L (dla $n_e = 0{,}30$ oraz $k = 5{\cdot}10^{-4}$ m·s^{-1})		
Współczynnik dyfuzji molekularnej D_M (dla $n_e = 0{,}30$ oraz $k = 5{\cdot}10^{-4}$ m·s^{-1})		

W przypadku zmian stałej dyspersji podłużnej α_L w badanym zakresie wartości zaobserwowano, że wyższe wartości tego parametru powodują wzrost długości i szerokości oraz powierzchni strefy zanieczyszczonej, przy jednoczesnym spadku stężeń maksymalnych zanieczyszczeń i braku migracji.

Szczegółowa analiza przeprowadzona dla zmiennej wartości stałej dyspersji podłużnej α_L, przy wartości współczynnika porowatości efektywnej $n_e = 0{,}30$ i wartości współczynnika filtracji $k = 5{\cdot}10^{-4}\ \mathrm{m{\cdot}s^{-1}}$, wykazała wzrost szerokości i długości strefy zanieczyszczonej, odpowiednio 5-krotny i 3-krotny, przy rosnącej w badanym zakresie wartości stałej α_L. Zanotowano 15-krotne zwiększenie powierzchni zanieczyszczonego obszaru, przy jednoczesnym bardzo dużym spadku maksymalnego stężenia zanieczyszczenia (o 87%) i braku jego przemieszczenia.

Podczas analizy badanego zakresu wartości współczynnika dyfuzji molekularnej D_M nie odnotowano znaczących zmian długości, szerokości i powierzchni strefy zanieczyszczonej oraz jej przemieszczania się. Współczynnik dyfuzji molekularnej D_M w zakresie wartości od 0 do $1{\cdot}10^{-6}\ \mathrm{m^2{\cdot}s^{-1}}$, w przypadku warstw o średniej i dobrej przepuszczalności, nie ma istotnego znaczenia przy migracji zanieczyszczeń.

Analiza przeprowadzona dla zmiennej wartości współczynnika dyfuzji molekularnej D_M, przy wartości współczynnika porowatości efektywnej $n_e = 0{,}30$ i wartości współczynnika filtracji $k = 5{\cdot}10^{-4}\ \mathrm{m{\cdot}s^{-1}}$, wykazała, że przy wartości współczynnika dyfuzji molekularnej większej od $D_M = 1{\cdot}10^{-6}\ \mathrm{m^2{\cdot}s^{-1}}$ zmiana wartości parametru o dwa rzędy wielkości zmniejsza maksymalne stężenie zanieczyszczenia o 67%.

Podsumowanie

Przedmiotem analizy było rozpoznanie migracji zanieczyszczeń w warstwie wodonośnej w rejonie posterunku hydrogeologicznego Stacji Bazowej ZMŚP Poznań-Morasko metodą modelowania matematycznego, a także badania modelowe migracji zanieczyszczeń w wodach podziemnych zlewni Różanego Strumienia przy założeniu różnych wartości parametrów występujących w adwekcyjno-dyspersyjnym równaniu transportu.

Do analizy migracji zanieczyszczeń w warstwie wodonośnej w zróżnicowanych warunkach hydrogeologicznych, przy określonych zakresach zmienności poszczególnych parametrów adwekcyjnych i dyspersyjnych, wykorzystano numeryczny model obszaru badań skonstruowany przy użyciu programu Visual MODFLOW v.4.3.0.154 Pro oraz MT3DMS v.5.2.

Badanie migracji zanieczyszczeń w wodach podziemnych metodą modelowania matematycznego wykazało, że w analizowanych zakresach wartości parametrów:

- współczynnik filtracji k jest najważniejszym parametrem warunkującym przemieszczanie się zanieczyszczeń w warstwie wodonośnej,

- współczynnik dyfuzji molekularnej D_M w zakresie wartości od 0 do $1 \cdot 10^6$ $m^2 \cdot s^{-1}$, w przypadku warstw o średniej i dobrej przepuszczalności, nie ma istotnego znaczenia przy migracji zanieczyszczeń,
- przy wyższych wartościach współczynnika filtracji k oraz stałej dyspersji podłużnej α_L większa jest powierzchnia obszaru zanieczyszczonego, a w przypadku współczynnika filtracji k substancje migrują na większe odległości od źródła zanieczyszczenia,
- większa porowatość warstwy wodonośnej powoduje nieznaczny spadek powierzchni strefy zanieczyszczonej, zanieczyszczenia migrują na mniejsze odległości, lecz większe jest ich stężenie,
- maksymalne stężenia zanieczyszczeń ulegają redukcji wraz ze wzrostem wartości współczynnika filtracji k oraz stałej dyspersji podłużnej α_L.

Wpływ wartości parametrów adwekcyjnych i dyspersyjnych na migrację zanieczyszczeń w warstwie wodonośnej analizowany był dla każdego parametru osobno, podczas gdy w warunkach terenowych migracja jest często zagadnieniem wieloparametrycznym. Badanie metodą modelowania matematycznego można uznać za bardzo dobre narzędzie pomagające w zrozumieniu uwarunkowań migracji zanieczyszczeń w wodach podziemnych.

Literatura

Behrens H., Seiler K.P., 1981. Field test on propagation of conservative tracers in fluwioglacial gravels of Upper Bavaria. Studies in Environmental Science, 17: 649–657.

Dąbrowski S., Kapuściński J., Nowicki K., Przybyłek J., Szczepański A., 2011. Metodyka modelowania matematycznego w badaniach i obliczeniach hydrogeologicznych. Poradnik metodyczny. Ministerstwo Środowiska, Warszawa.

Fox P.J., Lee J., 2008. Model for consolidation-induced solute transport with nonlinear and nonequilibrium sorption. Int. J. Geomech., 8, 3: 188–198.

Harbaugh A.W., Banta E.R., Hill M.C., McDonald M.G., 2000. MODFLOW-2000, the U.S. geological survey modular. Ground-water model – user guide to modularization. Concepts and the ground-water flow process. U.S. Geological Survey, Open-File Report 00-92.

Kleczkowski A.S. (red.), 1984. Ochrona wód podziemnych. Wyd. Geol., Warszawa.

Kulma R., Zdechlik R., 2009. Modelowanie procesów filtracji. Wyd. AGH, Kraków.

Małecki J.J., Nawalany M., Witczak S., Gruszczyński T., 2006. Wyznaczanie parametrów migracji zanieczyszczeń w ośrodku porowatym dla potrzeb badań hydrogeologicznych i ochrony środowiska. UW Wydział Geologii, Warszawa.

Major M., Chudzińska M., Majewski M., 2022. Wielkość dostawy wybranych zanieczyszczeń atmosferycznych i ich wpływ na jakość wód w zurbanizowanej zlewni Różanego Strumienia w Poznaniu w latach hydrologicznych 2016–2020. Przegląd Geograficzny, 94(4): 415–436. https://doi.org/10.7163/PrzG.2022.4.1

Major M., Majewski M., Olejarczyk M., Zięba M., 2017. Stan i funkcjonowanie geoekosystemu zlewni Różanego Strumienia w Poznaniu w roku hydrologicznym 2016. Monitoring Środowiska Przyrodniczego, 19(1): 31–39.

Maraqa M.A., 2007. Retardation of nonlinearly sorbed solutes in porous media. J. Environ. Eng., 133, 12: 587–594.

Marciniak M., 1999. Identyfikacja parametrów hydrogeologicznych na podstawie skokowej zmiany potencjału hydraulicznego. Metoda PARAMEX. Wyd. Nauk. UAM, Poznań.

Marciniak M., Okońska M., 2017. Monitoring migracji zanieczyszczeń w wodach podziemnych. [W:] M. Major, M. Marciniak, L. Kolendowicz, J. Chmiel, M. Majewski, R. Kruszyk, M. Półrolniczak, M. Okońska, J. Gudowicz, M. Olejarczyk, M. Zięba, Raport z realizacji programu badawczo-pomiarowego Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego w Stacji Bazowej Różany Strumień w 2016 roku. WNGiG UAM, Poznań.

Marciniak M., Okońska M., 2021. Badanie migracji zanieczyszczeń w wodach podziemnych metodą modelowania matematycznego. Podstawy teoretycznie migracji zanieczyszczeń w wodzie porowej. [W:] M. Major, M. Marciniak, L. Kolendowicz, M. Chudzińska, M. Majewski, R. Kruszyk, M. Półrolniczak, M. Okońska, M. Stefaniak, Raport z realizacji programu badawczo-pomiarowego Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego w Stacji Bazowej Poznań-Morasko w 2020 roku. WNGiG UAM, Poznań.

Marciniak M., Okońska M., 2022. Badanie migracji zanieczyszczeń w wodach podziemnych metodą modelowania matematycznego. Analiza wpływu parametrów adwekcyjno-dyspersyjnych na migrację zanieczyszczeń w warstwie wodonośnej. [W:] M. Major, M. Marciniak, L. Kolendowicz, M. Chudzińska, M. Majewski, R. Kruszyk, M. Półrolniczak, M. Okońska, M. Stefaniak, Raport z realizacji programu badawczo-pomiarowego Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego w Stacji Bazowej Poznań-Morasko w 2021 roku. WNGiG UAM, Poznań.

Okońska M., Marciniak M., 2014. Modelowanie migracji znacznika w hydrowęźle badawczym na podstawie doświadczenia terenowego. [W:] A. Krawiec, I. Jamorska (red.), Modele matematyczne w hydrogeologii, Wyd. Nauk. UMK, Toruń: 193–197.

Okońska M., Wolny F., 2011. Rozpoznanie hydrogeologiczne jako element przygotowań do badań migracji znacznika w warstwie wodonośnej. Biuletyn PIG, 445: 447–454.

Pazdro Z., Kozerski B., 1990. Hydrogeologia ogólna. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa.

Ptak T., Piepenbrink M., Martac E., 2004. Tracer tests for the investigation of heterogeneous porous media and stochastic modelling of flow and transport – a review of some recent developments. Journal of Hydrology, 294: 122–163.

Xu M., Eckstein Y., 1995. Use of weighted least-squares method in evaluation of the relationship between dispersivity and field scale. Ground Water, 33, 6: 905–908.

Zuber A. (red.), 2007. Metody znacznikowe w badaniach hydrogeologicznych. Poradnik metodyczny. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.

Małgorzata Jóźwiak

Stowarzyszenie Naukowe Europejski Instytut Kształcenia Podyplomowego EIOS-Kielce,
malgorzata.jozwiak1013@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-8270-3898

Rozwój soraliów wargowych w plechach porostu *Hypogymnia physodes* eksponowanych na zanieczyszczenia w obszarach o zróżnicowanej antropopresji

Development of labial soralia in the thallus of the lichen *Hypogymnia physodes* exposed to pollution in areas with different anthropopressure

Zarys treści: Rozmnażanie i rozprzestrzenianie się porostów jest uzależnione od warunków środowiska. Pustułka pęcherzykowata *Hypogymnia physodes* jest porostem epifitycznym, listkowatym, w skali lichenoindykacyjnej zajmującym pozycję przeznaczoną dla porostów o średniej wrażliwości na zanieczyszczenia. Jej rozprzestrzenianie się w warunkach naturalnych zależy od sposobu rozmnażania, które odbywa się w wyniku fragmentacji plechy macierzystej lub przy udziale zlichenizowanych diaspor, tzw. sorediów – urwistków powstających w soraliach. Prezentowane badania dotyczą analizy rozwoju i zdrowotnej kondycji plech w oparciu o zliczanie soraliów wargowych. Do badań wykorzystano plechy po półrocznym, letnim okresie ekspozycji w 2021 r. Uzyskane wyniki wskazały, że najlepszą kondycją zdrowotną, a w związku z tym dużą ilością wytwarzanych soraliów wargowych, charakteryzowały się plechy pozyskane ze Stacji Bazowych ZMŚP Kampinos i Wigry, natomiast najgorszą porosty eksponowane w SB Wolin i SB Storkowo.

Słowa kluczowe: rozmnażanie, porost epifityczny, zlichenizowane diaspory, soralia wargowe

Abstract: The reproduction and spread of lichens are strictly dependent on environmental conditions. *Hypogymnia physodes* is an epiphytic, leafy lichen, occupying a position in the lichen-indicating scale for lichens of medium sensitivity to pollution. Its spread in natural conditions strictly depends on the method of reproduction, which takes place as a result of fragmentation of the mother thallus or with the participation of lichenized diaspores, the so-called soredia – cliffs formed in soralia. The presented research concerns the analysis of the development and health condition of the thallus based on the counting of labial soralia. The thallus after a six-month-summer exposure period in 2021 was used for the study. The obtained results indicate that the best health condition, and therefore a large number of labial soralia produced, are characterized by thalluses obtained from the Kampinos and Wigry Base Stations, while the lichens exposed in BS Wolin and BS Storkowo showed the worst.

Keywords: reproduction, epiphytic lichen,lichenized diaspores, labial soralia

Wprowadzenie

W 2001 r. po raz pierwszy wykonano badania mające na celu ocenę zanieczyszczenia powietrza metalami ciężkimi i dwutlenkiem siarki, w programie pomiarowym Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego. Wykorzystano w tym celu pustułkę pęcherzykowatą *Hypogymnia physodes*, porost, który jest dobrym bioindykatorem (Fałtynowicz 1995, Sawicka-Kapusta, Zakrzewska 2003). Charakteryzuje się szczególną wrażliwością przejawiającą się widocznymi zmianami makro- i mikroskopowymi wskutek skażenia plech. Zmiany te wynikają z kumulacji zanieczyszczeń w komórkach. Dzięki takiej wrażliwości może być wyznaczony poziom toksyczności dawki, która znalazła się w środowisku, co pozwala na przewidywanie odległych skutków występujących w organizmach po czasie ekspozycji na toksynę. Badania w Stacjach Bazowych ZMŚP są prowadzone systematycznie w cyklu półrocznym i obejmują okres letni oraz zimowy. Jest więc możliwy stały – całoroczny – monitoring stanu środowiska umożliwiający analizę przyczynowo-skutkowych związków w układzie presja–stan–reakcja. Metoda ta (DPSIR) wskazuje zależności między oddziaływaniem człowieka na środowisko, jakością poszczególnych komponentów środowiska i podejmowaniem działań zaradczych mających na celu poprawę istniejącej sytuacji. Przyjęta metoda badawcza zakłada monitoring aktywny (Jeran i in. 1995, Conti, Cecchetti 2001, Cortes 2003, Sawicka-Kapusta in. 2003, 2005, 2007, 2010, Jóźwiak 2007, 2009, 2010, 2014) polegający na transplantacji plech porostowych. Stosowane próbki odniesienia umożliwiają porównanie wyników uzyskanych z każdej stacji badawczej, z każdego miejsca pomiarowego.

Metodyka badań

Analiza rozwoju i zdrowotnej kondycji plech odbywała się w oparciu o zliczanie soraliów wargowych i była dokonywana po okresie półrocznej ekspozycji w 2021 r. Obejmowała wyniki z okresu ekspozycji letniej, tj. w miesiącach maj–październik. Metoda badawcza polegała na losowym wyborze dziesięciu fragmentów plechy o powierzchni 2 × 2 cm, z gałązek transplantowanych w monitorowanym obszarze każdej Stacji Bazowej ZMŚP. Plechy oddzielano od gałązek, a następnie, wykorzystując mikroskop stereoskopowy Nikon SMZ 1500 z programem NIS – Elements Basic Research, liczono ilość występujących soraliów wargowych na każdej badanej powierzchni plechy. Wyniki dokumentowano fotograficznie. Z całego okresu badań uzyskano 110 fotografii. Stwierdzone na każdym fragmencie plechy soralia wargowe, w których są wytwarzane diaspory, stanowiły podstawę do oceny możliwości rozprzestrzeniania się diaspor na badanym obszarze, a w związku z tym zwiększania zasięgu występowania pustułki pęcherzykowatej.

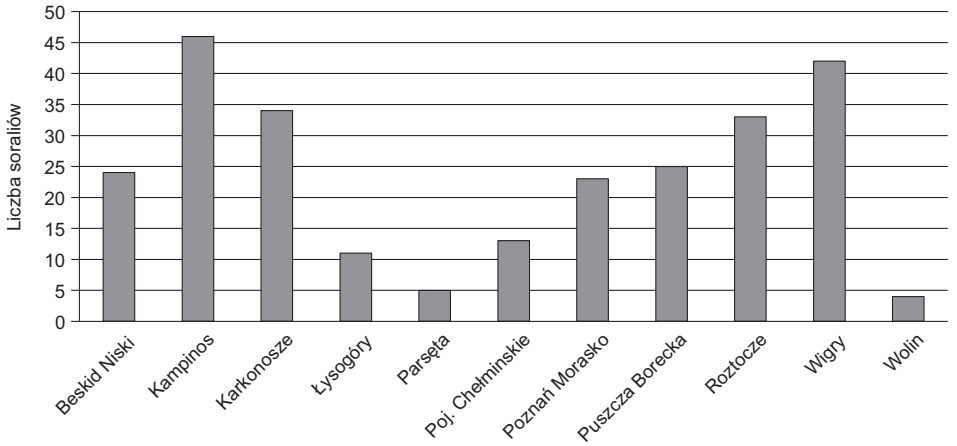
Na ocenę potencjalnych możliwości rozmnażania się porostów ma wpływ wilgotność, opad atmosferyczny oraz temperatura. Wymienione czynniki klimatyczne zostały wzięte pod uwagę podczas wnioskowania dotyczącego powstawania soraliów wargowych.

Charakterystyka obiektu badań

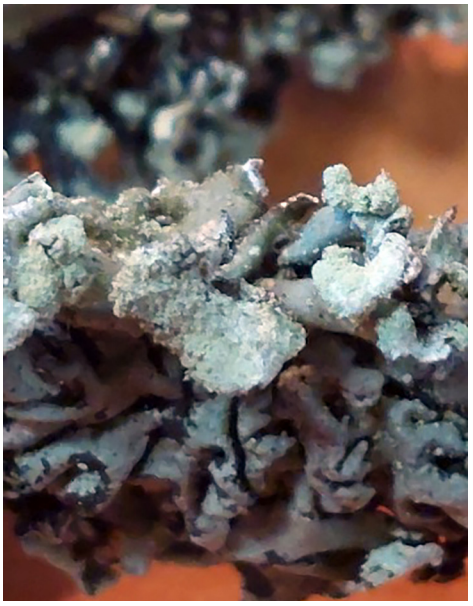
Pustułka pęcherzykowata *Hypogymnia physodes* jest listkowatym porostem epifitycznym umocowanym do kory pni drzew zmarszczkami kory dolnej, w skali lichenoindykacyjnej zajmującym pozycję przeznaczoną dla porostów o średniej wrażliwości na zanieczyszczenia (Fałtynowicz 1995). Wykazuje budowę przewarstwioną – heteromeryczną, z korą na górnej i dolnej stronie plechy. Jak wszystkie porosty, pustułka pęcherzykowata wykazuje dualizm budowy, w którym na zasadzie mutualizmu współżyją dwa organizmy – glon i grzyb, o odmiennych cechach i odmiennych wymaganiach biotopowych. Dzięki współżyciu obu organizmów, opartym na obopólnych korzyściach, powstaje porost – odrębny takson o swoistych dla siebie cechach. W budowie porostu partnerem mykobiontycznym jest grzybnia *Ascomycetes* (workowców). Paraplektenchyma jest zbudowana z krótkich strzępek grzyba stykających się ściankami. W przekroju poprzecznym komórki grzybowe są równowymiarowe – izodiametryczne. Wewnętrzną warstwę plechy, oprócz rozluźnionych strzępek grzybni, tworzą protokokoidalne jednokomórkowce, formujące kolonie, glony należące do *Chlorophyta* (zielenic) z rodzaju *Trebouxia* (Jóźwiak 2003, 2005). Komponent gonidialny plechy – glon, jest ułożony pojedynczo bądź w grupach między rozluźnionymi strzępkami grzybni i ma średnicę do 16 μm. Odmienność porostów w stosunku do budujących je komponentów przejawia się między innymi sposobem rozmnażania. Rozprzestrzenianie się w warunkach naturalnego występowania ściśle zależy od sposobu rozmnażania, które odbywa się w wyniku fragmentacji plechy macierzystej bądź przy udziale zlichenizowanych diaspor, tzw. sorediów – urwistków powstających w soraliach na brzegach plechy. Istotnym etapem w wegetatywnym rozmnażaniu porostów jest powstawanie soraliów (miejsc tworzenia sorediów), które tworzą się w wyniku nacisku rdzeniowej warstwy plechy na warstwę glonów. Efektem jest wypychanie kory górnej i jej pęknięcie umożliwiające wydostanie się urwistków/sorediów na zewnątrz. Soralia uwalniające soredia mogą powstawać na środku, na końcach odcinków lub na brzegach plechy, pojedynczo lub w skupiskach. W przypadku pustułki pęcherzykowatej są określane jako soralia wargowe, ze względu na charakterystyczne wywijanie przez nie brzegów plechy. Od ich ilości i zaawansowania stopnia rozwoju zależą reprodukcyjne procesy plech. Soredia składające się ze strzępek grzybów i komórek glonów rozprzestrzeniają się przy udziale wiatru. Po oddzieleniu od plechy macierzystej rozwija się nowy organizm o identycznych cechach genetycznych w stosunku do plechy macierzystej. Pustułka pęcherzykowata jest gatunkiem kosmopolitycznym, co predysponuje ją do stosowania w bioindykacji.

Wyniki

Wyniki zliczania soraliów wargowych, na powierzchni losowo pobranych próbek porostowych z każdej powierzchni badawczej, wskazały dobrą kondycję plech



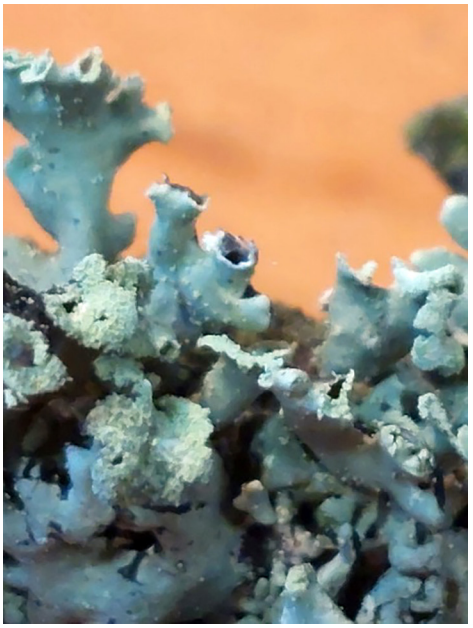
Ryc. 1. Suma soraliów występujących na powierzchni 4 cm² w 10 próbkach plech *Hypogymnia physodes* eksponowanych na terenie Stacji Bazowych ZMŚP
Fig. 1. Sum of soralia present on the area of 4 cm² in 10 samples of *Hypogymnia physodes* thallus exposed at Integrated Monitoring Base Stations



Ryc. 2. Prawidłowo wykształcone, mączyste soralia wargowe na plesze *Hypogymnia physodes* eksponowanej w Stacji Bazowej Kampinos (M.A. Jóźwiak)
Fig. 2. Mealy labial soralia on *Hypogymnia physodes* thallus exposed at the Base Station Kampinos (M.A. Jóźwiak)

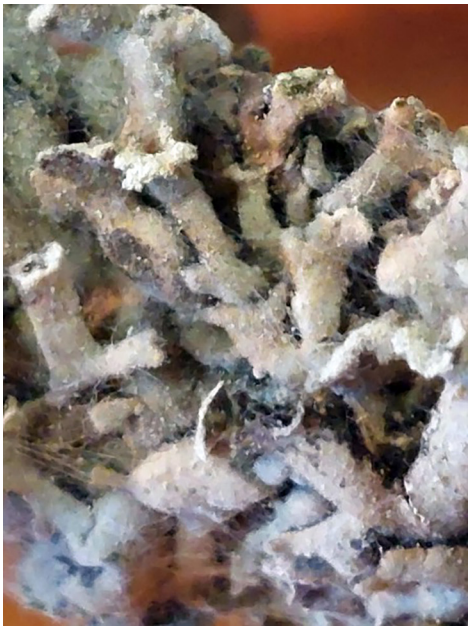
i duże możliwości rozmnażania porostów na obszarach monitorowanych przez Stacje Bazowe ZMŚP: Kampinos, Wigry, Karkonosze i Roztocze (ryc. 1–2). Porosty ze Stacji Bazowych: Beskid Niski, Puszcza Borecka i Poznań-Morasko charakteryzowała podobna, ale znacznie mniejsza ilość soraliów, w stosunku do wcześniej wymienionych stacji (ryc. 3). Plechy o sporadycznie występujących soraliach wargowych, z licznymi uszkodzeniami, wykruszeniami i barwnymi zmianami stwierdzono w próbkach badawczych ze Stacji Bazowych: Łysogóry, Parsęta, Pojezierze Chełmińskie i Wolin (ryc. 1, 4).

Przeanalizowano wpływ zanieczyszczeń powietrza metalami ciężkimi we wszystkich miejscach eksponowania porostów (ryc. 5–6), jak również warunki meteorologiczne panujące w okresie badań (ryc. 7–8), które mogły wpłynąć na stan i pojawienie się organów wegetatywnego rozmnażania plech. Stwierdzono, że



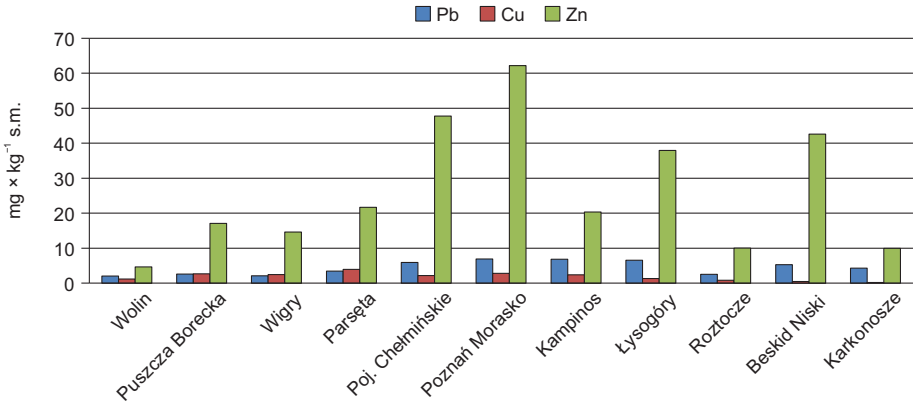
Ryc. 3. Nieliczne soralia wargowe na plechach pozyskanych w Stacji Bazowej Puszcza Borecka (M.A. Jóźwiak)

Fig. 3. Few labial soralia on thalluses obtained at the Base Station Puszcza Borecka (M.A. Jóźwiak)



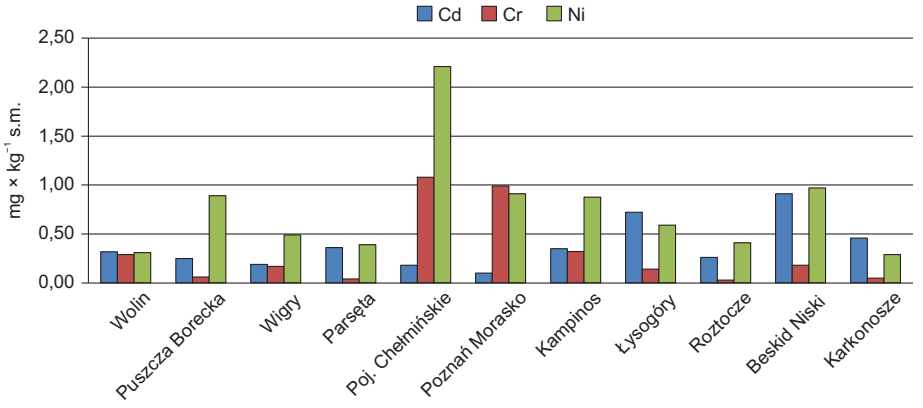
Ryc. 4. Odbarwiona i uszkodzona plecha z soraliami wargowymi na plesze *Hypogymnia physodes* eksponowanej w Stacji Bazowej Parsęta (M.A. Jóźwiak)

Fig. 4. Discolored and damaged thallus with labial soralia on *Hypogymnia physodes* thallus exposed at the Base Station Parsęta (M.A. Jóźwiak)

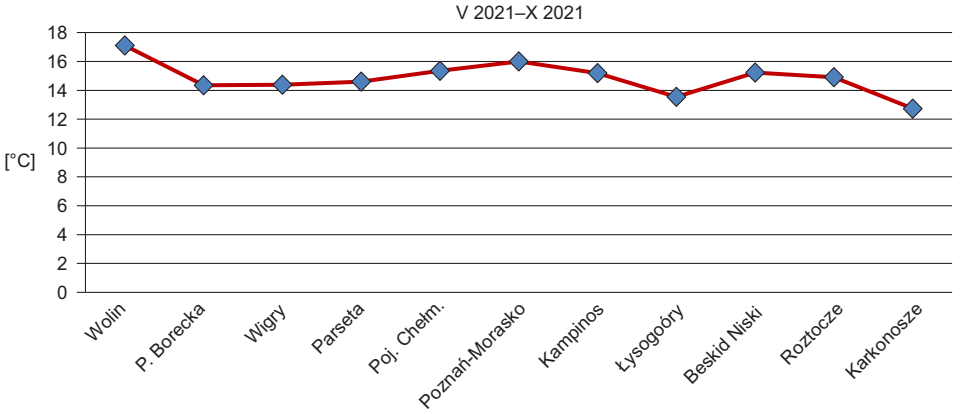


Ryc. 5. Stężenia ołowiu, miedzi i cynku w transplantowanych porostach eksponowanych na terenie Stacji Bazowych ZMŚP

Fig. 5. Concentrations of lead, copper and zinc in transplanted lichens exposed at Integrated Monitoring Base Stations



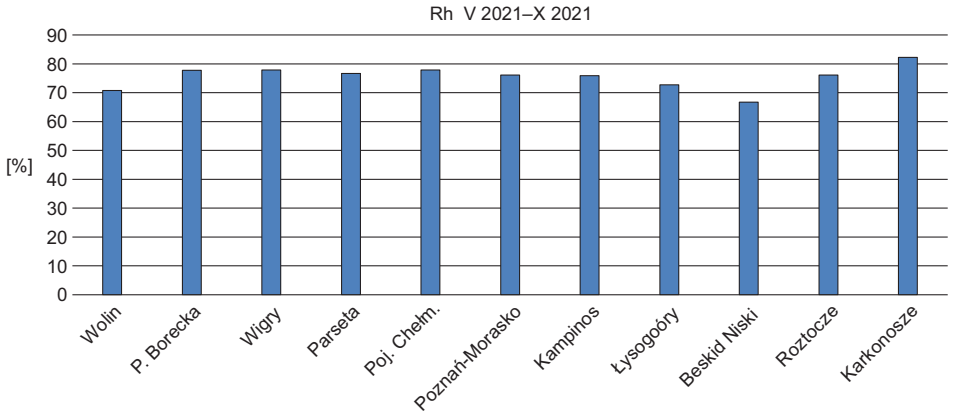
Ryc. 6. Stężenia kadmu, chromu i niklu w transplantowanych porostach eksponowanych na terenie Stacji Bazowych ZMŚP
Fig. 6. Concentrations of cadmium, chromium and nickel in transplanted lichens exposed at Integrated Monitoring Base Stations



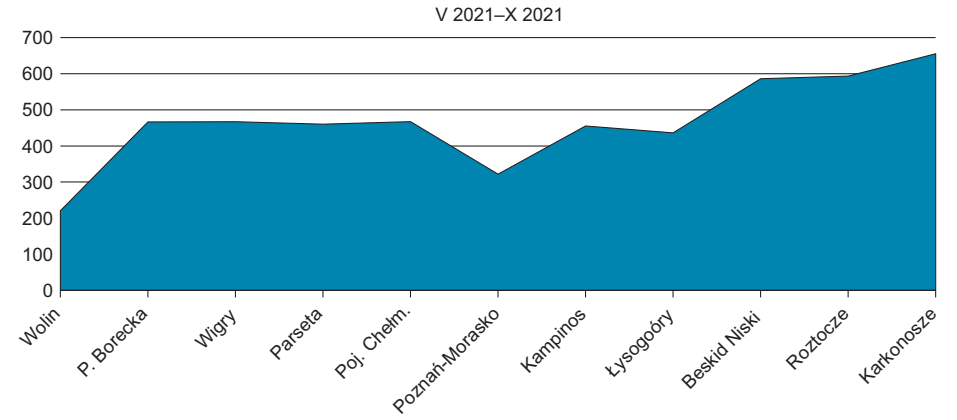
Ryc. 7. Średnie miesięczne temperatury powietrza w Stacjach Bazowych ZMŚP w 2021 r.
Fig. 7. Average monthly air temperatures at Integrated Monitoring Base Stations in 2021

porosty, na których zanotowano najmniejszą liczbę soraliów, były eksponowane na obszarze o najwyższych stężeniach cynku i ołowiu (Stacje Bazowe: Parsęta, Łysogóry, Pojezierze Chełmińskie, Poznań-Morasko, Beskid Niski i Puszcza Borecka).

Wpływ warunków meteorologicznych był wyraźnie widoczny w przypadku Stacji Bazowej Wolin, gdzie stwierdzono najniższą liczbę soraliów. Wysoka temperatura powietrza (17,1°C średnia miesięczna za okres V–X 2021 r.), stosunkowo niska wilgotność względna powietrza (70,8% średnia miesięczna za okres V–X 2021 r.) i opady (220,4 mm za okres V–X 2021 r.), a także bliskość morza wpłynęły na ograniczone wykształcanie się soraliów.



Ryc. 8. Średnia wilgotność względna w Stacjach Bazowych ZMŚP w 2021 r.
Fig. 8. Average relative humidity at Integrated Monitoring Base Stations in 2021



Ryc. 9. Miesięczne sumy opadów w Stacjach Bazowych ZMŚP w 2021 r.
Fig. 9. Monthly precipitation totals at Integrated Monitoring Base Stations in 2021

Podsumowanie

O stopniu zanieczyszczenia powietrza decydują trzy główne czynniki: wielkość i rodzaj emisji, imisja oraz warunki meteorologiczne warunkujące rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń. Najważniejsze z punktu widzenia obecności metali ciężkich w powietrzu są zanieczyszczenia pyłowe. Ich występowanie w obszarze ekspozycję porostów wynika z lokalizacji stacji bazowych w sąsiedztwie dużych aglomeracji (Stacje Bazowe: Kampinos, Poznań Morasko, Pojezierze Chełmińskie) lub na drodze przemieszczania się zanieczyszczonych mas powietrza z terenów przemysłowych (SB Łysogóry i SB Beskid Niski). Wpływ na rozmnażanie się porostów mają również mgły przesycone solą morską, które ze względu na ektohydryczność plech niszczą soralia, ograniczając w ten sposób ich rozmnażanie

i rozprzestrzenianie (SB Wolin). Duża wrażliwość porostów na wszystkie wymienione czynniki powoduje, że są bardzo dobrymi bioindykatorami.

Literatura

Conti M.E., Cecchetti G., 2001. Biological monitoring: lichens as bioindicators of air pollution assessment – a review. Environ. Poll., 114: 471–492.

Cortes E., 2003. Investigation of air pollution in Chile using biomonitors. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 262: 269–276.

Fałtynowicz W., 1995. Wykorzystanie porostów do oceny zanieczyszczenia powietrza. Zasady, metody, klucze do oznaczania wybranych gatunków. Centrum Edukacji Ekologicznej Wsi, Krosno.

Jeran Z., Byrne A.R., Batć F., 1995. Transplanted epiphytic lichens as biomonitors of air – contamination by natural radionuclides around the Źirowski VRH Uranium Mine, Slovenia. Lichenologist, 27: 375–385.

Jóźwiak M.A., 2007. Kumulacja metali ciężkich i zmiany morfologiczne w plechach porostu *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl. Monitoring Środowiska Przyrodniczego, 8: 51–56.

Jóźwiak M.A., 2009. Możliwości wykorzystania epifitów do oceny zanieczyszczenia powietrza w centralnej części Gór Świętokrzyskich. Monitoring Środowiska Przyrodniczego, 10: 57–64.

Jóźwiak M.A., 2010. Biomonitoring środowisk lądowych i wodnych. Uniwersytet Jana Kochanowskiego, Kielce.

Jóźwiak M.A., 2014. Wykorzystanie organizmów wskaźnikowych w bioindykacji środowisk lądowych i wodnych na wybranych przykładach. Kieleckie Towarzystwo Naukowe, PAN, Kraków.

Sawicka-Kapusta K., Zakrzewska M., 2003. Ocena zanieczyszczenia powietrza na Stacjach Bazowych Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego w 2001 roku. [W:] W. Bochenek, E. Gil (red.), Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Funkcjonowanie i monitoring geoekosystemów ze szczególnym uwzględnieniem zjawisk ekstremalnych. Biblioteka Monitoringu Środowiska: 20–29.

Sawicka-Kapusta K., Zakrzewska M., Bydłoń G., 2007. Biological monitoring – the useful metod for estimation of fair and environment quality. Air Pollution, 15: 353–362.

Sawicka-Kapusta K., Zakrzewska M., Bydłoń G., Hajduk J., 2010. Ocena zanieczyszczenia powietrza Stacji Bazowych ZMŚP metalami ciężkimi i dwutlenkiem siarki w latach 2001–2009 z wykorzystaniem porostu *Hypogymnia physodes*. Monitoring Środowiska Przyrodniczego, 11: 63–71.

Sawicka-Kapusta K., Zakrzewska M., Gdula-Argasińska J., 2005. Air pollution in the base stations of the Environmental Integrated Monitoring System in Poland. Air Pollution, 13: 465–475.

Janina Borysiak, Małgorzata Stępniewska

Wydział Geografii Społeczno-Ekonomicznej i Gospodarki Przestrzennej,
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, janina.borysiak@amu.edu.pl,
JB https://orcid.org/0000-0001-8957-7372, MS https://orcid.org/0000-0003-1052-648X

Fitoindykatory siedlisk przyrodniczych Natura 2000 jako miejsc koncentracji wiązki usług ekosystemów w dolinie rzeki Dębnicy (Pomorze Zachodnie)

Phytoindicators of Natura 2000 natural habitats as places of concentration of ecosystem services in the Dębnica River valley (Western Pomerania)

Zarys treści: W latach 2011–2021 przeprowadzono badania w dolinie rzeki Dębnicy, mające na celu: 1) identyfikację siedlisk N2000 i ich fitosocjologicznych indykatorów; 2) wytypowanie siedlisk N2000 najczęściej występujących i zajmujących największą powierzchnię; 3) analizę poziomu świadczenia wiązki regulacyjnych usług ekosystemowych przez wytypowane siedliska N2000, ze wskazaniem miejsc koncentracji wiązki usług. Wytypowanymi siedliskami były: *91E0 *Fraxino-Alnetum*, 9110 *Deschampsio flexuosae-Fagetum* i 9160 *Stellario holosteae-Carpinetum betuli*. Wiązką rozpatrywanych usług (wg kodów CICES V5.1) były: 2.2.1.1. Kontrola tempa erozji, 2.2.1.2. Buforowanie i tłumienie ruchów masowych, 2.2.1.3. Regulacja obiegu hydrologicznego i przepływu wód. Stwierdzono, że poziom świadczenia usługi zależy od troficzno-dynamicznej postaci ekosystemu w randze podzespołu, fitoindykatora rozpatrywanego na gruncie fitosocjologii.

Słowa kluczowe: bioróżnorodność, siedlisko N2000, wiązka usług ekosystemów, zespół roślinny

Abstract: In 2011–2021, research was carried out in the Dębnica River valley, aimed at: 1) identification of N2000 habitats and their phytosociological indicators; 2) selection of the most common N2000 habitats covering the largest area; 3) analysis of the level of provision of the regulation ecosystem services bundle by selected N2000 habitats. The selected habitats were: *91E0 *Fraxino-Alnetum*, 9110 *Deschampsio flexuosae-Fagetum*, and 9160 *Stellario holosteae-Carpinetum betuli*. On the other hand, the group of the considered services (according to CICES V5.1 codes) were: 2.2.1.1. Erosion rate control, 2.2.1.2. Buffering and damping of mass movements, 2.2.1.3. Regulation of the hydrological cycle and water

flow. It was found that the level (quality) of service provision depends on the trophic–dynamic form of the ecosystem in the rank of a subassociation considered in terms of phytosociology.

Keywords: biodiversity, ecosystem services bundle, Natura 2000 habitat, plant association

Wprowadzenie

Europejska Sieć Ekologiczna Natura 2000 ma chronić bioróżnorodność krajów Unii Europejskiej – siedliska przyrodnicze oraz gatunki flory i fauny (Rozporządzenie, 2012), ze względu na dostarczanie przez nią usług ekosystemowych wyszczególnionych w klasyfikacji CICES V5.1 (https://cices.eu/; Bastian 2013, Schirpke i in. 2014). Plany zadań ochronnych wykonane dla obszarów polskiej części sieci ujawniły braki w wiedzy o chronionej przez nią bioróżnorodności, a zatem i o miejscach koncentracji usług ekosystemów. Braki te są widoczne już w standardowych formularzach danych (http://natura2000.gdos.gov.pl). W tabelach 3.1 tych formularzy, określających jakość danych odnośnie do stanu wiedzy o siedlisku lub gatunku, często figuruje M, a nierzadko P, co według Instrukcji (2012) oznacza dane przeciętnej lub niskiej jakości, pochodzące m.in. z: nieopublikowanych obserwacji, nieaktualnych materiałów archiwalnych, prac niezrecenzowanych przez specjalistów, szacowania zamiast inwentaryzacji terenowej i zobrazowań teledetekcyjnych. Braki takie widać też w raportach przekazywanych Komisji Europejskiej, zawierających wyniki monitoringu stanu ochrony wykonywanego standaryzowanymi metodami (http://siedliska.gios.gov.pl). Monitoring dotyczy m.in. florystycznej, fizjonomicznej i funkcjonalnej struktury zespołów roślinnych będących fitoindykatorami siedlisk przyrodniczych N2000. Od zróżnicowania tej struktury, odzwierciedlającego warunki ekologiczne (Matuszkiewicz 2022), zależy poziom dostarczania usług ekosystemowych (Science 2015, Maes i in. 2020). W systemie CICES V5.1 usługi regulacyjne to nic innego jak ekologiczne funkcje bioróżnorodności w krajobrazie, ale rozpatrywane w aspekcie znaczenia dla dobrobytu człowieka (https://cices.eu/).

W latach 2011–2021 przeprowadzono geobotaniczne badania doliny rzeki Dębnicy (w zlewni Parsęty na Pomorzu Zachodnim), w całym 40-kilometrowym biegu rzeki. Motywacją do działania był brak publikacji dotyczących bioróżnorodności doliny rzecznej chronionej w sieci N2000, a także usług ekosystemów dostarczanych przez siedliska przyrodnicze. Teren badań leżał na specjalnych obszarach ochrony siedlisk; w całości w PLH320007 Dorzecze Parsęty, a po części w PLH320039 Jeziora Czaplineckie. Badania podjęto w celu: 1) identyfikacji zespołów roślinnych należących do fitoindykatorów siedlisk przyrodniczych N2000 występujących w dolinie rzeki Dębnicy; 2) wytypowania siedlisk przyrodniczych N2000 najczęściej występujących i zajmujących największą łączną powierzchnię; 3) określenia poziomu (jakości) wybranej wiązki usług ekosystemowych świadczonych przez wytypowane siedliska; 4) wskazania miejsc koncentracji regulacyjnych usług wytypowanych ekosystemów doliny rzecznej.

Teren badań

Skartowano dolinę rzeki Dębnicy w całym jej biegu. Rzeka jest ciekiem II rzędu (dopływem Parsęty). Ma 40 km długości, średni spadek 2,8‰ i zlewnię 289 km^2 (Najwer i in. 2016). Według Kondrackiego (2022) zlewnia Dębnicy leży w mezoregionach: Wysoczyzna Łobeska 314.44, Pojezierze Drawskie 314.45 i Równina Białogardzka 313.42; na obszarach fazy pomorskiej zlodowacenia vistulian (Karczewski 1989). Dolina jest zróżnicowana na morfodynamiczne strefy związane z: przełomami przez wzgórza moren (czołowych, ablacyjnych, martwego lodu), rynną subglacjalną i doliną wód fluwioglacjalnych. Stale podlega procesom denudacji, erozji i akumulacji (Mazurek 2010). Przeważa w niej użytkowanie leśne (Najwer i in. 2016, Borysiak 2018).

Metody i materiał

Zespoły roślinne identyfikowano fitosocjologiczną metodą Brauna-Blanqueta, stosując syntaksonomię z przewodnika Matuszkiewicza (2022). Zespoły przypisano do typów siedlisk przyrodniczych N2000, na podstawie poradników Herbicha (2004). Są one fitoindykatorami tych siedlisk. Związek siedlisk N2000 z dolinnymi warunkami środowiskowymi określono na podstawie własnych terenowych analiz eksperckich oraz monografii Herbicha (1994). Wskazano miejsca koncentracji usług ekosystemów w dolinie. Założono, że są nimi wszystkie fitocenozy zidentyfikowanych zespołów roślinnych określających typy siedlisk N2000. Do realizacji trzeciego wymienionego celu, z klasyfikacji CICES V5.1 (https://cices.eu/), wybrano wiązkę trzech usług ekosystemowych. Są to: 2.2.1.1. Kontrola tempa erozji, 2.2.1.2. Buforowanie i tłumienie ruchów masowych, 2.2.1.3. Regulacja obiegu hydrologicznego i przepływu wód. Szacunkowo oceniono poziom (jakość) świadczonych usług, stosując 3-stopniową skalę: 1 – stopień niski, 2 – średni, 3 – wysoki (tab. 1A–C). Wykorzystując taką samą skalę, oszacowano potencjalne zagrożenia erozją wodną (tab. 1A) oraz ruchami masowymi (tab. 1B), wynikające z uwarunkowań abiotycznych (tab. 1D). Wyniki zamieszczone w kolumnach A–C są oceną ekspercką na podstawie funkcjonalno-strukturalnych cech zespołów (tab. 1E), pozytywnie i istotnie wpływających na poziom świadczenia usługi. W oparciu o terenowe obserwacje biologicznych cech fitoindykatorów wskazano strategie realizowane przez gatunki roślin w warunkach morfolitodynamiki doliny rzecznej. Strategie analizowano, biorąc pod uwagę potencjał zawarty w autekologii oraz morfologiczno-rozwojowych cechach gatunków roślin. Cechy systemów korzeniowych drzew podano na podstawie literatury przedmiotu oraz własnych obserwacji odsłoniętych systemów korzeniowych *Alnus glutinosa*, *Carpinus betulus* i *Fagus sylvatica*, a także powałów tych gatunków drzew.

Tabela 1. Potencjalne zagrożenie erozją i ruchami masowymi oraz poziom usług ekosystemów, w zależności od troficzno-dynamicznej postaci zespołu roślinnego reprezentującego siedlisko Natura 2000 w dolinie rzeki Dębnica (Pomorze Zachodnie)
Table 1. Potential threat of erosion and mass movements as well as the level of ecosystem services bundle, depending on the trophic and dynamic state of the plant association representing the Natura 2000 habitat in the Dębnica River valley (Western Pomerania)

Potencjalne zagrożenie/ poziom usługi ekosystemów			Kod Natura 2000/podzespół roślinny/ siedlisko	Strukturalne cechy leśnych fitocenoz pozytywnie wpływające na poziom usług ekosystemów
2.2.1.1. Kontrola tempa erozji	2.2.1.2. Buforowanie i tłumienie ruchów masowych	2.2.1.3. Regulacja obiegu hydrologicznego i przepływu wód		
A	B	C	D	E
2/3	2/3	3/3	*91E0/Łęg jesionowo-olszowy *Fraxino-Alnetum typicum* postać typowa /wysoki i ruchomy poziom wody gruntowej, tereny słabo nachylone, opadające do koryta rzeki Dębnicy	W optymalnych stadiach rozwoju ekosystemu łęgu złożona fizjonomia i intensywnie rozwinięta ryzosfera. Duże zwarcie drzew, zwykle też podrostu i krzewów. Często 90–100% pokrycia w warstwie zielnej budowanej głównie przez rośliny higrofilne wymagające stałej i wysokiej wilgotności gleb (ryc. 1A). Rozległy system korzeniowy olszy czarnej *Alnus glutinosa* wiążący dużą objętość gleby. Na powierzchni ziemi rozwidlone, grube korzenie przybyszowe o dużym zwarciu, czasami zrośnięte i ustawione pionowo, dobrze umocowane w podłożu. Rzeźbotwórcza rola systemu korzeniowego olszy czarnej – tworzenie m.in. ostróg i ławic korytowych spowalniających odpływ wody i zatrzymujących przemiały rzeczne. Gromadzenie wody opadowej spływającej po pniu olszy, przez mszaki masowo pokrywające korę dolnych partii pnia oraz dzięki możliwości obfitego wykształcania odrośli pędów u nasady szyi korzeniowej. Bardzo szybko rozkładające się opadłe liście olszy (C/N = średnio 16) dostarczające próchnicy glebowej retencjonującej wodę

1/3	1/3	3/3	*91E0/Łęg jesionowo-olszowy *Fraxino-Alnetum caricetosum acutiformae* postać torfowiskowa/ teren płaski lub płytko zagłębiony w dnie doliny z wysokim poziomem wody gruntowej, z tendencją do okresowej stagnacji wody	Fizjonomia lasu i systemy korzeniowe *Alnus glutinosa* równie dobrze rozwinięte jak w fitocenozach podzespołu typowego *F.-A. typicum* (ryc. 1B). Duży powierzchniowy udział torfotwórczej turzycy błotnej *Carex acutiformis* (ryc. 1C) z obfitymi podziemnymi rozłogami intensywnie przerastającymi glebę. Sedentacja olchowo-turzycowego torfu niskiego gromadzącego wodę
2/2	2/2	3/2	*91E0/Łęg jesionowo-olszowy *Fraxino-Alnetum chrysosplenietosum alternifolii* postać źródliskowa / strefy wypływów wód podziemnych, najczęściej pod zboczem doliny (ryc. 1D)	Często duże pokrycie (70–80%) roślinnością zielną przystosowaną do stałego nasycania gleby wodą, łagodzącą skutki erozji źródliskowej i wodnej powierzchniowej. Fizjonomia łęgu mniej złożona niż w fitocenozach typowych postaci łęgu *F.-A. typicum*. Za to systemy korzeni przybyszowych olszy równie dobrze wykształcone
2/2	1/2	3/2	9160/Subatlantycki grąd *Stellario holosteae-Carpinetum betuli stachyetosum sylvaticae* niski oraz typowy *S.h.-C.b. typicum*/ wklęsłe formy rzeźby terenu w stokach doliny, stożki i półki usypiskowe (ryc. 1E), stożki napływowe u wylotu bocznych dolinek	Duże zwarcie drzewostanu (80–90%), co najwyżej średnie zwarcie podrostu i warstwy krzewów, zwykle średnie pokrycie roślinnością zielną (40–70%) z wydatnym udziałem roślin higrofilnych w grądzie niskim, mezofilnych w typowym. Mniejsze rozmiary graba aniżeli buka (cecha biologii rozwoju). Na stromych stokach, u graba (podobnie jak u buka) system licznych korzeni przybyszowych, mocujących drzewo w podłożu i wiążących glebę (ryc. 1F)

3/3	3/3	3/3	9110/Kwaśna buczyna niżowa *Deschampsio flexuosae-Fagetum typicum* postać typowa/ustabilizowane (zakonserwowane) strome i wypukłe fragmenty stoków doliny (ryc. 2A)	W optymalnym stadium rozwoju ekosystemu, rozległy system korzeniowy *Fagus sylvatica* – liczne, rozgałęzione i skupione korzenie przybyszowe poziome (ryc. 2B) z gęstymi odgałęzieniami krótkich i cienkich pionowych w glebie, rozmieszczone nad glebą i w jej górnej warstwie; od strony stoku często nieco słabszy rozwój korzeni przybyszowych. Dobrze wykształcona warstwa mszysta na stokach o dużym nachyleniu (ryc. 2C). Lokalnie, poziom ściółki i butwiny z opadłych liści buka, o dużej miąższości, z trudno rozkładających się liści buka (C/N = średnio 45). Juwenilne stadia rozwoju buczyny inicjowane samosiewnym odnowieniem buka w lukach drzewostanowych i podokapowo (ryc. 2D). Wówczas wysoka liczebność osobników w nalocie i podroście buka, gęsta sieć przenikających się gałęzi drzew, intensywnie wykształcona ryzosfera

Ryc. 1. Strukturalne cechy leśnych fitocenoz *Fraxino-Alnetum* i *Stellario holosteae-Carpinetum*, pozytywnie wpływające na poziom usług ekosystemów

A – *Fraxino-Alnetum typicum*, dobrze wykształcona warstwa zielna z dużym udziałem higrofitów, czyli roślin zależnych od stałej i wysokiej wilgotności gleby; B – rozległy system korzeniowy *Alnus glutinosa* w płacie *Fraxino-Alnetum caricetosum acutiformae*, chroniący koryto rzeki Dębnicy przed erozją boczną; grube i rozwidlone korzenie przybyszowe, o dużym zwarciu, czasami zrośnięte, ustawione pionowo, dobrze zakotwiczone w podłożu; C – kontrola retencji wodnej przez torfotwórczy podzespół łęgu jesionowo-olszowego *Fraxino-Alnetum caricetosum acutiformae*; D – źródliskowa postać łęgu jesionowo-olszowego *Fraxino-Alnetum chrysosplenietosum alternifolii* w strefie wypływów wód podziemnych; E – *Stellario holosteae-Carpinetum typicum* w dolnej części płaskiej półki przylegającej do koryta rzeki Dębnicy; F – *Carpinus betulus* z podporowymi korzeniami przybyszowymi stabilizującymi drzewo, a równocześnie chroniącymi stromy stok doliny przed erozją i ruchami masowymi

Fig. 1. Structural features of forest phytocoenoses *Fraxino-Alnetu*m and *Stellario holosteae-Carpinetum* positively influencing the level of ecosystem services

A – *Fraxino-Alnetum typicum*; a well-developed herb layer with a high proportion of hygrophytes, i.e. plants dependent on constant and high soil moisture; B – the intensive root system of *Alnus glutinosa* in *Fraxino-Alnetum caricetosum acutiformae*, conserving the Dębnica riverbed against water erosion; thick and bifurcated adventitious roots, compact, sometimes fused, set vertically, well anchored in the soil; C – water retention control by the peat-forming sub-association of *Fraxino-Alnetum caricetosum acutiformae*; D – the spring sub-association of *Fraxino-Alnetum chrysosplenietosum alternifolii* in the zone of groundwater outflow; E – *Stellario holosteae-Carpinetum typicum* in the lower part of the flat shelf adjacent to the Dębnica river bed; F – *Carpinus betulus* with adventitious roots stabilizing the tree and at the same time conserving the steep slope of the river valley against erosion and mass movements

A

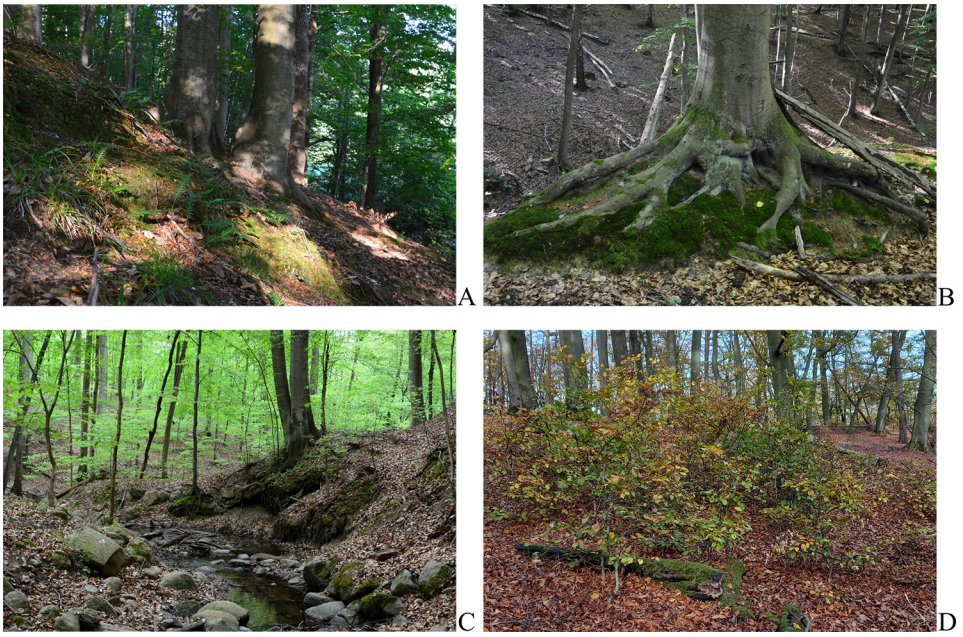
B

C

D

E

F



Ryc. 2. Strukturalne cechy leśnych fitocenoz *Deschampsio flexuosae-Fagetum*, pozytywnie wpływające na poziom usług ekosystemów
A – starodrzew kwaśnej buczyny niżowej *Deschampsio flexuosae-Fagetum typicum* stabilizujący górną partię stromego stoku doliny; dobrze wykształcona warstwa mszysta retencjonująca wodę opadową, chroniąca stok przed erozją i ruchami masowymi; B – system korzeniowy *Fagus sylvatica* z licznymi, rozgałęzionymi i skupionymi korzeniami przybyszowymi; C – system korzeniowy *Fagus sylvatica* łagodzący erozję boczną koryta rzecznego Dębnicy; D – juwenilne stadium rozwoju kwaśnej buczyny niżowej inicjowane samosiewnym odnowieniem buka zwyczajnego w luce drzewostanu; poziom ściółki i butwiny o dużej miąższości, z trudno rozkładających się liści buka

Fig. 2. Structural features of forest phytocoenoses *Deschampsio flexuosae-Fagetum* positively influencing the level of ecosystem services
A – *Deschampsio flexuosae-Fagetum typicum* stabilizes the upper part of the steep slope of the valley; well-developed moss layer retains rainwater and conserves the slope against erosion and mass movements; B – *Fagus sylvatica* root system with numerous branched and firmly clustered adventitious roots; C – *Fagus sylvatica* root system mitigating lateral erosion of the Dębnica river bed; D – the juvenile stage of development of the *Deschampsio flexuosae-Fagetum* ecosystem, initiated by self-seeding of the beech; mulch made of hard-decomposing beech leaves

Wyniki

Fitoindykatory typów siedlisk przyrodniczych Natura 2000

W dolinie rzeki Dębnicy zidentyfikowano 93 zespoły roślinne. Spośród nich 22 były fitosocjologicznymi fitoindykatorami łącznie 9 typów siedlisk przyrodniczych N2000. Największą różnorodność wykazały ziołorośla – kod 6430. Były reprezentowane przez 13 zespołów z *Convolvuletalia sepium*. Najczęściej występowały

fitocenozy *Urtico-Convolvuletum sepium* i *Stachyo sylvaticae-Impatientetum noli-tangere*, zazwyczaj wykształcone w okrajkach łęgów *Fraxino-Alnetum* (*91E0). Ekosystemami leśnymi o największym łącznym areale były: *91E0 *Fraxino-Alnetum*, 9110 *Deschampsio flexuosae-Fagetum* (= *Luzulo pilosae-Fagetum*) i 9160 *Stellario holosteae--Carpinetum betuli*. Trzy siedliska N2000 należały do priorytetowych: *91E0 *Fraxino-Alnetum*, *91D0 *Vaccinio uliginosi-Betuletum* i *91E0 *Salicetum albae* z *Salicetum triandro-viminalis*.

Poziom usług ekosystemowych w zależności od zespołu roślinnego i jego postaci

Analizie wiązki trzech usług ekosystemowych poddano 3 leśne siedliska o największym łącznym areale w dolinie rzeki Dębnicy i były to: *91E0 *Fraxino-Alnetum*, 9110 *Deschampsio flexuosae-Fagetum* oraz 9160 *Stellario holosteae-Carpinetum betuli*. Wyniki tej analizy zamieszczono w tabeli 1. Rozmieszczenie płatów wymienionych zespołów na stokach doliny jest odzwierciedleniem mechanizmu starzenia się i odmładzania siedlisk, związanego z ruchami masowymi, erozją boczną wód rzecznych i wsteczną erozją źródeł. Stwierdzono, że każda z dwóch rozważanych usług ekosystemów diagnozowana na najniższym, czyli najbardziej szczegółowym poziomie klasyfikacji CICES V5.1 (jakim jest klasa usługi), zależy od zespołu roślinnego, a poziom usługi (inaczej jakość dostarczanego świadczenia) – od jego postaci w randze podzespołu. Pokazuje to tabela 1 na przykładzie podzespołów odzwierciedlających zróżnicowanie lokalnych warunków ekologicznych i dynamikę rozwojową ekosystemów leśnych, a zatem odzwierciedlających poziom świadczenia analizowanej wiązki usług.

Podsumowanie

W dolinie rzeki Dębnicy zidentyfikowano 93 zespoły roślinne. Spośród nich 22 reprezentowały 9 typów siedlisk przyrodniczych N2000. Przedstawione wyniki są istotnym wkładem do znajomości szaty roślinnej oraz stanu zachowania siedlisk przyrodniczych dwóch obszarów Natura 2000, a mianowicie PLH320007 Dorzecze Parsęty i PLH320039 Jeziora Czaplineckie. Zdiagnozowano związek leśnych zespołów roślinnych reprezentatywnych dla siedlisk N2000 z dolinnymi warunkami środowiskowymi. Analizie poddano 3 leśne siedliska przyrodnicze N2000 występujące w dolinie rzeki Dębnicy najczęściej i na największej łącznej powierzchni. Były to: *91E0 *Fraxino-Alnetum*, 9110 *Deschampsio flexuosae-Fagetum* (= *Luzulo pilosae-Fagetum*) i 9160 *Stellario holosteae-Carpinetum betuli*. Biorąc pod uwagę funkcjonalno-strukturalne cechy tych leśnych ekosystemów, oszacowano poziom świadczenia wiązki trzech usług ekosystemowych, którymi były: 2.2.1.1. Kontrola tempa erozji, 2.2.1.2. Buforowanie i tłumienie ruchów masowych, 2.2.1.3. Regulacja obiegu hydrologicznego i przepływu wód. Uznano, że wszystkie obszary w dolinie rzeki Dębnicy, na których występują analizowane leśne siedliska N2000 są miejscami koncentracji wiązki rozważanych regulacyjnych usług

ekosystemowych. Stwierdzono, że poziom (jakość) świadczenia usług ekosystemowych zależał nie tylko od typu ekosystemu, ale od jego troficzno-dynamicznej postaci. W dotychczasowych publikacjach dotyczących usług ekosystemowych nie znaleziono wyników badań, które przedstawiałyby udokumentowaną tutaj zależność na podstawie kartowania terenowego, w związku z tym nie przeprowadzono dyskusji.

Podziękowania

Projekt „Usługi świadczone przez główne typy ekosystemów w Polsce – podejście stosowane" korzysta z dofinansowania otrzymanego od Islandii, Liechtensteinu i Norwegii w ramach mechanizmów finansowych EOG, o wartości 6 540 768 zł, a także dofinansowania z budżetu państwa w wysokości 1 154 253 zł. Celami projektu są: 1) przeniesienie wiedzy naukowej na temat usług ekosystemowych, istniejącej w Europie, do procesu rozpoznania i oceny usług ekosystemowych w Polsce; 2) zwiększenie potencjału naukowego, a także zdolności służb administracji i grup społecznych do wdrażania koncepcji usług ekosystemów w zarządzaniu środowiskiem.

Literatura

Bastian O., 2013. The role of biodiversity in supporting ecosystem services in Natura 2000 sites. Ecological Indicators, 24: 12–22.

Borysiak J., 2018. Dolinna roślinność rzeki Dębnicy i jej dopływów (dorzecze Parsęty, Pomorze Zachodnie) – bioróżnorodność syntaksonomiczna. [W:] W. Bochenek, M. Kijowska-Strugała (red.), Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Ocena funkcjonowania i kierunków zmian środowiska przyrodniczego Polski na podstawie wieloletnich badań stacjonarnych. Biblioteka Monitoringu Środowiska: 59–66.

Herbich J., 1994. Przestrzenno-dynamiczne zróżnicowanie roślinności dolin w krajobrazie młodoglacjalnym na przykładzie Pojezierza Kaszubskiego. Monographiae Botanicae, 76.

Herbich (red.), 2004. Poradniki ochrony siedlisk i gatunków Natura 2000 – podręcznik metodyczny, 1–3, 5. Ministerstwo Środowiska, Warszawa.

Instrukcja wypełniania Standardowego Formularza Danych obszaru Natura 2000, 2012. Generalna Dyrekcja Ochrony Środowiska, Warszawa.

Karczewski A., 1989. Morfogeneza strefy marginalnej fazy pomorskiej na obszarze lobu Parsęty w vistulianie (Pomorze Środkowe). Wyd. Nauk. UAM, Poznań.

Kondracki J., 2022. Geografia regionalna Polski. PWN, Warszawa.

Maes J., Teller A., Erhard M., Condé S., Vallecillo S., Barredo J.I., Paracchini M.L. i in., 2020. Mapping and assessment of ecosystems and their services: An EU ecosystem assessment, EUR 30161 EN. Publications Office of the European Union, Ispra.

Matuszkiewicz W., 2022. Przewodnik do oznaczania zbiorowisk roślinnych Polski. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa.

Mazurek M., 2010. Hydrogeomorfologia obszarów źródliskowych (dorzecze Parsęty, Polska NW). Wyd. Nauk. UAM, Geografia, 92.

Najwer A., Borysiak J., Gudowicz J., Mazurek M., Zwoliński Z., 2016. The relationships between geodiversity and biodiversity in the postglacial landscape (Dębnica catchment, West Pomerania, Poland). Quaestiones Geographicae, 35: 5–28.

Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 9 sierpnia 2012 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie siedlisk przyrodniczych oraz gatunków będących przedmiotem zainteresowania Wspólnoty, a także kryteriów wyboru obszarów kwalifikujących się do uznania lub wyznaczenia jako obszary Natura 2000 (Dz.U. 2012, poz. 1041).

Schirpke U., Scolozzi R., De Marco C., Tappeiner U., 2014. Mapping beneficiaries of ecosystem services flows from Natura 2000 sites. Ecosystem Services, 9: 170–179.

Science for Environment Policy. 2015. Ecosystem Services and the Environment. In-depth Report 11, DG Environment by the Science Communication Unit, UWE, Bristol.

Andrzej Kostrzewski[1,2], Marek Marciniak[1], Józef Szpikowski[1,3], Mikołaj Majewski[1,2], Tomasz Szeląg[1,2]

[1]Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, anko@amu.edu.pl
[2]Centrum Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu
[3]Stacja Geokologiczna w Storkowie, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu
AK https://orcid.org/0000-0001-5407-3617, MaM https://orcid.org/0000-0002-5377-5585,
JS https://orcid.org/0000-0001-9537-3261, MiM https://orcid.org/0000-0003-0864-9720,
TS https://orcid.org/

Założenia i realizacja problematyki monitoringu środowiska przyrodniczego w dydaktyce uniwersyteckiej

Assumptions and implementation of the issues of monitoring the natural environment in university didactics

Zarys treści: W oparciu o ankietę przeprowadzoną w wybranych szkołach wyższych w Polsce stwierdzono, że Monitoring Środowiska Przyrodniczego (MŚP) realizowany jest w formie wykładów, a także ćwiczeń jako wydzielony przedmiot na kierunkach przyrodniczych, społecznych i inżynierskich. Problematyka MŚP podejmowana jest w projektach badawczych studenckich kół naukowych. Brakuje niestety studiów podyplomowych w zakresie podnoszenia kwalifikacji zawodowych, umiejętności badawczych osób związanych z monitoringiem i ochroną środowiska. Pilną potrzebą jest opracowanie podręcznika z przedmiotu monitoring środowiska przyrodniczego, którego założenia wpisują się w aktualną problematykę zrównoważonego rozwoju i ochrony środowiska przyrodniczego.

Słowa kluczowe: monitoring środowiska przyrodniczego, studia podyplomowe, ochrona środowiska, zrównoważony rozwój

Abstract: Based on the prepared questionnaire in selected universities in Poland, it was found that Monitoring of the Natural Environment (SME) is carried out in the form of lectures and exercises, as a separate subject in natural, social and engineering faculties. The issue of SMEs is implemented in research projects of Student Science Clubs. Unfortunately, there are no Postgraduate Studies in the field of improving professional qualifications and research skills of people related to environmental monitoring and protection. There is

an urgent need to develop a textbook on the subject of Natural Environment Monitoring, the assumptions of which are in line with the current issues of sustainable development and environmental protection.

Keywords: Monitoring of the Natural Environment, Postgraduate Studies, environmental protection, sustainable development

Wprowadzenie

Współczesny rozwój środowiska przyrodniczego odznacza się dużą dynamiką m.in. w zakresie zmian klimatu, zwiększonej częstotliwości procesów ekstremalnych ze skutkami katastrofalnymi i narastającą antropopresją. Sprawą priorytetową w badaniach środowiskowych jest rozpoznanie charakteru i tendencji zmian środowiskowych oraz wskazanie zabiegów ochronnych. W naukach przyrodniczych i naukach o Ziemi, przy użyciu różnych metod, dokonywana jest ocena jakościowa i ilościowa zachodzących przemian środowiskowych. Warunkiem prawidłowej oceny zmian środowiskowych jest wykorzystanie w badaniach danych pomiarowych, opartych na zorganizowanym, standaryzowanym monitoringu środowiska przyrodniczego wszystkich sfer powierzchni Ziemi, a więc atmosfery, morfosfery, litosfery, hydrosfery, pedosfery, biosfery i antroposfery (Kostrzewski, Majewski 2018, 2021). System powierzchni Ziemi w coraz większym stopniu poddawany jest niepożądanemu oddziaływaniu człowieka. Sprawą pierwszorzędnej wagi jest edukacja społeczeństwa, realizowana w różnych formach. Jedną z form kształtowania świadomości ekologicznej społeczeństwa jest dydaktyka uniwersytecka. Niezbędne jest wprowadzenie do nauczania akademickiego przedmiotów z zakresu monitoringu środowiska przyrodniczego, jak również tworzenie odpowiednich specjalności i kierunków studiów. Należy dodać, że w wielu ośrodkach akademickich problematykę monitoringu środowiska przyrodniczego znajdujemy w obowiązujących programach studiów. Dydaktyka szkoły wyższej powinna w tej dziedzinie rozwijać się przede wszystkim na studiach przyrodniczych, ścisłych, medycznych, rolno-leśnych, a także technicznych. Podstawowym celem niniejszego opracowania jest przedstawienie aktualnego stanu problematyki monitoringu środowiska przyrodniczego w dydaktyce szkoły wyższej. Chodzi przede wszystkim o przygotowanie specjalistów do pracy zawodowej w zakresie organizacji i realizacji monitoringu środowiska przyrodniczego regionu, kraju, kontynentu, w powiązaniu ze znajomością jego natury, zróżnicowania i ochrony, w powiązaniu z zagospodarowaniem przestrzennym i ochroną zdrowia człowieka.

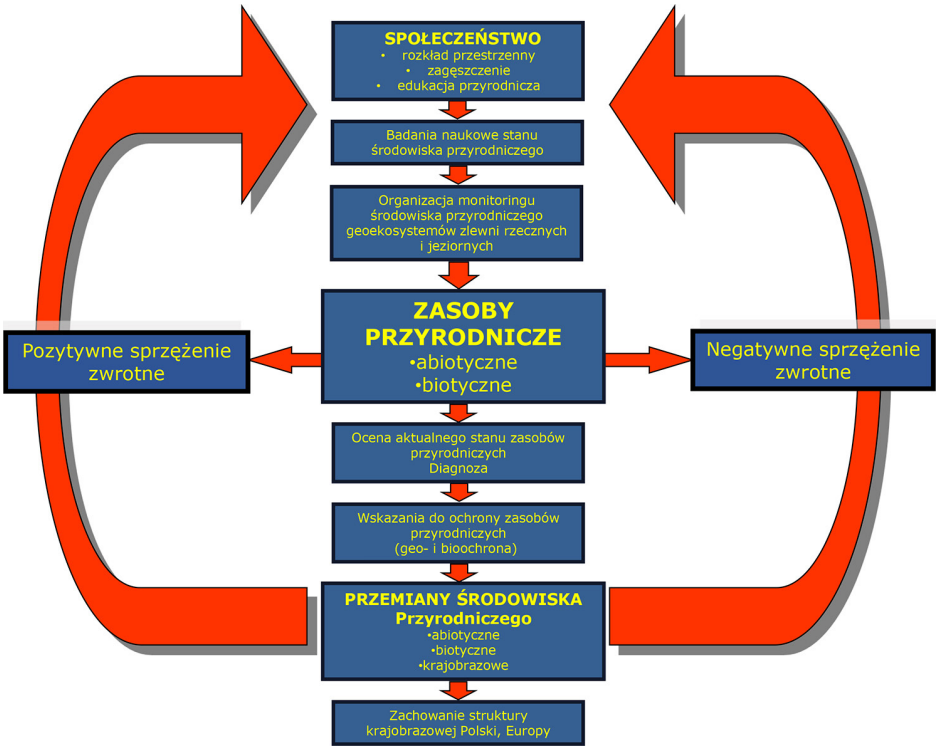
Monitoring Środowiska Przyrodniczego jako kierunek badań w naukach przyrodniczych

Monitoring środowiska przyrodniczego to nie tylko organizacyjne zabezpieczenie systemów pomiarowych służących do zbierania i gromadzenia danych o środowisku przyrodniczym, ale wyodrębniający się kierunek badań w naukach

przyrodniczych. Z metodologicznego punktu widzenia sprawą pierwszorzędnej wagi jest indywidualizacja przedmiotu badań w systemie nauk przyrodniczych, dobór metod badawczych oraz przedstawienie problemów badawczych do realizacji, ważnych zarówno z merytorycznego, jak i aplikacyjnego punktu widzenia (Kostrzewski 2011, 2018, 2020, Kostrzewski, Majewski 2021). Ważny jest także stan literatury przedmiotu i sformułowanej teorii naukowej. W tej kwestii dysponujemy już znaczącym dorobkiem, który wyraźnie wyróżnia się w naukach przyrodniczych. Przedmiotem badań monitoringu środowiska przyrodniczego jest jednostka przestrzeni geograficznej i jej środowisko przyrodnicze, traktowane jako system, określenie jego stanu aktualnego, rozwoju, zagrożeń i przemian z podaniem prognozy. W celu podkreślenia indywidualności przedmiotu badań monitoringu środowiska przyrodniczego przyjęto termin geoekosystemu (Kostrzewski 1993). Geoekosystem jest jednostką (strukturą) przestrzeni geograficznej, a jego wielkość zależy od przyjętego kryterium typologii. W umiarkowanej strefie klimatycznej najbardziej reprezentatywne są geoekosystemy rzeczne i jeziorne. Podstawowym zadaniem w badaniach środowiska przyrodniczego jest rozpoznanie struktury wewnętrznej geoekosystemu, którą tworzą elementy (budowa geologiczna, rzeźba terenu, topoklimat, wody powierzchniowe, wody podziemne, gleby, zbiorowiska roślinne, człowiek), następnie zjawiska (procesy fizyczne i chemiczne w środowisku, np. wiatry, huragany uciąg wód powierzchniowych i podziemnych itd.) i obiekty (urządzenia wprowadzone do środowiska przez człowieka). Podstawowym zadaniem w badaniu geoekosystemów jest rozpoznanie stanu aktualnego i różnych przejawów funkcjonowania geoekosystemu oraz określenie jakościowe i ilościowe związków, jakie zachodzą między elementami, zjawiskami i obiektami. Dominujące relacje, związki między elementami, obiektami i zjawiskami, decydują o typie geoekosystemu, pozwalają na określenie charakteru i tempa przemian krajobrazowych w zasięgu badanego geoekosystemu. Interpretacja funkcjonowania geoekosystemu winna mieć charakter wyjaśniająco-przyczynowo-skutkowy. Przyjmując tak sformułowany przedmiot badań monitoringu środowiska przyrodniczego, stwierdzić można, że sprawą bardzo istotną jest dostępność tematycznych baz danych środowiskowych, zebranych w różnych typach monitoringu środowiska przyrodniczego. Dogodną możliwością korzystania z tematycznych baz danych środowiska przyrodniczego jest Państwowy Monitoring Środowiska, obejmujący monitoringi specjalistyczne i monitoring kompleksowy środowiska przyrodniczego. Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego jest monitoringiem kompleksowym, stanowiącym podsystem PMŚ (Kostrzewski, Majewski 2021). Dlatego podsystem ZMŚP ma duże znaczenie w dydaktyce uniwersyteckiej, jest podstawowym źródłem informacji dla przedmiotu monitoringu środowiska przyrodniczego. Centralna baza danych ZMŚP ma zgromadzonych 1 862 615 rekordów, które można także wykorzystać w dydaktyce uniwersyteckiej.

Kolejnym argumentem zastosowania danych pomiarowych ZMŚP w przedmiocie monitoringu środowiska przyrodniczego jest fakt, że ZMŚP jest w istocie monitoringiem zasobów przyrodniczych (ryc. 1). Analiza stanu aktualnego i ocena zasobów przyrodniczych w środowisku dokonywana jest z uwzględnieniem zachodzących przemian środowiskowych, w odniesieniu do zachowań i potrzeb

społeczeństwa (ryc. 1). Analiza ma charakter przyczynowo-skutkowy, a jej wykorzystanie w dydaktyce uniwersyteckiej wyrabia u studentów postawy pozytywne wobec organizacji monitoringu środowiska przyrodniczego.



Ryc. 1. Zasoby przyrodnicze geoekosystemów i ich ochrona
Fig. 1. Natural resources of geoecosystems and their protection

Monitoring środowiska przyrodniczego jako przedmiot nauczania akademickiego realizuje:

- funkcję merytoryczną, która określa prawidłowości i mechanizmy funkcjonowania środowiska przyrodniczego,
- funkcję organizacyjną, która określa formy organizacji monitoringu środowiska,
- funkcję edukacyjną, proponującą różne typy zachowań, postaw człowieka w stosunku do ochrony środowiska przyrodniczego,
- funkcję dydaktyczną umożliwiającą kształtowanie u studentów odpowiednich stereotypów w zakresie ochrony środowiska,
- funkcję aplikacyjną, której celem jest wykorzystanie wyników monitoringu środowiska przyrodniczego dla konkretnych rozwiązań praktycznych.

W procesie dydaktycznym na poziomie akademickim ważna jest także realizacja funkcji szczegółowych w oparciu o przedmiot monitoring środowiska przyrodniczego. Do funkcji szczegółowych możemy zaliczyć:

- funkcję naukowo-poznawczą (teoretyczno-wyjaśniającą), której celem jest przedstawienie założeń metodologicznych i metodycznych badań środowiskowych,
- funkcję informacyjno-diagnostyczną, prezentującą formę przekazywania aktualnej informacji o środowisku (diagnoza środowiska), o jego stanie, kierunkach zagrożeń i formach ochrony,
- funkcję prognostyczną zwracającą uwagę na potrzebę stosowania odpowiednich modeli ujmujących krótko- i długookresowe przemiany środowiska przyrodniczego,
- funkcję planistyczno-decyzyjną, której celem jest przedstawienie różnych koncepcji organizacji monitoringu środowiska przyrodniczego na specjalne zamówienie (np. na potrzeby zbiorników zaporowych, obserwacji osuwisk, kontroli powodzi itd.), a otrzymane dane monitoringowe stanowią podstawę decyzji planistycznych.

Przedstawione informacje, dotyczące prowadzenia przedmiotu Monitoring Środowiska Przyrodniczego na poziomie akademickim, realizują zarówno cele merytoryczne, aplikacyjne, jak i edukacyjne.

Stan realizacji przedmiotu monitoring środowiska przyrodniczego w wybranych szkołach wyższych (2022 r.)

W celu rozpoznania aktualnego stanu realizacji przedmiotu Monitoring Środowiska Przyrodniczego w wybranych szkołach wyższych przekazano ankietę do 60 jednostek, natomiast otrzymano odpowiedzi z 14 szkół. Przekazane ankiety uznaliśmy za reprezentatywne dla szkół wyższych, które umożliwiają poznanie formy nauczania Monitoringu Środowiska Przyrodniczego (są także inne hasła przedmiotów).

Otrzymany materiał jest bardzo interesujący, daje dobre rozpoznanie w funkcjonowaniu stacji terenowych prowadzących monitoring różnych elementów środowiska przyrodniczego, prezentuje problemy badawcze oraz przedmioty z zakresu monitoringu środowiska przyrodniczego.

Na większości uczelni są stacje terenowe, co umożliwia studentom zapoznanie się z systemami pomiarowymi, organizacją monitoringu oraz zbieraniem i opracowywaniem danych pomiarowych (tab. 1).

Jak wynika z przeglądu analizowanych ankiet, dane pomiarowe z monitoringu stanowią podstawę realizacji różnych problemów badawczych, m.in. dotyczących zmian klimatu, denudacji w zlewniach rzecznych, morfodynamiki wybrzeża klifowego, przebiegu erozji bocznej w korytach rzecznych, bilansu wodnego, powodzi, degradacji gleb, stanu zachowania siedlisk roślinnych, wpływu warunków meteorologicznych na fenologię roślin (tab. 2). W oparciu o informacje zebrane z ankiet możemy stwierdzić, że Monitoring Środowiska Przyrodniczego realizowany jest na różnych kierunkach i specjalnościach (pod różnymi hasłami wykładów) oraz zawarty jest w treściach innych wykładów (tab. 3). Organizowane są także ćwiczenia terenowe. Niestety brakuje studiów podyplomowych, co dałoby

możliwość podnoszenia kwalifikacji zawodowych pracownikom różnych ośrodków, instytucji związanych z Głównym Inspektoratem Ochrony Środowiska, parkami narodowymi, Lasami Państwowymi, wojewódzkimi i miejskimi instytucjami ochrony środowiska itd.

Należy zwrócić uwagę na działalność studenckich kół naukowych, w ramach których szeroko rozwijana jest problematyka monitoringu środowiska przyrodniczego w sekcjach specjalistycznych i specjalnych projektach badawczych (tab. 4). Przedstawiona działalność badawcza umożliwia rozwijanie dydaktyki w zakresie Monitoringu Środowiska Przyrodniczego. Sprawia, że w ośrodkach akademickich uzyskiwane są stopnie magistra, doktora, doktora habilitowanego, a także profesora.

Tabela 1. Monitoring Środowiska Przyrodniczego w dydaktyce szkoły wyższej – stacje terenowe (2022 r.)
Table 1. Monitoring of the Natural Environment in teaching at a university – field stations (2022)

Nazwa jednostki	Stan zatrudnienia	Stacje terenowe	Systemy pomiarowe
Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych UAM: a) Instytut Geoekologii i Geoinformacji, b) Instytut Geografii Fizycznej i Kształtowania Środowiska, c) Instytut Geologii	57	5 stacji terenowych: eksperymentalne powierzchnie badawcze torfowisk, monitoring mokradeł i jezior, monitoring wybrzeża	posterunki meteorologiczne, hydrologiczne, stanowiska obiegu wody w geoekosystemie leśnym, monitoring zbiorowisk roślinnych, monitoring erozji gleb, powierzchnie testowe na wybrzeżu klifowym
Instytut Geografii i Nauk o Środowisku, Stacja Monitoringu, UJK Kielce	5	Stacja Geoekologiczna Malik, Stacja Bazowa ZMŚP Łysogóry	posterunek meteorologiczny, zanieczyszczenie powietrza, opad w lesie, roztwory glebowe, przekrój hydrometryczny (łącznie 12)
Wydział Nauk o Ziemi i Gospodarki Przestrzennej UMK	19	Stacja Bazowa ZMŚP Pojezierze Chełmińskie	posterunek meteorologiczny, jakość powietrza, opad w lesie, 3 punkty wodowskazowe, monitoring gleb
Wydział Przyrodniczo–Techniczny Uniwersytetu Opolskiego	7	–	–
Instytut Geografii, Katedra Geoekologii i Geoinformacji, Katedra Geografii Fizycznej, Uniwersytet KEN	36	–	4 systemy pomiarowe: monitoring hydrologiczny i meteorologiczny, monitoring pokrycia terenu na torfowiskach, monitoring erozji bocznej, monitoring działań rewitalizacyjnych w rzekach

Nazwa jednostki	Stan zatrudnienia	Stacje terenowe	Systemy pomiarowe
Wydział Geografii i Studiów Regionalnych UW, Katedra Geografii Fizycznej	40	Mazowiecki Ośrodek Geograficzny Murzynowo	5
Wydział Biologii UJ: a) Instytut Nauk o Środowisku b) Instytut Botaniki c) Instytut Zoologii i Badań Biomedycznych, Zakład Anatomii	25	–	4 1 (Bory Tucholskie)
Wydział Nauk Biologicznych UKW	–	–	–
Wydział Chemii, Instytut Nauk Chemicznych UMCS	13	2 stacje terenowe	2
Wydział Chemii, Pracownie: Chemii Analitycznej Stosowanej, Spektroskopii, Radiochemii i Chemii atmosfery, UW	7	–	2
Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Katedra Architektury Krajobrazu	33	–	1
Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej UJ	27	Stacja Naukowa Łazy UJ (SB ZMŚP Pogórze Karpackie)	posterunek meteorologiczny i hydrometryczny (5 zlewni): spłukiwanie, chemizm opadów w środowisku leśnym

Tabela 2. Monitoring Środowiska Przyrodniczego w badaniach naukowych (2022 r.)
Table 2. Monitoring of the Natural Environment in scientific research (2022)

Nazwa jednostki	Stan zatrudnienia	Problemy badawcze (wybrane)	Liczba publikacji
Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych UAM: a) Instytut Geoekologii i Geoinformacji, b) Instytut Geografii Fizycznej i Kształtowania Środowiska, c) Instytut Geologii	57	denudacja chemiczna i mechaniczna w zlewniach rzecznych, erozja boczna koryt rzecznych, morfodynamika wybrzeża klifowego, erozja gleb w różnych warunkach morfolitologicznych i użytkowania terenu, morfodynamika stoków, wysoczyzn młodoglacjalnych	>500
Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej UJ	27	8	60
Instytut Geografii i Nauk o Środowisku, Stacja Monitoringu, UJK Kielce	5	funkcjonowanie geoekosystemu w warunkach imisji kwaśnej i alkalicznej	194
Wydział Nauk o Ziemi i Gospodarki Przestrzennej UMK	19	zmiany klimatu, zanieczyszczenie środowiska, bilans wodny, degradacja gleb, zmiany roślinności	170
Wydział Przyrodniczo-Techniczny Uniwersytetu Opolskiego	7	biomonitoring, zanieczyszczenie środowiska	13
Instytut Geografii, Katedra Geoekologii i Geoinformacji, Katedra Geografii Fizycznej, Uniwersytet KEN	36	monitoring hydrologiczny zlewni karpackich, monitoring powodzi, monitoring procesów mrozowych grawitacyjnych i fluwialnych, monitoring erozji bocznej, monitoring zmian rzeźby	19
Wydział Geografii i Studiów Regionalnych UW, Katedra Geografii Fizycznej	40	monitoring stanów atmosfery, zanieczyszczenia powietrza, zanieczyszczenia opadu, zanieczyszczenia gleb, zanieczyszczenia erozji gleb, efektów wietrzeniowych w glebie, krajobrazu	29
Wydział Biologii UJ: a) Instytut Nauk o Środowisku b) Instytut Botaniki c) Instytut Zoologii i Badań Biomedycznych, Zakład Anatomii	25	bioróżnorodność, stan zachowania siedlisk przyrodniczych, bory chrobotkowe (Bory Tucholskie), różnorodność florystyczna muraw kserotermicznych, monitoring botaniczny rezerwatów przyrody, gatunki inwazyjne, monitoring zagrożeń oraz wskazania ochronne dla krajowych populacji płazów i gadów	26

Nazwa jednostki	Stan zatrudnienia	Problemy badawcze (wybrane)	Liczba publikacji
Wydział Nauk Biologicznych UKW	–	–	–
Wydział Chemii, Instytut Nauk Chemicznych UMCS	–	–	–
Wydział Chemii, Pracownie: Chemii Analitycznej Stosowanej, Spektroskopii, Radiochemii i Chemii Atmosfery, UW	7	mobilność i biodostępność metali z gleb, analiza specjacyjna, wpływ nanocząstek platynowców na rozwój roślin i inne	10
Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Katedra Architektury Krajobrazu	33	wpływ warunków miejskich na fenologie roślin, wpływ warunków mikroklimatycznych na fenologie roślin, ocena stanu środowiska z wykorzystaniem metod dendrochronologicznych	8

Tabela 3. Monitoring Środowiska Przyrodniczego w dydaktyce szkoły wyższej – wykłady i ćwiczenia (2022 r.)
Table 3. Monitoring of the Natural Environment in didactics of a university – lectures, exercises (2022)

Nazwa jednostki	Stan zatrudnienia	Przedmioty	Wykłady	Ćwiczenia	Ćwiczenia terenowe
Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych UAM: a) Instytut Geoekologii i Geoinformacji, b) Instytut Geografii Fizycznej i Kształtowania Środowiska, c) Instytut Geologii	57	monitoring środowiska przyrodniczego (na 3 specjalnościach)	15 h	15 h	5 dni
Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej UJ	27	procesy hydrologiczne i geomorfologiczne w zlewni	–	45 h	–
		współczesne procesy stokowe	30 h	–	–
		Beskid Niski – projekt geomorfologiczny	–	1 grupa	–

Nazwa jednostki	Stan zatrudnienia	Przedmioty	Wykłady	Ćwiczenia	Ćwiczenia terenowe
Instytut Geografii i Nauk o Środowisku, Stacja Monitoringu, UJK Kielce	5	6 (kierunki studiów) 7 (spec. monitoring środowiska)	–	–	1
Wydział Nauk o Ziemi i Gospodarki Przestrzennej UMK	19	monitoring środowiska geograficznego monitoring systemów przyrodniczych monitoring w przedmiotach podstawowych	15 h 15 h –	– – –	tak
Wydział Przyrodniczo-Techniczny Uniwersytetu Opolskiego	7	monitoring biomonitoring	– –	– –	–
Instytut Geografii, Katedra Geoekologii i Geoinformacji, Katedra Geografii Fizycznej, Uniwersytet KEN	36	monitoring w hydrogeologii geomorfologia stosowana 3 × kursy w zakresie monitoringu środowiska	– 10 h –	20 h 30 h –	–
Wydział Geografii i Studiów Regionalnych UW, Katedra Geografii Fizycznej	40	teledetekcyjny monitoring środowiska monitoring środowiska	45 h (30+15) –	45 h 15 h	–
Wydział Biologii UJ, Instytut Nauk o Środowisku		monitoring biologiczny monitoring ekosystemów wodnych metody terenowych badań przyrodniczych	22 h 20 h 5 h	8 h 25 h 11 h	10 h + 49 h + 68 h
Wydział Biologii UJ, Instytut Botaniki	25	monitoring wybranych siedlisk przyrodniczych i gatunków w Karpatach monitoring wybranych siedlisk przyrodniczych ekologia zbiorowisk roślinnych	30 h 30 h	– –	1
Wydział Biologii UJ, Instytut Zoologii i Badań Biomedycznych, Zakład Anatomii		metody monitoringu przyrodniczego	30 h	–	16 h
Wydział Nauk Biologicznych UKW	–	–	–	–	–

Nazwa jednostki	Stan zatrudnienia	Przedmioty	Wykłady	Ćwiczenia	Ćwiczenia terenowe
Wydział Chemii, Instytut Nauk Chemicznych UMCS	–	–	–	–	–
Wydział Chemii, Pracownie: Chemii Analitycznej Stosowanej, Spektroskopii, Radiochemii i Chemii Atmosfery, UW	7	analityka środowiska, environmental analysis, environmental management, lab. environmental analysis, marine microplastics	15 h 30 h 15 h – 15 h	– – – 40 h –	–
Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Katedra Architektury Krajobrazu	33	dziedzictwo przyrodnicze	15h	45h	

Tabela 4. Monitoring Środowiska Przyrodniczego na uczelniach wyższych – praca na stopień, studenckie koła naukowe
Table 4. Monitoring of the Natural Environment at universities – work for a degree, student scientific clubs

Nazwa jednostki	Stan zatrudnienia	Zrealizowane prace			Studenckie koło naukowe
		magisterskie	doktorskie	habilitacyjne	
Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych UAM: a) Instytut Geoekologii i Geoinformacji, b) Instytut Geografii Fizycznej i Kształtowania Środowiska, c) Instytut Geologii	57	> 150	25	6	Sekcja Monitoringu Środowiska Przyrodniczego, w ramach sekcji specjalistycznych
Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej UJ	27	12	12	1	Monitoring Osuwisk
Instytut Geografii i Nauk o Środowisku, Stacja Monitoringu, UJK Kielce	5	135	3	3	Sekcja Geoekologów (Monitoring Środowiska)
Wydział Nauk o Ziemi i Gospodarki Przestrzennej UMK	19	30	3	0	SKN Hydrologów
Wydział Przyrodniczo-Techniczny Uniwersytetu Opolskiego	7	100	–	–	SKN Biotechnologów

Nazwa jednostki	Stan zatrudnienia	Zrealizowane prace			Studenckie koło naukowe
		magisterskie	doktorskie	habilitacyjne	
Instytut Geografii, Katedra Geoekologii i Geoinformacji, Katedra Geografii Fizycznej, Uniwersytet KEN	36	20	2	1	Monitoring w Rzekach Karpackich
Wydział Geografii i Studiów Regionalnych UW, Katedra Geografii Fizycznej	40	20	5	–	Sekcja Monitoringu Środowiska Przyrodniczego
Wydział Biologii UJ: a) Instytut Nauk o Środowisku b) Instytut Botaniki c) Instytut Zoologii i Badań Biomedycznych, Zakład Anatomii	25	26 – –	– – –	– – –	Sekcja Botaniczna, Sekcja Ornitologiczna, Chiropterologiczna, Herpetologiczna
Wydział Nauk Biologicznych UKW	–	–	–	–	–
Wydział Chemii, Instytut Nauk Chemicznych UMCS	–	–	–	–	–
Wydział Chemii, Pracownie: Chemii Analitycznej Stosowanej, Spektroskopii, Radiochemii i Chemii atmosfery, UW	7	35	3	1	–
Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Katedra Architektury Krajobrazu	33				SK Architektury Krajobrazu

Podsumowanie

W oparciu o dokonany przegląd w wybranych szkołach wyższych można stwierdzić, że Monitoring Środowiska Przyrodniczego rozwijany jest zarówno w badaniach naukowych potwierdzonych publikacjami, jak i w dydaktyce. Na podkreślenie zasługuje realizacja problematyki monitoringu środowiska przyrodniczego w studenckich kołach naukowych, co jest ważne z naukowego i edukacyjnego punktu widzenia. Niewątpliwym mankamentem jest brak studiów podyplomowych podnoszących kwalifikacje zawodowe zatrudnionych w instytucjach realizujących monitoring środowiska przyrodniczego. Sprawą pilną jest opracowanie podręcznika z zakresu Monitoringu Środowiska Przyrodniczego, a także silniejsze związki ośrodków akademickich z praktyką.

Upowszechnianie informacji dotyczącej monitoringu środowiska przyrodniczego winno być ważnym zadaniem naukowym i dydaktycznym ośrodków akademickich.

Literatura

Kostrzewski A., 1993. Geoekosystem obszarów nizinnych. Koncepcja metodologiczna. Komitet Naukowy przy Prezydium PAN Człowiek i Środowisko, Zeszyty Naukowe, 6: 11–17.

Kostrzewski A., 2011. Znaczenie programu Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego w określeniu aktualnego stanu i przemian krajobrazu Polski. [W:] A. Kostrzewski, M. Samołyk (red.), Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Funkcjonowanie geoekosystemów w warunkach zmian użytkowania terenu i narastającej antropopresji. Biblioteka Monitoringu Środowiska, 27: 11–16.

Kostrzewski A., 2020. Indywidualność przedmiotowa Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego – program realizacji na lata 2021–2025. [W:] A. Olszewski, A. Andrzejewska (red.), Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Aktualny stan i przemiany środowiska przyrodniczego geoekosystemów jako cecha wskaźnikowa zmian klimatu. Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Poznań: 9–21.

Kostrzewski A., 2021. Wprowadzenie – koncepcja organizacji i realizacji programu Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego. [W:] A. Kostrzewski, M. Majewski (red.), Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego – organizacja, system pomiarowy, metody badań. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa: 15–20.

Kostrzewski A., Majewski M. (red.), 2018. Stan i przemiany środowiska przyrodniczego Polski w latach 1994– 2015 w oparciu o realizację programu Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa.

Strategiczny program PMŚ na lata 2020–2025. GIOŚ, Warszawa.

Robert Kruszyk

Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu,
rlk@amu.edu.pl, https://orcid.org/0000-0003-3147-8982

Wybrane procedury kontroli jakości danych pomiarowych w programie ZMŚP na poziomie Centralnej Bazy Danych

Selected procedures for quality control of measurement data in the IMNE programme at Central Data Base level

Streszczenie: Jedną z kluczowych funkcji systemu informatycznego programu ZMŚP jest weryfikacja przekazywanych corocznie przez stacje danych pomiarowych. Proces ten realizowany jest na dwóch poziomach. Pierwszy etap – kontrola formalna – odbywa się na lokalnych komputerach stacji bazowych podczas procedury transferu danych do bazy danych. Kontroli podlegają struktura i rozdzielczość czasowa przekazywanych danych, stosowane oznaczenia kodowe programów i parametrów pomiarowych, identyfikatory stacji oraz stanowisk pomiarowych. Drugi etap weryfikacji odbywa się po stronie serwera i obejmuje identyfikację wartości odstających oraz kontrolę poprawności wyników analiz chemicznych w oparciu o powszechnie stosowane testy: bilansu jonowego, przewodności oraz kontrolę wybranych stosunków jonowych. Uzupełnieniem tych metod było wykorzystanie faktu obecności statystycznie istotnych zależności pomiędzy parametrami, np. wysokością opadu podkoronowego i opadu na terenie otwartym, przewodnością elektrolityczną zmierzoną i sumą anionów i kationów.

Słowa kluczowe: system informatyczny, Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego, relacyjna baza danych, weryfikacja danych pomiarowych

Abstract: One of the key functions of the IMNE program's information system is the verification of measurement data submitted annually by stations. This process is carried out at two levels. The first stage – formal control is carried out on local base station computers during the procedure of inserting data into the database. The structure and time resolution of the transferred data, the applied code designations of programs and measurement parameters, the identifiers of stations and measurement stations are subject to control. The second stage of verification takes place on the server side and includes identification of outliers and validation of chemical analysis results based on commonly used ion balance tests, conductivity and control of selected ionic ratios. These methods were complemented by exploiting the fact of the presence of statistically significant relationships between parameters, e.g., the amount of the throughfall and the precipitation in the open area, measured conductivity and sum of anions and cations.

Key words: Integrated Monitoring of Natural Environment, relational database, verification of measurement data

Wstęp

Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego (ZMŚP) funkcjonujący w ramach Państwowego Monitoringu Środowiska (PMŚ) ma na celu dostarczenie informacji o stanie oraz tendencjach rozwoju wybranych geoekosystemów Polski oraz wskazanie rodzajów zagrożeń dla ich środowiska przyrodniczego (Kostrzewski 1991, 1993, Kostrzewski i in. 1995, Kostrzewski, Majewski 2021). Zarchiwizowane w Centralnej Bazie Danych wyniki prowadzonego monitoringu są corocznie przekazywane do międzynarodowego programu Integrated Monitoring (International Co-operative Programme on Integrated Monitoring on Air Pollution Effects) oraz służą spełnianiu wymagań sprawozdawczych dyrektywy w sprawie redukcji krajowych emisji niektórych rodzajów zanieczyszczeń powietrza (dyrektywa NEC) w zakresie badań wpływu zanieczyszczeń powietrza na ekosystemy (PMŚ 2020). Ponadto dane pomiarowe ZMŚP wpisują się w następujące tematy danych przestrzennych objętych dyrektywą INSPIRE: urządzenia do monitorowania środowiska, warunki atmosferyczne, warunki meteorologiczno-geograficzne oraz hydrografia. Nakłada to obowiązek harmonizacji danych źródłowych ZMŚP oraz ich publikacji w formacie GML zgodnym ze schematami aplikacyjnymi INSPIRE (Soczewski 2019). W tym celu konieczne jest zapewnienie odpowiedniej wiarygodności danych pozyskiwanych w ramach prowadzonego monitoringu. Cel ten realizowany jest poprzez wdrożoną na poziomie Centralnej Bazy Danych dwuetapową procedurę weryfikacji – kontrolę formalną oraz merytoryczną danych pomiarowych. Jest to jeden z komponentów systemu zapewnienia i kontroli jakości danych w programie ZMŚP obejmującego etapy pobierania próbek, wykonywania analiz przez laboratoria, opracowanie uzyskanych wyników monitoringu (Degórska, Żyfka-Zagrodzińska 2021).

System Informatycznego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego – architektura i funkcje

Podstawowym celem Systemu Informatycznego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego (SIMSP) jest dostarczenie nowoczesnych i efektywnych narzędzi pozwalających na gromadzenie i przetwarzanie dużych zbiorów danych zbieranych na przestrzeni lat w ramach programu ZMŚP (Zwoliński 1993, Kostrzewski i in. 1995). System ten oparty jest na architekturze klient–serwer obejmującej warstwę relacyjnej bazy danych pod kontrolą serwera PostgreSQL w wersji 14 o architekturze 64-bitowej oraz warstwę prezentacji. Dostęp użytkowników do bazy danych realizowany poprzez standard ODBC (ang. *Open Database Conectivity*). Pozwala to korzystać z danych zgromadzonych w bazie bezpośrednio z poziomu arkusza kalkulacyjnego programu MS Excel. W tym celu konieczne jest dodanie do

programu dodatku (ang. *plugin*) ZMSP, zaimplementowanego w języku programowania VBA (*Visual Basic for Applications*). Interfejs dodatku ZMSP ma postać dodatkowej wstążki (ang. *ribbon, Microsoft Fluent UI*) podzielonej na 7 tematycznych kart pozwalających na:

- pobieranie danych pomiarowych (w tym danych zagregowanych i zestawów wskaźników tematycznych) oraz metadanych (informacje o systemie pomiarowym ZMŚP) z bazy danych bezpośrednio do arkusza kalkulacyjnego,
- transfer danych ze stacji bazowych do bazy danych,
- weryfikację formalną danych pomiarowych (pierwszy etap kontroli danych),
- usuwanie danych pomiarowych w oparciu o zdefiniowane kryteria,
- utworzenie raportów obejmujących zakres przekazanych danych przez stację oraz wyników drugiego etapu kontroli – weryfikacji merytorycznej.
- Do podstawowych funkcji systemu SIMSP należy zaliczyć:
- zarządzanie danymi zgromadzonymi w bazie danych, w tym rejestrację dokonanych zmian (korekt danych) – historię zasobu,
- selekcję w oparciu o zdefiniowane kryteria i pobieranie danych pomiarowych z bazy danych do arkusza kalkulacyjnego,
- transfer danych pomiarowych do bazy danych,
- weryfikację danych pomiarowych,
- agregację danych pomiarowych oraz wygenerowanie zestawów wskaźników tematycznych,
- harmonizację danych pomiarowych do programu Integrated Monitoring oraz innych sieci monitoringowych,
- harmonizację danych pomiarowych do obowiązujących schematów aplikacyjnych INSPIRE oraz wygenerowanie zestawu plików GML.

Głównymi użytkownikami systemu informatycznego są: stacje bazowe, zespół ekspertów ZMŚP, Centrum ZMŚP, Główna Inspekcja Ochrony Środowiska (GIOŚ) oraz systemy zewnętrzne – program ICP Integrated Monitoring i Geoportal GIOŚ INSPIRE.

Weryfikacja danych pomiarowych

Najważniejszym etapem w procesie archiwizacji danych pomiarowych w bazie jest ich weryfikacja mająca na celu identyfikację i usunięcie błędów powstałych na etapie prowadzenia badań terenowych i analiz laboratoryjnych oraz podczas opracowania i przygotowania wyników do transferu do bazy. Corocznie do Centralnej Bazy Danych ZMŚP przekazywanych jest ponad 120 tys. wyników monitoringu pochodzących z realizacji 17 programów pomiarowych na 11 stacjach bazowych obejmujących monitoring wybranych komponentów abiotycznych i biotycznych badanych geoekosystemów (tab. 1).

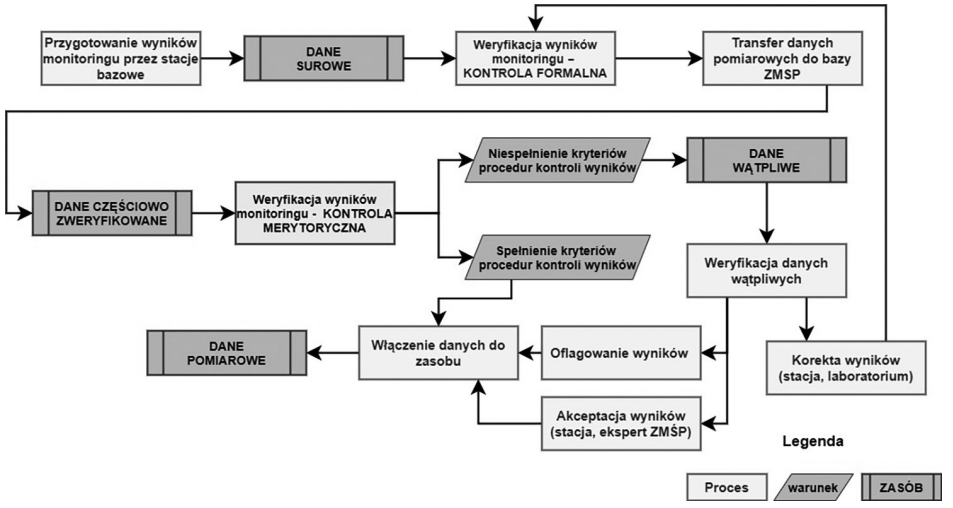
Weryfikacja wyników pomiarów na poziomie Centralnej Bazy Danych ZMŚP oparta została na następujących założeniach (ryc. 1):

- danych pomiarowych corocznie przekazywanych przez stacje bazowe do bazy danych określanych mianem **danych surowych**;

Tabela 1. Zakres danych zgromadzonych w Centralnej Bazie Danych ZMŚP
Table 1. Scope of data collected in the IMNE Central Database

Liczba programów pomiarowych	17
Liczba parametrów pomiarowych (zakres wymagany i rozszerzony)	425
Liczba parametrów pomiarowych (zakres wymagany)	239
Liczba parametrów hydrometeorologicznych, biotycznych, fizykochemicznych i chemicznych (zakres wymagany)	27 (11%), 96 (40%), 116 (49%)
Liczba wyników pomiarów zgromadzonych od roku 1994 do 2021	1 863 210 (228MB)
Liczba corocznie przekazywanych danych (stan na rok 2021, 11 stacji)	ok. 120 000
Rozdzielczość czasowa danych rejestrowanych w bazie	dane dobowe – dane roczne

- weryfikacji formalnej (etap 1) odbywającej się po stronie stacji bazowej w środowisku arkusza kalkulacyjnego, podczas transferu danych do bazy;
- negatywnym wyniku przynajmniej jednego z testów wykonywanych na etapie kontroli formalnej uniemożliwia wprowadzenie danych do bazy;
- danych pomiarowych po zakończonym etapie kontroli formalnej otrzymujących etykietę **danych częściowo zweryfikowanych**;
- stosowanych procedurach weryfikacji merytorycznej, na podstawie których tworzone są testy poprawności danych wykorzystywane w krajowych i europejskich sieciach monitoringu środowiska przyrodniczego;
- opracowanych procedurach, które powinny w pełni zautomatyzować proces weryfikacji danych pomiarowych, umożliwiając kompleksową analizę błędów oraz wykorzystanie kontroli graficznej;



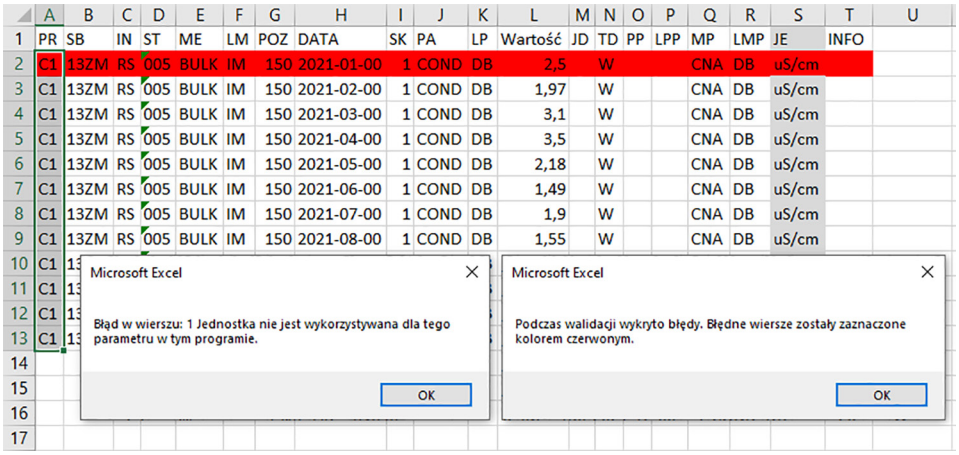
Ryc. 1. Schemat weryfikacji danych pomiarowych na poziomie Centralnej Bazy Danych
Fig. 1. Scheme for verification of measurement data at the level of the Central Database

- użyciu danych zagregowanych (statystykach wieloletnich) zgromadzonych w bazie w procesie weryfikacji merytorycznej; w przypadku danych meteorologicznych i hydrologicznych stosowane są co najmniej pięcioletnie serie pomiarowe; dla parametrów fizykochemicznych i chemicznych dane zagregowane obliczane są na podstawie ostatnich 10 lat poprzedzających weryfikowany okres pomiarowy;
- wynikach weryfikacji merytorycznej zarchiwizowanych w bazie danych;
- wyniku pomiarów, które na poziomie weryfikacji merytorycznej nie przejdą procedur kontrolnych, oznaczanych jako **dane wątpliwe**;
- na **danych wątpliwych**, które po włączeniu danych do zasobu otrzymują etykietę **danych pomiarowych**.

Weryfikacja formalna danych

Pierwszym etapem kontroli danych jest weryfikacja formalna, która zostaje przeprowadzona przez stację bazową w arkuszu kalkulacyjnym (ryc. 2). W tym celu niezbędna jest instalacja dodatku ZMSP oraz konfiguracja źródła ODBC pozwalającego na połączenie z Centralna Bazą Danych. Weryfikacja formalna obejmuje cztery grupy procedur:

- kontrolę struktury przekazywanych danych (kolejności kolumn, typu danych, stosowanych oznaczeń kodowych, faktu udokumentowania parametrów wymaganych),
- kontrolę zdefiniowanych reguł opartych na pewnych relacjach pomiędzy elementami systemu pomiarowego, np. na danym stanowisku pomiarowym realizowane są określone programy pomiarowe w danym okresie sprawozdawczym,



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U
1	PR	SB	IN	ST	ME	LM	POZ	DATA	SK	PA	LP	Wartość	JD	TD	PP	LPP	MP	LMP	JE	INFO	
2	C1	13ZM	RS	005	BULK	IM	150	2021-01-00	1	COND	DB	2,5		W			CNA	DB	uS/cm		
3	C1	13ZM	RS	005	BULK	IM	150	2021-02-00	1	COND	DB	1,97		W			CNA	DB	uS/cm		
4	C1	13ZM	RS	005	BULK	IM	150	2021-03-00	1	COND	DB	3,1		W			CNA	DB	uS/cm		
5	C1	13ZM	RS	005	BULK	IM	150	2021-04-00	1	COND	DB	3,5		W			CNA	DB	uS/cm		
6	C1	13ZM	RS	005	BULK	IM	150	2021-05-00	1	COND	DB	2,18		W			CNA	DB	uS/cm		
7	C1	13ZM	RS	005	BULK	IM	150	2021-06-00	1	COND	DB	1,49		W			CNA	DB	uS/cm		
8	C1	13ZM	RS	005	BULK	IM	150	2021-07-00	1	COND	DB	1,9		W			CNA	DB	uS/cm		
9	C1	13ZM	RS	005	BULK	IM	150	2021-08-00	1	COND	DB	1,55		W			CNA	DB	uS/cm		
10	C1	13																			
11	C1	13																			
12	C1	13																			
13	C1	13																			
14																					
15																					
16																					
17																					

Ryc. 2. Przykład kontroli formalnej danych pomiarowych w programie MS Excel
Fig. 2. Example of formal control of measurement data in MS Excel

- porównanie wyników monitoringu z wartościami referencyjnymi zdefiniowanymi przez zespół ekspertów ZMŚP,
- kontrolę występowania duplikatów na poziomie arkusza kalkulacyjnego oraz bazy danych.

Jeżeli wyżej wymienione procedury zakończą się sukcesem, następuje transfer danych z poziomu arkusza kalkulacyjnego do bazy danych. Równolegle kontrolowany jest zakres przesłanych danych z obowiązującym w danym roku sprawozdawczym zakresem wymaganym. Efektem końcowym etapu jest archiwizacja wyników monitoringu w bazie – dane otrzymują etykietę **częściowo zweryfikowanych** – oraz wygenerowanie raportu z zakresu przesłanych danych. Jeżeli wynik testu zakończy się negatywnie, pomiar traktowany jest jako błędny i musi zostać skorygowany lub oflagowany jako wartość nieważna. W sytuacji korekty dokonanej przez stację dane ponownie przechodzą cały proces kontroli formalnej.

Weryfikacja merytoryczna danych

Drugi etap kontroli – weryfikacja merytoryczna – przeprowadzany jest na poziomie administratora systemu i odbywa się po stronie serwera. Używane są skrypty i procedury zaimplementowane w języku SQL i PL/pgSQL. Weryfikacja danych na tym etapie polega na ich zaklasyfikowaniu do zasobu – dane otrzymują status **danych pomiarowych** (zatwierdzonych) albo **danych wątpliwych** – i pozostawieniu ich do wyjaśnienia z pracownikami stacji bazowej lub ekspertem ZMŚP. Weryfikacja merytoryczna obejmuje następujące grupy procedur:

- identyfikacje wartości odstających (nietypowych),
- powszechnie stosowane procedury kontroli poprawności wyników oznaczeń laboratoryjnych (bilans jonowy, test przewodności),
- kontrolę zależności pomiędzy parametrami pomiarowymi.

Podstawową procedurą kontroli danych na drugim etapie jest identyfikacja wartości odstających, których obecność w zbiorze danych może wynikać z naturalnych zjawisk przyrodniczych albo błędów popełnionych na etapie prowadzenia badań lub opracowania wyników pomiarów. Wyeliminowanie wartości odstających będących efektem popełnianych błędów w procesie badawczym jest warunkiem uzyskania miarodajnej oceny środowiska. W celu identyfikacji wartości nietypowych wykorzystano powszechnie stosowany test kwartylowy, w którym wyznacza się wartość statystyki K (rozstęp międzykwartylowy) według następującego wzoru:

$$K = Q_3 - Q_1$$

gdzie: Q_3 oznacza wartość trzeciego kwartyla, a Q_1 wartość pierwszego kwartyla.

Jeżeli wartość jest niższa niż $Q_1 - 1{,}5K$ lub większa $Q_3 + 1{,}5K$ jest uważana za wartość odstającą (Budka i in. 2013). W ramach wdrożonej procedury identyfikacji wartości nietypowych przyjęto kryterium mniej restrykcyjne, w którym za wartości nietypowe uznano mniejsze niż $Q_1 - 3K$ lub większe $Q_3 + 3K$, często

określane mianem wartości ekstremalnie odstających. Jako uzupełnienie stosowano również regułę trzech sigm, w której za wartości nietypowe przyjmuje się wartości spełniające warunek:

$$\bar{x}_i - 3SD < X_i \text{ lub } X_i > \bar{x}_i + 3SD$$

gdzie: $\bar{x}_i$ oznacza średnią, a SD odchylenie standardowe.

Należy jednak pamiętać, że reguła trzech sigm wymaga spełnienia założenia, iż zmienna posiada rozkład normalny (EMEP 2001).

Drugą metodą uzupełniającą test kwartylowy był test Hampela, w którym wartości odstające identyfikuje się, analizując różnicę pomiędzy obserwacją x_i a medianą (Me) z obserwacji według następującego wzoru:

$$r_i = x_i - Me$$

Jeżeli spełniony jest warunek $|r_i| \geq 4{,}5Me_{|ri|}$, wartości x_i uznaje się za odstającą (Budka i in. 2013).

Test bilansu jonowego oraz porównanie przewodności elektrolitycznej właściwej zmierzonej i obliczonej na podstawie stężeń jonów należą do podstawowych metod kontroli poprawności wykonania analiz składu chemicznego próbek wodnych (EMEP 2001, Mosello i in. 2005, Fürst i in. 2020, Degórska, Żyfka-Zagrodzińska 2021). Wykorzystanie wymienionych procedur kontroli wymaga spełnienia szeregu założeń:

Dostępne są stężenia głównych jonów (siarczanów, chlorków, azotanów, wodorowęglanów, jonów amonowych, sodu, potasu, wapnia, magnezu oraz jonów wodorowych). Stężenia jonów wodorowych obliczono na podstawie wartości pH. Analogicznie postępowano w sytuacji braku oznaczeń jonów HCO_3^-. W tym celu wykorzystano wzory podawane przez Degórską i Żyfkę-Zagrodzińską (2021). W przypadku HCO_3^- taki tok postępowania stosowano wyłącznie w przypadku wód niskozmineralizowanych, np. opadów atmosferycznych.

W przypadku programów: Chemizm opadu podkoronowego (C2), Spływ po pniach (C3), Roztwory glebowe (F1) oraz niektórych próbek wód podziemnych oraz powierzchniowych, w których stwierdzono brunatne zabarwienie, wskazujące na obecność rozpuszczonej materii organicznej i związki te nie były oznaczane, obliczony bilans jonowy niespełniający wartości kryterialnych nie skutkował zaliczeniem serii pomiarowej do wartości wątpliwych, stanowił wyłącznie informację, którą można wykorzystać do interpretacji wyników pozostałych testów.

W przypadku wód kwaśnych o niewielkiej mineralizacji (roztwory glebowe, wody podziemne i powierzchniowe), w których nie oznaczano stężeń jonów glinu oraz żelaza, nie było podstaw do odrzucenia lub akceptacji wyników analiz na podstawie obu procedur. Wynik testu stanowił wyłącznie dodatkową informację.

Obie procedury były przeprowadzane tylko dla tych serii pomiarowych, w których wszystkie elementy składu chemicznego oraz pH i przewodność zostały oznaczone w próbkach zbieranych w ten sam sposób (czas ekspozycji kolektora, frekwencja poboru próbek).

Zarówno w przypadku testu bilansu jonowego oraz różnicy przewodności zmierzonej i obliczonej wykorzystano formuły oraz współczynniki przeliczeniowe zawarte w pracach takich autorów, jak: Manual (2004), Mosello i in. (2005), Fürst i in. (2020), Degórska, Żyfka-Zagrodzińska (2021). W przypadku roztworów o sile jonowej (Is) większej 100 μeq·L^{-1}, co odpowiada mniej więcej przewodności zmierzonej większej od 100 μS·cm^{-1} (Mosello i in. 2005, Fürst i in. 2020, Degórska, Żyfka-Zagrodzińska 2021) zamiast stężeń uwzględniono aktywność jonów. W celu automatyzacji obliczeń zaimplementowano funkcje w języku SQL i PL/pgSQL pozwalające na obliczenie szeregu parametrów, m.in. sumy anionów, sumy kationów, mineralizację, siłę jonową oraz przewodność elektrolityczną właściwą obliczoną i uwzględniającą siłę jonową (tab. 2). Ponadto na podstawie wartości progowych funkcje pozwalają zaklasyfikować uzyskane wyniki kontroli jako spełniające kryteria zdefiniowane dla wymienionych procedur (wartości poprawne) lub w przeciwnym wypadku zaliczyć do danych wątpliwych.

Tabela 2. Zestawienie przykładowych danych niezbędnych do przeprowadzenia kontroli bilansu jonowego i testu przewodności
Table 2. Summary of sample data required for ion balance control and conductivity test

Program	Suma anionów	Suma kationów	Mineralizacja	Siła jonowa	Błąd bilansu jonowego	PEW_{25}zm	PEW_{25}obl	PEW_{25}oblsk	Błąd testu PEW_{25}
	meq·L^{-1}	meq·L	meq·L	mmol·L^{-1}	%	mS/m	mS/m	mS/m	%
H1	4,51	4,62	9,13	0,008	**1,3**	41,3	51,3	46,5	**7,4**
H1	4,82	4,95	9,77	0,008	**1,4**	39,8	53,9	45,1	**13,3**
F2	3,75	3,65	7,40	0,006	**-1,5**	34,2	41,2	35,3	**3,2**
H2	0,28	0,29	0,57	0,001	**0,8**	2,9	3,1	3,0	**3,4**
C2	0,23	0,55	0,78	0,000	**41,1**	5,1	5,5	5,2	**2**
C3	0,41	1,45	1,86	0,001	**56,4**	11,3	13,6	11,5	**11,5**
C1	0,045	0,055	0,10	0,000	**9,8**	0,8	0,8	0,8	**0**

Objaśnienia: C1 – chemizm opadów atmosferycznych, C2 – opad podkoronowy, C3 – spływ po pniach, F2 – wody podziemne, H1– wody powierzchniowe – rzeki, H2 – wody powierzchniowe – jeziora, PEW_{25}zm – przewodność elektrolityczna właściwa zmierzona, PEW_{25}obl – przewodność elektrolityczna właściwa obliczona na podstawie stężeń jonów, PEW_{25}oblsk – przewodność elektrolityczna właściwa obliczona na podstawie aktywności jonów.
Explanations: C1 – precipitation chemistry, C2 – throughfall, C3 – stemflow, F2 – groundwater chemistry, H1 – runoff water chemistry, H2 – lake water chemistry, PEW_{25}zm – specific conductivity measured, PEW_{25}obl – specific conductivity calculated from ion concentrations, PEW_{25}oblsk – specific conductivity calculated from ion activity.

Kolejną grupą procedur wykorzystywanych na etapie weryfikacji merytorycznej była kontrola zależności między parametrami pomiarowymi. Do tej grupy zaliczono:

- kontrolę wartości parametrów obliczanych w relacji do wartości referencyjnych,

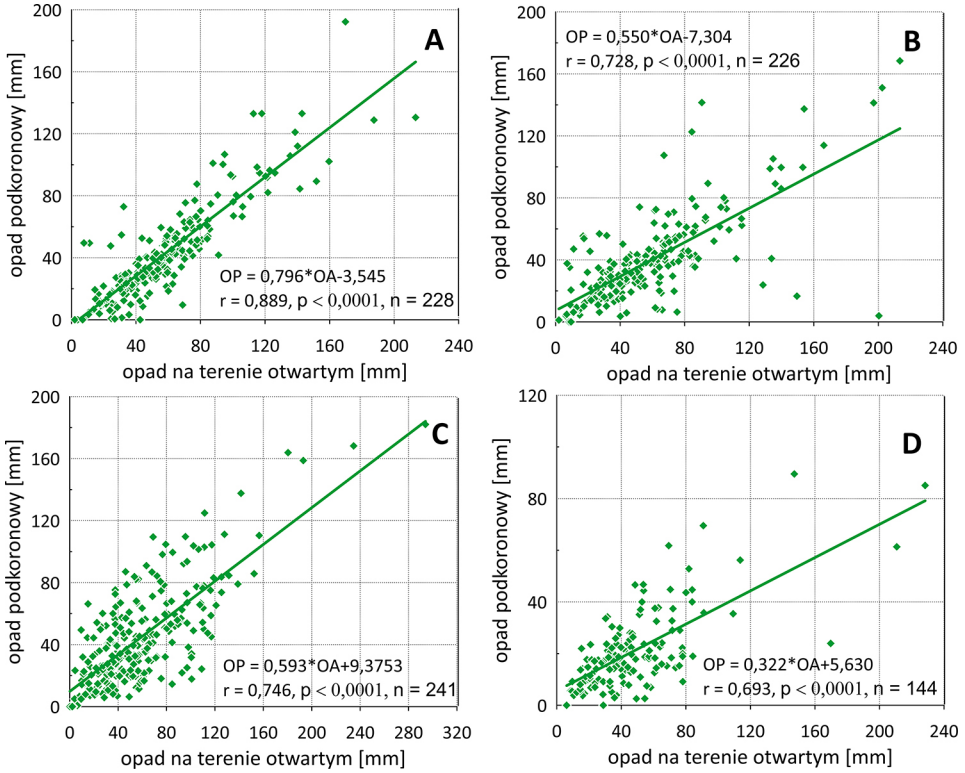
- kontrolę opartą na współwystępowaniu lub też wzajemnym wykluczaniu się niektórych zjawisk – zależności definicyjne i logiczne,
- kontrolę zależności statystycznych.

Procedury te pozwalają zidentyfikować wartości wątpliwe oraz mogą wskazać jon odpowiedzialny za niedomknięcie bilansu jonowego lub potwierdzić, czy wartość nietypowa jest efektem naturalnych zjawisk przyrodniczych albo błędów popełnionych podczas postępowania badawczego. Do pierwszej grupy zaliczono testy sprawdzające, czy parametr obliczany, będący wskaźnikiem wyliczonym na podstawie danych źródłowych, przyjmuje wartości z określonego zakresu. Najczęściej są to stosunki pierwiastków, np. węgla do azotu (C/N) lub węgla do fosforu (C/P) w próbkach glebowych (Fürst i in. 2020) lub stosunek jonów sodu do chlorków (Na^+/Cl^-) dla wód opadowych. Jeżeli jedynym źródłem tych jonów w opadach są aerozole morskie, stosunek ten przyjmuje wartości z zakresu od 0,5 do 1,5 (Mosello i in. 2005, Clarke i in. 2020, Fürst i in. 2020). Jony te nie uczestniczą również w procesach wymywania i wymiany jonowej zachodzących podczas kontaktu opadów z powierzchnią roślin (Draaijers i in. 1997, Kozłowski i in. 2012), dlatego wskaźnik ten można też wykorzystać w kontroli stężeń Na^+ i Cl^- w opadzie podkoronowym i spływie po pniach.

Odrębną grupę stanowią związki definicyjne i logiczne, w których obecność jednego z parametrów determinuje obecność innego parametru pomiarowego. Przykładem takiego związku jest występowanie w wodach wodorowęglanów, których obecność zależy od pH tych wód (Clarke i in. 2020, Degórska, Żyfka-Zagrodzińska 2021).

Odmienną grupę tworzą zależności statystyczne, których kontrola polegała na sprawdzeniu, czy korelacja taka występuje, określeniu jej mocy, rodzaju (np. zależność liniowa) oraz kierunku (korelacja dodatnia, ujemna). Przedmiotem kontroli są zarówno zależności między parametrami w ramach tego samego programu pomiarowego, np. zależność stężenia jonów sodowych od chlorkowych w wodach opadowych, oraz pomiędzy parametrami w różnych programach pomiarowych, np. zależność wysokości opadu podkoronowego od wysokości opadu na terenie otwartym (ryc. 3).

Jedną z podstawowych zależności statystycznych, wykorzystywanych w kontroli poprawności wykonanych analiz chemicznych, jest zależność przewodności elektrolitycznej właściwej od sumy stężeń anionów i kationów wyrażona w $\mu eq \cdot L^{-1}$. Zależność ta ma charakter korelacji liniowej dodatniej, kiedy stężenie jonów H^+ jest niskie, co ma miejsce przy wartościach pH większych od 5 (Fürst i in. 2020). Powyżej tej granicy konieczna jest korekta przewodności o stężenie jonów H^+ (Fürst i in. 2020). Test ten pozwala na identyfikację serii pomiarowej, dla której obliczony model nie jest aproksymowany przez model liniowy. Wskazuje to na błędy popełnione na etapie analityki laboratoryjnej lub rzadziej na problemy związane z pomiarem przewodności elektrolitycznej właściwej.



Ryc. 3. Przykład zależności statystycznej opadu podkoronowego (OP) od opadu na terenie otwartym (OA) dla drzewostanu grabowego (A), sosnowego (B), jodłowego (C) i bukowego (D) na podstawie danych z okresu 2000–2021, dane miesięczne

Objaśnienia: r – współczynnik korelacji Pearsona, p – poziom istotności, n – liczebność próbki

Fig. 3. Example of statistical dependence of throughfall (OP) on bulk precipitation (OA) for hornbeam (A), pine (B), fir (C) and beech (D) stands based on data from 2000 – 2021, monthly data

Explanations: r – Pearson correlation coefficient, p – significance level, n – sample size

Weryfikacja wartości wątpliwych

Ostatnim etapem kontroli merytorycznej jest weryfikacja wartości wątpliwych. Jeżeli w trakcie kontroli merytorycznej pomiar zostaje zweryfikowany negatywnie i wynik kontroli zostaje zatwierdzony przez administratora bazy danych (w niektórych sytuacjach wymagana jest konsultacja z ekspertem ZMŚP), dane takie otrzymują etykietę **danych wątpliwych**.

W procesie weryfikacji danych wątpliwych kluczową instytucją jest stacja bazowa dysponująca pełnym zestawem informacji niezbędnych do zaklasyfikowania danych wątpliwych jako wyników poprawnych lub uznania ich za wartości błędne. W przypadku gdy przedmiotem kontroli są wyniki analiz chemicznych, istotnym źródłem informacji jest laboratorium świadczące usługi analityczne na

rzecz stacji. W sytuacji kiedy stacja lub laboratorium nie może jednoznacznie zaliczyć wyników wątpliwych do wartości błędnych lub poprawnych, konieczna jest konsultacja eksperta ZMŚP. Ekspert podejmuje ostateczną decyzję o akceptacji wyniku pomiaru lub uznaniu go za wynik błędny. W tym ostatnim przypadku zostaje on oflagowany flagą wartość nieważna i zarchiwizowany w bazie danych. Nie podlega on procesowi agregacji, nie jest też udostępniany innym sieciom monitoringowym. Jeżeli wynik zostaje skorygowany przez stację lub laboratorium, ponownie przechodzi cały proces weryfikacji obejmujący zarówno kontrolę formalną, jak i merytoryczną.

Podsumowanie

Istotnym etapem w procesie archiwizacji danych pomiarowych w bazie danych jest weryfikacja wyników monitoringu środowiska przyrodniczego. Olbrzymie zróżnicowanie parametrów pomiarowych monitorowanych w ramach ZMŚP oraz liczba wyników corocznie przekazywanych przez stacje do bazy danych sprawia, że jedynie automatyzacja procesu kontroli danych pozwala efektywnie identyfikować wartości błędne lub wątpliwe. Procedura kontroli obejmuje etap weryfikacji formalnej i merytorycznej. Na obu etapach wykorzystywane są metadane (informacje o zakresie i sieci pomiarowej), dane zagregowane oraz wartości referencyjne. Etap kontroli formalnej zostaje przeprowadzony w przyjaznym dla użytkownika środowisku programu MS Excel. Obejmuje on kontrolę struktury przesłanych danych oraz stosowanych oznaczeń kodowych. Jest to pierwszy etap weryfikacji, pozwalający w sposób automatyczny wykryć tzw. grube błędy powstałe najczęściej na etapie przygotowania i opracowania danych. Weryfikacja merytoryczna przeprowadzana jest po stronie serwera z wykorzystaniem funkcji języka SQL i PL/pgSQL i ma na celu identyfikację wartości nietypowych oraz kontrolę poprawności oznaczeń laboratoryjnych (test bilansu jonowego oraz przewodności). Jeżeli na tym etapie wynik testowania zakończy się niepowodzeniem, wartość taka lub seria otrzymuje etykietę wartości lub serii wątpliwej. Ostatnim etapem kontroli danych jest weryfikacja wartości wątpliwych, w którym kluczową rolę odgrywa stacja bazowa (laboratorium) oraz ekspert ZMŚP.

Jedną z najważniejszych funkcjonalności opracowanego systemu weryfikacji jest możliwość całościowej analizy wyników kontroli na poziomie konkretnego rekordu danych. W tym celu w programie MS Access zaprojektowano szereg formularzy pozwalających zarządzać całym procesem weryfikacji danych. Zastosowane rozwiązanie pozwala ponadto na graficzną kontrolę danych umożliwiającą porównywanie danych weryfikowanych z danymi z wielolecia, wyników z różnych stacji i stanowisk oraz parametrów z różnych programów pomiarowych.

Literatura

Budka A., Kayzer D., Pietruczuk K., Szoszkiewicz K., 2013. Zastosowanie wybranych procedur do wykrywania obserwacji nietypowych w ocenie jakości rzek. Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich, 3/2: 85–95.

Clarke N., Žlindra D., Ulrich E., Mosello R., Derome J., Derome K., König N., Lövblad G., Draaijers G.P.J., Hansen K., Thimonier A., Waldner P., Verstraeten A., 2020. Part XIV: Sampling and Analysis of Deposition. Version 2020-1. [W:} UNECE ICP Forests Programme Co-ordinating Centre, Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. Thünen Institute of Forest Ecosystems, Eberswalde, Germany + Annex (http://www.icpforests.org/Manual.htm).

Degórska A., Żyfka-Zagrodzińska E., 2021. Zapewnienie jakości danych. [W:] A. Kostrzewski, M. Majewski (red.), Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Organizacja, system pomiarowy, metody badań. Wytyczne do realizacji. Bibl. Monit. Środ., Warszawa: 344–354.

Draaiers G.P.J., Erisman J.W., van Leuven N.F.M., Romer F.G., Te Winkel B.H., Veltkamp A.C., Vermeulen A.T., Wyers G.P., 1997. The impact of canopy exchange on differences observed between atmospheric deposition and throughfall fluxes. Atmos. Environ., 31: 387–397. http://doi.org/10.1016/S1352-2310(96)00164-1

EMEP Manual for sampling and chemical analysis EMEP/CCC-Report 1/95. Revised, 2001 (https://projects.nilu.no/ccc/manual).

Fürst A., Kowalska A., Brunialti G., Clarke N., Cools N., De Vos B., Derome J., Derome K., Ferretti M., Jakovljevič T., König N., Marchetto A., Mosello R., O'Dea P., Tartari G.A., Ulrich E., 2020. Part XVI: Quality Assurance and Control in Laboratories. Version 2020-1. [W]: UNECE, ICP Forests Programme Co-ordinating Centre, Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. Thünen Institute of Forest Ecosystems, Eberswalde, Germany + Annex (http://www.icp-forests.org/manual.htm).

Kostrzewski A., 1991. Koncepcja programu: Monitoring obiegu energii i materii – kompleksowy monitoring środowiska przyrodniczego w podstawowych typach geoekosystemów Polski. Komitet Naukowy przy Prezydium PAN „Człowiek i Środowisko, Poznań.

Kostrzewski A., 1993. Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego – stan prac, etapy realizacji. [W:] A. Kostrzewski (red.), Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego w Polsce. Wybrane problemy. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa: 11–18.

Kostrzewski A., Mazurek M., Stach A., 1995. Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Zasady organizacji, system pomiarowy, wybrane metody badań. Biblioteka Monitoringu Środowiska. Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Warszawa.

Kostrzewski A., Majewski M. (red.), 2021. Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Organizacja, system pomiarowy, metody badań. Wytyczne do realizacji. Bibl. Monit. Środ., Warszawa.

Kozłowski R., Jóźwiak M., Jóźwiak M., Bochenek W., 2012. Assessment of K+, Ca2+ and Mg2+ volume leaching in selected tree stands under conditions of acidic deposition. Sylwan, 156: 607–615. http://doi.org/10.26202/sylwan.2011117

Manual for the GAW Precipitation Chemistry Programme, 2004. Guidelines, Data Quality Objectives and Standard Operating Procedures. World Meteorological Organization Global Atmosphere Watch, 160.

Mosello R., Amoriello M., Arisci S., Carcano A., Clarke N., Derome J., Koenig N., Tartari G., Ulrich E., 2005. Validation of chemical analyses of atmospheric deposition in forested European sites. J. Limnol., 64(2): 93–102.

PMŚ, 2020. Program Państwowego Monitoringu Środowiska na lata 2020–2025. Warszawa (https://www.gios.gov.pl/images/dokumenty/pms/pms/PPMS_2020-2025_OSTATECZNY.pdf).

Soczewski P., 2019. Procedura harmonizacji danych przestrzennych INSPIRE Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego. Dokumentacja analityczna. Maszynopis.

Zwoliński Z., 1993. Projekt systemu informatycznego Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego. [W:] A. Kostrzewski (red.), Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego w Polsce. Wybrane problemy. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa: 101–109.

Realizacja programu Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego w zlewniach eksperymentalnych

Implementation of the Integrated Monitoring of the Natural Environment program in experimental catchments

Młyński Potok – dopływ górnej Parsęty

Józef Szpikowski[1,2], Andrzej Kostrzewski[1], Grażyna Szpikowska[2], Monika Domańska[2]

[1]Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, jozef.szpikowski@amu.edu.pl
[2]Stacja Geokologiczna w Storkowie, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu
JS https://orcid.org/0000-0001-9537-3261, AK https://orcid.org/0000-0001-5407-3617,
GS https://orcid.org/0000-0001-7649-6821

Klimatyczne i hydrologiczne zagrożenia i trendy zmian środowiska geograficznego zlewni górnej Parsęty na podstawie badań w ramach Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego

Climatic and hydrological threats and trends of changes in the geographical environment of the upper Parsęta catchment basing on the Integrated Monitoring of the Natural Environment

Zarys treści: Na podstawie badań realizowanych w ramach Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego (ZMŚP) w Stacji Bazowej Parsęta w Storkowie określono stan, zagrożenia i trendy zmian wybranych elementów klimatycznych i hydrologicznych środowiska przyrodniczego zlewni górnej Parsęty. Program ZMŚP jest prowadzony od roku 1994, a do analizy wykorzystano również dane gromadzone w Stacji w Storkowie od roku 1987. Zlewnia górnej Parsęty reprezentuje geoekosystem młodoglacjalny Pojezierza Drawskiego, o leśno-rolnej strukturze użytkowania ziemi, poza zasięgiem intensywnej urbanizacji. Niewielkie wieloletnie zamiany wskaźników oceanizmu i kontynentalizmu wskazują na typową dla tej części Polski zmienność typów pogody z dużym wpływem mas powietrza oceanicznego. Jednocześnie obserwuje się wieloletni trend wzrostu temperatury powietrza o 0,46°C na 10 lat przy braku wieloletnich trendów zmian wysokości opadów atmosferycznych. Wzrost temperatury powietrza odzwierciedla się w zwiększaniu wielkości parowania i niekorzystnie oddziałuje na zmiany klimatycznego bilansu wodnego oraz bilansu wodnego zlewni górnej Parsęty. Duża stabilność hydrologiczna górnej Parsęty jest wynikiem przewagi zasilania z wód podziemnych. Obserwowane trendy wzrostu temperatury powietrza i parowania mogą w dłuższej perspektywie wpłynąć na zmniejszenie zasobów wodnych zlewni.

Słowa kluczowe: Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego, zlewnia górnej Parsęty, wzrost temperatury powietrza, parowanie, bilans wodny

Abstract: On the basis of research carried out as part of the Integrated Monitoring of the Natural Environment (IMNE) at the Parsęta Base Station in Storkowo, the state, threats and trends of changes in selected climatic and hydrological elements of the natural environment of the upper Parsęta catchment area were determined. The IMNE program has been run since 1994, and data collected at the Storkowo Station since 1987 were also used for the analysis. The upper Parsęta catchment represents the young glacial geoecosystem of the Drawskie Lakeland, with a forest and agricultural structure of land use, beyond the reach of intensive urbanization. Small long-term changes in oceanism and continentalism indexes indicate the variability of weather types, typical for this part of Poland, with a strong influence of oceanic air masses. At the same time, there is a long-term trend of air temperature increase by 0.46°C per 10 years, with no long-term trends in changes in the amount of precipitation. The increase in air temperature is reflected in the increase in the amount of evaporation and adversely affects the changes in the climatic water balance as well as in the water balance of the upper Parsęta catchment. The high hydrological stability of the upper Parsęta is the result of the predominance of groundwater supply. The observed trends of increasing air temperature and evaporation may reduce water resources of the catchment in the long term.

Keywords: Integrated Monitoring of the Natural Environment, the upper Parsęta catchment, increase in air temperature, evaporation, water balance

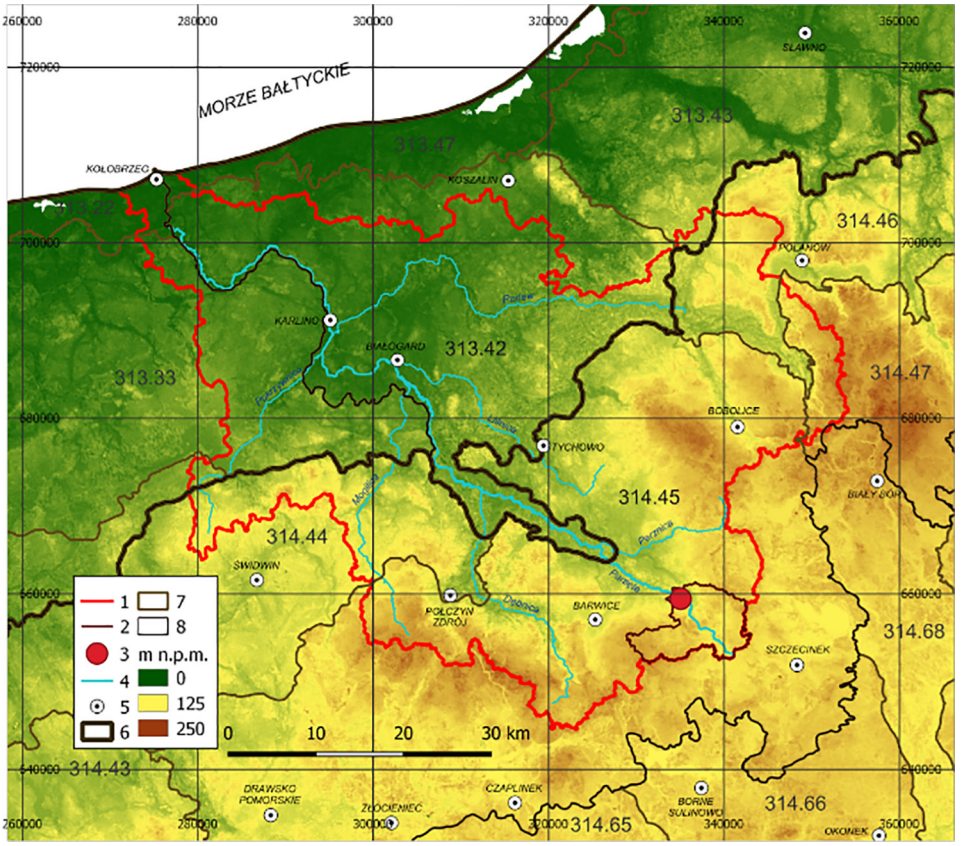
Wprowadzenie

Program Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego jest realizowany w Stacji Parsęta w Storkowie w zlewni górnej Parsęty od roku 1994, kiedy Stacja została włączona do struktury Stacji Bazowych ZMŚP. Monitoring jest prowadzony w nawiązaniu do koncepcji metodologicznej funkcjonowania geoekosystemu (Kostrzewski 1993) i obejmuje zarówno elementy abiotyczne, jak i parametry środowiska ożywionego (Kostrzewski, Majewski red. 2021). Prowadzone badania umożliwiają rozpoznanie aktualnego stanu, zagrożeń i trendów zmian środowiska przyrodniczego.

Celem niniejszego opracowania jest wskazanie głównych uwarunkowań, a zarazem zagrożeń, meteorologicznych i hydrologicznych, dla funkcjonowania geoekosystemu górnej Parsęty. Obserwowane i licznie prezentowane badania nad zmianami klimatycznymi przekładają się na dynamikę obiegu wody i całe środowisko geograficzne zlewni rzecznych w skali lokalnej i globalnej (Kundzewicz, Juda-Rezler 2010, Singh i in. 2014, Novruzova 2022).

Obszar badań

Zlewnia górnej Parsęty jest położona w mezoregionie Pojezierza Drawskiego i w strukturze Stacji Bazowych ZMŚP reprezentuje geoekosystem młodoglacjalny Polski północno-zachodniej (ryc. 1). Na obszarze zlewni o powierzchni 74 km^2



Ryc. 1. Położenie Stacji Bazowej ZMŚP Parsęta na tle podziału fizycznogeograficznego Polski (Solon i in. 2018)

1 – dorzecze Parsęty; 2 – zlewnia górnej Parsęty; 3 – Stacja Bazowa ZMŚP Parsęta w Storkowie; 4 – rzeki; 5 – miasta; 6 – granice podprowincji; 7 – granice makroregionów; 8 – granice mezoregionów

Fig. 1. Location of the IMNE Parsęta Base Station against the background of the physico-geographical division of Poland (Solon et al. 2018)

1 – Parsęta river basin; 2 – upper Parsęta catchment area; 3 – IMNE Parsęta Base Station in Storkowo; 4 – rivers; 5 – cities; 6 – borders of sub-provinces; 7 – borders of macroregions; 8 – borders of mesoregions

występują złożone elementy rzeźby nawiązujące do stref morfogenetycznych lobu Parsęty wyróżnionych przez Karczewskiego (1989). Wśród nich największy obszar zajmują formy kemowo-wytopiskowe rozdzielane lokalnymi sandrami i większymi zagłębieniami wytopiskowymi. W północno-zachodniej części zlewni górnej Parsęty rozciąga się strefa dennomorenowa zaliczana do najwyższego poziomu wysoczyzn morenowych północnego skłonu Pomorza. Cała zlewnia jest porozcinana dolinami rzecznymi Parsęty i jej dopływów.

Zlewnia górnej Parsęty reprezentuje leśno-rolny typ użytkowania ziemi. Grunty rolne zajmują 46% powierzchni zlewni (w tym grunty orne 31% i łąki

12%), natomiast lasy – 48%. Obszary antropogeniczne (głównie zabudowa) zajmują 3,5%, bagna i torfowiska 2%, a wody poniżej 0,5% obszaru zlewni.

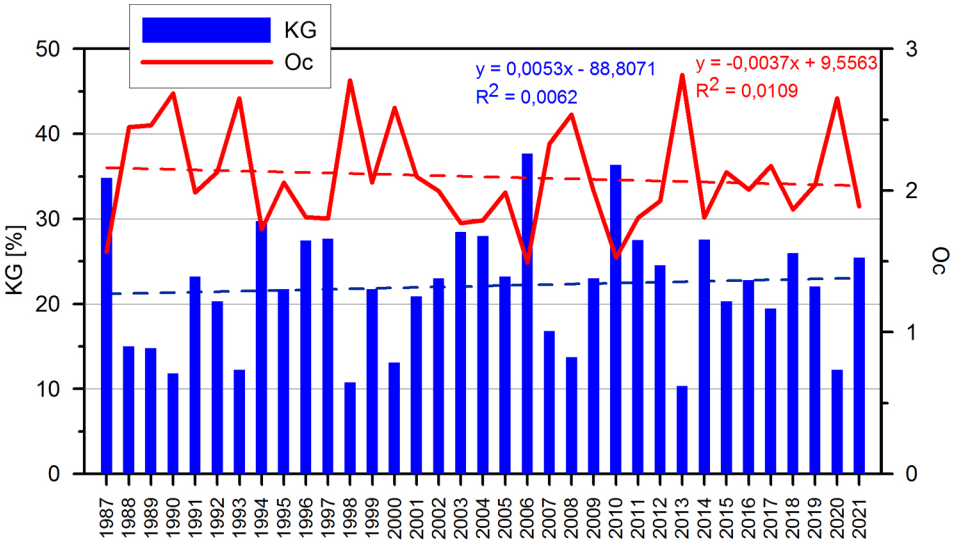
Dotychczasowa seria obserwacyjna pozwala na stwierdzenie, że aktualny stan środowiska geograficznego zlewni górnej Parsęty kształtowany jest przez zespół czynników naturalnych (dopływ energii słonecznej, dostawę i obieg wody w zlewni, typ rzeźby terenu i litologię osadów) oraz zróżnicowany wpływ uwarunkowań antropogenicznych (użytkowanie ziemi, dostawę zanieczyszczeń do powietrza i wód, korzystanie z zasobów środowiska). Obieg materii i energii jest bezpośrednio powiązany z dostawą i krążeniem wody.

Podstawowe dane do niniejszej analizy pochodzą z monitoringu środowiska prowadzonego w ramach ZMŚP w Stacji Bazowej Parsęta. Obserwacje meteorologiczne, hydrologiczne i inne prowadzone są zgodnie z metodykami stosowanymi w ZMŚP (Kostrzewski, Majewski red. 2021). Uzyskane wyniki podlegają weryfikacji i są zamieszczane w Centralnej Bazie Danych ZMŚP (Kruszyk 2021). Okres wegetacyjny, czyli czas z ustabilizowaną średnią dobową temperaturą co najmniej 5°C oraz okres intensywnej wegetacji (temperatura dobowa co najmniej 10°C), ustalono dla serii danych ze Storkowa z lat 1987–2021 według metody Huculaka i Makowca (1977). Metoda ta, oparta na danych dobowych temperatury powietrza, pod względem metodycznym lepiej niż metoda Gumińskiego oddaje zmienność warunków w poszczególnych latach (Bartoszek i in. 2012). Parowanie wskaźnikowe zostało obliczone z formuły Baca (1993). Dla okresów miesięcznych i rocznych obliczono klimatyczny bilans wodny jako różnicę pomiędzy opadem atmosferycznym a parowaniem wskaźnikowym w danym przedziale czasowym.

Wyniki i dyskusja

Warunki termiczne

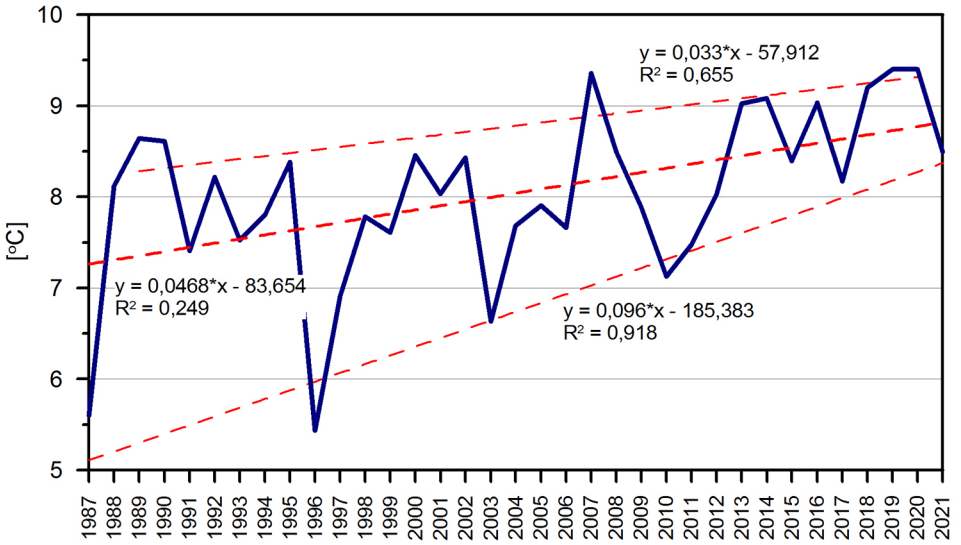
Trzydziestopięcioletnia seria pomiarów meteorologicznych (od roku 1987) wskazuje, że zlewnia górnej Parsęty pozostaje w strefie przejściowej pod silnym wpływem klimatu oceanicznego (ryc. 2). Dla lat 1987–2021 średnia wartość wskaźnika oceanizmu termicznego według Marsza (1995) wyniosła 2,1 i klasyfikuje klimat Storkowa jako suboceaniczny (Oc w przedziale od 2,0 do 2,99) z dominacją w chłodnej porze roku mas powietrza morskiego. Jednak aż w 15 latach wielolecia 1987–2021 wskaźnik oceanizmu mieścił się w zakresie od 1,00 do 1,99. Były to lata z dominacją w okresie zimowym mas powietrza kontynentalnego. Wskaźnik oceanizmu wykazuje nieistotny statystycznie trend malejący (spadek o 0,04 na 10 lat). Z kolei wskaźnik kontynentalizmu Gorczyńskiego (1922) osiągnął średnią wieloletnią wartość 22,1 przy zmienności od 10,4 do 36,3. Zgodnie z klasyfikacją średnia wartość wskaźnika pozwala uznać klimat Storkowa za oceaniczny. Dla 33 lat obserwacji wskaźnik mieścił się w klasie klimatu oceanicznego, a jedynie dla 2 lat w klasie klimatu kontynentalnego. Wskaźnik kontynentalizmu Gorczyńskiego w wieloleciu wykazuje nieistotny statystycznie trend rosnący



Ryc. 2. Wskaźniki kontynentalizmu Gorczyńskiego (KG) i oceanizmu termicznego Marsza (Oc) w Storkowie w latach 1987–2021 i trendy ich zmian
Fig. 2. Indices of Gorczyński's continentalism (KG) and thermal oceanism of the March (Oc) in Storkowo in the years 1987–2021 and trends of their changes

o 0,05 na 10 lat. Badania trendów zmian wskaźników klimatycznych dla zlewni Bystrzanki w Beskidzie Niskim (Bochenek i in. 2018) przejawiały dla wielolecia 1971–2015 znacząco większe tendencje do wzrostu kontynentalizmu klimatu według metody Gorczyńskiego. Można uznać, że w przypadku zlewni górnej Parsęty oba obliczone wskaźniki świadczą o większej stabilności klimatu Pomorza Środkowego w ujęciu wieloletnim przy pewnej typowej zmienności udziału mas powietrza pochodzenia morskiego i kontynentalnego w kształtowaniu pogody w kolejnych latach. O znaczeniu mas powietrza oceanicznego świadczy charakterystyczny układ termicznych pór roku z krótką zimą oraz ze stosunkowo długimi porami przejściowymi – przedwiośniem, wiosną, jesienią i przedzimiem.

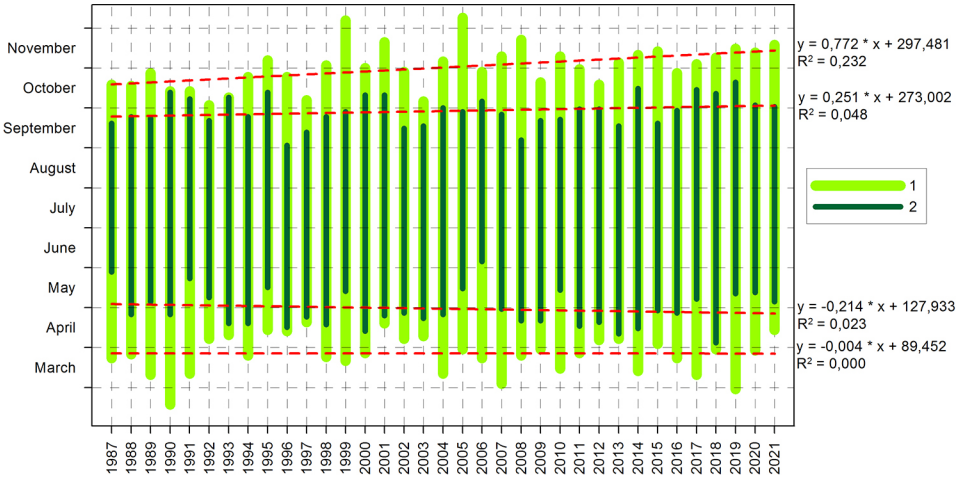
W wieloleciu 1987–2021 pojawia się wyraźna tendencja do wzrostu temperatury powietrza (ryc. 3). Trend wzrostowy dla średniej rocznej temperatury wynosi 0,46°C na 10 lat, lecz nie jest istotny statystycznie ($0,05<p<0,1$). Wzrost temperatury powietrza przyspieszył w ostatnich dwóch dekadach. Na podstawie danych z lat 1951–2005 Michalska (2011) obliczyła, że dla Chojnic (stacja położona w tym zestawieniu najbliżej Storkowa) wzrost temperatury wynosił 0,22°C na 10 lat, a dla Ustki 0,26°C na 10 lat. W Storkowie występuje przy tym istotny statystycznie ($p<0,05$) trend do wzrostu minimalnych średnich rocznych temperatur powietrza (o wielkości 1°C na 10 lat) i nieistotny statystycznie trend do wzrostu maksymalnych średnich rocznych temperatur powietrza. Obserwowany wzrost temperatury powietrza nie przebiega równomiernie. Zaznaczają się dwa wyraźne okresy wzrostu temperatury powierza: lata 1988–1990 i lata 2013–2021. W pozostałym okresie występowały lata o niższej temperaturze powietrza względem



Ryc. 3. Średnia roczna temperatura powietrza w Storkowie w latach 1987–2021 i trend zmian dla wszystkich wartości, dla minimów i dla maksimów
Fig. 3. Average annual air temperature in Storkowo in the years 1987–2021 and the trend of changes for all values, for minima and maxima

wartości średniej (np. 1996–1999, 2003–2006 i 2009–2011) przedzielane latami z temperaturą powietrza zbliżoną do średniej wartości wieloletniej. Stały i wyraźny trend wzrostu temperatury powietrza rozpoczął się w roku 2012 i trwał do roku 2021. Zmiany temperatury powietrza wpływają na wzrost sumy temperatur efektywnych (liczonej dla dni z temperaturą powyżej 10°C). Liniowy trend wzrostu temperatur efektywnych wynosi 75°C na 10 lat (nie jest istotny statystycznie). Wpływa to bezpośrednio na stan środowiska przyrodniczego, np. na kształtowanie korzystniejszych warunków siedliskowych dla niektórych roślin, w tym również dla gatunków inwazyjnych obcego pochodzenia.

Średnia długość okresu wegetacyjnego (ryc. 3) wynosiła 223 dni przy zmienności od 173 dni (rok 1997) do 265 dni (rok 2019). Okres intensywnej wegetacji trwał średnio 156 dni, przy zmienności od 116 dni (rok 1987) do 222 dni (rok 2018). Średnia data początku okresu wegetacyjnego to 30 marca, przy zmienności w przedziale od 19 lutego (rok 1990) do 24 kwietnia (rok 1997). Koniec okresu wegetacyjnego przypada średnio na 7 listopada, przy zmienności w przedziale od 9 września (rok 1992) do 16 grudnia (rok 2005). Okres intensywnej wegetacji rozciąga się średnio od 3 maja do 6 października. Początek okresu intensywnej wegetacji zmienia się od 8 kwietnia (rok 2018) do 10 czerwca (rok 2006), a koniec od 8 września (rok 1996) do 27 października (rok 2019). Dla początku sezonu wegetacyjnego nie stwierdzono w wieloleciu 1987–2021 zauważalnego trendu zmian, natomiast dla terminu końca występuje trend rosnący (nieistotny statystycznie) o wielkości prawie 8 dni na 10 lat (ryc. 4). Jest to wzrost porównywalny z maksymalnym stwierdzonym wydłużeniem okresu wegetacyjnego w Polsce



Ryc. 4. Okres wegetacyjny (1) i okres intensywnej wegetacji (2) w Storkowie w latach 1987–2021 i trendy zmian początków i końców tych okresów

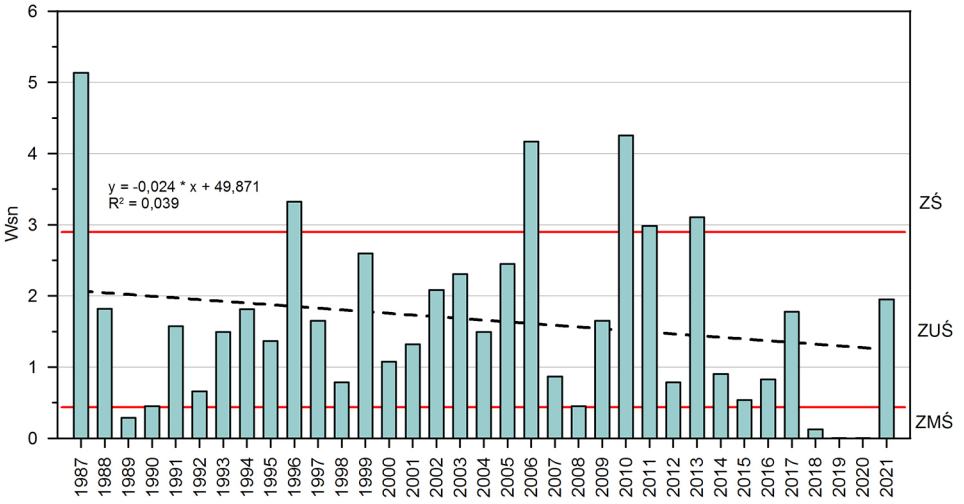
Fig. 4. Vegetation period (1) and intensive vegetation period (2) in Storkowo in the years 1987–2021 and trends of changes in the beginnings and ends of these periods

przez Tomczyka i Szygę-Plutę (2016) dla wielolecia 1971–2010 (Łeba, 8,5 dnia na 10 lat). Zauważono również tendencję do przyspieszania początku okresu intensywnej wegetacji o 2 dni na 10 lat i opóźniania zakończenia o 2,5 dnia na 10 lat.

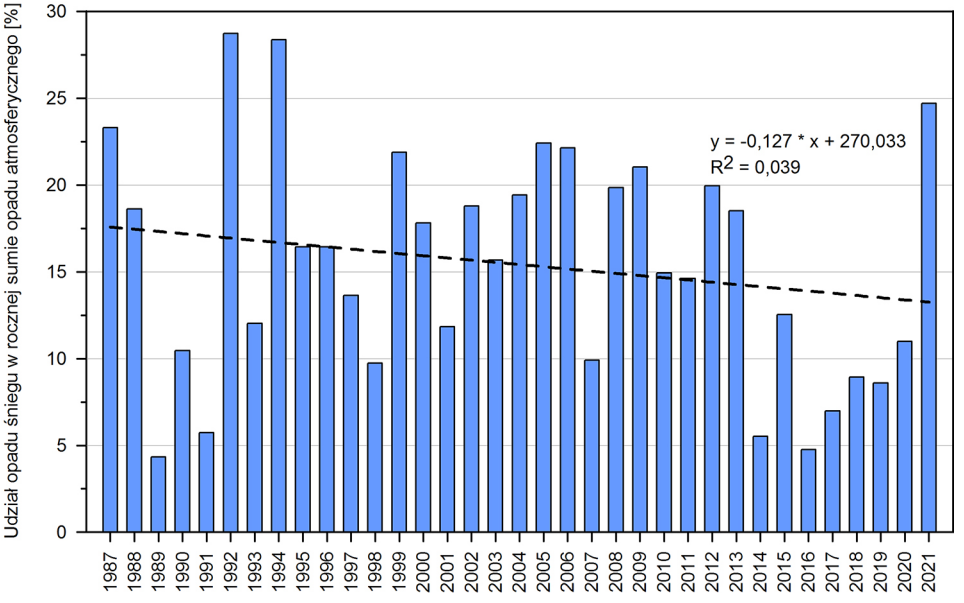
Warunki opadowe i bilans wodny

Roczna suma opadów atmosferycznych, przy wartości średniej 697,4 mm, nie wykazuje w wieloleciu 1987–2021 stałych trendów zmian, natomiast podlega wahaniom w nierównych cyklach co 3–4 lata. W ostatniej dekadzie zmniejszanie sumy rocznych opadów zachodziło od roku 2011 do 2014, po czym nastąpił cykl wzrostu opadów do roku 2017. W roku tym odnotowano maksymalną sumę rocznych opadów w Storkowie o wysokości 982,4 mm. Od tego roku ponownie opady systematycznie malały, aż do minimalnej w wieloleciu wartości 443,5 mm w roku 2021. Szczególnie niekorzystnie na kształtowanie klimatycznego bilansu wodnego zlewni górnej Parsęty wpływają lata z małą ilością opadów (zwłaszcza w półroczu zimowym) oraz zimy z niewielką pokrywą śnieżną. Wskaźnik śnieżności zim według Paczosa (1985) wykazuje dla wielolecia 1987–2021 nieistotny statystycznie trend malejący (ryc. 5). Należy przy tym zaznaczyć, że trzy kolejne bardzo mało śnieżne zimy wystąpiły w latach 2018–2020, czego nie odnotowano wcześniej w całym obserwowanym wieloleciu.

W wieloleciu 1987–2021 obserwowany jest malejący trend (nieistotny statystycznie) udziału opadu w formie śniegu w całkowitym opadzie atmosferycznym (ryc. 6). Nawet występowanie opadu śniegu, przy wysokich temperaturach powietrza w okresach zimowych, może nie prowadzić do utworzenia stabilnej



Ryc. 5. Wskaźnik śnieżności zim (Wsn) według Paczosa (1985) w Storkowie w wieloleciu 1987–2021
ZŚ – zimy śnieżne; ZUŚ – zimy umiarkowanie śnieżne; ZMŚ – zimy małośnieżne
Fig. 5. Winter snow index (Wsn) according to Paczos (1985) in Storkowo in the years 1987–2021
ZŚ – snowy winters; ZUŚ – moderately snowy winters; ZMŚ – low snow winters

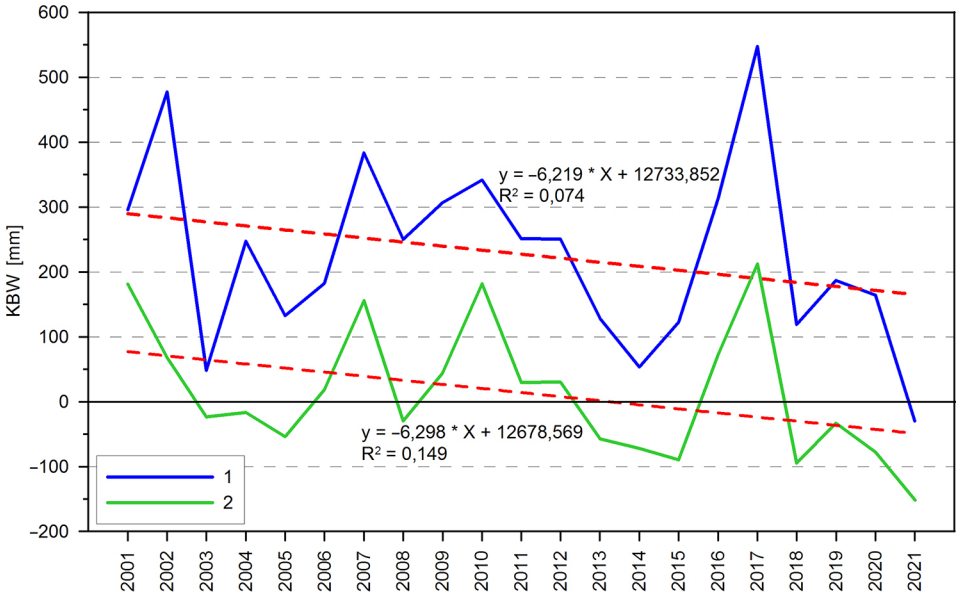


Ryc. 6. Udział opadu śniegu w całkowitym opadzie atmosferycznym w Storkowie w latach 1987–2021
Fig. 6. The share of snowfall in the total precipitation in Storkowo in the years 1987–2021

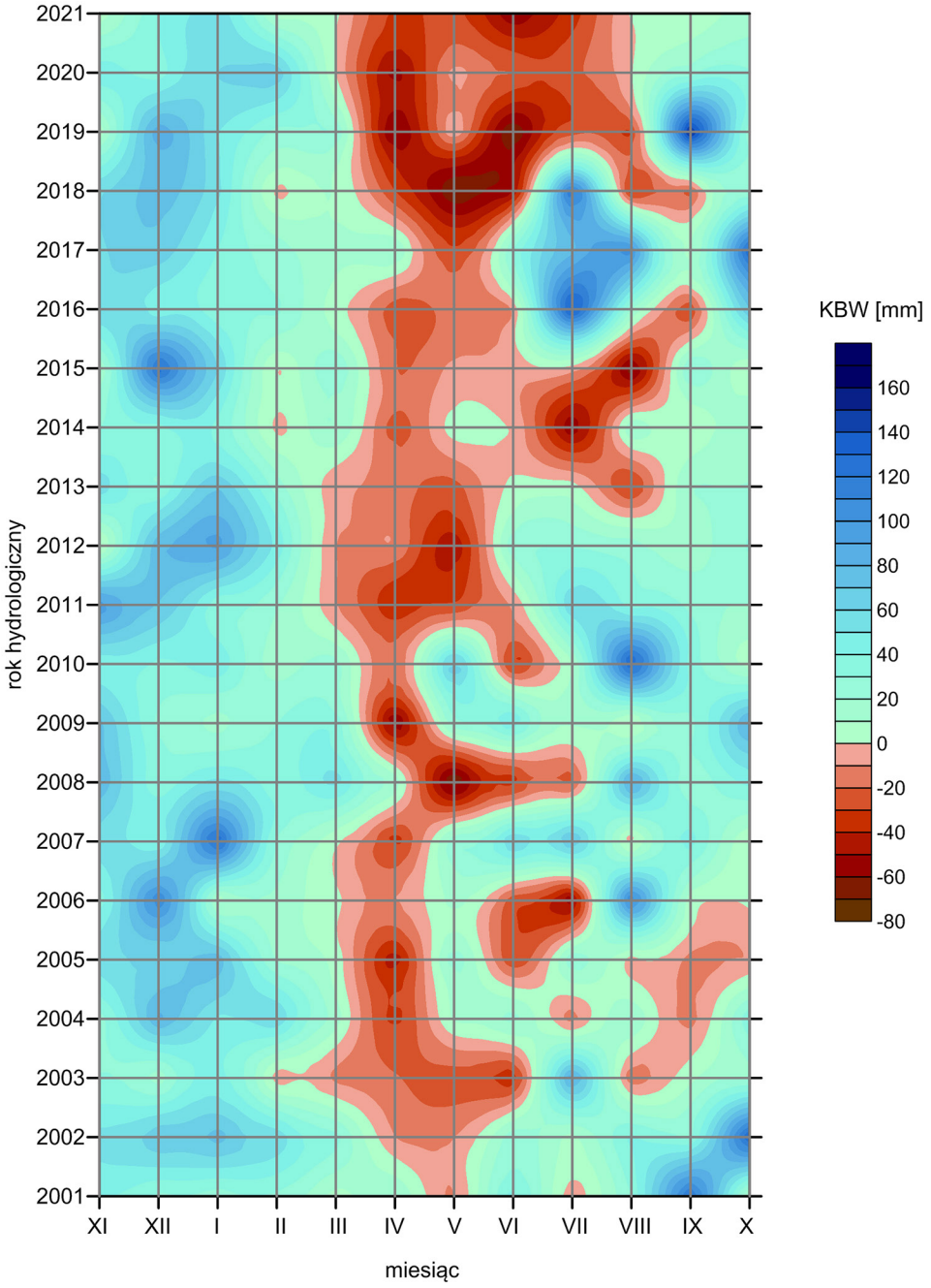
pokrywy śnieżnej. Świadczą o tym np. lata 2019 i 2020, gdy pomimo 9-procentowego udziału śniegu w opadzie pokrywa śnieżna utrzymywała się zaledwie przez 11 dni (2019) i przez 1 dzień (2020).

W wieloleciu 2001–2021 widoczny jest trend wzrostu rocznej sumy parowania wskaźnikowego (o 22 mm na 10 lat), co jest powiązane ze wzrostem temperatury powietrza. Średnia roczna wartość klimatycznego bilansu wodnego (KBW) w Storkowie w latach 2001–2021 wynosiła 227,4 mm, przy wartościach skrajnych miesięcznych –80,2 mm (maj 2008 r.) i 160,7 mm (wrzesień 2019 r.). W roku 2021 po raz pierwszy w badanym wieloleciu roczna wartość KBW była ujemna: –28,8 mm. Występuje wieloletni trend (nieistotny statystycznie) obniżania wartości KBW o 62 mm na 10 lat (ryc. 7). Dla sezonu wegetacyjnego, liczonego od kwietnia do września, średnia wartość KBW wynosi 14,1 mm. Dla tego okresu w wieloleciu 2001–2021 wystąpiło aż 11 lat z ujemnym KBW, ze szczególnym nasileniem w latach 2018–2021. Widoczny jest przy tym malejący trend KBW dla okresu wegetacyjnego, wynoszący 63 mm na 10 lat.

Ujemnym klimatycznym bilansem wodnym cechują się zazwyczaj miesiące od kwietnia do czerwca, ale występują również lata, gdy ujemny KBW występuje przez 6 miesięcy (lata 2003, 2018 i 2020), a nawet 7 miesięcy, jak w roku 2015. Rzadko ujemny KBW występuje tylko w 2 miesiącach roku (lata 2002 i 2009), a w wyjątkowo wilgotnym roku 2017 ujemny KBW odnotowano wyłącznie w 1 miesiącu (ryc. 8).



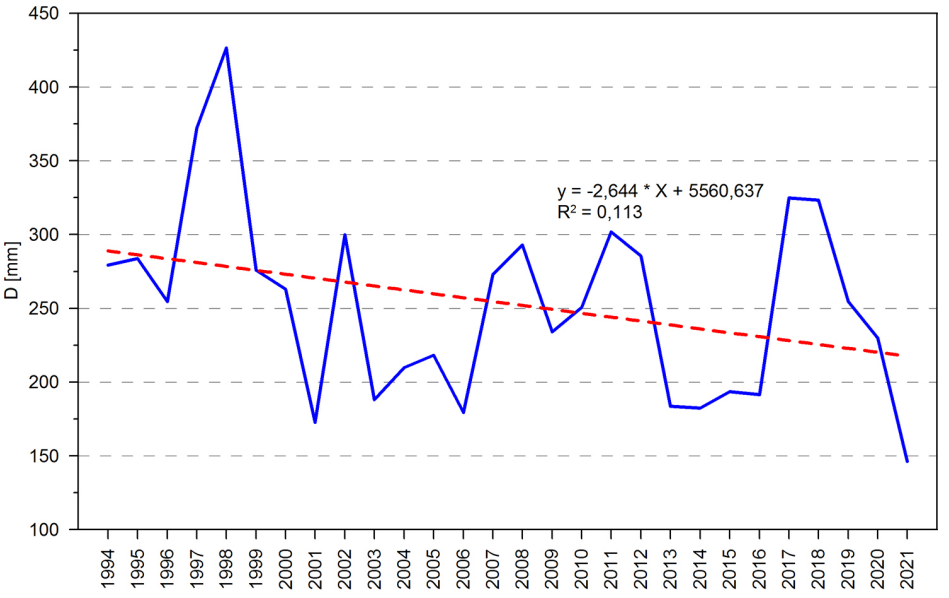
Ryc. 7. Wielkość klimatycznego bilansu wodnego (KBW) dla Storkowa dla lat 2001–2021
1 – roczna wartość KBW; 2 – wartość KBW w okresie wegetacyjnym (kwiecień–wrzesień)
Fig. 7. The value of the climatic water balance (KBW) for Storkowo in the years 2001–2021
1 – annual CWB value; 2 – CWB value during the growing season (April–September)



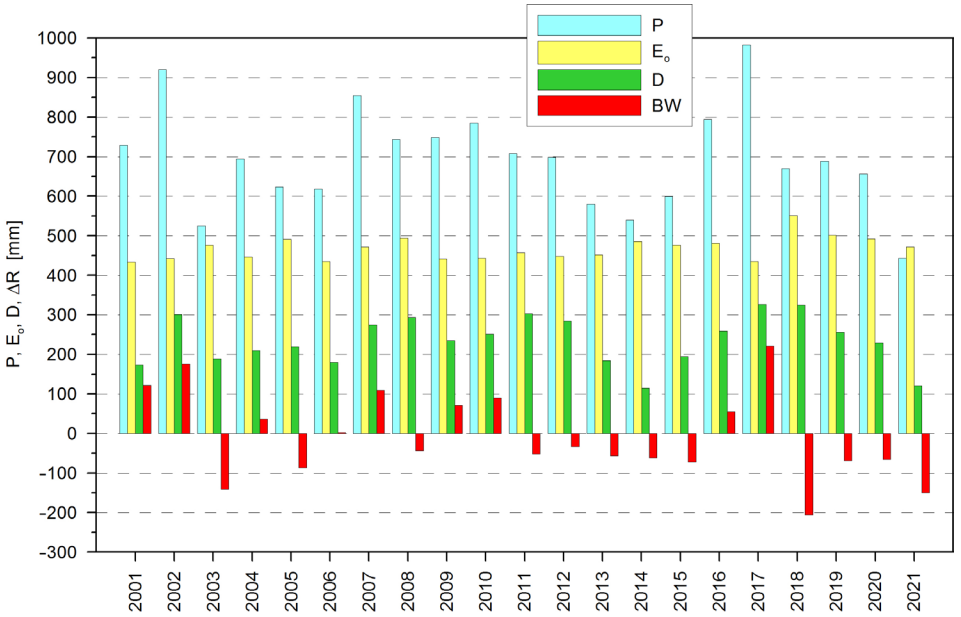
Ryc. 8. Klimatyczny bilans wodny w Storkowie w latach 2001–2021
Fig. 8. Climatic water balance in Storkowo in the years 2001–2021

Parsęta należy do rzek z dużym udziałem zasilania podziemnego. Według Wrzesińskiego i Brychczyńskiego (2014) dla zlewni Parsęty do profilu Tychówko w środkowym biegu rzeki zasilanie z wód podziemnych osiąga 65%. Ogranicza to wpływ zmienności opadów atmosferycznych na wielkość i zmienność odpływu rzecznego. Dodatkowo Parsęta, jako rzeka o reżimie niwalnym słabo wykształconym według podziału Dynowskiej (1971) (dla wielolecia 1994–2021 średni przepływ górnej Parsęty w marcu – miesiącu wiosennym z maksymalnym przepływem – osiąga 142% średniego przepływu rocznego), nie jest tak bardzo zależna od zasobów wodnych z pokrywy śnieżnej jak np. rzeki o reżimie niwalnym silnie wykształconym. Jednak dla wielolecia 1994–2021 zaznacza się trend (nieistotny statystycznie) do zmniejszania się wielkości odpływu ze zlewni górnej Parsęty (ryc. 9). Spadek wielkości odpływu ze zlewni był pogłębiony w latach 2013–2016 z niskimi sumami opadów atmosferycznych. Wyjątkowo wilgotny rok 2017 i duży odpływ rzeczny trwający również w roku 2018 zahamowały nieco trend spadkowy. Z kolei najsuchszy w wieloleciu obserwacyjnym rok 2021 ponownie pogłębił tendencję do obniżania wielkości odpływu ze zlewni. Odpływ osiągnął wówczas absolutne minimum wynoszące poniżej 150 mm.

Wzrost wielkości strat wody na parowanie i cykliczne kumulacje lat z mniejszymi sumami opadów atmosferycznych wpływają niekorzystnie na bilans wodny zlewni górnej Parsęty (ryc. 10). W wieloleciu 2001–2021 ujemny bilans wodny wystąpił w ciągu 12 lat. Szczególnie niekorzystnie na funkcjonowanie całego środowiska przyrodniczego zlewni górnej Parsęty wpływają ciągi następujących



Ryc. 9. Roczny odpływ (D) ze zlewni górnej Parsęty w latach 1994–2021 i trend zmian
Fig. 9. Annual discharge (D) from the upper Parsęta catchment in the years 1994–2021 and the trend of change



Ryc. 10. Bilans wodny zlewni górnej Parsęty w latach 2001–2021
P – opad atmosferyczny; E_o – parowanie wskaźnikowe; D – odpływ rzeczny; BW – bilans wodny
Fig. 10. Water balance of the upper Parsęta catchment in the years 2001–2021
P – atmospheric precipitation; E_o – indicator evaporation; D – river runoff; BW – water balance

po sobie lat z niedoborem wody, jak w okresach 2011–2015 i 2018–2021. Reakcją zlewni na ujemny bilans wodny jest występowanie susz hydrologicznych, podczas których zmniejsza się odpływ rzeczny, okresowo zanikają drobne cieki i małe zbiorniki wodne (Szpikowski, Domańska 2019). Lata 2016–2017 wykazały, że ponadprzeciętne opady atmosferyczne odtwarzają zasoby wodne. Retencja zlewni opiera się głównie na zasobach wód podziemnych, wobec czego zwiększony odpływ ze zlewni jest rozciągnięty w czasie, nawet na kolejne lata z mniejszymi opadami. Jednak utrzymywanie się trendu wzrostu temperatury powietrza i, co jest z tym związane, strat wody na parowanie, może w długiej perspektywie również wpłynąć na zasilanie podziemne i zwiększyć niestabilność hydrologiczną zlewni górnej Parsęty.

Podsumowanie

Zlewnię górnej Parsęty można uznać za geoekosystem w znacznym stopniu seminaturalny, w którym stosunkowo niewielki stopień przekształceń antropogenicznych w ograniczonym stopniu wpływa na funkcjonowanie środowiska przyrodniczego. W ostatnich latach obserwowane są istotne zmiany w strukturze użytkowania ziemi. Przeważają zmiany w obrębie gruntów rolnych i ugorów, jednak nasiliła się tendencja do przejmowania ziemi pod zabudowę jednorodzinną.

Pomiary meteorologiczne i hydrologiczne prowadzone w ramach programu Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego wskazują, że aktualnie główną przyczyną przekształceń w funkcjonowaniu geoekosystemu górnej Parsęty są obserwowane zmiany klimatyczne. Wyraźna tendencja do wzrostu temperatury powietrza przekłada się na zwiększenie parowania i zmniejsza ilość wody w zlewni. Znajduje to odzwierciedlenie w okresowych spadkach poziomu wód podziemnych, zmniejszeniu wielkości odpływu ze zlewni i w coraz częstszych i dłuższych okresach z ujemnym bilansem wodnym zlewni.

Wieloletnia realizacja programów badawczych w Stacji Bazowej ZMŚP Parsęta w Storkowie pozwala określić aktualny stan, pojawiające się trendy zmian oraz główne kierunki zagrożeń środowiska zlewni w krajobrazie młodoglacjalnym Pomorza Zachodniego, które w artykule tym zostały zasygnalizowane jedynie dla wybranych elementów klimatu i obiegu wody. Obserwowane zmiany i zagrożenia dotyczą jednak całości, choć w różnym stopniu, środowiska geograficznego. Oddziałują m.in. na dynamikę procesów korytowych, na odpływ fluwialny, kształtowanie uwarunkowań procesów erozyjnych i denudacyjnych. Reaguje na te zmiany środowisko ożywione, np. poprzez zmiany warunków siedliskowych dla drzewostanów czy też dla roślin inwazyjnych obcego pochodzenia. Stąd konieczność realizacji programu Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego w tak szerokim zakresie. Uzyskiwane wyniki mają wymiar aplikacyjny i mogą posłużyć do wskazywania optymalnych rozwiązań w zakresie wykorzystywania środowiska przyrodniczego, wprowadzania elementów ochrony i konkretnych działań na rzecz jego zrównoważonego rozwoju.

Literatura

Bac S., Koźmiński M., Rojek M., 1993. Agrometeorologia. PWN, Warszawa.

Bartoszek K., Węgrzyn A., Kaszewski B.M., Siłuch M., 2012. Porównanie wybranych metod wyznaczania dla początków i końca okresu wegetacyjnego na przykładzie Lubelszczyzny. Przegląd Geofizyczny, 57(1): 123–134.

Bochenek W., Kijowska-Strugała M., Kiszka K., 2018. Wieloletnie tendencje warunków klimatycznych w Szymbarku na podstawie wybranych wskaźników. Przegląd Geograficzny, 90(1): 35–52.

Dynowska I., 1971. Typy reżimów rzecznych w Polsce. Prace Geograficzne, 28.

Gorczyński W., 1922. The calculation of the degree of continentality. Monthly Weather Review, 50.

Huculak W., Makowiec M., 1977. Wyznaczanie meteorologicznego okresu wegetacyjnego na podstawie jednorocznych materiałów obserwacyjnych. Zeszyty Naukowe SGGW AR w Warszawie, Leśnictwo, 25: 65–72.

Karczewski A., 1989. Morfogeneza strefy marginalnej fazy pomorskiej na obszarze lobu Parsęty w vistulianie (Pomorze Środkowe). UAM, seria Geogr., 44, Poznań.

Kostrzewski A., 1993. Geoekosystem obszarów nizinnych. Koncepcja metodologiczna. Zeszyty Naukowe, Komitet Naukowy przy Prezydium PAN Człowiek i Środowisko, 6: 11–17.

Kostrzewski A., Majewski M. (red.), 2021. Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Organizacja, system pomiarowy, metody badań. Wytyczne do realizacji. Bibl. Monit. Środ., Warszawa.

Kruszyk R., 2021. Zasady gromadzenia i przekazywania danych do Centralnej Bazy Danych Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego. [W:] A. Kostrzewski, M. Majewski (red.), Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Organizacja, system pomiarowy, metody badań. Wytyczne do realizacji. Bibl. Monit. Środ., Warszawa, s. 355–374.

Kundzewicz Z.W., Juda-Rezler K., 2010. Zagrożenia związane ze zmianami klimatu. Nauka, 4: 69–76.

Marsz A., 1995. Wskaźnik oceanizmu jako miara klimatycznego współoddziaływania w systemie ocean – atmosfera – kontynenty. WSM, Gdynia.

Michalska B., 2011. Tendencje zmian temperatury powietrza w Polsce. Prace i Studia Geograficzne, 47: 67–75.

Novruzowa A., 2022. Climate change impacts on water resources. Teka of Political Science and International Relations, 16(2): 23–35.

Paczos S., 1985. Zagadnienie klasyfikacji zim w świetle różnych kryteriów termicznych. Annales UMCS, 40(7): 133–155.

Singh V.P., Mishra A.K., Chowdhary H., Prakash Khedun C., 2014. Climate Change and Its Impact on Water Resources. [W:] L.K. Wang, C.T. Yang (red.), Handbook of Environmental Engineering, Vol. 15. Modern Water Resources Engineering. New York: 525–569.

Solon J., Borzyszkowski J., Bidłasik M., Richling A., Badora K., Balon J., Brzezińska-Wójcik T., Chabudziński Ł., Dobrowolski R., Grzegorczyk I., Jodłowski M., Kistowski M., Kot R., Krąż P., Lechnio J., Macias A., Majchrowska A., Malinowska E., Migoń P., Myga-Piątek U., Nita J., Papińska E., Rodzik J., Strzyż M., Terpiłowski S., Ziaja W., 2018. Physico-geographical mesoregions of Poland: Verification and adjustment of boundaries on the basis of contemporary spatial data. Geographia Polonica, 91(2): 143–170.

Szpikowski J., Domańska M., 2019. Bilans wodny górnej Parsęty w latach 2001–2018 w świetle zmian warunków termiczno-opadowych. Varia. Prace z Zakresu Geografii, 3: 137–153.

Tomczyk A., Szyga-Pluta K., 2016. Okres wegetacyjny w Polsce w latach 1971–2010. Przegląd Geograficzny, 88(1): 75–86.

Wrzesiński D., Brychczyński A., 2014. Zróżnicowanie reżimu odpływu rzek w północno-zachodniej Polsce. Badania Fizjograficzne, A65: 261–274.

Józef Szpikowski[1,2], Grażyna Szpikowska[2], Monika Domańska[2]

[1]Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, jozef.szpikowski@amu.edu.pl

[2]Stacja Geokologiczna w Storkowie, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu

JS https://orcid.org/0000-0001-9537-3261, GS (https://orcid.org/0000-0001-7649-6821

Zjawiska ekstremalne w zlewni górnej Parsęty i ich wpływ na funkcjonowanie środowiska geograficznego

Extreme phenomena in the upper Parsęta catchment and their impact on the functioning of the geographical environment

Zarys treści: Realizacja programu Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego w Stacji Bazowej Parsęta w Storkowie umożliwia, poprzez analizę zebranych serii danych meteorologicznych i hydrologicznych, ocenę wpływu zjawisk ekstremalnych na funkcjonowanie środowiska geograficznego. Stacja Bazowa ZMŚP Parsęta realizuje program monitoringu w zlewni górnej Parsęty od roku 1994. Uzyskiwane wyniki uznajemy za reprezentatywne dla strefy młodoglacjalnej makroregionu Pojezierza Drawskiego.

Realizowany monitoring przypada na okres zmian klimatycznych, o których najdobitniej świadczy wzrost temperatury powietrza. Od roku 1987 występuje wyraźny, istotny statystycznie trend rosnący temperatury, który wynosi 0,46°C na 10 lat. Zmiany temperatury powietrza wpływają m.in. na wielkość parowania, odpływu wody ze zlewni i na bilans wodny geoekosystemu zlewni górnej Parsęty.

Do obliczeń wartości ekstremalnych obserwowanych zjawisk wykorzystano metodykę stosowaną w ZMŚP, czyli ekstrema absolutne (minimalne i maksymalne wartości danego zjawiska w całej serii obserwacyjnej). Testowano również metodę kwantylową, która za zdarzenie ekstremalne przyjmuje zjawisko o wartości nieprzekraczającej 10. lub większej od 90. kwantyla. Według tej metody zdarzenia ekstremalne wyjątkowe to takie, gdy zjawisko nie przekracza 1. kwantyla lub jest większe od 99. kwantyla. Przy analizie danych pogodowych zastosowano również wartości progowe dla poszczególnych elementów, tzw. dni charakterystyczne.

Podano przykłady zjawisk ekstremalnych ze zlewni górnej Parsęty, w tym wywołanych współwystępowaniem kilku czynników: wysokie wezbranie w lipcu 2018 r., intensywne procesy niweo-eoliczne w lutym 2007 r., ekstremalny spływ śródglebowy w styczniu 2002 r. i huraganowy wiatr w styczniu i w lutym 2022 r.

Słowa kluczowe: zlewnia górnej Parsęty, zjawiska ekstremalne, uwarunkowania procesów ekstremalnych, Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego

Abstract: The implementation of the Integrated Monitoring of the Natural Environment program at the Parsęta Base Station in Storkowo enables, through the analysis of the collected series of meteorological and hydrological data, the assessment of the impact of extreme phenomena on the functioning of the geographical environment. The Parsęta Base Station has been implementing a monitoring program in the upper Parsęta catchment since 1994. We consider the obtained results to be representative of the young glacial zone of the Drawskie Lakeland in NW Poland.

The monitoring takes place during the period of climate change, which is most clearly evidenced by the increase in air temperature. Since 1987, there has been a clear, statistically significant growing trend, which amounts to 0.46°C per 10 years. Changes in air temperature affect e.g. on the amount of evaporation, outflow of water from the catchment and on the water balance of the geoecosystem of the upper Parsęta catchment.

To calculate the extreme values of the observed phenomena, the methodology used in IMNE was used, i.e. absolute extremes (minimum and maximum values of a given phenomenon in the entire observation series). The quantile method was also adopted, which considers a phenomenon with a value not exceeding the 10th or greater than the 90th quantile as an extreme event. According to this method, extreme exceptional events are those when the phenomenon does not exceed the 1st quantile or is greater than the 99th quantile. When analyzing weather data, threshold values for individual elements were also used, the so–called characteristic days.

Examples of extreme phenomena from the catchment of the upper Parsęta are given, including those caused by the coexistence of several factors: high water in July 2018, intense niveo–aeolian processes in February 2007, extreme subsurface flow in January 2002 and hurricane wind in January and February 2022.

Keywords: upper Parsęta catchment, extreme phenomena, determinants of extreme processes, Integrated Monitoring of the Natural Environment

Wprowadzenie

W Zintegrowanym Monitoringu Środowiska Przyrodniczego realizowany jest program analityczny „Zjawiska ekstremalne" (Kostrzewski, Majewski red. 2021). Stacje Bazowe działające w ramach ZMŚP posiadają już wieloletnie, zweryfikowane ciągi pomiarowe, na podstawie których można sklasyfikować i wyznaczać zdarzenia ekstremalne odbiegające zasadniczo od ich przeciętnych lub najczęściej występujących wartości. Zdarzenia takie wpływają na funkcjonowanie środowiska przyrodniczego, a wiele z nich oddziałuje bezpośrednio bądź pośrednio na człowieka i gospodarkę. Dlatego aktualnie występuje szerokie zainteresowanie wyznaczaniem, klasyfikacją, ale również prognozowaniem zdarzeń ekstremalnych. Ważne jest informowanie o nich i podejmowanie możliwych działań zaradczych (m.in. Starkel 1976, Lorenc 1998, Smolska 2007, Zwoliński 2008, Lorenc i in. 2012).

Do wyznaczania zjawisk ekstremalnych wykorzystuje się różne metody. Część z nich opisują np. Kaszewski i Flis (2014). Zestawienie potencjalnych geomorfologicznych zdarzeń ekstremalnych zaproponowano w ramach projektu „Ekstremalne zdarzenia meteorologiczne i hydrologiczne w Polsce (ocena zdarzeń oraz prognozowanie ich skutków dla środowiska życia człowieka)" (Jania, Zwoliński

2011). O randze zdarzeń wyjątkowych, w tym geomorfologicznych, świadczy nie tyle ich formalne zakwalifikowanie do określonego przedziału wartości, wyznaczanego zwykle na podstawie ciągu danych, ile ich rzeczywiste skutki dla środowiska geograficznego (Froehlich 2006, Starkel 2011). Takie kompleksowe podejście, uwzględniające zazwyczaj zespół uwarunkowań, wymaga skoordynowanych działań, na ogół niemożliwych do podjęcia bez specjalnego systemu pomiarowego i monitoringu.

Wnikliwą analizę 50-letnich serii pomiarowych w celu wyznaczenia zdarzeń ekstremalnych w funkcjonowaniu strefy brzegowej Bałtyku południowego przedstawili Tylkowski i Hojan (2018). Ekstremalnie wysoki poziom morza, istotny dla tempa i natężenia procesów abrazyjnych, powiązali z warunkami termiczno–opadowymi. Analiza danych metodą kwantylową wykazała, że widoczny jest trend rosnący współwystępowania średniej i maksymalnej temperatury powietrza oraz średniego i wysokiego poziomu morza.

Celem opracowania jest wyznaczenie progowych wartości zdarzeń ekstremalnych wybranych wskaźników meteorologicznych i hydrologicznych w zlewni górnej Parsęty oraz wskazanie ich występowania potencjalnego. Przedstawiono również przykłady zdarzeń ekstremalnych wykazanych podczas prowadzonego monitoringu. Realizacja programu Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego w Stacji Bazowej Parsęta w Storkowie umożliwia, poprzez analizę zebranych serii danych meteorologicznych i hydrologicznych, ocenę wpływu zjawisk ekstremalnych na funkcjonowanie środowiska geograficznego. Stacja Parsęta realizuje program monitoringu w zlewni górnej Parsęty od roku 1994, a wcześniejsze serie obserwacji meteorologicznych i hydrologicznych, rozpoczętych już w roku 1987, można również wykorzystać do identyfikacji zdarzeń o charakterze ekstremalnym. Stacja Parsęta prowadzi monitoring w zlewni górnej Parsęty, stąd uzyskiwane wyniki uznajemy za reprezentatywne dla strefy młodoglacjalnej mezoregionu Pojezierza Drawskiego.

Realizowany monitoring przypada na okres wyraźnych zmian klimatycznych (np. Scott i in. 1990, Boryczka i in. 2002), o których najdobitniej świadczy wzrost temperatury powietrza (np. Hansen i in. 2006, Wójcik, Miętus 2014). Od roku 1987 na obszarze badań występuje wyraźny trend rosnący temperatury, który wynosi 0,46°C na 10 lat. Zmiany temperatury powietrza wpływają m.in. na wielkość parowania, odpływu wody ze zlewni i na bilans wodny geoekosystemu zlewni górnej Parsęty.

Zjawiska ekstremalne oddziałują na funkcjonowanie geoekosystemu zlewni górnej Parsęty, np. wysokie wezbrania uruchamiają na wyjątkową skalę odpływ fluwialny, głębokie i długotrwałe niżówki połączone są z zanikaniem mniejszych cieków i małych zbiorników wodnych czy też silny wiatr powoduje straty w drzewostanach i infrastrukturze.

Metody badań

Do obliczeń wartości ekstremalnych zjawisk obserwowanych w zlewni górnej Parsęty wykorzystano metodykę stosowaną w ZMŚP. Są to przede wszystkim ekstrema absolutne, tj. minimalne i maksymalne wartości danego zjawiska w całej serii obserwacyjnej (Kejna 2021). Zastosowano również metodę kwantylową, która za zdarzenie ekstremalne przyjmuje zjawisko o wartości nieprzekraczającej 10. lub większej od 90. kwantyla (Ziernicka-Wojtaszek, Zawora 2007, Ustrnul, Czekierda 2009). Za zdarzenia ekstremalne wyjątkowe metoda ta przyjmuje takie, gdy zjawisko nie przekracza 1. kwantyla lub jest większe od 99. kwantyla. Przy analizie danych pogodowych zastosowano również wartości progowe dla poszczególnych elementów, tzw. dni charakterystyczne.

Wartości ekstremalne temperatury powietrza wyznaczono na podstawie codziennych średnich, minimalnych i maksymalnych temperatur dobowych z lat 1994–2021. Dla tych danych wyznaczono ekstrema absolutne oraz progi 1., 10., 90. i 99. kwantyla. Dla opadów atmosferycznych ekstremalne wartości wyznaczono na serii sum dobowych oraz sum miesięcznych z lat 1994–2021. Dla sum dobowych przyjęto absolutne maksimum oraz progi 90. i 99. kwantyla. Dla sum miesięcznych opadu wyznaczono minimum i maksimum absolutne oraz progi 1., 10., 90. i 99. kwantyla. Miesięczne sumy parowania wskaźnikowego obliczono dla lat 2001–2021 według formuły Baca (1993), uwzględniającej niedosyt wilgotności powietrza, prędkość wiatru i wielkość promieniowania całkowitego. Dla tej serii danych wyznaczono minimum i maksimum absolutne oraz progi 1., 10., 90. i 99. kwantyla. Na podstawie codziennych obserwacji stanów wody prowadzonych w profilu zamykającym zlewnię górnej Parsęty w Storkowie dla lat 1994–2021 obliczono codzienne natężenia przepływu chwilowego, które są traktowane jako średnie dobowe wielkości przepływu. Również dla przepływów wyznaczono minimum i maksimum absolutne oraz progi 1., 10., 90. i 99. kwantyla. Podano również przykłady zdarzeń ekstremalnych ze zlewni górnej Parsęty z lat 2002–2022, które były uwarunkowane współwystępowaniem kilku czynników.

Wyniki

Temperatura powietrza

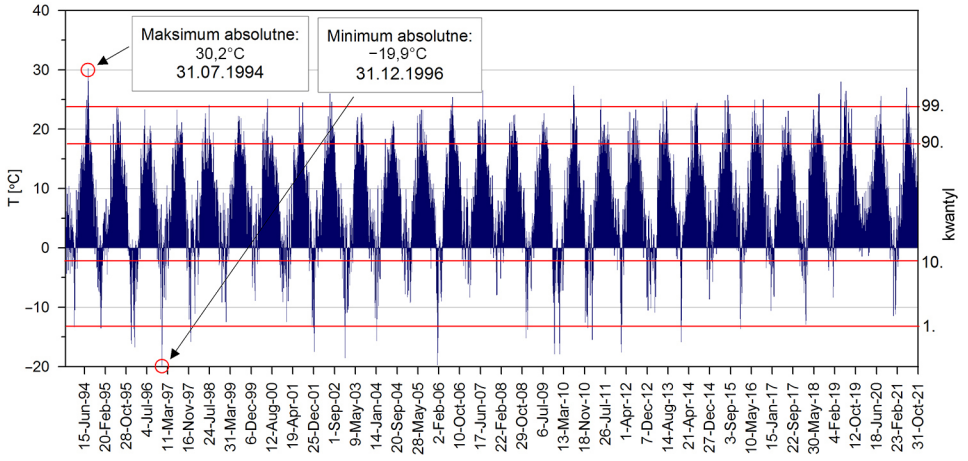
W tabeli 1 zestawiono najważniejsze absolutne wartości ekstremalne warunków termicznych. Dla średniej dobowej temperatury powietrza ekstrema absolutne wystąpiły 1 stycznia 1996 r.: –19,6°C i 31 lipca 1994 r.: 30,2°C (ryc. 1). Średnia dobowa temperatura powietrza poniżej 1. kwantyla (–13,1°C) w wieloleciu 1994–2021 wystąpiła 51 razy, czyli średnio 1,8 dnia w roku, a powyżej 99. kwantyla (24,1°C) 48 razy, czyli średnio przez 1,7 dnia w roku. W przypadku wartości

Tabela 1. Wartości ekstremalne średniej, minimalnej i maksymalnej dobowej temperatury powietrza w latach 1994–2021 w Stacji Bazowej ZMŚP Parsęta w Storkowie
Table 1. Extreme values of the average, minimum and maximum daily air temperature in the years 1994–2021 at the IMNE Parsęta Base Station in Storkowo

Parametr	Ekstrema absolutne		Zjawiska ekstremalne		Zjawiska ekstremalne wyjątkowe	
	minimum	maksimum	10. kwantyl	90. kwantyl	1. kwantyl	99. kwantyl
Średnia dobowa temperatura powietrza [°C]	–19,9 31.12.1996	30,2 31.07.1994	–1,7	17,9	–13,1	24,1
Minimalna dobowa temperatura powietrza [°C]	–25,1 1.01.1997	20,6 1.08.1994	–4,6	12,4	–15,5	16,9
Maksymalna dobowa temperatura powietrza [°C]	–12,4 7.01.2003	37,1 31.07.1994	1,1	24,9	–7,5	32,4
Dobowa amplituda temperatury powietrza [°C]	0,2 13.09.2009	27,2 16.05.2000	3,1	16,8	1,3	21,1

powyżej 90. kwantyla (17,9°C) było to aż 1026 razy, a poniżej 10. kwantyla (–1,7°C) 1010 razy (średnio po 37 dni w roku).

Minimalna dobowa temperatura powietrza mieściła się w przedziale od –25,1°C do 20,6°C. Wartości poniżej progu 1. kwantyla (–15,5°C) wystąpiły w wieloleciu 110 razy, a powyżej 99. kwantyla (16,9°C) 100 razy, czyli średnio w przybliżeniu 4 razy w roku.



Ryc. 1. Ekstrema absolutne i wartości 1., 10., 90. i 99. kwantyla dla średniej dobowej temperatury powietrza w Storkowie w latach 1994–2021
Fig. 1. Absolute extremes and values of the 1st, 10th, 90th and 99th quantiles for the average daily air temperature in Storkowo in the years 1994–2021

Maksymalna dobowa temperatura powietrza zawierała się w granicach od –12,4°C do 37,1°C. Wartości poniżej progu 1. kwantyla (–7,5°C) oraz powyżej 99. (32,4°C) kwantyla wystąpiły w wieloleciu 49 razy, średnio niecałe 2 razy w roku.

Dobowa amplituda temperatury powietrza mieściła się w zakresie od 0,2°C do 27,2°C. Wartości poniżej progu 1. kwantyla (1,3°C) wystąpiły w wieloleciu 83 razy (średnio 3 razy w roku), natomiast powyżej 99. kwantyla (21,1°C) 96 razy, czyli średnio 3,4 razy w roku.

Duża liczebność przypadków poniżej 10. i powyżej 90. kwantyla wyklucza stosowanie tej metody do wyznaczania wartości progowej dla ekstremalnych, dla średniej, maksymalnej, minimalnej temperatury powietrza oraz dla dobowej amplitudy temperatury powietrza.

Dla temperatury powietrza zostały obliczone dni charakterystyczne według zasad prowadzenia monitoringu meteorologicznego w ZMŚP (Kejna 2021). Liczbę dni charakterystycznych przedstawia tabela 2.

Tabela 2. Dni charakterystyczne w latach 1994–2021 w Storkowie
Table 2. Typical days in 1994–2021 in Storkowo

Dzień	Kryterium	Liczba dni w wieloleciu 1994–2021	Liczba dni średnio w roku
Dzień bardzo upalny	Tmax > 35°C	6	0,2
Dzień upalny	Tmax > 30°C	162	6
Dzień gorący	Tmax > 25°C	995	36
Dzień przymrozkowy	Tmin < 0°C	3066	120
Dzień mroźny	Tmax < 0°C	670	30
Dzień bardzo mroźny	Tmin < –10°C	335	12
Dzień z przymrozkiem IV–IX	Tmin < 0°C Tśr > 0°C	433	15

Wyznaczenie dni charakterystycznych, o określonych wartościach parametrów meteorologicznych, jest mało przydatne dla wyznaczania progów zjawisk ekstremalnych. Wskazuje na to chociażby liczba takich dni i ich średnia w roku, która jest wysoka, i tym samym trudno uznać, że określa zjawiska nadzwyczajne. Jedynym wyjątkiem są dni bardzo upalne z dobową temperaturą maksymalną powyżej 35°C, które w Storkowie występują rzadko: w wieloleciu 1994–2021 tylko 6 razy, czyli średnio 0,2 dnia na rok. Dni bardzo upalne wystąpiły wyłącznie w czterech latach: 1994 (3 dni), 2000 (1), 2007 (1) i 2019 (1). Dobrą charakterystyką dni upalnych jest fala upałów, czyli ciąg co najmniej siedmiu kolejnych dni z temperaturą maksymalną powyżej 30°C (Lorenc 1998). W Storkowie taki ciąg dni upalnych wystąpił tylko jednokrotnie, przez 11 kolejnych dni od 23 lipca do 2 sierpnia 1994 r. Dni upalnych, czyli z temperaturą maksymalną powyżej 30°C, wystąpiło w badanym wieloleciu aż 162, czyli średnio 6 w roku. Trudno zatem zaliczać takie przypadki do zdarzeń ekstremalnych.

Wśród dni charakterystycznych można również umieścić dni z przymrozkami, czyli z temperaturą minimalną poniżej 0°C przy średniej dobowej temperaturze

powietrza powyżej 0°C, liczone w sezonie od kwietnia do września. O ile dni takich występuje przeciętnie w roku aż 15, to do zjawisk ekstremalnych można zaliczyć dzień z najpóźniejszym w wieloleciu przymrozkiem wiosennym i najwcześniejszym przymrozkiem jesiennym. W Storkowie takie dni wypadły 2 czerwca 1997 r. i 6 września 2000 r. W przypadku najpóźniejszego wiosennego przymrozku była to data o 15 dni późniejsza od średniej (18 maja), w przypadku najwcześniejszego jesiennego przymrozku o 33 dni wcześniejsza od średniej (9 października).

Dni charakterystyczne mogą być przydatne do określania wieloletnich trendów zmian temperatury oraz do porównawczych analiz regionalnych, np. pomiędzy różnymi Stacjami Bazowymi ZMŚP.

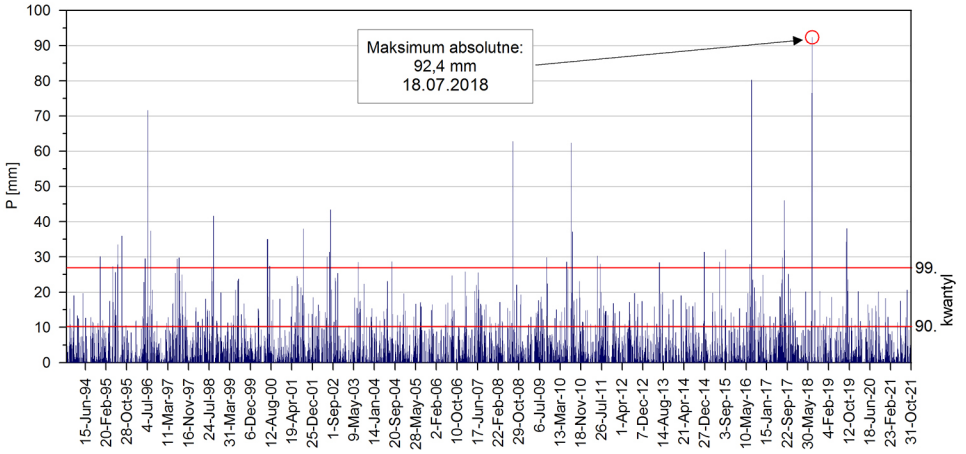
Opady atmosferyczne

W tabeli 3 zestawiono najważniejsze wartości ekstremalne dla opadu atmosferycznego w Storkowie w latach 1994–2021.

Tabela 3. Wartości ekstremalne dobowej i miesięcznej sumy opadu atmosferycznego w latach 1994–2021 w Stacji Bazowej ZMŚP Parsęta w Storkowie
Table 3. Extreme values of the daily and monthly total precipitation in the years 1994–2021 at the Parsęta Base Station of the IMNE in Storkowo

Parametr	Ekstrema absolutne		Zjawiska ekstremalne		Zjawiska ekstremalne wyjątkowe	
	minimum	maksimum	10. kwantyl	90. kwantyl	1. kwantyl	99. kwantyl
Suma dobowa [mm]	–	92,4 18.07.2018	–	10,2	–	27,5
Suma miesięczna [mm]	2,0 listopad 2012	213,4 lipiec 2016	21,3	99,3	6,0	192,5

W przypadku dobowych sum opadów atmosferycznych uzasadnione jest jedynie wyznaczanie maksimum absolutnego i wartości przekraczających 90. i 99. kwantyl. Maksimum absolutne wystąpiło w dniu 18 lipca 2018 r. i wyniosło 92,4 mm (ryc. 2). Opady dobowe powyżej wartości 90. kwantyla (10,2 mm) w wieloleciu 1994–2021 wystąpiły w ciągu aż 463 dni (10,1% wszystkich dni z opadem). Opady powyżej 99. kwantyla (27,5 mm) wystąpiły w ciągu 46 dni. Przyjęcie takiej granicy oznacza, że przeciętnie w każdym roku wystąpiłoby 1,6 dnia z opadem ekstremalnym. Metoda statystyczna przyjęta do wyznaczania opadu ekstremalnego w tym przypadku wydaje się niewłaściwa. Dotychczasowe obserwacje w zlewni górnej Parsęty nie potwierdzają, aby opady dobowe przekraczające 27,5 mm zawsze wywoływały nadzwyczajne skutki w środowisku przyrodniczym. Nie każde meteorologiczne zdarzenie ekstremalne powoduje ekstremalne skutki. W przypadku opadów decyduje o tym bardzo wiele zmiennych środowiskowych. Duże znaczenie ma nie tylko suma, ale również natężenie opadu oraz kumulacja wysokich opadów w ciągu kilku dni. Z tego powodu lepszym

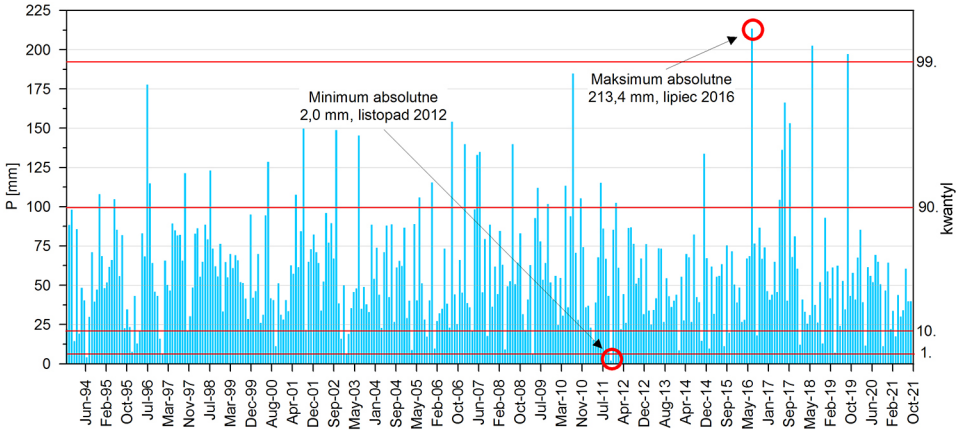


Ryc. 2. Maksimum absolutne i wartości 90. i 99. kwantyla dobowych sum opadów atmosferycznych w Storkowie w latach 1994–2021

Fig. 2. Absolute maximum and values of the 90th and 99th quantiles of daily precipitation in Storkowo in the years 1994–2021

sposobem wyznaczania opadów ekstremalnych może być analiza miesięcznych sum opadów.

W analizie sum miesięcznych opadów atmosferycznych uzasadnione jest, poza wskazaniem ekstremów absolutnych, również wyznaczenie 1., 10., 90. i 99. kwantyla (tab. 3, ryc. 3). Ekstremalnie niska suma opadu miesięcznego wystąpiła w listopadzie 2012 r. i wynosiła 2,0 mm. W wieloleciu 1994–2021 były tylko 3 miesiące z sumą opadu poniżej wartości 1. kwantyla. Były to, poza listopadem 2006 r.,



Ryc. 3. Maksimum absolutne i wartości 1., 10., 90. i 99. kwantyla miesięcznych sum opadów atmosferycznych w Storkowie w latach 1994–2021

Fig. 3. Absolute maximum and values of the 1st, 10th, 90th and 99th quantiles of monthly precipitation in Storkowo in the years 1994–2021

jeszcze lipiec 1994 i luty 2003 r. Opady o wartości poniżej 10. kwantyla występowały natomiast aż w ciągu 34 miesięcy. Na 28 lat odnotowano tylko 8 lat z sumą wszystkich miesięcznych opadów powyżej wartości 10. kwantyla. W trzech latach (1994, 2003 i 2015) było to aż po 3 miesiące z opadami poniżej wartości 10. kwantyla. Ekstremalnie wysoka miesięczna suma opadu wynosiła 213,4 mm i wystąpiła w lipcu 2016 r. Opady miesięczne o wartości przekraczającej 99. kwantyl wystąpiły tylko 3 razy. Było to, poza lipcem 2016 r., jeszcze w lipcu 2018 r. i we wrześniu 2019 r. Opady o sumach miesięcznych przekraczających 90. kwantyl wystąpiły aż 33 razy w ciągu 21 lat. W przypadku 2 lat (2007 i 2017) suma miesięczna opadów w trzech miesiącach przekraczała wartość 90. kwantyla. Analiza kwantylowa miesięcznych sum opadu wskazuje, że za opady ekstremalne można uznać jedynie te, które mieszczą się poniżej 1. (6,0 mm) lub powyżej 99. (192,5 mm) kwantyla. Było to łącznie 6 przypadków w wieloleciu 1994–2021.

Wyliczenia wskazują, że progi 10. i 90. kwantyla mogą w przypadku miesięcznych sum opadów atmosferycznych być przydatne do wyznaczenia lat z równomiernym rozkładem opadów w ciągu roku. W wieloleciu 1994–2021 wystąpiły 3 lata, gdy suma miesięczna opadów mieściła się w przedziale pomiędzy 10. i 90. kwantylem. Były to lata: 1999, 2004 i 2013, które można uznać za lata o wyjątkowo równomiernym rozkładzie opadów atmosferycznych w ciągu roku.

Parowanie

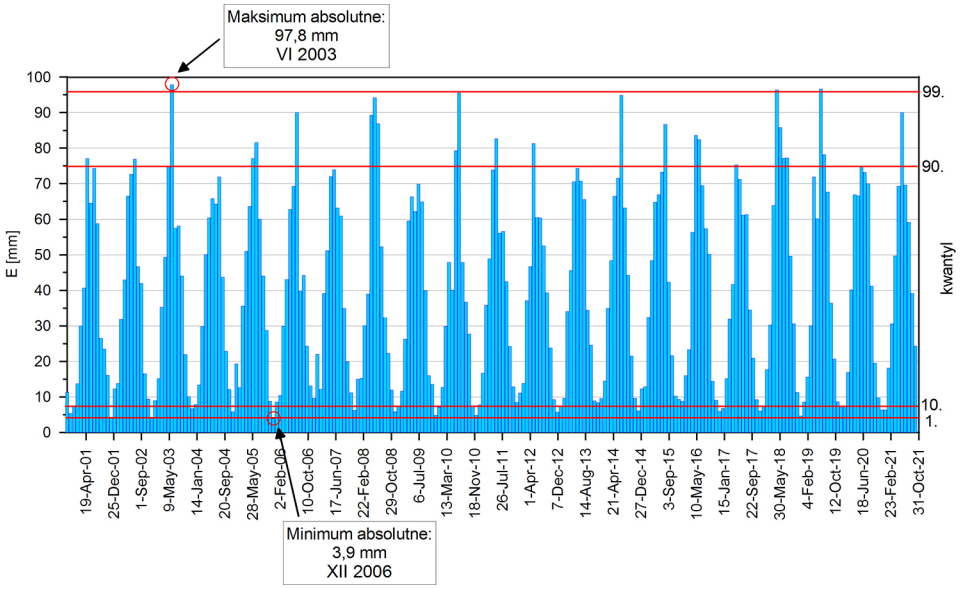
W tabeli 4 zestawiono najważniejsze wartości ekstremalne dla obliczonego parowania wskaźnikowego w Storkowie.

Tabela 4. Wartości ekstremalne miesięcznych sum parowania wskaźnikowego w latach 2001–2021 w Stacji Bazowej ZMŚP Parsęta w Storkowie

Table 4. Extreme values of monthly reference evaporation in the years 2001–2021 at the IMNE Parsęta Base Station in Storkowo

Parametr	Ekstrema absolutne		Zjawiska ekstremalne		Zjawiska ekstremalne wyjątkowe	
	minimum	maksimum	10. kwantyl	90. kwantyl	1. kwantyl	99. kwantyl
Parowanie wskaźnikowe – suma miesięczna [mm]	3,9 grudzień 2006	97,8 czerwiec 2003	7,4	75,2	4,3	96,2

Miesięczna suma parowania wskaźnikowego mieściła się w przedziale od 3,9 mm do 97,8 mm. Wartości parowania poniżej progu 10. kwantyla wystąpiły w wieloleciu podczas 24 miesięcy, a powyżej 90. kwantyla w 25 miesiącach, czyli średnio w wieloleciu przez 1,2 miesiąca w roku. Wartości poniżej progu 1. kwantyla (4,3 mm) wystąpiły w wieloleciu tylko w dwóch miesiącach, a powyżej 99. kwantyla (96,2 mm) w trzech miesiącach, czyli średnio 0,1 miesiąca w roku (przez ok. 3 dni w roku). Liczebność występowania zjawiska wskazuje, że



Ryc. 4. Ekstrema absolutne i wartości 1., 10., 90. i 99. kwantyla dla miesięcznych sum parowania wskaźnikowego w Storkowie w latach 2001–2021
Fig. 4. Absolute extremes and values of the 1st, 10th, 90th and 99th quantiles for the for monthly reference evaporation in Storkowo in the years 2001–2021

wartości parowania wskaźnikowego poniżej 1. kwantyla i przekraczające wartość 99. kwanyla można traktować jako zjawiska ekstremalne (ryc. 4).

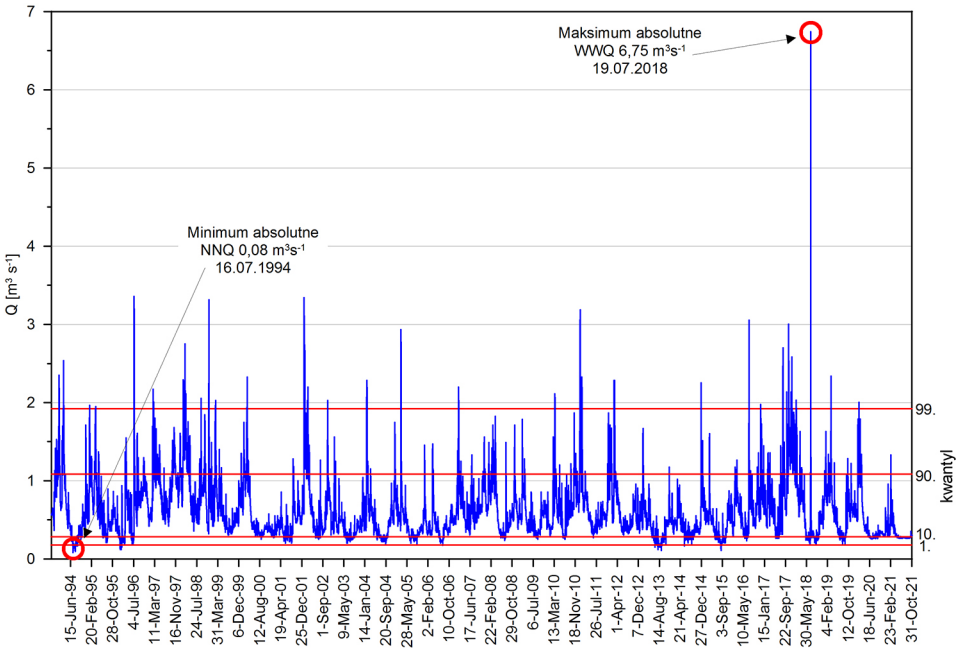
Przepływy Parsęty

Tabela 5 zawiera zestawienie wartości ekstremalnych dla przepływów dobowych i średnich miesięcznych.

Tabela 5. Wartości ekstremalne dobowych i średnich miesięcznych przepływów w profilu zamykającym zlewnię górnej Parsęty w Storkowie
Table 5. Extreme values of daily and average monthly flows in the profile closing the upper Parsęta catchment in Storkowo

Parametr	Ekstrema absolutne		Zjawiska ekstremalne		Zjawiska ekstremalne wyjątkowe	
	minimum	maksimum	10. kwantyl	90. kwantyl	1. kwantyl	99. kwantyl
Przepływ dobowy [$m^3 \cdot s^{-1}$]	0,081 16.07.1994	6,745 19.07.2018	0,296	1,088	0,182	1,925
Średni przepływ miesięczny [$m^3 \cdot s^{-1}$]	0,177 sierpień 2013	1,650 marzec 1998	0,287	1,021	0,225	1,461

Dla przepływów dobowych ekstrema absolutne wystąpiły 16 lipca 1994 r.: 0,081 $m^3 \cdot s^{-1}$ i 19 lipca 2018 r.: 6,745 $m^3 \cdot s^{-1}$ (ryc. 5). Przepływy dobowe o wartości poniżej 10. kwantyla wystąpiły 1118 razy (średnio podczas 40 dni w roku), a powyżej 90. kwantyla 910 razy (średnio przez 33 dni w roku). Przepływy o wartości poniżej 1. kwantyla stwierdzono 91 razy, a powyżej 99. kwantyla 90 razy (średnio po 3,3 dnia w roku). Liczebność występowania przepływów z zakresu do 10. i powyżej 90. kwantyla wyklucza zastosowanie tego kryterium do wyznaczania wartości ekstremalnych. Dyskusyjne jest również, czy przepływy występujące średnio przez 3 dni w roku (czyli o wartości poniżej 1. i powyżej 99. kwantyla) można uznawać za zjawiska ekstremalne.



Ryc. 5. Ekstrema absolutne i wartości 1., 10., 90. i 99. kwantyla dla przepływów dobowych górnej Parsęty w profilu Storkowo w latach 1994–2021

Fig. 5. Absolute extremes and values of the 1st, 10th, 90th and 99th quantiles for daily flows of the upper Parsęta in the Storkowo profile in the years 1994–2021

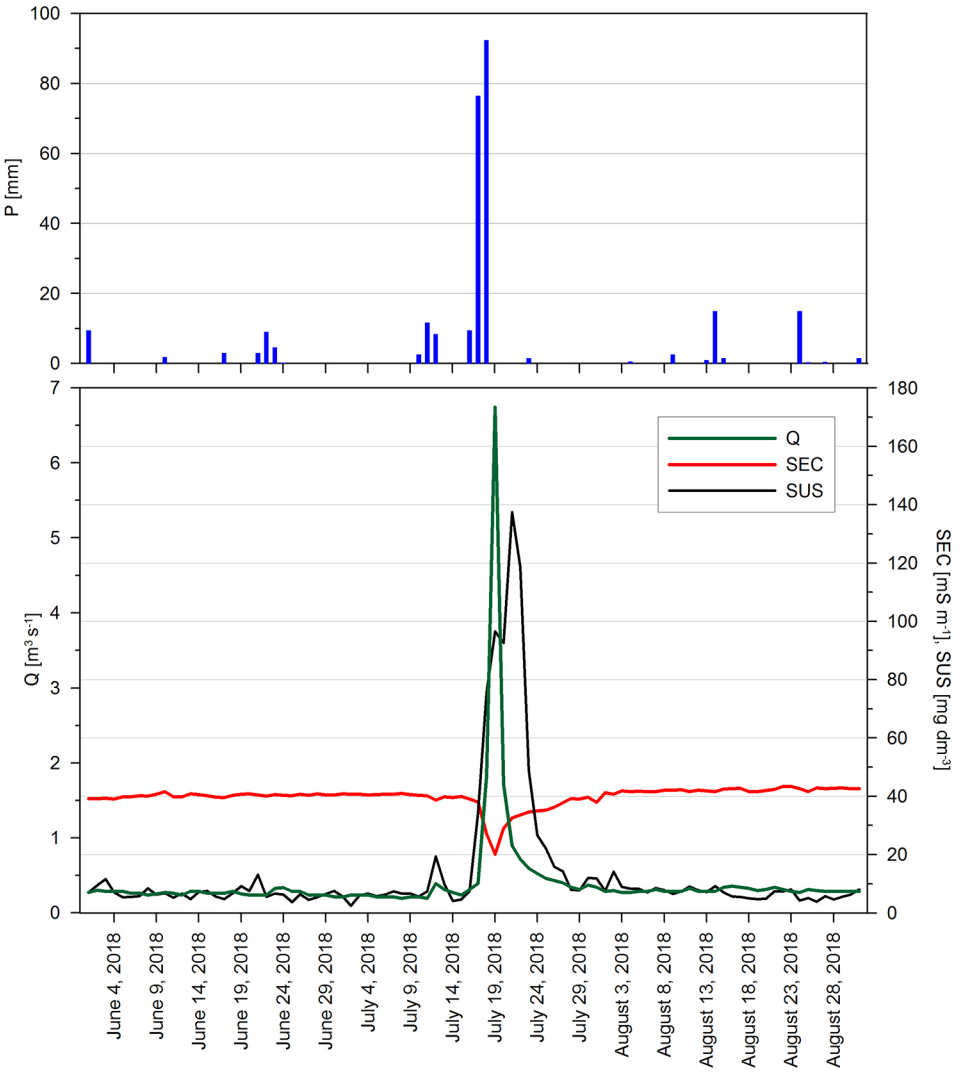
Dla średnich miesięcznych przepływów w profilu górnej Parsęty ekstrema absolutne zawierają się w przedziale od 0,177 $m^3 \cdot s^{-1}$ (w sierpniu 2013 r.) do 1,650 $m^3 \cdot s^{-1}$ (w marcu 1998 r.). Średnie miesięczne przepływy o wartości poniżej 10. kwantyla wystąpiły 34 razy (średnio przez 1,2 miesiąca w roku), a powyżej 90. kwantyla 32 razy (średnio przez 1,1 miesiąca w roku). Średnie miesięczne przepływy o wartości poniżej 1. kwantyla i powyżej 99. kwantyla, wystąpiły po 3 razy, czyli średnio przez 0,1 miesiąca w roku (po ok. 3 dni w roku).

Przykłady zdarzeń ekstremalnych ze zlewni górnej Parsęty i dyskusja

Analiza zjawisk ekstremalnych na podstawie danych ze Stacji Bazowej ZMŚP Parsęta w Storkowie wykazuje, że niewątpliwie wartości minimalna i maksymalna danego parametru w analizowanym wieloleciu mogą być uznawane za wartości ekstremalne. W przypadku wydzieleń opartych na analizie kwantylowej nie jest to już tak jednoznaczne. Duża liczebność przypadków zarówno dla temperatury powietrza, opadów, jak i przepływów dobowych w przedziałach poniżej 10. i powyżej 90. kwantyla nie uzasadnia automatycznego przypisywania im rangi zdarzeń ekstremalnych. W przypadku natężenia zjawisk mieszczących się poniżej 1. i powyżej 99. kwantyla przypadków jest zdecydowanie mniej, co pozwala na uznanie ich za zjawiska ekstremalne, natomiast na pewno nie za zjawiska ekstremalne wyjątkowe. W przypadku dobowych sum opadu atmosferycznego nawet wartości powyżej 99. kwantyla są dość liczne. Analiza przeprowadzona dla wartości miesięcznych (sum w przypadku opadów i parowania, i wartości średnich dla przepływów) dla zakresów poniżej 1. i powyżej 99. kwantyla lepiej klasyfikuje takie wartości jako zjawiska ekstremalne. Dni charakterystyczne w niewielkim stopniu mogą być (przynajmniej w stosowanych dotąd przedziałach wartości granicznych) przydatne dla wyznaczania meteorologicznych zjawisk ekstremalnych. Analiza danych zebranych w Storkowie w wieloleciu 1994–2021 wskazuje, że jedynie dni bardzo upalne można uznawać za typowe zjawiska ekstremalne. Również za takie mogą być uznane ciągi dni upalnych. Proponuje się też, aby za zdarzenia o ekstremalnym charakterze uznawać najpóźniejszy wiosenny i najwcześniejszy jesienny przymrozek w serii danych wieloletnich.

W dotychczasowej literaturze podnoszone jest znaczenie współwystępowania zjawisk, które może w rezultacie doprowadzić do zdarzeń ekstremalnych (Starkel 2011). Analiza taka wymaga jednak nie tylko serii zgromadzonych danych, ale przede wszystkim oceny skutków ich występowania. Pewne przykłady takiej oceny funkcjonowania środowiska geograficznego w warunkach występowania procesów ekstremalnych można przytoczyć na podstawie monitoringu realizowanego w Storkowie.

W dniach 16–18 lipca 2018 r. w Stacji Bazowej Parsęta zanotowano bardzo wysokie opady atmosferyczne o łącznej sumie 178,3 mm. W dniach 17 i 18 lipca spadło 168,9 mm deszczu, co było najwyższą sumą dwudniowego opadu dla wielolecia obserwacyjnego 1987–2021 w Storkowie (ryc. 6). Opad z okresu 16–18 lipca stanowił 25% rocznej sumy opadu w roku 2018, która wynosiła 670,3 mm i 193% średniego wieloletniego opadu lipcowego (87,4 mm). Dni te były poprzedzone okresem suchym: podczas wcześniejszych dwóch miesięcy spadło zaledwie 55 mm opadu. Przed ekstremalnym opadem przepływ w Parsęcie w profilu Storkowo od połowy maja utrzymywał się w strefie od SNQ do NSQ (0,25–0,39 $m^3 \cdot s^{-1}$). W dniu 18 lipca przepływ wzrósł do 1,82 $m^3 \cdot s^{-1}$, a w dniu następnym do maksymalnej wysokości w wieloleciu 1994–2021: 6,74 $m^3 \cdot s^{-1}$ (ryc. 7). Wezbranie trwało 9 dni. Dopiero 27 lipca przepływ w Parsęcie obniżył się do 0,4 $m^3 \cdot s^{-1}$. W trakcie całego wezbrania odpływ ze zlewni górnej Parsęty wyniósł 16,2 mm, co stanowiło 70% odpływu lipcowego i 5% całkowitego



Ryc. 6. Wpływ opadu i przepływu ekstremalnego na wielkość transportu fluwialnego Parsęty w lipcu 2018 r.
Q – natężenie przepływu chwilowego; SEC – przewodność elektrolityczna; SUS – stężenie materiału zawieszonego; P – opad atmosferyczny

Fig. 6. Influence of precipitation and extreme flow on the volume of Parsęta fluvial transport in July 2018
Q – instantaneous flow rate; SEC – electric conductivity; SUS – concentration of suspended material; P – precipitation

odpływu rocznego w roku 2018 (324,8 mm). Dwukrotnie wzrósł średni miesięczny odpływ jednostkowy. Maksymalny dobowy odpływ jednostkowy osiągnął rekordową wartość 92 $m^3 \cdot s^{-1} \cdot km^{-2}$.

Ryc. 7. Wezbranie w profilu zamykającym zlewnię górnej Parsęty w dniu 19 lipca 2018 r. (fot. G. Szpikowska)
Fig. 7. A flood in the upper Parsęta catchment profile on July 19, 2018

Podczas wezbrania odpłynęło 105 t materiału zawieszonego. Stanowiło to 19% ładunku materiału zawieszonego odprowadzonego ze zlewni górnej Parsęty w całym roku 2018 (562 t). Dostawa słabo zmineralizowanych wód opadowych spowodowała obniżenie przewodności elektrolitycznej wód Parsęty o połowę: z 40 do 20 $mS \cdot m^{-1}$. Ładunek materiału rozpuszczonego odprowadzonego ze zlewni podczas wezbrania wyniósł 324 t, co stanowiło 4% całkowitego ładunku materiału rozpuszczonego odprowadzonego w roku 2018 (8150 t). Ekstremalny opad i spowodowane nim wezbranie było ważnym czynnikiem wpływającym na wielkość transportu fluwialnego i modyfikującym normalne proporcje pomiędzy ładunkiem materiału zawieszonego i rozpuszczonego.

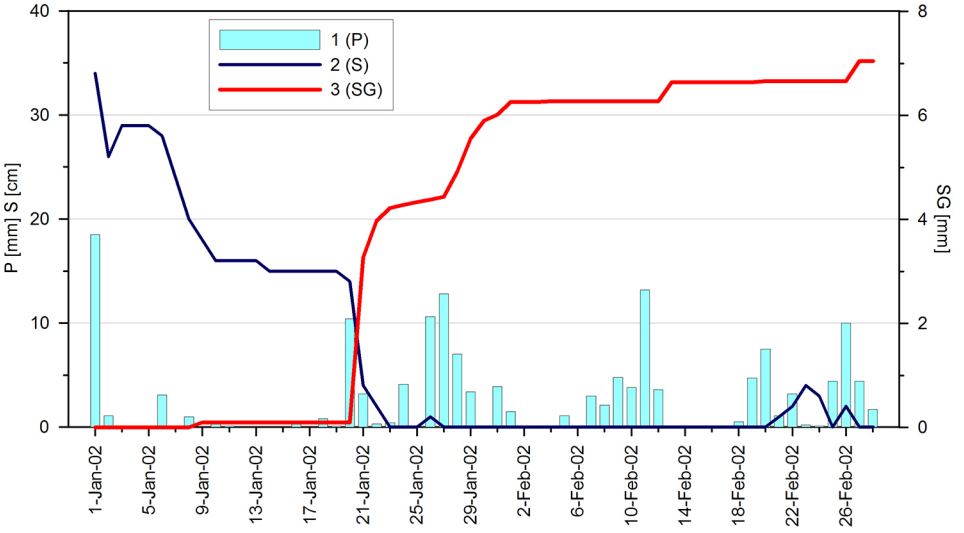
Przykładem zjawiska o charakterze ekstremalnym w zlewni górnej Parsęty jest epizod wystąpienia intensywnych procesów niweo-eolicznych w dniach 22–25 lutego 2007 r. (Szpikowski 2008). Badania terenowe przeprowadzone na wybranych stanowiskach wykazały, że ilość zanieczyszczeń mineralnych w śniegu osiągnęła średnio od 1 do 1,4 $kg \cdot m^{-2}$, a maksymalnie od 1,8 do 2,1 $kg \cdot m^{-2}$ (ryc. 8). Obniżenie powierzchni podlegających deflacji wynosiło podczas tego jednego zdarzenia od 0,02 do 0,04 mm, było zatem ilościowo porównywalne z roczną wielkością spłukiwania ze stoku z uprawą zboża (Szpikowski 2002). Zjawisko zakwalifikowano jako zdarzenie ekstremalne, a na podstawie analizy warunków meteorologicznych wyznaczono wartości progowe kluczowych elementów pogody. Ustalono, że dla uruchomienia procesów niweo-eolicznych w takiej skali niezbędne jest współwystępowanie następujących wartości progowych: temperatury powietrza <0°C, średniej prędkości wiatru >3 $m \cdot s^{-1}$, maksymalnej prędkości wiatru >7 $m \cdot s^{-1}$, miąższości pokrywy śnieżnej <5 cm. Kwerenda

Ryc. 8. Zaspa śnieżna zanieczyszczona materiałem mineralnym koło Storkowa w dorzeczu Parsęty – efekt intensywnych procesów niweo-eolicznych w lutym 2007 r. (fot. J. Szpikowski)

Fig. 8. A snowdrift contaminated with mineral material near Storkowo in the Parsęta catchment – the effect of intensive niveo–aeolian processes in February 2007

danych meteorologicznych wykazała, że w latach 2000–2007 wskazane elementy pogody o takich wartościach występowały równocześnie jedynie przez 17 dni, tylko w styczniu i w lutym, i były połączone z napływem mas powietrza polarno-kontynentalnego i z dominacją wiatru z sektora ENE–ESE. Intensywne zjawiska niweo-eoliczne o charakterze ekstremalnym występowały w tym samym czasie na dużym obszarze Polski, a zostały zbadane również na północnej krawędzi Wyżyny Lubelskiej (Rodzik, Siwek 2008).

Zdarzeniem o charakterze ekstremalnym w zlewni górnej Parsęty był intensywny spływ śródpokrywowy zanotowany na powierzchni eksperymentalnej w styczniu 2002 r. (Michalska 2003). 20 stycznia 2002 r. w wyniku ocieplenia rozpoczęło się szybkie (w ciągu trzech dni) wytapianie pokrywy śnieżnej o miąższości 15 cm. W tym samym czasie wystąpiły opady deszczu: 20 stycznia o wysokości 10,4 mm, a od 20 stycznia do końca miesiąca łącznie 57 mm. Na obszarach młodoglacjalnych w spływie śródpokrywowym odprowadzane jest średnio poniżej 1% opadów. Tymczasem po 20 stycznia 2002 r. uruchomił się intensywny spływ śródpokrywowy, w którym zostało odprowadzone ponad 7% wody pochodzącej z pokrywy śnieżnej i z opadów deszczu (ryc. 9). Przewodność

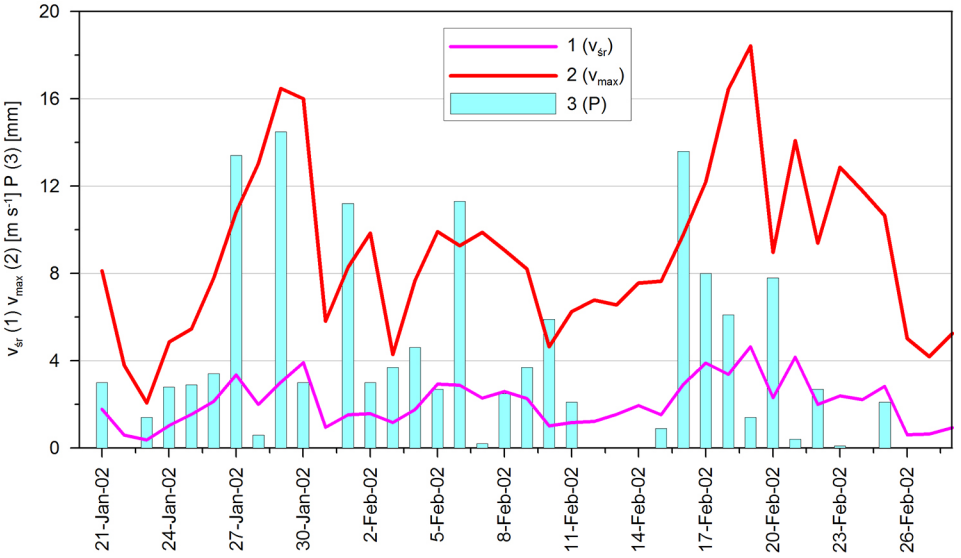


Ryc. 9. Ekstremalny spływ śródpokrywowy na tle opadów i pokrywy śnieżnej w zlewni górnej Parsęty w styczniu–lutym 2002 r. (za: Michalska 2003)
1 – opad atmosferyczny P (mm); 2 – miąższość pokrywy śnieżnej S (cm); 3 – skumulowany spływ śródpokrywowy SG (mm)
Fig. 9. Extreme subsurface runoff against the background of precipitation and snow cover in the upper Parsęta catchment in January–February 2002 (after Michalska 2003)
1 – precipitation P (mm); 2 – snow cover S (cm); 3 – accumulated subsurface runoff SG (mm)

elektrolityczna wód spływu śródpokrywowego spadła o połowę w porównaniu do wartości średniej z lat 2000–2001, jednak ładunek substancji rozpuszczonych odprowadzony ze stoku spływem śródpokrywowym był trzykrotnie większy niż sumaryczny ładunek w tych dwóch latach. Ekstremalnie wysoki spływ śródpokrywowy był uwarunkowany współwystępowaniem topnienia miąższej, jak na warunki zlewni górnej Parsęty, pokrywy śnieżnej, dużych opadów deszczu, przyspieszających również roztopy, i brakiem przemarznięcia gruntu, które ograniczałoby infiltrację i śródpokrywowy spływ wody.

Kolejnym przykładem zjawiska ekstremalnego w zlewni górnej Parsęty był silny wiatr, który wystąpił w ostatniej dekadzie stycznia 2022 r. Od 27 do 30 stycznia średnia dobowa prędkość wiatru wynosiła 3,1 $m \cdot s^{-1}$, a średnia dobowa maksymalna prędkość wiatru przekraczała 14 $m \cdot s^{-1}$. Maksymalna średnia godzinna prędkość wiatru osiągnęła 29 stycznia o godz. 23.00 19,1 $m \cdot s^{-1}$. W tym czasie nie występowało przemarznięcie gruntu, a w wyniku opadów deszczu, którego suma od połowy do końca stycznia wynosiła 59 mm, nastąpiło nasączenie gruntu wodą (ryc. 10).

W tym czasie doszło w lasach do licznych powałów drzew (ryc. 11). Zdecydowana większość powalonych drzew (ok. 90%) została wyrwana z korzeniami. Rozkołysanie i ostatecznie wyrywanie drzew było spowodowane długotrwałym silnym wiatrem przy dużej wilgotności gruntu. Po zaledwie dwóch tygodniach ponownie wystąpił silny wiatr, którego prędkość średnia dobowa od 17 do 25



Ryc. 10. Średnia dobowa prędkość wiatru, średnia dobowa maksymalna prędkość wiatru i dobowa suma opadu atmosferycznego w Storkowie w okresie 21 stycznia–28 lutego 2002 r.

1 – średnia dobowa prędkość wiatru $v_{śr}$ (m·s^{-1}); 2 – maksymalna średnia dobowa prędkość wiatru v_{max} (m·s^{-1}); 3 – dobowa suma opadu atmosferycznego P (mm)

Fig. 10. Average daily wind speed, average daily maximum wind speed and daily precipitation in Storkowo in the period January 21–February 28, 2002

1 – average daily wind speed v_{avg} (m·s^{-1}); 2 – maximum average daily wind speed v_{max} (m·s^{-1}); 3 – daily precipitation sum P (mm)

Ryc. 11. Powały świerków w zlewni górnej Parsęty spowodowane ekstremalnym wiatrem w styczniu i lutym 2022 r. (fot. G. Szpikowska)

Fig. 11. Spruce uprootings in the upper Parsęta catchment caused by extreme wind in January and February 2022

lutego przekroczyła 3 $m \cdot s^{-1}$, a średnia dobowa prędkość maksymalna 19 lutego – 18 $m \cdot s^{-1}$. Średnia godzinna maksymalna prędkość o godz. 6.00 19 lutego osiągnęła 22,4 $m \cdot s^{-1}$. Osłabione poprzednim huraganem drzewa po raz kolejny ulegały licznym powałom. Wyrywanie drzew z korzeniami w dalszym ciągu ułatwiało spore nawodnienie gruntu, ponieważ od 1 do 18 lutego spadło ponad 68 mm deszczu. Duży zasięg wichury doprowadził do strat w lasach Regionalnej Dyrekcji Lasów Państwowych w Szczecinku określanych na 2,1 mln m^3 drewna (dla porównania roczne pozyskiwanie drewna w lasach RDLP w Szczecinku to 3,2 mln m^3, informacje ze strony RDLP w Szczecinku https://www.szczecinek.lasy.gov.pl/). Poza zniszczeniami w lasach wichury spowodowały liczne szkody w sieci energetycznej skutkujące wielodniowym brakiem dostaw prądu do sieci.

Podsumowanie

Serie danych pomiarowych zbieranych w Stacji ZMŚP Parsęta w Storkowie stanowią ważny materiał dokumentacyjny dla określania występowania zjawisk ekstremalnych w środowisku geograficznym zlewni górnej Parsęty. Wobec niejednoznacznych, jak dotąd, metod określania progów zdarzeń ekstremalnych istotne jest ustalenie jednolitych zasad klasyfikacji takich zdarzeń dla wszystkich Stacji Bazowych realizujących program Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego.

Nie budzi wątpliwości fakt, że za wartości ekstremalne obserwowanych zjawisk należy uznawać minima i maksima absolutne z uzyskanej serii pomiarowej. Warunkiem jest odpowiednio długa seria danych, optymalnie co najmniej kilkudziesięcioletnia. Dla sieci pomiarowej Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego poważnym mankamentem jest niejednolity okres gromadzenia danych pomiarowych przez poszczególne Stacje Bazowe. W przypadku Stacji Parsęta dane reprezentujące stan środowiska geograficznego zlewni górnej Parsęty analizowane były za okres 1994–2021, czyli 28 lat. Wyniki analizy byłby niewątpliwie inne, gdyby wykorzystać dane od roku 1987, w którym rozpoczęto systematyczne pomiary hydrometeorologiczne. Ujednolicenie i zarazem wydłużenie serii pomiarowych dla wszystkich Stacji Bazowych ZMŚP byłoby możliwe przy odwołaniu się do dostępnych, najbliżej położonych punktów pomiarowych państwowej sieci hydrometeorologicznej.

Słabą stroną typowania zdarzeń ekstremalnych za pomocą metody kwantylowej wydaje się duża liczebność tego typu zdarzeń, zwłaszcza gdy przyjmie się granice 10. i 90. kwantyla. Przykładowo dla średniej dobowej temperatury powietrza z 28 lat jest to po 10% zebranych danych, czyli dwa razy po ponad 1000 przypadków. Zdaniem autorów wyklucza to stosowanie takiej metody wydzielania zdarzeń ekstremalnych. Przy przyjmowaniu za zdarzenia ekstremalne progu do 1. kwantyla i powyżej 99. kwantyla przypadków jest mniej, a tak wyodrębnione zdarzenia można uznawać za wyjątkowe w skali całej serii obserwacyjnej. Dobre wyniki, co potwierdzają obliczenia dla temperatury powietrza, parowania wskaźnikowego i przepływów, przynosi zastosowanie metody 1. i 99. kwantyla

dla wartości miesięcznych (średnich lub sum). Korzyścią stosowania metody kwantylowej (1. i 99. kwantyla) jest możliwość uzyskania wystarczającej liczby danych do wykazania, czy zachodzą określone trendy zmian ekstremów poszczególnych elementów czy też wyliczonych wskaźników hydrometeorologicznych w dłuższych okresach. Znaczenie tej metody to również możliwość oparcia się na ujednoliconych zasadach wyznaczania zdarzeń wyjątkowych, np. w skali wszystkich zlewni badawczych ZMŚP.

Stosowanie jako wyznaczników meteorologicznych zdarzeń ekstremalnych dni charakterystycznych dla danych ze Storkowa nie przynosi dobrych rezultatów. Wyjątkiem są dni bardzo upalne, których w zlewni górnej Parsęty występuje bardzo mało. Słabą stroną tej metody są sztywne granice wydzieleń nieuwzględniające regionalnego zróżnicowania warunków klimatycznych Polski, zatem ograniczające możliwości porównań zmienności przestrzennej w skali kraju.

Kluczem do wyznaczania zdarzeń ekstremalnych wydaje się szersza analiza różnych uwarunkowań wpływających na wystąpienie, przebieg, natężenie i końcowe efekty oddziaływania wyjątkowych procesów środowiskowych. Podane przykłady ze zlewni Parsęty jednoznacznie wykazują, że procesy w istotny sposób oddziałujące na funkcjonowanie środowiska w wielu przypadkach wymagają współwystępowania w pewnej sekwencji czasowej zespołu różnych zjawisk i procesów. Ten sposób klasyfikacji zdarzeń ekstremalnych, a przede wszystkim wykazania ich roli w funkcjonowaniu geoekosystemów, wymaga jednak prowadzenia systematycznych, różnokierunkowych badań i odpowiedniego systemu pomiarowego. Program realizowany przez Stacje Bazowe ZMŚP, poprzez swój szeroki zakres, ujednolicony sposób zbierania danych i weryfikację serii pomiarowych jest niezwykle przydatny do pełnienia takiej roli.

Literatura

Bac S., Koźmiński M. Rojek M., 1993. Agrometeorologia. PWN, Warszawa.

Boryczka J., Stopa-Boryczka M., Baranowski D., Grabowska K., Błażek E., Skrzypczuk J., 2002. Prognozy zmian klimatu Polski. Atlas współzależności meteorologicznych i geograficznych w Polsce. Wydawnictwa Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa.

Froehlich W., 2006. Efektywność geomorfologiczna i wartości progowe procesów hydromorfologicznych w beskidzkim systemie fluwialnym. [W:] A. Kostrzewski, J. Szpikowski (red.), Funkcjonowanie geoekosystemów zlewni rzecznych. Procesy ekstremalne w środowisku geograficznym. Poznań–Storkowo: 29–33.

Hansen J., Sato M., Ruedy R., Lo K., Lea D.W., Medina-Elizade M., 2006. Global temperature change. Proceedings of the National Academy of Sciences, 103(39): 14288–14293.

Jania J., Zwoliński Z., 2011. Ekstremalne zdarzenia meteorologiczne, hydrologiczne i geomorfologiczne w Polsce. Landform Analysis, 15: 51–64.

Kaszewski B.M., Flis E., 2014. Meteorologiczne i klimatyczne zdarzenia ekstremalne w polskiej literaturze. Prace Geograficzne, 139: 7–20.

Kejna M., 2021. Pogramy Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego. Program A1 – Meteorologia. [W:] A. Kostrzewski, M. Majewski (red.), Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Organizacja, system pomiarowy, metody badań. Wytyczne do realizacji. Bibl. Monit. Środ., Warszawa: 72–91.

Kostrzewski A., Majewski M. (red.), 2021. Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Organizacja, system pomiarowy, metody badań. Wytyczne do realizacji. Bibl. Monit. Środ., Warszawa.

Lorenc H., 1998. Ocena stopnia realizacji programu „obserwacje meteorologiczne i badania klimatyczne w systemie zintegrowanego monitoringu środowiska" oraz synteza uzyskanych wyników badań za okres 1994–1997. [W:] A. Kostrzewski (red.), Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Funkcjonowanie i tendencje rozwoju geoekosystemów Polski. Bibl. Monit. Środ., Warszawa: 113–118.

Lorenc H., 1998. Przyczyny, wielkość i skutki katastrofalnych opadów w lipcu 1997 w Polsce. Przegląd Geofizyczny, 43(3–4): 191–206.

Lorenc H., Cebulak E., Głowicki B., Kowalewski M., 2012. Struktura występowania intensywnych opadów deszczu powodujących zagrożenie dla społeczeństwa, środowiska i gospodarki Polski. [W:] H. Lorenc (red.), Klęski żywiołowe a bezpieczeństwo wewnętrzne kraju. IMGW, Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa: 7–32.

Michalska G., 2003. Dynamika śródpokrywowego spływu wody i substancji rozpuszczonych podczas intensywnych roztopów i opadów w eksperymentalnej zlewni Chwalimskiego Potoku (górna Parsęta). [W:] W. Bochenek, E. Gil (red.), Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Funkcjonowanie i monitoring geoekosystemów Polski ze szczególnym uwzględnieniem zjawisk ekstremalnych. Bibl. Monit. Środ., Tuchów: 63–70.

Rodzik J., Siwek K., 2008. Natężenie procesów niweo-eolicznych w okolicy Lublina w lutym 2007 r. Landform Analysis, 9: 192–197.

Scott H.J., Rosenberg N.J., Edmonds A.J., Cushman R.M., Darwin R.F., Yohe G.W., Liebetrau A.M., Hunsacker C.T., Bruns D.A., de Angelis D.L., Hales J.M., 1990. Consequences of climatic change for the human environment. Climate Research, 1: 63–79.

Smolska E., 2007. Extreme rainfalls and their impact on slopes – evaluation based on soil erosion measuremenets (as exemplified by the Suwałki Lakeland, Poland). Geographia Polonica, 80(2): 152–163.

Starkel L., 1976. The role of extreme (catastrophic) meteorological events in contemporary evolution of slopes. [W:] J. Wiley (red.), Geomorphology and Climate. Londyn: 203–246.

Starkel L., 2011. Złożoność czasowa i przestrzenna opadów ekstremalnych – ich efekty geomorfologiczne i drogi przeciwdziałania im. Landform Analysis, 15: 65–80.

Szpikowski J., 2002. Contemporary processes of soil erosion and the transformation of the morphology of slopes on agricultural use in the postglacial catchment of the Chwalimski Potok (Upper Parsęta, Drawskie Lakeland). Quaestiones Geographicae, 22: 79–90.

Szpikowski J., 2008. Rola procesów niweo-eolicznych w kształtowaniu rzeźby obszarów młodoglacjalnych (zlewnia Perznicy, Pojezierze Drawskie). Landform Analysis, 9: 198–201.

Tylkowski J., Hojan M., 2018. Threshold values of extreme hydrometeorological events on the Polish Baltic coast. Water, 10(10), art. nr 1337.

Ustrnul Z., Czekierda D., 2009. Atlas ekstremalnych zjawisk meteorologicznych oraz sytuacji synoptycznych w Polsce. Seria: Atlasy. IMGW, Warszawa.

Wójcik R., Miętus M., 2014. Niektóre cechy wieloletniej zmienności temperatury powietrza w Polsce (1951–2010). Przegląd Geograficzny, 86(3): 339–364.

Ziernicka-Wojtaszek A., Zawora T., 2007. Najmniejsze i największe niedobory i nadmiary opadów atmosferycznych na obszarze Polski (1971–2004). [W:] J. Szkutnicki, U. Kossowska-Cezak, E. Bogdanowicz, M. Ceran (red.), Cywilizacja i żywioły. Warszawa: 171–176.

Zwoliński Z., 2008. Wybrane zjawiska ekstremalne pojezierzy polskich. Landform Analysis, 8: 98–106.

Janina Borysiak[1], Monika Domańska[2], Józef Szpikowski[2,3]

[1]Wydział Geografii Społeczno-Ekonomicznej i Gospodarki Przestrzennej,
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, janina.borysiak@amu.edu.pl
[2]Stacja Geokologiczna w Storkowie, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu
[3]Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu
JB https://orcid.org/0000-0001-8957-7372, JS https://orcid.org/0000-0001-9537-3261

Geobotaniczne aspekty występowania kenofitów w zlewni górnej Parsęty (Pomorze Zachodnie)

Geobotanical aspects of the occurrence of kenophytes in the upper Parsęta catchment (Western Pomerania)

Zarys treści: W latach 2019–2022 w eksperymentalnej zlewni ZMŚP Parsęta zbadano geobotaniczne aspekty występowania inwazyjnych gatunków obcych będących kenofitami, równocześnie wykonując program ZMŚP-J3. Dla każdej fitocenozy, znajdującej się na stwierdzanym stanowisku kenofitu, analizowano jej: fitosocjologiczną rangę, syngenezę i siedlisko przyrodnicze Natura 2000. Zanotowany gatunek scharakteryzowano pod względem niektórych jego cech autekologicznych. Wyniki zamieszczono w syntetycznej tabeli razem z wynikami kartowania uzyskanymi od początku realizacji programu J3. Dotychczas zanotowano 52 inwazyjne gatunki roślin. Wystąpiły w 444 kwadratach o boku 100 m, na 1797 łącznie zinwentaryzowanych kwadratów.

Słowa kluczowe: fitosocjologia, gatunek inwazyjny, monitoring, Natura 2000, roślina naczyniowa

Abstract: In 2019–2022, in the experimental ZMŚP Parsęta catchment area, geobotanical aspects of the occurrence of invasive alien species that are kenophytes were investigated, while at the same time implementing the ZMŚP-J3 program. For each phytocoenosis found at the identified localities of a kenophyte, its following were analyzed: phytosociological rank, syngenesis and the Natura 2000 natural habitat. Recorded species were characterized in terms of some of its autecological features. The results are summarized in a synthetic table, together with the mapping results obtained from the beginning of Program J3. So far, 52 invasive plant species have been recorded. They appeared in 444 squares with a side of 100 meters, out of 1797 squares in total on the inventory.

Keywords: invasive species, monitoring, Natura 2000, phytosociology, vascular plant

Wprowadzenie

W 2011 r. przyjęto Unijną Strategię Ochrony Różnorodności Biologicznej 2020 dla działań realizujących cele związane z głównymi przyczynami utraty bioróżnorodności (https://environment.ec.europa.eu/strategy/biodiversity-strategy-2030_en). Podjęcie tych działań miało złagodzić zagrożenia dla naturalnego potencjału Europy, w tym ze strony inwazyjnych gatunków obcych. Wytyczne do realizacji sformułowano w rozporządzeniu Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) nr 1143/2014 w sprawie działań zapobiegawczych i zaradczych w odniesieniu do wprowadzania i rozprzestrzeniania inwazyjnych gatunków obcych (Dz.U.UE.L.2014.317.35). W Polsce w 2021 r. w odpowiedzi na to rozporządzenie uchwalono ustawę o gatunkach obcych (Dz.U. poz. 1718). Na jej podstawie mają być monitorowane populacje inwazyjnych gatunków obcych (skrót IGO) w kilku zakresach: taksonomicznym – obejmującym sporządzenie wykazu gatunków, ekologicznym – analizującym strukturalne cechy populacji, a także chorologicznym – diagnozującym dynamikę stanowisk wtórnego zasięgu geograficznego. Na podstawie wyników takiego monitoringu mają być podejmowane działania ochronne ograniczające zasięg i negatywny wpływ IGO na bioróżnorodność.

W 2015 r., po ukazaniu się rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) nr 1143/2014, Stacje Bazowe Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego (skrót ZMŚP) rozpoczęły realizację programu J3 – Monitoring gatunków inwazyjnych obcego pochodzenia – rośliny, według metodyki podanej przez Krzysztofiaka (2021). Jednym z celów programu J3 jest ocena zagrożeń gatunkowej różnorodności rodzimej flory i siedlisk przyrodniczych, jakie są związane z rozprzestrzenianiem się IGO. Program uwzględnia wszystkie trzy zakresy monitoringu wyznaczone ustawą z 2021 r. (Ustawa… 2021). Składa się z dwóch podprogramów. Jednym z nich jest monitoring ogólny, którego efektem są kartogramy przedstawiające rozwój przestrzennego zasięgu stanowisk każdego ze stwierdzonych IGO. Drugim jest monitoring szczegółowy, polegający na śledzeniu dynamiki populacji IGO, na stałych powierzchniach założonych w wybranych siedliskach przyrodniczych.

Dziewięć z jedenastu eksperymentalnych zlewni Stacji Bazowych ZMŚP leży na obszarach europejskiej sieci ekologicznej Natura 2000 (skrót N2000), całkowicie lub częściowo. Według Majewskiego i Kostrzewskiego (2022) jest to dziewięć obszarów specjalnej ochrony siedlisk (OSO, PLH), trzy specjalne obszary ochrony ptaków (SOO, PLB) i dwa obszary o znaczeniu dla Wspólnoty (OZW, PLC). Z standardowych formularzy danych dla tych obiektów N2000 (https://crfop.gdos.gov.pl/) wynika, że w eksperymentalnych zlewniach ZMŚP znajdują się liczne gatunki i siedliska przyrodnicze N2000, dla których ochrony ustanowiono dwanaście wspomnianych obszarów. Według Szpikowskiego i in. (2022) około 34% areału eksperymentalnej zlewni górnej Parsęty monitorowanej przez Stację Bazową ZMŚP Parsęta w Storkowie leży w granicach obszaru PLH320007 Dorzecze Parsęty, a 2% w zasięgu PLH320009 Jeziora Szczecineckie. Gatunki i siedliska przyrodnicze N2000 chronione na tych obszarach powinny być we

właściwym stanie ochrony. Mają to zapewniać plany zadań ochronnych. Drugi z wymienionych posiada taki dokument (https://crfop.gdos.gov.pl/), natomiast większość z 14 obszarów usytuowanych w granicach eksperymentalnych zlewni ZMŚP ich nie ma. Do wykonania planów są niezbędne aktualne dane o stanie wszystkich gatunków i siedlisk przyrodniczych N2000, występujących na tych obszarach, w tym informacje o zagrożeniach ze strony IGO. Danych mógłby dostarczyć program J3, gdyby na stwierdzanych stanowiskach IGO diagnozowano typ siedliska przyrodniczego N2000. W celu pozyskania takich danych, a przy okazji kilku innych, w eksperymentalnej zlewni monitorowanej przez Stację Bazową ZMŚP Parsęta, podjęto badania nad geobotanicznymi aspektami występowania IGO.

Metody i materiał

W latach 2019–2022 w eksperymentalnej zlewni Stacji Bazowej ZMŚP Parsęta badano geobotaniczne aspekty występowania IGO będących kenofitami figurującymi na liście zestawionej przez Tokarską-Guzik i in. (2012); podczas florystycznego kartowania dla programu J3 – Monitoring ogólny, metodą podaną przez Krzysztofiaka (2021). Było to kartowanie roślinności w różnych typach krajobrazów (głównie wiejskich) z takimi obiektami, jak m.in.: śródpolne oczka wodne, drogi gruntowe, drzewostany leśne i wysp śródpolnych, nieczynne cmentarze poniemieckie, wiejskie osady, tory kolejowe między Dalęcinem a Iwinem, kopalnia torfu w Nowym Chwalimiu i wydobywczy zakład górniczy kruszywa mineralnego w Parsęcku.

Stwierdzane stanowiska kenofitów lokalizowano w kwadratach o boku 100 m, stosując system MGRS (*Military Grid Reference System*) oparty na siatce UTM (*Universal Transverse Mercator*). Na każdym stanowisku rozpatrywano trzy aspekty geobotaniczne. Były to: 1) analiza fitosocjologicznej rangi zbiorowiska roślinnego, metodą Brauna-Blanqueta z zastosowaniem syntaksonomicznego ujęcia Brzega i Wojterskiej (2001) oraz Matuszkiewicza (2022); 2) diagnoza syngenezy zbiorowisk roślinnych według klasyfikacji Falińskiego (1969); 3) identyfikacja siedliska przyrodniczego N2000 na podstawie fitoindykatorów podanych w poradnikach Herbicha (2004) oraz w załączniku 1 do rozporządzenia Ministra Środowiska (Rozporządzenie… 2012). Sporządzono wykaz stwierdzonych IGO. Każdy wykazany gatunek scharakteryzowano pod względem jego: pozycji taksonomicznej (wg Mirka i in. 2020), pochodzenia geograficznego (za Tokarską-Guzik i in. 2012), formy życiowej (sklasyfikowanej przez Zarzyckiego i in. 2002), stosunku do kontynentalizmu/oceanizmu (dane z Vent i Schubert 1976), a także wartości wskaźnikowej warunków środowiskowych, analizując ekologiczne liczby Ellenberga – wilgotności, trofizmu i kwasowości gleby, wyznaczone przez Zarzyckiego i in. (2002). Pojęcia neofit i neofityzacja użyto zgodnie z definicjami Falińskiego (1998).

Wyniki

Do 2022 r. w eksperymentalnej zlewni Stacji Bazowej ZMŚP Parsęta zbadano 1797 kwadratów o boku 100 m. W 444 z nich stwierdzono łącznie 52 IGO w randze kenofita. W największej liczbie kwadratów wystąpiły (tab. 1): *Conyza canadensis* (382 kwadraty, ryc. 1A), *Erigeron annuus* (170), *Solidago canadensis* (159) i *Galinsoga parviflora* (123). Pierwsze dwa notowano w płatach wszystkich syngenetycznych typów zbiorowisk roślinnych, najrzadziej w zbiorowiskach naturalnych. *Conyza canadensis* rosła w płatach ksenospontanicznego zespołu *Erigeronto-Lactucetum serriolae*, na siedliskach antropogenicznych synantropijnych ruderalnych. Jest gatunkiem charakterystycznym tej asocjacji. Kenofity najczęściej znajdowano w zbiorowiskach antropogenicznych synantropijnych ruderalnych (tab. 1, kol. D: sr – 37). Wyłącznie w fitocenozach o takiej syngenezie wystąpiło 21 IGO. Dwanaście IGO (k – 12) spośród 50 zanotowanych rosło w fitocenozach zespołów antropogenicznych

Ryc. 1. Inwazyjne gatunki obce w eksperymentalnej zlewni górnej Parsęty, monitorowanej przez Stację Bazową Parsęta należącą do Zintegrowanego Monitoringu Przyrodniczego
A – *Conyza canadensis* w fitocenozie *Erigeronto-Lactucetum serriolae*; B – ksenospontaniczny szuwar *Acoretum calami*; C – ksenospontaniczny zespół *Impatientetum parviflorae* na nasypie kolejowym; D – ruderalne zbiorowisko *Bromo-Corispermetum leptopteri* w Kopalni Surowców Mineralnych Parsęcko

Fig. 1. Invasive alien species in the experimental upper Parsęta catchment monitored by the Parsęta Base Station of the Integrated Natural Monitoring.
A – *Conyza canadensis* in the patch of *Erigeronto-Lactucetum serriolae*; B – *Acoretum calami* xenospontaneous rush; C – *Impatientetum parviflorae* xenospontaneous association on a railway embankment; D – ruderal community of *Bromo-Corispermetum leptopteri* in the Parsęcko Mineral Resource Mine

ksenospontanicznych: tataraku *Acoretum calami* (ryc. 1B), rdestowca ostrokończystego *Convolvulo sepium-Reynoutrietum japonicae*, moczarki kanadyjskiej *Elodeetum canadensis*, słonecznika bulwiastego *Helianthetum decapetali*, niecierpka drobnokwiatowego *Impatientetum parviflorae* (ryc. 1C), niecierpka gruczołowatego *Impatienti glanduliferae-Convolvuletum sepium*, situ chudego *Juncetum macri* oraz nawłoci *Rudbeckio-Solidaginetum*. W zbiorowiskach roślinnych naturalnych stwierdzono: *Aesculus hippocastanum* (w *Aegopodio-Sambucetum nigrae* i *Stellario holosteae-Carpinetum betuli*), *Bidens frondosa* (*Bidentetum cernui*), *Conyza canadensis* (w płatach: *Agrimonio-Vicietum cassubicae*, *Poo compressae-Tussilaginetum* i *Sedo maximi-Peucedanetum oreoselini*), *Echinocystis lobata* (*Urtico-Convolvuletum*), *Erigeron annuus* (*Calamagrostietum epigeji*, *Rubo plicati-Sarothamnetum*), *Lupinus polyphyllus* (*Rubo plicati-Sarothamnetum*), *Padus serotina* (*Calamagrostietum epigeji*), *Quercus rubra* (*Calamagrostio arundinaceae-Quercetum petraeae*, *Stellario holosteae-Carpinetum betuli*), *Reynoutria japonica* (*Euonymo-Coryletum*), *Spiraea* x*pseudosalicifolia* (*Aegopodio-Sambucetum nigrae*), *Solidago canadensis* (*Agrostio-Populetum tremulae*, *Calamagrostietum epigeji*) i *Solidago gigantea* (*Phragmitetum communis*, *Urtico-Convolvuletum sepium*). Najliczniejszą grupę zespołów naturalnych skolonizował *Impatiens parviflora*, bowiem został znaleziony w płatach sześciu asocjacji: *Agrostio-Populetum tremulae*, *Euonymo-Coryletum*, *Melico uniflorae-Fagetum*, *Stachyo sylvaticae-Impatientetum noli-tangere*, *Stellario holosteae-Carpinetum betuli* oraz *Trifolio-Melampyretum nemorosi*). W fitocenozach wymienionych typów lasów niecierpek rozwijał się zawsze na siedliskach typowych dla jego skali środowiskowej pod względem ekologicznych liczb: wilgotności, trofizmu i kwasowości gleby. Ponadto masowo występował w pełnym świetle, na mocno nagrzewającym się tłuczniu torowiska kolejowego. Kwitł i owocował tam obficie.

Kenofitami mającymi 1–2 stanowiska (ale czasami kilka kwadratów MGRS) wśród roślinności obszarów nieleśnych były m.in.: *Anthoxanthum aristatum* w uprawie zboża blisko zabudowań osady Pustkowie); *Corispermum hyssopifolium* na drodze do Kopalni Surowców Mineralnych Parsęcko (ryc. 1D) oraz w Stacji Geoekologicznej w Storkowie, na składowisku piasku przywiezionego z wymienionej kopalni; *Cornus sericea* w oszyjku drzewostanu przy brzegu Parsęty; *Elodea canadensis* w korycie rzeki Parsęty w Parsęcku; *Galeopsis angustifolia* – w wyspecjalizowanej roślinności ruderalnej na torach kolejowych w pobliżu wiaduktu w Przeradzu, a także wśród roślinności segetalnej w uprawie łubinu, około 2 km na NWW od Chwalimek; *Heracleum sosnowskyi* na skarpie torowiska kolejowego k. Przeradza; *Impatiens glandulifera* w ziołoroślach okrajkowych na brzegu Parsęty; *Iva xanthiifolia* – na składowisku odpadów zakładu wydobywczego Torf. Sp. z o.o. Nowy Chwalim (ryc. 2A), a także *Oxalis corniculata* na rabacie kwiatowej w Stacji Geoekologicznej w Storkowie.

Spektrum form życiowych tworzyły: 22 terofity, 17 fanerofitów (7 mega- i 10 nanofanerofitów), 14 hemikryptofitów, 5 geofitów, jeden hydrofit (*Elodea canadensis*) i jedna liana (*Parthenocissus inserta*). Dziewięć gatunków miało po dwie formy życiowe. Większość IGO pochodziła z Ameryki Północnej – 28 gatunków, liczna grupa z Azji – 11, 6 z Europy południowej lub wschodniej, podczas gdy pozostałe miały szerszy swój rodzimy zasięg geograficzny, obejmujący nawet 4 kontynenty, np. *Oxalis corniculata*.

Ryc. 2. Inwazyjne gatunki obce na obszarach eksperymentalnej zlewni górnej Parsęty monitorowanej przez Stację Bazową Parsęta należącą do Zintegrowanego Monitoringu Przyrodniczego

A – *Iva xanthiifolia* na zruderalizowanym siedlisku zakładu Torf Sp. z o.o. w Nowym Chwalimiu; B – największy (6 ha) zanotowany płat *Lupinus polyphyllus* przy oddziałach 103 i 104 leśnictwa Rojsty; C – *Reynoutria japonica* w uprawie żyta; D – *Spiraea ×pseudosalicifolia* wypierająca łąkę trzęślicową N2000-6410 *Selino carvifoliae-Molinietum caeruleae*

Fig. 2. Invasive alien species found in the experimental upper *Parsęta catchment* monitored by the Parsęta Base Station of the Integrated Natural Monitoring

A – *Iva xanthiifolia* in the ruderal habitat of the Torf Sp. z o.o. in Nowy Chwalim; B – the largest (6 ha) recorded patch of *Lupinus polyphyllus* at divisions 103 and 104 of the Rojsty forestry; C – *Reynoutria japonica* in rye cultivation; D – *Spiraea ×pseudosalicifolia* replacing the meadow N2000-6410 *Selino carvifoliae-Molinietum caeruleae*

Flora IGO była zróżnicowana pod względem wskaźnika kontynentalizmu/oceanizmu, na gatunki oceaniczne (18) i suboceaniczne (11), zdecydowanie przeważające (29) nad kontynentalnymi (2) i subkontynentalnymi (7). Neutralnych w stosunku do kontynentalizmu było 7. Brakowało danych dla siedmiu kenofitów. Florę IGO charakteryzowało stosunkowo wąskie spektrum syntaksonomiczne. Rangi fitosocjologicznej nie miały 22 gatunki. Takim był *Lupinus polyphyllus*, który zajmował około 6 ha działki ewidencyjnej 36/2 między pododdziałami 103 i 104 leśnictwa Rojsty (ryc. 2B). Dużą siłę inwazji ujawnił rdestowiec *Reynoutria japonica*. Na stanowisku we wsi Ostrowite rósł w uprawie żyta, na gruncie rokrocznie oranym (ryc. 2C). Najliczniej notowano *Artemisietea* – 11 charakterystycznych z tej klasy, w tym 9 z rzędu *Convolvuletalia sepium*. Równo liczne (11) były *Stellarietea mediae*.

Obecność kenofitów w siedliskach przyrodniczych Natura 2000

W tabeli 1, w kolumnie C, pogrubioną czcionką prostą oznaczono zespoły roślinne będące fitosocjologicznymi identyfikatorami siedlisk przyrodniczych N2000. Zanotowano po jednym IGO w siedliskach: 6410 – *Spiraea xpseudosalicifolia*, ryc. 2D; 6510 – *Lupinus polyphyllus*; 9130 – *Impatiens parviflora* oraz 9190 – *Quercus rubra*; po dwa w 6430 – *Echinocystis lobata* i *Solidago gigantea*, a po trzy w 9160 – *Aesculus hippocastanum*, *Impatiens parviflora* i *Quercus rubra*. Zdiagnozowane kenofity wzięły więc udział w neofityzacji trzech leśnych siedlisk autogenicznych naturalnych, a mianowicie 9130, 9160 i 9190. Wkroczyły także do trzech antropogenicznych seminaturalnych: 6410 (ryc. 2D), 6430 oraz 6510.

Wnioski i rekomendacje

Prawie 1/3 obszaru eksperymentalnej zlewni górnej Parsęty, monitorowanej przez Stację Bazową Parsęta w Storkowie, leży na obszarze N2000 o nazwie PLH320007 Dorzecze Parsęty. Niewielka część (2%) także w PLH320009 Jeziora Szczecineckie i obejmuje lasy przy NE granicy zlewni, jeszcze nieskartowane w ramach programu J3. Obszar PLH320007 nie ma planu zadań ochronnych. Celem takiego planu jest zapewnienie gatunkom i siedliskom przyrodniczym N2000 właściwego stanu ochrony, po rozpoznaniu m.in. istniejących i potencjalnych zagrożeń dla różnorodności biologicznej i funkcjonowania ekosystemów. Badania przeprowadzone nad geobotanicznymi aspektami występowania IGO pokazały, że istnieje zagrożenie sześciu siedlisk Natura 2000 obszaru PLH320007 ze strony siedmiu kenofitów. Na „Liście referencyjnej zagrożeń, presji i działań" (Lista… 2011), którą posługują się wykonawcy projektów planu zadań ochronnych, zagrożenie to jest klasyfikowane jako „I01. Obce gatunki inwazyjne". Przedstawione wyniki badań dotyczące geobotanicznych podstaw występowania IGO można więc wykorzystać w pracach nad projektem planu zadań ochronnych. Tym bardziej, że stanowiska IGO określano rejestratorem GPS, z dokładnością do sekundy, a także wpisano do bazy danych ZMŚP. Wiadomo więc, gdzie dokładnie znajdują się miejsca inwazji.

Literatura

Brzeg A., Wojterska M., 2001. Zespoły roślinne Wielkopolski, ich stan poznania i zagrożenie. [W:] M. Wojterska (red.), Szata roślinna Wielkopolski i Pojezierza Południowopomorskiego. Bogucki Wyd. Nauk., Poznań: 39–110.

Faliński J.B., 1969. Zbiorowiska autogeniczne i antropogeniczne. Próba określenia i klasyfikacji. Dyskusje fitosocjologiczne (4). Ekologia Polska, 15: 173–182.

Herbich J. (red.), 2004. Poradniki ochrony siedlisk i gatunków Natura 2000 – podręcznik metodyczny, 1–3, 5. Ministerstwo Środowiska, Warszawa.

Krysztofiak L., 2021. Program J3 – Monitoring gatunków inwazyjnych obcego pochodzenia – rośliny. [W:] A. Kostrzewski, M. Majewski (red.), Zintegrowany monitoring śro-

dowiska przyrodniczego. Organizacja, system pomiarowy, metody badań. Wytyczne do realizacji. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa: 283–297.
Lista referencyjna zagrożeń, presji i działań, 2011. Instrukcja wypełniania Standardowego Formularza Danych Obszaru Natura 2000. Generalna Dyrekcja Ochrony Środowiska, Warszawa.
Majewski M., Kostrzewski A., 2022. Stan geoekosystemów Polski w 2021 roku na podstawie badań Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego.
Matuszkiewicz W., 2022. Przewodnik do oznaczania zbiorowisk roślinnych Polski. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa.
Mirek Z., Piękoś-Mirkowa H., Zając A., Zając M., 2020. Vascular Plants of Poland. An annotated checklist. W. Szafer Institute of Botany, Polish Academy of Sciences, Kraków.
Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 9 sierpnia 2012 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie siedlisk przyrodniczych oraz gatunków będących przedmiotem zainteresowania Wspólnoty, a także kryteriów wyboru obszarów kwalifikujących się do uznania lub wyznaczenia jako obszary Natura 2000 (Dz.U. 2012 poz. 1041).
Szpikowski J., Borysiak J., Domańska M., Kostrzewski A., Kruszyk R., Majewski M., Szpikowska G., 2022. Raport z realizacji programu badawczo-pomiarowego Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego w Stacji Bazowej Parsęta w 2021 roku. Stacja Geoekologiczna w Storkowie (mskr.).
Tokarska-Guzik B., Dajdok Z., Zając M., Zając A., Urbisz A., Danielewicz W., Hołdyński C., 2012. Rośliny obcego pochodzenia w Polsce ze szczególnym uwzględnieniem gatunków inwazyjnych. Generalna Dyrekcja Ochrony Środowiska w Warszawie, Warszawa.
Vent W., Schubert R., 1976. Exkursionsflora für die Gebiete der DDR und der BRD. Kritischer Band. Volk und Wissen Volkseigener Verlag, Berlin.

Tabela 1. Geobotaniczne aspekty występowania kenofitów w zlewni górnej Parsęty (Pomorze Zachodnie), w latach 2019–2022
Table 1. Geobotanical aspects of the occurrence of kenophytes in the upper Parsęta catchment (Western Pomerania), in 2019–2022

A	B	C	D	E	F	G	H
Acer negundo	1	roślinność nieużytku	sr	-	Am N	M	subk
Acorus calamus	6	*Acoretum calami*	k	Ph	Asia C, S	Hy	(subk)
Aesculus hippocastanum	7	*Aegopodio-Sambucetum nigrae*, 9160 – *Stellario holosteae-Carpinetum betuli*	n	-	Eur SE	M	suboz
Amaranthus retroflexus	3	*Hyoscyamo nigri-Malvetum neglectae*	sr	S_Sis	Am N, C	T	n
Anthoxanthum aristatum	3	*Sclerantho-Arnoseridetum minimae*	ss	S_Ap	Eur S	T	oz
Bidens frondosa	4	*Bidentetum cernui*; roślinność namulna	n	B	Am N [N]	T	n
Bromus carinatus	8	*Convolvulo arvensis-Agropyretum repentis*; roślinność nieużytku	sr	-	Am N	T, H	nd
Chamomilla suaveolens	69	*Hyoscyamo nigri-Malvetum*, *Matricario matricarioidis-Polygonetum arenastri*, *Lolio-Plantaginetum*; roślinność nieużytku	sn, sr	PP	Am N, Asia E	T	(oz)
Chenopodium strictum	4	*Chenopodietum stricti*	sr	S_Sis	Asia C	T	(k)
Conyza canadensis	382	*Agrimonio-Vicietum cassubicae*, *Armerio elongatae-Festucetum ovinae*, *Artemisio vulgaris-Tanacetetum*, *Erigeronto-Lactucetum serriolae*, *Hyoscyamo-Conietum maculati*, *Ivaetum xanthiifoliae*, *Poo compressae-Tussilaginetum*, *Prunello vulgaris-Plantaginetum brachystachyae*, *Sedo maximi-Peucedanetum oreoselini*, *Spergulo arvensis-Scleranthetum annui*; roślinność: nasypu toru kolejowego, nieużytku	k, n, sn, sr, ss	S_Sis	Am N [N]	T, H	n
Corispermum hyssopifolium	2	*Bromo-Corispermetum leptopteri*	sr	S_Sis	Eur E, Asia	T	(subk)

A	B	C	D	E	F	G	H
Cornus sericea	1	roślinność nieużytku	sr	-	Am N(E, C)	N	nd
Echinocystis lobata	11	*Helianthetum decapetali*, 6430 – *Urtico-Convolvuletum sepium*; roślinność nieużytku	k, n	A_ Con	Am N [E]	T	nd
Elodea canadensis	2	*Elodeetum canadensis*	k	P	Am N	H	(suboz)
Epilobium ciliatum	23	roślinność: nasypu toru kolejowego, nieużytku	sr	S	Am N [N]	H	n
Eragrostis minor	10	*Polygonetum calcati*; roślinność: nasypu toru kolejowego, nieużytku	sr	S	Eur SE, Asia W	T	(suboz)
Erigeron annuus	170	*Armerio elongatae-Festucetum ovinae*, *Artemisio vulgaris-Tanacetetum*, *Calamagrostietum epigeji*, *Convolvulo arvensis-Agropyretum repentis*, *Dauco-Picridetum hieracioidis*, *Hyoscyamo-Conietum maculati*, *Rubo plicati-Sarothamnetum*, *Setario-Lycopsietum arvensis*; roślinność: łąki, nieużytku, odłogu, pobocza drogi gruntowej, ugoru	n, sn, sr, ss	A	Am N [N]	H, T	n
Galeopsis angustifolia	2	roślinność: nasypu toru kolejowego, segetalna z uprawie łubinu	ss, sr	-	Eur W	T	suboz
Galinsoga ciliata	45	*Echinochloo-Setarietum pumilae*, *Euphorbio peplidis-Galinsogetum ciliatae*, *Lamio amplexicaulis-Veronicetum politae*, *Spergulo-Echinochloetum cruris-galli*; roślinność: nieużytku, pobocza drogi gruntowej, przydomowego ogrodu	sr, ss	S_ Pap	Am C, S	T	oz
Galinsoga parviflora	123	*Echinochloo-Setarietum pumilae*, *Euphorbio peplidis-Galinsogetum ciliatae*, *Prunello vulgaris-Plantaginetum brachystachyae*, *Setario-Lycopsietum arvensis*, *Spergulo-Echinochloetum cruris-galli*, *Spergulo arvensis-Scleranthetum annui*; roślinność: na nasypie toru kolejowego, pobocza drogi gruntowej, odłogu, ugoru, przydomowego ogrodu	sn, sr, ss	S_Ap	Am C, S	T	(oz)
Helianthus tuberosus	23	*Helianthetum decapetali*; roślinność: nieużytku, odłogu	k, sr	A_ Con	Am N	G	n
Heracleum sosnowskyi	2	okazjonalnie koszona roślinność skarpy nad nasypem toru kolejowego	sn	A_ Con	Azja (Kaukaz i tereny przyległe)	H	nd

A	B	C	D	E	F	G	H
Hesperis matronalis	1	*Agropyro repentis-Aegopodietum podagrariae*	n	A_ Con	Eur S	H	subk
Impatiens glandulifera	1	*Impatienti glanduliferae-Convolvuletum sepium*	k	A_ Con	Asia C	T	oz
Impatiens parviflora	75	*Agrostio-Populetum tremulae, Euonymo-Coryletum, Impatientetum parviflorae*, 9130 – *Melico uniflorae-Fagetum, Prunello vulgaris-Plantaginetum brachystachyae, Stachyo sylvaticae-Impatientetum noli-tangere*, 9160 – *Stellario holosteae-Carpinetum betuli, Trifolio-Melampyretum nemorosi*; roślinność: nasypu toru kolejowego, pobocza śródleśnej drogi gruntowej	k, n, sr	A_ Con	Asia C, E	T	(oz)
Iva xanthiifolia	6	*Ivaetum xanthiifoliae*; roślinność składowiska: ziemi, kredy jeziornej	k, sr	S_Sis	Am N	T	nd
Juglans regia	12	roślinność: drzewostanu, łąkowa po zlikwidowanym sadzie w darni	n, sn	-	Asia SW, C, E	M	suboz
Juncus tenuis	21	*Juncetum macri*; roślinność drogi gruntowej	k, sr	MA_ TP	Am N	H	(oz)
Lupinus polyphyllus	32	6510 – *Arrhenatheretum elatioris, Rubo plicati-Sarothamnetum, Rudbeckio-Solidaginetum*; roślinność: skarpy przydrożnej, pobocza trakcji kolejowej, odłogu	n, sn, sr	-	Am N [W]	H	suboz
Lycium barbarum	2	*Lycietum halimifolii*	sr	A_ Ono	Eur SE, Asia E	N	(suboz)
Medicago sativa	2	roślinność odłogu	sr	-	Asia SW	H	subk
Oxalis corniculata	2	*Poo annuae-Oxalidetum corniculatae*	sr	PP	Eur S, Asia SW, Afr, Austr	T, H	(oz)
Oxalis fontana	39	*Prunello vulgaris-Plantaginetum brachystachyae*; roślinność: segetalna gruntu ornego, nieużytku, odłogu, pobocza drogi gruntowej	sn, sr, ss	S_ Pap	Am N	G	(oz)
Padus serotina	34	*Calamagrostietum epigeji*; roślinność nieużytku	n, sr	-	Am N [E], Am C [N]	N, M	(oz)

A	B	C	D	E	F	G	H
Parthenocissus inserta	3	roślinność: nasypu toru kolejowego, nieużytku	sr	-	Am N [SW, C, NE]	H, li	n
Portulaca oleracea	1	*Polygonetum calcati*	sr	S	Asia S, Afr S	T	(oz)
Quercus rubra	24	9160 – *Stellario holosteae-Carpinetum betuli*, 9190 – *Calamagrostio arundinaceae-Quercetum petraeae*; roślinność drzewostanu	n	-	Am N	M	(oz)
Reynoutria japonica	5	*Agropyro repentis-Aegopodietum podagrariae*, *Convolvulo sepium-Reynoutrietum japonicae*, *Euonymo-Coryletum*, *Vicietum tetraspermae*	k, n, ss	A_ Con	Asia E	G	oz
Rhus typhina	8	roślinność nieużytku	sr	-	Am N (C, E)	N	(oz)
Ribes rubrum	6	roślinność nieużytku	sr	-	Eur (SW)	N	euoz
Robinia pseudoacacia	11	*Chelidonio-Robinietum*; roślinność drzewostanu	sr	-	Am N [E]	M	suboz
Robinia viscosa	1	roślinność przypłocia	sr	-	Am N [E]	M	nd
Rosa rugosa	10	roślinność: zrekultywowanego terenu po kopalni kruszywa, nieużytku	sr	-	Asia E	N	oz
Rudbeckia laciniata	4	roślinność nieużytku	sr	A_ Con	Am N [E]	H	(suboz)
Solidago canadensis	159	*Agrostio-Populetum tremulae*, *Artemisio vulgaris-Tanacetetum*, *Calamagrostietum epigeji*, *Convovulo arvensis-Agropyretum repentis*, *Rudbeckio-Solidaginetum*; roślinność: nieużytku, odłogu, pobocza drogi gruntowej	n, k, sr	A_ Con	Am N [E]	G, H	(subk)
Solidago gigantea	2	*Phragmitetum communis*, 6430 – *Urtico-Convolvuletum sepium*	n	A_ Con	Am N	G, H	(subk)
Sorbaria sorbifolia	3	roślinność nieużytku	k	-	Asia N, E	N	(k)
Spiraea alba; S. xpseudosalicifolia, *Spiraea* sp. div.	23	6410 – *Selino carvifoliae-Molinietum caeruleae*, *Aegopodio-Sambucetum nigrae*; roślinność nieużytku	n, sn, sr	-	Am N [E]; antr.	N	nd

A	B	C	D	E	F	G	H
Symphoricarpos albus	27	roślinność nieużytku	sr	-	Am N [W]	N	(suboz)
Syringa vulgaris	38	roślinność nieużytku	sr	-	Eur SE	N	suboz
Trifolium resupinatum	3	*Lamio amplexicaulis-Veronicetum politae*; roślinność nieużytku	sr, ss	-	Eur C, S; Asia SW	T	(oz)
Veronica persica	4	*Veronico agrestis-Fumarietum officinalis*	ss	S_Pap	Asia SW	T	(oz)

A – wg Mirka i in. (2020); B – liczba kwadratów N-MGRS; C – zespół (wg Brzega i Wojterskiej 2001 oraz Matuszkiewicza 2022) i/lub siedlisko, gdy nie określono rangi fitosocjologicznej; D – syngeneza zbiorowiska: n – naturalne, sn – antropogeniczne seminaturalne, ss – synantropijne segetalne, sr – synantropijne ruderalne, k – ksenospontaniczne (wg systemu Falińskiego 1969); E – klasa i/lub rząd, w którym IGO jest gatunkiem charakterystycznym: A – *Artemisietea*, Ap – *Aperetalia*, B – *Bidentetea*, Con – *Convolvuletalia*, MA – *Molinio-Arrhenatheretea*, Ono – *Onopordetalia*, P – *Potametea*, Pap – *Papaveretalia*, Ph – *Phragmitetea*, PP – *Polygono-Poetea*, S – *Stellarietea mediae*, Sis – *Sisymbrietalia*, TP – *Trifolio-Plantaginetalia*; F – pochodzenie geograficzne (za Tokarską-Guzik i in. 2012); G – forma życiowa Raunkiaera (za Zarzyckim i in. 2001); H – kontynentalizm/oceanizm (dane Vent i Schubert 1976): eu – eukontynentalny, k – kontynentalny, nd – brak danych, oz – oceaniczny, subk – subkontynentalny, suboz – suboceaniczny

Adam Olszewski, Anna Andrzejewska, Agnieszka Gutkowska

Kampinoski Park Narodowy, aolszewski@kampinoski-pn.gov.pl,
AO https://orcid.org/0000-0002-1635-4562, AA https://orcid.org/0000-0001-8205-0092,
AG https://orcid.org/0000-0003-3291-1215

Wpływ warunków pogodowych na defoliację sosny zwyczajnej i olszy czarnej w zlewni badawczej Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego Kampinos (Kampinoski Park Narodowy)

The influence of climatic conditions on the defoliation of Scots pine and black alder in the Integrated Monitoring of the Natural Environment catchment in Kampinos (Kampinoski National Park)

Zarys treści: W latach 2010–2022 na obszarze zlewni badawczej ZMŚP Kampinos, na trzech powierzchniach badawczych usytuowanych w borze świeżym, borze mieszanym świeżym i w olsie oceniano defoliację drzew. W przypadku powierzchni borowych gatunkiem monitorowanym była sosna zwyczajna *Pinus silvestris* L., a w olsie – olsza czarna *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn. Wyniki oceny defoliacji skonfrontowano z parametrami meteorologicznymi panującymi w okresie półtora roku przed pomiarami defoliacji: temperatura powietrza, opady atmosferyczne, usłonecznienie i wilgotność względna. Najbardziej istotne zależności dla wszystkich powierzchni uzyskano w przypadku sum opadów latem roku poprzedzającego ocenę defoliacji, oraz na powierzchniach borowych dla temperatury i usłonecznienia w okresie XI–XII.

Słowa kluczowe: defoliacja, sosna, olsza, pogoda, Stacja Bazowa ZMŚP „Kampinos", Puszcza Kampinoska

Abstract: In the 2010–2022 period, tree defoliation was assessed in three study plots located in the mesic coniferous, mesic mixed coniferous and alder forest in the Integrated Monitoring Station Kampinos study catchment area. In the case of the mesic coniferous forest and mesic mixed coniferous forest, the monitored species was Scots pine *Pinus silvestris*, and in the alder forest – black alder *Alnus glutinosa*. The results of the defoliation assessment were compared with meteorological parameters: air temperature, precipitation, sunshine, relative humidity prevailing in the period of one and a half years before the defoliation observations. The most significant correlations for all plots were obtained for

precipitation totals in the summer of the year preceding the defoliation assessment, and in the coniferous plots for temperature and sunshine in the period XI–XII.

Keywords: defoliation, scots pine, black alder, weather, Integrated Monitoring Station Kampinos, Kampinos Forest

Wprowadzenie

Ocena defoliacji drzew jest częścią oceny zdrowotności drzewostanów, powszechnie stosowaną w programach monitoringu środowiska prowadzonych zarówno w Polsce, jak i za granicą (Beker 1993, Jaszczak 1995, Sierota 1995). Badania defoliacji na dużej próbie 750 drzew w drzewostanach sosnowych nadleśnictwa Wyszków przeprowadził Wójcik (2000). Oceniał on zarówno zależność ubytku aparatu asymilacyjnego od przeciętnej pierśnicy, klasy Krafta, wieku, typu siedliskowego lasu (TSL), jak i warunków meteorologicznych.

Wpływ warunków meteorologicznych na stan zdrowotny drzew był najczęściej oceniany poprzez analizę szerokości słojów drzew z odwiertów przy zastosowaniu porównań z archiwalnymi danymi meteorologicznymi. W ten sposób można objąć badaniami dłuższe okresy (Bronisz i in. 2010). Przyjmuje się, że tempo wzrostu drzew i przyrost pierśnicy zależą od stanu aparatu asymilacyjnego (Wójcik 2000, Beker i in. 2020), choć w dojrzałych drzewostanach sosnowych Kampinoskiego Parku Narodowego takiego związku nie stwierdzili Przybylski i in. (2020). Dlatego prawdopodobnie warunki pogodowe wpływają w podobny sposób zarówno na rozwój aparatu asymilacyjnego, jak i na przyrosty pierśnicy i wzrost pędów. Gatunkami, którymi najczęściej zajmowali się badacze pod kątem zależności ich przyrostu od warunków pogodowych, są: sosna zwyczajna (Feliksik, Wójcik 1998, Feliksik i in. 2000, Feliksik, Wilczyński 2009, Opała 2009, Cedro, Cedro 2018), świerk pospolity (Feliksik, Wójcik 1998, Feliksik, Wilczyński 2009, Durło i in. 2015), jodła pospolita (Feliksik i in. 2000, Feliksik, Wilczyński 2009, Opała 2009, Bronisz i in. 2010, Wilczyński, Wertz 2012), modrzew europejski (Feliksik, Wójcik 1998, Wilczyński, Wertz 2012). Mniej prac dotyczy gatunków liściastych: buk (Feliksik i in. 2000, Opała 2009), różne gatunki dębów (Cedro 2007), jarząb brekinia (Cedro 2016). Ocenę zmian kondycji drzew poprzez analizę zależności wielkości przyrostów rocznych w 24-letnim drzewostanie sosnowym od warunków pogodowych przeprowadziły Kaźmierczak i Zawieja (2011).

Wielkość defoliacji, zwłaszcza drzew iglastych, jest zależna nie tylko od warunków pogodowych, ale i od zanieczyszczeń powietrza. Wpływ zanieczyszczeń powietrza na defoliację drzew miejskich badali m.in. Jóźwiak i Jóźwiak (2014) oraz Cedro i Cedro (2018).

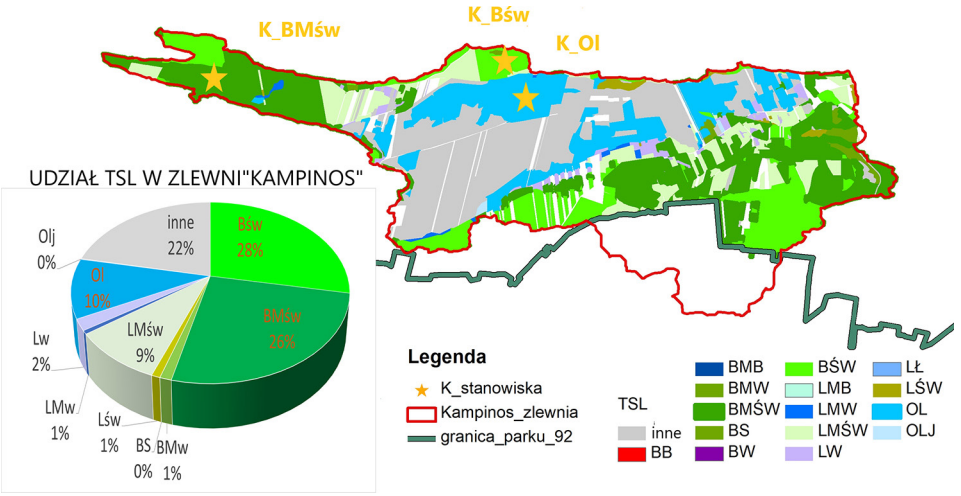
W latach 2015–2019 na terenie Puszczy Kampinoskiej wykonywano ocenę defoliacji w dojrzałych drzewostanach sosnowych m.in. w pobliżu zlewni Kampinos (Tyburski, Przybylski 2016, 2018, Przybylski i in. 2020). W okresie tym zanotowano istotny wzrost defoliacji, który został powiązany z suszami występującymi w latach bezpośrednio poprzedzających realizację prac badawczych (Przybylski i in. 2020).

Teren badań

Zlewnia doświadczalna Stacji Bazowej ZMŚP Kampinos położona jest w południowo-zachodniej części Puszczy Kampinoskiej, w większości na terenie Kampinoskiego Parku Narodowego. Stacja znajduje się w odległości około 30 km na zachód od Warszawy. Pod względem fizycznogeograficznym usytuowana jest na Nizinie Środkowomazowieckiej w pradolinie Wisły. Niemal w całości wchodzi w skład mezoregionu Kotlina Warszawska, a jej południowy skraj znajduje się na Równinie Łowicko-Błońskiej (Kondracki 2009, Solon i in. 2018). Według klasyfikacji przyrodniczo-leśnej zlokalizowana jest w mezoregionie Puszczy Kampinoskiej (IV.8), w obrębie Krainy Mazowiecko-Podlaskiej (Zielony, Kliczkowska 2012).

Zlewnia Kampinos położona jest w dorzeczu Łasicy (zlewnia III rzędu) – prawego dopływu Bzury. Obejmuje górną część zlewni Kanału Olszowieckiego Północnego (zlewnia IV rzędu). Powierzchnia zlewni badawczej Kampinos po profil wodowskazowy w Józefowie wynosi 21,003 km^2, z czego 8,199 km^2 (39%) stanowią obszary bezodpływowe. Kampinoska zlewnia doświadczalna zajmuje szerokie, zabagnione obniżenie wypełnione utworami organicznymi, które rozcina Kanał Olszowiecki Północny. Jest ono ograniczone od północy zwartym pasem wydm, natomiast od zachodu niższymi, pojedynczymi wydmami, oddzielonymi licznymi zagłębieniami deflacyjnymi. Od południa i od wschodu zlewnię ogranicza Równina Łowicko-Błońska.

Powierzchnia zlewni doświadczalnej pokryta jest lasami w 76,1% (1598 ha), dodatkowo 11,9% (250 ha) stanowią zadrzewienia i samosiewy (Zięba 2020). Udział typów siedliskowych lasu na terenie zlewni określono na podstawie



Ryc. 1. Udział i rozmieszczenie siedliskowych typów lasu oraz usytuowanie powierzchni monitoringu uszkodzenia drzew i drzewostanów w zlewni ZMŚP Kampinos

Fig. 1. Proportion and distribution of habitat type of forest and in the location of trees and treestands damage monitoring plots Integrated Monitoring Kampinos catchment

inwentaryzacji przyrodniczo-leśnej wykonanej w ramach urządzania lasu (BULiGL 2002). Wśród nich dominowały bory świeże (Bśw) – 28% powierzchni zlewni (porastały szczytowe partie wydm) i bory mieszane świeże (BMśw) – 26% (znajdowały się głównie w zagłębieniach międzywydmowych). Istotny udział miały też olsy (Ol) – 10%, które występują w obniżeniu bagiennym. Nieco mniejszy udział odnotowano w przypadku lasów mieszanych świeżych (9%), które jednak występują w niewielkich płatach rozproszonych w całej zlewni, w mozaice z terenami nieleśnymi, częściowo użytkowanymi rolniczo (ryc. 1).

Metoda

Ocenę defoliacji i odbarwienia aparatu asymilacyjnego wykonywano w latach 2010–2022 zgodnie z metodyką Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego (Zajączkowski 2021). Celem obserwacji było uzyskanie wskaźnikowych informacji o zmianach zdrowotności drzewostanów i o ewentualnej potrzebie wykonania kartowania na całym monitorowanym obszarze. Raz w roku, w lipcu, oddzielnie dla każdego drzewa notowane były defoliacja i odbarwienia oraz inne uszkodzenia drzew. Ubytek aparatu asymilacyjnego ustalano na podstawie obserwacji i porównania z wzornikiem. Przez cały okres badań oceny defoliacji dokonywała ta sama osoba, dzięki czemu wyniki uzyskane w poszczególnych latach były porównywalne.

Monitoring prowadzony był na trzech powierzchniach założonych w obrębie trzech typów siedliskowych lasu, które zajmują największą powierzchnię zlewni. Na każdej powierzchni wybrano po 20 drzew dominującego gatunku. Do monitoringu wybrano drzewa górujące i panujące, które zostały oznakowane na stałe w sposób nieuszkadzający pni. Powierzchnia w borze świeżym (Bśw; N52°17’50.269”, E20°30’18.563”) położona była w 60-letnim drzewostanie sosnowym porastającym partie szczytowe wydm. Gatunkiem monitorowanym była sosna zwyczajna. W podszycie występowały pojedyncze dęby bezszypułkowe *Quercus petraea* (Matt.) Liebl. W warstwie runa dominowała borówka brusznica *Vaccinium vitis-idaea*. Powierzchnia w borze mieszanym świeżym (BMśw; N52°17’43.044”, E20°26’43.224”) założona była w zagłębieniu międzywydmowym w 99-letnim drzewostanie sosnowym z domieszką dębu w podszycie. Gatunkiem monitorowanym była sosna zwyczajna. Powierzchnia w olsie (Ol; N52°17’39.84”, E20°31’21.72”) znajdowała się w 51-letnim drzewostanie na północnym skraju południowego pasa bagiennego. Gatunkiem monitorowanym była olsza czarna. W domieszce występowała brzoza omszona *Betula pubescens* Ehrh. W runie dominowały turzyce *Carex spp*.

Warunki pogodowe określono na podstawie danych uzyskanych ze stacji meteorologicznej położonej w miejscowości Granica (N52°17’10’’, E20°27’16’’, 73 m n.p.m.), w pobliżu zlewni badawczej. Pomiary temperatury powietrza, wilgotności względnej powietrza i usłonecznienia prowadzone były automatycznie co godzinę, natomiast pomiary dobowych sum opadów wykonywano manualnie przy użyciu deszczomierza Hellmanna raz na dobę.

Poszukiwano korelacji pomiędzy średnim ubytkiem aparatu asymilacyjnego drzew na każdej z trzech powierzchni a następującymi elementami pogodowymi: średnimi wartościami temperatury powietrza, średnimi z minimalnych i maksymalnych dobowych wartości temperatury powietrza, sumami opadów atmosferycznych, sumami usłonecznienia i średnią wilgotnością względną powietrza. Wpływ każdego z tych elementów na defoliację oceniano w następujących przedziałach czasowych:

- 12 miesięcy poprzedzających ocenę defoliacji (lipiec roku poprzedzającego–czerwiec roku bieżącego);
- 6 miesięcy poprzedzających ocenę defoliacji (styczeń–czerwiec roku bieżącego);
- półrocze zimowe (listopad roku poprzedzającego–kwiecień roku bieżącego);
- półrocze letnie (maj–październik roku poprzedzającego);
- wiosna roku bieżącego (marzec–maj roku bieżącego);
- zima roku bieżącego (grudzień roku poprzedzającego–luty roku bieżącego);
- jesień roku poprzedzającego (wrzesień–listopad roku poprzedzającego);
- lato roku poprzedzającego (czerwiec–sierpień roku poprzedzającego);
- wiosna roku poprzedzającego (marzec–maj roku poprzedzającego);
- wszystkie pary miesięcy poprzedzających ocenę defoliacji począwszy od II–III roku poprzedzającego ocenę do VI–VII, czyli okresu bezpośrednio przed oceną defoliacji.

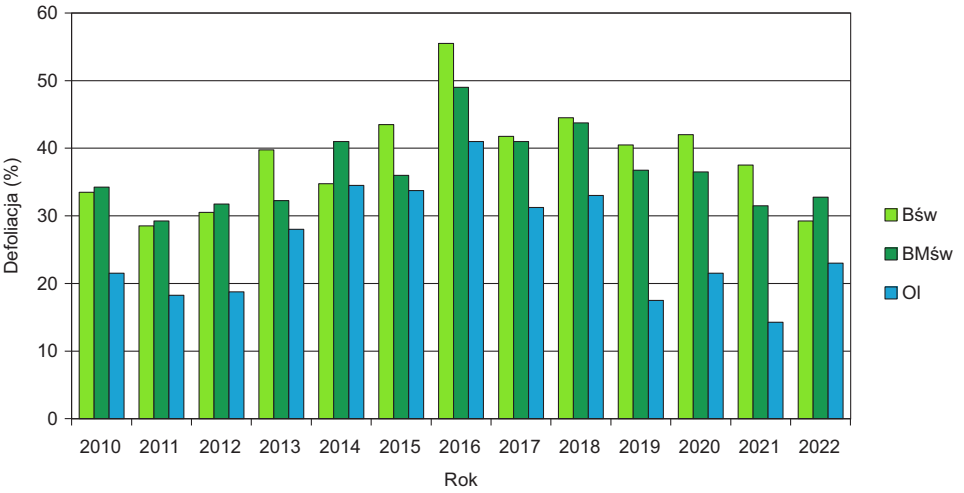
Siłę związku pomiędzy parametrami określono za pomocą współczynnika korelacji liniowej Pearsona. Istotność statystyczną korelacji sprawdzano za pomocą testu t-Studenta na poziomie istotności 0,05 (Liskowski, Tauber 2003).

Wyniki

Średnia defoliacja w wieloleciu na powierzchni w borze świeżym wyniosła 38,6%, w borze mieszanym świeżym – 36,6% i w olsie – 25,9%. Na powierzchniach borowych najniższa defoliacja wystąpiła w 2011 r., a w olsie w 2021 r. Najwyższą defoliację na wszystkich trzech powierzchniach zanotowano w 2016 r. (ryc. 2).

Korelacje stanu defoliacji oraz danych meteorologicznych uśrednionych dla całego roku poprzedzającego ocenę (od lipca roku poprzedzającego do czerwca roku bieżącego) były istotne statystycznie tylko dla powierzchni borowych. Wielkość defoliacji okazała się zależna od średniej temperatury powietrza (współczynnik r dla boru świeżego wyniósł 0,617, a dla boru mieszanego świeżego 0,599), średniej z minimalnych dobowych wartości temperatury (odpowiednio 0,655 i 0,597), a także w przypadku boru świeżego – od opadów (–0,613). Oznacza to, że u sosen wyższe wartości temperatury średniej i średniej z minimalnych dobowych powodowały wyższą defoliację, natomiast wyższe opady poprawiały kondycję sosen rosnących na siedlisku świeżym.

W półroczu I–VI, bezpośrednio poprzedzającym ocenę defoliacji, wpływ żadnego z parametrów pogodowych nie był istotny statystycznie. W okresie XI–IV, półrocze zimowe poprzedzające ocenę defoliacji, istotne statystycznie były



Ryc. 2. Roczna defoliacja na powierzchniach w Bśw, BMśw i Ol
Fig. 2. Yearly defoliation on the plots with mesic coniferous, mesic mixed coniferous and alder forest

korelacje z wartościami temperatury średniej z minimalnych dobowych dla boru mieszanego świeżego (0,656) i boru świeżego (0,611) oraz z wartościami temperatury średniej w przypadku boru mieszanego świeżego (0,565). W półroczu letnim (V–X), roku poprzedzającego ocenę defoliacji, istotna statystycznie była jedynie zależność defoliacji od opadów w borze świeżym (–0,563). Wyższe opady w półroczu letnim roku poprzedzającego ocenę defoliacji wiązały się z niższą defoliacją w roku następnym.

Analiza zależności defoliacji od elementów pogodowych występujących w poszczególnych sezonach wykazała, że największy wpływ na defoliację mają warunki pogodowe panujące latem poprzedniego roku, istotne również są temperatura i usłonecznienie zimą. Jedynie w przypadku olsu ważne okazały się wartości temperatury minimalnej występujące latem tuż przed obserwacjami defoliacji (–0,628). W przypadku zimy istotna statystycznie była zależność od sum usłonecznienia dla boru mieszanego świeżego (0,729) oraz słabsza dla boru świeżego (0,576). Współczynniki te pokazują, że im większe usłonecznienie zimą, tym większa defoliacja następnego lata. W borze świeżym istotne również były średnie wartości temperatury minimalnej dobowej (0,561), im wyższa, tym wyższa defoliacja. Pogoda latem poprzedniego roku okazała się istotna ze względu na wysokość opadów na wszystkich trzech powierzchniach: najsilniejsza dla boru świeżego (–0,808), słabsza dla boru mieszanego świeżego (–0,695) i olsu (–0,596), a więc im wyższe opady latem poprzedniego roku, tym lepsza kondycja drzew (niższa defoliacja) w roku następnym. Wraz z opadami zwiększa się wilgotność względna powietrza, od wysokości której korelacja była istotna statystycznie dla boru świeżego (–0,757) oraz boru mieszanego świeżego (–0,624). Ponadto w borze mieszanym świeżym i w olsie istotna statystycznie okazała się korelacja pomiędzy defoliacją i wartościami temperatury średniej z minimalnych dobowych:

ols (–0,687), bór mieszany świeży (–0,633), czyli wyższe wartości dobowej temperatury minimalnej latem poprzedniego roku sprzyjały lepszej kondycji drzew w roku kolejnym.

Rozpatrując wpływ elementów pogody występujących w okresach dwumiesięcznych, stwierdzono istotne statystycznie korelacje pomiędzy średnią temperaturą powietrza i defoliacją dla okresu XI–XII roku poprzedzającego ocenę w przypadku boru świeżego (0,668) i boru mieszanego świeżego (0,686), temperaturą średnią z maksymalnych dobowych: bór świeży (0,588) i bór mieszany świeży (0,631) oraz temperaturą średnią z minimalnych dobowych: bór świeży (0,714) i bór mieszany świeży (0,706), co wskazuje na wzrost defoliacji po ciepłym okresie przełomu jesieni i zimy. Ponadto wysoką istotnością charakteryzowały się korelacje pomiędzy defoliacją i temperaturą średnią z minimalnych w okresie VI–VII roku poprzedzającego: bór świeży (–0,712), bór mieszany świeży (–0,738) i ols (–0,700), czyli mniejsze spadki wartości temperatury w czerwcu i lipcu jednego roku skutkowały lepszą kondycją drzew w roku następnym i dotyczyło to zarówno sosen, jak i olsz (tab. 1).

Oprócz temperatury ważne były opady: w lutym i marcu w borze świeżym (0,608) oraz od czerwca do sierpnia poprzedniego roku na wszystkich powierzchniach (Bśw, VIp–VIIp – –0,623, VIIp–VIIIp – –0,756; BMśw, VIp–VIIp – –0,656, VIIp–VIIIp – –0,566; Ol, VIp–VIIp – –0,573, VIIp–VIIIp – –0,577). Ponadto w olsie wystąpiła korelacja z wysokością opadów w marcu i kwietniu poprzedniego roku.

Istotne statystycznie były wartości sumy godzin usłonecznienia zimą poprzedzającą ocenę defoliacji. W przypadku boru świeżego był to okres od listopada poprzedniego roku do stycznia (XI–XII – 0,585, XII–I – 0,680). W przypadku boru mieszanego świeżego okres ten był dłuższy od listopada roku poprzedzającego do lutego roku bieżącego (XI–XII – 0,645, XII–I – 0,769, I–II – 0,680). Na powierzchni z olszą suma godzin usłonecznienia była istotna w okresie XII–I – 0,582). Wartości te oznaczają, że im większe usłonecznienie zimą, tym w następującym po niej lecie defoliacja jest większa. Dodatkowo w olsie istotna statystycznie okazała się korelacja pomiędzy sumą godzin usłonecznienia a defoliacją w okresie III–IV roku poprzedniego. W tym wypadku większe usłonecznienie w miesiącach wiosennych poprzedniego roku skutkował lepszą kondycją drzew w następnym.

Istotny statystycznie wpływ wilgotności względnej powietrza notowano w podobnych okresach jak w przypadku opadów. W borze świeżym był to okres II–III roku bieżącego (0,588), czyli wyższa wilgotność powietrza wczesną wiosną sprzyjała zwiększonej defoliacji oraz okres od czerwca do września roku poprzedniego (VI–VII – –0,709; VII–VIII – –0,733; VIII–IX – –0,640), gdzie wysoka wilgotność względna w jednym roku powodowała mniejszą defoliację w roku kolejnym. W borze mieszanym świeżym wpływ wilgotności względnej powietrza był mniejszy i istotną zależność stwierdzono od lipca do września poprzedniego roku (VII–VIII – –0,605; VIII–IX – –0,558). W przypadku olsu nie stwierdzono zależności defoliacji od wilgotności względnej powietrza.

Podsumowując, najbardziej wrażliwy na warunki pogodowe okazał się drzewostan sosnowy na powierzchni w borze świeżym, nieznacznie mniej w borze mieszanym świeżym. Zdecydowanie lepiej zmienne warunki pogodowe znosił

Tabela 1. Współczynniki korelacji liniowej Pearsona miedzy defoliacją a parametrami meteorologicznymi w Stacji Bazowej ZMŚP Kampinos

p* – miesiące i sezony w roku poprzedzającym ocenę defoliacji; $T_{śr.}$ – temperatura średnia; $T_{śr.max}$ – temperatura średnia z maksymalnych dobowych; $T_{śr.min}$ – temperatura średnia z minimalnych dobowych; P_{sum} – sumy opadów atmosferycznych; Sol_{sum} – sumy usłonecznienia; $H_{śr}$ – średnia wilgotność względna powietrza. Wartości istotne statystycznie na poziomie P≥0,05 wytłuszczono

Table 1. Pearson's linear correlation coefficients between defoliation and meteorological parameters at the Integrated Monitoring Kampinos Base Station

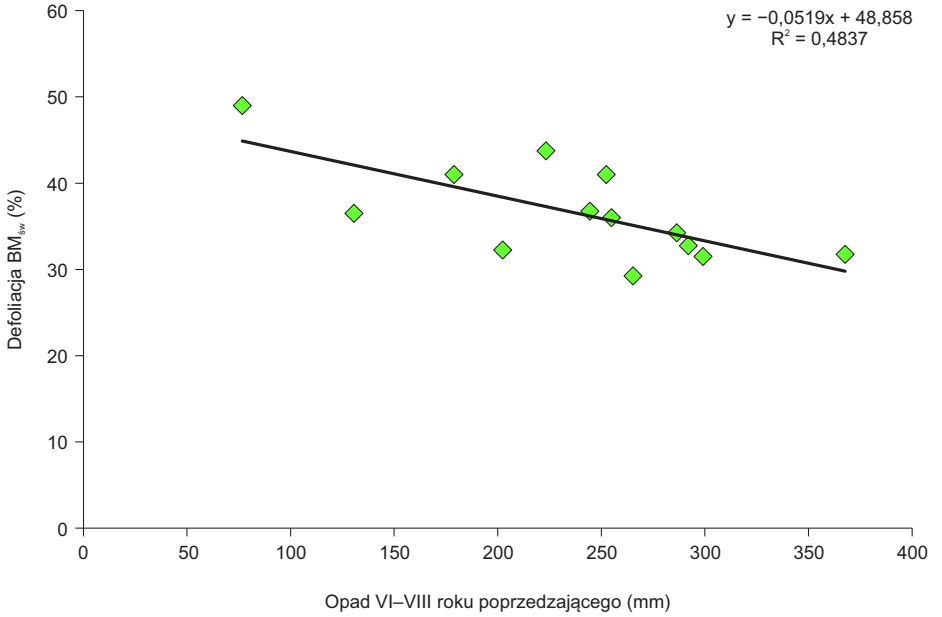
p* – months and seasons in the year preceding the defoliation assessment; $T_{śr}$ – average temperature; $T_{śr.max}$ – average temperature from daily maxima; $T_{śr.min}$ average temperature from daily minima; P_{sum} – precipitation totals; Sol_{sum} – sunshine totals; $H_{śr}$ – average relative humidity of precipitation. Statistically significant values at P≥0.05 are in bold

			Bór świeży (Bśw)						Bór mieszany świeży (BMśw)						Ols (Ol)					
		miesiące	$T_{śr}$	$T_{śr.max}$	$T_{śr.min}$	P_{sum}	Sol_{sum}	$H_{śr}$	$T_{śr}$	$T_{śr.max}$	$T_{śr.min}$	P_{sum}	Sol_{sum}	$H_{śr}$	$T_{śr}$	$T_{śr.max}$	$T_{śr.min}$	P_{sum}	Sol_{sum}	$H_{śr}$
Półrocza	Rok	VII_p–VI*1	**0,617**	0,520	**0,655**	**–0,613**	0,132	–0,234	**0,599**	0,523	**0,597**	–0,511	0,196	–0,236	0,306	0,248	0,347	–0,522	0,252	–0,325
	bieżące	I–VI	0,388	0,275	0,529	–0,024	0,053	0,244	0,476	0,429	0,541	–0,108	0,206	0,170	0,261	0,206	0,369	–0,025	0,200	0,097
	zimowe	XI_p–IV	0,478	0,307	**0,611**	–0,270	0,325	0,320	**0,565**	0,453	**0,656**	–0,203	0,506	0,239	0,347	0,232	0,477	0,139	0,239	0,120
	letnie p.	V_p–X_p	0,415	0,460	0,049	**–0,563**	–0,023	–0,672	0,277	0,263	0,018	–0,385	0,000	–0,537	–0,030	–0,001	–0,177	–0,452	0,195	–0,513
Sezony	lato	VI–VIII	0,174	0,303	–0,370	–0,437	–0,090	–0,236	0,004	0,105	–0,267	–0,339	–0,207	–0,030	–0,208	0,020	**–0,628**	–0,384	0,176	–0,245
	wiosna	III–V	0,139	0,041	0,233	–0,142	–0,199	0,266	0,539	0,442	0,545	–0,222	–0,003	0,255	0,364	0,287	0,386	–0,035	0,120	0,236
	zima	XII_p–II	0,537	0,487	**0,561**	–0,093	**0,576**	0,282	0,496	0,500	0,482	–0,373	**0,729**	0,027	0,329	0,316	0,352	–0,347	0,457	–0,282
	jesień	IX_p–XI_p	0,429	0,183	0,476	0,215	–0,146	–0,049	0,147	–0,145	0,311	0,348	–0,258	–0,093	–0,029	–0,269	0,176	0,141	–0,189	–0,275
	lato p.	VI_p–III_p	0,202	0,460	–0,540	**–0,808**	0,082	**–0,757**	0,102	0,348	**–0,633**	**–0,695**	0,184	**–0,624**	–0,155	0,078	**–0,687**	**–0,596**	0,347	–0,533
	wiosna p.	III_p–V_p	0,397	0,369	0,313	–0,279	–0,050	–0,246	0,017	–0,097	0,191	–0,064	–0,278	0,138	0,007	–0,160	0,262	0,292	–0,249	0,247

		Bór świeży (Bśw)						Bór mieszany świeży (BMśw)						Ols (Ol)					
	miesiące	$T_{śr}$	$T_{śr.\,max}$	$T_{śr.\,min}$	P_{sum}	Sol_{sum}	$H_{śr}$	$T_{śr}$	$T_{śr.\,max}$	$T_{śr.\,min}$	P_{sum}	Sol_{sum}	$H_{śr}$	$T_{śr}$	$T_{śr.\,max}$	$T_{śr.\,min}$	P_{sum}	Sol_{sum}	$H_{śr}$
Pary miesięcy	VI–VII	0,139	0,304	–0,191	–0,383	–0,126	–0,219	–0,007	0,130	–0,185	–0,196	–0,269	–0,126	–0,405	–0,188	**–0,607**	–0,195	0,033	–0,232
	V–VI	0,317	0,409	0,182	–0,009	–0,034	–0,044	0,273	0,409	0,043	–0,127	–0,022	–0,100	0,051	0,201	–0,136	–0,113	0,240	–0,146
	IV–V	0,164	0,180	0,099	–0,361	0,040	0,027	0,422	0,434	0,329	–0,427	0,162	0,046	0,390	0,354	0,358	–0,231	0,235	0,183
	III–IV	0,046	–0,091	0,157	–0,040	–0,237	0,277	0,392	0,250	0,484	0,040	–0,105	0,321	0,146	0,039	0,258	0,370	–0,163	0,350
	II–III	0,310	0,128	0,488	**0,608**	–0,373	**0,588**	0,403	0,280	0,537	0,530	–0,077	0,469	0,253	0,148	0,380	0,406	–0,138	0,272
	I–II	0,318	0,280	0,338	–0,021	0,499	0,363	0,221	0,241	0,211	–0,059	**0,680**	0,062	0,204	0,178	0,254	–0,122	0,356	–0,213
	XII_p–I	0,414	0,423	0,401	–0,477	**0,680**	0,008	0,389	0,432	0,338	**–0,663**	**0,769**	–0,161	0,206	0,243	0,178	–0,455	**0,582**	–0,522
	XI_p–XII_p	**0,668**	**0,588**	**0,714**	–0,208	**0,585**	–0,020	**0,686**	**0,631**	**0,706**	–0,170	**0,645**	–0,117	0,404	0,351	0,439	–0,005	0,426	–0,355
	X_p–XI_p	0,178	0,001	0,320	0,149	–0,043	0,138	0,059	–0,118	0,189	0,279	–0,071	–0,007	–0,001	–0,149	0,118	0,135	–0,061	–0,240
	IX_p–X_p	0,408	0,207	0,461	0,359	–0,319	–0,031	0,187	–0,068	0,332	0,429	–0,456	–0,059	–0,070	–0,215	0,071	0,119	–0,278	–0,228
	$VIII_p$–IX_p	**0,751**	**0,656**	**0,554**	–0,335	0,094	**–0,640**	0,457	0,351	0,360	–0,167	0,026	**–0,558**	0,087	0,055	0,109	–0,169	0,015	–0,447
	VII_p–$VIII_p$	0,390	**0,586**	–0,277	**–0,765**	0,174	**–0,733**	0,217	0,386	–0,385	**–0,656**	0,191	**–0,605**	0,162	0,303	–0,261	**–0,577**	0,335	–0,537
	VI_p–VII_p	–0,267	–0,017	**–0,712**	**–0,623**	–0,108	**–0,709**	–0,275	–0,016	**–0,738**	**–0,566**	0,027	–0,515	–0,327	–0,106	**–0,700**	**–0,573**	0,342	–0,492
	V_p–VI_p	0,008	0,142	–0,210	–0,380	0,008	–0,545	0,116	0,206	–0,033	–0,291	0,159	–0,375	–0,103	–0,076	–0,136	–0,175	0,290	–0,286
	IV_p–V_p	0,068	0,077	0,014	–0,392	–0,038	–0,235	–0,017	–0,111	0,105	–0,207	–0,176	0,124	–0,119	–0,275	0,151	0,149	–0,234	0,302
	III_p–IV_p	0,365	0,301	0,370	0,202	–0,177	–0,099	–0,117	–0,238	0,094	0,373	–0,519	0,269	–0,119	–0,265	0,149	**0,758**	**–0,554**	0,385
	II_p–III_p	0,483	0,483	0,467	0,052	0,011	–0,216	0,254	0,162	0,354	0,168	–0,369	0,099	0,189	0,170	0,215	0,213	–0,185	0,036

drzewostan olszowy. Największe znaczenie dla bieżącej kondycji drzew miała pogoda latem poprzedzającego roku. Istotne statystycznie okazały się korelacje z wysokością opadów i będącą ich skutkiem wilgotnością względną powietrza – im wyższe opady i wilgotność latem poprzedniego roku, tym mniejsza defoliacja w roku bieżącym. W borze świeżym i w olsie istotne w tym okresie były również wartości temperatury minimalnej, które były odwrotnie proporcjonalne do stopnia defoliacji. Dla drzewostanów sosnowych drugim ważnym okresem były miesiące XI–XII roku poprzedzającego ocenę defoliacji. Im wyższa temperatura średnia, średnia z minimalnych, a także usłonecznienie, tym większa defoliacja.

Spośród wszystkich parametrów najwyższy współczynnik Pearsona (0,808) uzyskano dla korelacji pomiędzy defoliacją na powierzchni w borze świeżym a sumą opadów latem roku poprzedzającego obserwacje. Prosta regresji wskazuje, że wzrost sumy opadów o 100 mm w lecie poprzedniego roku powoduje zmniejszenie średniej defoliacji na tej powierzchni o 5,19% (ryc. 3).



Ryc. 3. Zależność średniej defoliacji na powierzchni w borze świeżym od sumy opadów latem roku poprzedzającego obserwację defoliacji

Fig. 3. Dependence of average defoliation on the plot in mesic coniferous on the sum of precipitation in the summer of the year preceding the observation of defoliation

Dyskusja

Ze względu na małą próbę statystyczną – pomiar defoliacji tylko 20 drzew na danej powierzchni, uzyskane wyniki należy traktować jako wskaźnikowe. Jednak długi okres pomiarowy – 13 lat, wykonywanie oceny defoliacji przez cały okres badań przez tę samą osobę oraz fakt, że część uzyskanych wyników, zwłaszcza dla drzewostanów sosnowych, znajduje potwierdzenie w literaturze, umożliwia uznanie ich za wartościowe.

Temperatura

Wójcik (2000) zaobserwował tendencję do wyższej defoliacji u sosny w latach z wyższą temperaturą w zimie. Wynik ten nie był istotny statystycznie prawdopodobnie ze względu na zbyt krótki okres obserwacji. Szereg autorów wskazuje jednak, że ciepłe i krótkie zimy oraz ciepłe przedwiośnie warunkują duże przyrosty grubości sosny w nadchodzącym okresie wegetacyjnym. Ciepły luty i marzec powodują to, że okres wegetacyjny drzew rozpoczyna się wcześniej (Bijak 2013, Łodzińska-Jurkiewicz 2016, Cedro, Cedro 2018). Sosna wraz z końcem zimy i wzrastającą długością dnia traci mrozoodporność i staje się wrażliwa na niską temperaturę. Przemarzanie igieł, gałęzi i pnia powodujące uszkodzenia mrozowe, wysuszanie przez mroźne wiatry czy mechaniczne uszkodzenia przez śnieg przyczyniają się do osłabienia kondycji zdrowotnej drzew oraz zmniejszenia dynamiki przyrostowej w nadchodzącym sezonie wegetacji (Cedro, Cedro 2018). Również Feliksik i in. (2000) stwierdzili pozytywny wpływ wyższej temperatury w zimie i w lecie w roku obserwacji na przyrosty sosny i innych gatunków drzew. W przypadku powierzchni borowych w zlewni ZMŚP Kampinos spostrzeżenie to potwierdziło się tylko częściowo. Istotna statycznie była wyłącznie zależność defoliacji od wartości temperatury minimalnej w okresie lutego i marca i tylko na powierzchni boru świeżego. Brak widocznego wpływu temperatury średniej zimą na defoliację w następującym po niej okresie wegetacyjnym należy wiązać z faktem, że w badanym czasie zimy były łagodne (w porównaniu do okresów wcześniejszych analizowanych w cytowanych pracach) i nie występowały wielkie mrozy, które mogłyby znacząco oddziaływać na zwiększoną defoliację.

W zlewni Kampinos odnotowano silniejszą zależność defoliacji od temperatury powietrza w okresie późnej jesieni roku poprzedzającego. Wyższa temperatura powietrza w tym czasie powoduje zwiększoną defoliację. Podobną zależność odnotowali Cedro i Cedro (2018) w przypadku wzrostu słojów. Stwierdzili, że w roku poprzedzającym okres wegetacji notuje się ujemne wartości współczynników regresji dla temperatury powietrza we wrześniu i październiku. Natomiast Feliksik i in. (2000) wskazali, że w roku poprzedzającym pomiary słoi drewna reakcje przyrostowe były odmienne – sosna preferowała chłody w sierpniu lub wrześniu, natomiast pozytywnie reagowała na wysoką temperaturę w październiku. W zlewni Kampinos wyższa temperatura w sierpniu i wrześniu poprzedniego

roku w borze świeżym powodowała zwiększoną defoliację w roku kolejnym, jednak wyższe wartości dobowej temperatury minimalnej w czerwcu i lipcu roku poprzedzającego pomiary (brak chłodów wczesnym latem) korelowały ze zmniejszoną defoliacją w roku następnym na obu powierzchniach borowych.

Opady

Większość autorów zgadza się, że na kondycję drzew w kolejnym sezonie wegetacyjnym wpływ ma wysokość opadów w lecie poprzedniego roku. Wójcik (2000) stwierdził, że reakcja aparatu asymilacyjnego na zwiększone opady po okresie suszy następuje dopiero w następnym i kolejnych okresach wegetacyjnych. Kaźmierczak i Zawieja (2014) określiły, że opady w trzecim i czwartym kwartale pozytywnie oddziałują na wzrost drzew w następnym roku, ale obfitość opadów od października do grudnia oddziałuje negatywnie. Feliksik i in. (2000) stwierdzili, że wyższe od przeciętnych opady w miesiącach letnich wpływały stymulująco na przyrost sosny, natomiast negatywny wpływ na przyrost miały duże opady we wrześniu. W zlewni Kampinos również zaobserwowano istotną zależność od opadów w lecie roku poprzedzającego ocenę i dotyczyło to nie tylko sosny, ale również olszy. Negatywny wpływ zwiększonych opadów na defoliację wystąpił jedynie w przypadku powierzchni w borze świeżym w lutym i marcu roku prowadzenia oceny defoliacji.

Usłonecznienie

W badaniach dendroklimatycznych usłonecznienie jest rzadko wykorzystywane, chociaż jest to jeden z dominujących czynników warunkujących proces kształtowania się przyrostów rocznych drzew. Szczególnie liczba godzin ze słońcem w maju i czerwcu silnie wpływa na szerokość słoja u jarzębu brekinii. Usłonecznienie jest pochodną zachmurzenia, z którym nierozerwalnie związany jest najważniejszy z hydrometeorów – opad atmosferyczny. Im większe zachmurzenie, tym większe prawdopodobieństwo wystąpienia opadu, a tym samym zmniejsza się usłonecznienie (Cedro 2016).

Najwyższe wartości korelacji i regresji dla usłonecznienia Cedro (2016) uzyskała, (podobnie jak w przypadku temperatury) we wrześniu i w październiku roku ubiegłego oraz w maju i w czerwcu roku bieżącego i były to wartości ujemne. W zlewni Kampinos również uzyskano wyniki wskazujące na negatywny wpływ wysokiego usłonecznienia zimą na kondycję drzew w następującym po niej okresie wegetacyjnym. Wzrost usłonecznienia powodował wzrost defoliacji od grudnia do stycznia w borze świeżym, od grudnia do lutego w borze mieszanym świeżym i w okresie grudzień–styczeń w olsie. Wysokie usłonecznienie zimą oznacza nie tylko brak opadów, ale również niższą wilgotność powietrza i niższą temperaturę. Ponadto w olsie odnotowano wpływ większego usłonecznienia w marcu i kwietniu poprzedniego roku na mniejszą defoliację w roku następnym.

Wilgotność względna

Parametrem zależnym zarówno od opadów, jak i temperatury jest wilgotność względna powietrza. W Puszczy Kampinoskiej, gdzie ogólna suma opadów jest niska (średnia dla wielolecia 2010–2022 z lat hydrologicznych wyniosła 603,2 mm), wilgotność powietrza zwiększa się dzięki obecności bagien i przenoszeniu wilgotnego powietrza znad bagien na wydmy. Zależność defoliacji od wysokości wilgotności względnej okazała się istotna w przypadku sosen na powierzchniach borowych. Większa wilgotność względna powietrza latem poprzedniego roku powodowała spadek defoliacji w roku następnym i zależności te były silniejsze niż w przypadku opadów. Natomiast odwrotną zależność stwierdzono dla lutego i marca bieżącego roku dla boru świeżego.

Wnioski

Na badanych powierzchniach defoliacja drzew była skorelowana z warunkami pogodowymi panującymi w okresie ponad roku przed oceną defoliacji.

Drzewa na wszystkich powierzchniach reagowały na wysokość opadów w okresie letnim poprzedniego roku przed pomiarami. Najsilniejszą zależność zaobserwowano pomiędzy sumą opadów letnich w roku poprzedzającym badania a defoliacją w Bśw – wzrost sumy opadów o 100 mm przyczyniał się do niższej defoliacji o 5,19% w roku następnym. Ponadto wyższe opady w marcu i kwietniu poprzedniego roku sprzyjały mniejszej defoliacji w roku następnym.

Drzewa na powierzchniach w Bśw i BMśw reagowały na średnią temperaturę panującą w ostatnich 12 miesiącach przed pomiarem defoliacji. Ponadto wyższa temperatura późną jesienią powodowała zwiększenie defoliacji w kolejnym roku. Jednocześnie wyższe wartości dobowej temperatury minimalnej, a więc brak chłodów w lecie poprzedniego roku, sprzyjały mniejszej defoliacji w roku następnym.

Wystąpiły również istotne statystycznie zależności pomiędzy defoliacją a usłonecznieniem i wilgotnością względną powietrza. Wysokie usłonecznienie zimą powodowało wzrost defoliacji w następującym po niej okresie wegetacyjnym na wszystkich powierzchniach, natomiast w olsie wyższe usłonecznienie wczesną wiosną poprzedniego roku powodowało mniejszą defoliację w kolejnym roku. Związek wilgotności względnej powietrza z defoliacją był podobny do związku z opadami atmosferycznymi.

Mimo małej liczby drzew ocenianych w poszczególnych typach drzewostanu uzyskane wyniki pokazują reakcje drzew na zmienne warunki pogodowe i potrzebę kontynuacji badań.

Literatura

Beker C., 1993. Ocena defoliacji drzew jako podstawowe kryterium klasyfikacji stanu zdrowotnego lasu. Pr. Inst. Bad. Leśn., ser. B, 18: 89–94.

Beker C., Turski M., Kaźmierczak K., Najgrakowski T., 2020. Wielkość i wydajność aparatu asymilacyjnego sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.). Sylwan, 164(1): 3–9.
Bijak S., 2013. Climate signal in the radial growth of selected coniferous species from the Forest Experimental Station in Rogów. Leśne Prace Badawcze (Forest Research Papers), June 2013, 74(2): 101–110.
Bronisz A., Bijak S., Bronisz K., 2010. Dendroklimatologiczna charakterystyka jodły pospolitej (*Abies alba* Mill.) na terenie Gór Świętokrzyskich. Sylwan, 154(7): 463–470.
BULiGL, 2002. Plan Ochrony Ekosystemów Leśnych KPN na okres 1 I 2002 do 31 XII 2021, Warszawa.
Cedro A., 2007. Tree-ring chronologies of Downy oak (*Quercus pubescens*), Pedunculateoak (*Q. robur*) and Sessile oak (*Q. petrea*) in The Bielinek Nature Reserve: comparision of the climatic determinants of tree-ring width. Geochronometria, 26: 39–40.
Cedro A., 2016. Wpływ warunków klimatycznych na szerokość przyrostu rocznego jarzębu brekinii (*Sorbus torminalis* L.) w Wielkopolsce. Leśne Prace Badawcze, 77(2): 117–123.
Cedro A., Cedro B., 2018. Wpływ warunków klimatycznych i zanieczyszczenia powietrza na reakcję przyrostową sosny zwyczajnej (*Pinus silvestris* L.) rosnącej w Lasach Miejskich Szczecina. Leśne Prace Badawcze, 79(2): 105–112.
Durło G.B., Małek S., Socha J., 2015. Extreme precipitation events in the Forest Promotion Complex of Silesian Beskid. Folia Forestalia Polonica, series A, 57(1): 18–27.
Feliksik E., Wilczyński S., 2009. The effect of climate on tree-ring chronologies of native and nonnative tree species growing under homogenous site conditions. Geochronometria, 33: 49–57.
Feliksik E., Wilczyński S., Podlaski R., 2000. Wpływ warunków termiczno-pluwialnych na wielkość przyrostów radialnych sosny (*Pinus sylvestris* L.), jodły (*Abies alba* Mill.) i buka (*Fagus sylvatica* L.) ze Świętokrzyskiego Parku Narodowego. Sylwan, 144(9): 53–64.
Feliksik E., Wójcik R., 1998. Wpływ temperatury i opadów na przyrost roczny drewna świerka, sosny i modrzewia występujących w leśnictwie Pierścień u podnóża Pogórza Wilamowickiego. Problemy Zagospodarowania Ziem Górskich, 44: 77–85.
Kondracki J., 2009. Geografia regionalna Polski. Wyd. III. PWN S.A.
Jaszczak R., 1995. Zmiana stanu zdrowotnego drzewostanów sosnowych pod wpływem średnich skażeń z uprzemysłowionej aglomeracji miejskiej. Sylwan, 8: 43–49.
Jóźwiak M.A., Jóźwiak M., 2014. Możliwości oceny stanu powietrza atmosferycznego na podstawie defoliacji w miastach na przykładzie Kielc (The ability to assess the state of airpollution in cities on the basis of defoliation as the example of Kielce). Monitoring Środowiska Przyrodniczego, 16: 21–27.
Kaźmierczak K., Zawieja B., 2011. Dependence of Height increment on the precipitation and temperature conditions in a 24-year pine stand. Colloquium Biometricum, 41: 229–240.
Kaźmierczak K., Zawieja B., 2014. The influence of weather conditions on annual height increments of Scots pine. Biometrical Letters, 5, 2: 143–152.
Liskowski M., Tauber R.D., 2003. Podstawy statystyki praktycznej. Wyższa Szkoła Hotelarstwa i Gastronomii, Poznań.
Łodzińska-Jurkiewicz O., 2016. Studia i Materiały CEPL w Rogowie, R. 18, 48/3: 56–62.
Opała M., 2009. Wpływ warunków klimatycznych na kształtowanie się szerokości przyrostu rocznego *Fagus sylvatica*, *Pinus sylvestris* i *Abies alba* z Ojcowskiego Parku Narodowego. Prądnik. Prace Muz. Szafera, 19: 219–230.

Przybylski P., Tyburski Ł., Mohytych V., 2020. The relationship between height and diameter trees of Scots pine (*Pinus silvestris* L.) and the extent of crown defoliation in the Kampinos National Park. Folia Forestalia Polonica, A, 62(1): 22–30.

Sierota Z., 1995. Przerzedzenie koron drzew jako efekt stresu i źródło stresu. Sylwan, 8: 5–24.

Solon J., Borzyszkowski J., Bidłasik M., Richling A., Badora K., Balon J., Brzezińska-Wójcik T., Chabudziński Ł., Dobrowolski R., Grzegorczyk I., Jodłowski M., Kistowski M., Kot R., Krąż P., Lechnio J., Macias A., Majchrowska A., Malinowska E., Migoń P., Myga-Piątek U., Nita J., Papińska E., Rodzik J., Strzyż M., Terpiłowski S., Ziaja W., 2018. Physico-geographical mesoregions of Poland: Verification and adjustment of boundaries on the basis of contemporary spatial data. Geographia Polonica, 91, 2: 143–170.

Tyburski Ł., Przybylski P., 2018. Evaluation of the loss of the assimilation apparatus and its causes in Scots pine stands (*Pinus sylvestris* L.) of the Kampinos National Park. Folia Forestalia Polonica, A, 60(3): 173–182.

Wilczyński S., Wertz B., 2012. Sygnał klimatyczny w seriach przyrostów radialnych jodły pospolitej oraz modrzewia europejskiego. Studia i Materiały CEPL w Rogowie, R. 14, 1(30): 66–74.

Wójcik R., 2000. Analiza zmian ilościowych aparatu asymilacyjnego w drzewostanach sosnowych Nadleśnictwa Wyszków. Sylwan, 8: 39–46.

Zajączkowski G., 2021. Uszkodzenia drzew i drzewostanów. Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Organizacja, system pomiarowy, metody badań. Wytyczne do realizacji. Inspekcja Ochrony Środowiska, Biblioteka Monitoringu Środowiska: 303–305.

Zielony R., Kliczkowska A., 2012. Regionalizacja przyrodniczo-leśna Polski 2010. Centrum Informacyjne Lasów Państwowych, Warszawa.

Zięba M., 2020. Zmiany pokrycia terenu i użytkowanie ziemi. [W:] A. Olszewski, A. Wierzbicki, Raport z realizacji programu badawczo-pomiarowego ZMŚP w Stacji Bazowej Kampinos w 2019 roku. Maszynopis: 173–181.

Maciej Major[1,2], Maria Chudzińska[2], Mikołaj Majewski[1,2]

[1]Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu,
maciej.major@amu.edu.pl
[2]Stacja Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego Poznań-Morasko,
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu
MM https://orcid.org/0000-0002-5424-919X, MC https://orcid.org/0000-0001-6280-2226,
MM https://orcid.org/0000-0003-0864-9720

Obieg materii rozpuszczonej w zlewni Różanego Strumienia w Poznaniu w roku hydrologicznym 2021

Cycling of dissolved matter in the Różany Strumień catchment in Poznań in the 2021 hydrological year

Zarys treści: Zlewnia Różanego Strumienia zlokalizowana jest w północnej części Poznania i stanowi przedmiot badań Stacji ZMŚP Poznań-Morasko. Rok hydrologiczny 2021 był szóstym rokiem pomiarowym w ramach programu ZMŚP na analizowanym terenie. Na wymienionym obszarze badania prowadzono w oparciu o stacjonarne powierzchnie testowe w ramach 12 programów pomiarowych ZMŚP, a wyniki kilku z nich przedstawiono w poniższym opracowaniu. W pracy scharakteryzowano obieg materii rozpuszczonej na podstawie analizy panujących warunków termiczno-opadowych, rozpoznania składu chemicznego opadów atmosferycznych, zestawienia stanów i przepływów wód w Różanym Strumieniu oraz analizy właściwości fizykochemicznych wód podziemnych. Uzyskane rezultaty w 2021 r. odniesiono do okresu 2016–2020, czyli do początku realizacji badań. Obieg materii rozpuszczonej w zlewni Różanego Strumienia w 2021 r. uzależniony był przede wszystkim od panujących warunków hydrometeorologicznych.

Słowa kluczowe: obieg materii rozpuszczonej, zlewnia Różanego Strumienia, skład chemiczny, wody powierzchniowe, wody podziemne

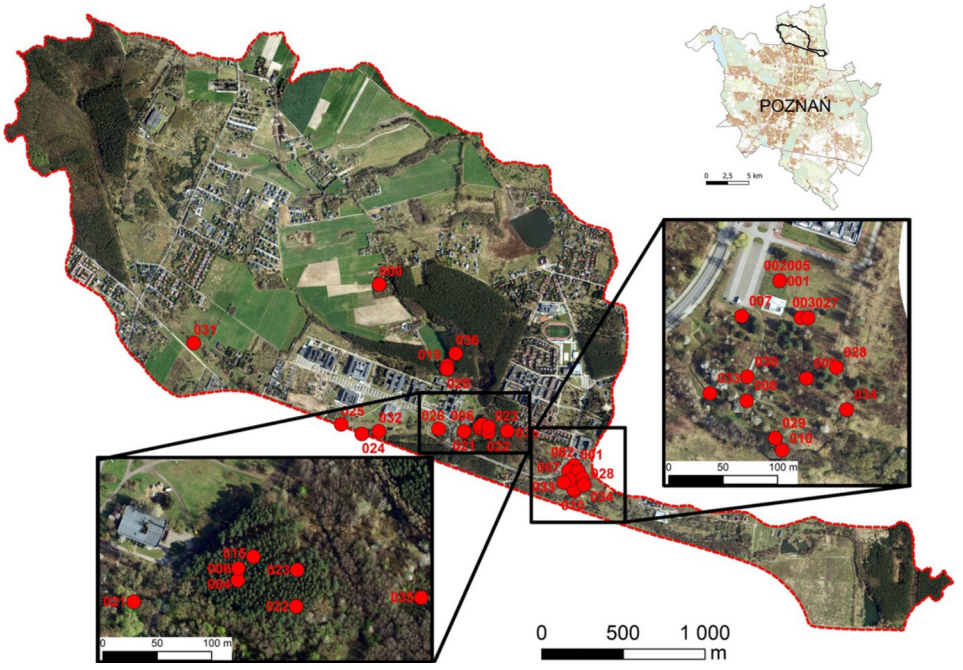
Abstract: The Różany Strumień catchment is located in the northern part of Poznań and is the subject of research by the Poznań-Morasko IMNE (ZMŚP) Station. The 2021 was the sixth measurement year under the IMNE program in the analyzed area. The research was carried out on the basis of stationary test plots under 12 IMNE measurement programs, and the results of several of them are presented in this paper. The paper presents the cycling of dissolved matter based on the analysis of the prevailing thermal and precipitation conditions, recognition of the chemical composition of precipitation, water levels and

flows in Różany Strumień, and an analysis of the physicochemical properties of groundwaters. The results obtained in 2021 were compared to the period 2016–2020, i.e. from the beginning of the measurements. The cycling of dissolved matter in the Różany Strumień catchment in 2021 depended primarily on the prevailing hydrometeorological conditions.

Keywords: cycling of the dissolved matter, Różany Strumień catchment, chemical composition, surface water, groundwater

Wprowadzenie

Przedmiotem badań Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego (ZMŚP) jest przestrzeń przyrodnicza, która składa się z wzajemnie na siebie oddziałujących podsystemów, takich jak: atmosfera, biosfera, pedosfera, litosfera, hydrosfera i antroposfera. Jednostką przestrzenną, która umożliwia całościowe ujęcie przepływu energii i obiegu materii jest zlewnia rzeczna, względnie jeziorna. W analizowanym przypadku jest to zlewnia Różanego Strumienia (ryc. 1).



Ryc. 1. Lokalizacja zlewni Różanego Strumienia w Poznaniu i rozmieszczenie stanowisk pomiarowych
Fig. 1. Location of the Różany Strumień catchment in Poznań and testing plots placement

Stacjonarne badania terenowe zaplanowano i przeprowadzono w oparciu o system monitoringu hydrosfery na Wydziale Nauk Geograficznych i Geologicznych UAM, będący częścią infrastruktury Stacji ZMŚP Poznań-Morasko. Jest to

także pierwsza Stacja Bazowa w programie ZMŚP w Polsce działająca w granicach dużej aglomeracji miejskiej i podlegająca silnej presji antropogenicznej (Major i in. 2017).

Podstawą analiz były: wyniki badań panujących warunków termiczno-opadowych, rozpoznanie składu chemicznego opadów atmosferycznych, zestawienia stanów i przepływów wód w Różanym Strumieniu oraz analiza właściwości fizykochemicznych wód podziemnych.

Rok hydrologiczny 2021 był szóstym rokiem pomiarowym w zlewni Różanego Strumienia w ramach programu Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego. Obserwacje prowadzono w oparciu o 12 programów pomiarowych ZMŚP, a wyniki kilku z nich przedstawiono w poniższym opracowaniu. Na podstawie uzyskanych rezultatów podjęto próbę charakterystyki obiegu materii rozpuszczonej w zlewni Różanego Strumienia w Poznaniu w roku hydrologicznym 2021.

Obszar badań

Zlewnia Różanego Strumienia jest zlewnią miejską, położoną w północnej części Poznania (ryc. 1). Według podziału fizycznogeograficznego Kondrackiego (2009), zlokalizowana jest w obrębie mezoregionów: Pojezierze Poznańskie i Poznański Przełom Warty. W ramach Pojezierza Poznańskiego wchodzi w skład mikroregionu Wzgórza Owińsko-Kierskie.

Cały obszar zlewni, o powierzchni 7,7 km^2, nachylony jest w kierunku południowo-wschodnim, do doliny Warty. Długość głównego cieku – Różanego Strumienia – wynosi 6,9 km. Zlewnia reprezentuje typowy krajobraz młodoglacjalny i znajduje się w obrębie strefy marginalnej stadiału poznańskiego zlodowacenia bałtyckiego (Galon 1972), a według podziału geomorfologicznego Krygowskiego (1961) zlokalizowana jest w obrębie Wysoczyzny Poznańskiej. Mimo położenia w nizinnej części kraju obszar charakteryzuje się znacznymi deniwelacjami przekraczającymi 100 m.

W zlewni dominują trzy główne formy rzeźby polodowcowej: ciąg pagórów czołowomorenowych w północnej części, wysoczyzna morenowa falista w okolicy rezerwatu „Meteoryt Morasko" oraz równina sandrowa (tzw. Sandr Naramowicki) na południe od moren czołowych. W strukturze użytkowania ziemi dominują użytki zielone i grunty orne (Major i in. 2017).

Znaczący wpływ na kształtowanie krajobrazu zlewni Różanego Strumienia ma postępująca rozbudowa Kampusu Morasko oraz zwiększający się obszar osiedli mieszkaniowych wraz z towarzyszącą im infrastrukturą drogową i komunalną.

Metody badań

Obieg materii rozpuszczonej w zlewni Różanego Strumienia określono na podstawie systematycznych pomiarów szeregu komponentów środowiska

przyrodniczego. Badania realizowano na stanowiskach pomiarowych zlokalizowanych na obszarze zlewni. System pomiarowy i zastosowana metodyka badań terenowych była zgodna z założeniami metodologicznymi i programem pomiarowym ZMŚP (Kostrzewski i in. 1995) oraz nawiązywała do założeń europejskiego programu Integrated Monitoring (Integrated Cooperative Programme on Integrated Monitoring on Air Pollution Effects, ICP/IM) (Manual 1998), co umożliwiło analizy porównawcze otrzymanych wyników z badaniami prowadzonymi w innych geoekosystemach Polski. Zakres badań w Stacji Poznań-Morasko obejmował m.in.:

- codzienne automatyczne i manualne pomiary podstawowych elementów meteorologicznych, głównie opadów atmosferycznych i temperatury powietrza, które są podstawowymi parametrami oceny funkcjonowania geoekosystemu badanej zlewni,
- comiesięczną analizę składu chemicznego opadów atmosferycznych na otwartej przestrzeni,
- pomiary właściwości fizykochemicznych wód powierzchniowych – Różanego Strumienia (codzienne pomiary stanu i przepływu oraz comiesięczne analizy składu chemicznego),
- pomiary właściwości fizykochemicznych wód podziemnych (z częstotliwością raz na kwartał).

Skład chemiczny próbek wody oznaczano w Laboratorium Geoekologicznym Stacji ZMŚP Poznań-Morasko na Wydziale Nauk Geograficznych i Geologicznych UAM oraz w Laboratorium Hydrochemicznym Stacji Geoekologicznej UAM w Storkowie. Pomiary odczynu (pH) i przewodności elektrolitycznej właściwej (SEC) wykonano potencjometrycznie (CPC 411 Elmetron). Metodami spektrometrii absorpcji i emisji atomowej (AAS/AES, SpectrAA-20 plus firmy Varian) oznaczono kationy: Na^+, K^+, Mg^{2+} i Ca^{2+} (tylko dla próbek opadu). W próbkach wód powierzchniowych i podziemnych jony wapnia oznaczano miareczkowo – kompleksometrycznie. Stężenia jonów NH_4^+ określono metodą spektrofotometryczną (Nanocolor UV/VIS II Macherey-Nagel). Z kolei stężenia anionów: SO_4^{2-}, NO_3^- i Cl^- oznaczano metodą chromatografii jonowej (DX-120 firmy Dionex).

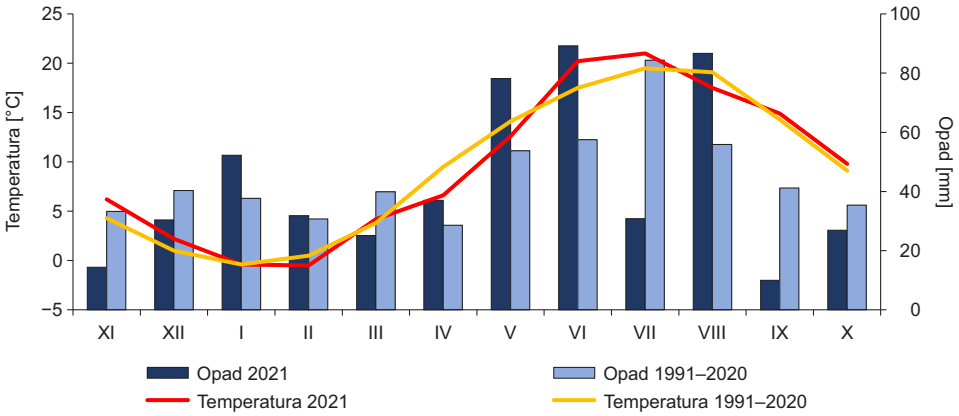
Wyniki

Uwarunkowania termiczno-opadowe

Przepływ energii w geoekosystemie jest inicjowany przez energię słoneczną, natomiast podstawowym obiegiem materii w systemie jest obieg wody. Wielkość dostawy atmosferycznej w zlewni ma wpływ na funkcjonowanie geoekosystemu na kolejnych etapach obiegu materii. Dlatego podstawą określenia obiegu materii rozpuszczonej w geoekosystemie jest właściwe rozpoznanie warunków hydrometeorologicznych (Major i in. 2017, 2019, 2020). W związku ze zbyt krótkim sześcioletnim okresem pomiarowym w zlewni Różanego Strumienia, dane

termiczne i opadowe zostały odniesione do wyników zebranych w okresie referencyjnym 1991–2020 na Stacji IMGW-PIB Poznań-Ławica.

Zgodnie z klasyfikacją termiczną stosowaną w Zintegrowanym Monitoringu Środowiska Przyrodniczego, rok hydrologiczny 2021 należy zaliczyć do kategorii lat lekko ciepłych (Lorenc 1998), a jego średnia roczna temperatura powietrza, wynosząca 9,5°C, była wyraźnie niższa niż w latach 2018–2020 (średnio o 1,2°C). W ujęciu miesięcznym trzy miesiące uznano za chłodne (bardzo chłodny kwiecień z temperaturą 6,6°C i lekko chłodne maj – 12,6°**C** oraz sierpień – 17,5°**C**). Z kolei najcieplejszym miesiącem był lipiec, który z temperaturą 21,0°C zaliczony został do kategorii miesięcy ciepłych. Ciepły był również listopad 2021 r. (6,2°**C**), a czerwiec z temperaturą 20,2°C zakwalifikowano jako ekstremalnie ciepły. Mniejsze odchylenia od normy wieloletniej wystąpiły w przypadku opadów atmosferycznych. Rok hydrologiczny 2021 z roczną sumą opadów atmosferycznych równą 512,7 mm był rokiem normalnym (suma była nieznacznie niższa od normy z wielolecia, stanowiąc 95% średniego opadu rocznego). Opady cechowały się dużą zmiennością sum miesięcznych, odbiegając znacząco od średnich przebiegów wieloletnich. Maksimum opadowe wystąpiło w bardzo wilgotnych: czerwcu (89,2 mm) i sierpniu (86,7 mm). 22 czerwca nastąpił katastrofalny opad o sumie 77,6 mm. Z kolei najsuchszym miesiącem z sumą opadów równą 10 mm był wrzesień (ryc. 2). Do kategorii miesięcy suchych zaliczono również: listopad, marzec oraz lipiec. Podobnie jak w latach wcześniejszych pokrywa śnieżna nie miała wpływu na retencję wody w zlewni (występowała łącznie przez 33 dni ze średnią grubością wynoszącą 5,1 cm).

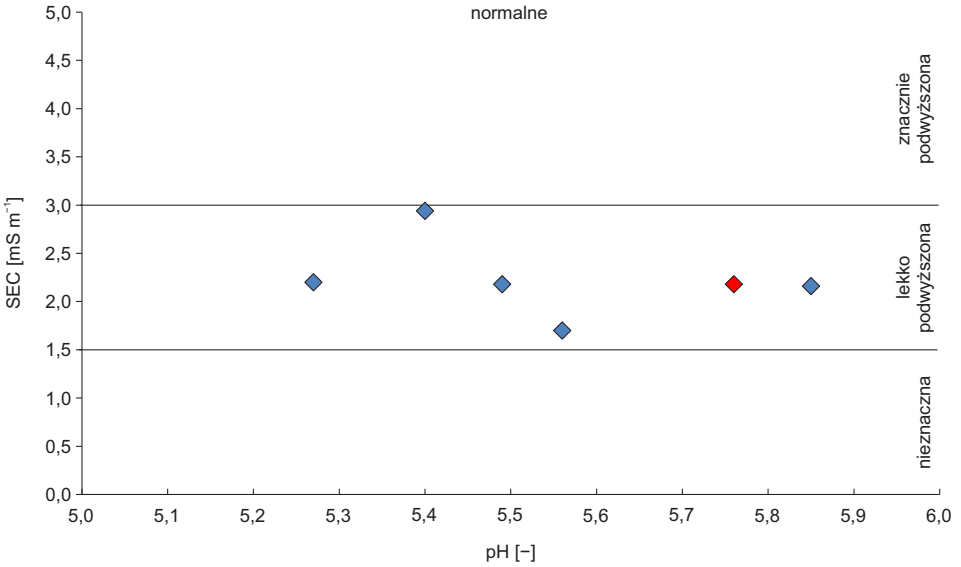


Ryc. 2. Miesięczne sumy opadów i średnie miesięczne temperatury powietrza w 2021 r. w zlewni Różanego Strumienia na tle wartości z wielolecia 1991–2020 w Stacji IMGW-PIB Poznań Ławica

Fig. 2. Monthly precipitation totals and average monthly air temperatures in the Różany Strumień catchment in the 2021 hydrological year and in the Institute of Meteorology and Water Management – National Research Institute Station Poznań Ławica in the 1991–2020 hydrological years

Chemizm opadów atmosferycznych

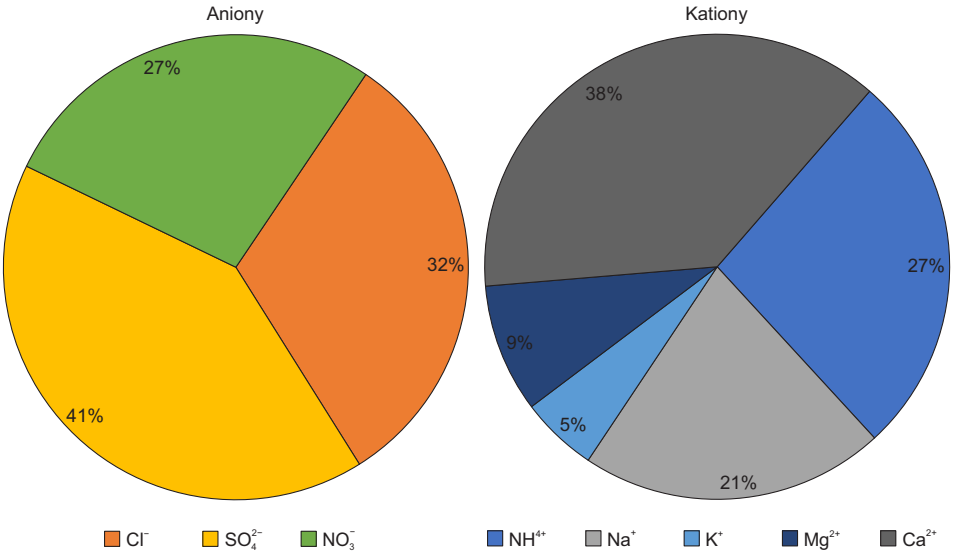
Opady atmosferyczne na otwartej przestrzeni w Stacji ZMŚP Poznań-Morasko cechowały się stosunkowo niską mineralizacją i normalnym odczynem. *Średnia* wartość przewodności elektrolitycznej w 2021 r. wyniosła 2,18 mS·m^{-1} i była niższa w porównaniu do lat poprzednich (średnia z wielolecia 2016–2020 wyniosła 2,26 mS·m^{-1}). Pomimo tego jej wartości nadal utrzymały się na podobnym poziomie – lekko podwyższonym. Z kolei wartość pH była nieznacznie wyższa od wartości uzyskanych w latach 2016–2019 i niższa niż w roku 2020, plasując się nadal na poziomie odczynu normalnego (ryc. 3).



Ryc. 3. pH i przewodność elektrolityczna właściwa opadów atmosferycznych w zlewni Różanego Strumienia w roku 2021 na tle wielolecia 2016–2020

Fig. 3. pH and specific electrical conductivity in precipitation in the Różany Strumień catchment in 2021 year according to 2016–2020 years

Wielkość dostawy substancji rozpuszczonych do badanej zlewni określono na podstawie składu chemicznego opadów (Major i in. 2018). Badania składu chemicznego opadów atmosferycznych na otwartej przestrzeni wykazały, że wśród anionów największy udział procentowy w strukturze opadów miały jony siarczanowe, chlorkowe i azotanowe, a wśród kationów dominowały jony wapniowe i amonowe (ryc. 4). W stosunku do lat poprzednich w 2021 r. odnotowano niższe stężenia azotanów i jonów amonowych oraz podwyższone stężenia chlorków. Spadek stężenia jonów azotanowych przełożył się na wartość wskaźnika udziału czynników kwasogennych w zakwaszaniu opadów (stosunek średnich ważonych stężeń jonów NO_3^- do średnich ważonych stężeń jonów SO_4^{2-}), osiągając najniższą wartość (0,67) w porównaniu do wyników uzyskanych w latach 2016–2020.



Ryc. 4. Procentowy udział kationów i anionów w opadzie atmosferycznym w Stacji ZMŚP Poznań-Morasko w 2021 r. hydrologicznym

Fig. 4. Percentage cation and anion shares in precipitation at the Poznań-Morasko IMNE Station in the 2021 hydrological year

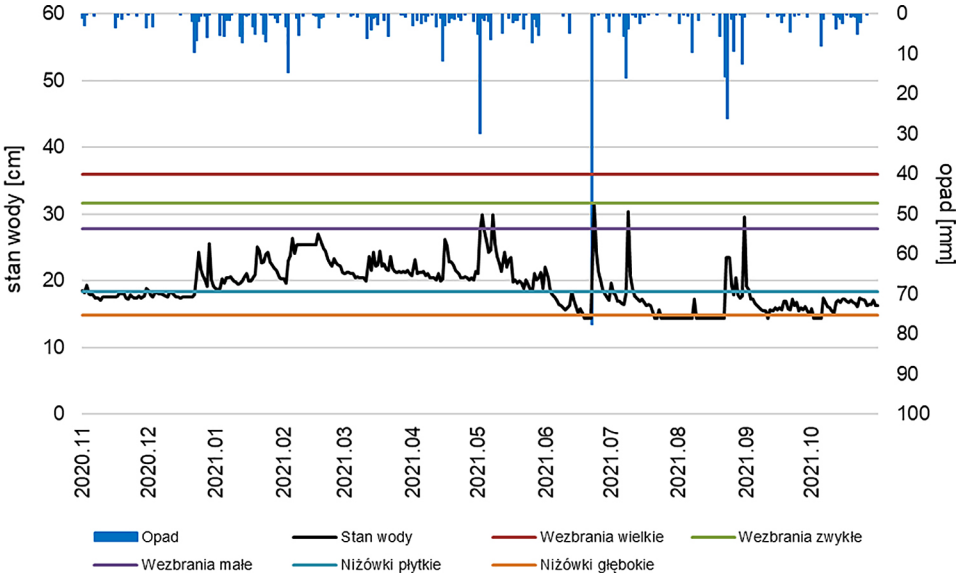
Dodatkowo trend ten nie nawiązuje do tendencji zwiększającej się roli NO_3^- nad SO_4^{2-} w Polsce północnej i zachodniej (większego wpływu zanieczyszczeń komunikacyjnych na kwasowość opadów). Jest natomiast zbliżony do wartości uzyskiwanych w Polsce południowo-wschodniej (Majewski, Kostrzewski 2021). Prawdopodobną przyczyną tych rozbieżności jest miejski charakter zlewni wraz z okoliczną infrastrukturą.

W strukturze średnich rocznych stężeń poszczególnych składników rozpuszczonych w opadach najwięcej występowało jonów Ca^{2+} (23%), następnie $N\text{-}NH_4^+$ (16%), $S\text{-}SO_4^{2-}$ (16%), Na (13%), $N\text{-}NO_3^-$ (12%) i Cl^- (11%). Mniejszy udział stwierdzono dla jonów Mg^{2+} (5%), K^+ (3%) i H^+ (1%), których sumaryczny udział wyniósł 8%. Wysokie stężenia jonów zasadowych (Ca^{2+} i $N\text{-}NH_4^+$), które są głównymi czynnikami wpływającymi na neutralizację opadów atmosferycznych (Keresztesi i in. 2020) wpłynęły również na uzyskiwanie wyższych wartości pH wód opadowych w roku 2021 (pH = 5,77) niż średnio w latach poprzednich 2016–2020 (pH = 5,47).

Depozycja atmosferyczna w roku hydrologicznym 2021, przy uwzględnieniu rocznej sumy opadów na poziomie 512,7 mm, wyniosła 2,4 $t \cdot km^{-2}$. Wśród anionów największą depozycją charakteryzowały się: chlorki (529 mg $Cl \cdot m^{-2}$), następnie siarczany (310 mg $SSO_4 \cdot m^2$) i azotany (180,5 mg $N\text{-}NO_3 \cdot m^{-2}$). Depozycja kationów przedstawiała się następująco: wapń (548 mg $Ca^{2+} \cdot m^{-2}$), sód (354 mg $Na^+ \cdot m^{-2}$), jony amonowe (272 mg $N\text{-}NH_4^+ \cdot m^2$), potas (152 mg $K^+ \cdot m^{-2}$) i magnez (79 mg $Mg^{2+} \cdot m^2$).

Wody powierzchniowe

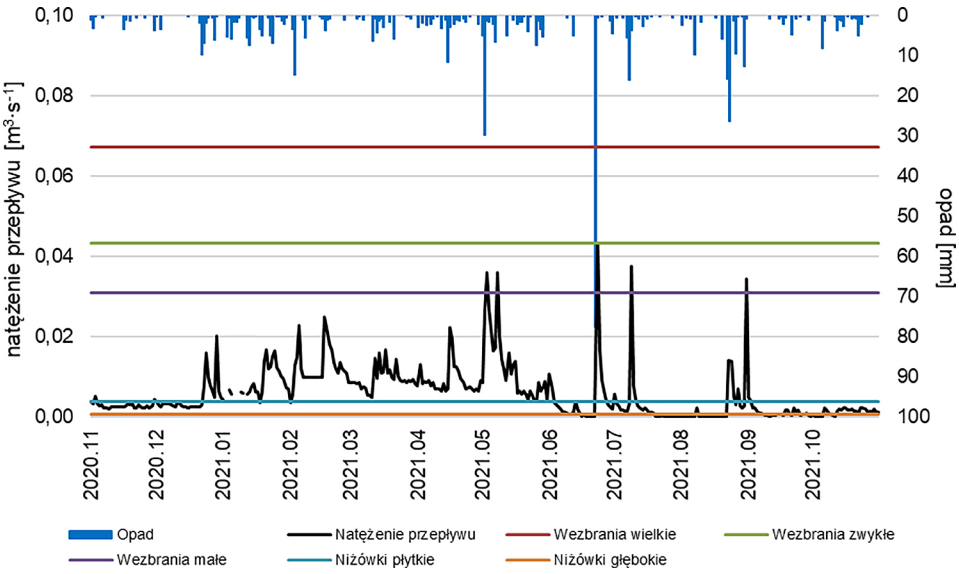
Sytuacja hydrologiczna w Różanym Strumieniu była bezpośrednio uzależniona od warunków hydrometeorologicznych. Stosunkowo niskie stany, mieszczące się w przedziale od 14 do 32 cm ze średnią 19 cm powyżej zera łaty wodowskazowej (ryc. 5), stanowiły kontynuację niekorzystnej sytuacji hydrologicznej zapoczątkowanej w półroczu letnim 2018 r. Wyższe stany wód występowały epizodycznie i pojawiały się w bezpośrednim następstwie wysokich opadów atmosferycznych. Zauważalna była szybka reakcja na opady wyższe niż 20 mm. Najwyższy stan wody wystąpił 23 czerwca, po ekstremalnie wysokim opadzie w dniu poprzedzającym, wynoszącym 77,6 mm.



Ryc. 5. Średnie dobowe wartości stanów wody [cm] na tle sum dobowych opadów atmosferycznych [mm] w zlewni Różanego Strumienia w 2021 r. hydrologicznym
Fig. 5. Mean daily water levels [cm] and daily precipitation totals [mm] in the Różany Strumień catchment in the 2021 hydrological year

Kształt hydrogramu odpływu nawiązywał do kształtu hydrogramu stanów wody. Przepływy w 2021 r. mieściły się w przedziale od 0,0000 $m^3 \cdot s^{-1}$ do 0,0434 $m^3 \cdot s^{-1}$. Średni roczny przepływ wyniósł 0,0059 $m^3 \cdot s^{-1}$. Podobnie jak w przypadku stanów, był porównywalny z suchymi latami 2019–2020 i zdecydowanie niższy niż w latach wcześniejszych (o 40% w stosunku do średniej z okresu 2015–2020). Roczna amplituda względna przepływów w 2021 r. wyniosła 7,41. Wartości progowe wezbrań i niżówek obliczono na podstawie kryteriów zaproponowanych przez Ozgę-Zielińską i Brzezińskiego (1994). Jako górną granicę wystąpienia płytkiej niżówki obliczono przepływ o natężeniu 0,0037 $m^3 \cdot s^{-1}$, a niżówki głębokiej – 0,0004 $m^3 \cdot s^{-1}$. Z kolei dolny próg wezbrania małego wyniósł 0,0310 $m^3 \cdot s^{-1}$,

zaś wezbrania zwykłego 0,0434 $m^3 \cdot s^{-1}$. Przepływy poniżej wartości granicznej wystąpienia niżówki miały miejsce przez 188 dni, w tym przez 55 dni trwała niżówka głęboka. Ponadto przez 40 dni, od czerwca do października, odnotowano zerowy przepływ wody (4 dni w czerwcu, 10 dni w lipcu, 21 dni w sierpniu, 1 dzień we wrześniu i 4 dni w październiku). Wezbrania wystąpiły przez 5 dni, w tym jednokrotnie pojawiło się wezbranie zwykłe – po ekstremalnym opadzie z 22 czerwca (ryc. 6).



Ryc. 6. Średnie dobowe wartości przepływu [$m^3 \cdot s^{-1}$] na tle dobowych sum opadów atmosferycznych [mm] w zlewni Różanego Strumienia w 2021 r. hydrologicznym

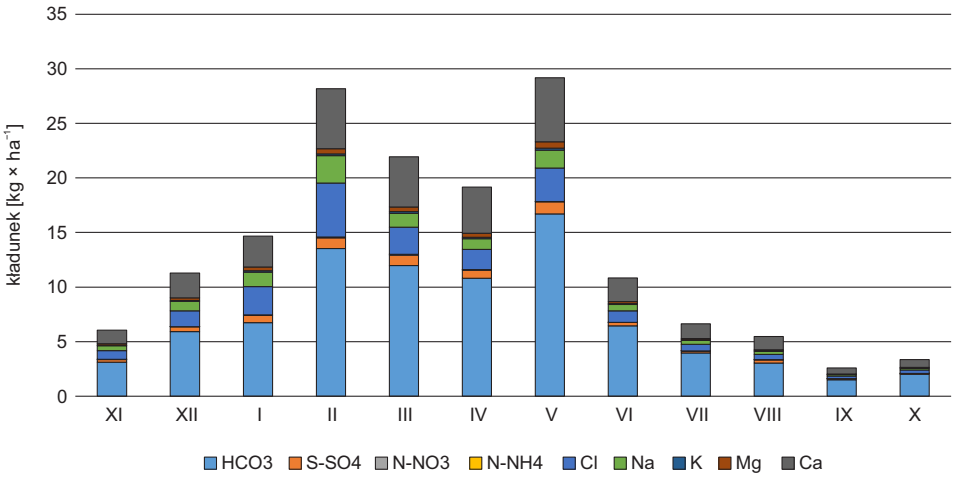
Fig. 6. Mean daily discharge [$m^3 \cdot s–1$] and daily precipitation totals [mm] in the Różany Strumień catchment in the 2021 hydrological year

W układzie roku hydrologicznego średni miesięczny odpływ jednostkowy również był najwyższy w maju i w lutym. Z kolei maksymalne dobowe odpływy jednostkowe, przekraczające 0,0040 $m^3 \cdot s^{-1} \cdot km^{-2}$, związane były z poprzedzającymi je intensywnymi opadami i wystąpiły w maju, czerwcu, lipcu oraz sierpniu, z maksimum w czerwcu – 0,0056 $m^3 \cdot s^{-1} \cdot km^{-2}$. Minimalne dobowe odpływy jednostkowe wyniosły 0 $m^3 \cdot s^{-1} \cdot km^{-2}$ i wystąpiły przynajmniej jeden raz w miesiącu od czerwca do października (ryc. 6).

Wody Różanego Strumienia w roku 2021 charakteryzowały się lekko zasadowym odczynem (średnia ważona pH 7,90). Wyniki pomiarów przewodności elektrolitycznej właściwej (SEC) w próbkach pozwoliły zaliczyć te wody do wysoko zmineralizowanych. Średnia ważona wartość przewodności wyniosła 83,8 $mS \cdot m^{-1}$, przy niewielkiej zmienności (SD ±14,7 $mS \cdot m^{-1}$). Wysoka wartość SEC związana była m.in. z przekształceniami antropogenicznymi w zlewni (zmianami użytkowania terenu, deforestacją zlewni dla potrzeb urbanizacji oraz rolnictwem), jak

również dostawą zanieczyszczonych wód do cieków czy też spływami powierzchniowymi z obszarów rolniczych (Majewski, Kostrzewski 2021). Według klasyfikacji Altowskiego i Szwieca wody Różanego Strumienia należały do typu hydrogeochemicznego wapniowo-wodorowęglanowo-chlorkowego $\frac{HCO_3^{61}Cl^{22}SO_4^{16}}{Ca^{70}Na^{19}Mg^{10}}$.

W 2021 r. sumy ładunków wszystkich jonów były wyższe niż w latach 2019–2020, co można wiązać z nieco większymi wartościami odpływu. Struktura jonów nie uległa zmianie i na podstawie uzyskanych wartości stwierdzono, że największymi ładunkami wśród anionów odznaczały się jony wodorowęglanowe, następnie chlorki i siarczany, a wśród kationów wapń, sód i magnez. W przypadku większości jonów zaobserwowano zależność wielkości ich ładunku od przepływu (Puczko, Jekatierynczuk-Rudczyk 2020). W miesiącach letnich i jesiennych przepływów odnotowano obniżone wartości ładunków, co wiąże się z mniejszym wskaźnikiem odpływu (ryc. 7).

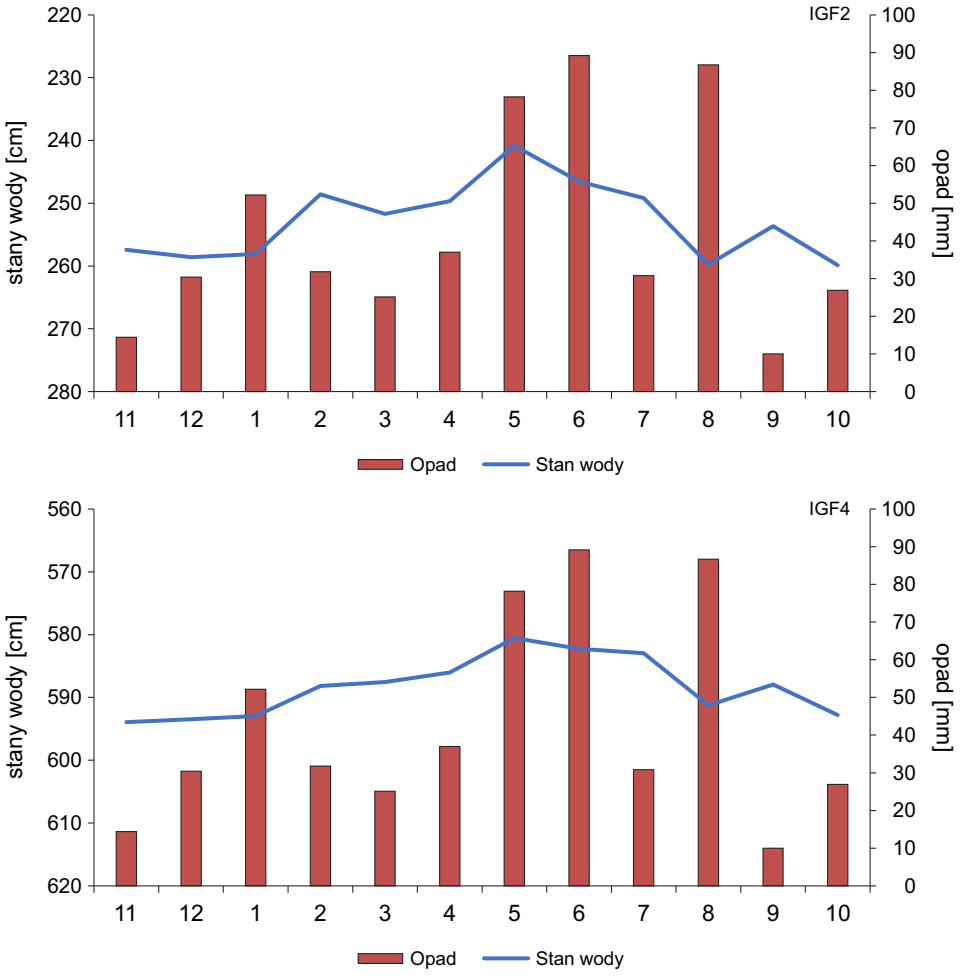


Ryc. 7. Miesięczne ładunki w zlewni Różanego Strumienia w roku hydrologicznym 2021
Fig. 7. Monthly ions loads in the Różany Strumień in the 2021 hydrological year

Na podstawie rozporządzenia Ministra Infrastruktury z dnia 25 czerwca 2021 r. w sprawie klasyfikacji stanu ekologicznego, potencjału ekologicznego i stanu chemicznego oraz sposobu klasyfikacji stanu jednolitych części wód powierzchniowych, a także środowiskowych norm jakości dla substancji priorytetowych (Dz.U. 2021 poz. 1475) dokonano oceny jakości wód Różanego Strumienia. Z badanych wskaźników fizykochemicznych dwa (Na i K) nie podlegały klasyfikacji w rozporządzeniu, sześć zaliczono do I klasy czystości (pH, Mg, PO_4, S-SO_4, N-NO_3 i N-NH_4), a cztery były poza III klasą czystości (przewodność elektrolityczna, HCO_3, Ca i Cl). W porównaniu do 2020 r. charakterystyki badanych parametrów nie uległy zmianom. Na tej podstawie jakość wód Różanego Strumienia określono poniżej dobrego.

Wody podziemne

Roczny rozkład miesięcznych sum opadów atmosferycznych znalazł odzwierciedlenie na kolejnym etapie obiegu wody, w tym przypadku w podobnym przebiegu zmienności średnich miesięcznych stanów wód podziemnych w 2021 r. W pierwszej połowie roku stany wód utrzymywały się na zbliżonym poziomie. Wilgotne maj oraz czerwiec sprzyjały wzrostowi stanów wody, jednak po bardzo suchym lipcu zanotowano ponowne obniżenie zwierciadła wód (ryc. 8). W obu stanowiskach pomiarowych (IGF2 i IGF4) średnie stany wód podziemnych w 2021 r.



Ryc. 8. Średnie miesięczne stany wód podziemnych i miesięczne sumy opadów atmosferycznych w zlewni Różanego Strumienia w 2021 r. hydrologicznym

Fig. 8. Mean monthly groundwater levels and monthly precipitation totals in the Różany Strumień catchment in the 2021 hydrological year

utrzymywały się na równie niskim poziomie jak w dwóch poprzednich latach. Niskie stany były następstwem dwóch suchych i bardzo ciepłych lat 2018 oraz 2019. Korzystniejsza sytuacja opadowa w 2020 r. nie przyniosła wymiernych efektów, co wiązać można ze stale wzrastającą średnią roczną temperaturą powietrza, wzmagającą ewapotranspirację. Na tle wielolecia 2016–2020 wszystkie miesiące w 2021 r. charakteryzowały się bardzo wysokimi ujemnymi odchyleniami średnich miesięcznych poziomów wód podziemnych. Poziomy miesięczne w 2021 r. były niższe od wartości z wielolecia średnio o 10 cm dla piezometru IGF2 (od 1 cm w maju do 16 cm w październiku) oraz o 8 cm, a dla piezometru IGF4 (od 3 cm w lipcu do 14 cm w kwietniu). W całym roku hydrologicznym 2021 zwierciadło wód podziemnych w obu piezometrach znajdowało się poniżej średnich wysokich stanów wód podziemnych z okresu 2016–2020, a przez zdecydowaną większość roku również poniżej średnich stanów wód podziemnych. Jedynie w maju w punkcie pomiarowym IGF2 stan był powyżej średnich stanów pięcioletnich. W piezometrze IGF2 nie zostały przekroczone niskie stany wieloletnie, z kolei w piezometrze IGF4 stany wód od listopada do stycznia oraz w październiku były poniżej średnich niskich stanów z okresu 2016–2020.

Typ hydrogeochemiczny wód podziemnych, zgodnie z klasyfikacją Altowskiego-Szwieca (Macioszczyk 1987), w obu piezometrach określono jako wapniowo-wodorowęglanowo-siarczanowo-chlorkowy, ze znaczną mineralizacją wynoszącą ponad 500 mg·dm^{-3} (wody słodkie). Na podstawie średnich wartości parametrów fizykochemicznych badanych wód podziemnych określono ich klasę monitoringową według rozporządzenia Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej z dnia 11 października 2019 r. (Dz.U. 2019 poz. 2148) w sprawie kryteriów i sposobu oceny stanu jednolitych części wód podziemnych. Względem roku poprzedniego pogorszeniu uległa klasa jakości dla wodorowęglanów – ujęcie IGF2 z II na III. Średnie roczne wartości pozostałych parametrów mieściły się w I klasie jakości wód podziemnych z wyjątkiem przewodności elektrolitycznej właściwej, siarczanów i chlorków, które zaliczono do II klasy czystości oraz wapnia przyporządkowanego do III klasy (tab. 1).

Tabela 1. Wybrane wskaźniki fizykochemiczne wód podziemnych i określone dla nich klasy jakości wód

Table 1. Selected physico-chemical indicators of underground waters and water quality classes specified for them

Rok klasa	Punkt pomiarowy	pH	SEC	Ca	Na	Mg	K	PO_4	HCO_3	Cl	S-SO_4	N-NO_3	N-NH_4	Mineralizacja	Stan chemiczny zlewni
		[-]	[mS·m^{-1}]	[mg·dm^{-3}]											
2021	IGF2	7,09	94,1	131,7	42,3	12,5	3,80	0,0	368	74,1	25,20	1,00	0,13	658	dobry
klasa		I	II	III	I	I	I	I	III	II	II	I	I		
2021	IGF4	7,07	94,4	133,4	41,6	13,5	2,70	0,0	334	82,5	26,10	1,23	0,05	635	dobry
klasa		I	II	III	I	I	I	I	II	II	II	I	I		

Na podstawie uzyskanych klas jakości wód określono stan chemiczny wód podziemnych. W przypadku I, II lub III klasy czystości stan chemiczny ocenia się jako dobry (wg rozporządzenia Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi

Śródlądowej z dnia 11 października 2019 r.). Dlatego w zlewni Różanego Strumienia stan chemiczny wód podziemnych określono jako dobry.

Podsumowanie

W Stacji ZMŚP Poznań-Morasko rok hydrologiczny 2021 był szóstym rokiem pomiarowym w ramach programu Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego. Obserwacje prowadzono w oparciu o 12 programów pomiarowych ZMŚP, a wyniki kilku z nich przedstawiono w tym artykule.

Obieg materii rozpuszczonej na terenie zlewni Różanego Strumienia w 2021 r. uzależniony był przede wszystkim od panujących warunków hydrometeorologicznych, a zwłaszcza niekorzystnych stosunków termiczno-opadowych. Analizowany rok zaliczono do kategorii lat lekko ciepłych (Lorenc 1998), a jego średnia roczna temperatura powietrza, wynosząca 9,5°C, była wyraźnie niższa niż w latach poprzednich (2018–2020). Rok hydrologiczny 2021, z roczną sumą opadów atmosferycznych wynoszącą 512,7 mm, był rokiem normalnym (suma była nieznacznie niższa od normy z wielolecia, stanowiąc 95% średniego opadu rocznego). Opady cechowały się dużą zmiennością sum miesięcznych, odbiegając znacząco od średnich przebiegów wieloletnich.

Opady atmosferyczne na otwartej przestrzeni w Stacji ZMŚP Poznań-Morasko cechowały się stosunkowo niską mineralizacją i normalnym odczynem. Badania składu chemicznego wykazały, że wśród anionów największy udział procentowy w strukturze opadów miały jony siarczanowe, chlorkowe i azotanowe, a wśród kationów dominowały jony wapniowe i amonowe.

Niskie stany wód Różanego Strumienia, mieszczące się w przedziale od 14 do 32 cm ze średnią 19 cm powyżej zera łaty wodowskazowej, były kontynuacją niekorzystnej sytuacji hydrologicznej zapoczątkowanej w półroczu letnim 2018 r. Przepływy w 2021 r. mieściły się w przedziale od 0,0000 $m^3 \cdot s^{-1}$ do 0,0434 $m^3 \cdot s^{-1}$. Średni roczny przepływ wyniósł 0,0059 $m^3 \cdot s^{-1}$.

Wody Różanego Strumienia w roku 2021 charakteryzowały się lekko zasadowym odczynem (pH 7,90), a średnia ważona wartość przewodności elektrolitycznej wyniosła 83,8 $mS \cdot m^{-1}$. Według klasyfikacji Altowskiego i Szwieca wody Różanego Strumienia należały do typu hydrogeochemicznego wapniowo-wodorowęglanowo-chlorkowego. Z badanych wskaźników fizykochemicznych dwa (Na i K) nie podlegały klasyfikacji w rozporządzeniu, sześć zaliczono do I klasy czystości, cztery były poza III klasą czystości, a jakość wód Różanego Strumienia określono poniżej dobrej.

Badania składu chemicznego wód podziemnych wykazały, że w porównaniu do roku 2020 pogorszeniu uległa klasa jakości dla wodorowęglanów (piezometr IGF2) z II na III. Średnie roczne wartości pozostałych parametrów mieściły się w I klasie jakości wód podziemnych z wyjątkiem przewodności elektrolitycznej właściwej, siarczanów i chlorków, które zaliczono do II klasy czystości, oraz wapnia – przyporządkowanego do III klasy. Na podstawie uzyskanych klas jakości stan chemiczny wód podziemnych w badanej zlewni określono

jako dobry. Typ hydrogeochemiczny wód podziemnych w obu piezometrach był wapniowo-wodorowęglanowo-siarczanowo-chlorkowy.

Realizacja programów pomiarowych w Stacji ZMŚP Poznań-Morasko w 2021 r. pozwoliła scharakteryzować obieg materii rozpuszczonej na terenie zlewni Różanego Strumienia. Badania wykonywane w kolejnych latach umożliwią analizowanie związków przyczynowo-skutkowych, rozpoznanie tendencji zmian wybranych komponentów środowiska geograficznego oraz sformułowanie prognoz krótko- i długoterminowych pod kątem zagrożeń środowiska zlewni zurbanizowanej wynikających ze wzrastającej presji antropogenicznej i większej dostawy zanieczyszczeń.

Literatura

Galon R., 1972. Geomorfologia Polski. T. 2. Niż Polski. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa.

Keresztesi A., Nita I.A., Birsan M.V, Bodor Z., Pernyeszi T., Micheu M.M., Szép R., 2020. Assessing the variations in the chemical composition of rainwater and air masses using the zonal and meridional index. Atmospheric Research, 237: 104846.

Kondracki J., 2009. Geografia regionalna Polski. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.

Kostrzewski A., Mazurek M., Stach A., 1995. Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Zasady organizacji, system pomiarowy, wybrane metody badań. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa.

Krygowski B., 1961. Geografia fizyczna Niziny Wielkopolskiej. Cz. 1. Geomorfologia. PTPN, Wyd. Matem-Przyrod. Kom. Fizjogr., Warszawa.

Lorenc H., 1998. Ocena stopnia realizacji programu „obserwacje meteorologiczne i badania klimatyczne w systemie zintegrowanego monitoringu środowiska" oraz synteza uzyskanych wyników badań za okres 1994–1997. [W:] A. Kostrzewski (red.), Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Funkcjonowanie i tendencje rozwoju geoekosystemów Polski. IX Sympozjum ZMŚP, Bibl. Monit. Środ., Warszawa: 113–119.

Macioszczyk A., 1987. Hydrogeochemia. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa: 327–328.

Majewski M., Kostrzewski A., 2021. Stan geoekosystemów Polski w 2020 roku (http://centrumzmsp.home.amu.edu.pl/wp-content/uploads/2021/11/Raport_2020.pdf; dostęp: 20.12.2021).

Major M., Chudzińska M., Majewski M., 2019. Funkcjonowanie geoekosystemu zlewni Różanego Strumienia (Pojezierze Wielkopolskie) w latach hydrologicznych 2016–2018. Studia i Prace z Geografii, 80: 59–75.

Major M., Chudzińska M., Majewski M., Zięba M., 2020. Funkcjonowanie geoekosystemu zlewni Różanego Strumienia w Poznaniu w roku hydrologicznym 2019. [W:] A. Olszewski, A. Andrzejewska (red.), Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Aktualny stan i przemiany środowiska przyrodniczego geoekosystemów jako cecha wskaźnikowa zmian klimatu. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Izabelin: 211–224.

Major M., Majewski M., Olejarczyk M., Zięba M., 2017. Stan i funkcjonowanie geoekosystemu zlewni Różanego Strumienia w Poznaniu w roku hydrologicznym 2016. Monitoring Środowiska Przyrodniczego, 19(1): 31–39.

Major M., Chudzińska M., Majewski M., Zięba M., 2018. Podstawowe składowe bilansu materii rozpuszczonej w zlewni Różanego Strumienia w Poznaniu w roku hydrologicznym 2017. Monitoring Środowiska Przyrodniczego, 20: 79–86.

Manual for Integrated Monitoring, 1998. International Co-operative Programme on Integrated Monitoring of Air pollution Effects on Ecosystems. ICP IM Programme Centre Helsinki (www.syke.fi/nature/icpim).

Ozga-Zielińska M., Brzeziński J., 1994. Hydrologia stosowana. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.

Puczko K., Jekatierynczuk-Rudczyk E., 2020. Extreme Hydro-Meteorological Events Influence to Water Quality of Small Rivers in Urban Area: A Case Study in Northeast Poland. Scientific Reports, 10: 10255. https://doi.org/10.1038/s41598-020-67190-4

Rozporządzenie Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej z dnia 11 października 2019 r. w sprawie kryteriów i sposobu oceny stanu jednolitych części wód podziemnych, 2019 (Dz.U. 2019 poz. 2148).

Rozporządzenia Ministra Infrastruktury z dnia 25 czerwca 2021 r. w sprawie klasyfikacji stanu ekologicznego, potencjału ekologicznego i stanu chemicznego oraz sposobu klasyfikacji stanu jednolitych części wód powierzchniowych, a także środowiskowych norm jakości dla substancji priorytetowych, 2021 (Dz.U. 2021 poz. 1475).

Aleksandra Czuchaj, Mikołaj Majewski, Marek Marciniak

Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu,
aleczu1@amu.edu.pl, AC https://orcid.org/0000-0002-7249-8069,
MiM https://orcid.org/0000-0003-0864-9720, MaM https://orcid.org/0000-0002-5377-5585

Koncepcja stanowiska do badań spływu powierzchniowego i spłukiwania w zlewni Różanego Strumienia

The concept of surface runoff and soil loss testing plot in the Różany Strumień catchment

Zarys treści: W zlewni Różanego Strumienia funkcjonuje system monitoringu środowiska przyrodniczego, badający składowe bilansu wodnego z wyjątkiem spływu powierzchniowego. W celu uzupełnienia tego monitoringu zaprojektowano specjalne stanowisko badawcze. Jest ono zlokalizowane na stoku o nachyleniu 6° i składa się z czterech poletek testowych o różnych typach pokrycia powierzchni terenu: asfalt, kostka betonowa na piasku, trawa oraz czarny ugór. W dolnej części każdego z poletek znajduje się chwytacz spływu powierzchniowego. Zaprojektowane stanowisko badawcze umożliwia monitoring zdarzeń naturalnych oraz badania eksperymentalne z wykorzystaniem symulatora opadów. Zastosowanie symulatora opadów umożliwi lepsze rozpoznanie procesów zachodzących na stoku, a w szczególności procesu formowania się spływu powierzchniowego.

Słowa kluczowe: spływ powierzchniowy, symulator opadów, poletka testowe, badania eksperymentalne, deszcze nawalne

Abstract: In the Różany Strumień catchment, there is a monitoring system for the natural environment, examining the components of the water balance, with the exception of surface runoff. In order to supplement this monitoring, a special research station was designed. It is located on a slope with a slope of 6° and consists of four test plots with different types of land surface cover: asphalt, concrete pavement on sand, grass and black fallow. At the bottom of each plot is a runoff catcher. The research station stand enables the monitoring of natural events and experimental research using a rainfall simulator. With its use, it will be possible to better recognize the processes taking place on the slope, and in particular the process of surface runoff formation.

Keywords: runoff, rainfall simulator, test plots, experimental research, torrential rain

Wprowadzenie

Zgodnie z teorią Hortona (1933, 1945) spływ powierzchniowy to różnica pomiędzy objętością wody pochodzącej z opadu atmosferycznego, która nie odparowała, a wody infiltrującej w podłoże. Zjawisko spływu powierzchniowego ma miejsce przede wszystkim w czasie opadów i roztopów. Korzystne warunki generowania spływu powierzchniowego występują przy dużym natężeniu opadów, ich długim czasie trwania lub bardzo szybkim topnieniu pokrywy śnieżnej i lodowej. Na złożoność omawianego procesu ma wpływ wiele czynników, takich jak: natężenie oraz czas trwania opadu, rodzaj gleby, jej przewodnictwo wodne oraz wilgotność początkowa, rodzaj pokrywy roślinnej, a także nachylenie i długość stoku (De Roo i in. 1992). W warunkach polskich na spływ powierzchniowy znacząco oddziałuje proces parowania. Parowaniu ulega około 65% opadu atmosferycznego, a w bezpośrednim spływie powierzchniowym bierze udział maksymalnie 18% wód opadowych (Chełmicki 2001).

Dotychczasowe badania spływu powierzchniowego były prowadzone przede wszystkim w aspekcie erozji wodnej gleby. Większość odbywała się z wykorzystaniem poletek testowych na wzór badań Wischmeiera i Smitha (1978). Badania erozyjne na poletkach testowych były prowadzone w Polsce m.in. w Storkowie na Pojezierzu Drawskim (Szpikowski 2003, Majewski 2020), w Szymbarku w Beskidzie Niskim (Gil i in. 2021), w Łazach na Pogórzu Wiśnickim (Święchowicz 2012), w Guciowie na Roztoczu Środkowym (Stępniewski 2008), w Bogucinie na Płaskowyżu Nałęczowskim (Rejman 2006) i w Udziejku na Pojezierzu Suwalskim (Smolska 2002).

W literaturze spotyka się także badania erozji wodnej gleby z wykorzystaniem symulatorów opadów. Najczęściej nawadnianiu poddawano małe powierzchnie poniżej 5 m^2 w warunkach laboratoryjnych (Bryan 1974, Samantaray, Ghose 2022) lub terenowych (Józefaciuk 1966, Tossell i in. 1987, Slattery, Bryan 1994, Humphry i in. 2002, Iserloh i in. 2013, Boulange i in. 2019, Salem, Meselhy 2021, Wu i in. 2022). Spotyka się także badania dotyczące nawadniania większych powierzchni kilkudziesięciu, a nawet ponad 100 m^2 (Luk i in. 1986, Panini i in. 1997, Elhakeem, Papanicolaou 2009, Isidoro i in. 2022). W Polsce badania erozji wodnej gleb z wykorzystaniem symulatora opadu prowadzono w Lublinie (Nowocień i in. 2004) oraz w Storkowie (Majewski 2020).

Dotychczasowe badania eksperymentalne skupiały się przede wszystkim na jednym typie pokrycia powierzchni terenu, jakim jest tzw. czarny ugór, chociaż można spotkać także badania na powierzchniach pokrytych roślinnością (Li, Pan 2018). Iserloh i in. (2021) zwracają uwagę na brak standaryzacji sposobu symulowania opadów.

W celu uzupełnienia wiedzy w tym zakresie opracowano koncepcję stanowiska badawczego złożonego z poletek o różnych typach pokrycia powierzchni terenu, a także eksperymentu z wykorzystaniem symulatora opadów. Badania eksperymentalne przeprowadzone na stanowisku pozwalają na wyznaczenie ilościowych parametrów spływu powierzchniowego w zależności od czasu trwania

i natężenia opadu, a także typu pokrycia powierzchni terenu oraz warunków wilgotnościowych gruntu. Prezentowane poniżej terenowe stanowisko do badania spływu powierzchniowego umożliwia zarówno obserwacje w warunkach opadu naturalnego, jak i symulowanego.

Związek spływu powierzchniowego z powodziami błyskawicznymi

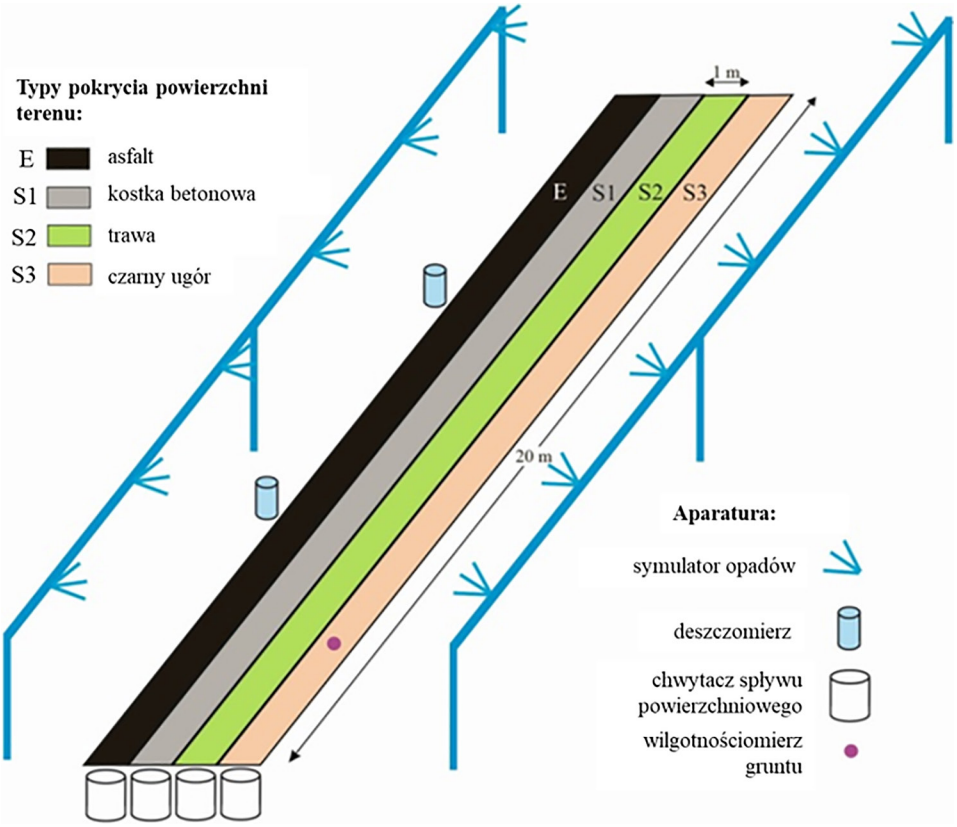
W przeszłości miasta w Europie były lokowane na wzgórzach ze względu na korzystne warunki obronne. Z czasem na stokach tych wzgórz formowały się obszary podmiejskie, zabudowywane wraz z rozwojem osadnictwa. Na skutek procesów urbanizacyjnych obszary te tworzyły zabudowę miejską. Współcześnie, wobec postępujących zmian klimatu, coraz częściej obserwuje się intensywne opady deszczu (IPCC 2021). Równocześnie na obszarach zurbanizowanych stale wzrasta udział powierzchni uszczelnionych. Podczas nawalnych opadów atmosferycznych systemy kanalizacyjne nie są wystarczająco pojemne, co sprawia, iż woda opadowa zaczyna spływać po uszczelnionych powierzchniach miejskich. W rezultacie coraz częściej dochodzi do powodzi błyskawicznych.

Dotychczasowe eksperymentalne badania spływu powierzchniowego dotyczyły w większości procesów erozji wodnej na obszarach rolniczych. Natomiast brakuje badań spływu powierzchniowego na powierzchniach pokrytych w sposób charakterystyczny dla obszarów zurbanizowanych, zwłaszcza na powierzchniach utwardzonych nieprzepuszczalnych i półprzepuszczalnych.

Projekt stanowiska do badania spływu powierzchniowego

Stanowisko badawcze zostało usytuowane na stoku o południowej ekspozycji i nachyleniu wynoszącym 6 stopni. Stanowisko złożone jest z czterech poletek testowych o różnym pokryciu powierzchni. Każde poletko ma wymiary 20 m długości i 1 m szerokości, a w jego dolnej części znajduje się chwytacz spływu powierzchniowego. Do celów badawczych wybrano cztery powierzchnie: asfalt, kostkę betonową na podsypce piaskowej, trawę oraz czarny ugór (ryc. 1). Asfalt, kostka oraz trawa są powierzchniami charakterystycznymi dla obszarów zurbanizowanych. Powierzchnia asfaltowa jest nieprzepuszczalna, co umożliwi rozpoznanie wielkości parowania podczas eksperymentów z opadami symulowanymi. Natomiast czarny ugór jest standardem w badaniach erozji wodnej gleb, co pozwoli na porównanie wyników przeprowadzonych badań z badaniami zrealizowanymi przez innych autorów w innych lokalizacjach. Każde poletko testowe ograniczone jest betonowymi obrzeżami, które zostały uszczelnione przy krawędziach. Wyeliminuje to ucieczkę spływającej wody na sąsiednie poletka.

Omówiony powyżej dobór różnych typów pokrycia powierzchni terenu umożliwia rozpoznanie spływu powierzchniowego na zróżnicowanych powierzchniach charakterystycznych dla obszarów zurbanizowanych. Powierzchnie te są szczególnie narażone na skutki nawalnych opadów atmosferycznych i powodzi



Ryc. 1. Schemat koncepcyjny stanowiska do badania spływu powierzchniowego
Fig. 1. Conceptual schema of the surface runoff research station

błyskawicznych ze względu na swoją ograniczoną przepuszczalność lub jej całkowity brak.

Bilans Pencka-Oppokowa

Równanie Pencka-Oppokowa opisuje bilans obiegu wody w zlewni:

$$P = E + H_P + H_G + \Delta R \tag{1}$$

gdzie:
P – opad (deszcz, śnieg, grad, krupa, …),
E – parowanie (ewaporacja i transpiracja),
H_P – spływ powierzchniowy (stokowy i korytowy),
H_G – spływ podziemny (gruntowy i podziemny),
ΔR – zmiany retencji.

Bilans obiegu wody dla stanowiska terenowego sporządzono poprzez uwzględnienie w równaniu Pencka-Oppokowa składników dominujących i wyeliminowanie składników możliwych do pominięcia:

$$P = E + H_P + I \tag{2}$$

gdzie:
P – opad (deszcz),
E – parowanie (ewaporacja),
H_P – spływ powierzchniowy (stokowy),
I – infiltracja.

Pomiar opadu (P) naturalnego jest wykonywany w zlokalizowanym około 80 m od stanowiska badawczego posterunku meteorologicznym, wyposażonym w deszczomierz Hellmanna oraz automatyczną stację pogodową DAVIS. Ponadto na stanowisku terenowym do badania spływu powierzchniowego znajdują się dwa deszczomierze Hellmanna, które umożliwiają bezpośrednią rejestrację opadów (P) symulowanych.

Spływ powierzchniowy (H_P) mierzony jest w czterech chwytaczach spływu powierzchniowego, które zostały wbudowane poniżej każdego z czterech poletek testowych.

Wielkość infiltracji (I) jest kontrolowana przez pięć automatycznych czujników wilgotności gruntu zainstalowanych na poletku z czarnym ugorem na głębokościach: 5, 10, 20, 50 oraz 80 cm poniżej poziomu gruntu.

Dla każdego z poletek testowych S1, S2 oraz S3 bilans wodny można zapisać jako:

$$P = E + H_{Si} + I_{Si} \tag{3}$$

gdzie:
P – opad mierzony za pomocą deszczomierza Hellmanna,
E – ewaporacja wyznaczana na poletku z asfaltem E,
H_{Si} – spływ powierzchniowy na poletkach S1, S2, S3 mierzony w chwytaczach,
I_{Si} – infiltracja na poletkach S1, S2, S3.

Na szczelnym poletku testowym z asfaltem nie zachodzi infiltracja:

$$P = E + H_E,$$

a stąd

$$E = P - H_E, \tag{4}$$

gdzie:
H_E – spływ powierzchniowy zarejestrowany w chwytaczu na poletku z asfaltem.

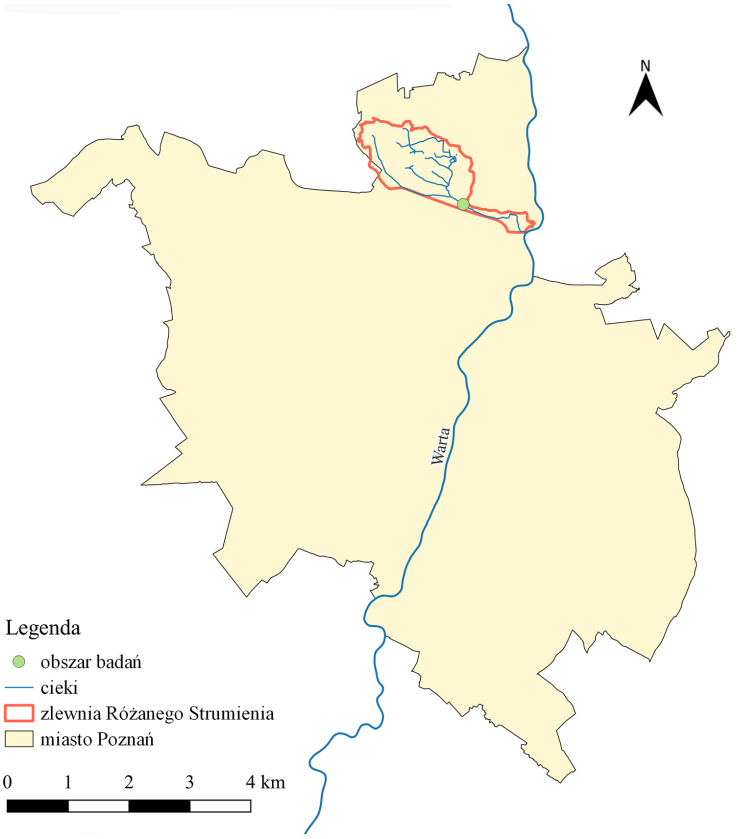
Na podstawie równań (3) możliwe jest obliczenie infiltracji I_{Si}:

$$I_{Si} = P - E - H_{Si} \tag{5}$$

Na poletku S1 o powierzchni pokrytej czarnym ugorem rejestrowana jest także erozja wodna gleb. Materiał skalny, który spływa z powierzchni testowej do chwytacza, jest oddzielany od wody, osuszany i ważony, co pozwala ocenić ilościowo proces erozji gleb.

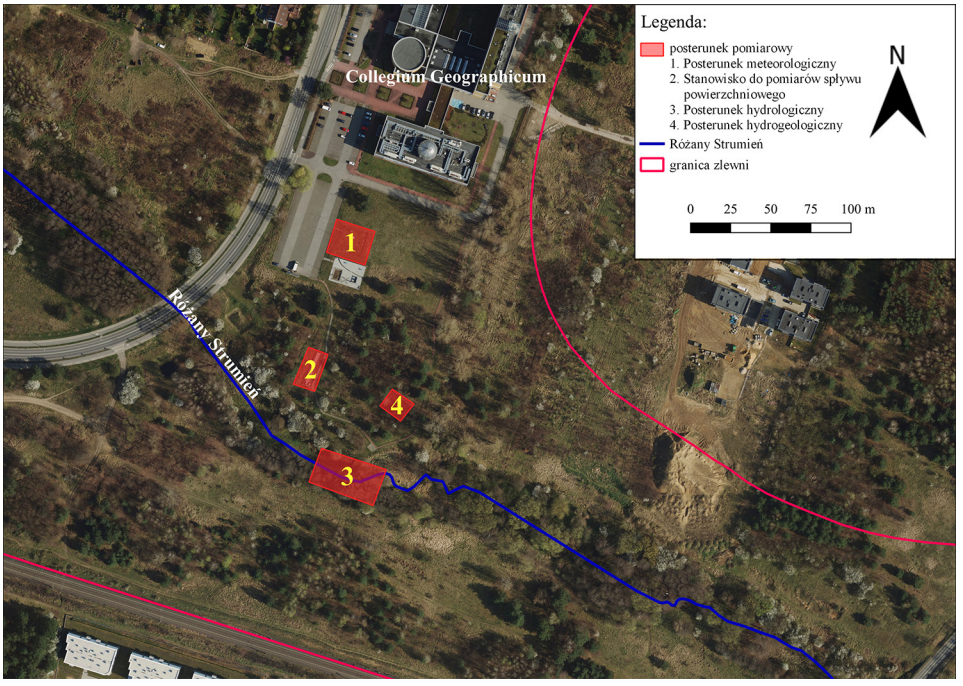
Lokalizacja stanowiska badawczego

Stanowisko terenowe do badań spływu powierzchniowego znajduje się w zlewni Różanego Strumienia (ryc. 2). Jest to nieduży ciek w północnej części aglomeracji miasta Poznania o długości około 6 km, który uchodzi do Warty. Zlewnia Różanego Strumienia o powierzchni około 7,7 km^2 charakteryzuje się wysokim stopniem antropopresji. Jej znaczną część zajmuje zabudowa mieszkalna oraz kampus uniwersytecki. Zlewnia cechuje się dużym udziałem miejskich powierzchni nieprzepuszczalnych (17% powierzchni), które podczas nawalnych opadów atmosferycznych mogą generować powodzie błyskawiczne.



Ryc. 2. Lokalizacja zlewni Różanego Strumienia na tle miasta Poznania
Fig. 2. Location of the Różany Strumień catchment in the city of Poznań

W zlewni Różanego Strumienia funkcjonuje Stacja Bazowa Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego Poznań-Morasko. Aparatura pomiarowa zlokalizowana jest na czterech posterunkach obserwacyjnych (ryc. 3). Na posterunku meteorologicznym znajduje się deszczomierz Hellmanna oraz ewaporometr. Aparaturę do pomiarów spływu powierzchniowego omówiono powyżej. Na posterunku hydrologicznym znajduje się łata wodowskazowa oraz koryto Parshalla do pomiarów przepływu cieku. Na posterunku hydrogeologicznym zamontowane są piezometry do monitoringu stanu wód podziemnych. Od roku 2015 rejestrowane są systematycznie: wysokość opadów atmosferycznych, przepływ w cieku oraz stany wód podziemnych. Stanowisko badawcze do pomiarów spływu powierzchniowego stanowi uzupełnienie monitoringu w zakresie rozpoznania wszystkich elementów bilansu obiegu wody w zlewni.



Ryc. 3. Lokalizacja posterunków obserwacyjnych Stacji Bazowej ZMŚP Poznań-Morasko na kampusie WNGiG UAM w Poznaniu

Fig. 3. The location of the observation stations of the Stacja Bazowa ZMŚP Poznań-Morasko on the campus of the WNGiG UAM in Poznań

Zaletą lokalizacji stanowiska do badania spływu powierzchniowego w sąsiedztwie Wydziału Nauk Geograficznych i Geologicznych UAM (WNGiG) jest osłonięcie z każdej strony zadrzewieniami. Ograniczają one zakłócenia spowodowane porywami wiatru w czasie eksperymentów z symulacją opadu atmosferycznego.

Projekt i kalibracja chwytacza

W dolnej części każdego poletka testowego znajduje się chwytacz spływu powierzchniowego. Jest on skonstruowany z dwóch części: komory zewnętrznej oraz właściwego chwytacza w kształcie walca.

Komory zewnętrzne zostały wykonane ze zbiorników typu Mauser, które po odcięciu górnej części mają wymiary: 1,2 × 1,0 × 0,8 m. Każda z komór znajduje się w metalowym stelażu i jest owinięta folią kubełkową, która wzmacnia i uszczelnia ściany boczne. Komory są umieszczone poniżej poziomu gruntu. Ich zadaniem jest ochrona właściwego chwytacza przed naprężeniami pochodzącymi z gruntu oraz umożliwienie łatwego opróżniania chwytaczy i poboru próbek wody spływającej po stoku. Komory zewnętrzne połączone są przy dnie rurą odprowadzającą wodę grawitacyjnie do Różanego Strumienia.

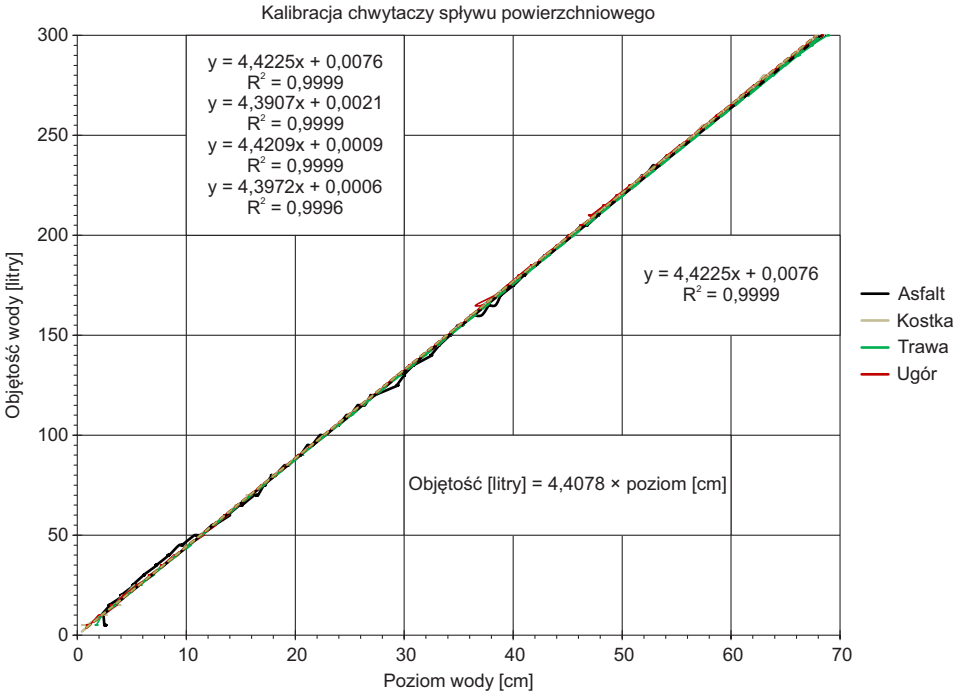
W każdej z komór posadowiony jest chwytacz spływu powierzchniowego. Ma on kształt walca o objętości 300 dm^3. W dolnej części chwytacza znajduje się zawór, umożliwiający spust zebranej w nim wody. Dno chwytacza do wysokości zaworu zostało wybetonowane. Powierzchnia betonowa znajduje się 80 cm poniżej terenu.

W górnej części chwytacza umieszczona jest rynna, kierująca wodę z poletka do jego wnętrza. Rynna ma kształt trapezu, jej powierzchnia pozioma i ścianki boczne zostały wykonane z białego pleksi. Przy dnie każdego chwytacza na stalowej lince jest zawieszony cyfrowy rejestrator poziomu wody typu *levelogger*. Kompensację wahań ciśnienia atmosferycznego zapewnia *barologger* umieszczony w pobliskim posterunku meteorologicznym. *Loggery* docelowo zaprogramowane są z krokiem czasowym, wynoszącym 1 minutę. Każdy chwytacz nakrywany jest pokrywą, która usuwana jest na czas pomiarów spływu po stoku. Ponadto ze względów bezpieczeństwa używana jest druga pokrywa, wykonana ze stelaża i siatki plastikowej nakładana na wierzch komory zewnętrznej.

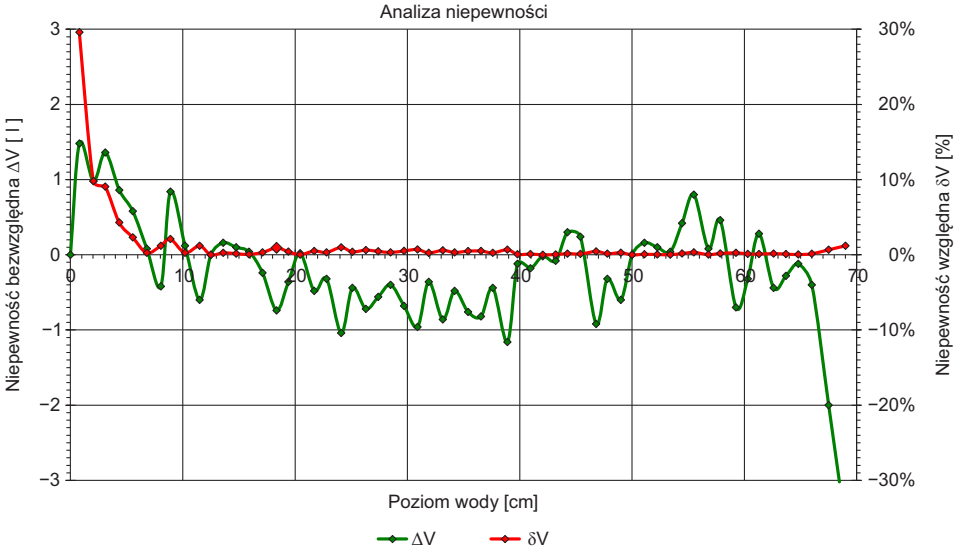
Przed rozpoczęciem eksperymentów i obserwacji terenowych chwytacz spływu powierzchniowego został wykalibrowany w warunkach laboratoryjnych. W górnej części chwytacza na linkach stalowych zawieszono cztery *leveloggery* w taki sposób, aby dolna część czujnika dotykała dna chwytacza. Współpracujący *barologger* znajdował się w tym samym pomieszczeniu. Rejestracja poziomu wody została zaprogramowana z krokiem czasowym 30 sekund. Do chwytacza wlano odmierzone dokładnie 5 dm^3 wody, a następnie odczekano do ustabilizowana się poziomu wody. Procedurę powtórzono 60 razy aż do całkowitego napełnienia chwytacza. Podczas kalibracji wykorzystano *leveloggery* przeznaczone do późniejszych obserwacji terenowych, aby jednocześnie potwierdzić ich sprawność.

Po pracach laboratoryjnych zestawiono zmiany poziomu wody w chwytaczu zarejestrowane przez wszystkie cztery czujniki (ryc. 4). Efektem przeprowadzonej kalibracji jest liniowa funkcja opisująca zależność objętości wody V od poziomu wody l w chwytaczu:

$$Y\ [dm^3] = 4{,}4078 \times l\ [cm] \tag{6}$$



Ryc. 4. Krzywa kalibracyjna chwytacza spływu powierzchniowego
Fig. 4. Runoff catcher calibration curve



Ryc. 5. Analiza niepewności podczas kalibracji chwytaczy spływu powierzchniowego
Fig. 5. Uncertainty analysis during calibration of runoff catchers

Warto podkreślić, że krzywe kalibracyjne dla każdego z czterech *leveloggerów* cechują się współczynnikiem korelacji bliskim jedności (ryc. 4).

W procesie interpretacji pomiarów kalibracyjnych dokonano analizy niepewności bezwzględnych i względnych dla chwytacza (ryc. 5). Tylko dla pierwszych 3 cm napełnienia chwytacza wodą niepewności bezwzględne przekroczyły 1 dm^3, a niepewności względne były większe niż 9%. W pozostałym zakresie zmienności napełnienia chwytacza wodą niepewności względne były mniejsze niż 1 dm^3 (średnio 0,46 dm^3), a średnia niepewność bezwzględna wynosiła 1,27%.

Koncepcja symulacji opadów

Pomimo wzrastającego ryzyka opadów nawalnych, przez ostatnie kilka lat w Poznaniu roczne sumy opadów były niskie, a okresy bezdeszczowe długie. W takich warunkach nie ma możliwości badania spływu powierzchniowego przy opadach naturalnych i dlatego przyjęto koncepcję z symulacją opadów.

Program badań eksperymentalnych opracowano, korzystając z klasyfikacji opadowej zaproponowanej przez Chomicza (1951), która kategoryzuje opady na podstawie współczynnika α, obliczanego ze wzoru:

$$\alpha = \frac{P}{t^{\frac{1}{2}}}$$

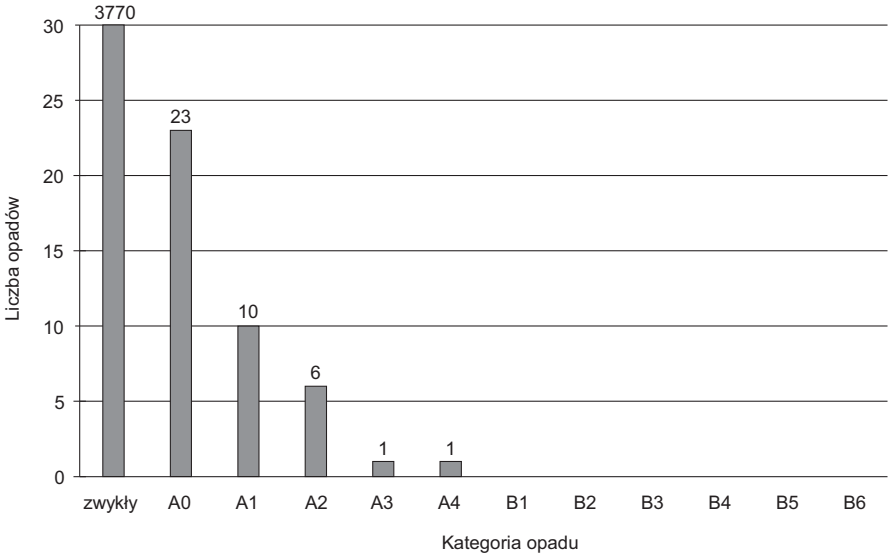
gdzie:
P – całkowita suma opadu [mm],
t – czas trwania opadu [min].

Tabela 1. Klasyfikacja opadów według Chomicza (1951)
Table 1. Classification of precipitation according to Chomicz (1951)

α = f(P, t)		Klasyfikacja Chomicza (1951)		
min.	maks.	kategoria	Opad	
0,00	1,00			zwykły
1,01	1,40	A0		silny
1,41	2,00	A1	I	ulewny
2,01	2,82	A2	II	
2,83	4,00	A3	III	
4,01	5,65	A4	IV	
5,66	8,00	B1	V	nawalny
8,01	11,30	B2	VI	
11,31	16,00	B3	VII	
16,01	22,61	B4	VIII	
22,62	32,00	B5	IX	
32,01	45,23	B6	X	
45,24	64,00	B7	XI	

Klasyfikacja Chomicza (1951) dzieli opady na 13 kategorii od opadu zwykłego poprzez opad silny, dalej 4 stopnie opadów ulewnych oraz 7 stopni opadów nawalnych (tab. 1).

Analizując 10-minutowe dane opadowe ze Stacji Bazowej ZMŚP Poznań-Morasko z lat 2015–2021 nie stwierdzono występowania opadów nawalnych. W ciągu 7 lat wystąpiło 3770 opadów zwykłych, 23 w kategorii A0, 10 w kategorii A1, 6 w kategorii A2 i po jednym w kategoriach A3 oraz A4 (ryc. 6). Opad ekstremalny (A4) zanotowano 22 czerwca 2021 r., kiedy przez godzinę obserwowano natężenie deszczu wynoszące 60 mm/h. Na podstawie powyższych wartości oraz zakresu możliwości technicznych projektowanego symulatora opadów postanowiono zasymulować 7 różnych kategorii opadów według klasyfikacji Chomicza (1951) – od opadu silnego (A0), przez 4 kategorie opadów ulewnych (A1, A2, A3, A4) do 2 kategorii opadów nawalnych (B1, B2), oznaczonych w tabeli 1 różnymi odcieniami koloru niebieskiego.



Ryc. 6. Liczba opadów według klasyfikacji Chomicza (1951) odnotowanych w latach 2015–2021 na Stacji Bazowej ZMŚP Poznań-Morasko

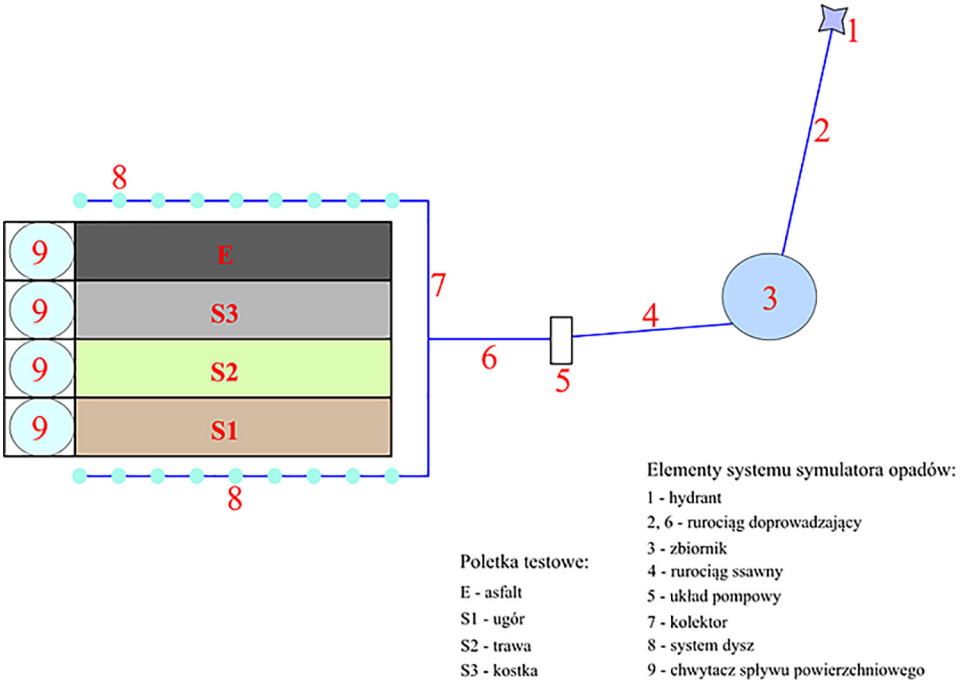
Fig. 6. Number of rainfalls according to the Chomicz classification (1951) registered in the years 2015–2021 at the Stacja Bazowa ZMŚP Poznań-Morasko

Projekt układu do symulacji opadów

Układ do symulacji opadów został zaprojektowany przez wyspecjalizowaną firmę zewnętrzną, która zagwarantowała równomierność opadu na stanowisku badawczym na poziomie 80% oraz realizację założonego programu eksperymentów.

W skład instalacji hydraulicznej do symulacji opadów (ryc. 7) wchodzą następujące urządzenia: hydrant miejskiej sieci wodociągowej (1), węże strażackie (2)

doprowadzające wodę do zbiornika (3) o pojemności 10 m^3, rurociągu ssawnego (4), układu pompowego (5), rurociągu (6), kolektora (7) oraz systemu dysz (8) na tyczkach. W dolnej części stoku umieszczono cztery chwytacze spływu (9).



Ryc. 7. Schemat instalacji hydraulicznej do symulacji opadów
Fig. 7. Schema of the hydraulic system for rainfall simulation

W zależności od programu eksperymentu potrzebne jest 2–8 m^3 wody, która jest magazynowana w zbiorniku (3). Ze zbiornika (3) woda przepływa rurociągiem ssawnym (4) do układu pompowego (5) i dalej rurociągiem (6) i kolektorem (7) jest rozsyłana do dysz (8). Na układ (5) pompowy składa się: pompa, sterownik czasowy, bezpieczniki, filtr oraz przepływomierz, umożliwiający regulację ciśnienia i przepływu chwilowego.

System dysz składa się z 18 tyczek rozmieszczonych w równych odległościach od siebie wzdłuż obu zewnętrznych granic stanowiska badawczego. Tyczki mają różną wysokość, tak aby wszystkie dysze znajdowały się na tym samym poziomie. Zapewnia to równomierne ciśnienie wody na wypływie z poszczególnych dysz. Konfiguracje różnych rodzajów dysz (ryc. 8b) umożliwiające symulację siedmiu natężeń opadów zestawiono w tabeli 2. Odpowiednie ustawienie dysz odbywało się zgodnie z zaleceniami projektanta.

Ryc. 8. Elementy instalacji hydraulicznej do symulacji opadów a) zbiornik oraz układ pompowy, b) zestaw dysz do symulacji opadów
Fig. 8. Elements of the hydraulic system for rainfall simulation a) tank and pump system, b) a set of nozzles for precipitation simulation

Tabela 2. Konfiguracje dysz umożliwiające uzyskanie symulację opadów o różnym natężeniu
Table 2. Nozzle configurations to simulate rainfall of varying intensity

Natężenie symulowanego opadu [mm/h]	Układ dysz
4	18 × HADAR Grey
8	10 × MP Rotator 1000
16	18 × MP Rotator 1000
30	18 × R VAN
40	10 × VAN 15
50	10 × VAN 15 oraz 8 × R VAN
60	18 × VAN 15

Program eksperymentów terenowych i wstępne wyniki

Zgodnie z klasyfikacją opadów Chomicza (1951), przygotowano program 14 eksperymentów terenowych: 7 różnych natężeń opadu i 7 różnych czasów trwania,

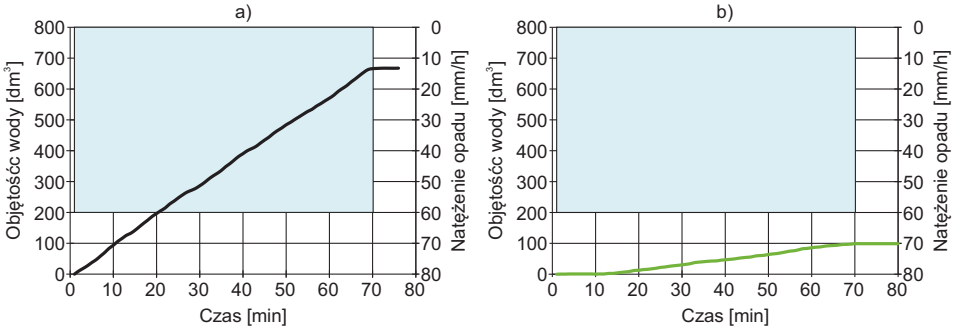
Tabela 3. Program eksperymentów
Table 3. Program of the experiments

Natężenie	Czas	Suma	α	Klasyfikacja Chomicza (1951)				
[mm/h]	t [min]	P [mm]		min.	maks.	kategoria		opad
4	360	24	1,26	1,01	1,40	A0		silny
8	180	24	1,79	1,41	2,00	A1	I	ulewny
16	90	24	2,53	2,01	2,82	A2	II	
30	50	25	3,54	2,83	4,00	A3	III	
40	45	30	4,47	4,01	5,65	A4	IV	
50	60	50	6,45	5,66	8,00	B1	V	nawalny
60	70	70	8,37	8,01	11,30	B2	VI	

realizujących 7 różnych kategorii opadów według skali Chomicza, w suchych oraz mokrych warunkach gruntu. Jako suche warunki gruntu rozumie się taki grunt, który nie był nawadniany przez co najmniej 24 godziny poprzedzające opad. Eksperymenty w warunkach mokrego gruntu wykonywano bezpośrednio po eksperymentach dla suchych warunków wilgotnościowych. Ponadto pomiędzy symulacjami poszczególnych kategorii opadów zachowywano minimalnie 2 dni przerwy, aby osiągnąć podobne początkowe warunki wilgotnościowe gruntu. Eksperyment był przeprowadzany w lipcu 2022 r., każdorazowo przy słonecznych, bezdeszczowych i bezwietrznych warunkach.

W wyniku zrealizowanych eksperymentów zarejestrowano 54 krzywe dynamiki spływu powierzchniowego (przykładowe krzywe zaprezentowano na ryc. 9). Krzywa dynamiki spływu powierzchniowego dla asfaltu (ryc. 9a) ma charakter liniowy, natomiast dla trawy (ryc. 9b) – nieliniowy. Liniowy charakter krzywej jest charakterystyczny dla obszarów zurbanizowanych i został zaobserwowany także dla krzywych na poletku z kostką.

Każda krzywa dynamiki spływu powierzchniowego ma trzy wartości charakterystyczne – moment inicjacji spływu, moment stabilizacji poziomu wody w chwytaczu oraz kąt nachylenia krzywej. Przykładowe wartości charakterystyczne dla dwóch powyższych krzywych zestawiono w tabeli 4. Kąt nachylenia



Ryc. 9. Krzywe dynamiki spływu powierzchniowego dla opadu B2 (60 mm/h, 70 min) w warunkach mokrego gruntu dla a) asfaltu, b) trawy (kolorem błękitnym oznaczony opad)

Fig. 9. Surface runoff dynamic curves for precipitation B2 (60 mm/h, 70 min) in wet ground conditions for a) asphalt, b) grass (precipitation marked in blue)

Tabela 4. Przykładowe wartości charakterystyczne krzywych dynamiki spływu powierzchniowego

Table 4. Examples of characteristic values of surface runoff dynamics curves

Poletko testowe	Warunki wilgotnościowe gruntu	Kategoria Chomicza (1951)	Czas trwania opadu [min]	Czas trwania spływu powierzchniowego		Kąt nachylenia krzywej α [stopnie]
				inicjacja [min]	stabilizacja [min]	
asfalt	suche	B2	70	2	70	89,2
trawa	suche	B2	70	13	70	57,0

jest różny w zależności od pokrycia powierzchni terenu, warunków wilgotnościowych gruntu oraz kategorii symulowanego opadu.

Zebrane podczas eksperymentów terenowych wyniki są w trakcie opracowywania. Planowana jest druga seria pomiarów terenowych w okresie wiosennym, podczas której zostanie powtórzony cały program eksperymentów.

Podsumowanie

Stanowisko do badań spływu powierzchniowego to kluczowy element uzupełniający monitoring bilansu wodnego w zlewni Różanego Strumienia. Ponadto krzywe dynamiki spływu powierzchniowego, uzyskane w wyniku eksperymentów terenowych z wykorzystaniem symulatora opadów, pozwolą na lepsze rozpoznanie procesów zachodzących na stokach o różnych pokryciach terenu. W badaniach upatruje się także zastosowania praktycznego w postaci poprawienia ochrony stoków na obszarach miejskich przed powodziami błyskawicznymi. Bardzo istotnym aspektem badań jest zastosowanie różnych typów pokrycia powierzchni terenu, ponieważ stoki o pokryciu nieprzepuszczalnym, np. wykonanym z asfaltu, mogą generować powodzie błyskawiczne, natomiast stoki pokryte trawą mogą je ograniczać.

Literatura

Bryan R.B., 1974. A simulated rainfall test for the prediction of soil erodibility. Zeitschrift fur Geomorphologie N.F. Supplement Band, 21: 138–150.

Boulange J., Malhat F., Jaikaew P., Nanko K., Watanabe H., 2019. Portable rainfall simulator for plot-scale investigation of rainfall-runoff, and transport of sediment and pollutants. Int. J. Sedim. Res., 34(1): 38–47.

Chełmicki W., 2001. Woda. Zasoby, degradacja, ochrona. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.

Chomicz K., 1951. Ulewy i deszcze nawalne w Polsce. Wiadomości Służby Hydrologicznej i Meteorologicznej, 2, 3: 5–88.

De Roo A.P.J., Riezebos H.Th., 1992. Infiltration experiments on loess soil and their implications for modelling surface runoff and soil erosion. Catena, 19: 221–239.

Elhakeem M., Papanicolaou A.N., 2009. Estimation of the Runoff Curve Number via Direct Rainfall Simulator Measurements in the State of Iowa, USA. Water Resources Management, 23(12): 2455–2473.

Gil E., Kijowska-Strugała M., Demczuk P., 2021. Soil erosion dynamics on a cultivated slope in the Western Polish Carpathians based on over 30 years of plot studies. Catena, 207: 105682.

Horton R., 1933. The role of infiltration in the hydrologic cycle. Transactions – American Geophysical Union, 14.

Horton R., 1945. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. Bulletin of the Geological Society of America, 56: 275–370.

Humphry J.B., Daniel T.C., Edwards D.R., Sharpley A.N., 2002. A portable rainfall simulator for plot-scale runoff studies. Applied Engineering in Agriculture, 18(2): 199–204.

Iserloh T., Isidoro J.M.G.P., de Lima J.L.M.P., Marzen M., de Lima M.I.P., Green D., Seeger M., Ries J. B., 2021. Moving towards harmonisation in rainfall simulation. EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-5667.

Iserloh T., Ries J.B., Arnáez J., Boix-Fayos C., Butzen V., Cerdà A., Echeverría M.T., Fernández-Gálvez J., Fister W., Geißler C., Gómez J.A., Gómez-Macpherson H., Kuhn N.J., Lázaro R., León F.J., Martínez-Mena M., Martínez-Murillo J.F., Marzen M., Mingorance M.D., Ortigosa L., Peters P., Regüés I.D., Ruiz-Sinoga J.D., Scholten T., Seeger M., Solé-Benet A., Wengel R., Wirtz S., 2013. European small portable rainfall simulators: A comparison of rainfall characteristics. Catena, 110: 100–112.

Isidoro J.M.G.P., Silveira A., Lima B.O., 2022. Development of a large-scale rainfall simulator for urban hydrology research. Eng. Sanit. Ambient., 27(1).

IPCC, 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, New York, NY, USA.

Józefaciuk C., 1966. Zastosowanie deszczowni do badań wodnej erozji gleb. Wiadomości IMUZ, 6, 3: 285–290.

Li C., Pan C., 2018. The relative importance of different grass components in controlling runoff and erosion on a hillslope under simulated rainfall. J. of Hydr., 558: 90–103.

Luk S.H., Abrahams A.D., Parsons A.J., 1986. A simple rainfall simulator and trickle system for hydro-geomorphological experiments. Physical Geography, 7: 344–356.

Majewski M., 2020. Sekularne i ekstremalne procesy erozji wodnej gleb na Pojezierzu Drawskim. Landform Analysis, 39.

Nowocień E., Podolski B., Wawer R., 2004. Estimating outflow and sediment uptake chosen Polish soil kinds in simulated conditions. Electronic Journal of Polish Agricultural Universities, 7(2).

Panini T., Torri D., Pellegrini S., Pagliai M., Salvador Sanchis M.P., 1997. A theoretical approach to soil porosity and sealing development using simulated rainstorms. Catena, 3: 199–218.

Rejman J., 2006. Wpływ erozji wodnej i uprawowej na przekształcanie gleb i stoków lessowych. Acta Agrophisica, Rozprawy i Monografie, 136.

Salem H.M., Meselhy A.A., 2021. A portable rainfall simulator to evaluate the factors affecting soil erosion in the northwestern coastal zone of Egypt. Natural Hazards, 105: 2937–2955.

Samantaray S., Ghose D.K., 2022. Prediction of S12-MKII rainfall simulator experimental runoff data sets using hybrid PSR-SVM-FFA approaches. Journal of Water and Climate Change, 13, 2.

Slattery M.C., Bryan R.B., 1994. Surface seal development under simulated rainfall on an actively eroding Surface. Catena, 22: 17–34.

Smolska E., 2002. The intensity of soil erosion in agricultural areas in North-Eastern Poland. Landform Analysis, 3: 25–33.

Stępniewski K., 2008. Wpływ spływu roztopowego i deszczowego na wielkość spłukiwania z poletek o różnym użytkowaniu. Landform Analysis, 9: 49–52.

Szpikowski J., 2003. Contemporary processes of soil erosion and the transformation of the morphology of slopes in agricultural use in the postglacial catchment of the Chwalimski Potok (Upper Parsęta, Drawskie Lakeland). Quaestiones Geographicae, 22.

Święchowicz J., 2012. Wartości progowe parametrów opadów deszczu inicjujących procesy erozyjne w zlewniach użytkowanych rolniczo. Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej UJ, Kraków.

Tossell R.W., Dickinson W.T., Rudra R.P., Wall G.J., 1987. A Portable Rainfall Simulator. Canadian Agricultural Eng., 29, 2: 155–162.
Wischmeier W.H., Smith D.D., 1978. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. Agricultural Handbook, 537. U.S. Department of Agriculture, Washington D.C.
Wu B., Li L., Xu L., Li X., 2022. Modelling sheet erosion on steep slopes of clay loess soil using a rainfall simulator. Biosystem Engineering, 216: 1–16.

Marek Jóźwiak[1], Małgorzata Jóźwiak[2]

[1]Wydział Nauk Ścisłych i Przyrodniczych, Uniwersytet Jana Kochanowskiego w Kielcach,
marek.jozwiak.kielce@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-3628-8563

[2]Stowarzyszenie Naukowe Europejski Instytut Kształcenia Podyplomowego EIOS-Kielce,
https://orcid.org/0000-0002-8270-3898

Ocena stanu środowiska przyrodniczego w centralnej części Gór Świętokrzyskich – podsumowanie 26 lat działalności Stacji Bazowej ZMŚP Łysogóry

Assessment of the natural environment condition in the central part of the Świętokrzyskie Mountains – a summary of 26 years of activity of the Łysogóry Monitoring Base Station

Zarys treści: Góry Świętokrzyskie znajdują się pod wpływem zarówno lokalnych, jak i zdalnych imisji przemysłowych oraz transportowych, szczególnie z kierunków dominujących wiatrów zachodnich i południowo-zachodnich. W zlokalizowanej na północnym stoku Łyśca Stacji Bazowej Łysogóry prowadzone są badania obejmujące 14 programów pomiarowych i 5 programów analitycznych. Przedstawione opracowanie obejmuje rezultaty badań w latach 1994–2020. Analiza uzyskanych wyników pozwala stwierdzić, że środowisko przyrodnicze w centralnej części Gór Świętokrzyskich znajduje się w fazie zaawansowanych, różnokierunkowych, przyspieszających się przemian pod wpływem imisji suchej, wilgotnej i mokrej. Główny nurt tych przemian jest ukierunkowany na postępujące zakwaszanie wskutek występowania kwasowych składników w powietrzu. Imisje stwierdzone na badanym obszarze i wywołane przez nie zmiany w środowisku przyrodniczym są charakterystyczne i rozpowszechnione na rozległych przestrzeniach nie tylko regionu Gór Świętokrzyskich.

Słowa kluczowe: zanieczyszczenie powietrza, wzrost temperatury, transformacja opadów, zakwaszenie środowiska

Abstract: The Świętokrzyskie Mountains are influenced by local and remote industrial and transport immissions, especially from the directions of the dominant western and south-western winds. The Łysogóry Base Station, located on the northern slope of Łysiec, conducts research involving 14 measurement programs and 5 analytical programs. The presented study covers the years 1994–2020. The analysis of the obtained results allows concluding that the natural environment in the central part of the Świętokrzyskie Mountains

is in the phase of advanced, multi-directional, accelerating changes under the influence of dry, moist, and wet immission. The mainstream of these transformations is directed at the progressive acidification of acidic components in the air. The immissions found in the study area and the changes in the natural environment caused by them are characteristic and widespread in vast areas, not only in the Świętokrzyskie Mountains region.

Keywords: air pollution, temperature rise, transformation of rain, acidification of the environment

Wprowadzenie

W latach 70. i 80. XX stulecia w literaturze światowej opisywano wiele metod i technik oceny środowiska zarówno o charakterze poznawczym, jak i praktycznym. Było to spowodowane zapotrzebowaniem na takie oceny, bez których niemożliwe jest zrozumienie podstawowych prawidłowości określających wzajemne związki między człowiekiem a jego otoczeniem. W większości oceny te dotyczyły zjawisk jednostronnych, elementarnych, za to wnioski z nich płynące często rozszerzano na całokształt badanych relacji (Kostrowicki 1992). W efekcie rzeczywista ocena mijała się z prawdą, a zatem informacja zwrotna w postaci reakcji środowiska była inna niż się spodziewano. Stało się jasne, że konieczne jest badanie całokształtu środowiska przyrodniczego; ujmowanie go w sposób dynamiczny, przy jednoczesnym uwzględnianiu strukturalno-funkcjonalnych powiązań, jakie występują między jego elementami składowymi.

Po raz pierwszy koncepcję zorganizowanych, systematycznie prowadzonych badań wytypowanych elementów środowiska w Górach Świętokrzyskich zaproponowali Kowalkowski (1992) oraz Kowalkowski i Piskorz (1993). Koncepcja ta została następnie udoskonalona w miarę rozwoju naukowych metod badania środowiska (Jóźwiak 2001, 2007, 2009, 2014, Jóźwiak, Kowalkowski 2002, 2003) i wymogów Państwowego Monitoringu Środowiska, a także programu Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego (Kostrzewski i in. 1995, Kostrzewski, Majewski 2021).

Teren badań

Góry Świętokrzyskie położone są w: megaregionie Pozaalpejska Europa Środkowa, prowincji Wyżyny Polskie, podprowincji Wyżyna Małopolska, makroregionie Wyżyna Kielecka i mezoregionie Góry Świętokrzyskie (Kondracki 2002). W przeszłości teren ten był pokryty puszczami i bogaty w surowce mineralne. Już w okresie 4800–3200 lat p.n.e. był penetrowany przez człowieka (Kowalczewski 1981). Prawdopodobnie u schyłku paleolitu (12 000–8000 lat p.n.e.) organizowano pozyskiwanie naturalnych zasobów mineralnych i ich przeróbkę. W okresie późniejszym Góry Świętokrzyskie stały się ważnym w skali Europy hutniczym ośrodkiem przemysłowym. Ta działalność, trwająca pięć tysiącleci, pozostawiła trwałe piętno na przyrodzie tego regionu. Mimo antropopresji zachowały się

naturalne lub w niewielkim stopniu zmienione fragmenty przyrody, które 1 maja 1950 r. zostały objęte ochroną jako Świętokrzyski Park Narodowy.

Obecnie region ten, wyniesiony od 100 do 400 m ponad otaczające tereny, znajduje się pod wpływem zarówno lokalnych, jak i zdalnych imisji przemysłowych oraz transportowych, szczególnie z kierunków dominujących wiatrów zachodnich oraz południowo-zachodnich. Wcześniejsze badania wykazały silne zakwaszenie wód powierzchniowych na obszarze Świętokrzyskiego Parku Narodowego i zagrożenie w nich życia biologicznego, pochodzące z powietrza atmosferycznego skażonego emisjami. Obserwowany zły stan zdrowotny drzewostanu, jak również publikacje donoszące o zachwianiu równowagi w środowisku, a także o zagrożeniu oraz wymieraniu na tym obszarze wielu gatunków flory i fauny (Cieśliński 1985, Bróż 1990, Kowalkowski i in. 1990, Liana i in. 1990) były podstawą do podjęcia badań, których celem było rozpoznanie stanu środowiska przyrodniczego w warunkach stałej antropopresji oraz poznanie kierunku przemian zarówno abiotycznych, jak i biotycznych elementów środowiska.

Metodyka

Przy obowiązującym w stacjach Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego badaniu obiegu materii w eksperymentalnej zlewni przyjęto koncepcję lokalizacji stacji monitoringu w centralnej części Gór Świętokrzyskich, w głównym masywie Łysogór w obszarze Łyśca, na terenie Świętokrzyskiego Parku Narodowego (ryc. 1). Występuje tam naturalny drzewostan z silnie zaznaczającymi

Ryc. 1. Krajobraz centralnej części Gór Świętokrzyskich
Fig. 1. Landscape of the Świętokrzyskie Mountains central part

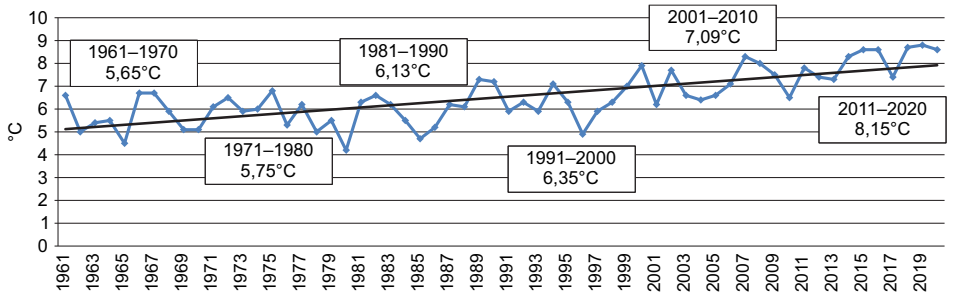
się intensywnymi procesami przemian charakterystycznych dla ekosystemu będącego pod silną, długotrwałą, zdalną, kwaśną imisją. Badania obejmowały 14 programów pomiarowych i 5 programów analitycznych, które były realizowane siłami Stacji Bazowej ZMŚP Łysogóry oraz przez ekspertów ZMŚP (tab. 1). Metodyki tych programów zostały przedstawione przez Kostrzewskiego i in. (1995) oraz Kostrzewskiego i Majewskiego (2021).

Tabela 1. Programy pomiarowe i analityczne realizowane w Stacji Bazowej ZMŚP Łysogóry
Table 1. Measurement and analytical programs implemented at the Łysogóry Base Station

Programy pomiarowe, w tym realizowane przez eksperta*	Kod programu pomiarowego
Meteorologia	A1
Zanieczyszczenie powietrza	B1
Chemizm opadów atmosferycznych	C1
Chemizm opadu podokapowego	C2
Chemizm spływu po pniach	C3
Metale ciężkie i siarka w porostach*	D1
Chemizm roztworów glebowych	F1
Wody podziemne	F2
Opad organiczny	G2
Wody powierzchniowe – rzeki	H1
Gatunki inwazyjne obcego pochodzenia – rośliny	J3
Uszkodzenia drzew i drzewostanów	K1
Epifity nadrzewne	M1
Hydrobiologia rzek – makrofity i ocena hydromorfologiczna koryta rzecznego*	I1
Zmiana pokrycia i użytkowania ziemi*	
Makrofity i ocena hydromorfologiczna koryta rzecznego*	
Świadczenia geoekosystemów*	
Modelowanie zmian bilansu wodnego i biogeochemicznego zlewni reprezentatywnej*	
Ocena funkcjonowania zlewni rzecznej w oparciu o bio- i geowskaźniki	

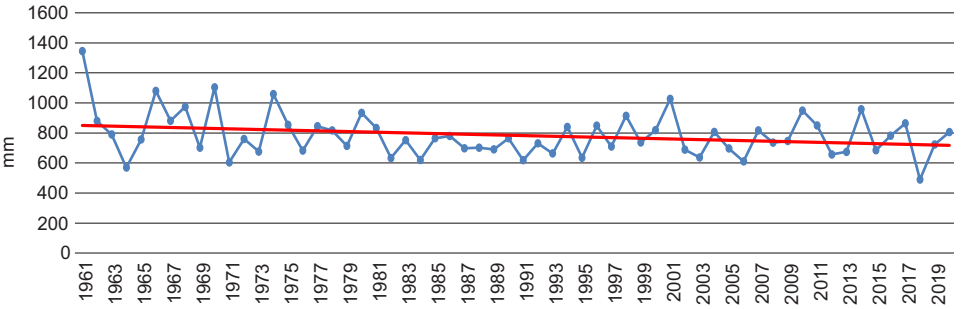
Wyniki

W latach 1961–2020 stwierdzono wzrost temperatury powietrza, szczególnie widoczny w pierwszym dwudziestoleciu XXI w. (ryc. 2). Średnia suma opadów atmosferycznych w wieloleciu 1961–2020 wyniosła 783,2 mm i ma tendencję spadkową (ryc. 3). Dokonana, za Kaczorowską (1962) i Lorenc (1994), charakterystyka termiczno-opadowa dla lat 1994–2020 wykazała, że zarówno pod względem opadów, jak i temperatury badany obszar został sklasyfikowany jako normalny (ryc. 4). Jednocześnie stwierdzono, że 11 lat było suchych, a 7 wilgotnych i bardzo wilgotnych. Badany teren jest poddawany silnej lokalnej i zdalnej imisji, głównie związkami siarki i azotu. Na przestrzeni 26 lat zarówno SO_2, jak i NO_2



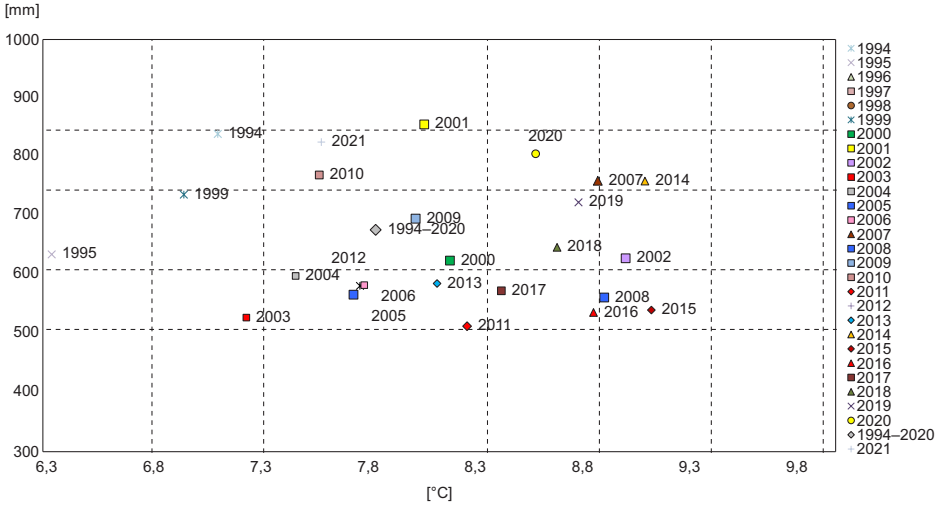
Ryc. 2. Temperatura powietrza w centralnej części Gór Świętokrzyskich w latach 1961–2020

Fig. 2. Air temperature in the central part of the Świętokrzyskie Mountains in 1961–2020



Ryc. 3. Roczne sumy opadów w centralnej części Gór Świętokrzyskich w latach 1961–2020

Fig. 3. Annual precipitation totals in the central part of the Świętokrzyskie Mountains in 1961–2020

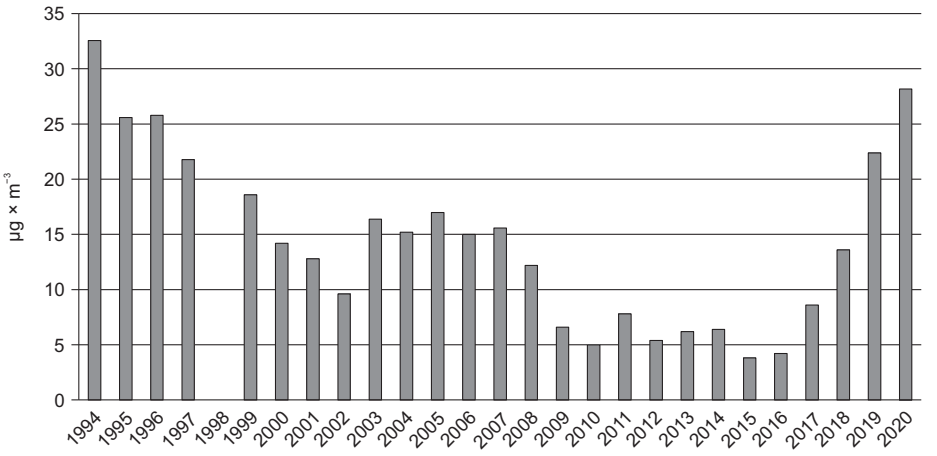


Ryc. 4. Klasyfikacja termiczno-opadowa w centralnej części Gór Świętokrzyskich (Jóźwiak i in. 2021)

Fig. 4. Thermal and precipitation classification in the central part of the Świętokrzyskie Mountains (Jóźwiak i in. 2021)

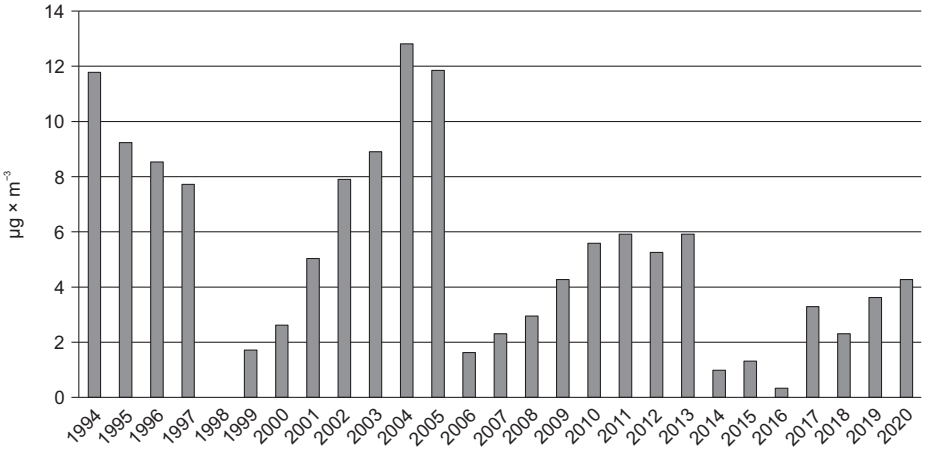
wykazały sinusoidalny przebieg, w którym latami wzrostu były okresy: 1994–1997, 2004–2006 oraz 2018–2020 (ryc. 5–6).

Zanieczyszczenia powietrza wpływają na jakość opadów docierających do podłoża. Prawie połowę opadów (50,6%), charakteryzował odczyn w przedziale pH 4,1–5,1. Głównym źródłem niskiego pH były jony siarczanowe (Jóźwiak i in. 2021). W wieloleciu 2000–2020 konduktywność opadów w przeważającej większości mieściła się w kategorii znacznie i mocno podwyższonej (ryc. 6). Również



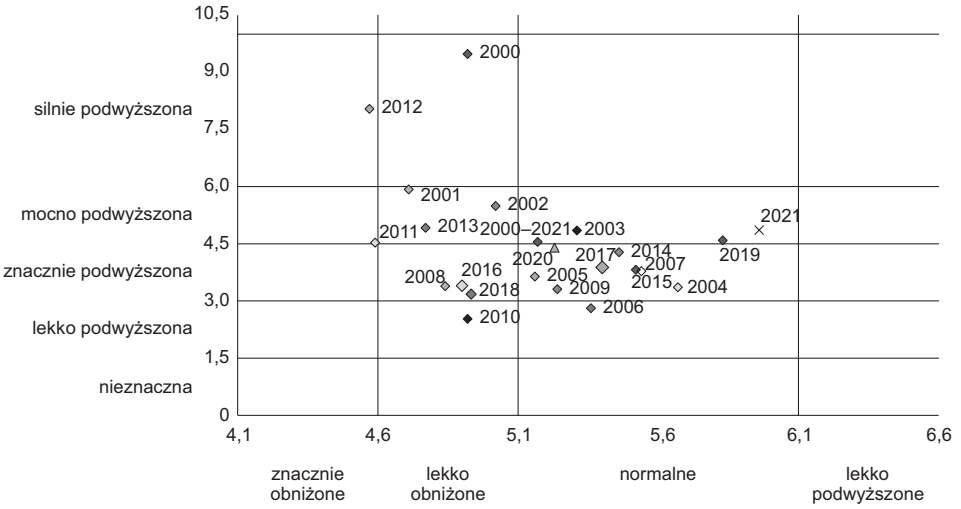
Ryc. 5. Średnie roczne stężenie SO_2 w centralnej części Gór Świętokrzyskich w latach 1994–2020

Fig. 5. Average annual SO2 concentration in the central part of the Świętokrzyskie Mountains in 1994–2020



Ryc. 6. Średnie roczne stężenie NO_2 w centralnej części Gór Świętokrzyskich w latach 1994–2020

Fig. 6. Average annual NO2 concentration in the central part of the Świętokrzyskie Mountains in 1994–2020



Ryc. 7. Odczyn pH i konduktywność opadów w centralnej części Gór Świętokrzyskich w latach 2000–2020 (Jóźwiak i in. 2021)

Fig. 7. Acidity and conductivity of precipitation in the central part of the Świętokrzyskie Mountains in 2000–2020 (Jóźwiak i in. 2021)

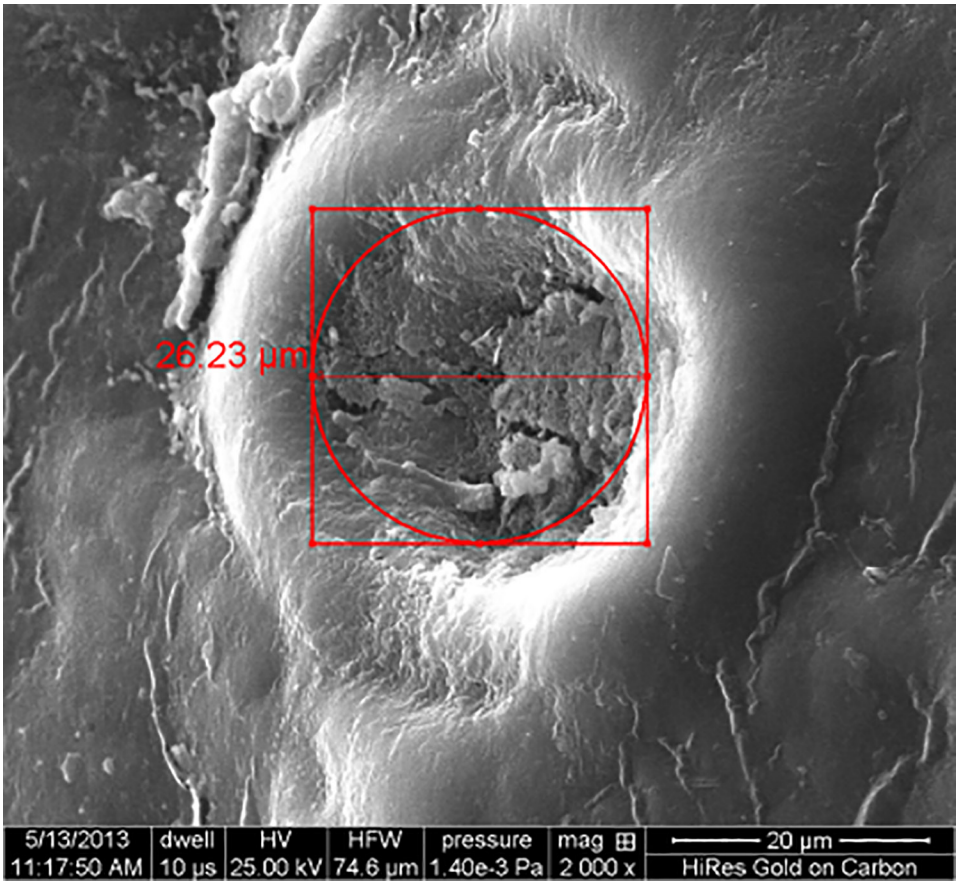
opady przenikające przez korony drzew i spływające po korze ulegały transformacji. W wieloleciu 2000–2020 odczyn pH opadów podkoronowych wykazał tendencję wzrostową, od pH 4,1 w 2001 r. do pH 5,9 w roku 2019. W tym samym czasie konduktywność zmalała, z 22,7 $mS \cdot m^{-1}$ (2000 r.) do 6,49 $mS \cdot m^{-1}$ (2019 r.).

Podsumowanie wyników monitoringu

Środowisko przyrodnicze monitorowane przez Stację Bazową ZMŚP Łysogóry znajduje się w fazie zaawansowanych, różnokierunkowych, przyspieszających się przemian pod wpływem imisji suchej, wilgotnej i mokrej. Główny nurt tych przemian jest ukierunkowany na postępujące zakwaszanie wskutek występowania w powietrzu kwasowych składników, częściowo stymulowane przez zmniejszanie emisji do powietrza pyłów alkalicznych. Stwierdzone na badanym obszarze imisje i wywołane przez nie zmiany w środowisku przyrodniczym są charakterystyczne i rozpowszechnione na rozległych przestrzeniach nie tylko regionu Gór Świętokrzyskich. Szczególnie niebezpieczne dla ekosystemów leśnych są imisje kwaśne. Podatność obszarów leśnych na zakwaszanie zależy od wielu czynników, takich jak m.in.: gatunek drzewa, struktura profilu glebowego, skład mechaniczny i głębokość gleby, miąższość poziomu próchnicznego w glebie, obecność litych skał w podłożu i dynamika wilgotności. Na nie, bezpośrednio z powietrza i pośrednio przez drzewostany, działają kwaśne deszcze. Wiadomo, że SO_2 w postaci gazowej, a szczególnie w kwasowej formie w wodach opadowych, oddziałuje wielokierunkowo na nadziemne organy roślin. Ich wrażliwość na SO_2 jest uzależniona

od temperatury i wilgotności powietrza, dostępu światła i zdolności gleb do uzupełniania składników odżywczych. W geoekosystemie centralnej części Gór Świętokrzyskich te właśnie czynniki są niekorzystnie stymulowane emisją SO_2. Mniej toksyczne tlenki azotu natomiast działają długookresowo, deformująco na: środowisko glebowe, zbiorniki wodne i zbiorowiska roślinne (Juda-Rezler 2000). Stężenia tego zanieczyszczenia powietrza, mimo że w ostatnich latach znacznie się obniżyły, mają jednak istotny wpływ na kształtowanie właściwości gleb tego obszaru. W kwaśnych glebach leśnych, wskutek zwolnionej amonifikacji, przebiega zredukowana mineralizacja materii organicznej, połączona ze znaczną nitryfikacją. Emisja różnych gazów do środowiska, związana z gospodarczą działalnością człowieka, powoduje powstawanie mieszanin gazów, a pyły zawieszone w powietrzu atmosferycznym przekształcają się w aerozole przeważnie silnie kwaśne. Efekty działania tych mieszanin na roślinność, gleby i wody mogą być bardzo zróżnicowane, addytywne w czasie, synergistyczne lub antagonistyczne. Badania różnych kompleksów leśnych w środkowej Europie (Kowalkowski i in. 2005) wykazały dwa kierunki działania związanego z obciążeniem depozytami SO_2 oraz NO_2, pyłem zawieszonym i O_3 w postaci opadu suchego i mokrego. Jest to oddziaływanie strukturalne – objawiające się selektywnym obumieraniem starych drzewostanów, zagęszczeniem pokrywy roślinnej dna lasu, zmianami kwasowości gleb, jak też funkcjonalne – polegające na zmianach w przebiegu wzrostu i statusu żywieniowego roślin, przeobrażeniach obiegu wody i substancji. Dotychczasowe badania wskazują, że w Świętokrzyskim Parku Narodowym występuje zarówno strukturalny, jak i funkcjonalny efekt zanieczyszczenia powietrza gazami i pyłem zawieszonym z zawartymi w nim metalami ciężkimi (Kowalkowski, Jóźwiak 2000a, Kowalkowski i in. 2001, M. Jóźwiak 2000, 2001, 2009, 2021, M.A. Jóźwiak 2014, 2021). Na analizowanym terenie zmiany te są niezwykle ostro zarysowane, zarówno w kierunku negatywnym, jak i pozytywnym. Kwaśne wody deszczowe nasycone: SO_4, Cl, Ca, K, Mg, K, Mn oraz Fe, niekorzystnie oddziałują na nadziemne i podziemne części roślin. Z ich nadziemnych części, szczególnie z liści drzew iglastych i liściastych oraz kory pni, wymywane są znaczne ilości Ca, Mg, K, Mn i Zn, co wywołuje niedobory tych składników. W igłach jodły, wskutek niedoborów kationów o charakterze zasadowym, powstają wolne kwasy organiczne i kwasy mineralne, co może być przyczyną zakłóceń w procesie fotosyntezy, a także uszkodzenia błony komórkowej (Kowalkowski, Jóźwiak 2000b). Rozpłynięcie się igiełek wosku krystalicznego, stwierdzone u jodły od 3 rocznika igieł wzwyż, powoduje zaskorupienie aparatów szparkowych (ryc. 8) oraz ograniczenie wymiany gazowej, nadmierne uwodnienie ich komórek i rozwój grzybów pasożytniczych.

W warunkach kwaśnych gleb nasyconych kwasowymi jonami H^+, Al^{3+} i Fe^{3+} kationy zasadowe pochodzące z drzewostanu są wymywane z gleb w zasięgu systemów korzeniowych (Kowalkowski, Jóźwiak 2000c). W ten sposób, bezpośrednio pod drzewami i w zasięgu korzeni, gleby są najsilniej zakwaszane i wyjaławiane ze składników odżywczych. Ten proces jest szczególnie stymulowany w drzewostanach bukowo-jodłowych i jodłowych. Efektem tych niekorzystnie kształtujących się warunków edaficznych w ekosystemach leśnych Świętokrzyskiego

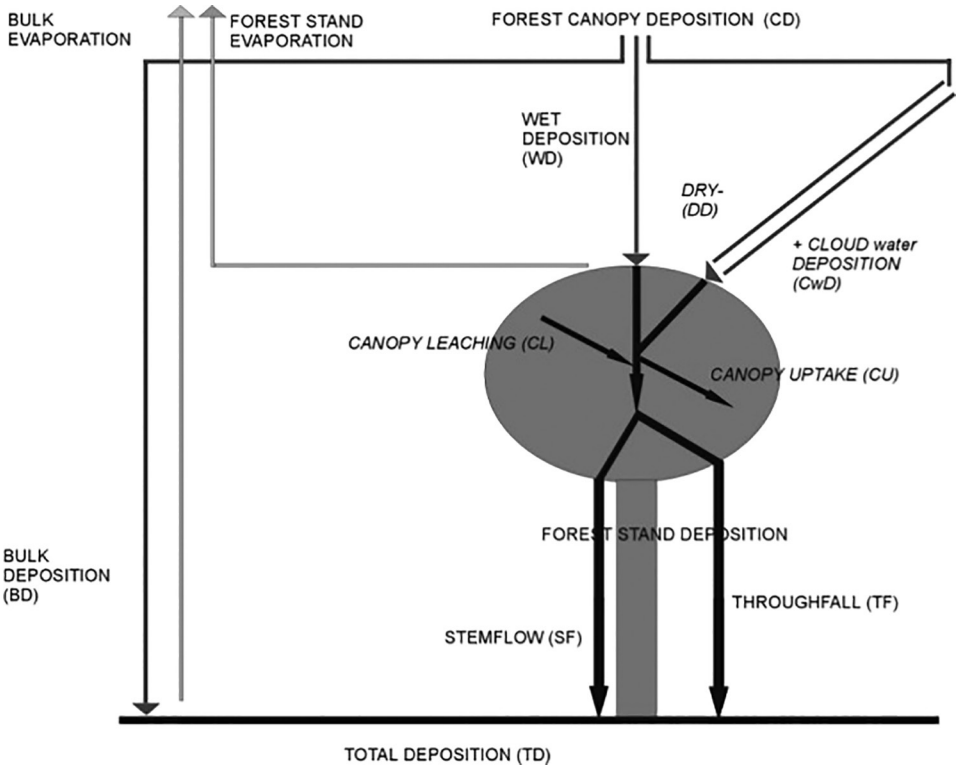


Ryc. 8. Aparat szparkowy w obrazie skaningowego mikroskopu elektronowego (M.A. Jóźwiak)
Fig. 8. Stomata in the image of a scanning electron microscope (M.A. Jóźwiak)

Parku Narodowego jest obumieranie starodrzewi jodłowych i stan chorobowy dużej części jodeł w drugim piętrze lasu, a także w podrostach i nalotach. U buka wykształciła się biczowatość pędów w górnej części koron, a na korze pni występują popielate i biało popielate zacieki utworzone przez spływające, agresywne kwaśne wody opadowe.

Dotychczasowe doświadczenia badawcze w obszarach eksperymentalnej zlewni Stacji Bazowej ZMŚP Łysogóry w regionie Gór Świętokrzyskich jednoznacznie wykazały, że funkcjonujące w geoekosystemie systemy depozycji, z kompleksem ich czasoprzestrzennych wartości i z ich reakcjami następczymi na procesy transformacji trudno zmiennych i czasowo łatwo zmiennych składników, wymagają stałego monitoringu. Od 1994 r., na północnym stoku Łyśca, gdzie jest zlokalizowana Stacja Bazowa ZMŚP Łysogóry, z różnym natężeniem jest rejestrowana depozycja zanieczyszczeń pochodzących z obszarów leżących na głównym kierunku

wiatrów południowych i południowo-zachodnich. Depozycja ta ma charakter bezpośredni i pośredni. Opady po przejściu przez strefę koron drzew, a następnie spływające po pniach drzew ulegają transformacji (ryc. 9).



Ryc. 9. Schemat systemu depozycji bezpośredniej i pośredniej w ekosystemie leśnym Świętokrzyskiego Parku Narodowego (Kowalkowski i in. 2005)
Fig. 9. Scheme of the direct and indirect deposition system in the forest ecosystem of the Świętokrzyski National Park (Kowalkowski et al. 2005)

Ten proces nadal trwa, ze zmieniającymi się natężeniami i przestrzennie zróżnicowanymi nasileniami rozwoju entropii dodatniej oraz entropii ujemnej w wymiarach czasu i przestrzeni, do których odnosimy otrzymywane informacje. Zróżnicowane produkty depozycji przenikające przez pedosferę poddawane są pedogenicznej transformacji z powstawaniem wielokierunkowej depozycji przepływowej, przy wydatnym, różnicującym udziale korzeni roślin i zespołów organizmów glebowych. W zasięgu następczych sekwencji poziomów glebowych związanych z mozaikowatością polipedonów depozycja ta ulega istotnym przemianom i transformacjom. Istotną nową cechą jest obecność koloidalnej materii organicznej unieruchamianej w poziomach glebowych lub znajdującej się w zawiesinie migrujących roztworów glebowych. Bardzo ważnym elementem depozycji całkowitej w geoekosystemie, w którym przeważają powierzchnie leśne, są

biogrupy drzew i ich skład gatunkowy, zwarcie koron, wypełnienie koron organami asymilacyjnymi oraz piętrowa budowa drzewostanu.

Literatura

Bróż E., 1990. Lista wymierających i zagrożonych gatunków roślin naczyniowych Krainy Świętokrzyskiej. Rocznik Świętokrzyski, 17: 97–105.

Cieśliński S., 1985. Zmiany we florze porostów epifitycznych i epiksylicznych na obszarze Świętokrzyskiego Parku Narodowego. Rocznik Świętokrzyski, 12: 125–142.

Jóźwiak M., 2000. Zanieczyszczenie powietrza atmosferycznego w środkowej części Gór Świętokrzyskich. Studia Kieleckie, 4: 67–79.

Jóźwiak M., 2001. Funkcjonowanie wybranego geoekosystemu w Górach Świętokrzyskich w warunkach kwaśnej imisji. Przegląd Geologiczny, 49: 775–779.

Jóźwiak M., 2009. Współczesne procesy zachodzące w geoekosystemie w centralnej części Gór Świętokrzyskich, Monitoring Środowiska Przyrodniczego, 10: 9–16.

Jóźwiak M., Jóźwiak M.A., Kozłowski R., Szwed M., Żelezik M., 2021. Raport z realizacji programu badawczo-pomiarowego ZMŚP w Stacji Bazowej Łysogóry w 2020 roku. Stacja Monitoringu Uniwersytetu Jana Kochanowskiego w Kielcach, mskr.

Jóźwiak M., Kowalkowski A., 2002. Rozwinięta koncepcja monitoringu ekosystemu leśno-rolnego regionu świętokrzyskiego. Regionalny Monitoring Środowiska Przyrodniczego, 3: 17–24.

Jóźwiak M., Kowalkowski A., 2003. Realizacja koncepcji Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego w regionie świętokrzyskim w 10-lecie jego inauguracji. Regionalny Monitoring Środowiska Przyrodniczego, 4: 9–22.

Jóźwiak M.A., 2007. Kumulacja metali ciężkich i zmiany morfologiczne porostu *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl. Monitoring Środowiska Przyrodniczego, 8: 51–56.

Jóźwiak M.A., 2014. Wykorzystanie organizmów wskaźnikowych w bioindykacji środowisk lądowych i wodnych na wybranych przykładach. Kieleckie Towarzystwo Naukowe, Kielce.

Juda-Rezler K., 2000. Oddziaływanie zanieczyszczeń powietrza na środowisko. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.

Kaczorowska Z., 1962. Opady w Polsce w przekroju wieloletnim. Przegląd Geograficzny IG PAN, 33: 1–112.

Kondracki J., 2002. Geografia regionalna Polski. PWN, Warszawa.

Kostrowicki A.S., 1992. System „Człowiek–Środowisko" w świetle teorii ocen. Prace Geograficzne, 156.

Kostrzewski A., Majewski M., 2021. Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego Organizacja, system pomiarowy, metody badań. Wytyczne do realizacji. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa.

Kostrzewski A., Mazurek M., Stach A., 1995. Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Zasady organizacji, system pomiarowy, wybrane metody badań. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa.

Kowalczewski Z., 1981. Węzłowe problemy tektoniki trzonu paleozoicznego Gór Świętokrzyskich. Przegląd Geologiczny, 29: 334–340.

Kowalkowski A., 1992. Stacja Świętokrzyska Monitoringu Krajowego Ziemi. Stacje terenowe monitoringu środowiska przyrodniczego. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa: 246–248.

Kowalkowski A., Brogowski Z., Kocoń J., Swałdek M., 1990. Stan odżywienia i zdrowotność jodły (*Abies alba* Mill.) w Świętokrzyskim Parku Narodowym. Rocznik Świętokrzyski, 17: 11–26.

Kowalkowski A., Jóźwiak M., 2000a. Stan zanieczyszczenia powietrza. [W:] S. Cieśliński, A. Kowalkowski (red.), Monografia Świętokrzyskiego Parku Narodowego: 391–406.

Kowalkowski A., Jóźwiak M., 2000b. Wpływ warunków środowiska na zdrowotność jodły. [W:] S. Cieśliński, A. Kowalkowski (red.), Monografia Świętokrzyskiego Parku Narodowego: 455–467.

Kowalkowski A., Jóźwiak M., 2000c. Zmiany w środowisku glebowym. [W:] S. Cieśliński, A. Kowalkowski (red.), Monografia Świętokrzyskiego Parku Narodowego: 427–439.

Kowalkowski A., Jóźwiak M., Kozłowski R., 2001. Pedogeniczne czynniki procesów zakwaszania wód w ekosystemie leśnym Świętokrzyskiego Parku Narodowego. [W:] M. Jóźwiak, A. Kowalkowski (red.), Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Funkcjonowanie i monitoring geoekosystemów z uwzględnieniem zanieczyszczenia powietrza, Biblioteka Monitoringu Środowiska: 253–270.

Kowalkowski A., Jóźwiak M., Kozłowski R., Wróblewski H., 2005. Atmospheric air pollution and transformation processes of deposition in the forest ecosystem of the Świętokrzyskie Mountains region. Monitoring Środowiska Przyrodniczego, 6: 23–37.

Kowalkowski A., Piskorz S., 1993. Materiały do koncepcji monitoringu Regionu Świętokrzyskiego. Seminarium 11–12 marca 1993. Regionalny system monitoringu środowiska Regionu Świętokrzyskiego.

Liana A., Jabłoński B., Mikołajczyk W., 1990. Stan fauny Świętokrzyskiego Parku Narodowego, jej walory, zagrożenia i możliwości ochrony. Rocznik Świętokrzyski, 12: 135–172.

Lorenc H., 1994. Ocena zmienności temperatury powietrza i opadów atmosferycznych w okresie 1901–1993 na podstawie obserwacji z wybranych stacji meteorologicznych w Polsce. Wiadomości IMGW, 38: 43–59.

Mariusz Klimek, Paweł Krzaklewski, Anita Bokwa

Wydział Geografii i Geologii, Uniwersytet Jagielloński, Kraków, mariusz.klimek@uj.edu.pl,
MK https://orcid.org/0000-0003-0683-894X, PK https://orcid.org/0000-0002-1613-5482,
AB https://orcid.org/0000-0002-3809-7843

Zmienność warunków termicznych i opadowych na Stacji Bazowej ZMŚP Pogórze Karpackie w latach 1991–2020 w perspektywie zmiany klimatu

Variability of thermal and precipitation conditions at the IMNE Base Station Pogórze Karpackie in the years 1991–2020 in the perspective of climate change

Zarys treści: Wyniki analiz pomiarów temperatury powietrza i opadów atmosferycznych na posterunku meteorologicznym w Łazach koło Bochni z okresu 1991–2020 pozwoliły stwierdzić istotny statystycznie trend rosnący średniej rocznej temperatury (0,51°C/dekadę), wzrost udziału dni gorących, upalnych i bardzo upalnych w kolejnych dekadach oraz zmniejszenie udziału dni mroźnych i bardzo mroźnych. Roczne sumy opadów wykazały nieznaczną tendencję wzrostową, nieistotną statystycznie. Dla współczynnika SPI (Standardized Precipitation Index) i RPI (Relative Precipitation Index) udział miesięcy suchych w przypadku kwietnia i czerwca wzrósł w II i III dekadzie analizowanego okresu (w stosunku do I dekady), a miesięcy wilgotnych – w przypadku maja, lipca, września i października. Natomiast w odniesieniu do współczynnika Sielianinowa udział miesięcy suchych w III dekadzie (w stosunku do I i II dekady) znacząco wzrósł tylko dla czerwca.

Słowa kluczowe: Pogórze Wiśnickie, współczynnik Sielianinowa, SPI, RPI, zmiana klimatu

Abstract: Analyses of air temperature and precipitation series from the meteorological station in Łazy near Bochnia, from the period 1991–2020, allowed to confirm statistically significant increasing trend of mean annual air temperature (0.51°C/decade), increase in the share of very warm, hot and very hot days in consecutive decades, together with decrease in the share of frosty and very frosty days. Annual sums of precipitation showed a slight increase but statistically insignificant. For SPI (Standardized Precipitation Index) and RPI (Relative Precipitation Index) indices, the share of dry months for April and June increased in the 2nd and 3rd decade (in comparison with the 1st decade), while for wet

months it increased in May, July, September and October. For Selianinov index, the share of dry months in the 3rd decade increased significantly only in June.

Keywords: Wiśnickie Foothills, Selianinov index, SPI, RPI, climate change

Wprowadzenie

Według raportu IPCC, obszary górskie należą do terenów najbardziej zagrożonych przez zmianę klimatu. Karpaty są położone w Europie Środkowej, gdzie niezależnie od przyjętego scenariusza zmian emisji gazów cieplarnianych przewiduje się wzrost temperatury powietrza o około 2°C w połowie XXI w., co najprawdopodobniej doprowadzi do wzrostu częstości susz (Bokwa i in. 2021, IPCC 2021). Chociaż roczne sumy opadów atmosferycznych w Karpatach należą do najwyższych w Polsce, zaobserwowano wzrost częstości długich okresów bezopadowych w ostatnich dekadach zarówno na przedpolu gór (Twardosz 1999), jak i w samych górach (Cebulska 2013, 2016). Jak podkreślają Werners i in. (za: Alberton i in. 2017), dotychczasowy wzrost temperatury powietrza w Karpatach jest szczególnie znaczący latem, kiedy też coraz częściej występują fale upałów. Zmiany sum opadów cechuje duże zróżnicowanie przestrzenne i czasowe. W południowo-wschodnich i zachodnich Karpatach obserwuje się ich spadek, a wzrost w części północnej i północno-wschodniej (Antofie i in. 2015). Wzrost opadów we wschodniej części Karpat widoczny jest m.in. w zlewni Cisy. Na początku XXI w. miało miejsce więcej powodzi niż w poprzednich 35 latach (Bartholy 2007). Okresy wezbrań jedynie przerywają postępujące zagrożenie suszami. Symulacje klimatyczne wykonane dla drugiej połowy XXI w. pokazują, że należy się spodziewać wzrostu zimowych sum opadu o około 20 mm, zwłaszcza w północnej części Karpat. Prawdopodobnie wzrośnie częstość opadów intensywnych, powodujących wysoki odpływ powierzchniowy, a ograniczoną infiltrację. Jeśli dodamy do tego zmniejszenie ilości wód roztopowych (z powodu coraz mniejszych opadów śniegu), wzrost temperatury powietrza latem i, co za tym idzie, wzrost parowania, to rosnące zagrożenie suszami letnimi wydaje się nieuchronne (Werners i in. za: Alberton i in. 2017).

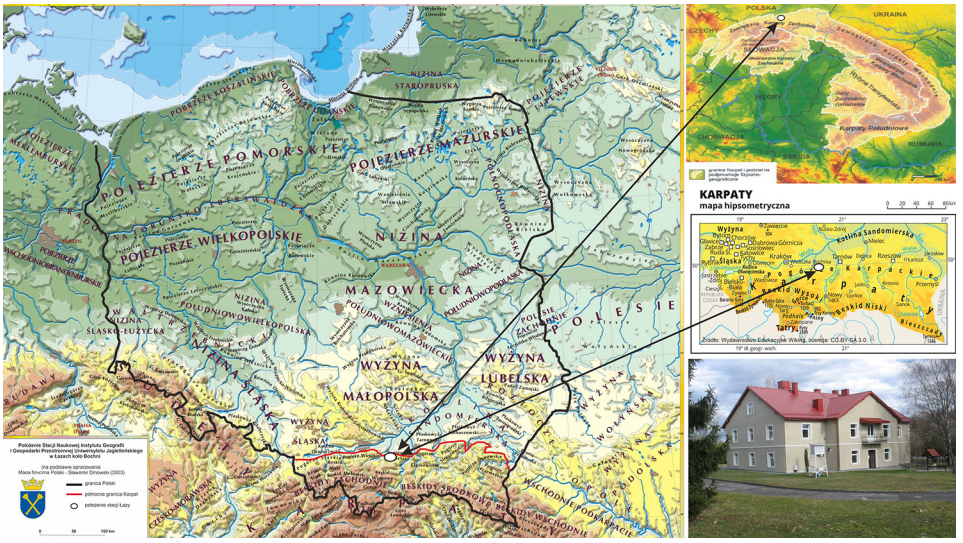
W świetle tych badań monitorowanie i analizowanie zmian temperatury powietrza i opadów na obszarach górskich i pogórskich należy uznać za niezwykle ważne zadanie, tym bardziej że standardowa sieć obserwacyjna na terenach górskich jest znacznie rzadsza niż na nizinnych. Działania takie wpisują się w monitoring geoekosystemów zlewni rzecznych, realizowany w ramach Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego (ZMŚP), który służy zarówno rozpoznaniu aktualnego stanu środowiska przyrodniczego, w skali regionalnej i lokalnej, jak określeniu kierunków i tempa jego przemian. Warunki klimatyczne są elementem zasobów przyrodniczych, które stymulują i zabezpieczają rozwój współczesnych i przyszłych społeczeństw. Mają one istotne znaczenie dla obiegu energii i przepływu materii, który warunkuje tempo i kierunek przemian krajobrazu. Są też źródłem zagrożeń dla działalności człowieka. Analiza wieloletnich meteorologicznych danych pomiarowych i obserwacyjnych pozwala na określenie

jakościowe i ilościowe niektórych wartości progowych w funkcjonowaniu geoekosystemów, a także na rozpoznanie zmienności i tendencji zmian warunków klimatycznych.

Celem niniejszej pracy jest scharakteryzowanie warunków termicznych i pluwialnych Pogórza Wiśnickiego na podstawie danych meteorologicznych z lat 1991–2020 ze Stacji Bazowej Pogórze Karpackie w Łazach koło Bochni. Wyniki analiz dokumentują aktualne warunki klimatyczne, kształtujące się w dobie globalnego ocieplenia, dla terenu pogórskiego, gdzie lokalne warunki pogodowe i klimatyczne są znacząco modyfikowane przez procesy atmosferyczne generowane przez zróżnicowaną rzeźbę powierzchni.

Obszar badań, dane i metody

Posterunek meteorologiczny Stacji Bazowej Pogórze Karpackie w Łazach położony jest na lokalnym wzniesieniu o wysokości 245 m n.p.m. i współrzędnych: 49.96521° N, 20.49537° E w strefie przejściowej pomiędzy Karpatami i Kotliną Sandomierską. Kondracki (1994) zalicza ten obszar do północnej części Kotliny Sandomierskiej, do tzw. Podgórza Bocheńskiego. Starkel (1988) natomiast widział na tym terenie więcej cech karpackich i zaliczył go do Przedgórza Brzeskiego będącego jednostką niższego rzędu Pogórza Wiśnickiego, które wchodzi w skład Pogórza Wielickiego będącego północnym skrajem Karpat (ryc. 1).



Ryc. 1. Położenie Stacji Bazowej Pogórze Karpackie oraz posterunku meteorologicznego
Źródła rycin składowych: 1 – mapa fizyczna Polski (Dmowski 2003), 2 – Karpaty – Mapa hipsometryczna (Wiking: Licencja CC-BY-SA-3.0).

Fig. 1. Location of the Base Station Pogórze Karpackie and the meteorological station
Sources of component figures: 1 – Physical map of Poland (Dmowski 2003), 2 – Carpathians – Hypsometric map (Wiking: License CC-BY-SA-3.0).

Standardowe pomiary meteorologiczne rozpoczęto na Stacji 1 listopada 1986 r., a od 1 sierpnia 1988 r. posterunek został włączony do krajowej sieci IMGW. Od listopada 2015 r. wprowadzono automatykę pomiarów standardowych oraz rozszerzono ich zakres o pomiar promieniowania i parowania. W pracy analizowano dane dotyczące temperatury powietrza i opadów atmosferycznych za okres 1991–2020 z pomiarów manualnych wykonywanych trzy razy na dobę w standardowych terminach pomiarowych. Obliczono wskaźniki uwzględnione i opisane w metodyce badań ZMŚP (Kostrzewski, Majewski 2021) oraz dodatkowe, istotne z punktu widzenia funkcjonowania środowiska pogórskiego:

– średnie miesięczne, półroczne (IV–X i XI–III) i roczne wartości temperatury powietrza, na podstawie średnich dobowych wartości otrzymanych ze wzoru:

$$T_{śr.dob.} = \frac{(t_{06} + t_{18} + t_{max} + t_{min})}{4};$$

T_{06} – temperatura powietrza o godzinie 6:00 GMT;
T_{18} – temperatura powietrza o godzinie 18:00 GMT;
t_{max} – maksymalna dobowa temperatura;
t_{min} – minimalna dobowa temperatura;

– średnia roczna z amplitud dobowych temperatur,
– zakres temperatury:

$$Z_{temp.} = t_{max}\ abs - t_{min}\ abs;$$

t_{max} abs – absolutne maksimum temperatury; najwyższa temperatura zmierzona w wieloleciu;
t_{min} abs – absolutne minimum temperatury; najniższa temperatura zmierzona w wieloleciu;
– roczna liczba dni upalnych (t_{max} >30°C), gorących (t_{max} >25°C), mroźnych (t_{max} <0°C) i bardzo mroźnych (t_{max} <–10°C);
– termiczne pory roku, wyznaczone metodą rachunkową Gumińskiego (Kostrzewski, Majewski 2021) i zmiany początku i końca ich występowania; za okres wegetacyjny przyjęto łączny czas trwania wiosny, lata i jesieni, obliczony według tej metody;
– sumy miesięczne i roczne opadów atmosferycznych i ich średnie wieloletnie;
– roczna liczba dni z opadem ≥0,0, ≥0,1, ≥ 1,0, ≥10,0, ≥20,0 i ≥30,0 mm;
– zaklasyfikowano każdy rok według klasyfikacji opadowej Kaczorowskiej (1962, zm.);
– zestawiono występowanie przypadków długotrwałych opadów rozlewnych o sumie ≥200 mm/3 doby oraz opadu dobowego >50 mm;
– określono występowanie suszy meteorologicznej, czyli okresów, kiedy opady nie występują przez co najmniej 15 dni;
– obliczono współczynnik hydrotermiczny Sielianinowa (Gałęzewska, Kapuściński 1978), wskaźniki SPI (World… 2012) i RPI (Gąsiorek, Musiał 2011) według poniższych wzorów:

Współczynnik hydrotermiczny Sielianinowa:
K = 10P/Σt,
P – miesięczna suma opadów,
Σt – suma średnich dobowych wartości temperatury powietrza >0°C w danym miesiącu.

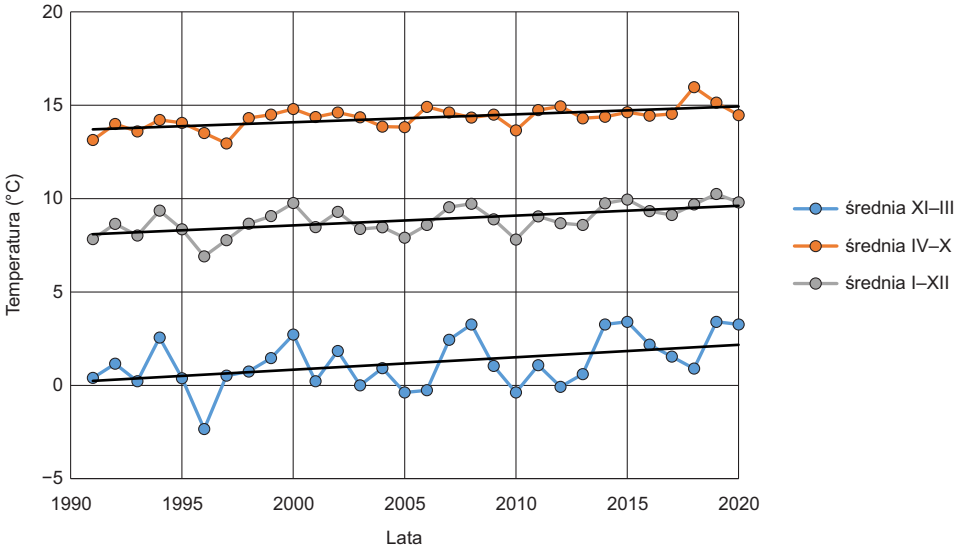
Wskaźnik standaryzowanego opadu SPI (*Standardized Precipitation Index*):
- **SPI** = (P1/3 – μ)/σ,
- P – miesięczna suma opadów atmosferycznych,
- μ – wartość średnia znormalizowanego ciągu opadów z wielolecia,
- σ – średnie odchylenie standardowe znormalizowanego ciągu opadów z wielolecia.

Wskaźnik względnego opadu RPI (*Relative Precipitation Index*):
- **RPI**=P/Pśr·100%,
- P – suma opadów w danym okresie,
- Pśr – wartość średnia opadów z wielolecia.

Dla wybranych wieloletnich serii danych wyznaczono trendy liniowe i zbadano ich istotność statystyczną.

Temperatura powietrza

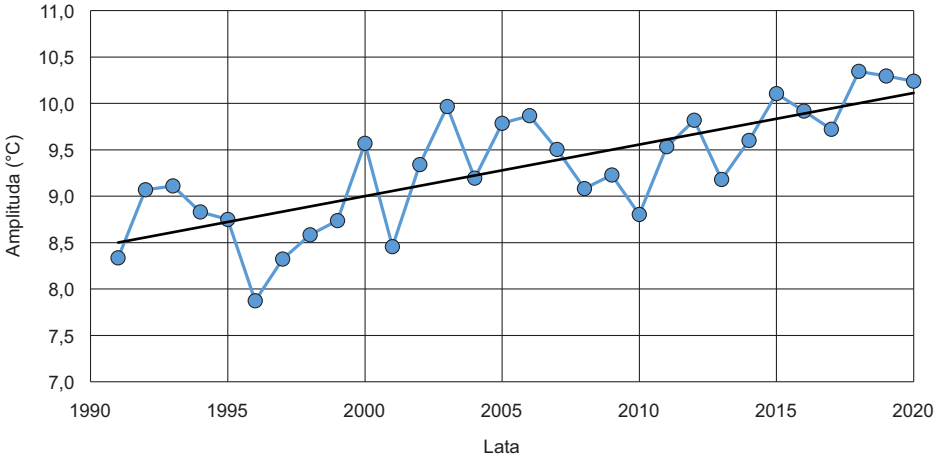
Średnia roczna temperatura powietrza w Łazach w okresie 1991–2020 wyniosła 8,9°C, a absolutny zakres temperatury 65,5°C. Najzimniejszym miesiącem był



Ryc. 2. Przebieg średnich rocznych, średnich z półrocza letniego i średnich z półrocza zimowego dla wartości temperatury w latach 1991–2020 w Łazach
Fig. 2. The course of annual mean, summer half-year and winter half-year mean temperatures in the years 1991–2020 in Łazy

styczeń ze średnią temperaturą –1,4°C, a najcieplejszym lipiec z wartością 19,2°C. Absolutne minimum: –29,4°C zanotowano 23 stycznia 2006 r., a maksimum: 36,1°C 8 sierpnia 2013 r. Temperatury średnie roczne wykazywały istotny statystycznie trend rosnący wynoszący 0,51°C/dekadę, podobnie jak średnie temperatury półrocza zimowego i letniego, przy czym większy był wzrost temperatury w półroczu zimowym: 0,65°C/dekadę niż w półroczu letnim: 0,41°C/dekadę (ryc. 2). Średnie temperatury w poszczególnych miesiącach wykazywały tendencję rosnącą, ale statystycznie istotny trend wzrostowy odnotowano tylko dla kwietnia (0,72°C/dekadę), czerwca (0,65°C/dekadę), sierpnia (0,49°C/dekadę), września (0,46°C/dekadę) i największy dla grudnia (1,34°C/dekadę). Średnie roczne temperatury maksymalne i minimalne wykazały tendencję wzrostową, ale tylko maksymalne – statystycznie istotny trend wzrostowy 0,75°C/dekadę.

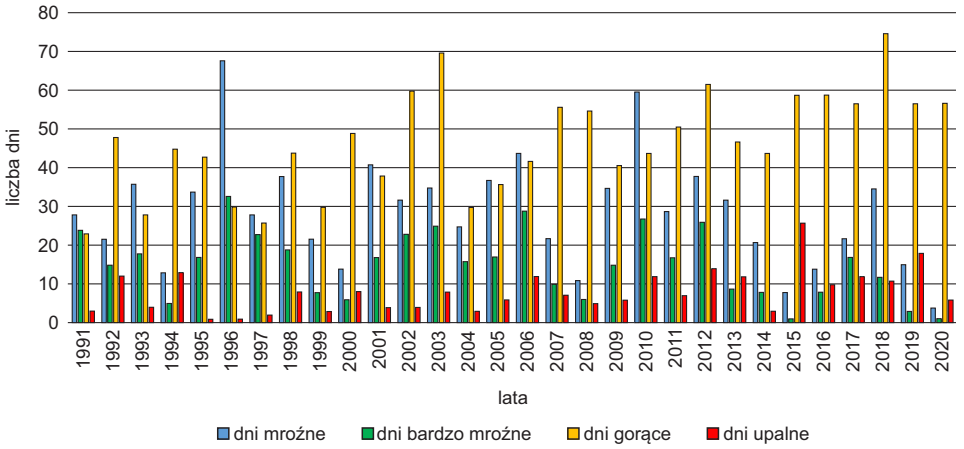
Średnia roczna amplituda dobowa temperatury powietrza wykazała w badanym okresie względnie małą zmienność i statystycznie istotny trend wzrostowy wynoszący 0,54°C/dekadę (ryc. 3). Największa amplituda wystąpiła w 2019 r. (10,3°C), a najmniejsza w 1996 r. (7,9°C). Średnia roczna wartość wieloletnia wyniosła 9,3°C. W pierwszej dekadzie badanego 30-lecia średnia roczna amplituda dobowa wyniosła 8,7°C, a w trzeciej osiągnęła wartość 9,9°C.



Ryc. 3. Przebieg średniej rocznej dobowej amplitudy powietrza w latach 1991–2020 w Łazach
Fig. 3. The course of the annual mean daily air amplitude in the years 1991–2020 in Łazy

Analiza dni charakterystycznych w poszczególnych latach 30-lecia 1991–2020 wykazała wzrost liczby dni gorących, upalnych oraz spadek liczby dni mroźnych i bardzo mroźnych (ryc. 4). Wzrosty i spadki były istotne statystycznie dla dni bardzo mroźnych, gorących i upalnych i wynosiły odpowiednio: –3,9 dnia/dekadę, +9,5 dnia/dekadę i +3,0 dnia/dekadę.

Nastąpiły również zmiany w długości termicznych pór roku. Znacznemu wydłużeniu uległo przedzimie (ze średnio 33 dni w pierwszej dekadzie do 51 dni w III dekadzie) i lato (ze 102 do 110 dni) oraz wiosna (z 61 do 67 dni). Dużemu



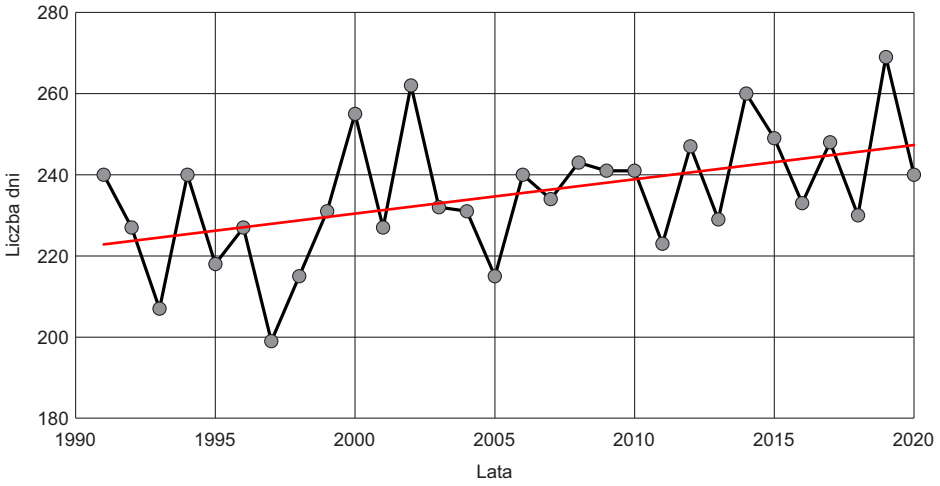
Ryc. 4. Roczna liczba dni mroźnych, bardzo mroźnych, gorących i upalnych w okresie 1991–2020 w Łazach oraz trendy liniowe dla zmian istotnych statystycznie
Fig. 4. Annual number of frosty, very frosty, hot and hot days in the period 1991–2020 in Łazy and linear trends for statistically significant changes

skróceniu uległa zima (ze średnio 68 dni w I dekadzie do 40 dni w III dekadzie) oraz w mniejszym stopniu przedwiośnie (ze średnio 41 do 34 dni) (tab. 1).

Tabela 1. Średnia długość pór roku w latach 1991–2020 w Łazach
Table 1. The average length of the seasons in the years 1991–2020 in Łazy

Termiczna pora roku	Średnia [dni]			
	1991–2000	2021–2010	2011–2020	1991–2020
Zima	68	54	40	54
Przedwiośnie	41	38	34	38
Wiosna	61	64	67	64
Lato	102	103	110	105
Jesień	63	69	66	66
Przedzimie	33	33	51	39

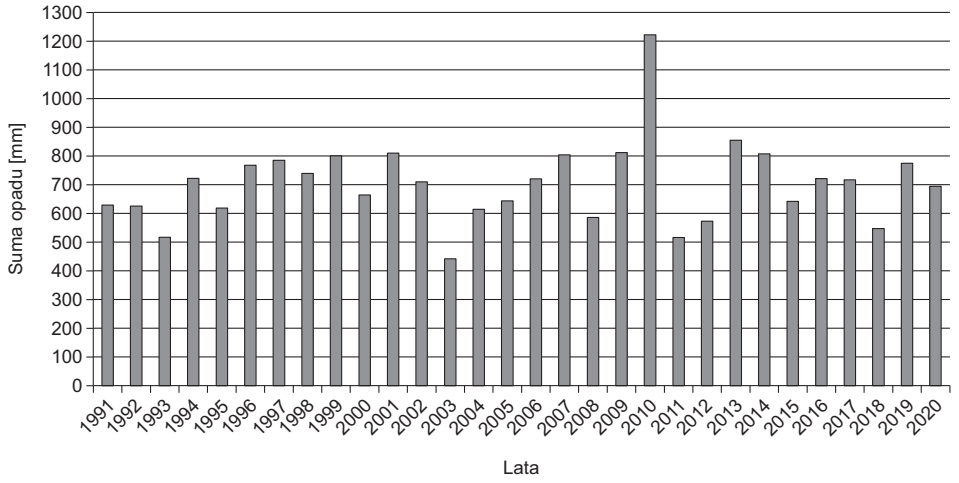
Średnia długość okresu wegetacyjnego w latach 1991–2020 wynosiła 235 dni i wykazała statystycznie istotny trend wzrostowy: 8,5 dnia/dekadę (ryc. 5). Średnia długość w poszczególnych dekadach badanego 30-lecia wykazywała również wyraźny wzrost od 226 dni w pierwszej dekadzie, przez 237 dni w drugiej dekadzie, do 245 dni w trzeciej dekadzie.



Ryc. 5. Długość okresu wegetacyjnego w Łazach w latach 1991–2020
Fig. 5. The length of the vegetation period in Łazy in the years 1991–2020

Opady atmosferyczne

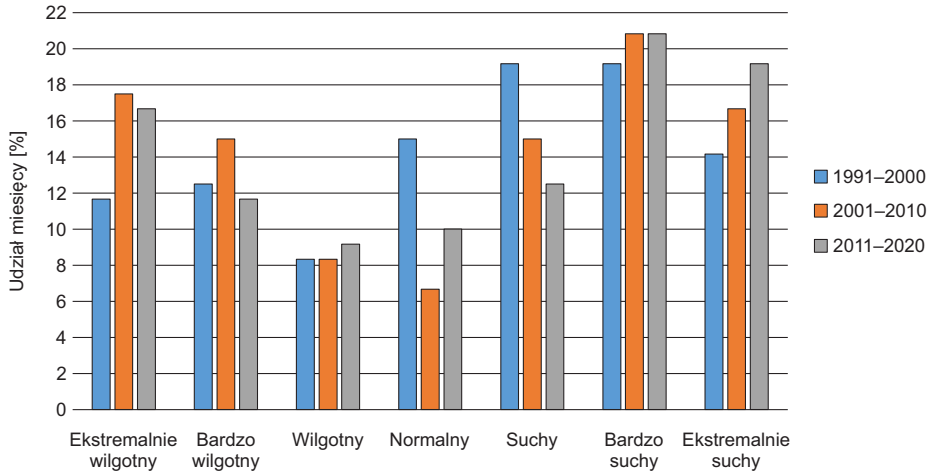
W 30-leciu 1991–2020 średnia roczna suma opadów wynosiła 702,8 mm. Najwyższe średnie miesięczne sumy opadu występowały w lipcu (102,5 mm) i czerwcu (101,8 mm), a najniższe w grudniu (27,8 mm) i lutym (28,6 mm). Najwyższą roczną sumę opadów zarejestrowano w 2010 r. – 1221,9 mm, a najniższą w 2003 r. – 334,1 mm. Najwyższą miesięczną sumę opadów zanotowano w maju 2000 r. – 334,3 mm, a najniższą w kwietniu 2009 r. – 0,3 mm. Najwyższą dobową



Ryc. 6. Roczne sumy opadów w latach 1991–2020 w Łazach
Fig. 6. Annual rainfall totals in the years 1991–2020 in Łazy

sumę opadów zmierzono 16 maja 2010 r. i wyniosła ona 91,9 mm. Przebieg rocznych sum opadów w okresie 1991–2020 wykazał nieznaczną tendencję wzrostową, jednakże statystycznie nieistotną (ryc. 6).

Roczne liczby dni z dobowymi sumami opadów od ≥0,0 do ≥30,0 mm wykazywały niewielkie, statystycznie nieistotne tendencje zmian, podobnie jak sumy roczne opadów. Klasyfikacja miesięcznych sum opadów przeprowadzona metodą Kaczorowskiej (1962, zm.) wykazała, że w kolejnych dekadach badanego okresu udział miesięcy ekstremalnie suchych wzrósł z 14% w latach 1991–2000 do 19% w dekadzie 2011–2020. Miesiące bardzo suche stanowią najwyższy odsetek ze wszystkich kategorii w ostatnich dwu dekadach badanego okresu (21%), podczas gdy miesiące normalne w dekadzie 2011–2020 to zaledwie 10% (ryc. 7).



Ryc. 7. Udział miesięcy w poszczególnych klasach według metody Kaczorowskiej w kolejnych dekadach okresu 1991–2020 w Łazach

Fig. 7. The share of months in individual classes according to the Kaczorowska method in subsequent decades of the period 1991–2020 in Łazy

W badanym okresie na stacji w Łazach nie wystąpiły długotrwałe opady rozlewne o sumie ≥200 mm/3 doby. Dni z opadem dobowym >50 mm występowały sporadycznie. W dekadzie 1991–2000 było 5 takich przypadków, w kolejnej dekadzie 10, ale w latach 2011–2020 tylko 3. W następnych dekadach występowało coraz mniej przypadków suszy meteorologicznej, czyli okresów kiedy opady nie występują przez co najmniej 15 dni. W latach 1991–2000 było ich 6, w kolejnej dekadzie 4, a w latach 2011–2020 wyłącznie 2.

Wskaźniki SPI, RPI oraz współczynnik Sielianinowa

W celu analizy badanego 30-lecia 1991–2020 pod względem deficytu lub nadmiaru wody, w tym pod kątem zagrożenia suszą, posłużono się wskaźnikami SPI,

RPI oraz współczynnikiem Sielianinowa. Wskaźnik standaryzowanego opadu SPI i względnego opadu RPI wykorzystuje w formule obliczeniowej dane opadowe, natomiast współczynnik Sielianinowa oprócz opadu – także dane dotyczące temperatury powietrza. Analiza badanego okresu pod względem udziału miesięcy: suchych, normalnych i wilgotnych w poszczególnych dekadach wykazała dla współczynników SPI i RPI wyraźne zwiększenie udziału miesięcy suchych (w przypadku kwietnia i czerwca), ale również miesięcy wilgotnych (w przypadku maja, lipca, września i października) w II i III dekadzie w stosunku do I dekady badanego okresu. Tylko dla sierpnia nie wykazano zmian o jednoznacznej tendencji. Dla współczynnika Sielianinowa jedynie w przypadku czerwca wyraźnie wzrósł udział miesięcy suchych w III dekadzie w stosunku do I i II dekady. Pozostałe miesiące albo nie były analizowane (kwiecień, październik) ze względu na metodykę obliczeń, albo nie wykazywały istotnych tendencji w udziale dla poszczególnych dekad i klas wilgotności (tab. 2).

Tabela 2. Liczba miesięcy suchych, wilgotnych i normalnych według współczynnika Sielianinowa oraz wskaźników SPI i RPI w kolejnych dekadach okresu 1991–2020
Table 2. The number of dry, wet and normal months according to the Sielianinow coefficient and the SPI and RPI indices in the subsequent decades of the period 1991–2020

Miesiące	Miesiące	IV			V			VI			VII			VIII			IX			X		
	Dekady	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Współczynnik hydrotermiczny Sielianinowa [liczba miesięcy]																						
Suche	<1,4				2	2	3	2	3	6	5	5	6	6	7	6	4	5	4			
Normalne	1,4–1,6				3	1	1	2	1	1	2	0	0	2	0	1	1	0	0			
Wilgotne	>1,6				5	7	6	6	6	3	3	5	4	2	3	3	5	5	6			
Wskaźnik standaryzowanego opadu SPI [liczba miesięcy]																						
Suche	<–0,49	1	4	4	5	3	3	1	3	6	5	2	3	3	3	3	3	4	4	3	4	1
Normalne	–0,49–0,49	6	4	4	5	4	2	8	3	2	2	4	4	5	4	4	6	1	1	2	3	5
Wilgotne	>0,49	3	2	2	0	3	5	1	4	2	3	4	3	2	3	3	1	5	5	5	3	4
Wskaźnik względnego opadu RPI [liczba miesięcy]																						
Suche	<75%	1	6	5	5	4	4	2	4	6	5	4	4	3	4	3	4	4	4	4	2	2
Normalne	75–125%	6	2	3	5	4	2	6	2	2	4	2	3	5	3	4	5	1	1	2	4	4
Wilgotne	>125%	3	2	2	0	2	4	2	4	2	1	4	3	2	3	3	1	5	5	4	4	4

Podsumowanie i wnioski

Przedstawione wyniki analiz prezentują główne cechy termiczne i opadowe klimatu progu Pogórza Karpackiego, w jego zachodniej części, w okresie 1991–2020. Są one zgodne z wynikami innych badań klimatu polskich Karpat, wskazującymi na postępujący wzrost temperatury powietrza, związany z globalną zmianą klimatu, oraz dużą zmienność opadów atmosferycznych, które nie wykazują jednoznacznego trendu spadkowego lub wzrostowego (Bokwa i in. 2021). W badanym okresie średnia roczna temperatura powietrza zwiększała się o 0,51°C/dekadę, przy czym wzrost ten był większy w półroczu zimowym 0,65°C/dekadę

niż letnim 0,41°C/dekadę. Są to wartości relatywnie wysokie w porównaniu do całego obszaru kraju; wzrost temperatury na terenie Polski wynosi od 0,3 do 0,6°C (Żmudzka 2009, Michalska 2011). Globalne ocieplenie spowodowało na Pogórzu istotny statystycznie spadek rocznej liczby dni bardzo mroźnych (–3,9 dnia/dekadę) i wzrost rocznej liczby dni gorących i upalnych (+9,5 i +3,0 dnia/dekadę), a także wydłużenie termicznego przedzimia, wiosny i lata, przy jednoczesnym skróceniu zimy i przedwiośnia, co przełożyło się na wydłużenie okresu wegetacyjnego średnio o 9 dni/dekadę. Chociaż roczne sumy opadów nie uległy istotnym zmianom w badanym okresie, widoczna jest postępująca zmiana w rozkładzie opadów w ciągu roku, czego dowodzi wzrost udziału miesięcy ekstremalnie suchych z 14% w latach 1991–2000 do 19% w dekadzie 2011–2020. Region Pogórza, choć należący do obszaru karpackiego, gdzie sumy opadów atmosferycznych należą do najwyższych w kraju, w coraz większym stopniu jest narażony na niedobory opadów, o czym świadczy fakt, że w ostatnich dwu dekadach badanego okresu miesiące bardzo suche (wg klasyfikacji Kaczorowskiej) stanowiły 21%, a miesiące normalne zaledwie 10%. Wskaźniki SPI i RPI oraz współczynnik Sielianinowa wskazały na wzrost udziału miesięcy suchych dla wybranych miesięcy półrocza ciepłego, a równocześnie na wzrost miesięcy wilgotnych dla innych miesięcy tego półrocza, co dowodzi tendencji do wzrostu nierównomierności rozkładu opadów w czasie. Wyniki te potwierdzają i uszczegóławiają rezultaty badań uzyskane przez Czarnecką i Niedzgorską-Lencewicz (2012), które podkreślały, że w latach 1951–2010 na znacznym obszarze Polski obserwowano malejący udział opadów letnich w sumie rocznej. Spinoni i in. (2013) zwracają uwagę na wzrost częstotliwości susz w pierwszym 20-leciu XXI w. oraz postępujący kontynentalizm klimatu, zwłaszcza w rumuńskiej części Karpat Wschodnich. Świadczy to o narastaniu cech kontynentalizmu pluwialnego, co potwierdziły dla obszaru karpackiego także badania Bochenka i in. (2018). W Karpatach Południowych wyraźnie zaznaczył się wzrost opadów ekstremalnych związanych z bardziej intensywną konwekcją w miesiącach letnich, co z kolei wynika ze wzrostu temperatury powietrza. Trend w sposób zauważalny zaznaczył się po 2003 r., kiedy dominowały dodatnie anomalie temperatury (Micu i in. 2021). Analiza wartości współczynnika Sielianinowa wykazała duży wzrost udziału miesięcy suchych w czerwcu, co dowiązuje do wyników uzyskanych przez Skowerę (2014), która stwierdziła występowanie podobnego zjawiska na większości obszaru Polski w latach 1971–2010.

Zaobserwowane tendencje oznaczają, że w przyszłości należy się spodziewać na obszarze Pogórza Karpackiego wzrostu zagrożenia suszą. Prognozowany jest spadek rocznych sum opadów o około 20% w półroczu ciepłym, przy jednoczesnym ich wzroście w miesiącach zimowych (Werners i in. 2016). Już obecnie postępujący wzrost temperatury przyczynia się do wzrostu wielkości parowania, a opisane zmiany w opadach, nawet przy utrzymaniu się dotychczasowych sum rocznych, dodatkowo pogłębią problemy z dostępnością wody dla celów komunalnych, rolnictwa czy roślinności dziko rosnącej. Konieczne zatem jest wdrażanie wszelkich działań wspomagających magazynowanie wody opadowej w okresach jej nadmiaru, tak aby można ją wykorzystać w okresach niedoborów opadów.

Literatura

Alberton M., Andresen M., Citadino F., Egerer H., Fritsch U., Götsch H., Hoffmann C., Klemm J., Mitrofanenko A., Musco E., Noellenburg N., Pettita M., Renner K., Zebisch M., 2017. Outlook on climate change adaptation in the Carpathian mountains. United Nations Environment Programme, GRID-Arendal and Eurac Research, Nairobi, Vienna, Arendal and Bolzano (www.unep.org, www.grida.no, www.eurac.edu; http://www.carpathianconvention.org/tl_files/carpathiancon/Downloads/02%20Activities/Climate%20Change/MP_Carpathians_lores.pdf).

Antofie T., Naumann G., Spinoni J., Vogt J., 2015. Estimating the water needed to end the drought or reduce the drought severity in the Carpathian region. Hydrol. Earth Syst. Science, 19: 177–193.

Bartholy J., Pongracz R., 2007. Regional analysis of extreme temperature and precipitation indices for the Carpathian Basin from 1946 to 2001. Global and Planetary Change, 57, 1–2: 83–95.

Bochenek W., Kijowska-Strugała M., Kiszka K., 2018. Wieloletnie tendencje warunków klimatycznych w Szymbarku na podstawie wybranych wskaźników. Przegląd Geograficzny, 90, 1: 35–52.

Bokwa A., Klimek M., Krzaklewski P., Kukułka W., 2021. Drought trends in the Polish Carpathian Mts. in the years 1991–2020. Atmosphere, 12, 10, 1259.

Cebulska M., 2013. Okresy bez opadów i ze słabymi opadami w polskich Karpatach (1984–2013). Pol. J. Agron., 34: 52–61.

Cebulska M., 2016. Niedobór opadów atmosferycznych w okresie wegetacyjnym w zlewni Małej Wisły (1984–2013). Acta Sci. Pol. Form. Circumiectus, 15: 13–26.

Czarnecka M., Nidzgorska-Lencewicz J., 2012. Wieloletnia zmienność sezonowych opadów w Polsce. Woda–Środowisko–Obszary Wiejskie, 12, 2(38): 29–44.

Gałęzewska M., Kapuściński J., 1978. Próba określenia prawdopodobieństwa posuchy i suszy w Wielkopolsce na przykładzie Poznania. Ann. Agric. Acad. Poznań, 105: 3–11.

Dmowski S., 2003. Mapa fizyczna Polski. Warszawa.

Gąsiorek E., Musiał E., 2011. Porównanie i klasyfikacja warunków opadowych na podstawie wskaźnika standaryzowanego opadu i wskaźnika względnego opadu. Woda–Środowisko–Obszary Wiejskie, 11: 107–119 (https://www.itp.edu.pl/old/wydawnictwo/woda/zeszyt_36_2011/artykuly/Gasiorek%20Musial.pdf; dostęp: 5.08.2021).

IPCC, 2021. Sixth Assessment Report, Working Group I – The Physical Science Basis, Regional Fact Sheet –Europe. 2021 (https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/#Regional; dostęp: 5.08.2021).

Kaczorowska Z., 1962. Opady w Polsce w przekroju wieloletnim. Prace Geograficzne IG PAN, 33: 1–107.

Kondracki J., 1994. Geografia Polski. Mezoregiony fizycznogeograficzne. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.

Kostrzewski A., Majewski M. (red.), 2021. Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Organizacja, system pomiarowy, metody badań. Wytyczne do realizacji. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa.

Michalska B., 2011. Tendencje zmian temperatury powietrza w Polsce. Prace Studia Geogr., 47: 67–75.

Micu D.M., Amihaesei V.A., Milian N., Cheval S., 2021. Recent changes in temperature and precipitation indices in the Southern Carpathians, Romania. Theoretical and Applied Climatology, 144: 691–710

Skowera B., 2014. Zmiany warunków hydrotermicznych na obszarze Polski (1971–2010). Fragm. Agron., 31(2): 74–87.

Spinoni J., Antofie T., Barbosa P., Bihari Z., Lakatos M., Szalai S., Szemtimrei T., Vogt J., 2013. An overview of drought events in the Carpathian Region, in 1961–2010. Advances in Science & Research, 10: 21–32.

Starkel L., 1988. Paleogeography of the periglacial zone in Poland during the maximum advance of the Vistulian ice-sheet. Geographia Polonica, 55: 151–163.

Twardosz R., 1999. Charakterystyka okresów bezopadowych w Krakowie 1863–1995. Geogr. Rev., 71: 435–446 (http://www.formatiocircumiectus.actapol.net/pub/15_2_13.pdf; dostęp: 5.08.2021).

Werners S.E., Szalai S., Zingstra H., Kőpataki E., Beckmann A., Bos E., Civic K., Hlásny T., Hulea O., Jurek M., Koch H., Kondor A.C, Kovbasko A., Lakatos M., Lambert S., Peters R., Trombik J., van de Velde I., Zsuffa I., 2016. Climate Change Adaptation in the Carpathian Mountain Region. [W:] N. Salzmann, C. Huggel, S. Nussbaumer, G. Ziervogel (red.), Climate Change Adaptation Strategies – An Upstream downstream Perspective: 79–99.

World Meteorological Organization. Standardized Precipitation Index User Guide, 2012. WMO-No. 1090. World Meteorological Organization: Geneva, Switzerland.

Żmudzka E., 2009. Współczesne zmiany klimatu Polski. Acta Agrophys., 13(2): 555−568.

Monitoring w zróżnicowanych warunkach środowiska przyrodniczego

Monitoring in various natural environment conditions

Jezioro Czarne w zlewni górnej Parsęty

Janina Borysiak, Małgorzata Stępniewska

Wydział Geografii Społeczno-Ekonomicznej i Gospodarki Przestrzennej,
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznani, janina.borysiak@amu.edu.pl,
JB https://orcid.org/0000-0001-8957-7372, MS https://orcid.org/0000-0003-1052-648X

Florystyczna różnorodność przesłanką rewaloryzacji poniemieckich cmentarzy dorzecza Parsęty (Pomorze Zachodnie) i ich kulturowych usług ekosystemowych

Floristic diversity as a premise for the revalorization of post-German cemeteries of the Parsęta River basin (Western Pomerania) and their cultural ecosystem services

Zarys treści: Skartowano spontaniczną florę naczyniową 37 poniemieckich cmentarzy ewangelickich zamkniętych po II wojnie światowej. Przez 80 lat na ich obszarach zachodziły procesy wtórnej sukcesji roślinności. Doprowadziły do rozwoju flory o wysokim stopniu naturalności oraz wykształcenia roślinności, która swą strukturą nawiązuje do naturalnych fitocenoz leśnych. Przedstawiono gatunkowe bogactwo i różnorodność skartowanej flory. Stwierdzono, że w niedawno wykonanych pracach porządkowych nie uwzględniono wartości przyrodniczych nabytych w toku wtórnej sukcesji roślinności. Określono znaczenie nekropolii dla dostarczania kulturowych usług ekosystemowych. Wskazano na konieczność opracowania standardów pielęgnacji zieleni nieczynnych poniemieckich cmentarzy, które będą uwzględniać zarówno ochronę bioróżnorodności, jak i dostarczane przez nią usługi ekosystemowe związane z eko-tanatoturystyką.

Słowa kluczowe: bioróżnorodność, eko-tanatoturystyka, flora, usługi ekosystemów

Abstract: The spontaneous vascular flora of 37 post-German Evangelical cemeteries, closed shortly after World War II, was mapped. For 80 years, processes of secondary vegetation succession took place in their areas. They caused the development of flora with a high degree of naturalness and vegetation formation, whose structure refers to natural forest phytocoenoses. Plant species richness and diversity of the found flora are presented. Gardening care practices performed relatively recently were found, not taking into account the natural values acquired during secondary vegetation succession. The importance of necropolises in providing cultural ecosystem services was determined. The necessity to develop standards for the care of greenery in closed post-German Evangelical cemeteries

was indicated, which will consider both the protection of biodiversity and the ecosystem services related to the eco-thanatotourism.

Keywords: biodiversity, eco-thanatotourism, flora, ecosystem services

Wprowadzenie

Na Ziemiach Zachodnich i Północnych odzyskanych przez Polskę po II wojnie światowej (Stachowiak 2015) znajdują się nieczynne, poniemieckie cmentarze ewangelickie. Na mocy ustawy z 8 maja 1945 r. o majątkach opuszczonych i porzuconych cmentarze te przeszły pod administrację Głównego Urzędu Tymczasowego Zarządu Państwowego, podlegającego Ministrowi Skarbu (Dz.U. nr 17 poz. 97). Od tego czasu nie były formalnie objęte żadnymi działaniami konserwatorskimi (Marcinek 2019). Dużą część z nich zinwentaryzowano, a wyniki zapisano w tzw. karcie cmentarza. Zdigitalizowane karty są zdeponowane w zasobach Narodowego Instytutu Dziedzictwa (np. https://zabytek.pl/pl/obiekty/cmentarz-ewangelicki-690787). Pilotażowe badania autorskie dowiodły, że w dorzeczu Parsęty nekropolie te są elementem wiejskich krajobrazów opanowanych przez antropogeniczną roślinność synantropijną. Są to specyficzne ekosystemy wchodzące w skład zielonej infrastruktury (EEA 2011), *hot spots* bioróżnorodności i generowanych przez nie wiązek usług ekosystemowych (Science 2015). Przez blisko 80 lat na ich obszarach zachodziły procesy wtórnej sukcesji roślinności, rozpoczęte w momencie zaprzestania ich użytkowania, a także dokonanej (urzędowo) rozbiórki nagrobków i innych elementów architektonicznych. Sukcesja doprowadziła do rozwoju roślinności nawiązującej do naturalnych fitocenoz leśnych i zazwyczaj towarzyszącej im ziołoroślowej.

Nieczynne, ewangelickie cmentarze poniemieckie są ekosystemami o dużym kulturowym potencjale (Wałkowska 2019). Zainteresowanie tymi obiektami może być motywowane walorami dziedzictwa historycznego i edukacyjnymi, a także symbolicznym, religijnym i artystycznym. Większość polskiego społeczeństwa postrzega jednak te nekropolie jako kłopotliwe dziedzictwo po niemieckiej okupacji. Znaczenia określone przez Wałkowską (2019) to kulturowe usługi świadczone przez cmentarne ekosystemy (https://cices.eu/). Rydzewska i in. (2011) stwierdzili, że zainteresowaniu dawnymi cmentarzami ludności niemieckiej może towarzyszyć chęć uporządkowania terenu w celu przywrócenia pamięci o zmarłych.

Spontaniczna szata roślinna cmentarzy leżących w granicach Polski była stosunkowo rzadko badana pod względem flory naczyniowej, jej gatunkowego bogactwa i różnorodności. Analizowali ją m.in.: w północnych regionach kraju – Stachak i Grinn (1992), Hołdyński i Żurkowska (2001), Sobisz i Antkowiak (2009), Sigiel-Dopierała i Jagodziński (2011), Majgier (2012) oraz Majgier i Rahmanov (2013); w Wielkopolsce – Czarna (2001, 2004, 2005), Celka i Żywica (2004), Antkowiak i Heine (2005), Konon i in. (2005) oraz Czarna i in. (2011); w centrum i na południu kraju – Galera i in. (1993), Czarna i Piskorz (2005, 2006), Czarna i Nowińska (2010a, b), Jędrzejko i Walusiak (2010), Dębicz (2012),

Jędrzejko i in. (2013), a także Trzaskowska i Karczmarz (2013). Dotychczasowe stosunkowo niewielkie zainteresowanie spontaniczną roślinnością nekropolii zainspirowało do studiów na obszarach ewangelickich cmentarzy poniemieckich. W latach 2013–2021 przeprowadzono badania, których celem była ocena przyrodniczej wartości spontanicznej flory naczyniowej takich cmentarzy i jej znaczenia dla kulturowych świadczeń ekosystemowych.

Obszar i metody badań

W latach 2013–2021 skartowano spontaniczną florę naczyniową 37 nieczynnych cmentarzy ewangelickich leżących w dorzeczu Parsęty (tab. 1). Miały powierzchnię od 0,17 do 1,0 ha (łącznie 16,15 ha). W terenie ich granice zazwyczaj wyznaczały murki z kamienia polnego. Z kart cmentarzy (https://zabytek.pl/pl) wynikało, że prawie wszystkie założono między początkiem XIX w. a połową XX w., nieczynne zaś po ukończeniu II wojny światowej. Na każdym cmentarzu spisano spontanicznie występujące gatunki roślin. Spisem nie objęto roślin stanowiących celowe nasadzenia, z wyjątkiem tych, które samoistnie kolonizowały obszar cmentarza. Na podstawie spisów zestawiono ogólną florę naczyniową wszystkich cmentarzy łącznie. Skład tej flory, liczącej 208 gatunków, analizowano pod kątem bogactwa i różnorodności roślin, a także wartości przyrodniczej. W diagnozie wzięto pod uwagę takie cechy każdego z gatunków, jak: pozycja taksonomiczna według Mirka i in. (2020), ogólny zasięg geograficzny podany przez Zająca i Zająca (2009), indeks kontynentalizmu/oceanizmu za Vent i Schubert (1976), status geograficzno-historyczny za Tokarską-Guzik i in. (2012), ranga syntaksonomiczna wskazana przez Brzega i Wojterską (2001) lub Matuszkiewicza (2022), forma życiowa Raunkiaera określona przez Zarzyckiego i in. (2002) oraz ekologiczne wskaźniki Ellenberga – wilgotności, trofizmu i kwasowości, zestawione przez Zarzyckiego i in. (2002). Uwzględniono status gatunków jako wskaźników starych lasów, podany przez Dzwonko i Loster (2001), jak również jako bioindykatorów siedliska przyrodniczego Natura 2000 wyszczególnionych w poradnikach Herbicha (2004), a także za Bliz i in. (2011) – stopień zagrożenia wymarciem w krajach Unii Europejskiej i status dzikiego krewniaka rośliny uprawnej. Tabelę zawierającą listę 208 gatunków flory naczyniowej zanotowanych w 37 cmentarnych ekosystemach, wraz z przypisanymi im cechami określającymi gatunkowe bogactwo i różnorodność oraz przyrodniczą wartość, zamieszczono na stronie internetowej https://ecoservpol.amu.edu.pl/publikacje-wynikow-projektu/, jako załącznik 1. W analizie usług ekosystemów posiłkowano się międzynarodową klasyfikacją usług ekosystemowych CICES V5.1 (https://cices.eu/).

Tabela 1. Lokalizacja poniemieckich cmentarzy ewangelickich w dorzeczu Parsęty (Pomorze Zachodnie, zbadanych w latach 2013–2021
Table 1. Location of post-German Evangelical cemeteries in the Parsęta basin (Western Pomerania), examined in 2013–2021

Lokalizacja cmentarza (nazwa wsi) Location of cemetery (name of the village)	φN / λE [WGS 84]	Powierzchnia cmentarza Area of cemetery [ha]
Brusno	53°43'58.42"/16°13'11.90"	0,50
Buślary	53°48'18.08"/16°04'25.09"	0,30
Chłopowo	53°40'54.28"/16°16'14.98"	0,20
Czarne Wielkie	53°38'40.36"/16°16'33.61"	0,50
Czechy	53°53'25.11"/16°31'13.46"	0,60
Dalęcino	53°45'31.68"/16°37'13.08"	0,40
Gwiazdowo	53°41'05.33"/16°17'17.72"	0,18
Iwin	53°47'53.34"/16°31'08.44"	0,30
Iwin	53°47'17.80"/16°31'38.65"	0,20
Kocury	53°42'01.81"/16°13'44.63"	0,35
Kołacz	53°47'07.37"/16°10'43.63"	0,70
Kusowo	53°48'33.53"/16°33'06.72"	0,30
Lipno	53°41'48.93"/16°05'36.85"	0,30
Lubogoszcz	53°49'00.43"/16°27'09.01"	0,30
Luboradza	53°43'59.72"/16°16'25.63"	0,50
Łeknica	53°45'15.57"/16°17'47.40"	0,65
Nowe Koprzywno	53°42'04.71"/16°16'20.99"	0,17
Nowy Chwalim	53°45'57.01"/16°28'52.25"	0,20
Ogartowo	53°46'21.94"/16°08'03.88"	0,50
Ostre Bardo	53°49'54.72"/16°06'09.29"	0,65
Ostrowąsy	53°47'14.56"/16°21'58.47"	0,80
Parchlino	53°43'22.24"/16°17'38.73"	0,25
Piaski	53°45'21.92"/16°15'28.45"	0,55
Polne	53°39'16.05"/16°19'00.98"	0,30
Popielawy	53°45'33.26"/16°10'30.43"	0,25
Popielewo	53°44'50.79"/16°10'21.60"	0,50
Przeradz	53°46'19.27"/16°32'31.94"	0,30
Przeradz	53°46'10.59"/16°33'03.94"	0,50
Przybkowo	53°43'31.46"/16°19'24.43"	0,70
Radomyśl	53°45'43.47"/16°31'52.66"	0,30
Sławno	53°51'09.39"/16°31'43.92"	0,20
Stary Chwalim	53°46'52.04"/16°25'53.65"	0,80
Storkowo	53°47'02.61"/16°29'31.59"	0,30
Storkowo	53°47'39.61"/16°28'27.09"	0,20
Sulikowo	53°48'18.91"/16°19'41.51"	1,00
Uradz	53°41'01.49"/16°18'01.61"	0,70
Wielawino	53°48'41.63"/16°26'30.11"	0,70

Wyniki

Różnorodność florystyczna

Spontaniczna flora naczyniowa 37 zbadanych cmentarzy liczyła 208 gatunków roślin reprezentujących: 153 rodzaje, 64 rodziny, 43 rzędy, 5 klas i dwie gromady. Z *Pteridophyta* wystąpiło 6 gatunków (*Equisetum arvense*, *Dryopteris carthusiana*, *D. dilatata*, *D. filix-mas*, *Polypodium vulgare*, *Pteridium aquilinum*), a 202 z *Spermatophyta*. Najliczniejszą grupą (167 gat.) były *Magnoliopsida*. Sekwencję rodzin najbogatszych w gatunki tworzyły: *Asteraceae* (24 gat.), *Poaceae* (19), *Rosaceae* (13), *Fabaceae* (10), *Apiaceae* (9), *Lamiaceae* (8), *Caryophyllaceae* (7) i *Ranunculaceae* (7). W spektrum form życiowych Raunkiaera największy udział miały hemikryptofity (117 gat.), fanerofity (56; 26 megafanerofitów i 30 nanofanerofitów) oraz geofity (32). Flora składała się z 179 (86%) spontaneofitów oraz 29 (14%) gatunków obcego pochodzenia, w tym z 7 archeofitów (*Anchusa officinalis*, *Fallopia convolvulus*, *Leonurus cardiaca*, *Melandrium album*, *Myosotis arvensis*, *Urtica urens*) i 22 kenofitów (spośród których 10 pochodziło z Ameryki Północnej). Kenofitami najczęściej występującymi były: *Impatiens parviflora*, *Padus serotina* i *Syringa vulgaris*. Na wielu

Ryc. 1. Poniemieckie cmentarze ewangelickie w dorzeczu Parsęty (Pomorze Zachodnie)
1 – Brusno. Drzewostan, siedlisko Natura 2000 – 9160 Grąd subatlantycki *Stellario-Carpinetum*. Procesy regeneracyjne wspomagane właściwym stanem ochrony grądów występujących w przyległej dolinie rzeki Brusno. 2 – Nowy Chwalim. Tablica informacyjna wykonana w ramach programu ,,Kultura Bliska" sfinansowanego przez Fundację Wspomagania Wsi. 3 – Brusno. Murek z kamienia polnego wyznaczający granicę cmentarza. 4 – Lipy przy granicy cmentarza w Lipnie. 5 – Nowy Chwalim. Pozostałości rozebranych nagrobków. 6 – Ogartowo. Naturalny, wielogatunkowy i wielogeneracyjny drzewostan siedliska Natura 2000 – 9160 Grąd subatlantycki *Stellario-Carpinetum*, wykształcony na obszarze nieczynnego cmentarza. 7 – Brusno. Warstwa zielna siedliska Natura 2000 – 9160 Grąd subatlantycki *Stellario-Carpinetum* z gatunkami-wskaźnikami starych lasów: *Aegopodium podagraria*, *Galeobdolon luteum* i *Stellaria holostea*. 8 – Stary Chwalim. *Daphne mezereum* – chamefit objęty częściową ochroną gatunkową, wskaźnik starych lasów. 9 – Kusowo. Roślinność w zaawansowanym stadium wtórnej sukcesji roślinności, zapoczątkowanej w 1945 r. z chwilą likwidacji cmentarza. Jedna z niewielu pozostawionych tablic nagrobnych. 10 – Dalęcino, uporządkowany cmentarz ludności niemieckiej przylegający do czynnej nekropolii. Usunięty podrost drzew, wycięte krzewy, skoszone runo. Strata części bioróżnorodności nabytej w toku 80-letniej, regeneracyjnej sukcesji roślinności odtwarzającej naturalne fitocenozy leśne

Fig. 1. Post-German Evangelical cemeteries in the Parsęta basin (Western Pomerania)
1 – Brusno. Natura 2000 – 9160 *Stellario-Carpinetum* habitat. Regenerative processes supported by the favorable conservation status of hornbeam forests occurring in the adjacent Brusno River valley. 2 – Nowy Chwalim. The information board about the program for the care of German cemeteries, financed by the Rural Development Foundation. 3 – Brusno. A field stone wall marks the boundary of the cemetery. 4 – Lime trees marking the border of the cemetery in Lipno. 5 – Nowy Chwalim. Remains of demolished tombstones. 6 – Ogartowo. Natural, multi-species, and multi-generational stand of the Natura 2000 – 9160 *Stellario-Carpinetum* habitat. 7 – Brusno. The herb layer of the Natura 2000 – 9160 *Stellario-Carpinetum* habitat with ancient-forest plant species: *Aegopodium podagraria*, *Galeobdolon luteum* and *Stellaria holostea*. 8 – Stary Chwalim. *Daphne mezereum* – under species conservation, ancient-forest plant species. 9 – Kusowo. Vegetation at an advanced stage of secondary ecological succession. One of the few left tombstones. 10 – Dalęcino. An orderly German Evangelical cemetery adjacent to Roman Catholic necropolis

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

cmentarzach masowo występowały gatunki rodzime takie, jak *Convallaria majalis*, *Hedera helix* i *Vinca minor*. Prawdopodobnie rośliny te pochodziły z nasadzeń. Spontaneofity należały do trzech elementów geograficznych: holarktycznego (74 gat., 41%), łącznikowego (99, 53%) i kosmopolitycznego (6, 3%). Grupę gatunków o holarktycznym zasięgu reprezentowały trzy subelementy: cyrkumborealny (18 gat.), eurosyberyjski (35) i europejskoumiarkowany (21). Przeważały gatunki oceaniczne (166) nad kontynentalnymi (18), a 24 były neutralne w stosunku do oceanizmu/kontynentalizmu. Do spontaneofitów nieczęsto notowanych w zlewniach Dębnicy i górnej Parsęty (badania florystyczne J. Borysiak, npbl) należały: *Anemone ranunculoides*, *Campanula persicifolia*, *Carex brizoides*, *Daphne mezereum*, *Epilobium montanum*, *Epipactis helleborine*, *Galeopsis speciosa*, *Lilium martagon*, *Lonicera periclymenum*, *Melica uniflora*, *Peucedanum oreoselinum*, *Sambucus racemosa*, *Sanicula europaea* i *Vicia cassubica*. W spektrum syntaksonomicznym największy udział miały gatunki charakterystyczne z klas: *Querco-Fagetea* (49, 24%), *Artemisietea* (43, 21%; w tym 26 *Convolvuletalia sepium*) i *Molinio-Arrhenathere*tea (19, 9%). Swą obecność zaznaczyły leśne gatunki *Quercetea robori-petraeae* (9), oszyjkowe *Rhamno-Prunetea* (11) i ciepłolubnych ziołorośli okrajkowych *Trifolio-Geranietea* (8). Zanotowano 35 gatunków-wskaźników starych lasów (w tym 19 z *Querco-Fagetea*), a także fitoindykatory łącznie 15 siedlisk przyrodniczych Europejskiej Sieci Ekologicznej Natura 2000. Analiza liczb ekologicznych Ellenberga dla gatunków ogólnej flory naczyniowej wykazała, że gleby cmentarzy były: świeże pod względem wilgotności (średnia wartość wskaźnika W = 3,2), mezoeutroficzne (Tr = 3,5) i prawie obojętne pod względem odczynu pH (R = 3,9). Zagadnienia geobotaniczne związane z szatą roślinną ekosystemów cmentarnych zilustrowano na rycinie 1 (ryc. 1.1–10).

Usługi ekosystemowe bioróżnorodności poniemieckich cmentarzy ewangelickich

Spontaniczną florę naczyniową 37 poniemieckich cmentarzy cechował wysoki stopień naturalności wyrażony 86-procentowym udziałem rodzimych gatunków roślin, a analiza cech gatunkowych wykazała duże bogactwo i różnorodność flory naczyniowej oraz roślinności składające się na znaczną wartość przyrodniczą. Stan ten wynikał z blisko 80-letniego braku pielęgnacji nekropolii jako miejsc pamięci, zarastających w wyniku niczym niekontrolowanej wtórnej sukcesji roślinności w miejscach po rozebranych nagrobkach. W Chłopowie, Łeknicy, Nowym Koprzywnie i Przybkowie wykonano prace porządkowe w ramach projektu „Kultura Bliska", finansowanego przez Fundację Wspomagania Wsi (inf. na tablicach zamieszczonych na cmentarzach). Fundacja działa na rzecz zachowania europejskiego dziedzictwa kulturowego, stanowiącego materialny i duchowy dorobek poprzednich pokoleń (www.fww.org.pl). W ramach wspomnianych prac porządkowych fizjonomia zregenerowanej naturalnej roślinności leśnej została uproszczona. Usunięto podrost drzew i krzewy. Warstwę zielną skoszono. Były to jednak sporadyczne zabiegi konserwatorskie. Niewątpliwie spowodowały utratę

części zasobów roślinnych nabytych w procesie około 80-letniej, wtórnej sukcesji roślinności. Pielęgnacje podobnego typu są wspierane przez samorządy miejskie, parafie kościelne, a nierzadko przez potomków wysiedlonych Niemców (Grzywa 2010). Wałkowska (2019) stwierdziła, że nieczynne cmentarze ewangelickie zachodniej Polski są postrzegane przez dużą część społeczeństwa polskiego jako kłopotliwa spuścizna po niemieckiej okupacji. Ze względu na bolesną historię Polaków trudno jest im zapewnić należną ochronę, choć ich kulturowo-przyrodnicze wartości stanowią potencjał do świadczenia kulturowych usług ekosystemowych związanych z czymś, co proponujemy nazwać eko-tanatoturystyką.

Wnioski

Wykonane prace porządkowe świadczą o szacunku do pochówków w poniemieckich nekropoliach i pragnieniu przywrócenia tożsamości miejsca. Działania takie nie pozostają jednak bez negatywnego wpływu na gatunkowe bogactwo i różnorodność roślin. Dając należne pierwszeństwo *sacrum*, należałoby opracować takie standardy pielęgnacji zieleni nieczynnych cmentarzy ewangelickich, które pozwoliłyby realizować cele Unijnej Strategii Ochrony Bioróżnorodności 2030. Cele te to m.in. zapobieganie stratom różnorodności florystycznej i budowanie stabilności ekosystemów – wartości ważnych dla świadczenia usług ekosystemowych. W odniesieniu do cmentarzy o złym lub szczątkowym stanie zachowania architektonicznych obiektów (nagrobków, kaplic, ogrodzeń itp), a mających jednocześnie istotne znaczenie dla bioróżnorodności, prace porządkowe należałoby ograniczyć do niezbędnego minimum. W przypadku natomiast obiektów z fragmentarycznie zachowanymi małą architekturą (m.in. gdzieniegdzie nagrobkami, murkami oporowymi) i założeniami zieleni (np. alejami drzew) o cennych walorach kulturowych, ich rewaloryzacja powinna być poprzedzona inwentaryzacją szaty roślinnej. Dopiero na podstawie jej wyników należałoby określać działania konserwatorskie konieczne do właściwego utrzymania nieczynnych cmentarzy ludności niemieckiej jako świętych przestrzeni, a zarazem refugiów naturalnej przyrody i *hot spots* świadczenia usług ekosystemowych na obszarach wiejskich opanowanych przez antropogeniczną roślinność synantropijną. Marcinek (2019) proponuje, by inwentaryzacja, dokumentacja i ochrona ocalałych jeszcze ewangelickich cmentarzy poniemieckich stała się elementem szerszego projektu Rzeczypospolitej Polskiej. Chroniłoby to potencjał do świadczenia usług ekosystemowych związanych z eko-tanatoturystyką.

Podziękowania

Projekt „Usługi świadczone przez główne typy ekosystemów w Polsce – podejście stosowane" korzysta z dofinansowania otrzymanego od Islandii, Liechtensteinu i Norwegii w ramach funduszy EOG o wartości 6 540 768 zł oraz dofinansowania budżetu państwa o wartości 1 154 253 zł. Celami projektu są przeniesienie

wiedzy naukowej na temat usług ekosystemowych istniejącej w Europie do procesu rozpoznania i oceny usług ekosystemowych w Polsce oraz zwiększenie potencjału naukowego i zdolności administracji i zainteresowanych grup społecznych do wdrażania tego podejścia w zarządzaniu środowiskiem.

Literatura

Antkowiak W., Heine A., 2005. Dendroflora and current state of historic cemeteries of the Koło district in central Poland. Rocz. AR Pozn., 373, Bot.-Stec., 9: 3–12.

Bilz M., Kell S.P., Maxted N., Lansdown R.V., 2011. European red list of vascular plants. Publications Office of the Europaean Union, Luxembourg.

Brzeg A., Wojterska M., 2001. Zespoły roślinne Wielkopolski, ich stan poznania i zagrożenie. [W:] M. Wojterska (red.), Szata roślinna Wielkopolski i Pojezierza Południowopomorskiego. Bogucki Wyd. Nauk., Poznań: 39–110.

Celka Z., Żywica J., 2004. Flora naczyniowa wybranych cmentarzy Ostrowa Wielkopolskiego i okolicy. Rocz. AR Pozn., 363, Bot.-Stec., 7: 11–31.

Czarna A., 2001. Flora naczyniowa cmentarzy ewangelickich w Koźminie i Koźmińcu (Nizina Wielkopolska). Rocz. AR Pozn., 334, Bot., 4: 27–37.

Czarna A., 2004. Flora naczyniowa cmentarzy na terenie Jarocina. Rocz. AR Pozn., 363, Bot., 7: 33–45.

Czarna A., 2005. Flora naczyniowa starego cmentarza katolickiego na Świerczewie w Poznaniu. Rocz. Nauk. PTOP Salamandra, 9: 61–75.

Czarna A., Nowińska R., 2010a. Interesting vascular flora of a new jewish cemetery in Olkusz in the Jura Krakowsko-Częstochowska region. Rocz. AR Pozn., 410, Bot.-Stec., 15: 53–56.

Czarna A., Nowińska R., 2010b. Vascular flora in cemeteries of the Roztocze Region and surrounding areas (south-east Poland). Acta Agrobot., 64: 77–92.

Czarna A., Piskorz R., 2005. Vascular flora of cemeteries in the town of Zakopane in the Tatra Mountains. Rocz. AR Pozn., 373, Bot.-Stec., 9: 47–58.

Czarna A., Piskorz R., 2006. Vascular plants on selected catholic cemeteries of Jelenia Góra and its surroundings. Rocz. AR Pozn., 378, Bot.-Stec., 10: 69–86.

Czarna A., Woźnicka A., Maj M., Mrozowska M., 2011. Flora of vascular plants of selected Poznań cemeteries. Acta Agrobot., 64: 123–140.

Dębicz R., 2012. Zieleń cmentarzy w krajobrazie wsi Dolnego Śląska. Wyd. Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu, Wrocław.

Dzwonko Z., Loster S., 2001. Wskaźnikowe gatunki starych lasów i ich znaczenie dla ochrony przyrody i kartografii roślinności. Pr. Geogr., 178.

EEA, 2011. Green infrastructure and territorial cohesion. The concept of green infrastructure and its integration into policies using monitoring systems. EEA Technical report No 18/2011. EEA, Copenhagen. https://doi.org/10.2800/88266

Galera H., Sudnik-Wójcikowska B., Lisowska M., 1993. Flora cmentarzy lewobrzeżnej Warszawy na tle flory miasta. Fragm. Flor. Geobot., 38: 237–261.

Grzywa J., 2010. Zapomniane *sacrum* – cmentarze ludności niemieckiej i żydowskiej jako problem społeczno-kulturowy współczesnego miasta. Studia Etnologiczne i Antropologiczne, 10: 386–404.

Herbich J. (red.), 2004. Poradniki ochrony siedlisk i gatunków Natura 2000 – podręcznik metodyczny, 1–3, 5. Ministerstwo Środowiska, Warszawa.

Hołdyński C., Żurkowska T., 2001. Drzewa i krzewy opuszczonych cmentarzy w Mazurskim Parku Krajobrazowym. Rocznik Dendrologiczny, 49: 265–273.
Jędrzejko K., Walusiak E., 2010. Wieloaspektowość i specyfika kulturowa badań przyrodniczych na cmentarzach – w nawiązaniu do analiz florystycznych i fitosocjologicznych na obszarze Podbeskidzia Zachodniokarpackiego (Pogórze Śląskie i Wielickie). Problemy Ekologii, 14: 98–105.
Jędrzejko K., Rahmanov O., Banaszek J., 2013. Flora naczyniowa (Tracheophyta) cmentarzy w Czeladzi. Prace Komisji Krajobrazu Kulturowego, 22: 77–88.
Konon A., Krzyżaniak M., Urbański P., 2005. Stan cmentarzy poewangelickich na terenie Lednickiego Parku Krajobrazowego. Rocz. AR Pozn., 370, Ogrodn., 39: 45–51.
Majgier L., 2012. Analiza ekologiczna flory naczyniowej porzuconych cmentarzy Stara Rudówka i Rybical (Kraina Wielkich Jezior Mazurskich). Acta Geographica Silesiana, 11: 41–48.
Majgier L., Rahmonov O., 2013. Zróżnicowanie roślinności w obrębie porzuconych cmentarzy ewangelickich na terenie gminy Ryn. Prace Komisji Krajobrazu Kulturowego, 22: 63–76.
Marcinek R., 2019. Barbarzyńcy w ogrodzie pamięci. Cmentarz rodziny von Lüttwitzów w Sobótce-Górce. Ochrona Zabytków, 1: 171–204.
Matuszkiewicz W., 2022. Przewodnik do oznaczania zbiorowisk roślinnych Polski. Wyd. PWN, Warszawa.
Mirek Z., Piękoś-Mirkowa H., Zając A., Zając M., 2020. Vascular Plants of Poland. An annotated checklist. W. Szafer Institute of Botany, Polish Academy of Sciences, Kraków.
Rydzewska A., Krzyżaniak M., Urbański P., 2011. Niegdyś sacrum, dziś profanum – dawne cmentarze ewangelickie Poznania i okolic. Prace Komisji Krajobrazu Kulturowego, 15: 64–72.
Science for Environment Policy, 2015. Ecosystem Services and Biodiversity. In-depth Report 11 produced for the European Commission, DG Environment by the Science Communication Unit, UWE, Bristol. https://doi.org/10.2779/162593
Sigiel-Dopierała A., Jagodziński A.M., 2011. Landscape Park (Poland). Rocz. AR Pozn., 410, Bot.-Stec., 15: 57–64.
Sobisz Z., Antkowiak W., 2009. Flora naczyniowa cmentarzy na obszarze Słowińskiego Parku Narodowego. Słupskie Prace Biologiczne, 6: 127–144.
Stachak A., Grinn U., 1993. Drzewa i krzewy Cmentarza Centralnego Szczecina. Zeszyty Naukowe AR w Szczecinie, 153: 111–127.
Stachowiak A., 2015. Niemieckie cmentarze na Ziemiach Zachodnich jako miejsca niepamięci. Prace Etnograficzne, 43: 123–140.
Tokarska-Guzik B., Dajdok Z., Zając M., Zając A., Urbisz A., Danielewicz W. i in., 2012. Rośliny obcego pochodzenia w Polsce ze szczególnym uwzględnieniem gatunków inwazyjnych. Generalna Dyrekcja Ochrony Środowiska, Warszawa.
Trzaskowska E., Karczmarz K., 2013. Spontaneous vascular flora of selected cemeteries in Lublin and the surrounding area. Acta Agrobot., 66: 107–121.
Vent W., Schubert R., 1976. Exkursionsflora für die Gebiete der DDR und der BRD. Kritischer Band. Volk und Wissen Volkseigener Verlag, Berlin.
Wałkowska J., 2019. Nieczynne cmentarze protestanckie: kłopotliwe dziedzictwo czy niewykorzystany potencjał turystyczny? Turystyka Kulturowa, 3: 163–179.
Zając A., Zając M., 2009. Elementy geograficzne rodzimej flory Polski. Pracownia Chorologii Komputerowej Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków.
Zarzycki K., Trzcińska-Tacik H., Różański W., Szeląg Z., Wołek J., Korzeniak U., 2002. Ecological indicator values of vascular plants of Poland. W. Szafer Institute of Botany, Polish Academy of Sciences, Kraków.

Janina Borysiak

Wydział Geografii Społeczno-Ekonomicznej i Gospodarki Przestrzennej, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, janina.borysiak@amu.edu.pl, https://orcid.org/0000-0001-8957-7372

Adaptacyjne strategie roślin naczyniowych klifu wybrzeża Bałtyku Południowego w Wolińskim Parku Narodowym

Adaptive strategies of vascular plants of the South Baltic coast cliff in the Wolin National Park

Zarys treści: Przedstawiono wyniki kartowania flory roślin naczyniowych występujących na siedliskach klifowych Wolińskiego Parku Narodowego. Przeanalizowano skład flory (obejmującej 206 gatunków) pod kątem bogactwa i różnorodności gatunkowej roślin. Określono adaptacyjne strategie roślin w warunkach morfolitodynamiki siedlisk klifowych. Dokonano tego zgodnie z klasyfikacją Łukasiewicza (1962) dotyczącą biologii rozwoju roślin.

Słowa kluczowe: adaptacyjne strategie roślin, biogeomorfologia, biologia rozwoju, flora

Abstract: The results of mapping the flora of vascular plants occurring in the cliff habitats of the Wolin National Park are presented. The composition of the flora (covering 206 species) was analyzed in terms of the richness and species diversity of plants. Adaptive plant strategies under the conditions of morpholithodynamics of cliff habitats were determined. This was done in accordance with Łukasiewicz's (1962) classification on the biology of plant development.

Keywords: adaptive plant strategy, biogeomorphology, developmental biology, flora

Wprowadzenie

Warunki hydrometeorologiczne strefy nadmorskiej wpływają na morfolitodynamikę przybałtyckich klifów Wolina i związaną z nią sukcesję roślinności (Tylkowski i in. 2017, 2021). Mechanizmy sukcesji można odkrywać, analizując potencjał zawarty w morfologiczno-rozwojowych cechach roślin. Przejawia się on fenotypową zmiennością roślin i ich adaptacyjnymi strategiami. Fenotypy i strategie pokazują, w jaki sposób rośliny utrzymują swoje stanowiska i/lub zwiększają obszar zasięgu (Łukasiewicz 1992). W 2016 r. przeprowadzono badania nad

bioróżnorodnością flory naczyniowej północnego klifu Wolińskiego Parku Narodowego (Borysiak i in. 2017). Ich wyniki zainspirowały do szukania czynników determinujących bogactwo gatunkowe i różnorodność roślin naczyniowych. Gatunkową strukturę i dynamikę flory wolińskiego klifu wcześniej badała Piotrowska (1979). Łukasiewicz (1962) opracował klasyfikację opartą na morfologiczno-rozwojowych właściwościach bylin. Na jej podstawie określił przystosowania roślin do wydmowego środowiska Mierzei Łebskiej (Łukasiewicz 1992). W latach 2016–2020 autorka przeprowadziła badania, których celem było zastosowanie tej klasyfikacji do charakterystyki adaptacyjnych strategii roślin w warunkach siedliskowych północnego klifu w Wolińskim Parku Narodowym.

Metody badań

W latach 2016–2020 zbadano różnorodność morfologiczno-rozwojowych cech roślin występujących na północnym klifie w Wolińskim Parku Narodowym, a także adaptacyjnych strategii roślin, zwracając przy tym uwagę na morfolitodynamikę klifu. Równocześnie inwentaryzowano florę naczyniową klifu na obszarze między podstawą klifu a jego koroną, bez wchodzenia na zbocza. Obserwacje biologii rozwoju ograniczono do wybranych gatunków roślin – do ich osobników, które w całości lub w dużej części zostały odsłonięte pod wpływem czynników naturalnych, np. w wyniku abrazji, erozji wodnej i eolicznej czy też ruchów masowych. Kryterium wyboru była zatem dostępność materiału – bez konieczności niszczenia roślin na obszarze leżącym w parku narodowym. Z tej grupy wyselekcjonowano gatunki, które w widoczny sposób wpływały na morfodynamikę klifu. Do dalszych obserwacji wybrano: dwa ryzofity typowe – *Anthyllis vulneraria* subsp. *maritima* i *Cerastium holosteoides*, ryzokaulofita *Artemisia campestris* subsp. *sericea* oraz dwa kaulofity kłączowe – *Calamagrostis epigejos* i *Tussilago farfara*. U osobników, w liczbie 30–50 każdego z tych gatunków, analizowano organy wieloletnie oraz sposoby wegetatywnego rozmnażania i obumierania organów wieloletnich. Obserwacje prowadzono w różnych stadiach ontogenezy roślin, bowiem pewne właściwości bylin zmieniają się i/lub ujawniają w miarę starzenia się osobnika, często dopiero w okresie dojrzewania nasion (Łukasiewicz 1962). Na większości analizowanych stanowisk charakteryzowano warunki glebowe, posługując się przewodnikiem Kabały i in. (2017), a także procesy i zjawiska wpływające na rozwój roślin. Na podstawie wyników obserwacji rośliny pogrupowano w trzy morfologiczno-rozwojowe typy bylin: ryzofity, ryzokaulofity i kaulofity, według klasyfikacji Łukasiewicza (1962, 1992). Zbadano związek wyróżnionych typów z lokalnymi warunkami siedliskowymi. Gatunkową kompozycję flory naczyniowej zinwentaryzowanej na klifie poddano analizie, której celem była charakterystyka bioróżnorodności wyrażonej bogactwem gatunkowym, różnorodnością roślin i ich przyrodniczą wartością. Określono bogactwo taksonów, przyjmując ich nazewnictwo i status według Mirka i in. (2020). W diagnozie zróżnicowania flory wzięto pod uwagę: formę życiową według Raunkiaera (dane z Zarzyckiego i in. 2002), element geograficzny (Zając, Zając 2009), oceanizm/kontynentalizm (Vent, Schubert 1976),

status geograficzno-historyczny (Tokarska-Guzik i in. 2012), status gatunku starych lasów (Dzwonko, Loster 2001), stopień zagrożenia określony w Europejskiej Czerwonej Liście Roślin Naczyniowych (Bilz i in. 2011) i rangę syntaksonomiczną (Matuszkiewicz 2020). Podano stopień synantropizacji flory klifu. Jest nim procentowy udział antropofitów (sumy archeofitów i kenofitów) we florze klifów.

Wyniki

Na północnym klifie w Wolińskim Parku Narodowym stwierdzono 206 gatunków naczyniowych. Charakterystykę flory przedstawiono w tabeli 1. Florę cechował niski stopień synantropizacji – 13%. Prawie połowę gatunków obcego pochodzenia stanowiły kenofity. Ich stanowiska koncentrowały się wokół publicznych plaż, punktu widokowego Gosań i technicznej zabudowy występującej przy koronie klifu. Najliczniejsze stanowiska miały *Conyza canadensis* i *Salix acutifolia*. Krzewy tego drugiego były osobnikami młodymi, prawie zawsze rosnącymi u podnóża klifu. Pochodziły z ukorzenienia pędów przyniesionych przez wiatr, prawdopodobnie z Międzywodzia, gdzie przeciwerozyjne nasadzenia tej wierzby w pasie technicznym ochrony wybrzeża są okresowo przycinane. Zakorzenione końce pędów, odsłonięte podczas sztormu, nosiły wyraźne, skośne ślady cięć. *Conyza canadensis* rosła przede wszystkim na siedliskach gliniasto-piaszczystych. We florze zwróciła uwagę obfitość: fanerofitów (drzew i krzewów), hemikryptofitów oraz gatunków oceanicznych i holarktycznych. Największy udział w formowaniu roślinności klifu odgrywały gatunki z: *Artemisietea, Koelerio-Corynephoretea, Molinio-Arrhenatheretea i Querco-Fagetea*. Po jednym stanowisku miały: *Atriplex littoralis, Brachypodium pinnatum, Campanula trachelium, Centaurium erythraea, Cichorium intybus, Empetrum nigrum, Lycopodium clavatum, Lathyrus japonicus* subsp. *maritimus, Origanum vulgare, Polygala vulgaris* i *Thalictrum aquilegiifolium*.

Tabela 1. Bogactwo gatunkowe i różnorodność roślin na klifowych siedliskach Bałtyku Południowego w Wolińskim Parku Narodowym

Table 1. Species richness and diversity of plants in cliff habitats of the South Baltic coast in the Wolin National Park

Analizowany aspekt	Liczba gatunków
Bogactwo gatunkowe	206
Ranga taksonomiczna	
Rodzaj	153
Rodzina	58
Rząd	52
Klasa	5
Equisetopsida, Polypodiopsida	2, 3
Pinopsida	6
Magnoliopsida	160
Liliopsida	36

Analizowany aspekt	Liczba gatunków
Gromada	2
Pteridophyta	6
Spermatophyta	201
Rodzaje najbogatsze w gatunki	
Festuca	5
Poa	5
Salix	5
Trifolium	5
Vicia	5

Analizowany aspekt	Liczba gatunków
Rodziny najbogatsze w gatunki	
Asteraceae, Poaceae	29, 27
Fabaceae, Rosaceae	19, 15
Forma życiowa wg Raunkiaera	
megafanerofit, nanofanerofit, chamefit drzewiasty	18, 33, 5
hemikryptofit, chamefit zielny	114, 9
geofit	25
terofit	30
hydrofit, liana, półpasożyt	4, 1, 1
Geograficzny element wśród spontaneofitów	
holarktyczny	73
cyrkumborealny	21
europejskoumiarkowany	17
eurosyberyjski, ałtajsko-alpijski	4, 1
łącznikowy, kosmopolityczny	104, 2
nieokreślony	2
Oceanizm/kontynentalizm	
oz, (oz), suboz, (suboz)	13, 77, 21, 30
(subk), subk, (k), k	7, 9, 13, 2
neutralny	34
Element geograficzno-historyczny	
spontaneofit	181
archeofit, kenofit	11, 12
prawdopodobnie antropofit	2
gatunek – wskaźnik starych lasów	26

Analizowany aspekt	Liczba gatunków
Zagrożenie wymarciem	
LC gatunek najmniejszej troski	21
CWR zagrożony dziki krewniak rośliny uprawnej	15
Ranga syntaksonomiczna	
Artemisietea (łącznie)	26
Convolvuletalia	7
Onopordetalia	7
Molinio-Arrhenatheretea (łącznie)	21
Molinietalia	1
Arrhenatheretalia	4
Trifolio-Plantaginetalia	2
Querco-Fagetea, Koelerio-Corynephoretea	21, 17
Rhamno-Prunetea, Stellarietea mediae (łącznie)	14, 14
Aperetalia	3
Sisymbrietalia	3
Trifolio-Geranietea	12
Festuco-Brometea	10
Calluno-Ulicetea	8
Vaccinio-Piceetea	6
Cakiletea maritimae	4
Epilobietea angustifoliae	4
Salicetea purpureae	3
Phragmitetea	2
Alnetea glutinosae, Asplenietea trichomanes	1, 1
bez rangi fitosocjologicznej	32
współczynnik antropizacji flory	12,7%

Wyniki obserwacji morfologiczno-rozwojowych typów roślin zamieszczono w tabeli 2. W ostatniej kolumnie wymieniono cechy opisujące strategie adaptacyjne realizowane w zmiennych warunkach siedliskowych. Dane dotyczą gatunków reprezentatywnych dla ryzofitów typowych – *Anthyllis vulneraria* subsp. *maritima* (ryc. 1) i *Cerastium holosteoides* (ryc. 2), ryzokaulofitów – *Artemisia campestris* subsp. *sericea* i kaulofitów kłączowych – *Calamagrostis epigejos i Tussilago farfara* (ryc. 3). Spośród morfologiczno-rozwojowych typów roślin największy wpływ na morfodynamikę klifu miały kaulofity kłączowe. Wykazały zdolność do stabilizowania podłoża za sprawą wytwarzania podziemnych organów służących do rozmnażania wegetatywnego. Były to *Calamagrostis epigejos* na siedliskach gliniasto-piaszczystych, a na piaszczysto-gliniastych i gliniastych *Tussilago farfara*. Organy podziemne *Tussilago farfara* na podłożach piaszczysto-gliniastych miały

Tabela 2. Adaptacyjne strategie roślin na klifowych siedliskach wybrzeża Bałtyku Południowego w Wolińskim Parku Narodowym
Table 2. Adaptive plant strategies in cliff habitats of the South Baltic coast in the Wolin National Park

Gatunek, ranga syntaksonomiczna, kod Natura 2000	Typ morfologiczno-rozwojowy	Strategia adaptacyjna
Anthyllis vulneraria subsp. *maritima*, ChAss. *Trifolio-Anthyllidetum maritimae*, Natura 2000–1230	ryzofit typowy	Roślina dwuletnia; kwiatostany w drugim roku osobniczego rozwoju, prawie na każdym pędzie; rozmnażanie generatywne już od późnego lata z dopiero co wyprodukowanych nasion; po wydaniu nasion pędy obumierają na przełomie sierpnia i września; siewki z reguły z dala od osobników macierzystych; korzeń palowy do 1,5 cm średnicy przy nasadzie pędów nadziemnych, z licznymi odgałęzieniami II rzędu i znacznie liczniejszymi III rzędu pokrytymi brodawkami korzeniowymi; brak korzeni przybyszowych i kłączy; część nadziemna zbudowana z bardzo licznych, przylegających do siebie gęsto ulistnionych pędów rozwidlających się tuż nad nasadą; osobniki tworzą zwarte skupienia opierające się destrukcyjnym czynnikom związanym z ruchami masowymi i erozją.
Cerastium holosteoides, DAss. *Trifolio-Anthyllidetum maritimae*, ChCl. *Molinio-Arrhenatheretea*	ryzofit typowy	Rozmnażanie wyłącznie generatywne, natychmiast z świeżo wyprodukowanych nasion; palowy korzeń z licznymi odgałęzieniami II i III rzędu; brak korzeni przybyszowych i kłączy; część nadziemną tworzą liczne, mocno skupione pędy, pierwszy raz widlasto rozgałęzione już przy nasadzie; dojrzałe osobniki wykształcają fitogeniczne formy eoliczne. Często osobniki dwuletnie.
Artemisia campestris subsp. *sericea*, ChAss. *Helichryso-Jasionetum litoralis*, Natura 2000–*2130	ryzo-kaulofit typowy	Rozmnażanie generatywne; korzeń palowy zdrewniały z nielicznymi, ale długimi i silnymi rozgałęzieniami II rzędu, często skręcony; zasypane części pędów nadziemnych wykształcają korzenie przybyszowe; brak kłączy; część nadziemna mocno rozbudowana; większość pędów z kwiatostanami.
Calamagrostis epigejos, ChCl. *Epilobietea angustifolii*	kaulofit kłączowy	Rozmnażanie prawie wyłącznie wegetatywne; u korzeni przybyszowych obfitość rozgałęzień do IV rzędu włącznie; sferyczne – wielokierunkowe i wielopoziomowe ułożenie licznych kłączy przenikających się nawzajem, tworzących zwartą matę odporną na działanie czynników mechanicznych; na stabilniejszych podłożach kłącza o znacznie krótszych międzywęźlach, stąd liczne pędy nadziemne rosnące w zwarciu; kwitnie obficie.
Tussilago farfara, ChAss. *Poo compressae-Tussilaginetum*, Natura 2000–1230	kaulofit kłączowy	Obfite rozmnażanie generatywne ze świeżo wyprodukowanych nasion i wegetatywne z podziemnych kłączy; w miejscach wilgotnych masowe kiełkowanie nasion i bardzo wysoka przeżywalność siewek; kłącza wykształcające korzenie przybyszowe; na przełomie sierpnia i września wyjątkowa obfitość zawiązków kłączy, większa na podłożu gliniasto-piaszczystym niż piaszczysto-gliniastym.

A

B

C

D

E

F

G

H

Ryc. 1. *Anthyllis vulneraria* subsp. *maritima*, 2-letni ryzofit typowy
A, B – facja w zespole *Trifolio-Anthyllidetum maritimae*; C – listopad 2018 r., korzeń palowy z odgałęzieniami II rzędu i znacznie liczniejszymi III rzędu pokrytymi brodawkami z *Azotobacter*, brak korzeni przybyszowych i kłączy, duża liczba pędów przylegających do siebie i rozgałęzionych w pobliżu nasady, a w następnym sezonie wegetacyjnym wykształcających kwiatostany; D – jednoroczne osobniki utrzymujące się w podłożu dzięki rozbudowanemu systemowi korzeniowemu; E, F – skupienie roślin zatrzymujących namywane i nawiewane sedymenty; G – osobnik zachowujący żywotność w warunkach namywania i nawiewania materiału; H – płat osobników zabezpieczający siedlisko przed abrazją i erozją wodną

Fig. 1. *Anthyllis vulneraria* subsp. *maritima*, 2-year-old typical rhizophyte
A, B – facies in *Trifolio-Anthyllidetum maritimae* association; C – November 2018, the tap root with 2sd order branches and much more numerous 3rd order, covered with *Azotobacter* nodules, no adventitious roots and rhizomes, a large number of shoots adjacent to each other and branched near their base, and in the next growing season developing inflorescences; D – one-year-old specimens that persist with the help of an extensive root system; E, F – cluster of plants retaining washed and blown sediments; G – an individual remaining viable in the conditions of washing and blowing materials; H – patch of individuals protecting the habitat against abrasion and water erosion

więcej kłączy, a na jesieni więcej pąków kłączowych i korzeni przybyszowych już na następny sezon wegetacyjny, aniżeli okazy z podłoży gliniastych. O stabilizacji podłoży zróżnicowanych pod względem granulometrycznym decydował więc fenologiczny behawior roślin w rocznym cyklu rozwojowym. Osobniki *Calamagrostis epigejos* i *Tussilago farfara* wykształcały odnowieniowe pędy we wszystkich kierunkach. Rośliny cechowała większa żywotność (wyrażona m.in. większymi rozmiarami) w warunkach akumulacji osadów aniżeli deflacji zgromadzonego materiału czy też wymywania sedymentów. Na gliniastych stożkach napływowych mocno przesiąkniętych wodą obserwowano masowy rozwój siewek *Tussilago farfara*. Tylko niektóre fitocenozy z facjalnym występowaniem *Tussilago farfara* zidentyfikowano jako *Poo compressae-Tussilaginetum* R. Tx. 1931. Syntaksonomiczna pozycja płatów z podbiałem pospolitym wymaga więc badań fitosocjologicznych na tle morfolitodynamiki. Strategię adaptacyjną analogiczną do realizowanej przez trzcinnika piaskowego i podbiał pospolity miało kilka kaulofitów kłączowych siedlisk gliniasto-piaszczystych. Były to: *Ammophila arenaria*, *Carex arenaria*, *Cirsium arvense*, *Equisetum arvense*, *Leymus arenarius*, a zwłaszcza *Festuca villosa*. Na piaskach gliniastych stabilizującą rolę odgrywał kaulofit typowy *Corynephorus canescens*, formując duże płaty. Do kaulofitów typowych, z reguły nietworzących większych skupień osobników, należały: *Epipactis atrorubens*, *Hieracium umbellatum* var. *dunense* i *Solidago virgaurea*. U ryzofitów typowych, takich jak *Anthyllis vulneraria* subsp. *maritima* (ryc. 3), *Helichrysum arenarium*, *Jasione montana* var. *litoralis* i *Trifolium pratense* subsp. *maritimum*, strategia utrzymywania się na siedlisku polegała na wykształcaniu nadziemnej części rośliny zbudowanej z dużej liczby gęsto ułożonych pędów rozgałęzionych już przy nasadzie, z których prawie każdy wykształcał kwiatostan. Gatunki te można więc uznać za jeden zespół adaptacyjny – ekologiczną grupę funkcjonalną o określonym zakresie uruchomionego potencjału cech morfologiczno-rozwojowych. Grupa ta dostarczała regulacyjnych świadczeń ekosystemowych związanych z kontrolą erozji i ruchów masowych. Oprócz bylin, w stabilizowaniu osadów piaszczystych i gliniasto-piaszczystych udział miały terofity *Arenaria serpyllifolia* i *Senecio vulgaris*. Cechowała je wysoka

A

B

C

D

E

F

G

H

Ryc. 2. A–D – *Cerastium holosteoides*, E, F – *Calamagrostis epigejos*, G, H – *Artemisia campestris* subsp. *sericea*
A – ryzofit typowy o zwielokrotnionych pędach widlasto rozgałęzionych, palowy korzeń z odgałęzieniami II i III rzędu, brak korzeni przybyszowych i kłączy; B – jeden osobnik otoczony siewkami skiełkowanymi ze świeżo wyprodukowanych nasion, chroniący podłoże przed erozją i ruchami masowymi; C – płat juwenilnych osobników na stożku napływowym; D – fitogeniczna forma eoliczna utworzona przez jednego dojrzałego osobnika, stabilizowana przez siewki tego osobnika; E, F – *Calamagrostis epigejos*, kaulofit kłączowy zdolny do stabilizowania gliniasto-piaszczystej gleby dzięki obfitości kłączy i korzeni przybyszowych rozwidlonych do IV rzędu i tworzących podziemną matę wiążącą podłoże; F – razem z kaulofitem kłączowym *Leymus arenarius* tworzy fitocenozę przeciwdziałającą abrazji; G, H – ryzokaulofit typowy *Artemisia campestris* subsp. *sericea*; G – mocno rozbudowana część nadziemna z licznymi kwiatostanami; H – zdrewniały korzeń palowy bez kłączy, korzenie przybyszowe wyrastające z podziemnych nasad pędów zasypanych piaskiem

Fig. 2. A–D – *Cerastium holosteoides*, E, F – *Calamagrostis epigejos*, G, H – *Artemisia campestris* subsp. *sericea*
A – typical rhizophyte with multiplied shoots, fork-branching from their bases, tap root with 2nd and 3rd order branches, lack of adventitious roots and rhizomes; B – one individual surrounded by seedlings sprouted from freshly produced seeds, protecting the substratum against erosion and mass movements; C – cluster of juvenile individuals on the alluvial fan; D – phytogenic aeolian landform built by one mature individual, stabilized by seedlings of this individual; *E, F – Calamagrostis epigejos*, rhizomatous caulophyte capable of stabilizing clay-sandy soil due to the abundance of rhizomes and adventitious roots forked to the 4th order and forming an underground mat binding the substratum; F – it develops anti-abrasion phytocoenosis together with the rhizomatous caulophyte *Leymus arenarius*; G, H – typical rhizocaulophyte *Artemisia campestris* subsp. *sericea*; G – highly developed aboveground part with numerous inflorescences; H – woody tap root without rhizomes, adventitious roots growing from underground shoot bases covered with sand

produkcja nasion zdolnych do natychmiastowego, masowego kiełkowania. Taką strategię stwierdzono również u *Cerastium holosteoides*. Ryzokaulofitem typowym była *Artemisia campestris* subsp. *sericea*, a kłączowym *Honckenya peploides* i *Lathyrus pratensis* var. *velutinus*. Na gliniasto-piaszczystym klifie widywano fitogeniczne formy eoliczne utworzone przez dojrzałe osobniki *Cerastium holosteoides*. Podobne obserwowano między klifem a plażą, utworzone przez *Cakile maritima*, *Honckenya peploides* i *Salsola kali*. Szczególnie dobrze wykształcone i na dużym obszarze, takie formy eoliczne utworzone przez *Honckenya peploides* wystąpiły na przedpolu wydm przednich poza granicami parku narodowego między Świnoujściem a Międzyzdrojami. Stwierdzono 19 gatunków z rodziny Fabaceae, skupiającej taksony zdolne do wiązania azotu atmosferycznego i wzbogacania gleby w azot. Spośród nich największe poduchowate skupienia, stawiające opór siłom erozji i ruchom masowym tworzyły: *Lathyrus pratensis* var. *velutinus* i *Trifolium pratense* subsp. *maritimum*. Brodawki z *Azotobacter* najobficiej występowały u nich na odgałęzieniach korzeniowych II i III rzędu.

A

B

C

D

E

F

G

H

Ryc. 3. A–H – kaulofit kłączowy *Tussilago farfara*
A – *Poo compressae-Tussilaginetum*; B – kłącza i korzenie przybyszowe osobnika rosnącego na siedlisku gliniasto-piaszczystym; C – słaby rozwój podziemnych organów u osobników rosnących na gliniastej glebie; D – system kłączy rozwiniętych w różnych kierunkach, w gliniasto-piaszczystej glebie; E – obfitość zawiązków pędów w gliniasto-piaszczystej glebie pod koniec sezonu wegetacyjnego (listopad 2018); F – płat osobników chroniących przed abrazją, zakotwiczonych w glebie rozbudowanym systemem kłączy i korzeni przybyszowych; G – płat chroniący przed erozją wodną; H – kontrola erozji eolicznej przez pędy wyrastające z podziemnych rozłogów; współwystępowanie z kaulofitem kłączowym *Festuca villosa*
Fig. 3. A–H – *Tussilago farfara* rhizomatous caulophyte
A – *Poo compressae-Tussilaginetum* association; B – rhizomes and adventitious roots of an individual growing in a clay-sandy habitat, C – poor development of underground organs in individuals growing in clay soil; D – a system of rhizomes developed in different directions, in a clay-sandy soil; E – abundance of shoot buds in loamy-sandy soil at the end of the growing season (November 2018); F – cluster of individuals protecting against abrasion, anchored in the soil by an extensive system of rhizomes and adventitious roots; G – a patch protecting against water erosion; H – control of aeolian erosion by shoots growing from underground stolons; coexistence with *Festuca villosa* rhizomatous caulophyte

Dyskusja

Wyniki inwentaryzacji florystycznej należy traktować jako przyczynek do znajomości flory naczyniowej północnego klifu Wolińskiego Parku Narodowego. Nie uzyskano pełnego obrazu flory, ponieważ ze zboczy klifu spisywano tylko gatunki naczyniowe możliwe do zidentyfikowania bez wchodzenia na klif. Stwierdzone gatunki pokazują jednak ogólny charakter bioróżnorodności roślin określający stan „zerowy" do przyszłych badań porównawczych. Wszystkie fitocenozy na klifie reprezentują siedlisko przyrodnicze Natura 2000: klify na wybrzeżu Bałtyku (kod 1230). Zasługują one na podjęcie szczegółowych badań geobotanicznych na tle abiotycznych uwarunkowań; obligatoryjnie z wykorzystaniem danych zbieranych w Stacji Bazowej Wolin Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego.

Nie przeprowadzono tutaj dyskusji nad adaptacyjnymi strategiami roślin naczyniowych klifu. Badania miały bowiem charakter pilotażowy. Obserwacje miały posłużyć do postawienia hipotez naukowych. Stwierdzono wyraźną reakcję roślin naczyniowych na zmiany powodowane morfolitodynamiką klifu, generowaną procesami erozyjnymi i ruchami masowymi. Dostrzeżono zależność procesów geodynamicznych od rozwoju roślin. Dalsze badania (koniecznie biogeomorfologiczne!) powinny koncentrować się na problematyce związanej z adaptacyjnym potencjałem roślin ujawniającym się fenotypową plastycznością wynikającą z morfologiczno-rozwojowych właściwości gatunków. Dzięki temu rośliny są zdolne utrzymywać się na przeobrażających się siedliskach, a także opanowywać siedliska nowo utworzone. Obserwacje pokazały, że ten sam gatunek, np. kaulofit kłączowy *Tussilago farfara*, może wykształcać kilka fenotypów dostosowanych do kierunku, zakresu i tempa morfolitologicznych zmian na klifie.

Literatura

Bilz M., Kell S.P., Maxted N., Lansdown R.V., 2011. European red list of vascular plants. Publications Office of the Europaean Union, Luxembourg.

Borysiak J., Czyryca P., Kostrzewski A., Tylkowski J., Winowski M., 2017. Związek bioróżnorodności flory naczyniowej z morfodynamiką wybrzeża klifowego wyspy Wolin. [W:] A. Kostrzewski, M. Winowski (red.), Geoekosystem Wybrzeży Morskich, 3. Monitoring funkcjonowania i przemian wybrzeży morskich w warunkach zmian klimatu i narastającej antropopresji. Poznań–Biała Góra: 108–118.

Dzwonko Z., Loster S., 2001. Wskaźnikowe gatunki starych lasów i ich znaczenie dla ochrony przyrody i kartografii roślinności. Prace Geograficzne IGiPZ PAN, 178.

Kabała C., Czępińska-Kamińska D., Drewnik M., Jankowski M., Marzec M., 2017. Przewodnik terenowy do opisu gleb. Polskie Towarzystwo Gleboznawcze, Warszawa.

Łukasiewicz A., 1962. Morfologiczno-rozwojowe typy bylin. PTPN, Wydział Mat.-Przyr., Pr. Kom. Biol., 27, Poznań.

Łukasiewicz A., 1992. Charakterystyka roślin psammofilnych i ich przystosowania do środowiska wydmowego Mierzei Łebskiej. Wyd. Nauk. UAM, B, 48.

Matuszkiewicz W., 2020. Przewodnik do oznaczania zbiorowisk roślinnych Polski. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa.

Mirek Z., Piękoś-Mirkowa H., Zając A., Zając M., 2020. Vascular Plants of Poland. An annotated checklist. W. Szafer Institute of Botany, Polish Academy of Sciences, Kraków.

Piotrowska H., 1979. Specific aspects of the cliff-flora of Wolin Island. Fragm. Flor. Geobot., 25: 17–31.

Tokarska-Guzik B., Dajdok Z., Zając M., Zając A., Urbisz A., Danielewicz W., Hołdyński C., 2012. Rośliny obcego pochodzenia w Polsce ze szczególnym uwzględnieniem gatunków inwazyjnych. Generalna Dyrekcja Ochrony Środowiska, Warszawa.

Tylkowski J., Borysiak J., Kostrzewski A., Kruszyk R., Szpikowski J., 2017. Stan i przemiany środowiska przyrodniczego wybranych geoekosystemów Polski w latach 1994–2015. [W:] A. Kostrzewski, M. Majewski (red.), Stan i przemiany środowiska przyrodniczego geoekosystemów Polski w latach 1994–2014 w oparciu o realizację programu Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego. Poznań: 539–580.

Tylkowski J., Winowski M., Hojan M., Czyryca P., Samołyk M., 2021. Influence of Hydrometeorological Hazards and Sea Coast Morphodynamics onto Development of the *Cephalanthero rubrae-Fagetum* (Wolin Island, the Southern Baltic Sea). Natural Hazards and Earth System Science, 21: 363–374.

Vent W., Schubert R., 1976. Exkursionsflora für die Gebiete der DDR und der BRD. Kritischer Band. Volk und Wissen Volkseigener Verlag, Berlin.

Zając A., Zając M., 2009. Elementy geograficzne rodzimej flory Polski. Pracownia Chorologii Komputerowej Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków.

Zarzycki K., Trzcińska-Tacik H., Różański W., Szeląg Z., Wołek J., Korzeniak U., 2002. Ecological indicator values of vascular plants of Poland. W. Szafer Institute of Botany, Polish Academy of Sciences, Kraków.

Andrzej Kostrzewski, Grzegorz Rachlewicz

Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu
anko@amu.edu.pl, AK https://orcid.org/0000-0001-5407-3617,
GR https://orcid.org/0000-0003-1826-2079

Monitoring środowiska przyrodniczego strefy polarnej – założenia i organizacja

Monitoring of the natural environment of the polar zone – assumptions and organization

Zarys treści: Regiony polarne zajmują szczególne miejsce we współczesnych przemianach środowiska przyrodniczego świata. Do obszarów polarnych odnosimy skalę przemian środowiskowych w innych strefach morfoklimatycznych. W oparciu o założenia merytoryczne i organizacyjne Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego (ZMŚP), który jest podsystemem Państwowego Monitoringu Środowiska, przedstawiono organizację standaryzowanego monitoringu środowiska przyrodniczego w strefie polarnej. Monitoring polarny musi uwzględniać indywidualność przyrodniczą strefy arktycznej i antarktycznej. ZMŚP weryfikowany jest w zasięgu zlewni zlodowaconej i niezlodowaconej Stacji Polarnej Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza „Petuniabukta" na Spitsbergenie.

Słowa kluczowe: Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego, standaryzowany monitoring strefy polarnej, zlewnia zlodowacona i niezlodowacona

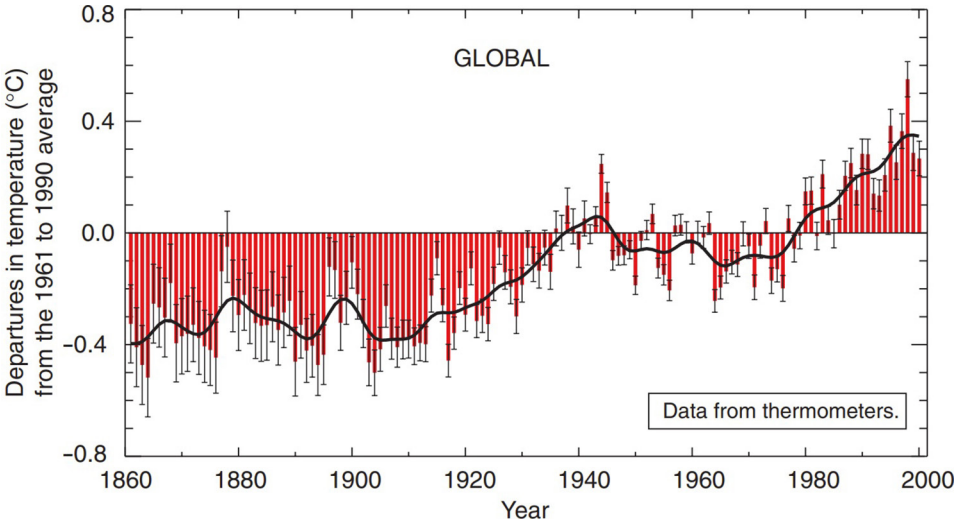
Abstract: The polar regions occupy a special place in the contemporary transformations of the natural world. We refer to the polar areas as the scale of environmental changes in other morphoclimatic zones. Based on the substantive and organizational assumptions of the Integrated Environmental Monitoring (ZMŚP), which is a subsystem of the State Environmental Monitoring. The organization of standardized monitoring of the natural environment in the polar zone was presented. Polar monitoring must take into account the natural individuality of the Arctic and Antarctic zones. IMŚP is verified within the catchment area of the glaciated and non-glaciated Polar Station of the Adam Mickiewicz University "Petuniabukta" on Spitsbergen.

Keywords: Integrated Monitoring of the Natural Environment, standardized monitoring of the polar zone, glaciated and non-glaciated catchment

Wprowadzenie

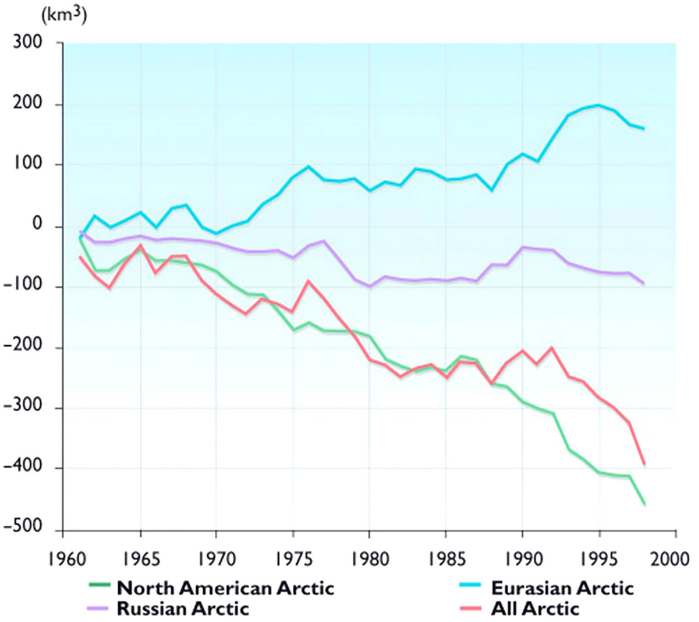
Cechą szczególną współczesnego systemu Ziemi w ujęciu globalnym są zmiany klimatu, dynamiczne przemiany środowiska przyrodniczego, narastająca częstotliwość procesów ekstremalnych ze skutkami katastrofalnymi oraz różnokierunkowa, nasilająca się antropopresja. Niezbędna jest systematyczna obserwacja zachodzących zmian, zorganizowany, standaryzowany monitoring środowiska przyrodniczego w skali globalnej, kontynentalnej i regionalnej. Zachodzące przemiany środowiska przyrodniczego wymagają zaawansowanych metod badawczych w celu rozpoznania mechanizmów ich funkcjonowania, które mają wpływ na jakość życia i współczesny rozwój społeczeństw świata. Istniejąca sieć stacji badawczych i obserwatoriów coraz częściej wyposażonych w automatykę i zdalny przesył danych pozwala na coraz dokładniejsze rozpoznanie prawidłowości funkcjonowania przyrody świata oraz na zapobieganie skutkom zmian.

Regiony polarne zajmują szczególne miejsce w prowadzonej obserwacji współczesnych przemian środowiska przyrodniczego świata. To właśnie do obszarów polarnych odnosimy skalę przemian środowiskowych w umiarkowanej strefie klimatycznej. Procesy fizyczne, funkcjonujące w strefie polarnej, są podstawowym źródłem współczesnych przemian środowiskowych w umiarkowanej strefie klimatycznej. Regiony polarne są naturalnym laboratorium, umożliwiającym monitorowanie procesów w systemie Ziemi, w warunkach do dziś niezmienionych przez człowieka. Obserwowane globalne zmiany temperatury powietrza (ryc. 1) oraz szybko zachodzące zmiany objętości lodowców (ryc. 2) i zasięgu wieloletniej



Ryc. 1. Anomalie średnich temperatur powietrza (IPCC, Climate Change 2001, The Scientific Basis)

Fig. 1. Anomalies of average air temperatures (IPCC, Climate Change 2001, The Scientific Basis)



Ryc. 2. Zmiany objętości lodowców arktycznych (Impacts of a Warming Arctic, ACIA 2004)

Fig. 2. Changes in the volume of Arctic glaciers (Impacts of a Warming Arctic, ACIA 2004)

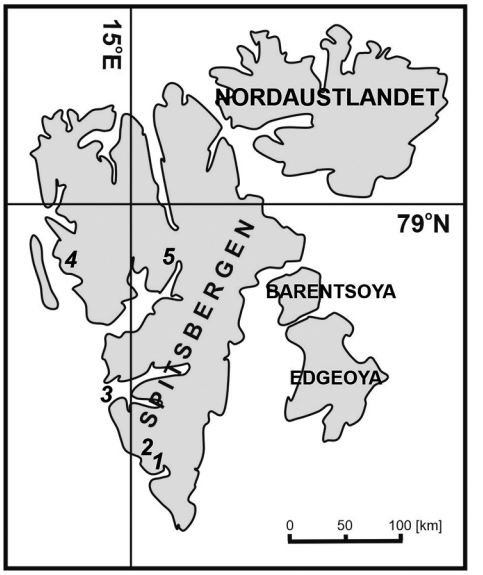
zmarzliny powodują przekształcenia struktury krajobrazowej obszarów polarnych. Obserwacja i rejestracja tego procesu jest bardzo ważna zarówno z merytorycznego, jak i aplikacyjnego punktu widzenia.

Sieć stacji badawczych w Arktyce i Antarktyce stanowi doskonałe miejsce do realizacji standaryzowanego monitoringu środowiska przyrodniczego oraz kształtowania i rozwijania świadomości geoekologicznej i odpowiedzialności za zachowanie zasobów przyrodniczych obszarów polarnych.

W oparciu o sprawdzone, zweryfikowane założenia Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego (ZMŚP) przedstawiamy kolejną propozycję organizacji standaryzowanego monitoringu środowiska przyrodniczego w strefie polarnej (Kostrzewski i in. 2007, Kostrzewski, Rachlewicz 2017).

Zastosowanie podstawowych założeń programowych Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego do organizacji monitoringu w strefie polarnej

Polska aktywność polarna dynamicznie rozwijała się zarówno w okresie przed-, jak i powojennym. Realizowane badania dotyczyły głównie zagadnień geologicznych, geomorfologicznych i meteorologicznych. Można więc uznać, że rozwijał się przede wszystkim monitoring geomorfologiczny (np. powtarzalne kartowania stref marginalnych lodowców, zmiany linii brzegowej) oraz monitoring meteorologiczny (np. sezonowe badania warunków pogodowych). Duże zaangażowanie i aktywność w szczególności przedstawicieli nauk o Ziemi sprawiła, że aktualnie na Spitsbergenie funkcjonuje jedna stacja narodowa oraz cztery stacje uniwersyteckie (ryc. 3).



Ryc. 3. Polskie stacje polarne na Spitsbergenie
1 – Stacja Polarna im. Stanisława Siedleckiego w Hornsundzie; 2 – Stacja Polarna im. Stanisława Baranowskiego Uniwersytetu Wrocławskiego; 3 – Stacja Polarna Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej z Lublina; 4 – Stacja Polarna „Kaffioyra" Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu; 5 – Stacja Polarna „Petuniabukta" Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu

Fig. 3. Polish polar stations on Spitsbergen
1 – Stanisław Siedlecki Polish Polar Station in Hornsund; 2 – Stanisław Baranowski Polar Station of Wrocław University; 3 – Calypsobyen Polar Station of Maria Curie Skłodowska University; 4 – Nicolaus Copernicus University Polar Station, Kaffioyra; 5 – Adam Mickiewicz University Polar Station, Petuniabukta

Uzasadnieniem funkcjonowania sieci polskich stacji polarnych na Spitsbergenie są zarówno przyczyny natury historycznej, jak i ciągle wzrastająca potrzeba badań polarnych w współczesnym systemie nauki i praktyki, co jest warunkowane:

- wzrastającą pozycją badań polarnych w naukach o Ziemi, a także w naukach biologicznych, ekonomicznych, społecznych, politycznych oraz inżynierskich,
- stosunkowo słabo rozpoznanym mechanizmem funkcjonowania i przemian środowiska przyrodniczego w strefie polarnej, co stanowi podstawę poznania współczesnych zmian struktury krajobrazowej świata,
- stosunkowo słabym rozpoznaniem zasobów przyrodniczych w strefie polarnej, ich eksploatacją, ochroną i zachowaniem,
- brakiem wypracowanych założeń zrównoważonego rozwoju obszarów polarnych,
- zwiększeniem informacji dla społeczności lokalnej w zakresie jakości życia i ochrony środowiska przyrodniczego strefy polarnej.

Znajdujemy więc uzasadnienie przedstawienia koncepcji monitoringu środowiska przyrodniczego strefy polarnej, uwzględniające mankamenty w dotychczasowej realizacji, które są następujące:

- brak kompleksowej, zintegrowanej koncepcji monitoringu środowiska przyrodniczego geoekosystemów polarnych,
- brak standaryzacji systemów pomiarowych i odpowiedniej aparatury,
- dotychczasowy monitoring strefy polarnej ma najczęściej charakter sezonowy, co sprawia, że brak wieloletnich serii obserwacyjnych, gromadzonych w profesjonalnych bazach danych,
- brak uzgodnień polskich stacji polarnych w zakresie organizacji i realizacji monitoringu środowiska przyrodniczego,

- słabe powiązanie organizacyjne z siecią międzynarodową stacji polarnych Integrated Monitoring.

Pomimo dynamicznego rozwoju rynku wciąż brak urządzeń, aparatury pomiarowej, które winny być standaryzowane w obrębie różnych stacji polarnych (szczególnie polskich, a także innych krajów) i grup badawczych. Wszystko to sprawia, że dysponujemy krótkimi, przerywanymi i niezweryfikowanymi seriami pomiarowymi. Odczuwamy wyraźny brak porozumienia zarówno w skali krajowej, jak i międzynarodowej. Warto podkreślić, że wiele krajów, np. Kanada, ma opracowane procedury monitoringu polarnego (Data management principles and guidelines for polar research and monitoring in Canada 2017), ale praktyka ta nie jest powszechna, nawet w państwach leżących w Arktyce. Istnieje słabe powiązanie organizacyjne i merytoryczne z europejską siecią Integrated Monitoring ICP IM. Trzeba jednak stwierdzić, że następuje wymiana doświadczeń dotyczących funkcjonowania geoekosystemów polarnych, co może mieć znaczenie fundamentalne dla przygotowania opracowań monograficznych i prognoz (Zwoliński i in. 2013).

Przedstawiamy zweryfikowaną propozycję (Kostrzewski i in. 2007, Kostrzewski, Rachlewicz 2017) wykorzystania założeń Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego, który jest podsystemem Państwowego Monitoringu Środowiska (Kostrzewski, Majewski 2021), w organizacji i realizacji monitoringu środowiska przyrodniczego obszarów polarnych. ZMŚP jest monitoringiem kompleksowym realizowanym w zasięgu jednostek przestrzennych, które umownie nazywamy geoekosystemami (Kostrzewski 1993).

Geoekoesystem jest jednostką przestrzeni geograficznej, której wielkość zależy od przyjętego kryterium typologii. W strefie polarnej, podobnie jak w innych strefach morfoklimatycznych, przyjmujemy, że podstawowym typem geoekosystemu do organizacji i realizacji monitoringu środowiska przyrodniczego jest zlewnia rzeczna – zlodowacona lub niezlodowacona (Kostrzewski 2003, Stach i in. 2003) oraz jeziorna. Takie podejście metodyczne umożliwia ocenę jakościową i ilościową obiegu energii i przepływu materii w geoekosystemach polarnych (Kostrzewski 1991, 1993, Kostrzewski, Majewski 2021). Na etapie wstępnym procesu badawczego istotną kwestią jest rozpoznanie struktury wewnętrznej (subsystemów, elementów) wytypowanych do organizacji monitoringu geoekosystemów w oparciu o analityczne badania elementów środowiska fizycznogeograficznego. Należy pamiętać, że w przypadku geoekosystemów polarnych na badane relacje, związki między poszczególnymi subsystemami i elementami środowiska przyrodniczego, decydujący wpływ ma oddziaływanie kriosfery, uważane za przyczynę oraz tło zachodzących przemian środowiskowych. Kolejna ważna sprawa: wytypowane do monitoringu geoekosystemy polarne obejmują obszary ze zróżnicowanym pokryciem i zasięgiem mas lodowcowych, które w większości znajdują się obecnie w fazie zaniku (Rachlewicz i in. 2007, Rachlewicz 2009). Proces zaniku mas lodowcowych sprawia, że powstaje nowa jakość krajobrazów paraglacjalnych (Ballantyne 2002). Na odsłoniętych spod lodu powierzchniach zachodzi sukcesja roślinna, prowadząca do postglacjalnego utrwalenia krajobrazu (Stawska 2017). Zlewnie zlodowacone wymagają specjalnej organizacji systemu pomiarowego w celu ujęcia migracji osadów od źródeł do ujścia (Decaulne i in. 2013).

Zintegrowany monitoring geoekosystemów polarnych winien realizować następujące cele:

- rozpoznanie struktury wewnętrznej monitorowanych geoekosystemów zlewni rzecznych zlodowaconych i niezlodowaconych,
- rozpoznanie przepływu osadów i obiegu energii w podstawowych typach geoekosystemów zlewni rzecznych zlodowaconych i niezlodowaconych,
- kompleksową ocenę stanu współczesnych geoekosystemów polarnych (zagrożenia, formy ochrony),
- przedstawienie progów i indykatorów wystąpienia zdarzeń o charakterze ponadprzeciętnym, ekstremalnym i katastrofalnym,
- ocenę georóżnorodności i bioróżnorodności, ze wskazaniem zagrożeń i form ochrony,
- przedstawienie scenariuszy rozwoju geoekosystemów polarnych w warunkach obserwowanych zmian klimatu i różnokierunkowej, narastającej antropopresji,
- modelowanie rozwoju geoekosystemów polarnych z przeznaczeniem na różne zapotrzebowanie.

Tak sformułowane cele winny być realizowane w oparciu o przyjęty program geoekosystemów polarnych.

Tabela 1. Program zintegrowanego monitoringu geoekosystemów obszarów polarnych
Table 1. Program of integrated monitoring of geoecosystems of polar areas

Kod	Program	Częstotliwość obserwacji	Program podstawowy	Program rozszerzony
A1	Meteorologia	1 × dzień	×	
		3 × dzień	×	×
		ciągła rejestracja	×	
B1	Chemizm powietrza	1 × dzień	×	
		ciągła rejestracja	×	×
C1	Chemizm opadu i pokrywy śnieżnej	1 × miesiąc z codziennych próbek	×	×
C2	Chemizm opadu podkoronowego	1 × miesiąc z codziennych próbek	–	
C3	Chemizm spływu po pniach	1 × miesiąc z codziennych próbek	–	
D1	Metale ciężkie w mchach	1 × 5 lat	×	×
E1	Gleby	1 × 5 lat w całym profilu	×	
		2 × rok w poziomie A	×	
F1	Chemizm roztworów glebowych	1 × miesiąc	×	×
F2	Wody podziemne – źródła	1 × dzień	×	
		1 × sezon lub miesiąc	×	×
G1	Chemizm organów asymilacyjnych (liście)	1 × rok	×	

Kod	Program	Częstotliwość obserwacji	Program podstawowy	Program rozszerzony
G2	Chemizm opadu biogenicznego (ściółki)	1 × rok	×	
H1	Wody powierzchniowe – rzeki	1 × tydzień lub miesiąc	×	
		1 × dzień	×	×
		ciągła rejestracja	×	
H2	Wody powierzchniowe – jeziora	1 × sezon	×	×
I1	Hydrobiologia rzek	2 × rok	×	
I2	Hydrobiologia jezior	2 × miesiąc od czerwca do września	×	
		2 × rok	×	
		1 × rok		
J1	Roślinność zlewni reprezentacyjnej	1 × 10–15 lat	×	
J2	Struktura i dynamika szaty roślinnej (obszary testowe)	1 × 3 lata	×	
		1 × 5 lat	×	
		1–3 × w sezonie wegetacyjnym	×	
K1	Uszkodzenia drzew i siedlisk leśnych	1 × rok	–	
		1 × 5 lat	–	
L1	Inwentaryzacja siedlisk leśnych	1 × 5 lat	–	
M1	Epifity nadrzewne	1 × 1–5 lat	–	
N1	Mikrobiologiczna dezintegracja ściółki	1 × rok	×	
O1	Fauna bezkręgowców	1 × miesiąc w sezonie wegetacyjnym	–	
P1	Użytkowanie terenu		×	×
P2	Transformacja krajobrazu		×	×
	PROGRAMY SPECJALISTYCZNE			
S1	Glacjologia: akumulacja/ ablacja/zasięg lodowców	1 × 10 dni	×	
		1 × rok	×	
S2	Termika i dynamika wieloletniej zmarzliny	ciągła rejestracja × 1 × miesiąc	×	
S3	Topoklimat	ciągła rejestracja	×	
S4	Dynamika wybrzeża	1 × rok	×	

Pilotażowe prace prowadzone są w oparciu o Stację Polarną Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza „Petuniabukta", która położona jest w Billefjorden w centralnej części Spitsbergenu.

Stacja obejmuje działalnością badawczą obszar położony pomiędzy 78°40'–78°50'N i 16°00'–17°00'E. „Petuniabukta" jest pierwszą Stacją Bazową ZMŚP na Spitsbergenie, której program zatwierdził w 2013 r. Główny Inspektor

Ochrony Środowiska. Wokół zatoki Petunia znajduje się szereg zlewni, o zróżnicowanym pokryciu lodowcami oraz o zróżnicowanym współczesnym systemie morfogenetycznym.

Ryc. 4. Stacja Polarna Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza „Petuniabukta", centralny Spitsbergen (G. Rachlewicz)
Fig. 4. Polar Station of the University of Adam Mickiewicz "Petuniabukta", central Spitsbergen (G. Rachlewicz)

Specyfikę przyrodniczą Stacji Polarnej „Petuniabukta" UAM określają następujące uwarunkowania:

- położenie w centralnej części Spitsbergenu, mające zasadniczy wpływ na charakter i funkcjonowanie morfosystemu w przeszłości i obecnie,
- cechy klimatu polarnokontynentalnego, odzwierciedlone w funkcjonowaniu współczesnego systemu morfogenetycznego,
- ślady starych zlodowaceń (w osadach i rzeźbie terenu),
- zróżnicowanie typów lodowców i form marginalnych,
- zróżnicowany współczesny system morfogenetyczny, obejmujący podsystemy: wietrzeniowo-denudacyjny, stokowy, lodowcowy, wodnolodowcowy, fluwialny, peryglacjalny (m.in. eoliczny), litoralny i morski (fiordowy),
- zróżnicowany, unikatowy charakter ekosystemów,
- ograniczony wpływ oddziaływania człowieka.

Dzięki takim cechom Stacji Polarnej stanowi doskonałe miejsce monitoringu przemian środowiska przyrodniczego i struktury krajobrazowej strefy polarnej.

Zintegrowany monitoring przyrodniczy obszarów polarnych Spitsbergenu środkowego jest w okresie organizacji, w fazie początkowego rozwoju standaryzowanego systemu pomiarowego. Zebrane dotąd serie pomiarowe nie są wystarczająco długie i standaryzowane, aby stanowiły podstawę studiów porównawczych z innymi obszarami polarnymi.

Podsumowanie

Obszary polarne we współczesnym rozwoju systemu Ziemi są szczególnie ważne zarówno z merytorycznego, jak i aplikacyjnego punktu widzenia. Do poznania mechanizmów współczesnych przemian środowiska przyrodniczego niezbędny jest zorganizowany, standaryzowany monitoring, funkcjonujący w oparciu o międzynarodowe projekty w skali globalnej.

Do najważniejszych zadań w zakresie realizacji monitoringu środowiska przyrodniczego geoekosystemów polarnych można zaliczyć:

- rozwijanie specjalistycznych systemów monitoringu polarnego – meteorologia, hydrologia, lodowce, wieloletnia zmarzlina – mających dobre podstawy i długie tradycje w badaniach polarnych,
- monitoring polarny, który powinien odpowiadać standardom pomiarowym monitoringów, działających w niższych szerokościach geograficznych, aby dostarczać danych porównywalnych z obszarów niezmienionych przez człowieka,
- opracowanie metodyk organizacji i realizacji monitoringu geoekosystemów w strefie polarnej, zawierających odpowiednie procedury pomiarowe i metody opracowania danych.

Powyższe uwarunkowania mają kluczowe znaczenie dla poprawnej oceny jakościowej i ilościowej funkcjonowania środowiska polarnego i jego przemian.

Stacja Polarna Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza „Petuniabukta" w środkowym Spitsbergenie wdraża do monitoringu polarnego założenia programu Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego. Stacja może stać się miejscem wzorcowym realizacji zintegrowanego monitoringu polarnego i dostarczać dane pomiarowe z obszarów o niskiej antropopresji do studiów porównawczych w innych strefach morfoklimatycznych.

Literatura

Ballantyne C.K., 2002. Paraglacial geomorphology. Quaternary Science Reviews, 21: 1935–2017.

Decaulne A., Rachlewicz G., Lamoureux S.F., Beylich A.A., 2013. Sediment Budgets in Cold Environments Sedimentary fluxes dynamics in the changing mountain and polar environment: Monitoring, record & consequences. Zeitschrift für Geomorpologie, 57, Suppl. 2: 1–1.

Kostrzewski A. (red.), 1991. Koncepcja programu: Monitoring obiegu energii i materii – kompleksowy monitoring środowiska przyrodniczego w podstawowych typach geoekosystemów Polski. Komitet Naukowy „Człowiek i Środowisko", Poznań.

Kostrzewski A., 1993. Geoekosystem obszarów nizinnych. Koncepcja metodologiczna. [W:] A. Kostrzewski (red.), Geoekosystem obszarów nizinnych. Komitet Naukowy „Człowiek i Środowisko", Zeszyty Naukowe, 6: 11–17.

Kostrzewski A., 2003. Skottehytta. Środowisko przyrodnicze otoczenia Petuniabukta, program badań. [W:] A. Kostrzewski, Z. Zwoliński (red.), Funkcjonowanie dawnych i współczesnych geoekosystemów Spitsbergenu. Warsztaty geomorfologiczne, Spitsbergen: VI-27-VI-29.

Kostrzewski A., 2021. Wprowadzenie – koncepcja organizacji i realizacji programu Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego. [W:] A. Kostrzewski, M. Majewski (red.), Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego – organizacja, system pomiarowy, metody badań. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa: 15–20.

Kostrzewski A., Rachlewicz G., 2017. Integrated monitoring of polar regions in diagnosis and assessment of contemporary landscape changes. [W:] G. Rachlewicz (red.), Cryosphre reactions against the background of environmental changes in contrasting high-Arctic conditions in Svalbard. Institute of Geoecology and Geoinformation, Adam Mickiewicz University in Poznań Polar reports, 2, Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Poznań: 53–57.

Kostrzewski A., Rachlewicz G., Zwoliński Z., 2007. Zmiany funkcjonowania geoekosystemów lądowych Arktyki. [W:] A. Marsz, A. Styszyńska (red.), Zmiany klimatyczne w Arktyce i Antarktyce w ostatnim pięćdziesięcioleciu XX wieku i ich implikacje środowiskowe. Wyd. Akad. Mor., Gdynia: 289–309.

Rachlewicz G., 2009. Contemporary sediment fluxes and relief changes in high Arctic glacierized valley systems (Billefjorden, Central Spitsbergen). Wydawnictwo Naukowe UAM.

Rachlewicz G., Szczuciński W., Ewertowski M., 2007. Post-"Little Ice Age" retreat rates of glaciers around Billefjorden in central Spitsbergen, Svalbard. Polish Polar Research, 28(3): 159–186.

Stach A., Kostrzewski A., Mazurek M., Michalska G.M., Zwoliński Z., 2003. Spatial patterns of stream alimentation in lowland areas of NW Poland a hydrochemical and geostatistical analysis. Journal of Hydrology and Hydromechanics, 51(3): 1–20.

Stawska M., 2017. Impacts of geomorphic disturbances on plant colonization in Ebba valley, central Spitsbergen, Svalbard. Quaestiones Geographicae, 36(1): 51–64.

Zwoliński Z., Kostrzewski A., Pulina M., 2013. Dawne i współczesne geoekosystemy Spitsbergenu. Polskie badania geomorfologiczne. Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Poznań.

Funkcjonowanie Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego w latach 1992–2022

Functioning of the Integrated Monitoring of the Natural Environment in the years 1992–2022

Stacja Bazowa ZMŚP Parsęta w Storkowie

Powołania Stacji Bazowych

Stacje Bazowe ZMŚP	Rok powołania
Puszcza Borecka	1993
Wigry	1993
Pojezierze Chełmińskie	1993
Parsęta	1993
Kampinos	1993
Łysogóry	1993
Beskid Niski	1993
Wolin	2009
Roztocze	2010
Poznań-Morasko	2013
Karkonosze	2013
Pogórze Karpackie	2022

Sympozja Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego
Symposia of the Integrated Monitoring of the Natural Environment

Nr	Organizator	Data	Miejsce	Tematyka
I	Storkowo	26–27.09.1990	Szczecinek, Storkowo	Geoekosystem obszarów nizinnych
II	Storkowo	10–11.10.1991	Szczecinek, Storkowo	Kompleksowy Monitoring Środowiska Przyrodniczego – metodologia, metodyka, założenia realizacyjne
III	Storkowo	12–13.10.1992	Szczecinek, Storkowo	Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego – metodologia, metodyka, realizacja
IV	Storkowo	23–24.09.1993	Szczecinek, Storkowo	Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego – funkcjonowanie i monitoring geoekosystemów
V	Święty Krzyż	13–14.10.1994	Bieliny, Jodłowy Dwór	Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego – funkcjonowanie i monitoring geoekosystemów
VI	Szymbark	14–16.09.1995	Stacja Naukowa w Szymbarku	Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Funkcjonowanie i monitoring geoekosystemów (monitoring geoekosystemów górskich)

Nr	Organizator	Data	Miejsce	Tematyka
VII	Koniczynka	19–21.09.1996	Toruń, Koniczynka	Funkcjonowanie i monitoring geoekosystemów z uwzględnieniem lokalnych problemów ekologicznych
VIII	Wigry	10–11.09.1997	Wigry	Funkcjonowanie geoekosystemów na terenach pojeziernych
IX	Storkowo	2–4.09.1998	Szczecinek, Storkowo	Funkcjonowanie i tendencje rozwoju geoekosystemów Polski
X	Kampinos	8–10.09.1999	Wojskowa Akademia Techniczna w Warszawie	Funkcjonowanie i tendencje rozwoju geoekosystemów Polski ze szczególnym uwzględnieniem parków narodowych
XI	Puszcza Borecka	19–21.09.2000	Żabinka	Funkcjonowanie geoekosystemów na terenach pojeziernych o niskiej antropopresji
XII	Święty Krzyż	11–13.09.2001	Kielce	Funkcjonowanie i monitoring geoekosystemów z uwzględnieniem zanieczyszczenia powietrza
XIII	Szymbark	12–14.06.2002	Stacja Naukowa w Szymbarku	Funkcjonowanie i monitoring geoekosystemów ze szczególnym uwzględnieniem zjawisk ekstremalnych
XIV	Koniczynka	3–5.09.2003	Toruń, Koniczynka	Funkcjonowanie i monitoring geoekosystemów w warunkach narastającej antropopresji
XV	Wolin	1–3.09.2004	Międzyzdroje	Funkcjonowanie geoekosystemów Polski w warunkach zmian klimatu i różnokierunkowej antropopresji
XVI	Wigry	15–17.09.2005	Wigry	Funkcjonowanie i monitoring geoekosystemów Polski w warunkach narastającej antropopresji
XVII	Kampinos	12–14.04.2007	Siedziba KPN w Izabelinie	Program Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego a zadania ochrony obszarów Natura 2000
XVIII	Szymbark	14–16.05.2008	Stacja Naukowa w Szymbarku	Funkcjonowanie środowiska przyrodniczego w okresie przemian gospodarczych w Polsce
XIX	Wolin	14–16.04.2010	Międzyzdroje	Funkcjonowanie geoekosystemów Polski w warunkach zmian użytkowania terenu i narastającej antropopresji

Nr	Organizator	Data	Miejsce	Tematyka
XX	Storkowo	11–13.04.2011	Borne Sulinowo	Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Funkcjonowanie geoekosystemów w różnych strefach krajobrazowych Polski
XXI	Święty Krzyż	5–7.07.2012	Sobków	Krajobraz i turystyka w warunkach zrównoważonego rozwoju
XXII	Wigry	27–29.05.2013	Gawrych Ruda	Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego – aspekty metodyczne, stan aktualny i perspektywy
XXIII	Roztocze	3–6.06.2014	Zwierzyniec	Ocena stopnia przeobrażeń obszarów cennych przyrodniczo
XXIV	Karkonosze	15–17.04.2015	Szklarska Poręba	Funkcjonowanie geoekosystemów Polski w warunkach zmieniającego się klimatu
XXV	Storkowo	27–29.04.2016	Borne Sulinowo–Storkowo	Funkcjonowanie, tendencje rozwoju, zagrożenia i ochrona środowiska przyrodniczego Polski
XXVI	Koniczynka	24–26.05.2017	Ciechocinek	Stan i perspektywy środowiska przyrodniczego Polski w warunkach zmian klimatu i narastającej antropopresji
XXVII	Beskid Niski	19–21.09.2018	Gorlice	Ocena funkcjonowania i kierunków zmian środowiska przyrodniczego Polski na podstawie wieloletnich badań stacjonarnych
XXVIII	Puszcza Borecka	16–19.09.2019	Jeziorowskie	Funkcjonowanie geoekosystemów pod presją zanieczyszczenia atmosfery i zmian klimatu
XXIX	Kampinos	28–29.09.2020	on-line	Aktualny stan i przemiany środowiska przyrodniczego geoekosystemów jako cecha wskaźnikowa zmian klimatu
XXX	Parsęta	8–10.06.2022	Szczecinek, Storkowo	Współczesne przemiany naturalne i antropogeniczne środowiska przyrodniczego zlewni rzecznych i jeziornych

Szkolenia Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego
Trainings of the Integrated Monitoring of the Natural Environment

Nr	Organizator	Data	Miejsce	Tematyka
1	Storkowo	14–17.10.1992	Storkowo	Koncepcja ZMŚP, zakres i metodyka badań wybranych elementów środowiska przyrodniczego dla potrzeb monitoringu zintegrowanego, dyskusja o wyborze sprzętu i aparatury
2	Centrum ZMŚP	21–26.06.1993	Tarnów Jeziorny	Metody pomiarów hydrologicznych, meteorologicznych, monitoring jezior
3	Puszcza Borecka	26–30.09.1994	IOŚ Warszawa, Jeziorowskie	Metodologia ZMŚP dotycząca zanieczyszczeń powietrza
4	Centrum ZMŚP	14.11.1995	Poznań	System informatyczny ZMŚP
5	Storkowo	9–16.07.1995	Storkowo	Gleby, rośliny, wody gruntowe
6	Wigry	22–26.06.1998	Wigierski Park Narodowy	Fauna bezkręgowa, meteorologia, biologiczne metody oceny jakości wód powierzchniowych, system monitoringu środowiska Stacji Bazowej Wigry
7	Centrum ZMŚP	28.06–02.07.1999	Tarnów Jeziorny	Metody pomiarów hydrologicznych, meteorologicznych, GIS
8	Szymbark	23–26.05.2001	Szymbark	Monitoring porostów, metody i ocena pomiarów meteorologicznych, pokrycie terenu z wykorzystaniem obrazów satelitarnych
9	Storkowo	18–23.08.2002	Storkowo	Gleby, biegaczowate, GIS – użytkowanie ziemi, uszkodzenia drzew i drzewostanów
10	Kampinos	2–6.08.2003	Izabelin	Monitoring wód podziemnych, systemy informacji geograficznej
11	Wigry	27.09–1.10.2004	Gawrych Ruda Wigierski Park Narodowy	Program ZMŚP w kontekście dyrektywy INSPIRE, wykorzystanie GPS w aktualizacji danych przestrzennych, przetwarzanie zdjęć lotniczych w TNTMips, metody statystycznego opracowania danych
12	Szymbark	23–26.05.2005	Szymbark	Zastosowanie metod statystycznych do interpretacji danych ZMŚP. Pokrycie terenu i użytkowanie ziemi
13	Wolin	6–9.11.2007	Wolin	GIS użytkowanie terenu, geoindykatory i bioindykatory
14	Wolin	15–17.06.2008	Wolin	Program Gleby w ZMŚP

Nr	Organizator	Data	Miejsce	Tematyka
15	Święty Krzyż	6–8.10.2008	Kielce	Monitoring wód podziemnych, biologiczne elementy jakości wód w RDW, wskaźniki chemicznego stanu wód i gleb, metody oceny wpływu zanieczyszczeń powietrza i opadów atmosferycznych
16	Wigry	16–18.06.2010	Mikołajewo	Monitoring uszkodzeń drzew i drzewostanów, monitoring epifitów nadrzewnych, flora i roślinność zlewni reprezentatywnej, dyskusja o programach pomiarowych
17	Roztocze	11–14.10.2011	Zwierzyniec	Metodologia ZMŚP w ramach programów: A1, J2, P1 oraz programu rozszerzonego obejmującego podsystem monitoringu przyrody
18	Storkowo	18–19.10.2012	Storkowo	Modelowanie – prognozowanie zmian bilansu wodnego i biogeochemicznego dla stanowisk pomiarowych i zlewni reprezentatywnych ZMŚP
19	Wolin	10–12.04.2013	Wolin	Glebowe wskaźniki stanu środowiska przyrodniczego – interpretacja profili glebowych, zanieczyszczenia gleb i roztworów glebowych Modelowanie – scenariusze zmian bilansu wodnego i biogeochemicznego dla zlewni reprezentatywnych ZMŚP Świadczenia geoekosystemów – założenia wstępne wartościowania środowiska przyrodniczego
20	Święty Krzyż	20–22.05.2014	Mąchocice Kapitulne	Hydromorfologia i hydrobiologia rzek, świadczenia geoekosystemów
21	Szymbark	21–24.09.2015	Wapienne	Ocena funkcjonowania geoekosystemów zlewni reprezentatywnych z wykorzystaniem geo- i biowskaźników. Meteorologia, wody powierzchniowe rzeki i jeziora – organizacja pomiarów, opracowanie wyników i ich interpretacja
22	Poznań	22–23.09.2016	Poznań	Program ZMŚP – wybrane programy, interpretacja i prezentacja wyników
23	Kampinos	17–20.09.2017	Izabelin	Podstawy metodologiczne i metodyczne realizacji programu ZMŚP
24	Roztocze	9–11.05.2018	Zwierzyniec	Metodologiczne i metodyczne aspekty realizacji programu ZMŚP

Nr	Organizator	Data	Miejsce	Tematyka
25	Pojezierze Chełmińskie	16–18.06.2019	Toruń	Zastosowanie dronów w monitoringu środowiska, kontrola jakości poboru próbek i danych oraz modelowanie obiegu wody w zlewniach reprezentatywnych Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego
26	Łysogóry	22–23.10.2020	on-line	Zapewnienie i kontrola jakości danych Standaryzacja systemów pomiarowych Oznaczanie odczynu i przewodności elektrycznej właściwej w glebach Wykorzystanie mchu rokitnika pospolitego do oceny zanieczyszczenia powietrza metalami ciężkimi
27	Wolin	23–24.09.2021	on-line	Znaczenie stanu i zmian warunków pogodowych w badaniach środowiska przyrodniczego (organizacja monitoringu, system pomiarowy, metody badań, interpretacja i prezentacja wyników badań)
28	Centrum ZMŚP	22.09.2022	on-line	Metody monitorowania i interpretacji wyników badań wód powierzchniowych, gleb, chemizmu roztworów glebowych, uszkodzeń drzew i drzewostanów w funkcjonowaniu geoekosystemów zlewni rzecznych i jeziornych Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego

Seminaria Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego
Seminars of the Integrated Monitoring of the Natural Environment

Lp.	Organizator	Data	Miejsce	Tematyka
1	Centrum ZMŚP, GIOŚ	25.03.2014	Warszawa	Seminarium Funkcje i zadania Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego w ochronie struktury krajobrazowej kraju
2	Centrum ZMŚP, GIOŚ, KNG PAN, IGiPZ PAN	7.11.2019	Warszawa	Stan i przemiany środowiska przyrodniczego geoekosystemów Polski w latach 1994–2015 w oparciu o realizację programu Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego
3	Centrum ZMŚP, GIOŚ, IGiPZ PAN, SB Beskid Niski	12.12.2019	Warszawa	Procesy ekstremalne i ich wpływ na przemiany środowiska przyrodniczego Polski w warunkach zmian klimatu i narastającej antropopresji

Współpraca z Głównym Inspektoratem Ochrony Środowiska
Cooperation with the Chief Inspectorate of Environmental Protection

Lp.	Przedsięwzięcie/zadanie	Umowa nr
1	Realizacja programu Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego – nadzór merytoryczny oraz prowadzenie pomiarów w 2002 r.	7/2002/F Finansowana ze środków NFOŚiGW na podstawie umowy dotacji nr 673/2001/Wn-50/MN-PO-BD/D
2	Realizacja programu Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego – nadzór merytoryczny oraz prowadzenie pomiarów w 2003 r.	3/2003/F, Finansowana ze środków NFOŚiGW na podstawie umowy dotacji nr 373/2001/Wn-50/MN-PO-BD/D
3	Realizacja programu Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego – nadzór merytoryczny oraz prowadzenie pomiarów w latach 2004–2005	31/2004/F Finansowana ze środków NFOŚiGW na podstawie umowy dotacji nr 411/2004/Wn-50/MN-PO-BD/D
4	Realizacja programu Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego – nadzór merytoryczny oraz prowadzenie pomiarów w latach 2006–2008	51/2006/F Finansowana ze środków NFOŚiGW na podstawie umowy dotacji nr 525/2006/Wn-50/MN-PO-BD/D
5	Realizacja programu ZMŚP – nadzór merytoryczny oraz prowadzenie pomiarów w latach 2009–2011	48/2009/F Finansowana ze środków NFOŚiGW na podstawie umowy dotacji nr 442/2009/Wn-50/MN-PO-BD/D
6	Realizacja programu Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego – nadzór merytoryczny oraz prowadzenie pomiarów w latach 2012–2014	25/2013/F Finansowana ze środków NFOŚiGW na podstawie umowy dotacji nr 259/2012/Wn07/MN-PO-BD/D
7	Realizacja programu Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego – nadzór merytoryczny oraz prowadzenie badań w latach 2015–2017	18/2015/F Finansowana ze środków NFOŚiGW na podstawie umowy dotacji nr 889/2014/WN-50/MN-PO/D
8	Realizacja programu Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego – nadzór merytoryczny oraz prowadzenie pomiarów w latach 2018–2020	19/2018/F Finansowana ze środków NFOŚiGW na podstawie umowy dotacji nr 10/2018/Wn50/MN-po/D
9	Realizacja programu Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego (ZMŚP) – nadzór merytoryczny oraz przeprowadzenie badań w roku 2021	DM/13/2020/F Finansowana ze środków NFOŚiGW na podstawie umowy dotacji nr 50/2019/Wn50/MN-PO/D
10	Realizacja programu Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego (ZMŚP) – nadzór merytoryczny oraz przeprowadzenie badań w roku 2022	GIOŚ/ZP/179/2022/DMŚ/NFOŚ Finansowana ze środków NFOŚiGW na podstawie umowy dotacji nr 50/2019/Wn50/MN-PO/D

Publikacje Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego
Publications of the Integrated Monitoring of the Natural Environment

1992

1 Stacje terenowe monitoringu środowiska przyrodniczego w Polsce. A. Kostrzewski, A. Stach (red.). Centrum ZMŚP Poznań, Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa, ss. 328.

1993

2 Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Monitoring geoekosystemów. A. Kostrzewski (red.). Centrum ZMŚP Poznań, Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa, ss. 294, ISBN 83-85949-19-4.

3 Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego w Polsce. Wybrane problemy. A. Kostrzewski (red.). Centrum ZMŚP Poznań, Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa, ss. 225, ISBN 83-85660-04-6.

1994

4 Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Stacja Bazowa Święty Krzyż. A. Kowalkowski (red.). Święty Krzyż. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa, ss. 96.

5 Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Stacja Bazowa Szymbark (Karpaty Fliszowe). L. Starkel, E. Gil (red.). Szymbark. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa, ss. 169, ISBN 83-85949-60-7.

6 Seminarium Szymbark '94. Znaczenie badań i monitoringu środowiska dla rozwiązywania problemów ochrony środowiska zlewni rzeki Ropy. E. Gil (red.). Szymbark. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Nowy Sącz, ss. 90, ISBN 83-85949-96-8.

7 Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Stacja Bazowa Storkowo. A. Kostrzewski (red.). Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa, ss. 246, ISBN 83-85949-59-3.

1995

8 Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Funkcjonowanie i Monitoring Geoekosystemów. A. Kowalkowski (red.). Święty Krzyż, Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa, ss. 190, ISBN 83-86676-22-1.

9 Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Stan geoekosystemów Polski w 1994 roku. A. Kostrzewski (red.). Centrum ZMŚP Poznań, Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa, ss. 214, ISBN 83-86676-67-1.

10 Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Propozycje programowe. A. Kostrzewski (red.). Centrum ZMŚP Poznań, Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa, ss. 164, ISBN 83-86676-22-1.

11 Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Zasady organizacji, system pomiarowy, wybrane metody badań. A. Kostrzewski, M. Mazurek., A. Stach (red.). Centrum ZMŚP Poznań, Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa, ss. 255, ISBN 83-86676-68-X.

1996

12 Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego – Stacja Bazowa Koniczynka. G. Wójcik, K. Marciniak (red.). Koniczynka. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa, ss. 272, ISBN 83-86676-88-4.

13 Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Monitoring Geoekosystemów Górskich. R. Soja, P. Prokop (red.). Szymbark. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa, ss. 224, ISBN 83-86676-86-8.

1997

14 Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Stacja Bazowa Puszcza Borecka. T. Śnieżek (red.). Puszcza Borecka. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa, ss. 168, ISBN 83-87166-83-9.

15 Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Materiały z VIII Sympozjum ZMŚP. Funkcjonowanie geoekosystemów na terenach pojeziernych. L. Krzysztofiak. M. Romański (red.). Wigry. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa, ss. 96, ISBN 83-906233-7-4.

16 Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Stacja Bazowa Wigry (Wigierski Park Narodowy). L. Krzysztofiak (red.). Wigry. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa, ss. 154, ISBN 83-87166-85-5.

1998

17 Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Stan geoekosystemów Polski w latach 1994–1997. A. Kostrzewski (red.). Centrum ZMŚP Poznań, Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa, ss. 244, ISBN 83-7217-035-5.

18 Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Funkcjonowanie i tendencje rozwoju geoekosystemów Polski. IX Sympozjum ZMŚP. A. Kostrzewski (red.). Storkowo. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa, ss. 256, ISBN 83-7217-036-3.

1999

19 Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Stacja Bazowa „Pożary" w Kampinoskim Parku Narodowym. A. Andrzejewska (red.). Kampinos. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa, ss. 136, ISBN 83-7217-065-7.

2001

20 Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego w Polsce. Funkcjonowanie i monitoring geoekosystemów z uwzględnieniem zanieczyszczenia powietrza . M. Jóźwiak, A. Kowalkowski (red.) Św. Krzyż, Biblioteka Monitoringu Środowiska, ss. 404, ISBN 83-7217-134-3.

2003

21 Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Funkcjonowanie i monitoring geoekosystemów ze szczególnym uwzględnieniem zjawisk ekstremalnych. W. Bochenek, E. Gil (red.). Szymbark. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Szymbark, ss. 192, ISBN 83-7217-196-3.

2004

22 Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Funkcjonowanie i monitoring geoekosystemów w warunkach narastającej antropopresji. M. Kejna, J. Uscka (red.). Koniczynka. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Koniczynka, ss. 437, ISBN 83-916579-8-1.

2005

23 Funkcjonowanie geoekosystemów Polski w warunkach zmian klimatu i różnokierunkowej antropopresji. A. Kostrzewski, R. Kolander (red.). Biała Góra. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Poznań, ss. 612, ISBN 83-89290-96-0.

2006

24 Stan, przemiany i funkcjonowanie geoekosystemów Polski w latach 1994–2004 na podstawie Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego. A. Kostrzewski, R. Kruszyk (red.). Centrum ZMŚP, Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa, ss. 294, ISBN 83-7217-292-7.

25 Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Funkcjonowanie i monitoring geoekosystemów Polski w warunkach narastającej antropopresji. L. Krzysztofiak (red.). Wigry. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa, ss. 424, ISBN 978-83-7217-298-3.

2007

26 Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Program Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego, a zadania ochrony obszarów Natura 2000. A. Kostrzewski, A. Andrzejewska (red.). Kampinos. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa, ss. 447, ISBN 978-83-7217-305-8.

2009

27 Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Funkcjonowanie środowiska przyrodniczego w okresie przemian gospodarczych w Polsce. W. Bochenek, M. Kijowska (red.). Szymbark. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Szymbark, ss. 328, ISBN 978-83-7631-100-5.

2011

28 Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Funkcjonowanie geoekosystemów w warunkach zmian użytkowania terenu i narastającej antropopresji. A. Kostrzewski, M. Samołyk (red.). Biała Góra. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Biała Góra, ss. 187, ISBN 978-83-932529-0-9.

2012

29 Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Funkcjonowanie geoekosystemów w różnych strefach krajobrazowych Polski. A. Kostrzewski, J. Szpikowski (red.). Storkowo. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Storkowo, ss. 222, ISBN 978-83-936530-0-3.

2013

30 Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Aspekty metodyczne, stan aktualny, perspektywy. XII Sympozjum ZMŚP. 20-lecie Stacji Bazowej Wigry. L. Krzysztofiak (red.). Wigierski Park Narodowy, Krzywe, ss. 100, ISBN 978-83-88344-97-8.

2016

31 Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Funkcjonowanie, tendencje rozwoju, zagrożenie i ochrona środowiska przyrodniczego Polski. A Kostrzewski, J. Szpikowski, M. Domańska (red.). Storkowo. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Storkowo, ss. 204, ISBN 978-83-936530-0-4.

2017

32 Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Funkcjonowanie środowiska przyrodniczego Polski w warunkach globalnych zmian klimatu. M. Kejna, J. Uscka-Kowalkowska (red.). UMK, Toruń, ss. 314, ISBN 978-83-231-3826-6.

2018

33 Stan i przemiany środowiska przyrodniczego geoekosystemów Polski w latach 1994–2015 w oparciu o realizację programu Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego. A. Kostrzewski, M. Majewski (red.). Warszawa, ss. 583, ISBN 978-83-63016-38-8.

34 Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Ocena funkcjonowania i kierunków zmian środowiska przyrodniczego Polski na podstawie wieloletnich badań stacjonarnych. W. Bochenek, M. Kijowska-Strugała (red.). Szymbark, ss. 288, ISBN 978-83-7631-821-9.

2020

35 Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Aktualny stan i przemiany środowiska przyrodniczego geoekosystemów jako cecha wskaźnikowa zmian klimatu. A. Olszewski, A. Andrzejewska (red.). Izabelin, ss. 224, ISBN 978-83-7986-325-9.

2021

36 Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Organizacja, system pomiarowy, metody badań. Wytyczne do realizacji. A. Kostrzewski, M. Majewski (red.). Warszawa, ss. 377, ISBN 978-83-7986-358-7.