



Strasbourg, 24 września 2009 r.

T-PVS/Inf (2009) 8 rev

[Inf08erev_2009.doc]

KONWENCJA O OCHRONIE GATUNKÓW
DZIKIEJ FLORY I FAUNY EUROPEJSKIEJ ORAZ ICH SIEDLISK

Stały Komitet

29. posiedzenie

Berno, 23-26 listopada 2009 r.

**WPŁYW ZMIANY KLIMATU NA GATUNKI
BEZKRĘGOWCÓW W EUROPIE, Z ODNIESIENIEM DO
GATUNKÓW NARAŻONYCH OKREŚLONYCH W
KONWENCJI BERNEŃSKIEJ**

Raport przygotowany przez

Dr Roberta Wilsona

Centrum Ekologii i Ochrony, University of Exeter, Wielka Brytania

Niniejszy dokument nie zostanie rozdany podczas posiedzenia. Proszę zabrać ze sobą niniejszy egzemplarz.

Ce document ne sera plus distribué en réunion. Prière de vous munir de cet exemplaire.



Sfinansowano ze środków
Narodowego Funduszu Ochrony
Środowiska i Gospodarki Wodnej

*Tłumaczenie sfinansowane ze środków Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska
i Gospodarki Wodnej*

*Nieniejsze tłumaczenie zostało wykonane na zlecenie Generalnej Dyrekcji Ochrony
Środowiska i nie jest oficjalnym tłumaczeniem Rady Europy.*

Dokument opublikowany za zgodą Sekretariatu Konwencji Berneńskiej.

Spis treści

STRESZCZENIE.....	5
1. WPROWADZENIE	6
2. ADAPTACJA BEZKRĘGOWCÓW DO NIEDAWNEJ ZMIANY KLIMATU	6
2.1 Zmiany fenologiczne.....	7
2.2 Reakcje demograficzne.....	8
2.3 Preferencje siedliskowe.....	9
2.4 Reakcje o charakterze ewolucyjnym	9
2.5 Równoleżnikowe zmiany zasięgu	10
2.6 Wysokościowe zmiany zasięgu.....	10
2.7 Zmiany bogactwa i składu gatunkowego	11
2.8 Zmiany w interakcjach biotycznych.....	12
3. PRZYSZŁE SKUTKI I ZAGROŻENIA	13
3.1 Bioklimatyczne modele przyszłych zasięgów gatunków	13
3.2 Interakcje zmian klimatu z dodatkowymi zagrożeniami dla bioróżnorodności bezkęgowców.....	15
3.3 Zmiana klimatu i usługi ekosystemowe bezkręgowców	16
4. PODATNOŚĆ BEZKRĘGOWCÓW Z KONWENCJI BERNEŃSKIEJ NA ZMIANĘ KLIMATU.....	18
4.1 Motyle	19
4.2 Inne owady	22
4.3 Inne stawonogi - pajęczaki	22
4.4 Mięczaki.....	23
4.5 Koralowce	23
5. ADAPTACJA OCHRONY BEZKRĘGOWCÓW DO ZMIANY KLIMATU	23
5.1 Wrażliwości gatunków.....	23
5.2 Zakres planowanej adaptacji.....	23
5.3 Implikacje w zakresie monitoringu, badań i polityki	27

6. GŁÓWNE WNIOSKI I ZALECENIA.....	28
7. PODZIĘKOWANIA	30

STRESZCZENIE

- Istnieją mocne dowody na to, że niedawna zmiana klimatu miała wpływ na bezkręgowce.
- Obserwuje się zmiany dotyczące fenologii, procesów demograficznych (śmiertelności i płodności) i preferencji siedliskowych wśród populacji bezkręgowców. Istnieją pewne dowody na zmiany ewolucyjne w zakresie zdolności rozprzestrzeniania się i indukcji diapauzy.
- Rozmieszczenie gatunków bezkręgowców rozwija się na granicach wysokich szerokości geograficznych lub granicach zasięgu wysokości i zmniejsza się na granicach niskich szerokości geograficznych lub granicach wysokości. Tempo ekspansji do granic zasięgu jest ograniczone przez dostępność siedlisk i możliwości rozprzestrzeniania się. W przypadku niektórych gatunków zmniejszenie skraju zasięgu nie wydaje się wskazywać na wyraźne opóźnienie czasowe następujące po ociepleniu klimatu.
- Bogactwo gatunkowe nie zwiększyło się na wysokich szerokościach geograficznych tak znacznie, jak to przewidywano w związku z biogeograficznym powiązaniem gatunków, ze względu na ograniczenie zwiększania zasięgu poprzez utratę siedlisk. Gatunki o szerokim zasięgu lub gatunki generalistyczne, a także gatunki występujące na niskich szerokościach geograficznych lub na niskich wysokościach, stanowią obecnie większą część gatunków w niektórych środowiskach bezkręgowców w porównaniu z gatunkami zajmującymi tylko jeden rodzaj siedlisk („specjalistami”) lub gatunkami występującymi na wysokich szerokościach geograficznych lub wysokościach i przy niskich temperaturach.
- Możliwy wpływ interakcji biotycznych na reakcje gatunków na zmianę klimatu jest rozpoznany w niewielkim stopniu i pociąga za sobą skutki w postaci pojawiających się chorób lub inwazyjnych gatunków obcych.
- Zmiana klimatu może mieć poważne skutki dla bezkręgowców, które zapewniają usługi ekosystemowe, takie jak obieg składników pokarmowych lub zapylenie, lub wykonują szkodliwe działania, np. jako wektory chorób i szkodniki leśne.
- Modele bioklimatu stosowane do potencjalnych rozmieszczeń europejskich motyli w 2080 roku wskazują, że 48-78% gatunków zmniejszy wielkość rozmieszczenia o ponad 50%, jeśli nie będą w stanie dostosować rozmieszczenia do zmian klimatu. Istnieją znaczne różnice w przewidywanych stratach rozmieszczenia między scenariuszami w oparciu o wzrosty temperatury o 2,4 °C i 4,1 °C.
- Bezkręgowce wymienione w Konwencji Berneńskiej charakteryzują się dużą specyficznością w odniesieniu do siedlisk i wąskim rozmieszczeniem. Ich wrażliwość i brak zdolności adaptacyjnych sugeruje dużą podatność na zmiany klimatu.
- Planowana adaptacja może mieć kluczowe znaczenie dla zachowania tych bezkręgowców w warunkach zmiany klimatu. Brane są pod uwagę działania w zakresie ochrony krajobrazu, wspomaganie kolonizacji i zarządzania różnorodnością siedlisk, podobnie jak monitoring, badania i implikacje polityczne.

1. WPROWADZENIE

Dowody na antropogeniczną zmianę klimatu są obecnie przytłaczające (IPCC 2007), a ostatnie badania i metaanalizy wskazują również, że różnorodność systemów ekologicznych i taksonów zmienia się w sposób zgodny z niedawnym ociepleniem klimatu (Hughes 2000, Walther i in. 2002, Parmezan i Yohe 2003, Root i in. 2003, Rosenzweig i in. 2007). Wiele przykładów ekologicznych adaptacji do zmiany klimatu pochodzi z badań przeprowadzonych na bezkręgowcach, a szybkość z jaką gatunki i społeczności bezkręgowców zareagowały na niedawne ocieplenie klimatu sugeruje, że dalsze skutki zmiany klimatu będą miały znaczny wpływ na rozmieszczenie i różnorodność bezkręgowców.

Klimat wpływa na rozmieszczenie w czasie i przestrzeni zarówno warunków środowiskowych, jak i zasobów (inne organizmy dla heterotroficznych bezkręgowców) dla wzrostu i przetrwania gatunku, dlatego jest powszechnie uważany za główny wyznacznik rozmieszczenia gatunków (np. MacArthur 1972, Gaston 2003) i globalnych wzorców różnorodności biologicznej (np. Currie 1991, Hawkins i in. 2003). Dzieje się tak dlatego, że jako małe organizmy ektotermiczne bezkręgowce są szczególnie wrażliwe na wahania temperatury, wilgotności oraz innych warunków środowiskowych (np. pH, zasolenie). Ponadto wiele bezkręgowców ma krótkie cykle życiowe, wysokie wskaźniki płodności i umieralności oraz formy dyspersyjne w niektórych fazach cyklu życia. Stąd dynamika, rozmieszczenie i fenologia populacji bezkręgowców może szybko reagować na zmiany warunków klimatycznych. Ponadto społeczności bezkręgowców są bardzo zróżnicowane w porównaniu z innymi grupami taksonomicznymi, tak że istnieje możliwość znacznych zmian w zakresie bogactwa i składu gatunków bezkręgowców w czasie i przestrzeni, w odpowiedzi na zmiany środowiskowe. Zmiany w dynamice, rozmieszczeniu i różnorodności populacji bezkręgowców wynikają z indywidualnych adaptacji poszczególnych gatunków do zmian klimatu i innych czynników zmian środowiskowych, ale mogą prowadzić do znaczących zmian w zakresie biotycznych interakcji wśród bezkręgowców (np. konkurencja, relacja drapieżnik/ofiara, dynamika żywiciel/parazytoid), a także interakcji między bezkręgowcami i innymi grupami taksonomicznymi (np. dostępność gospodarzy dla bezkręgowców, efekty patogenów, pasożyty i drapieżcy bezkręgowców). Wpływ zmiany klimatu na dynamikę, rozmieszczenie i różnorodność bezkręgowców może zatem oddziaływać na stan ich ochrony.

Niniejszy raport przedstawia dowody na adaptację bezkręgowców do niedawnej zmiany klimatu oraz modele wzorców adaptacji bezkręgowców do przyszłych zmian, w celu zobrazowania mechanizmów, którym będą podlegać bezkręgowce w wyniku ciągłych zmian, oraz w celu wyeliminowania potencjalnych zagrożeń dla różnorodności biologicznej bezkręgowców, związanych ze zmianą klimatu. W raporcie przedstawiono przykłady licznych taksonów bezkręgowców, a następnie skupiono się na potencjalnym zagrożeniu gatunków wymienionych w Konwencji Berneńskiej. Ekologiczne cechy gatunków mające wpływ na ich wrażliwość na zmianę klimatu zostały opisane w ramach konkretnych studiów przypadków i posłużyły do stworzenia ram dla oceny zagrożenia gatunków zarówno bezpośredniego, przez skutki zmiany klimatu, jak i w wyniku ich interakcji z dodatkowymi zagrożeniami dla różnorodności biologicznej (np. utrata siedlisk i gatunki inwazyjne). Na koniec przedstawiono ogólne zalecenia dotyczące dostosowania ochrony bezkręgowców do zmiany klimatu.

2. ADAPTACJA BEZKRĘGOWCÓW DO NIEDAWNEJ ZMIANY KLIMATU

Systemy biologiczne reagują na szeroki zakres bodźców środowiskowych, a obecne spadki globalnego rozmieszczenia, wielkości populacji i różnorodności genetycznej gatunków są związane z procesami antropogenicznymi, takimi jak utrata i fragmentacja siedlisk, zanieczyszczenie środowiska, nadmierna eksploatacja zasobów naturalnych i rozprzestrzenianie się inwazyjnych gatunków obcych (Sala i in. 2000). Jednak metaanalizy badań przeprowadzonych dla szerokiego zakresu taksonów i regionów geograficznych dostarczyły przekonujących dowodów na to, że systemy biologiczne uległy zmianie zgodnie ze zmianą klimatu, i tylko przez nie mogą zostać satysfakcjonująco wyjaśnione (Parmesan i Yohe 2003, Root i in. 2003). Dwie najlepiej udokumentowane zmiany biologiczne związane z klimatem dotyczą

zmian w fenologii i rozmieszczeniu gatunków na wyższych szerokościach geograficznych i wysokościach (Hughes 2000, Walther i in. 2002). Pierwsza z nich, zmiana w rozmieszczeniu, jest bardziej interesująca z punktu widzenia ochrony, biorąc pod uwagę użyteczność wielkości zasięgu gatunków w odniesieniu do monitorowania stanu ochrony i zagrożenia gatunków wyginięciem. Jednak zmiany fenologiczne mogą mieć konsekwencje dla przyszłych reakcji gatunków i społeczności na zmianę klimatu, jeżeli istnieje możliwość modyfikacji fenologicznego nakładania się pomiędzy gatunkami oddziałującymi na siebie wzajemnie. Ponadto w wielu badaniach zidentyfikowano wpływ zmiany klimatu na szereg powiązanych procesów ekologicznych, które mogą pomóc wyjaśnić wrażliwość gatunków na zmianę klimatu oraz zakres ich skutecznej ochrony, na przykład procesy demograficzne (wzrost, śmiertelność i płodność), preferencje siedliskowe i reakcje ewolucyjne. Zmiany w rozmieszczeniu gatunków wpłynęły na wzorce bogactwa i składu gatunkowego, co z kolei może wpłynąć na przyszłe interakcje biotyczne. Dowody na te reakcje ekologiczne bezkręgowców w odpowiedzi na zmianę klimatu są obecnie uważane zarówno za dowody na wszechobecne skutki zmiany klimatu, jak i za ogólne informacje na temat mechanizmów, które wpływają na adaptację gatunków do zmiany klimatu.

2.1 Zmiany fenologiczne

Wiele badań wykazało, że gatunki stają się aktywne, migrują i rozmnażają się na początku roku w związku ze wzrostem temperatury, co prowadzi do szybszego tempa wzrostu lub wcześniejszego wyjścia z zimowej pasywności (Roy i Sparks 2000, Peñuelas i in. 2002, Stefanescu i in. 2003). Długoterminowe dane z programów badania owadów w Europie dostarczyły cennych dowodów na przyspieszenie pojawiania się dorosłych owadów w miarę wzrostu temperatury. W Wielkiej Brytanii daty pierwszego wylotu 28 spośród 33 analizowanych gatunków motyli w latach 1976-1998 były wcześniejsze przy wyższych temperaturach, a wzrost temperatury o 1 °C doprowadził do przyspieszenia terminu pierwszego wylotu średnio o 4,5 dnia (Roy i Sparks 2000). Motyle pojawiają się wcześniej również w Katalonii (Hiszpania), co jest związane z wyższymi temperaturami i niższymi opadami zimą lub wiosną (Stefanescu i in. 2003). Dla 17 gatunków brytyjskich ważek daty pierwszego kwartyła okresów wylotu uległy przyspieszeniu średnio o 1,5 dnia na dekadę (3 dni dla wzrostu temperatury o 1 °C) w latach 1960-2004 (Hassall i in. 2007). W Austrii trzy gatunki motyli, pszczoły miodnej *Apis mellifera* i chrabąszcza majowego *Melolonthus melolonthus* pojawiały się wcześniej o 3 do 5 dni w związku ze wzrostem temperatury o 1 °C między lutym a kwietniem (Scheifinger i in. 2005). Kulminacyjne terminy pojawienia się 104 gatunków molowców w Holandii uległy przyspieszeniu średnio o 11,6 dni w latach 1975-1994, czemu towarzyszył wzrost średniej rocznej temperatury o 0,9 °C (Ellis i in. 1997, Kuchlein i Ellis 1997).

Wzrost temperatury umożliwił również wielu gatunkom dłuższą aktywność w ciągu roku (Roy i Sparks 2000). W przypadku brytyjskich motyli wcześniejszym datom pojawienia się towarzyszyły dłuższe okresy lotów dla 24 gatunków (całkowita średnia +3 dni na dekadę, n = 35 gatunków). Wzrost ten zaznaczył się szczególnie wyraźnie wśród gatunków, u których w ciągu roku pojawia się kilka pokoleń; były one w stanie zwiększyć liczbę pokoleń w niektórych częściach swojego zasięgu.

Ostatnie przeglądy badań fenologicznych pokazują średnie przyspieszenie terminów wydarzeń wiosennych o 2,3-5,1 dni w ciągu dekady dla wielu grup taksonomicznych (Parmesan i Yohe 2003, Root i in. 2003). Cykle życia drzew przyspieszyły średnio tylko o trzy dni w związku ze zmianą klimatu, podczas gdy cykle życia bezkręgowców o pięć dni na dekadę (Root i in. 2003). Subtelne różnice pomiędzy sygnałami związanymi z fenologią na różnych poziomach troficznych mogą prowadzić do czasowego niedopasowania pomiędzy pojawieniem się larw bezkręgowców oraz dostępnością pożywienia, na przykład: wzrost średniej temperatury zimą bez towarzyszącego mu spadku liczby dni mrozu zmniejszył synchronizację między wylęgiem jaj ćmy piędzik przedzimek *Operophtera brumata* i pączkowaniem jej gospodarza *Quercus robur* (Visser i Hollemann 2001). W systemie tym przyspieszenie cyklu fenologicznego owadów roślinożernych nie spotkało się z reakcją wróblowatych, które się nimi żywią (Visser i in. 1998 2006). Niemniej jednak najnowsze badania sugerują, że larwy owadów roślinożernych mogą dość szybko przystosować się do zmienionej czasowej dostępności pożywienia, a zmniejszenie zagrożenia ze strony drapieżnych ptaków ze względu na niedopasowanie reprodukcji w czasie może skompensować spadek wydajności z powodu niedopasowania fenologicznego roślin żywicielskich (Both i in. 2009).

Zmiany fenologiczne mogą również doprowadzić do zmian warunków klimatycznych najczęściej doświadczanych przez gatunki na poszczególnych etapach cyklu życia. Wiele gatunków brytyjskich motyli pojawia się wcześniej, ale konsekwencje w postaci warunków klimatycznych doświadczanych przez dorosłe osobniki, etapów rozmnażania gatunków, zależą od ich cyklu życia: gatunki pojawiające się wiosną mogą nie doświadczyć znacznie wyższych temperatur, jeśli pojawienie się dorosłych osobników będzie przypadać na chłodniejsze, wcześniejsze terminy, ale gatunki pojawiające się późnym latem mogą doświadczyć dużo wyższych temperatur podczas reprodukcji i wybierania miejsca na złożenie jaj ze względu na cieplejsze warunki ogólne, a także ze względu na pojawianie się w cieplejszym okresie roku. Szacuje się, że w latach 1985-2004 pojawiający się wiosną zorzynek rzeżuchowiec *Anthocharis cardamines* doświadczył spadku temperatury o 0,4°C w okresie ich lotu, podczas gdy karłatek klinek *Hesperia comma*, pojawiający się w lecie i na jesieni, doświadczył wzrostu temperatury o 2,8° C (Wilson i in. 2007a).

2.2 Reakcje demograficzne

Długoterminowe dane z monitoringu motyli wykazały, jak rosnąca temperatura przyczynia się do przyspieszenia cyklu fenologicznego, a także pokazały zależności pomiędzy wielkością populacji i warunkami pogodowymi (Roy i in. 2001). Roczne rozmiary populacji większości brytyjskich motyli są pozytywnie powiązane z ciepłymi i suchymi warunkami wylotu wiosną i latem oraz ciepłymi i wilgotnymi warunkami w roku poprzednim. Jednak dokładny związek pomiędzy nimi zależy od cyklu życia danego gatunku. Na przykład rozmiary populacji kilku gatunków rozmnażających się dwa razy w roku są najsilniej związane z wysokimi temperaturami wiosną lub latem, które zapewniają odpowiednie warunki dla rozwoju larw i poczwerek. Z kolei gorące lub suche warunki w poprzednim roku wiążą się ze spadkiem populacji u takich gatunków jak przestrojnik trawnik *Aphantopus hyperantus* i osadnik egeria *Pararge aegeria*, których larwy żerują na roślinach rosnących w siedliskach wilgotnych lub częściowo zacienionych i mogą być podatne na suszę. Dowody na podobne negatywne relacje pomiędzy wielkością populacji a gorącymi lub suchymi warunkami na granicach zasięgu gatunków na niższych szerokościach geograficznych lub wysokościach byłyby przydatne w ocenie bezpośrednich zagrożeń dla gatunków spowodowanych zmianą klimatu na granicy ich tolerancji na ciepło. Dane z 406 pułapek świetlnych zainstalowanych w ramach badania owadów przez UK Rothamsted (*UK Rothamsted Insect Survey*) pokazują, że coraz cieplejsze i wilgotniejsze zimy przyczyniają się do wzrostu śmiertelności ćmy niedźwiedziówki kai *Arctia caja*, co prowadzi do spadku gęstości populacji i zmiany centrum rozmieszczenia i liczebności tego gatunku w kierunku chłodniejszych, wyższych szerokości geograficznych (Conrad i in. 2001 2002 2003).

Temperatura wpływa bezpośrednio na śmiertelność bezkręgowców, zmniejszając wskaźnik przeżywalności w dolnych i górnych granicach tolerancji termicznej (Ratte 1985). Na przykład odsetek osobników rusałki pawika *Inachis io* i rusałki ceika *Polygonia c-album* osiągających dorosłość wynosił ponad 60% dla temperatur 15-30 °C, ale dla temperatur 9 °C i 34 °C wynosił odpowiednio 0% i 20-40% osobników osiągających dojrzałość (Bryant i in. 1997). Górne granice zakresu szerokości geograficznej tych gatunków odpowiadają izotermie 15 °C w lipcu, możliwe, że ze względu na ich wymagania dotyczące temperatur wystarczająco ciepłych dla przetrwania i rozwoju larw w lecie. W środkowej Hiszpanii motyl niestrzęp głogowiec *Aporia crataegi* występował na wysokościach od ok. 600 do 1800 m w latach 1967-73, ale w 2006 r. najniższe występujące populacje zaobserwowano na wysokości ok. 900 m, mimo że rośliny, którymi żywią się larwy tego gatunku, przetrwały na znacznie niższych wysokościach (Merrill i in. 2008). Średnie regionalne roczne temperatury w tym samym okresie wzrosły o 1,3 °C (odpowiednik przesunięcia w górę o 225 m w ujęciu izotermalnym), a eksperymenty z translokacją części jaj gatunków wykazały, że śmiertelność jaj złożonych w lecie i młodych larw zmniejszyła się wraz ze wzrostem wysokości, co oznacza bezpośredni wzrost śmiertelności w stadiach poprzedzających dorosłość u tego gatunku spowodowanej przez wysokie temperatury.

Dla wielu gatunków bezkręgowców żyjących w strefie umiarkowanej śmiertelność w okresie zimowania może mieć istotny wpływ na dynamikę populacji i na geograficzne granice rozmieszczenia gatunku (Bale i in. 2002). Minimalne temperatury, których doświadczają stadia zimujące, mogą wpłynąć na górne granice zasięgu gatunków, a wzrost temperatury zimą może zwiększyć przeżywalność podczas zimowania i doprowadzić do rozszerzenia zasięgu na wyższe szerokości geograficzne (Crozier 2003). Natomiast niskie temperatury mogą być korzystne dla gatunków, które spędzają zimą w nieaktywnej

diapauzie, ponieważ zmniejszone tempo metabolizmu w chłodniejszych mikrosiedliskach może prowadzić do zwiększenia przeżywalności i płodności (Irwin i Lee 2000 2003). Na przeżywalność wśród zimujących owadów dorosłych może wpływać zarówno temperatura, jak i wilgotność, na przykład rusałka pawik *Inachis io* wykazuje większą przeżywalność podczas zimowania w temperaturze 2 °C niż 10 °C, w suchych, a nie wilgotnych warunkach (Pullin i Bale 1989), co może mieć wpływ na lokalizację niskiego zakresu szerokości geograficznej dla tego gatunku (Bryant i in. 1997).

Zmiany temperatury otoczenia, wilgoci i atmosferycznego CO₂ mogą wpływać na wzrost owadów i jakość roślin, którymi żywią się larwy. Podwyższone stężenia CO₂ prowadzą do zmniejszenia zawartości azotu i zwiększenia proporcji C:N w liściach, co powoduje spadek wydajności owadów (tempa wzrostu, masy ciała i przeżywalności) (Coviella i Trumble 1999, Zvereva i Kozlov 2006). Większość badań doświadczalnych pokazuje pozytywny wpływ temperatury na wydajność owadów roślinożernych, tak że nie zaobserwowano znacznej zmiany wydajności przy jednoczesnym wzroście CO₂ i temperatury (Zvereva i Kozlov 2006).

Warunki temperaturowe bezpośrednio wpływają na płodność (np. gametogenezę, determinację płci i tarło) wielu bezkręgowców wodnych (Hogg i Williams 1996, Lawrence i Soame 2004). Dlatego wpływ zmiany klimatu na dynamikę populacji bezkręgowców przybrzeżnych, które stanowią pożywienie dla zimujących ptaków w północnej Europie, jest niepokojący (Lawrence i Soame 2004). Dowody na bezpośredni wpływ warunków klimatycznych na płodność bezkręgowców lądowych są mniej jasne. W przypadku motyla karłatka klinka *Hesperia comma*, współczynniki składania jaj w Wielkiej Brytanii rosną przy cieplejszych temperaturach, potencjalnie umożliwiając gatunkowi zwiększenie płodności w połączeniu z niedawnym ociepleniem na północnym brzegu zasięgu jego występowania (Davies i in. 2006).

2.3 Preferencje siedliskowe

Na większych szerokościach i wysokościach niektóre motyle i chrząszcze stopniowo stają się coraz bardziej ograniczone do ciepłych mikrosiedlisk charakteryzujących się takimi cechami jak stoki skierowane na południe, niska roślinność i puste powierzchnie, co sugeruje ograniczenie temperaturą dla gatunków w miarę jak dochodzą one do granicy „chłodu” (Thomas 1993, Menéndez i Gutiérrez 1996, 2004, Thomas i in. 1998, 1999, Merrill i in. 2008, Ashton i in. 2009). Dla motyla *Hesperia comma* na jego północnej granicy zasięgu w Wielkiej Brytanii zwiększeniu temperatur w okresie lotów w latach 1982-2001/2002 towarzyszyły przesunięcia mikrosiedlisk wykorzystywanych do składania jaj; w latach 2001/2002 większa liczba jaj została złożona w miejscach o zmniejszonym pokryciu podłoża (Davies i in. 2006). Zmiana klimatu mogą zatem powodować zmiany typów roślinności stanowiącej siedlisko dla poszczególnych gatunków, co oznacza, że kontrola reakcji populacji gatunków ma istotne znaczenie dla zapewnienia, że siedlisko nie jest zarządzane według przestarzałych planów.

2.4 Reakcje o charakterze ewolucyjnym

Większość dowodów paleologicznych sugeruje, że przez ostatnie dwa miliony lat bezkręgowce zmieniały swoje rozmieszczenie w poszukiwaniu odpowiedniego klimatu, a nie adaptowały się do zmieniających się warunków *in situ* (Coope 2004). Niemniej jednak u bezkręgowców często obserwuje się duże rozmiary populacji i krótkie okresy życia pokoleń, a zmiany w doborze mogą następować bardzo szybko w okresach gwałtownej zmiany klimatu (Thomas 2005). Możliwy jest wybór fenotypów, które sprzyjają szybkiej ekspansji na granicach zasięgu, gdzie warunki klimatyczne ulegają poprawie, takich jak te związane z rozproszeniem lub eksploatacją nowych lub rozpowszechnionych zasobów. Współczesne ewolucyjne odpowiedzi na zwiększenie granic zasięgu obejmują selekcję dyspersyjnych form motyli (Hill i in. 1999a, c), chrząszczy biegaczowatych (Niemela i Spence 1991) i pasikonikowatych (Thomas i in. 2001, Simmons i Thomas 2004) oraz selekcję zwiększonej ilości składanych jaj na szeroko rozpowszechnionych roślinach żywicielskich w stosunku do bardziej ograniczonych wcześniejszych gospodarzy motyla modraszek agestis *Aricia agestis* (Thomas i in. 2001). Adaptacje te zwiększają tempo, w jakim gatunki są w stanie nadążać za zmieniającymi się obszarami o odpowiednim klimacie, ale gdy populacja zostanie ustalona, może nastąpić powrót do selekcji w stosunku do form dyspersyjnych, prawdopodobnie związanych ze zmniejszoną płodnością (Hughes i in. 2003, Simmons i Thomas 2004). W konsekwencji formy przystosowane do zwiększania zasięgu mogą być preferowane przez stosunkowo krótki okres czasu ewolucji, a zatem nie jest łatwo je wykryć w skamieniałościach.

Potencjał do adaptacji w zmieniających się warunkach klimatycznych zależy od zasobu zmienności genetycznej w obrębie populacji gatunków. Wiele gatunków wykazuje adaptacje do lokalnych klimatów w różnych częściach ich zasięgu geograficznego, na przykład pod względem wielkości, tempa wzrostu, indukcji diapauzy lub zakresu plastycznych odpowiedzi, które mogą zostać wywołane z poszczególnych genotypów (Nylín i Gotthard 1998, Berner i in. 2004). Gatunki często wykazują lokalne zróżnicowanie adaptacyjne do stopnia skrócenia długości dnia wymaganego do wywołania zimowej diapauzy. Dłuższe dni wystarczają do wywołania diapauzy na wysokich szerokościach geograficznych lub wysokościach, gdzie warunki ulegają pogorszeniu wcześniej (Roff 1980). Krytyczny czas ekspozycji na światło dla indukcji zimowej diapauzy zmieniał się znacząco dla gatunku komara *Wyeomyia smithii* w latach 1972-1996 r., co doprowadziło do późniejszego zaprzestania aktywności larw podczas ciepłego lata (Bradshaw i Holzapfel 2001).

Pomimo powszechnego zróżnicowania genotypowego i fenotypowego w ramach zasięgów geograficznych gatunków, zdolność populacji do przystosowania się do nowych warunków będzie zależała od ich lokalizacji w obecnym zasięgu. Populacje na granicach zwiększającego się zasięgu mogą mieć zdolność stosunkowo szybkiej adaptacji, z uwagi na przepływ genów z centralnego obszaru zasięgu gatunku. Jednakże na granicach rozmieszczenia gatunków może być mało prawdopodobne, by populacje danych gatunków miały styczność z nowymi warunkami w swojej ewolucyjnej przeszłości, tak więc może występować brak wcześniejszych różnic genetycznych umożliwiających adaptację (Thomas 2005). Zasięgi gatunków uległy przesunięciom w kierunku biegunów i z dala od nich podczas czwartorzędowych okresów ocieplenia i ochłodzenia, a największy rezerwuuar różnorodności genetycznej może pojawić się w częściach zasięgów gatunków, które pozostały zajęte w okresach glacialnych i interglacialnych (Hewitt 2004, Schmitt i Hewitt 2004). W obecnych warunkach interglacialnych strefa największej różnorodności genetycznej dla większości gatunków znajduje się w pobliżu dolnej granicy zasięgu pod względem wysokości geograficznych, gdzie wymieranie związane z klimatem może stanowić znaczną utratę przyszłej zmienności, która mogłaby potencjalnie mieć znaczenie adaptacyjne (Hampe i Petit 2005).

2.5 Równoleżnikowe zmiany zasięgu

Istnieją mocne dowody na związane z niedawnym ociepleniem klimatu przesunięcia równoleżnikowych zasięgów gatunków motyli, w kierunku biegunów. Zasięgi gatunków uległy przesunięciu na północ w XX wieku dla 22 (63%) z 35 gatunków niewędrownych motyli europejskich, gdzie dostępne dane dotyczyły zarówno północnych, jak i południowych granic zasięgu; istnieją dowody na kolonizację północnych granic zasięgu dla 21 gatunków i na wymieranie na południowych granicach dla 8 gatunków (Parmesan i in. 1999). Tylko w przypadku dwóch z 35 gatunków granice zasięgu uległy przesunięciu na południe.

W kilku badaniach udokumentowano poszerzenie zasięgu poszczególnych gatunków motyli poza ich wcześniejsze górne granice równoleżnikowe (np. Hill i in. 1999b 2001, Warren i in. 2001, Braschler i in. 2007). Gatunki motyli były cennymi systemami modelowymi ze względu na bogactwo danych historycznych na temat ich rozmieszczenia, a także dlatego, że zależą one od warunków termicznych w całym cyklu życia. Najnowsze badania sugerują, że górne granice równoleżnikowe wielu innych taksonów bezkręgowców również uległy przesunięciu na północ w odpowiedzi na niedawną zmianę klimatu (np. Hickling i in. 2005 2006). Jednakże istnieją obecnie silne dowody, że zwiększenie zasięgu większości gatunków w ich górnych granicach szerokości geograficznej nie znajduje uzasadnienia w podążaniu za odpowiednimi warunkami klimatycznymi (Warren i in. 2001, Menéndez i in. 2006; patrz pkt 2.7 niżej).

Do niedawna na niższych, cieplejszych granicach równoleżnikowych zaobserwowano stosunkowo niewiele przypadków zmniejszenia zasięgu. Jednak zwiększenie zasięgu jest łatwiejsze do wykrycia niż jego zmniejszenie, ponieważ kolonizacja bezpośrednio prowadzi do obecności gatunków w regionach lub dużych komórkach siatki, natomiast lokalne wymieranie prowadzi do stopniowego zaniku gatunku do izolowanych populacji w danym regionie, które mają mało szans by utrzymać się przy życiu w dłuższej perspektywie (Wilson i in. 2004).

2.6 Wysokościowe zmiany zasięgu

Wiele gatunków może zanikać na granicach ciepłego klimatu niezauważenie, ponieważ ich regionalne populacje utrzymują się, ale ulegają przesunięciu na większe wysokości. Dwa badania wykazały wzrost

średnich wysokości komórek siatki zajmowanych przez gatunki motyli (Hill i in. 2002 dla Wielkiej Brytanii; Konvicka i in. 2003 dla Republiki Czeskiej). Rzeczywiste ostatnie zmiany w zasięgu wysokościowym gatunków mogą być nawet większe niż odnotowane w badaniach opartych na komórkach siatki, ponieważ takie komórki mogą obejmować szerokie zróżnicowanie wysokościowe, zwłaszcza w rejonach górskich (Konvicka i in. 2003). Jednak trudno jest przypisać zmiany w zasięgu skierowane w górę wyłącznie skutkom zmiany klimatu, ponieważ degradacja siedlisk jest zazwyczaj bardziej dotkliwa na niższych wysokościach (Nogués-Bravo i in. 2008).

Próbkowanie w pojedynczych lokalizacjach w różnych okresach czasu może pomóc w wykrywaniu zmian wysokościowych z większą dokładnością, umożliwiając monitorowanie skutków degradacji siedlisk. Badania nad gatunkiem ćmy korowódki pniówki *Thaumatopoea pityocampa* pokazują, że ten gatunek szkodnika rozszerzył swoje rozmieszczenie na wyższe szerokości geograficzne oraz w szczególności na większe wysokości w związku z niedawnymi ociepleniem w okresie letnim i zimowym (Hódar i in. 2003, Battisti i in. 2005 2006, Robinet i in. 2007). Dolne granice zasięgu wysokościowego 16 gatunków motyli w górach Sierra de Guadarrama (środkowa Hiszpania) wzrosły średnio o 212 m w latach 1967-73 do 2004 r., czemu towarzyszył wzrost średniej rocznej temperatury w regionie o 1,3 °C (odpowiednik ok. 225 m) (Wilson i in. 2005). Ścisła korelacja między wzrostem temperatury i zmianami dolnej granicy wysokości, w połączeniu z faktem, że rośliny żywicielskie dla larw wielu badanych gatunków były szeroko rozpowszechnione w regionie, sugeruje, że to klimat, a nie bezpośrednia zmiana siedlisk, był najważniejszym czynnikiem zmiany w systemie. Dla tych gatunków wzrost górnych granic wysokości nie uległ istotnej zmianie, częściowo dlatego, że wiele gatunków już zajmowało duże wysokości w latach 1967-73. W rezultacie nastąpiło ogólne zmniejszenie zasięgu wysokościowego gatunków oraz średni spadek szacowanego obszaru rozmieszczenia dla poszczególnych gatunków o 22% w ciągu zaledwie 30 lat.

Zmiany, które zaszły w latach 1970-2004/05 w lokalnym rozmieszczeniu trzech z czterech gatunków motyli ograniczonych do dużych szerokości geograficznych lub wysokości w Wielkiej Brytanii sugerują również, że zmiana klimatu odgrywają rolę w zmniejszeniu zasięgu, niezależnie lub w połączeniu z efektem utraty siedlisk (Franco i in. 2006). Górówka epifron *Erebia epiphron* zanikła na niższych wysokościach nawet tam, gdzie pozostały rośliny żywicielskie dla larw, podczas gdy górówka medea *Erebia aethiops* i modraszek artakserkses *Aricia artakserkses* zanikły na niższych szerokościach geograficznych nawet tam, gdzie pozostały rośliny żywicielskie. W przeciwieństwie do opóźnienia czasowego w poszerzaniu zasięgu gatunków w odpowiedzi na zmianę klimatu, przedstawione w tych badaniach tempo zmniejszania się rozmieszczenia wydaje się nadążać za tempem zmiany klimatu (Thomas i in. 2006).

2.7 Zmiany bogactwa i składu gatunkowego

Tak jak rozmieszczenie wielu gatunków uległo przeniesieniu na wyższe szerokości geograficzne i wysokości, tak i różnorodność i skład ekologicznych społeczności również uległy zmianie. W systemach lądowych najsilniejsze dowody uzyskano dla gatunków motyli. Podobnie jak w przypadku wielu innych grup taksonomicznych, bogactwo gatunkowe motyli jest skorelowane z bilansem wodno-energetycznym: na wysokich szerokościach geograficznych energia wydaje się być głównym czynnikiem ograniczającym rozmieszczenie gatunków, tak że bogactwo gatunkowe zwiększa się wraz z temperaturą; natomiast na niskich szerokościach dostępność wody jest z nim silniej skorelowana (Hawkins i Porter 2003, Hawkins i in. 2003, Stefanescu i in. 2004). W miarę wzrostu temperatury w Wielkiej Brytanii wiele gatunków motyli zwiększyło swój zasięg na północ; bogactwo gatunkowe również wzrosło (Menéndez i in. 2006). Jednak rozszerzenie zasięgu w dużej mierze ogranicza się do gatunków o szerokim zasięgu i gatunków generalistycznych, ponieważ większość gatunków specjalistycznych nie ma wystarczającej dostępności siedlisk w antropogenicznie zmienionym krajobrazie, aby móc skolonizować siedliska poza ich wcześniejszymi granicami zasięgu (Warren i in. 2001). Stąd skład społeczności motyli w Wielkiej Brytanii jest obecnie coraz bardziej zdominowany przez powszechne gatunki generalistyczne, co oznacza homogenizację składu społeczności motyli, która może zachodzić w szerszym zakresie w innych grupach taksonomicznych.

W pobliżu granic niskich szerokości zasięgu gatunków motyli w środkowej Hiszpanii bogactwo gatunkowe zmniejszyło się na wszystkich wysokościach z wyjątkiem największych, ponieważ wiele

gatunków zniknęło ze stanowisk położonych na małych wysokościach. Kilka gatunków rozszerzyło swoje rozmieszczenie na największych wysokościach górskich, ale bogactwo gatunkowe motyli maleje dalej na południu Hiszpanii. Istnieje kilka gatunków rekompensujących te straty na małych i średnich wysokościach, ale wiele z nich nie ma wystarczająco szeroko rozpowszechnionych siedlisk, aby móc skolonizować obszary górskie (Wilson i in. 2007b). Zaniki różnorodności bezkręgowców lądowych w południowo-zachodniej Europie odzwierciedlają zmiany przewidywane przez modele bioklimatu opracowane dla gadów i płazów (Araújo i in. 2006).

Dowody uzyskane z bezkręgowców wodnych również wskazują na zmiany w składzie gatunkowym zgodne z ociepleniem klimatu. W górnym biegu rzeki Rodan, taksony bezkręgowców termofilnych zastąpiły gatunki żyjące w zimnych wodach (Daufresne i in. 2004), podczas gdy w strumieniach europejskich, które obecnie wysychają coraz częściej z powodu częstszych susz, nastąpiły równoczesne zmiany w składzie grup bezkręgowców (Fenoglio i in. 2007). Jednak wydaje się, że społeczności makrobezkręgowców żyjących w strumieniach w regionie Morza Śródziemnego charakteryzują się obecnością gatunków wysoce dyspersyjnych, co skłoniło Bonadę i in. (2007) do wniosku, że utrata gatunków ze strumieni w umiarkowanych szerokościach geograficznych może zostać zrekomensowana imigracją taksonów z południowych rejonów Morza Śródziemnego.

Społeczności makrobezkręgowców z rejonu pływów wykazały wzrost liczby gatunków z szerszym rozmieszczeniem na południu oraz zmniejszenie liczby gatunków z szerszym rozmieszczeniem na północy (np. Sagarin i in. 1999). Jednakże badając reakcje społeczności z obszaru pływów w ciepłych i chłodnych wodach można wyciągnąć wnioski, że zmian w składzie społeczności nie można przewidzieć jedynie na podstawie biogeograficznych powiązań między gatunkami: zmiany w składzie gatunkowym wydają się w dużej mierze wynikać z efektów kaskadowych spowodowanych utratą lub pojawieniem się gatunków, które są ściśle powiązane z innymi gatunkami we wspólnocie (Schiel i in. 2004).

Z rozważań nad zmianami różnorodności społeczności bezkręgowców związanymi z klimatem jasno wynika, że wzorce zmian będą zależeć od indywidualnych reakcji poszczególnych gatunków, jednak na te reakcje będą miały wpływ inne czynniki zmian środowiskowych (np. bezpośrednia modyfikacja siedlisk) oraz zmiany w interakcjach biotycznych.

2.8 Zmiany w interakcjach biotycznych

Istotne badanie przeprowadzone z wykorzystaniem laboratoryjnego mikrokosmosu wykazało, że wydajność trzech gatunków muszki owocowej *Drosophila* w różnych temperaturach zależy od ich konkurencyjnych interakcji oraz naturalnych wrogów (Davis i in. 1998). Istnieje jednak kilka przekonujących badań empirycznych dotyczących wpływu interakcji biotycznych na reakcje gatunków na zmianę klimatu w tej dziedzinie. Rozmieszczenie gatunków gospodarzy lub zasobów nakłada wyraźne ograniczenia na zdolność gatunku do przesunięcia swojego rozmieszczenia w odpowiedzi na zmianę klimatu. Na przykład wydaje się, że motyl niestrzęp głogowiec *Aporia crataegi* nie jest w stanie zwiększyć swojej górnej granicy wysokości w środkowej Hiszpanii, ponieważ jego rośliny żywicielskie nie rosną na wysokości wyższej niż ok. 1800 m n.p.m. (Merrill i in. 2008).

Wpływ naturalnych wrogów również może mieć poważne skutki, które mogą się różnić w zależności od warunków klimatycznych lub z powodu zmian w rozmieszczeniu gatunków oddziałujących na siebie. Śmiertelność larw motyla przeplatka cinksia *Melitaea cinxia* spowodowana przez parazytoidea *Cotesia melitaeorum* zmniejsza się w chłodnych latach, ponieważ ciemno ubarwione larwy *M. cinxia* mogły wygrzewać się na słońcu w celu przyspieszenia rozwoju, natomiast białe, nieruchome kokony *C. melitaeorum* rozwijają się zbyt wolno, aby dorosłe osobniki pojawiały się w okresie dostępności larw, na których mogą pasożytować (Van Nouhuys i Lei 2004). Gdy gatunki owadów poszerzają zasięg rozmieszczenia na północ, ich śmiertelność może się zmniejszyć, przynajmniej czasowo, zanim naturalni wrogowie gatunku dostosują się do zmian ich zasięgu (Grobler i Lewis 2008, Menendez i in. 2008). Jednym z problemów w przewidywaniu lub zarządzaniu skutkami takich zmian jest to, że konkretny gatunek gospodarzy i naturalni wrogowie wielu bezkręgowców mogą być słabo opisane w literaturze lub nie są opisane w ogóle.

3. PRZYSZŁE SKUTKI I ZAGROŻENIA

3.1 Bioklimatyczne modele przyszłych zasięgów gatunków

Geograficzne korelacje rozmieszczenia gatunków i szczególnych warunków klimatycznych można wykorzystać do wyciągnięcia wniosków na temat klimatycznych ograniczeń zasięgu gatunków, a tym samym do opracowania modeli bioklimatycznych dla poszczególnych gatunków (Pearson i Dawson 2003). Takie modele były wykorzystywane do przewidywania przyszłych zasięgów wielu owadów, w szczególności motyli (np. Hill i in. 1999b 2002, Araujo i Luoto 2007, Schweiger i in. 2008, Settele i in. 2008). Modele te wykorzystują zmienne, które mogą mieć powiązania *a priori* z rozmieszczeniem owadów, na przykład roczne skumulowane temperatury powyżej poziomu progowego (wpływające na tempo wzrostu i rozwoju), minimalne temperatury zimowe (wpływające na przetrwanie zimowania) oraz dostępność wilgoci (wpływająca na produkcję podstawową).

Modele klimatyczne są dopasowane do aktualnych rozmieszczeń gatunków zarówno na górnych, jak i dolnych granicach zasięgu (Hill i in. 2002), i wydają się sprawdzać dla różnych taksonów (Huntley i in. 2004). Modele te są stosunkowo dokładne dla gatunków, których rozmieszczenie jest ciągłe, z granicami, które mogą być wyznaczane przez ograniczenia klimatyczne dla danego gatunku lub dla niektórych ważnych gatunków oddziałujących, jak np. rośliny żywicielskie larw. Modele te są mniej dokładne dla gatunków o szerokich, ale rozproszonych rozmieszczeniach, gdzie ograniczenia dotyczące siedlisk lub lokalna dynamika kolonizacji i wymierania mogą zdominować wzorce rozmieszczenia w ramach zasięgu odpowiedniego klimatycznie (Luoto i in. 2005). Czynniki takie jak interakcje biotyczne, lokalna zmienność topograficzna i lokalne adaptacje ewolucyjne mogą również prowadzić do rozbieżności między rozproszonymi obserwowanymi i wzorowanymi na powiązaniach klimatycznych. Podejścia do modeli zmian rozmieszczenia motyli w warunkach zmiany klimatu weszły w kluczowy etap równoczesnego modelowania zmian rozmieszczenia poszczególnych roślin żywicielskich dla gatunków (Araujo i Luoto 2007, Schweiger i in. 2008), w wyniku czego przyszłe potencjalne rozmieszczenia gatunków motyli są znacznie mniejsze (ale bardziej realistyczne), niż gdyby ich modele tworzone były bez uwzględnienia dostępności gatunku gospodarza.

Niemniej jednak modelowanie przyszłych obszarów o klimacie odpowiednim dla gatunków na podstawie ich aktualnych preferencji i przyszłych scenariuszy zmiany klimatu pozwala na wyciągnięcie bardzo ogólnych wniosków na temat prawdopodobnych skutków zmiany klimatu na wielkości zasięgu gatunków, względnej podatności poszczególnych grup gatunków, oraz względnych skutków różnych scenariuszy zmiany klimatu lub poziomu emisji dwutlenku węgla (np. Settele i in. 2008). Podejście to zostało do tej pory zastosowane dla 293 z ok. 450 europejskich gatunków motyli, pozostałe uznano za zbyt mocno ograniczone, aby można było opracować dla nich dokładne modele (patrz ramka 1). W modelach tych, zgodnie ze stosunkowo konserwatywnym scenariuszem zmiany klimatu opartym o średni wzrost temperatury do 2080 roku o 2,4 °C (SEDG), szacuje się że rozmiary rozmieszczenia 48% gatunków motyli ulegną zmniejszeniu o ponad 50%, ale zmniejszenie rozmieszczenia o więcej niż 95% dotknie tylko 3% gatunków. Przy scenariuszu przewidującym wzrost temperatury o 4,1 °C do 2080 roku (GRAS), zasięgi rozmieszczenia uległy zmniejszeniu o ponad 50% w przypadku 78% gatunków i o 95% w przypadku 24% gatunków. Szacunki te zakładają, że gatunki nie są w stanie dokonać kolonizacji regionów, które stają się klimatycznie odpowiednie: dowody z zaobserwowanych zmian sugerują, że dla większości gatunków taki scenariusz może być bardziej realistyczny niż założenie, że będą one kolonizować obszary o odpowiednim klimacie w miarę ich pojawiania się (Warren i in. 2001, Menendez i in. 2006). Wnioski z modeli przedstawionych przez Settele i in. (2008) dla gatunków z Konwencji Berneńskiej są rozważane w punkcie 4 poniżej.

Ramka 1. Atlas ryzyka klimatycznego motyli europejskich (Settele i in. 2008)

Uzasadnienie

W atlasie zaprezentowano modele powiązań klimatycznych dla 294 z ok. 450 europejskich gatunków motyli, a następnie prognozowane rozmieszczenia obszarów o klimacie odpowiednim dla tych gatunków w oparciu o scenariusze zmiany klimatu do roku 2050 i 2080. Główne cele były następujące:

1. Zapewnienie wizualnych dowodów do dyskusji na temat zagrożeń związanych ze zmianami klimatu i wpływu na różnorodność biologiczną, a tym samym przyczynienie się do informowania o ryzyku zmiany klimatu.
2. Przedstawienie danych na temat dużych grup taksonomicznych, które mogą pomóc w hierarchizacji działań ochronnych wynikających ze zmiany klimatu.
3. Dotarcie do szerszego audytorium z naukowymi prognozami wpływu zmian klimatu na bioróżnorodność.

Scenariusze zmiany klimatu

Zostały one opracowane w ramach unijnego projektu ALARM (Ocena znaczących zagrożeń środowiskowych dla różnorodności biologicznej przy pomocy sprawdzonych metod). Zastosowano trzy scenariusze zmian:

1. Zrównoważony Cel Rozwoju w Europie (SEDG): koncentruje się na osiągnięciu zrównoważonego rozwoju poprzez integrację polityki gospodarczej, społecznej i w dziedzinie ochrony środowiska. Polityka ma na celu ustabilizowanie stężenia gazów cieplarnianych w atmosferze i powstrzymanie utraty bioróżnorodności. SEDG zbliżony jest do scenariusza IPCC B1 ze spodziewanym średnim wzrostem temperatury o 2,4 °C do 2080 r.
2. *Business As Might Be Usual* (BAMBU): kontynuacja znanych i przewidywalnych trajektorii społeczno-gospodarczych i politycznych. Polityka ekologiczna jest postrzegana jako technologiczne wyzwanie, rozwiązywane przez innowacje, zachęty rynkowe i do pewnego stopnia także działania regulacyjne. BAMBU zbliżony jest do scenariusza IPCC A2 ze spodziewanym średnim wzrostem temperatury o 3,1 °C do 2080 r.
3. Stosowana strategia wzrostu (GRAS): polityki wzrostu gospodarczego opartego na wolnym handlu są aktywnie prowadzone przez rządy. Polityka środowiskowa dotyczy naprawy szkód i w ograniczonym zakresie działań prewencyjnych, na podstawie kalkulacji kosztów i korzyści. GRAS zbliżony jest do scenariusza IPCC A1F1 ze spodziewanym średnim wzrostem temperatury o 4,1 °C do 2080 r.

Modele bioklimatyczne

Następujące zmienne zostały wykorzystane do modelowania niszy klimatycznych wszystkich gatunków:

1. Łączna liczba dni wzrostu aż do sierpnia, miara dostępności temperatury.
2. Zawartość wody w glebie dla górnego horyzontu, miara dostępności wody i mikroklimatu przy powierzchni.
3. Zasięg rocznych opadów, odzwierciedlający klimat kontynentalny lub oceaniczny.
4. Zasięg rocznych temperatur, odzwierciedlający klimat kontynentalny lub oceaniczny.

Dane na temat rozmieszczenia motyli na obszarze 50 x 50 km² powiązane z danymi klimatycznymi z lat 1971-2000. Prognozy klimatyczne dla lat 2021-2050 i 2051-2080 zostały wykorzystane do prognozy niszowych obszarów klimatycznych dla gatunków odpowiednio w 2050 r. i 2080 r. Wyniki są oparte na zmianach w modelowanych niszowych obszarach klimatycznych w porównaniu z szacowanym obszarem nisz w latach 1971-2000.

Przyjęto dwa alternatywne założenia w zakresie zdolności gatunków do przesunięcia obszaru ich rozmieszczenia:

1. Pełne rozproszenie: łączna powierzchnia przestrzeni niszowych w roku 2050 lub 2080 będzie zajęta.
2. Brak rozproszenia: tylko obszar przestrzeni niszowych pokrywający się z obecnym modelem niszy będzie zajęty.

Na podstawie ostatnich zmian w rozmieszczeniu gatunków motyli obserwowane zmiany dla wielu gatunków znajdują się gdzieś pomiędzy tymi dwoma scenariuszami rozprzestrzeniania się, jednak bliżej scenariusza "brak rozproszenia", zwłaszcza dla gatunków specjalistycznych (Warren i in. 2001, Menendez i in. 2006).

Kategorie ryzyka klimatycznego

Zostały opracowane na podstawie:

1. Dokładności zmiennych klimatycznych w przewidywaniu aktualnego rozmieszczenia gatunków (w oparciu o technikę AUC, gdzie $AUC > 0,75$ wskazuje na umiarkowaną lub dobrą dokładność, a $AUC < 0,75$ ograniczoną dokładność).
2. Szacunkowych zmian obszarów niszowych od 2000 do 2080 roku, w oparciu o założenie „braku rozproszenia”.

Kategorie ryzyka były następujące:

1. PR - Potencjalne ryzyko klimatyczne - tylko ograniczona dokładność modelu ($AUC < 0,75$)

Wszystkie inne kategorie posiadają umiarkowaną lub dużą dokładność modelu ($AUC > 0,75$).

2. LR – Niskie ryzyko - <50% maksymalnego szacowanego zaniku przestrzeni niszowej z powodu zmiany klimatu w każdym ze scenariuszy zmiany klimatu.
3. R - Ryzyko zmiany klimatu - maksymalny szacunkowy zanik w 50-70%.
4. HR - Wysokie ryzyko - maksymalny szacunkowy zanik 70-85%.
5. HHR – Bardzo wysokie ryzyko - maksymalny szacunkowy zanik w 85-95%.
6. HHRH – Wyjątkowo wysokie ryzyko - maksymalny szacunkowy zanik w ponad 95%.

Rozmieszczenie gatunków, które są obecnie ograniczone do lokalnych obszarów takich jak łańcuchy górskie lub wyspy, może wykazywać niewielkie pokrycie geograficzne lub jego brak z miejscami, co do których prognozuje się, że będą klimatycznie odpowiednie w przyszłości (np. Ohlemuller i in. 2006, 2008), i może okazać się niemal niemożliwe skolonizowanie regionów, co do których prognozuje się, że będą klimatycznie odpowiednie. Gatunki o bardzo wąskich granicach tolerancji klimatycznej, a zatem o ograniczonym rozmieszczeniu geograficznym, będą w najmniejszym stopniu zdolne do przetrwania zmiany klimatu, chyba że ich populacja dostosuje się do zmieniających się warunków lub bardzo drobne zmiany mikrotopograficzne lub w roślinności pozwolą im na przetrwanie w obecnym zasięgu geograficznym lub w jego pobliżu.

3.2 Interakcje zmian klimatu z dodatkowymi zagrożeniami dla bioróżnorodności bezkręgowców

W przypadku motyli utrata i fragmentacja siedlisk już wydaje się ograniczać zdolności gatunków do poszerzenia zasięgu rozmieszczenia o pojawiające się obszary o korzystnym klimacie (Warren i in. 2001, Menendez i in. 2006). Tempo, w jakim karłatkowi klinkowi *Hesperia comma* udało się poszerzyć zasięg rozmieszczenia na północnej granicy zasięgu w Wielkiej Brytanii można przewidzieć dość dokładnie wykorzystując dane o stopniu fragmentacji siedlisk i jego wpływie na dynamikę kolonizacji i wymierania lokalnych populacji gatunku („dynamika metapopulacji”) (Wilson i in. 2009). Podczas gdy wnioski te powodują zaniepokojenie prawdopodobną niezdolnością gatunków do przesunięcia ich rozmieszczenia w wysoce zmodyfikowanych krajobrazach, sugerują jednak przynajmniej, że możliwe będzie określenie, które krajobrazy mogą mieć największe szanse na doprowadzenie do zmiany zasięgu.

Zanieczyszczenia w środowisku lądowym mogą powodować bezpośrednią utratę siedlisk dla gatunków (powodując ograniczenia w zmianach zasięgu) lub zmniejszać pożyteczność siedlisk. Wzorce odkładania azotu w północnej Europie wydają się być skorelowane ze spadkiem gęstości populacji i rozmieszczenia motyli, których stadia niedojrzałe są aktywne wiosną. Sugeruje się, że odkładanie azotu w połączeniu z dłuższym rocznym okresem wzrostu doprowadziło do zmian w konkurencyjnych interakcjach roślin, co z kolei prowadzi do przerostu osłoniętych, ciepłych mikrosiedlisk wymaganych przez te gatunki motyli (WallisDeVries i Van Swaay 2006). Zachęcający jest fakt, że społeczności bezkręgowców słodkowodnych w kredowych strumieniach w Wielkiej Brytanii wydają się zdolne do wytrzymania negatywnych skutków zmiany klimatu, jeżeli zanieczyszczenia trafiające do strumieni są zminimalizowane, a jakość wody zachowana (Durance i Ormerod 2009).

Zmiany warunków klimatycznych mogą zmienić skutki chorób u populacji bezkręgowców. Wysokie temperatury wody morskiej w północno-zachodniej części Morza Śródziemnego zostały powiązane z masową śmiertelnością wśród populacji bentonicznych makrobezkręgowców, w szczególności gorgonii i gąbek (Bally i Garabou 2007, Garabou i in. 2009). We Francji wzrosła śmiertelność gatunku uchowiec europejski *Haliotis tuberculata* spowodowana morską bakterią *Vibrio harveyi*, co powiązano z ociepleniem klimatu (Travers i in. 2009).

Gatunki o wysokim współczynniku rozrodu, generalistycznych wymaganiach siedliskowych i bardzo dyspersyjne mogą być w stanie skolonizować regiony, które stają się klimatycznie korzystne. Biorąc pod uwagę te względy, prawdopodobne jest, że gatunki kosmopolityczne lub powodujące epidemie, takie jak wiele szkodników rolniczych lub leśnych (np. Battisti i in. 2005 2006) lub wektory chorób, rozszerzą zasięg swojego rozmieszczenia. Atrybuty inwazyjnych gatunków obcych oraz to, jaki wpływ mogą na nie mieć zmiany klimatu, zostały szczegółowo opisane przez Capdevila-Arguelles i Zilletti (2008), Hellmann i in. (2008) oraz Pejchar i Mooney (2009). Poniższy rozdział zawiera omówienie możliwych skutków zmiany klimatu na świadczenie przez bezkręgowce usług ekosystemowych oraz ich szkodliwe działania.

3.3 Zmiana klimatu i usługi ekosystemowe bezkręgowców

Bezkręgowce odgrywają ważną rolę w dostarczaniu bezpośrednich „usług” ekosystemowych (korzyści) i „szkodliwych działań” (koszty) dla społeczeństw ludzkich, mają także znaczący wpływ na funkcjonowanie ekosystemów. Zmiany w rozmieszczeniu bezkręgowców, liczebności i dynamice populacji, spowodowane przez zmianę klimatu, mogą w związku z tym prowadzić do ważnych ekologicznych i społeczno-ekonomicznych skutków. Przykłady takich skutków obejmują zmiany w częstości występowania chorób u ludzi i zwierząt powodowanych lub przenoszonych przez bezkręgowce, zmiany w rozmieszczeniu lub liczebności szkodników rolniczych lub leśnych, zmiany w liczebności i składzie społeczności organizmów rozkładających w cyklu pokarmowym, oraz zmiany w liczebności i różnorodności zapylaczy. Poniżej przedstawiono krótki przegląd dowodów na to, że te funkcje ekosystemu są lub będą dotknięte zmianą klimatu.

Toczy się debata na temat możliwości wpływu zmiany klimatu na przesunięcie globalnych rozmieszczeń, rozpowszechnienie i zjadliwość chorób przenoszonych przez wektory, szczególnie takie jak malaria, żółta febra, gorączka denga, arbowirusy i gorączka zachodniego Nilu, które są przenoszone przez komary (np. Epstein i in. 1998, Russell 1998, Sutherst 1998, Reiter 2001 2008). Zmiany w rozmieszczeniu, liczebności lub cyklu życia bezkręgowców przenoszących patogeny mogą odgrywać ważną rolę w określaniu częstotliwości i rozmieszczenia kolejnych ognisk choroby, podobnie jak bezpośrednie skutki ocieplenia klimatu mają wpływ na przetrwanie, rozwój i sezonowość patogenów. Jednak w chwili obecnej istnieje stosunkowo niewiele dowodów na bezpośrednie zmiany wywołane klimatem, które powodowałyby zmiany we wzorcu przestrzennym lub czasowym chorób przenoszonych przez bezkręgowce (Harvell i in. 2002). Ostatnie modele klimatyczne przyszłego rozmieszczenia malarii *falciparum* wskazują niewiele przewidywanych zmian w stosunku do bieżącego rozmieszczenia (Rogers i Randolph 2000). Ponadto dowody na to, że malaria poszerzyła swoje rozmieszczenie na większe wysokości w górach Afryki Wschodniej odzwierciedlają głównie zwiększoną odporność na leki przeciwmalaryczne i zmniejszenie kontroli komarów, przy jednoczesnym braku istotnych zmian warunków meteorologicznych (Hay i in. 2002a, b). Z kolei wirus choroby niebieskiego języka (BTV) rozprzestrzenił się w południowej i środkowej Europie od 1998 roku, co wydaje się być związane ze zwiększoną trwałością wirusa podczas łagodniejszych zim, zwiększeniem na północ zasięgu jego wektora

Culicoides imicola i przenoszeniem przez inne rodzime europejskie gatunki *Culicoides* poza wcześniejszy zasięg geograficzny BTV (Purse i in. 2006). Większa znajomość ekologii drobnoustrojów, ich wektorów oraz żywicieli jest potrzebna do ustalenia ich wrażliwości na zmianę klimatu i inne zmiany środowiskowe (Reiter 2001 2008). Systematyczne pobieranie próbek wzdłuż gradientów szerokościowych i wysokościowych może przyczynić się do wyjaśnienia skutków zmiany klimatu na rozmieszczenie gatunków wektorowych (Kovats i in. 2001).

Zmiany w składzie społeczno- bezkręgowców glebowych mogą prowadzić do istotnych zmian w cyklu pokarmowym, w tym obiegu węgla w przyrodzie (Bradford i in. 2002 2007). Ocieplenie gleby o +3,5 °C w ciągu dwóch lat doprowadziło do znacznych zmian w składzie fauny bezkręgowców w eksperymentalnym mezokosmosie w południowej Szkocji (2 °W, 55 °N), co mogłyby znacząco zmienić funkcję węgla ekosystemu (Iglesias Briones i in. 2009). Z kolei symulacje ocieplenia miały niewielki wpływ na społeczność mikrostawonogów glebowych na ubogich w składniki pokarmowe wrzosowiskach dębika *Dryas* w południowej Norwegii, podczas gdy dodatkowe składniki odżywcze znacząco zmieniały skład społeczności (Hagvar i Klanderud 2009). Dalsze badania nad wpływem zmiany klimatu na bezkręgowce glebowe umożliwią określenie zdolności adaptacji ekosystemów do zmiany klimatu i ich potencjalną rolę w przechowywaniu węgla.

Bezkręgowce szkodniki wywierają ważne ekologiczne i społeczno-ekonomiczne skutki dla rolnictwa i leśnictwa, i mogą być bardzo wrażliwe na zmianę klimatu ze względu na bezpośrednie i pośrednie skutki warunków klimatycznych na demografię i rozmieszczenie bezkręgowców (Harrington 2002, Sutherst i in. 2007). Informacje z całej Europy zostały wykorzystane do modelowania wpływu zmiany klimatu na fenologię populacji mszyc, w tym wielu groźnych szkodników upraw (Harrington i in. 2007). Roślinożerne owady leśne mają wpływ na poziom defoliacji lasów i reżimy zaburzeń leśnych (np. poprzez dostarczanie paliwa dla pożarów lasów), a zatem wpływają na obieg składników pokarmowych w lasach, wydajność, sekwestrację węgla i bioróżnorodność. W konsekwencji wpływ zmiany klimatu na szkodniki lasów może mieć istotne skutki ekologiczne i ekonomiczne, a badania na ten temat są niezbędne, aby dostosować gospodarkę leśną do zmiany klimatu (Ayres i Lombardero 2000, Logan i in. 2003). Zmiany w rozmieszczeniu, liczebności i dynamice leśnych szkodników bezkręgowych zaczęto dokumentować; opracowano również modele ich reakcji na zmianę klimatu. Zasięg rozmieszczenia korowódki pniówki *Thaumetopoea pityocampa* w Europie zwiększył się w kierunku biegunów i w górę w odpowiedzi na ostatnie ocieplenie klimatu (Hódar i in. 2003, Battisti i in. 2005 2006) do tego stopnia, że gatunek stał się wzorcowym systemem do ekologicznego modelowania reakcji szkodników na zmianę klimatu (Robinet i in. 2007, Netherer i Schopf 2009). W Ameryce Północnej opracowano modele łączące ostatnie ocieplenie ze zwiększeniem zasięgu oraz częstości i nasilenia epidemii bielojada *Dendroctonus ponderosae* (Carroll i in. 2003 2006, Aukema i in. 2006). Śmiertelność drzew podczas epidemii bielojada *Dendroctonus ponderosae* zmniejsza absorpcję dwutlenku węgla w lasach i zwiększa emisję dwutlenku węgla z gnijących martwych drzew, potencjalnie zmieniając kanadyjskie lasy ze zbiorników dwutlenku węgla w duże źródła netto dwutlenku węgla (Kurz i in. 2008), co podkreśla znaczenie dynamiki bezkręgowców w lasach zarówno dla łagodzenia skutków zmiany klimatu, jak i adaptacji do tych skutków zmiany klimatu.

Okolo jedna trzecia globalnej produkcji roślinnej i 60-90% gatunków roślin wymaga zapylaczy, z których wiele to bezkręgowce (Klein i in. 2007, Kremen i in. 2007). Zmiana klimatu może potencjalnie doprowadzić do zerwania interakcji między roślinami i zapylaczami poprzez zmianę rozmieszczenia lub fenologii roślin lub ich zapylaczy, ale nie ma wystarczających dowodów na to, że takie zmiany już następują, lub na to w jaki sposób mogą one wpływać na powiązania między roślinami i zapylaczami w przyszłości (Hegland i in. 2009). W Hiszpanii fenologia owadów zapylających, w tym pszczoły miodnej *Apis mellifera* jest bardziej zaawansowana niż fenologia roślin, co może prowadzić do czasowego niedopasowania (Gordo i Sanz 2005 2006). Ciepła wiosna w Japonii w 2002 r. spowodowała zmniejszenie zbioru nasion u dwóch gatunków roślin zwykle zapylanych przez trzmiele, ponieważ fenologia roślin była bardziej zaawansowana niż w przypadku trzmieli; natomiast dwa gatunki roślin zapylane przez muchy w tym samym regionie zakwitły stosunkowo wcześniej, ale nie zaobserwowano w ich przypadku zmniejszenia zbioru nasion (Kudo i in. 2004). Memmott i in. (2007) wykorzystali dokładne informacje o fenologii i interakcjach między gatunkami w sieci 1420 zapylaczy i 429 gatunków roślin z zachodniej części Illinois (USA), by sformułować przewidywanie, że zmiany fenologiczne związane z klimatem mogą zmniejszyć dostępne zasoby kwiatowe dla 17-50% gatunków zapylaczy. Utrzymanie wysokiej

różnorodności zapylaczy i roślin w krajobrazach heterogenicznych może być zatem niezbędne do zabezpieczenia przed potencjalnymi zmianami fenologicznymi związanymi z klimatem w interakcjach między roślinami i zapylaczami (Kremen i in. 2007, Hegland i in. 2009, Winfree i Kremen 2009).

4. PODATNOŚĆ BEZKRĘGOWCÓW Z KONWENCJI BERNEŃSKIEJ NA ZMIANĘ KLIMATU

Berry (2008) dokonała przeglądu istniejących informacji na temat zagrożeń dla siedlisk i gatunków wymienionych w Konwencji Berneńskiej w związku ze zmianą klimatu. Zagrożenie obejmuje składniki poziomów ekspozycji na zmianę klimatu, wrażliwość na te zmiany oraz zakres i ograniczenia w adaptacji do tych zmian, zarówno autonomicznie przez poszczególne gatunki, jak i w ramach planowanego przystosowania społeczności (IPCC 2007, podsumowane w Berry 2008; zob. ramka 2). Zwracam tu uwagę na dostępne dowody na zagrożenie spowodowane skutkami zmiany klimatu dla taksonów bezkręgowców z Konwencji Berneńskiej. Istnieje kilka przykładów dowodów na bezpośredni wpływ zmiany klimatu na bezkręgowce z Konwencji Berneńskiej oraz coraz mniej przykładów poza rzędem Lepidoptera. Jednak ostatnie badania na temat preferencji siedliskowych i rozmieszczenia wielu taksonów dostarczają wskazówek na temat ich prawdopodobnego zagrożenia.

Ramka 2. Terminologia podatności na zmianę klimatu (IPCC 2007, Berry 2008)

Podatność

Stopień, w jakim system jest podatny na negatywne skutki zmiany klimatu i nie radzi sobie z nią. Podatność jest funkcją *ekspozycji* na zmianę klimatu, *wrażliwości* na zmianę klimatu i zdolności adaptacyjnych systemu (*adaptacja*). Wysoka podatność odzwierciedla wysoką ekspozycję, wysoką wrażliwość i niskie zdolności adaptacyjne.

Ekspozycja

Charakter, wielkość i tempo zmiany klimatu i przemian, na jakie system jest narażony. Najbardziej niepokojące rodzaje ekspozycji to wysokie zmiany temperatury, opadów, wzrost poziomu morza, zwiększenie częstotliwości lub wielkości ekstremalnych zjawisk oraz zmiany reżimów zaburzeń, takich jak pożary. Różne regiony lub siedliska mogą doświadczać różnych poziomów zmian ekspozycji dla tych zmiennych.

Wrażliwość

Stopień oddziaływania zmiany klimatu na system, negatywny lub pozytywny. Gatunki w pobliżu granic tolerancji klimatycznych (np. na granicach zasięgu) mogą być bardzo wrażliwe, podobnie jak gatunki o rozmieszczeniu zlokalizowanym wysoko, które sugeruje małe rozmiary niszy.

Adaptacja

Dostosowanie w systemach naturalnych lub ludzkich w odpowiedzi na rzeczywiste lub oczekiwane bodźce klimatyczne lub ich skutki, łagodzące szkody lub wykorzystujące korzystne możliwości.

Adaptacja autonomiczna (lub *spontaniczna*) dotyczy reakcji gatunków, które pozwolą im na przetrwanie; obejmują adaptację genetyczną, korektę fenologii lub fizjologii oraz kolonizację regionów, które stają się klimatycznie korzystne. Wiele czynników może przyczynić się do mniejszych zdolności adaptacyjnych (np. niewielka populacja lub zasięg rozmieszczenia, ograniczona zdolność rozproszenia, niska różnorodność genetyczna, bardzo specyficzne wymagania dotyczące siedlisk lub interakcji biotycznych). *Adaptacja planowana* (lub *społeczna*) obejmuje zarządzanie przez ludzi i działania polityczne mające na celu zwiększenie autonomicznej zdolności adaptacyjnej gatunków.

4.1 Motyle

W przypadku motyli posiadamy zdecydowanie najbardziej szczegółowe dane o rozmieszczeniu spośród wszystkich grup bezkręgowców. Informacje te zostały wykorzystane do opracowania modeli bioklimatycznych dla piętnastu z 23 gatunków motyli z Konwencji Berneńskiej. Dziewięć z tych gatunków zostało sklasyfikowanych jako narażone na wysokie, bardzo wysokie albo wyjątkowo wysokie ryzyko narażenia na zmianę klimatu, co oznacza przewidywanie, że do 2080 roku ponad 70% obecnych europejskich rozmieszczeń gatunków będzie klimatycznie niekorzystnych w co najmniej jednym ze scenariuszy zmiany (zob. tabela 1). Cztery gatunki zostały sklasyfikowane jako narażone na ryzyko zmiany klimatu, ponieważ ponad 50% obecnych pól siatki będzie dla nich nieodpowiednie do 2080 roku w co najmniej jednym scenariuszu. Tylko jeden gatunek (przeplatka maturna *Euphydryas maturna*) nie osiągnął prognozowanych strat w wysokości ponad 50% w żadnym ze scenariuszy do 2080 r. (niskie ryzyko narażenia na zmianę klimatu), podczas gdy obecne rozmieszczenie gatunku przeplatka aurinia (*Euphydryas aurinia*) warunki klimatyczne mogły tłumaczyć jedynie w ograniczonym zakresie (potencjalne ryzyko narażenia na zmianę klimatu).

Tabela 1. Modele ryzyka klimatycznego dla gatunków motyli z Konwencji Berneńskiej (wg Settele i in. 2008)

	Dokładność modelu (AUC)	Kategoria ryzyka klimatycznego	Średnia zmiana (%) do 2080 r.*	
			Pełne rozproszenie	Brak rozproszenia
<i>Apatura metis</i>	0,98	HHR	+47	-71
<i>Coenonympha hero</i>	0,88	HHR	-44	-76
<i>Coenonympha oedippus</i>	0,95	R	+161	-50
<i>Euphydryas aurinia</i>	0,72	PR	-24	-41
<i>Hypodryas maturna</i>	0,79	LR	+46	-37
<i>Lopinga achine</i>	0,81	R	+58	-43
<i>Lycaena dispar</i>	0,88	R	+54	-41
<i>Maculinea arion</i>	0,77	R	-17	-52
<i>Maculinea nausithous</i>	0,91	HHR	-45	-84
<i>Maculinea teleius</i>	0,84	HHR	-26	-74
<i>Melanargia arge</i>	0,98	HR	+119	-64
<i>Papilio alexanor</i>	0,94	HHR	-53	-77
<i>Parnassius apollo</i>	0,8	HR	-51	-66
<i>Parnassius mnemosyne</i>	0,77	HR	-18	-65
<i>Zerynthia polyxena</i>	0,85	HR	+80	-59

* Średnia prognozowana zmiana została pokazana jako średnia z trzech scenariuszy zmiany klimatu (SEDG, BAMBU, GRAS). Różnice pomiędzy scenariuszami pokazane są na rys. 1.

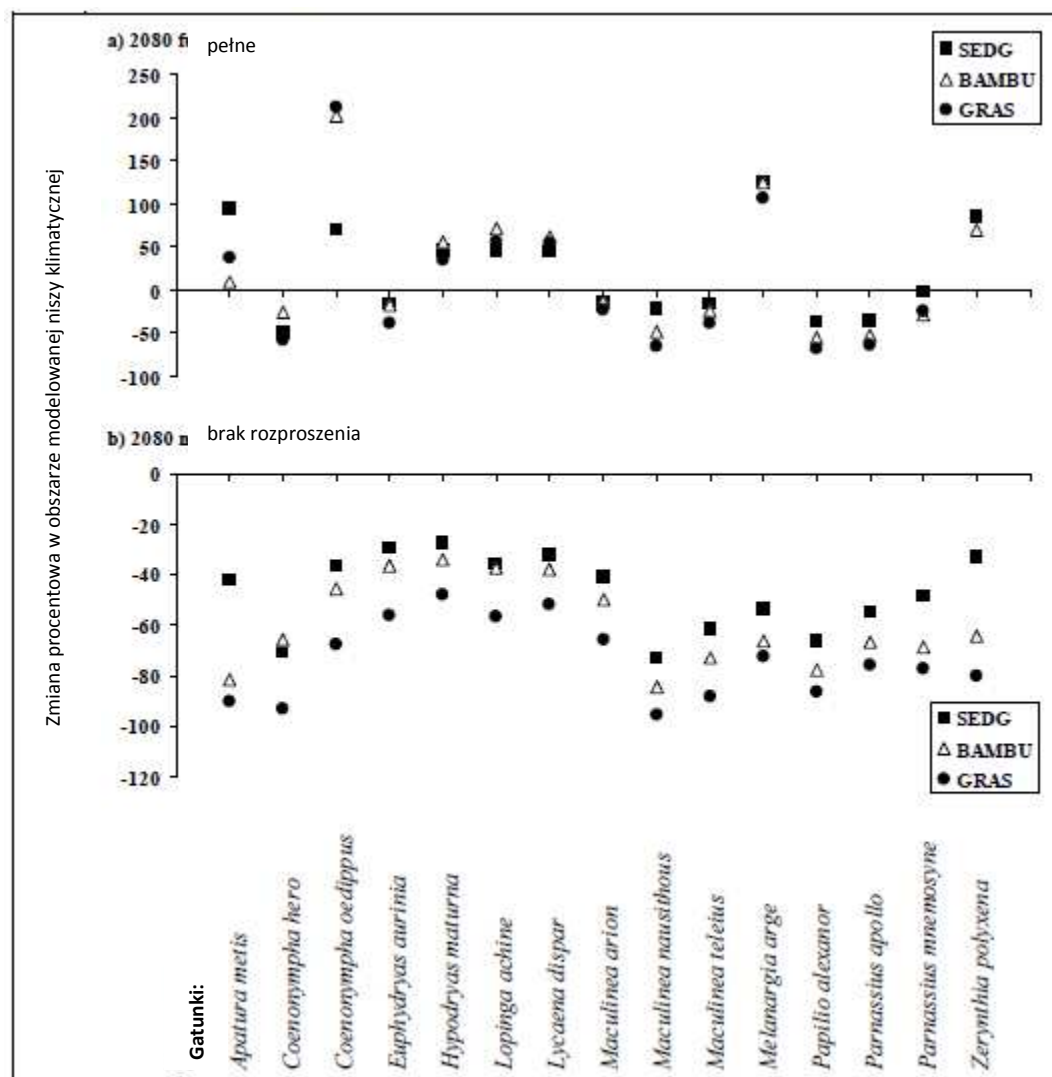
Trzy ważne wnioski można wyciągnąć z modeli Settele i in. (2008) dla gatunków motyli z Konwencji Berneńskiej:

1. Wzrost temperatury o 2,4 °C (scenariusz SEDG), 3,1 °C (scenariusz BAMBU) lub 4,1 °C (scenariusz GRAS) prowadzą do wyraźnych i znaczących różnic w przewidywanym zasięgu rozmieszczenia gatunków motyli z Konwencji Berneńskiej. Zarówno w roku 2050, jak i w 2080 scenariusz największego ocieplenia (GRAS) przewiduje niższe rozmiary rozmieszczenia niż dwa pozostałe scenariusze. W 2080 roku, według scenariusza pośredniego (BAMBU), dojdzie do zmniejszenia zasięgu rozmieszczenia w stosunku do najbardziej konserwatywnego scenariusza (SEDG) (rys. 1).

Dlatego łagodzenie skutków zmiany klimatu poprzez redukcję emisji gazów cieplarnianych jest koniecznym działaniem dla ochrony tych gatunków.

2. Udana kolonizacja regionów znajdujących się poza obecnymi granicami rozmieszczenia gatunków, które w przyszłości będą odpowiednie pod względem klimatycznym, doprowadzi do znacznego zwiększenia potencjalnych zasięgów rozmieszczenia dla wszystkich gatunków z Konwencji Berneńskiej w stosunku do scenariusza „brak rozproszenia” (rys. 1). Biorąc pod uwagę fakt, że większość motyli wymienionych w Konwencji ma wysoce specjalistyczne wymagania siedliskowe i rozdrobnione rozmieszczenie siedlisk, jest mało prawdopodobne, że będą one w stanie poszerzyć granice rozmieszczenia autonomicznie w celu skolonizowania regionów, które staną się klimatycznie korzystne. Dlatego szacunki przyszłych zasięgów rozmieszczenia w oparciu o scenariusz braku rozproszenia są bardziej realistyczne dla tych gatunków niż te zakładające pełne rozproszenie. Stąd ochrona w postaci wspomaganej kolonizacji może stać się odpowiednią techniką dla tych gatunków, których zasięg rozmieszczenia może ulec największej redukcji.
3. Dziewięć gatunków motyli z Konwencji Berneńskiej najbardziej narażonych na zmianę klimatu występuje w różnych biotopach, w tym na środkowoeuropejskich łąkach (*Coenonympha hero*, *Maulinea nausithous*, *Maculinea teleius*), pastwiskach śródziemnomorskich (*Melanargia arge*, *Papilio alexanor*, *Zerynthia polyxena*), łąkach górskich lub położonych na dużych szerokościach geograficznych (*Parnassius apollo*, *Parnassius mnemosyne*) i łągowych lasach w Europie Wschodniej (*Apatura metis*). Przynajmniej pod względem wrażliwości gatunku nie wydaje się, by ekologiczne społeczności związane z niektórymi siedliskami były bardziej zagrożone niż inne. Ochrona i zarządzanie szerokim zakresem siedlisk naturalnych i półnaturalnych będą więc miały zasadnicze znaczenie.

Wiele gatunków motyli wymienionych w Konwencji Berneńskiej posiada inne cechy, które sugerują wysoką wrażliwość na zmianę klimatu lub zmniejszoną zdolność do adaptacji (patrz ramka 2). Wszystkie osiem gatunków motyli, dla których Settele i in. (2008) nie opracowali modeli, to europejskie gatunki endemiczne, na ogół z rozmieszczeniem ograniczonym do wysp lub łańcuchów górskich. Biorąc pod uwagę ich często niewielkie zasięgi rozmieszczenia lub wilkość populacji oraz ich izolację w odpowiednich wąskich regionach, gatunki te mają bardzo małą szansę na zmianę zasięgu równoleżnikowego. Możliwa jest pewna ograniczona zmiana zasięgu wysokościowego dla gatunków żyjących w górach. Wzorce przemieszczania zostały wyliczone dla gatunku *Erebia sudetica* w Republice Czeskiej (Kuras i in. 2003), a wymagania siedliskowe dla *Erebia calcaria* zostały opracowane w Słowenii (de Groot i in. 2009). Projekty badawcze takie jak te będą niezwykle cenne dla identyfikacji czynników ograniczających rozmieszczenie gatunków oraz możliwej roli, jaką fragmentacja siedlisk może odegrać w ograniczaniu zmian zasięgu gatunków w odpowiedzi na zmianę klimatu.



Rysunek 1. Prognozowane zmiany w europejskiej niszowej przestrzeni klimatycznej dla motyli wymienionych w Konwencji Berneńskiej (na podstawie Settele i in. 2008; patrz ramka 1). Dane pokazują procentową zmianę w przestrzeni niszowej w latach 2000–2080, przy założeniu pełnego rozproszenia (a) lub braku rozproszenia (b), dla trzech scenariuszy zmiany klimatu: wzrostu temperatury o 2,4 °C (SEDG, kwadraty), 3,1 °C (BAMBU, trójkąty) i 4,1 °C (GRAS, kółka).

Motyle wymienione w Konwencji Berneńskiej mają zazwyczaj wysoko specjalistyczne lub rozdrobnione rozmieszczenie siedliskowe oraz ograniczone możliwości rozprzestrzeniania się, co sugeruje, że byłoby mało prawdopodobne, że rozszerzą swój zasięg w odpowiedzi na zmianę klimatu. Rozmieszczenie siedlisk dla niektórych gatunków można przewidzieć na podstawie skutków warunków klimatycznych i/lub powierzchni ziemi (np. dla *Parnassius mnemosyne* zob. Heikkinen i in. 2005 2007, Luoto i in. 2007; dla *Maculinea nausithous* zob. Jimenez-Valverde i in.). Badania nad możliwościami rozprzestrzeniania się sugerują, że odległości rzędu 10-50 km między obszarami siedliskowymi prawie na pewno uniemożliwiłyby naturalną kolonizację (np. dla *Parnassius apollo* zob. Brommer i Fred 1999; dla *Parnassius mnemosyne* zob. Meglecz i in. 1999, Valimaki i Itamies 2003; dla *Coenonympha hero* zob. Cassel-Lundhagen i Sjögren-Gulve 2007 2008).

Dokładne informacje na temat wykorzystania siedlisk również sugerują potencjalną wrażliwość gatunków na zmianę klimatu. Gatunki *Maculinea* mają bliskie związki z gatunkami mrówek gospodarzy, których rozmieszczenie z kolei zależy od lokalnego zróżnicowania mikroklimatu (np. Thomas i in. 1998, Mouquet i in. 2005). Larwy *Parnassius apollo* i *P. mnemosyne* wydają się regulować temperaturę przesuując się między obszarami śmieci, nagiej ziemi i bardziej zacienionej roślinności (Valimaki i Itamies 2005, Ashton i in. 2009), podczas gdy zimowe powodzie mogą być istotną przyczyną śmiertelności

larw *Lycaena dispar* (Nicholls i Pullin 2000 2003). Zmiany warunków klimatycznych mogą oznaczać, że następują zmiany typów mikrosiedlisk spełniających wymagania mikroklimatyczne gatunków, tak więc monitorowanie wykorzystania siedlisk i reakcji społeczności na zarządzanie siedliskami może być ważne. W przypadku *Parnassius apollo*, lokalne wymieranie już zostało powiązane z ociepleniem klimatu we Francji (Descimon i in. 2006) i Hiszpanii (Wilson i in. 2005, Ashton i in. 2009), z niskimi granicami wysokości przemieszczania się gatunków w górę w obu regionach. Przedwczesne zapowiedzi wiosny we Francji prawdopodobnie doprowadziły do wyjścia larw *P. apollo* z zimowej diapauzy, co doprowadziło je do śmierci głodowej, gdy później było zbyt zimno na zdobycie pożywienia (Descimon i in. 2006). Bardzo małe populacje *P. apollo*, które pozostały w niektórych częściach rozmieszczenia tego gatunku, mogły doprowadzić do zaniku endogamicznego, co sprawia, że gatunek ten nie jest w stanie dostosować się do zmieniających się warunków; jednak ponowne wprowadzenie tego gatunku miało miejsce w Polsce, z pewnymi sukcesami (Adamski i Witkowski 2007). Zrozumienie, w jaki sposób warunki klimatyczne wpływają na dostępność zasobów dla zagrożonych gatunków, jest niezbędne do właściwego zarządzania siedliskami celem ochrony gatunków. W przypadku myrmekofilnego gatunku *Maculinea arion* zarządzanie strukturą runi w celu zapewnienia odpowiedniego mikroklimatu dla mrówek gospodarzy (*Myrmica sabuleti*) było istotnym krokiem do przywrócenia gatunku w Wielkiej Brytanii (Thomas i in. 2008).

Kontynuacja odpowiedniego zarządzania pozwoliła populacjom ponownie wprowadzonym w Wielkiej Brytanii przetrwać i skolonizować dodatkowe odpowiednie siedlisko w pobliżu, co było przykładem tego, jak szczegółowa wiedza ekologiczna i zarządzanie siedliskami może przyczynić się do udanej ochrony (patrz także Settele i Kuhn 2009).

4.2 Inne owady

Wiele europejskich gatunków endemicznych o wąskim zasięgu może mieć bardzo ograniczone możliwości powiększenia zasięgu na przyszłe klimatycznie korzystne rejony (np. *Coenagrion freyi* (Odonata), *Cordulegaster trinacriae* (Odonata), *Baetica ustulata* (Orthoptera), *Carabus olympiae* (Orthoptera)). Gatunek *Carabus olympiae* ma ograniczone rozmieszczenie siedlisk we włoskich Alpach, a przekształcanie lasów bukowych lub zarośli w pastwiska najprawdopodobniej uniemożliwiłoby gatunkowi kolonizację lokalizacji poza jego obecnym wąskim zasięgiem (Negro i in. 2007 2008). Zbadano kilka przypadków możliwych interakcji pomiędzy klimatem a preferencjami siedliskowymi: *Saga pedo* (Orthoptera) ma zasięg ograniczony do stromych południowo-zachodnich zboczy na północnej granicy zasięgu (Kristin i Kanuch 2007); *Cerambyx cerdo* (Coleoptera) wykorzystuje odizolowane pnie drzew w Europie Środkowej, a więc pół-otwarte pastwiska sprzyjają przetrwaniu tego saproksylicznego chrząszcza, który odgrywa rolę inżyniera ekosystemu poprzez tworzenie siedlisk dla wielu innych zagrożonych chrząszczy (Buse i in. 2007 2008). Identyfikacja i utrzymywanie odpowiednich siedlisk dla tych gatunków będzie miało zasadnicze znaczenie dla ich ochrony: istnieje duże zapotrzebowanie na dodatkowe informacje dotyczące wymagań siedliskowych dla owadów wymienionych w Konwencji Berneńskiej innych niż Lepidoptera oraz tego, czy te wymagania siedliskowe są zróżnicowane w zależności od równoleżnikowego lub wysokościowego zasięgu gatunków. Ostrożne podejście do zarządzania siedliskami obejmowałoby w międzyczasie utrzymanie różnorodnych warunków (zob. pkt 5.2.4. poniżej).

Istotne prace autekologiczne zostały przeprowadzone w odniesieniu do chrząszcza *Osmoderma eremita*. Gatunek ten jest wrażliwy na wzrost temperatury powietrza (Renault i in. 2005), a jego rozprzestrzenianie jest bardzo ograniczone (Hedin i in. 2008). W rozproszonych siedliskach *O. eremita* rzadko przemieszcza się między lasami, a przetrwanie w lasach zależy od liczby starych dębów (Ranius 2000 2007). Ochrona osiadłych gatunków specjalistycznych wrażliwych na klimat stanowi znaczące wyzwanie w warunkach zmiany klimatu, ale informacje na temat wymagań siedliskowych takie jak te dostępne dla *O. eremita* są ważnym pierwszym krokiem.

4.3 Inne stawonogi - pajęczaki

Rozmieszczenie iberyjskiego endemicznego pająka *Macrothele calpeiana* wydaje się być zdeterminowane głównie przez zmienne klimatyczne: gatunek występuje w regionach z dużą ilością opadów i ich wysoką okresowością, ale nie występuje w regionach, gdzie temperatury sięgają skrajności (Jimenez-Valverde i Lobo 2006). Model rozmieszczenia opracowany dla gatunku okazał się precyzyjny przy identyfikacji regionu południowej Portugalii, gdzie populacje *M. calpeiana* występowały, a wcześniej

ich nie zaobserwowano (Jiménez-Valverde i in. 2007). Ten przykład pokazuje wartość, jaką mają dane na temat rozmieszczenia przy opracowywaniu modeli, które mogą pomóc wskazać wcześniej niezarejestrowane miejsca występowania rzadkich gatunków. Dalsze modele oparte na scenariuszach klimatycznych mogą być pomocne w ocenie wrażliwości *M. calpeiana* na zmianę klimatu; modele te sugerują również, że gatunek może wymagać środowiska leśnego, aby mógł przetrwać, lub zmienić swój zasięg w przypadku ocieplenia klimatu.

4.4 Mięczaki

Wiele gatunków mięczaków wymienionych w Konwencji Berneńskiej to gatunki endemiczne o wąskim zasięgu (ograniczonym do np. basenu Morza Śródziemnego lub Madery), a zatem mogą być wrażliwe na zmianę klimatu. Wysiłki mające na celu przywrócenie endemicznego śródziemnomorskiego gatunku ślimaka *Patella ferruginea* zostały utrudnione przez wysokie wskaźniki śmiertelności przeszczepionych osobników (Espinosa i in. 2008), co sugeruje, że w przypadku tego gatunku wspomagana kolonizacja może być techniką trudną do zastosowania.

4.5 Koralowce

Gatunek *Astroides calycularis*, występujący w ciepłych wodach, niedawno skolonizował wschodnią część Morza Adriatyckiego przemieszczając się z poprzedniej granicy zasięgu w południowo-zachodniej części Morza Śródziemnego, w związku ze wzrostem temperatury wody i zmianami prądów wód powierzchniowych (Kruzic i in. 2002, Grubelic i in. 2004, Bianchi 2007). To poszerzenie zasięgu występowania wskazuje na kolonizację Morza Śródziemnego przez gatunki (z Atlantyku i Morza Czerwonego) o przewadze subtropikalnych powiązań biogeograficznych (Bianchi 2007).

5. ADAPTACJA OCHRONY BEZKRĘGOWCÓW DO ZMIANY KLIMATU

Bezkręgowce zmieniają swoje zasięgi podążając za ostatnimi ociepleniami klimatu, a działania ochronne mają za zadanie zapobieżenie zanikowi gatunków w tych częściach ich zasięgu, gdzie klimat ulega pogorszeniu, zanim dokonają one kolonizacji regionów lub siedlisk, które stają się bardziej korzystne. To wyzwanie staje się jeszcze trudniejsze w przypadku fragmentacji siedlisk. Powyższa dyskusja pokazuje, że gatunki mogą reagować na zmianę klimatu w sposób indywidualny, co prowadzi czasami do nieprzewidywalnych zmian wzorców rozmieszczenia i liczebności, fenologii i interakcji między gatunkami. W rezultacie programy ochrony mogą być podobnie elastyczne i dynamiczne, ale można sformułować pewne ogólne wytyczne.

5.1 Wrażliwości gatunków

Zmiana klimatu nieproporcjonalnie zagraża gatunkom o małych lub izolowanych populacjach i zasięgach rozmieszczenia, wąskich wymaganiach siedliskowych i ograniczonej zdolności do rozprzestrzeniania się. Cechy te zwiększają ryzyko, że zmiana klimatu spowoduje spadek wielkości populacji i wymieranie na skalę lokalną, ograniczając jednocześnie zdolność gatunku do wykorzystania nowych zasobów lub skolonizowania klimatycznie odpowiednich lokalizacji. Cechy te charakteryzują bezkręgowce wymienione w Konwencji Berneńskiej i oznaczają, że zmiana klimatu najprawdopodobniej doprowadzi do zwiększenia podatności gatunków, które już są w najwyższym stopniu zagrożone przez inne czynniki powodujące zmiany.

5.2 Zakres planowanej adaptacji

Podatność gatunków może być wysoka w regionach i środowiskach, gdzie ekspozycja na zmianę klimatu jest skrajnie wysoka, lub dla gatunków o wysokiej wrażliwości związanej z cechami ekologicznymi (rozmieszczenie, rozmiary niszy, zagrożenia związane z innymi czynnikami środowiskowymi). Te cechy ekspozycji lub wrażliwości oznaczają, że istnieją silne ograniczenia dla autonomicznej adaptacji w drodze reakcji ewolucyjnych lub zmian rozmieszczenia. Planowana lub społeczna adaptacja może być zatem konieczna dla zachowania gatunków wrażliwych, w celu przezwyciężenia barier dla autonomicznej adaptacji. Niektóre ogólne wytyczne dla ochrony bezkręgowców zostały przedstawione poniżej (patrz również Hopkins 2007, Mitchell i in. 2007, gdzie przedstawiono ogólne wytyczne dotyczące dostosowania ochrony do zmiany klimatu).

5.2.1 Priorytetyzacja regionów, taksonów lub biotopów

Zarządzanie ochroną priorytetową może być wymagane w naturalnych siedliskach lub regionach, których różnorodność biologiczna jest szczególnie wrażliwa na skutki zmiany klimatu. Te regiony lub siedliska mogą zostać zidentyfikowane w ramach modeli reakcji gatunków lub biomów na zmianę klimatu (np. Hannah i in. 2002). W skali międzynarodowej ośrodki endemizmu lub bioróżnorodności mogą się odznaczać koncentracją gatunków, szczególnie podatną na zmiany zarówno w użytkowaniu ziemi, jak i zmiany klimatu (Myers i in. 2000). Duże szerokości geograficzne i wysokości są narażone na największą ekspozycję na zmiany temperatury, co potencjalnie może prowadzić do przesunięcia odpowiedniej przestrzeni klimatycznej dla gatunków do miejsc znajdujących się w dużej odległości poza ich aktualnym zasięgiem. Obszary górskie będą szczególnie narażone, ponieważ wspierają one nieproporcjonalnie dużo gatunków rzadkich lub endemicznych (np. zasięg ośmiu gatunków motyli z Konwencji Berneńskiej jest całkowicie lub prawie całkowicie ograniczony do regionów górskich), i ponieważ stanowią one często dolną granicę zasięgu gatunków, które są szczególnie wrażliwe na ocieplenie klimatu i które mogą być ważnymi zbiornikami genetycznej zmienności (Hampe i Petit 2005). Obszary górskie mogą także stanowić szanse dla ochrony, ponieważ (i) często znajdują się tam stosunkowo nienaruszone siedliska w stosunku do krajobrazów nizinnych, (ii) strome zbocza mogą umożliwić gatunkom szybsze podążanie za zmianami klimatu na mniejszych odległościach niż na nizinach, oraz (iii) mała zmienność topograficzna może umożliwić przetrwanie i adaptację w lokalnych ostojach. Biomy śródziemnomorskie mogą wymagać szczególnej uwagi ze względu na brak szans dla gatunków przystosowanych do cieplejszych i bardziej suchych warunków do kolonizacji tych regionów w miarę postępującego ocieplenia klimatu. Fauna bezkręgowców z terenów podmokłych, w tym torfowisk, stawów, jezior i rzek, może być również podatna na skutki zmiany klimatu (np. dla Odonata, Ott 2007). Minimalizacja innych zagrożeń dla gatunków w tych regionach może zwiększyć prawdopodobieństwo, że przetrwają one zmianę klimatu.

5.2.2 Ochrona na skalę krajobrazu

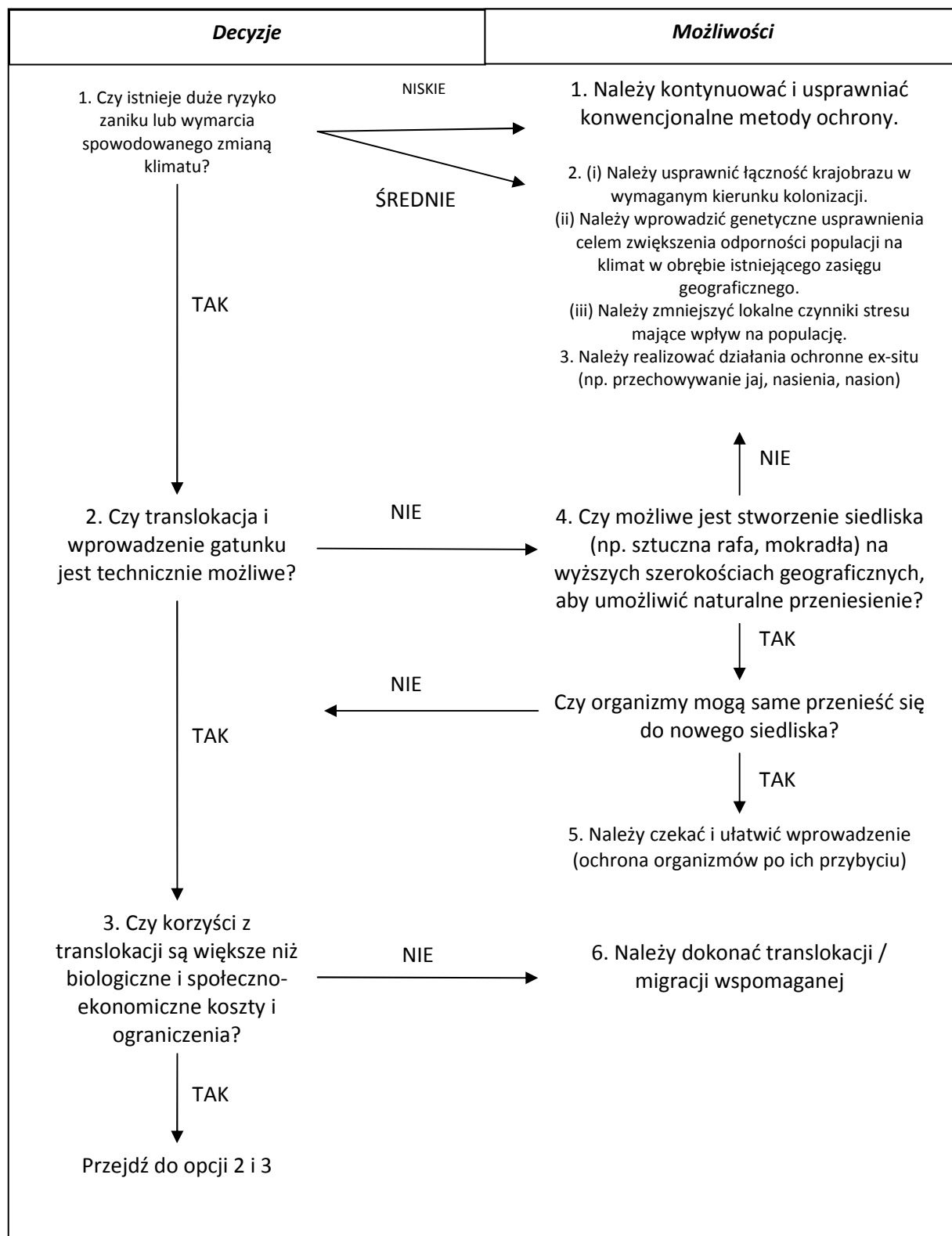
Na poziomie regionalnym zarządzanie siedliskami w skali krajobrazu w ramach sieci rezerwowych i całego środowiska będzie ważne zarówno w celu utrzymania obecnych populacji gatunków, jak też w celu zwiększenia prawdopodobieństwa kolonizacji lokalizacji lub siedlisk, które staną się bardziej korzystne. Takie podejście zostało z powodzeniem zastosowane w przypadku gatunku motyla *Hesperia comma* w Anglii, gdzie zarządzanie użytkami zielonymi w ramach planów rolno-środowiskowych pozwoliło gatunkom przynajmniej częściowo przezwyciężyć ograniczenia wynikające z fragmentacji siedlisk i rozszerzyć zasięg (Davies i in. 2005, Wilson i in. 2009). Zmiany preferencji siedliskowych *H. comma* związane z klimatem oznaczały, że gatunek ten był w stanie skolonizować wiele obszarów użytków zielonych, które nie były uprzednio określane jako idealne siedlisko dla tego gatunku (Davies i in. 2006). Tak więc ochrona miejsc lub zarządzanie nimi może być korzystne dla gatunków, które są obecne nie tylko w tym miejscu, ale także w okolicy; zmiany w wykorzystaniu siedlisk przez gatunek w warunkach zmiany klimatu mogą umożliwić skolonizowanie lokalizacji, które wcześniej były uznawane za nieodpowiednie.

5.2.3 Wspomagana kolonizacja

Zarządzanie szerszym krajobrazem w celu zwiększenia łączności między populacjami będzie najtrudniejsze do osiągnięcia w przypadku gatunków osiadłych, których aktualne rozmieszczenie jest bardzo małe lub odizolowane od miejsc, które według oczekiwań mogą okazać się korzystne w przyszłości. W tym kontekście zarządzanie pozostałościami sieci siedlisk naturalnych w połączeniu z translokacją populacji, tj. „wspomagana kolonizacja”, może być bardziej opłacalne niż tworzenie korytarzy przyrodniczych łączących krajobrazy silnie zmodyfikowane (Hulme 2005). Wykorzystanie metod modelowania bioklimatu może pomóc w identyfikacji regionów i taksonów, dla których wprowadzenie gatunków miałoby największe szanse na sukces. Wprowadzenie gatunków owadów do odpowiednich siedlisk poza ich aktualnym zasięgiem było skuteczne w wielu przypadkach (np. Menéndez i in. 2006). Jednak zakres translokacji populacji jako narzędzia ochrony może być ograniczony do stosunkowo małej liczby gatunków przewodnich z powodu kosztów i wymogu uzyskania bardzo szczegółowych danych ekologicznych (np. patrz Thomas i in. 2009). Hoegh-Guldberg i in. (2008) proponują wprowadzenie ram decyzyjnych dla identyfikacji odpowiednich systemów, w których można stosować wspomaganą

kolonizację (patrz ramka 3), w celu zapewnienia, że translokacja gatunków nie spowoduje więcej problemów niż ma ich rozwiązać, ani w przypadku gatunków centralnych, ani gatunków żyjących w miejscach, do których są one wprowadzane.

Ramka 3. Ramy decyzyjne dla stosowania wspomaganiej kolonizacji dla ochrony gatunków w ramach zmiany klimatu (na podstawie Hoegh-Guldberg i in. 2008).



5.2.4 Zarządzanie różnorodnością

Utrzymanie różnorodności siedlisk w skali lokalnej i w skali krajobrazu może sprzyjać przetrwaniu gatunków z dwóch powodów.

Po pierwsze, preferencje siedliskowe gatunków zmieniają się wraz z klimatem w czasie (Davies i in. 2006) i w ramach zasięgu geograficznego gatunków (Thomas 1993, Thomas i in. 1998 1999). Ponadto warunki siedliskowe lub praktyki zarządzania, które są korzystne dla gatunków, mogą się zmieniać w zależności od pory roku (Roy i Thomas 2003) lub na przestrzeni lat (Kindvall 1996, Sutcliffe i in. 1997), w zależności od panujących warunków abiotycznych, a zatem zapewnienie różnych rodzajów siedlisk lub mikrosiedlisk pozwoli gatunkom na wykorzystanie mikrosiedlisk, które są najbardziej korzystne w określonym czasie. Dokładne monitorowanie może być coraz bardziej potrzebne w celu wykrycia związków między klimatem a wielkością populacji i preferencjami siedliskowymi gatunków oraz w celu zapewnienia, że siedliska nie będą zarządzane według przestarzałych metod.

Po drugie, niejednorodność siedlisk może działać jako zabezpieczenie przed warunkami ekstremalnymi, pozwalając populacjom na przetrwanie w niektórych miejscach lub siedliskach, gdy inne staną się chwilowo niekorzystne lub niemożliwe do zasiedlenia. Na przykład siedliska o większych rozbieżnościach topograficznych lub w zakresie wilgotności są odpowiednie dla bardziej trwałych populacji *Metrioptera bicolor* (Kindvall 1996). Wykazano również, że różnorodność siedlisk ma bardzo istotne znaczenie dla umożliwienia przetrwania populacji i metapopulacji motyla *Euphydryas editha* w Kalifornii (Singer i Thomas 1996, Thomas i in. 1996).

5.3 Implikacje w zakresie monitoringu, badań i polityki

Istnieje potrzeba monitorowania i badania zarówno wrażliwości gatunków na zmianę klimatu, jak i zakresu adaptacji dokonywanej przez same gatunki lub za pośrednictwem planowanej ochrony lub interwencji politycznych.

Wrażliwość. Informacje na temat wrażliwości gatunków są potrzebne w celu ustalenia priorytetów dotyczących gatunków, siedlisk i regionów dla planowanej adaptacji do zmiany klimatu.

Dokładne informacje z całej Europy na temat rozmieszczenia motyli pozwoliły na opracowanie modeli będących pierwszym krokiem do porównania prawdopodobnej wrażliwości różnych gatunków na zmianę klimatu oraz różnic wpływu różnych scenariuszy zmian klimatu (Settele i in. 2008). Dla dobrze udokumentowanej grupy takiej jak motyle informacje o wymaganiach siedliskowych lub powiązaniach z roślinami gospodarzami mogą być następnie wykorzystane w celu zwiększenia realizmu modelowanych zmian rozmieszczenia gatunków (Araujo i Luoto 2007, Schweiger i in. 2008). Tego rodzaju podejście może być obecnie stosowane do wielu innych zagrożonych gatunków motyli i osadzone na empirycznych informacjach na temat wpływu klimatu, interakcji między siedliskami i oddziaływań biotycznych na dynamikę populacji i rozmieszczenie gatunków, w celu wzmocnienia wsparcia dla oddziaływań w zakresie zmiany klimatu, oraz w celu umożliwienia dalszego rozwoju modeli do przewidywania skutków zmiany klimatu na rozmieszczenie gatunków.

Dla wielu gatunków bezkręgowców, o których rozmieszczeniu lub preferencjach siedliskowych wiadomo stosunkowo niewiele, konieczne jest zebranie tych podstawowych danych ekologicznych. Metody modelowania rozmieszczenia mogą być następnie wykorzystane do przewidywania lokalizacji, gdzie mogą pojawić się gatunki centralne, a także do wskazywania wymagań klimatycznych lub siedliskowych lub tolerancji gatunków (np. Jimenez-Valverde i Lobo 2006). Takie podejście może pomóc w precyzowaniu przedmiotu badań nad rozmieszczenie słabo udokumentowanych gatunków lub regionów (Jiménez-Valverde i in. 2007 2008).

Zdolności adaptacyjne. Tam, gdzie dostępne są informacje na temat rozmieszczenia, wielkości populacji lub preferencji siedliskowych gatunków, dalszy monitoring pozwala na wykrycie reakcji na zmiany środowiskowe. Takie informacje mogą mieć kluczowe znaczenie dla określenia, czy i w jaki sposób gatunki dokonują przesunięć rozmieszczenia, poprzez badanie wymierania w ciepłym klimacie lub ekspansji w chłodnym klimacie, oraz tego, czy te procesy postępują wraz ze zmianą klimatu czy nie nadążają za nią.

Monitorowanie wielkości populacji i preferencji siedliskowych pomoże w ustaleniu, czy siedlisko jest zarządzane prawidłowo w warunkach zmieniającego się klimatu. Należy opracować wzorcowe systemy,

które pokazują znaczenie dostępności siedlisk w zwiększaniu możliwości przesunięcia zasięgu gatunków lub jego ograniczaniu w warunkach zmiany klimatu, w miarę możliwości wykorzystując dane historyczne do testowania przewidywań modeli zmian rozmieszczenia (np. Wilson i in. 2009). Informacje na temat systemów i gatunków, dla których zarządzanie siedliskami na skalę lokalną lub krajobrazu umożliwiło zwiększenie odpowiednio populacji lub zasięgu może mieć kluczowe znaczenie dla wyciągnięcia wniosków dotyczących najlepszych praktyk w zakresie dostosowania ochrony do zmiany klimatu.

Obecny dialog na temat możliwej roli wspomaganej kolonizacji w ułatwianiu reakcji gatunków na zmianę klimatu (Hoegh-Guldberg i in. 2008) również wymaga mocnych dowodów z udanych i nieudanych programów ponownego wprowadzenia gatunków (np. Adamski i Witkowski 2007, Espinosa i in. 2008, Thomas i in. 2009), aby pomóc w dostarczeniu informacji na temat możliwości i konsekwencji tego podejścia.

Wreszcie dokumentacja i rozpowszechnianie informacji na temat zaobserwowanych reakcji bezkręgowców na zmianę klimatu (i ich konsekwencji ekologicznych) będzie ważne dla uświadomienia decydentom i ogółowi społeczeństwa: a) wpływu zmiany klimatu na systemy naturalne, oraz b) potencjalnych korzyści i daleko idących skutków łagodzenia skutków zmiany klimatu i planowanej adaptacji.

Dalsze informacje naukowe na temat wrażliwości gatunków i systemów na zmianę klimatu powinny być wykorzystywane do prowadzenia polityki w zakresie łagodzenia zmian klimatu i adaptacji. W ramach najobszerniejszej oceny potencjalnego wpływu zmiany klimatu na grupę bezkręgowców w Europie (przeprowadzonej dla motyli przez Settele i in. 2008) określono potencjalnie głęboki wpływ wielkości prognozowanego ocieplenia na rozmieszczenie gatunków. Ograniczenie tego wpływu jest zatem niezbędne. Warren (2008, przedmowa w Settele i in. 2008) sugeruje również rozważenie następujących zagadnień polityki w celu zapewnienia, że sieci siedlisk będą dostępne dla gatunków zmieniających rozmieszczenie w miarę ocieplania się klimatu:

- Przesunięcia w ramach finansowania Wspólnej Polityki Rolnej (WPR) w celu nagradzania różnorodności biologicznej.
- Lepiej finansowane i bardziej ukierunkowane programy rolno-środowiskowe oraz alokacja płatności na rzecz obszarów o niekorzystnych warunkach gospodarowania (ONW) w celu utrzymania rolnictwa o wysokiej wartości przyrodniczej (HNV).
- Pełne wdrożenie dyrektywy siedliskowej UE wraz z odpowiednią ochroną i zarządzaniem obszarami Natura 2000 w całej Europie.
- Nowe inicjatywy w ramach tworzenia zasobów sieci siedlisk w celu wspierania różnorodności biologicznej i łagodzenia negatywnych skutków zmiany klimatu.

6. GŁÓWNE WNIOSKI I ZALECENIA

W reakcji na ostatnio zaobserwowaną zmianę klimatu zaobserwowano zmiany w cyklu życia, dynamice populacji, rozmieszczeniu i różnorodności bezkręgowców. Aby zminimalizować straty w różnorodności biologicznej bezkręgowców wynikające z tych zmian, potrzebna jest polityka ochronna i praktyka w celu zwiększenia zdolności adaptacyjnych systemów naturalnych i sterowanych.

Gatunki endemiczne o wąskim zasięgu są szczególnie narażone na zmianę klimatu i mogą mieć niewielką możliwość przesunięcia rozmieszczenia w sposób naturalny w celu zasiedlenia obszaru o odpowiednim klimacie. Dokumentowanie i ochrona obecnego rozmieszczenia i siedlisk dla tych gatunków jest niezbędna, jeśli mają one mieć jakąkolwiek szansę na przetrwanie zmiany klimatu. Regiony sprzyjające populacjom wielu gatunków endemicznych o wąskim zasięgu i gatunkom, których naturalne przesunięcie rozmieszczenia w odpowiedzi na zmianę klimatu jest mało prawdopodobne, obejmują wyspy na Atlantyku i Morzu Śródziemnym oraz pasma górskie w południowej i środkowej Europie.

PROPONOWANE DZIAŁANIA:

Ochrona różnorodności

I.1. Utrzymanie i aktywne zarządzanie dużymi obszarami i sieciami różnorodnych siedlisk w celu: (i) ochrony dużych populacji o małych szansach lokalnego wyginięcia, (ii) przygotowania do zmian preferencji siedliskowych gatunków w warunkach zmieniającego się klimatu, oraz (iii) zabezpieczenia przeciwko ekstremalnym wydarzeniom klimatycznym lub związanym z klimatem (np. pożary).

Ochrona istniejących populacji

I.2. Ochrona istniejących populacji zagrożonych gatunków w wielu siedliskach i lokalizacjach pozostających w ich zasięgu geograficznym. Skoncentrowanie wysiłków na ochronie istniejących populacji gatunków w sieciach o wysokiej różnorodności biologicznej i w sieciach chronionych, takich jak obszary Emerald i Natura 2000 w całej Europie.

Minimalizacja zagrożeń dla systemów wrażliwych

I.3. Minimalizacja zagrożeń, które wraz ze zmianą klimatu zagrażają różnorodności biologicznej bezkręgowców, w tym intensyfikacji użytkowania gruntów, rezygnacji z tradycyjnego rolnictwa i leśnictwa, osuszania terenów podmokłych, urbanizacji, zanieczyszczenia i rozprzestrzeniania się obcych gatunków inwazyjnych. W pierwszej kolejności należy zminimalizować te zagrożenia w systemach, które wspierają najbardziej zagrożone gatunki bezkręgowców, w tym:

- *Biotopty:* Góry, naturalne i półnaturalne łąki, stare lasy, biom śródziemnomorski, tereny podmokłe (w tym torfowiska, jeziora słodkowodne, stawy i rzeki) oraz morskich systemów bentonicznych.
- *Regiony:* Wyspy na Atlantyku i Morzu Śródziemnym oraz pasma górskie w południowej i środkowej Europie.

Ułatwienia zmian zasięgu

I.4. Ustanowienie lub utrzymanie sieci siedlisk naturalnych i półnaturalnych na skalę krajobrazu w celu zwiększenia szans naturalnego przesunięcia zasięgu gatunków, ponieważ wiele bezkręgowców będzie musiało rozszerzyć zasięg swojego rozmieszczenia na wyższe szerokości geograficzne lub wysokości, aby przetrwać zmianę klimatu.

I.5. Ustanowienie sieci ekologicznych na skalę krajobrazu poprzez działania obejmujące ochronę i aktywne zarządzanie istniejącymi siedliskami, odtworzenie zniszczonych siedlisk oraz zrównoważone zarządzanie obszarami oddzielającymi istniejące obszary chronione.

I.6. Należy rozważyć realizację wspomaganą kolonizacji w ramach planowanych interwencji ochronnych na rzecz zachowania gatunków, których aktualne rozmieszczenie prawdopodobnie nie pozwoli na ich przetrwanie w dłuższej perspektywie, a które mają małe szanse dotarcia do odpowiednich siedlisk o korzystnych warunkach klimatycznych poza ich aktualnym zasięgiem.

Monitorowanie i badania

I.7. Podjęcie wzmożonych kontroli i prowadzenie badań nad reakcjami bezkręgowców i systemów ekologicznych na zmianę klimatu, co jest kluczowe dla zapewnienia podstaw do podejmowania decyzji dotyczących polityki i zarządzania, w tym w następujących kluczowych obszarach:

- Dokumentacja rozmieszczenia gatunków, wymagań siedliskowych i preferencji klimatycznych dla słabo znanych gatunków i regionów w charakterze danych wyjściowych do prognozowania prawdopodobnych reakcji na zmianę klimatu i inne czynniki środowiskowe, oraz w celu umożliwienia wydawania zaleceń w zakresie ich ochrony.
- Testowanie niezależnych ról i interakcji między zmianą klimatu i innymi zagrożeniami w prowadzeniu obserwacji na temat dynamiki populacji i rozmieszczenia gatunków, które pomogą zidentyfikować przyczyny i prognozować ekologiczne reakcje oraz umożliwić hierarchizację systemów i sposobów podejścia do zarządzania adaptacyjnego.
- Monitorowanie reakcji bezkręgowców na zmianę klimatu w celu wykrycia zmian we wrażliwości różnych gatunków oraz w celu zapewnienia, że zasoby są skoncentrowane na priorytetowych gatunkach i systemach.

7. PODZIĘKOWANIA

Jestem wdzięczny Radzie Europy, a w szczególności Grupie ekspertów Konwencji Berneńskiej ds. różnorodności biologicznej i zmiany klimatu za możliwość ukończenia niniejszego raportu. Uczestnicy spotkania grupy ekspertów w lipcu 2009 r. podzielili się ze mną cennymi uwagami na temat projektu raportu, szczególnie cennych uwag dostarczyli Deborah Procter, Jan Plesnik, Friedrich Wulf, Vernon Heywood i Miguel Araújo. Rozmowy z Chrisem Thomasem, Martinem Warrenem oraz Johnem Hopkinsem pomogły w opracowaniu zaleceń przedstawionych w raporcie. Chciałbym szczególnie podziękować Caroline Lasén Diaz i Véronique du Cussac za nieocenione wsparcie w całym procesie przygotowania i prezentacji raportu.