

Globalne ocieplenie – fakty i mity

■ Współczesne ocieplenie – zjawisko spowodowane przez człowieka, czy naturalna anomalia klimatu? Bombardowani opiniami zwolenników obu opcji często czujemy się zdezorientowani. Argumenty wydają się tak przekonujące...

prof. dr hab. Joanna Wibig

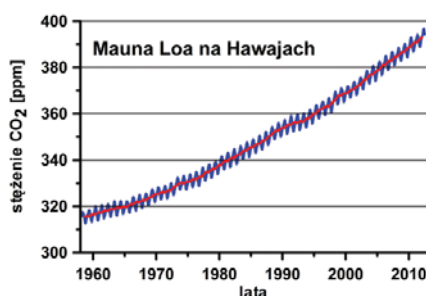
Katedra Meteorologii i Klimatologii, Uniwersytet Łódzki

Rozwój nauki, to ciągle budowanie teorii naukowych i ich eksperymentalna weryfikacja. Same fakty nie tworzą jeszcze wiedzy. Naukowcy analizując je, tworzą logicznie spójne teorie naukowe wyjaśniające obserwowane zjawiska. Następnie planują eksperymenty umożliwiające potwierdzenie lub odrzucenie zbudowanych teorii. W klimatologii przeprowadzenie eksperymentu jest praktycznie niemożliwe. Ziemiński system klimatyczny jest ogromnie skomplikowany i nie da się odtworzyć w warunkach laboratoryjnych. Odpowiednikiem eksperymentu w nauce o klimacie jest obserwacja. W każdej chwili stan systemu klimatycznego Ziemi jest jakby wynikiem pojedynczego doświadczenia. Ciąg takich stanów odpowiada serii eksperymentów.

Teorię naukową uważamy powszechnie za prawdziwą, jeśli tłumaczy obserwowane zjawiska, a jednocześnie nie występują sprzeczne z nią zdarzenia. Prawdziwość teorii naukowej, to nic innego, jak ogromne prawdopodobieństwo, że zjawiska będą przebiegały w sposób z nią zgodny. Jeśli zdarzy się coś sprzecznego z teorią, to znaczy, że trzeba zacząć od początku. Zebrać wszystkie obserwowane fakty i zbudować nową teorię, która by je objaśniała w spójny i logiczny sposób.

Jak na tym tle wygląda teoria antropogenicznego ocieplenia klimatu?

Obserwacje meteorologiczne prowadzone różnymi metodami w wielu miejscach ziemskiego systemu klimatycznego: w atmosferze, na powierzchni Ziemi, w oceanach i w gruncie wskazują na ocieplenie, czyli gromadzenie ciepła w oceanach, gruncie i dolnej



Rys. 1. Krzywa Keelinga przedstawiająca stężenie dwutlenku węgla w atmosferze mierzone na szczycie Mauna Loa na Hawajach w latach 1958–2012. Niebieska linia prezentuje średnie wartości dla poszczególnych miesięcy. Spadki i wzrosty wynikają z rocznego cyklu wegetacyjnego na półkuli północnej. Czerwona linia przedstawia wartości uśrednione w ciągu kolejnych 12 miesięcy. Jej wznoszenie się wynika ze spalania paliw kopalnych

warstwie atmosfery, zwanej troposferą. Jednocześnie zawartość dwutlenku węgla w atmosferze wzrasta. Wzrost ten obserwowany jest w bezpośrednich pomiarach. Na przykład w tzw. krzywej Keelinga (rys. 1) otrzymanej na podstawie prowadzonych od 1958 roku pomiarów w Mauna Loa na Hawajach, z dala od antropogenicznych źródeł dwutlenku węgla. Na to, że wzrost zawartości tego gazu w atmosferze jest skutkiem działalności człowieka wskazuje zmiana składu izotopowego węgla. Węgiel występuje w dwóch stabilnych izotopach ^{12}C i ^{13}C (i dodatkowo w jednym niestabilnym izotopie ^{14}C). Rośliny chętniej pochłaniają lżejszy izotop węgla (^{12}C) i dlatego w pokładach kopalnych stosunek $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ jest mniejszy niż w atmosferze. Na skutek spalania paliw kopalnych więcej cięższego węgla dostaje się do atmosfery i stosunek $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ spada.

Istnieje fizyczny mechanizm wiążący temperaturę powierzchni Ziemi i troposfery z ilością dwutlenku węgla i innych gazów cieplarnianych, czyli gazów pochłaniających promieniowanie podczerwone w zakresie emitowanym przez Ziemię i atmosferę. Zwiększone pochłanianie promieniowania podczerwonego przez gazy cieplarniane potwierdzają zarówno eksperymenty laboratoryjne, jak i satelitarne pomiary energii emitowanej z systemu Ziemia-atmosfera.

W celu weryfikacji hipotezy antropogenicznego wpływu na ocieplenie klimatu rozważano szereg zjawisk, które powinno się obserwować, gdyby teoria była prawdziwa. Na przykład, gdy wzrasta efekt cieplarniany, temperatura w nocy (czyli temperatura minimalna) powinna wzrastać szybciej niż temperatura w okresie dnia (temperatura maksymalna). W nocy, ze względu na zwiększoną zawartość dwutlenku węgla w atmosferze, powierzchnia Ziemi ochładza się wolniej. Promieniowanie Ziemi jest pochłaniane przez atmosferę i wysyłane z powrotem do Ziemi, zapobiegając wychłodzeniu. Z analogicznego powodu ocieplenie w zimie powinno być większe niż w lecie. Większy wzrost temperatury minimalnej niż maksymalnej potwierdzają obserwacje.

Ponieważ gazy cieplarniane pochłaniają znaczną część promieniowania podczerwonego w troposferze, mniej energii dociera do stratosfery, która powinna się z tego powodu wychłodzić. Zjawisko to również jest obserwowane. Wzrostowi temperatury w troposferze towarzyszy jednocześnie spadek temperatury stratosfery.

Przeciwnicy teorii, że globalne ocieplenie występuje i jest wywołane działalnością człowieka, wysuwają szereg argumentów na poparcie swojej tezy.

Zmiany klimatu są naturalne?

W przeszłości klimat ulegał znacznym zmianom. W ciągu ostatnich 700 tysięcy lat występowały przemienne okresy bardzo chłodne i ciepłe. Przyczyny zmian były naturalne i dlatego dzisiejsze zmiany też są spowodowane czynnikami naturalnymi.

Fakty

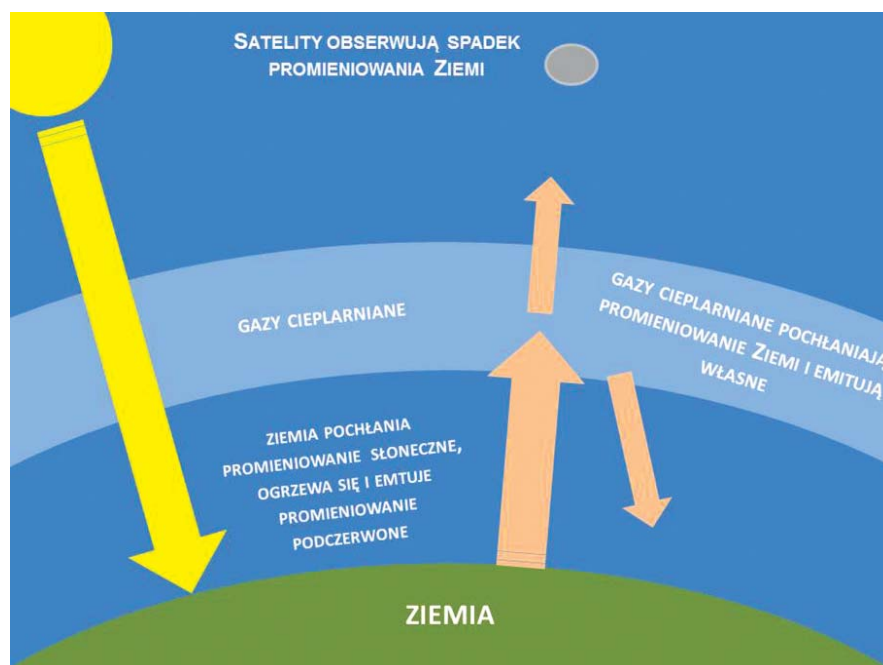
Klimat zmienia się pod wpływem zaburzenia bilansu energetycznego. Gdy Ziemia akumuluje ciepło, temperatura globalna wzrasta, gdy traci, ochładza się. Obecnie, pod wpływem zwiększonej zawartości gazów cieplarnianych w atmosferze, ta równowaga została zachwiana. Gazy cieplarniane powodują, że atmosfera pochłania więcej energii emitowanej przez Ziemię i część z tej energii jest wysyłana z powrotem ogrzewając najpierw Ziemię, a potem otaczającą ją atmosferę (rys. 2). Stopniowo uaktywniają się mechanizmy sprzężeń zwrotnych (patrz ramka). W cieplejszej atmosferze może zmieścić się więcej pary wodnej, która jest najsilniejszym gazem cieplarnianym. To dodatnie sprzężenie zwrotne, które wpływa na nasilenie ocieplenia. Dodatkowa para wodna w atmosferze powoduje wzrost zachmurzenia. Wpływ zmian zachmurzenia na temperaturę Ziemi nie jest jednoznaczny. W ciągu dnia chmury ograniczają dopływ promieniowania słonecznego – działają ochładzająco, w nocy zapobiegają nadmiernemu wypromieniowaniu ciepła z dolnych warstw atmosfery.

Wpływ Słońca?

To Słońce jest przyczyną ocieplenia. W ciągu ubiegłych kilkuset lat liczba plam słonecznych systematycznie wzrastała. Dane wskazują, że aktywność Słońca jest przyczyną obecnego ocieplenia klimatu.

Fakty

W pierwszej połowie XX wieku aktywność słoneczna rzeczywiście nieznacznie wzrastała, ale w ciągu ostatnich 35 lat maleje, a ocieplenie nabrało tempa.



Rys. 2. Promieniowanie słoneczne ulega w atmosferze odbiciu, rozpraszaniu i absorpcji. Około połowy tego, co dociera do górnej granicy atmosfery, pochłania powierzchnia Ziemi, po czym sama emituje promieniowanie w podczerwonej części widma. Jest ono prawie w całości pochłaniane przez atmosferę, ogrzewając ją. Atmosfera również emituje promieniowanie podczerwone, którego duża część wraca do powierzchni Ziemi, dodatkowo ją ogrzewając. Ten dodatkowy zastrzyk energii powoduje efekt cieplarniany

Słońce oddziałuje na klimat Ziemi wysyłając promieniowanie. Ilość promieniowania, które dociera do górnej granicy atmosfery nosi nazwę stałej słonecznej. Wynosi ona średnio 1365 Wm^{-2} i zmienia się w cyklu rocznym, wraz ze zmianami odległości Ziemi od Słońca w granicach około 1 Wm^{-2} oraz mniej regularnie, wraz ze zmianami aktywności geomagnetycznej Słońca. W ciągu ostatnich 300 lat zmiany te mieściły się w granicach 3 Wm^{-2} . Od końca lat siedemdziesiątych dostępne są satelitarne pomiary stałej słonecznej. Wynika z nich niewielki, lecz jednak ujemny trend stałej słonecznej. Dlatego Słońce nie jest główną przyczyną ostatniego ocieplenia. Jego udział w ociepleniu od początku XX w. jest mniejszy niż 11%, a po 1979 roku zmiany aktywności Słońca wpływają na spadek temperatury (zmniejszając efekt ocieplenia antropogenicznego).

Niewiarygodne modele?

Modele nie są wiarygodne. Wykorzystując parametryzację, modele statystyczne, których parametry są dopasowane

do współczesnego klimatu, dzięki czemu dość dobrze opisują dane obserwacyjne. Ale nie ma powodu wierzyć, że te same parametry będą odpowiednie również w przyszłości, gdy zmienią się procesy chemiczne w atmosferze na skutek wzrostu zawartości dwutlenku węgla, innych gazów cieplarnianych i aerozoli.

Fakty

Modele klimatu są dalekie od doskonałości. Jednak pozwalają na przeprowadzanie różnych eksperymentów. Jeden z nich polegał na porównaniu obserwowanych zmian temperatury Ziemi od połowy XIX wieku do czasów obecnych z symulacjami. Wykonano trzy grupy symulacji. W pierwszej uwzględniono jedynie czynniki naturalne: aktywność Słońca i zjawiska wulkanicznych. W drugiej tylko czynniki antropogeniczne: zawartość gazów cieplarnianych. W trzeciej grupie uwzględniono obie grupy czynników. Okazało się, że dopiero wtedy zmiany symulowane przez modele były zgodne z obserwowanymi. Gdy nie brano pod uwagę zmiany zawartości gazów cieplarnianych, modele nie były zdolne do odtworzenia wzrostu temperatury od końca lat siedemdziesiątych XX wieku.

Prawdą jest natomiast, iż nie ma gwarancji, że parametryzacje dobrze działające w warunkach dzisiejszego i przeszłego klimatu, sprawdzą się w przyszłości. Ten fakt zwiększa niepewność prognoz, ale raczej nie zaprzecza samym zmianom. Gdyby klimat się nie zmieniał, parametryzacje działałyby nie gorzej niż obecnie.

Klimat się ochładza

Mamy ochłodzenie. Najcieplejszy był rok 1998, potem już temperatura nie wzrastała, chociaż emisja dwutlenku węgla do atmosfery trwa nadal.

Fakty

Ziemia nadal akumuluje energię i temperatura globalna stopniowo wzrasta. Jednakże temperatura powierzchni zmienia się intensywnie z roku na rok na skutek wewnętrznej zmienności związanej z wymianą ciepła między atmosferą a oceanem. W 1998 roku wystąpiło bardzo silne zjawisko El Niño. To spowodowało ogromny przepływ ciepła z Pacyfiku do atmosfery. W kolejnych kilku latach panowały warunki normalne lub La Niña, co oznacza

wpływ na powierzchnię chłodnych wód głębinowych na znacznych obszarach równikowego Pacyfiku. Jednak w latach 2005 i 2010 znów panowały warunki El Niño i temperatura globalna była zbliżona do tej z 1998 roku (rys. 3). Zmiany temperatury z roku na rok wynikające ze zmian temperatury równikowego Pacyfiku są znacznie wyższe niż te związane z ociepleniem. Dlatego niezwykle silne El Niño, takie jak w roku 1998, może przynieść rekordowe temperatury niemożliwe do pobicia przez kilkanaście następnych lat.

Problem Antarktydy

Mimo globalnego ocieplenia ilość lodu na Antarktydzie wzrasta.

Fakty

Sytuacja lodowa wokół Antarktydy jest dość skomplikowana. Po pierwsze, trzeba rozróżnić między lodem kontynentalnym na Antarktydzie i lodem morskim wokół niej. Od 2002 roku prowadzone są pomiary satelitarne zmian pokrywy lodowej na Antarktydzie. Wynika z nich, że ilość lodu we wnętrzu Wschodniej Antarktydy jest sta-

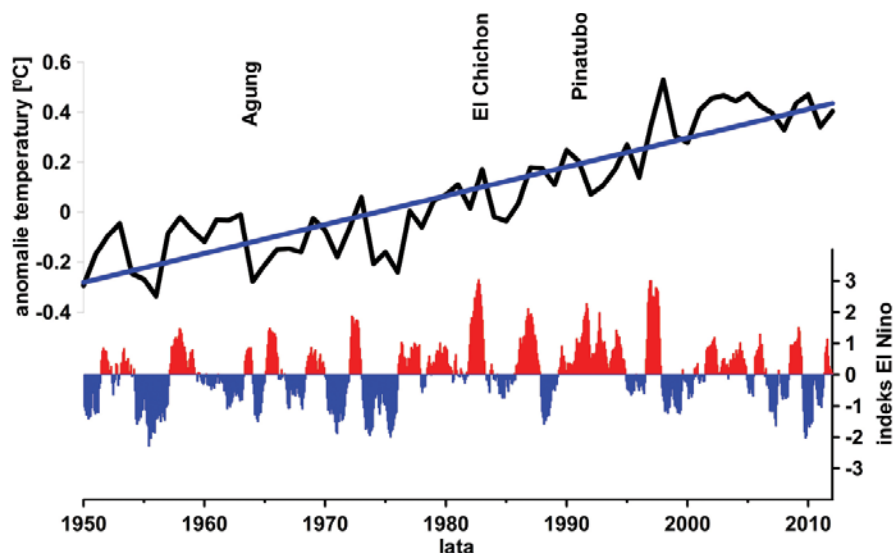
bilna, a w Zachodniej maleje w rosnącym tempie. Natomiast zwiększa się ilość lodu morskiego wokół Antarktydy, mimo ocieplenia wód w tym rejonie. Globalnie temperatura wód oceanicznych wzrasta o $0,1^{\circ}\text{C}$, a wokół Antarktydy o $0,17^{\circ}\text{C}$. Do wzrostu pokrywy lodowej przyczyniła się dziura ozonowa nad Antarktydą. Spowodowała ochłodzenie stratosfery w tym rejonie i zmianę cyrkulacji atmosferycznej. Nasiliły się wiatry, które spychają lód ku niższym szerokościom geograficznym. W pustych miejscach tworzy się nowa kora lodowa.

Antropogeniczny dwutlenek węgla ma znaczenie?

Ilość dwutlenku węgla, która dostaje się do atmosfery ze źródeł antropogenicznych stanowi niewielki ułamek tego co dociera w procesach naturalnych, dlatego nie może mieć wpływu na klimat.

Fakty

To prawda, że udział źródeł antropogenicznych jest niewielki. Rocznie biosfera lądowa wysyła do atmosfery 444 miliardy ton węgla, a kolejne 332 miliardy ton emituje ocean. Na tym tle 23 miliardy ton docierające rocznie do atmosfery na skutek spalania paliw kopalnych, wydają się pomijalne. Nie wspomina się tylko o tym, że natura również pochłania węgiel. Rośliny przetwarzają zawarty w atmosferze dwutlenek węgla na cukry proste w procesie fotosyntezy, a i ocean pochłania ogromne ilości tego gazu. Bez emisji antropogenicznych procesy absorpcji i emisji były prawie idealnie zbilansowane. Nieznaczne ilości węgla odkładały się na dnie oceanów zwiększając stopniowo zapasy paliw kopalnych. Teraz człowiek zaburzył tę równowagę i wysyła w ciągu roku do atmosfery tyle węgla ile odkładało się w czasie setek tysięcy lat. Zwiększona ilość dwutlenku węgla w atmosferze przyspieszyła nieco proces fotosyntezy, zwiększyła się również ilość węgla pochłanianego corocznie przez ocean, ale i tak około połowy antropogenicznej emisji pozostaje w atmosferze i powoduje stopniowy wzrost zawartości dwutlenku węgla w atmosferze. Obecne tempo



Rys. 3. Górny wykres przedstawia różnicę między średnią roczną temperaturą Ziemi w kolejnych latach w stosunku do średniej z lat 1961–1990 (czarna linia) i trend zmian temperatury (linia niebieska). Dolny wykres prezentuje indeks El Niño. W latach El Niño, indeks jest dodatni i temperatura powierzchni Pacyfiku wyższa od średniej (czerwony obszar). Wtedy średnia temperatura globalna jest wyższa od tej wynikającej z trendu zmian temperatury. W latach La Niña, indeks jest ujemny i temperatura powierzchni Pacyfiku niższa od średniej (niebieski obszar). Wtedy średnia temperatura globalna jest niższa od tej wynikającej z trendu zmian temperatury. Ten cykl zaburzają duże wybuchy wulkanów, po których temperatura wyraźnie spada na okres 2–3 lat (strzałki)

wzrostu zawartości dwutlenku węgla w atmosferze wynosi około 1,7 ppm (*particle per milion* – 1 ppm oznacza, że na każdy milion cząstek gazów tworzących atmosferę jedna jest cząstką dwutlenku węgla) rocznie.

Ocieplenie klimatu tylko w miastach?

Globalne ocieplenie jest fikcją. Pomiary temperatury są niewiarygodne. Duża część punktów pomiaru temperatury położona jest w obszarach miejskich. Obserwowane ocieplenie jest jedynie efektem zwiększonej temperatury w miastach.

Fakty

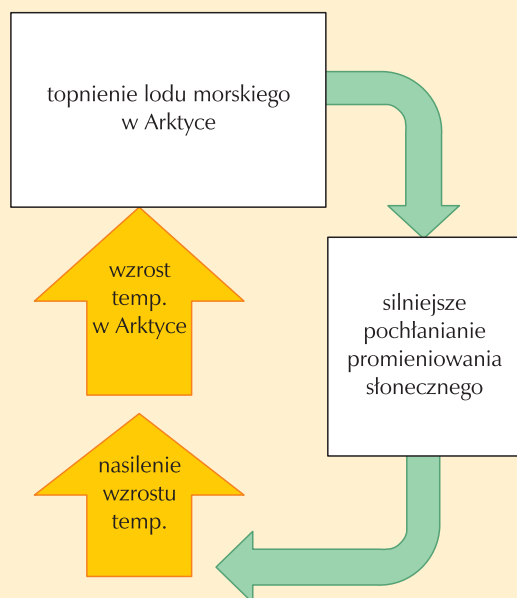
Temperatura powietrza mierzona jest nie tylko przez termometry. Od ponad 30 lat prowadzone są pomiary satelitarne, na które w żaden sposób nie wpływa rozwój miast. Pomiary te wskazują na rosnącą temperaturę powietrza w troposferze i spadek temperatury w stratosferze. Zmiany dat obserwowanych pojavów fenologicznych również wskazują na ocieplenie. Żyjące w naturze rośliny rozpoczynają wcześniej swój cykl wegetacyjny i później przechodzą w stan zimowego uśpienia. Na ocieplenie wskazuje również cykl życiowy dziko żyjących zwierząt. Ptaki wcześniej przylatują do swoich letnich siedlisk i później opuszczają je jesienią.

Przeciwnicy teorii globalnego ocieplenia proponują różne teorie, które wyjaśniają jedno bądź kilka zjawisk obserwowanych w związku z ociepleniem. Najbardziej popularne wiążą współczesne zmiany klimatu z cyklicznością aktywności Słońca lub wieloletnimi zmianami temperatury oceanów: AMO i PDO (*Atlantic Multidecadal Oscillation* i *Pacific Decadal Oscillation*, Wieloletnią Oscylacją Atlantyku i Dekadową Oscylacją Pacyfiku). Jednak, jak na razie, żadna z nich nie opisuje kompleksowo zdarzeń wynikających ze wzrostu temperatury globalnej.

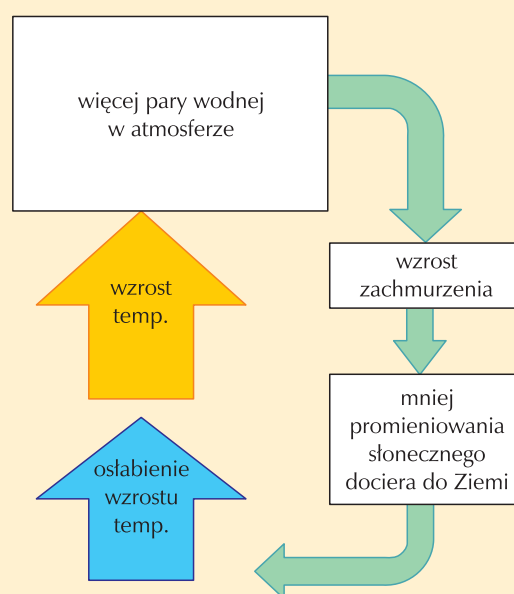
Sprzężenia zwrotne

Jeżeli sygnał po wejściu do jakiegoś systemu ulega takiemu przetworzeniu, że zmienia pierwotny sygnał na wejściu, mówimy o sprzężeniu zwrotnym. W wyniku sprzężenia zwrotnego sygnał wejściowy może się nasilić, wtedy nazywamy je **dodatnim sprzężeniem zwrotnym**, lub osłabić, wtedy nazywamy je **ujemnym sprzężeniem zwrotnym**.

Dodatnie sprzężenia zwrotne wzmacniają działanie sygnałów i prowadzą do zmian w systemie. Na przykład wzrost temperatury w Arktyce powoduje zmniejszenie pokrywy lodowej. W następstwie spada albedo powierzchni morza i mniej energii słonecznej odbija się, a więcej ulega pochłonięciu i jeszcze bardziej wzrasta temperatura Arktyki. Sygnał wejściowy – wzrost temperatury – uruchamia ciąg procesów powodujących jeszcze większy wzrost temperatury. Mamy tu klasyczny przykład nasilenia sygnału wejściowego (rys. 4). Wynikiem jest przyspieszenie ocieplenia. Ujemne sprzężenia zwrotne prowadzą do osłabienia sygnału i stabilizacji systemu. Na przykład wzrost temperatury powoduje zwiększoną zawartość pary wodnej w atmosferze i wzrost zachmurzenia. Zachmurzenie odbija część promieniowania słonecznego padającego w kierunku Ziemi i powoduje spadek temperatury. Sygnał wejściowy wzrost temperatury, powoduje uruchomienie ciągu procesów, na skutek których temperatura spada (rys. 5), czyli sygnał wejściowy ulega osłabieniu. Wynikiem jest powrót do stanu początkowego.



Rys. 4. Wzrost temperatury w Arktyce powoduje zmniejszenie pokrywy lodowej. W następstwie spada albedo powierzchni morza i mniej energii słonecznej odbija się, a więcej ulega pochłonięciu i jeszcze bardziej wzrasta temperatura w Arktyce. Dodatnie sprzężenia zwrotne wzmacniają działanie sygnałów i prowadzą do zmian w systemie



Rys. 5. Wzrost temperatury powoduje zwiększoną zawartość pary wodnej w atmosferze i wzrost zachmurzenia. Zachmurzenie odbija część promieniowania słonecznego padającego w kierunku Ziemi i powoduje spadek temperatury. Ujemne sprzężenia zwrotne prowadzą do osłabienia sygnału i stabilizacji systemu