



Jacob Aall Bonnevie Bjerknes

(1897-1975)



Jacob Aall Bonnevie Bjerknes (lub jak go później w USA często nazywano Jack Bjerknes) urodził się w Sztokholmie 2 listopada 1897 r. Nazwisko pochodzi od rodzinnej farmy w południowo-wschodniej Norwegii. Jacob Bjerknes reprezentował trzecie pokolenie w dynastii norweskich naukowców. Jego dziadek – Carl Anton Bjerknes (1825-1903) – był profesorem matematyki w Royal Frederick University, później University of Christiania (Christiania – tak w latach 1624-1878 nazywano stolicę Norwegii Oslo). Wykazał on, teoretycznie i eksperymentalnie, że idealny płyn przenosi siły typu Coulomba między pulsującymi sferami i sądził, że jest na tropie hydrodynamicznej teorii elektromagnetyzmu eteru. Ojciec – Vilhelm Bjerknes (1862-1951) – rozpoczął karierę jako fizyk współpracując z Heinrichem Hertzem (1857-1894) w Bonn nad rezonansem elektromagnetycznym. W roku 1893 Vilhelm Bjerknes poślubił Honorię Sphię Bonnevie (1864-1928), norweską studentkę nauk ścisłych i przyrodniczych w Christianii. Osiedlili się w Sztokholmie, gdzie Vilhelm Bjerknes został profesorem mechaniki i fizyki matematycznej w Stockholm Högskola (później University of Stockholm). Jacob Bjerknes został nazwany Jacob Aall Bonnevie na cześć ojca swojej matki, Jacoba Aalla Bonnevie (1838-1904), wybitnego urzędnika państwowego i ministra edukacji w Norwegii. Jego ciotka – Kristine Bonnevie (1872-1948) – zoolog i embriolog, została pierwszą kobietą profesorem w Norwegii. Młody Jacob dorastał w ten sposób w rodzinie akademickiej.

Jacob Aall Bonnevie Bjerknes (Jack Bjerknes) był jednym z twórców nowoczesnej meteorologii. Na scenę naukową wszedł w wieku dwudziestu lat wraz z odkryciem struktury cyklonów pozazwrotnikowych, które nabrały największego znaczenia i stały się punktem wyjścia do owocnego rozwoju meteorologii teoretycznej oraz praktycznego prognozowania pogody. To ojciec Jacoba, słynny fizyk i geofizyk Vilhelm Bjerknes, przygotował grunt pod badania prowadzące do tego odkrycia, ale Jacob Bjerknes był głównym twórcą współczesnej koncepcji dynamiki i struktury cyklonów umiarkowanych i wysokich szerokości geograficznych.

RODZINNE TŁO

W 1897 roku, kiedy urodził się Jacob, jego ojciec, Vilhelm Bjerknes, sformułował twierdzenie o cyrkulacji, które nosi jego imię. Uogólnia ono twierdzenie Helmholtza i Kelvina o zachowaniu wirów w płynach idealnych na twierdzenie o tworzeniu wirów w płynach niejednorodnych. Dzięki temu twierdzeniu Vilhelm Bjerknes zdał sobie sprawę, że jest teraz w posiadaniu pełnego zestawu równań hydrodynamicznych/termodynamicznych, które rządzą ruchem niejednorodnych płynów. Zachęcony przez swoich szwedzkich kolegów, w tym słynnego chemika Svante Arrheniusa (1859-1927) i oceanografa Otto Pettersona (1848-1941), postanowił zastosować tę teorię do ruchów w atmosferze i oceanie. Wysunął pogląd, że prognozowanie pogody powinno być traktowane jako problem fizyki matematycznej i realizowany, przy uwzględnieniu warunków początkowych, przez numeryczne lub graficzne całkowanie równań opisujących przebieg procesów. To nic innego jak traktowanie atmosfery jako systemu fizycznego; ale w tamtym czasie był to pogląd rewolucyjny.

W 1905 roku Vilhelm Bjerknes odwiedził Stany Zjednoczone. Z inicjatywy znanego amerykańskiego meteorologa Clevelanda Abbe (1838-1916, edytora *Monthly Weather Review* i głównego meteorologa U.S. Weather Bureau) wygłosił wykład w Waszyngtonie, w którym opisał swoją wizję naukowego przewidywania pogody. Wykład został

entuzjastycznie przyjęty i zaowocował corocznym stypendium Carnegie Institution of Washington, które Vilhelm Bjerknes zachował do II wojny światowej. Pieniądze te pozwoliły zatrudnić i wykształcić znaczną liczbę asystentów badawczych, z których wszyscy stali się znanymi geofizykami i meteorologami.

W 1907 roku, kiedy Jacob miał dziewięć lat, Vilhelm Bjerknes został powołany na katedrę w Royal Frederick University i rodzina przeniósła się do Christianii (Oslo). We współpracy ze swoimi asystentami Carnegie: szwedem Johanem Sandströmem oraz norwegami Olafem Devikiem i Theodorem Hesselbergiem, opublikował pokazną pracę „Dynamic Meteorology and Hydrography” (1910) wydaną przez Carnegie Institution of Washington. Pod wrażeniem tego dzieła uczeni niemieccy zaproponowali Vilhelmowi Bjerknesowi stanowisko dyrektora nowo powstałego na Uniwersytecie w Lipsku Instytutu Geofizyki. Vilhelm Bjerknes zgodził się i w 1913 roku wraz z rodziną przeniósł się do Lipska. Jacob pozostał jednak w Christianii, aby ukończyć gimnazjum i rozpocząć studia naukowe na norweskim uniwersytecie.

W LIPSKU PODCZAS I WOJNY ŚWIATOWEJ

Instytut Geofizyki w Lipsku rozpoczął działalność pomyślnie. Vilhelm Bjerknes przyjechał do Lipska wraz z dwoma swoimi asystentami z Carnegie: Theodorem Hesselbergiem (późniejszym dyrektorem Norweskiego Instytutu Meteorologicznego) i Haraldem Ulrikiem Sverdrupem (późniejszym dyrektorem Scripps Oceanographic Institution). Ponadto w Instytucie zatrudnionych zostało kilku niemieckich doktorantów i asystentów naukowych, wśród nich Robert Wenger, który po Bjerknesie został następnym dyrektorem Instytutu. Gdy wybuchła I wojna światowa wielu niemieckich studentów i pracowników wezwano do służby wojskowej. Sverdrup i Hesselberg wyjechali, a Vilhelm Bjerknes bardzo potrzebował pomocy w swoich badaniach.

W 1916 roku Jacob Bjerknes – niespełna dziesięcioletek – przerwał studia w Norwegii i wyjechał do Lipska, aby dołączyć do rodziny i pomóc ojcu. Wraz z nim pojechał też inny norweski student, Halvor Solberg (1895-1974). W Lipsku niemiecki doktorant Herbert Petzold badał kinematykę i dynamikę linii szkwałów. Petzold został wysłany na front i zginął pod Verdun w 1916 roku. Jego badania przejął Jacob Bjerknes i odkrył, że linie zbieżności w polu wiatru mogą mieć tysiące kilometrów długości, mają tendencję do dryfowania na wschód i są powiązane z występowaniem stref zachmurzenia i opadów. Opisał te wyniki w swojej pierwszej pracy naukowej (*Über die Fortbewegung der Konvergenz-und Divergenzlinien* –1917), która ukazała się drukiem w *Meteorologische Zeitschrift* przed ukończeniem przez Jacoba dwudziestu lat.

W miarę trwania wojny sytuacja Instytutu Geofizyki w Lipsku pogarszała się z powodu braku siły roboczej i skrajnych niedoborów żywności. Dzięki interwencji norweskich oceanografów: badacza polarnego Fridtjofa Nansena (1861-1930) i profesora w Muzeum Bergen Bjørna Helland-Hansena (1877-1957) dla Vilhelma Bjerknesa utworzono profesurę w Bergen w zachodniej Norwegii.

SZKOŁA W BERGEN

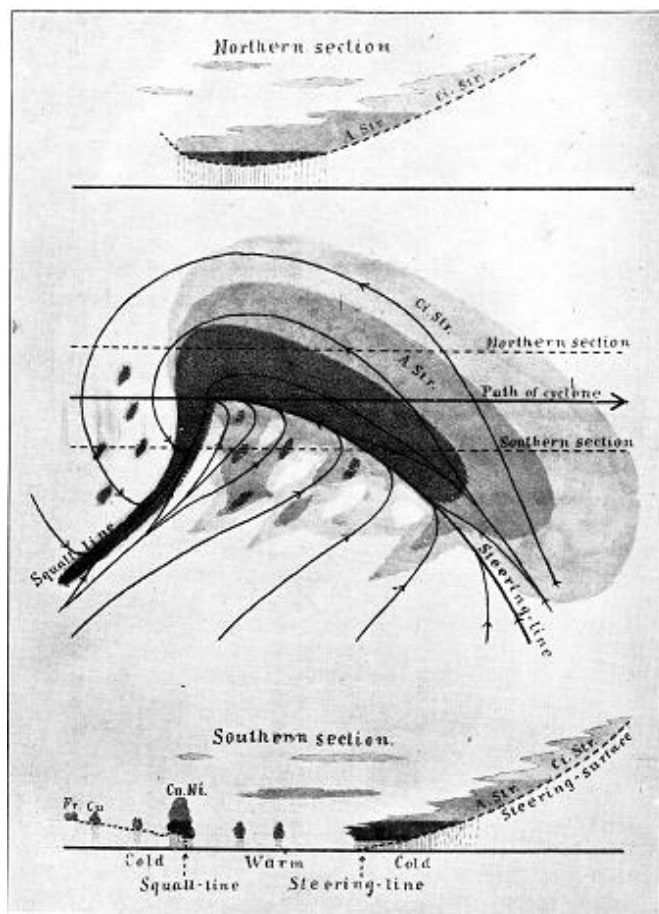
W Bergen nie było wówczas uniwersytetu; istniały jednak plany utworzenia wydziału naukowego (z czasem uniwersytetu), a załączkiem takiej instytucji było Muzeum w Bergen. Bjørn Helland-Hansen, który zajmował tam stanowisko profesora oceanografii przez wiele lat prowadził międzynarodowe kursy z badań oceanograficznych. Utworzenie w 1917 roku Instytutu Geofizyki przy Muzeum Bergen z profesurą Vilhelma Bjerknesa było ważnym krokiem w kierunku wzmocnienia środowiska akademickiego w Bergen. Vilhelm Bjerknes opuścił wojenne Niemcy i przybył do Bergen latem 1917 roku z dwoma młodymi asystentami – Jacobem Bjerknesem i Halvorem Solbergiem. Zdał sobie sprawę, że nie będzie miał w Bergen środków na teoretyczne badania w zakresie problematyki prognozowania pogody i zamiast tego zaplanował skierowanie badań w stronę praktycznego prognozowania pogody, oferując specjalną usługę prognozowania letnich warunków pogodowych dla rolnictwa. W tym celu, przy wsparciu rządu norweskiego, zorganizował sieć licznych stacji obserwacyjnych w południowej Norwegii.

Dzięki tym przygotowaniom prognozy pogody rozpoczęto wydawać latem 1918 roku. Vilhelm Bjerknes sam nie brał udziału w pracach nad mapami pogodowymi, ale zorganizował dla Jacoba i Halvora Solberga stanowiska pracy prognostów w Bergen i w Christianii (Oslo). Ponieważ wojna wciąż trwała, to niemożliwe było otrzymywanie żadnych danych pogodowych z Francji, Anglii czy Atlantyku. Jednak na podstawie ulepszonej sieci obserwacyjnej dostarczającej dane z Norwegii Jacob Bjerknes mógł ponownie zidentyfikować linie zbieżności tego samego typu, które badał w Lipsku, gdy przemieszczały się wzdłuż norweskiego wybrzeża. Co więcej, odkrył, że te linie zbieżności, które później nazwano frontami, są w charakterystyczny sposób połączone z cyklonami. W artykule *On the Structure of Moving Cyclones* (O strukturze ruchomych cyklonów) opublikowanym w *Geofysiske Publikationer* jesienią 1918 roku (przedruk w *Monthly Weather Review* w lutym 1919 roku), zanim skończył 21 lat, przedstawił swój słynny model cyklonu z układem frontów (fig. 5 w omawianym artykule – patrz rycina poniżej). Przyjęto w nim, że fronty reprezentują powierzchnie graniczne oddzielające zimne powietrze znajdujące się na północ i zachód od centrum cyklonu,

od ciepłego powietrza w ciepłym sektorze na południu i południowym wschodzie. Jacob Bjerknes wykazał, że te frontalne powierzchnie graniczne są nachylone, a zimne powietrze znajduje się od spodu, zgodnie z równaniem (opisującym front między dwiema masami powietrza w różnych temperaturach), opracowanym w 1903 roku przez austriackiego meteorologa Maxa Margulesa (z Instytutu Meteorologii i Geofizyki w Wiedniu). Co więcej, Jacob Bjerknes stwierdził w swoim artykule, że ciepłe powietrze wznosi się wzdłuż pochyłych powierzchni frontalnych, powodując powstawanie pasm chmur i opadów atmosferycznych wzdłuż frontów, podczas gdy zimne powietrze opada i rozprzestrzenia się przy ziemi. Zauważył też, że te pionowe ruchy reprezentują redukcję energii potencjalnej, która może odpowiadać za powstawanie energii kinetycznej cyklonu, zgodnie z teorią Margulesa opublikowaną w pracy „Über die Energie der Strome” piętnaście lat wcześniej. Jacob Bjerknes wspominał również w swoim artykule o koncepcji serii cyklonów podążającej tą samą ścieżką, przy czym zimny front po jednym cyklonie służy jako ciepły front nowego cyklonu położonego dalej na zachód. Omówił nawet rolę cyklonów w ogólnej cyrkulacji atmosfery i prawidłowo przypisał im rolę łącznika w wymianie powietrza między regionami polarnymi i strefą równikową.

Model cyklonu Jacoba Bjerknesa:
linie prądu, chmury i opady
oraz przekroje pionowe
na północ i południe od centrum

(fig. 5 w pracy *On the Structure of Moving Cyclones*,
Geofysiske Publikationer, 1919)



Ten krótki, ośmiostronicowy artykuł Jacoba Bjerknesa zawierał dużo bardzo interesujących przemyśleń i sugestii. To było fantastyczne osiągnięcie dla dwudziestolatka po kilku miesiącach pracy z mapami pogodowymi z ograniczonej części Europy. W kolejnych latach model cyklonu z układem frontów był przedmiotem intensywnych badań zespołu składającego się z Jacoba Bjerknesa, Halvora Solberga i Tora Bergerona (1891-1977) – szwedzkiego studenta, który dołączył do zespołu Bergen w 1919 roku. Solberg ponownie przeanalizował stare mapy pogodowe z Atlantyku z wieloma obserwacjami ze statków. Odkrył dowody na to, że front polarny istnieje w postaci falistej linii przez większość oceanu, z nowymi cyklonami tworzącymi się jako rosnące fale na froncie. Tor Bergeron odkrył też, że na późniejszym etapie rozwoju cyklonu front chłodny wyprzedzi front ciepły, podnosząc ciepłe powietrze sektora ciepłego na wyższy poziom, podczas gdy zimne powietrze rozchodzi się przy ziemi. Ten proces nazwał okluzją.

Cykl „życia” cyklonu i koncepcja serii cyklonów podążających tą samą ścieżką zostały rozwinięte we wspólnej pracy Jacoba Bjerknesa i Halvora Solberga *Life cycle of cyclones and the polar front theory of atmospheric circulation* opublikowanej w 1922 roku. W pracy tej wykazano i wyjaśniono, że w szerokościach umiarkowanych niżej powstają wtedy, gdy na powierzchni stacjonarnego frontu, oddzielającego ciepłe i chłodne masy powietrza, pojawiają się ruchy falowe, i że w cyklu „życiowym” cyklonu można wyróżnić charakterystyczne stadia rozwojowe: początkowe, fali, młodego cyklonu i okluzji – wypełniania się niżej (fig. 2 w omawianym artykule – patrz rycina poniżej).

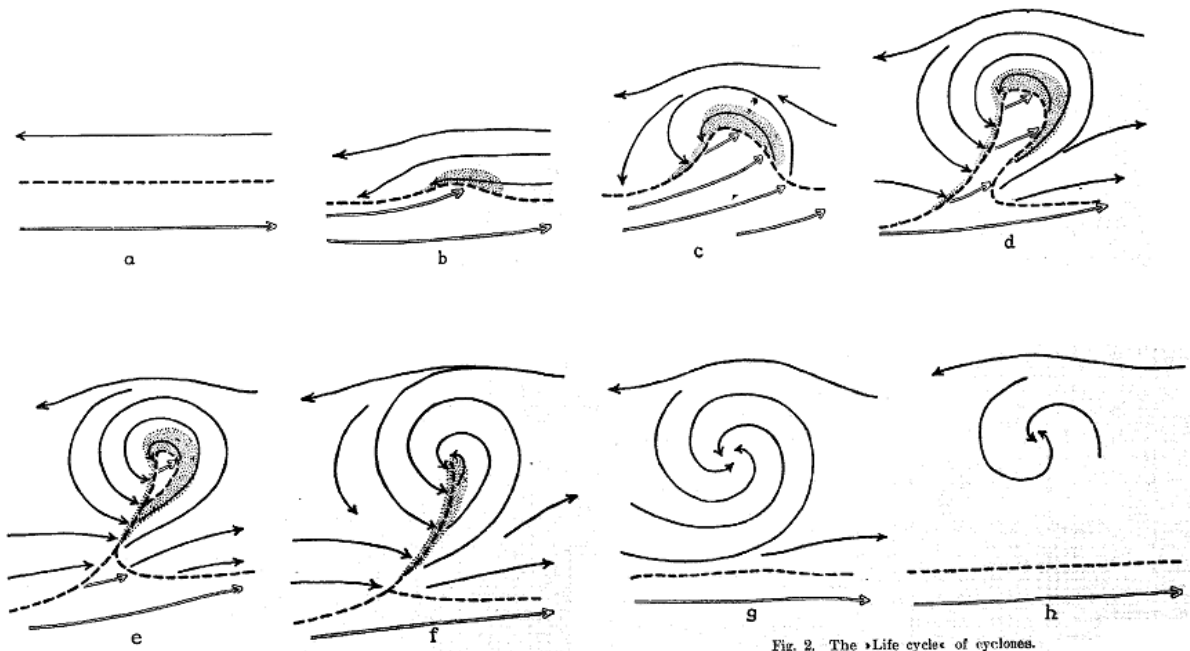


Fig. 2. The «Life cycles» of cyclones.

Fazy rozwoju cyklonu w umiarkowanych szerokościach geograficznych Jacoba Bjerknesa i Halvora Solberga (fig. 2 w pracy: *Life cycle of cyclones and the polar front theory of atmospheric circulation*, 1922)

Zespół z Bergen mógł teraz sformułować czterowymiarowy model cyklonu o typowej strukturze i typowym cyklu rozwoju. Jak ujął to Theodor Hesselberg (1885-1966): „[Cyklon] rodzi się jako początkowa fala Solberga na froncie polarnym, rozwija się w idealny cyklon Jacoba Bjerknesa i w końcu ulega bergerońskiej śmierci okluzyjnej”. Warto jednak zauważyć, że wiele cech cyklu życia cyklonów zostało już zawartych w oryginalnej pracy Jacoba Bjerknesa, którą napisał jesienią 1918 roku (*On the structure of moving cyclones*). W 1920 roku Jacob Bjerknes został szefem Biura Prognoz Pogody dla zachodniej Norwegii. W biurze analizy i prognozowanie z mapy pogodowej oparto na modelu cyklonu z frontami. Pozycje frontów dostarczały informacji o wiatrach, temperaturze, chmurach i opadach; ponadto kształt układu frontów w cyklonie wskazywał na jego etap rozwoju, a tym samym mógł dostarczyć informacji o jego przyszłym zachowaniu. Model cyklonu z układem frontów okazał się więc być niezwykle przydatnym narzędziem w prognozowaniu pogody.

Dotychczas model cyklonu opierał się głównie na obserwacjach z ziemi, a jego pionowa struktura została w większości wywnioskowana z teorii. W 1922 r. Jacob Bjerknes wyjechał do Zurychu w Szwajcarii jako zaproszony konsultant Szwajcarskiego Instytutu Meteorologicznego. Za pomocą danych z obserwatoriów na szczytach górskich w Alpach mógł zweryfikować istnienie nachylonych powierzchni frontalnych do wysokości 3000 metrów. Za pracę, którą napisał o tych badaniach (*Diagnostic and prognostic application of mountain observations*), otrzymał stopień doktora filozofii na Uniwersytecie w Oslo w 1924 roku. W 1928 Jacob Bjerknes poślubił Hedvig Borthen (1904-1998), córkę znanego okulisty z Bergen. Po kilku latach Jack i Hedvig osiedlili się w domu w Hop, na południe od Bergen.

FALA GÓRNA

W latach 20. XX wieku dalsze badania przepływu powietrza na wyższych wysokościach utrudniał brak obserwacji z tych poziomów. Jednak kiedy w ciągu trzech kolejnych dni w grudniu 1928 r. dwa cyklony przeszły nad Europą, to Jules Jaumotte (1887-1940), dyrektor Królewskiego Belgijskiego Instytutu Meteorologicznego, wypuścił w Uccle w Belgii trzydzieści jeden balonów wyposażonych w instrumenty samopiszzące, z których 25 odzyskano. Zapisy zebrane przez aparaturę na balonach zostały przeanalizowane przez Jacoba Bjerknesa, a wyniki zostały podane w artykule (*Exploration de quelques perturbations atmosphériques à l'aide de sondages rapprochés dans le temps* – 1932, manuskrypt złożony w listopadzie 1930 r.), który był jednym z jego największych osiągnięć tego etapu rozwoju naukowego. Ten liczący 52 strony artykuł zawiera prawdopodobnie pierwszy opis fal zachodnich w górnej troposferze, które są związane z cyklonami na niskich poziomach. Stwierdzono w nim, że zatoka falowa znajduje się powyżej zimnego frontu przy ziemi, a wirowość związana z tą zatoką została prawidłowo przypisana pionowemu rozciąganiu, gdy ciepłe powietrze schodzi w dół po pochyłej zimnej powierzchni frontalnej. Była to pierwsza próba opisanie dynamicznego działania górnej fali. W 1931 roku Jacob Bjerknes przejął kierownictwo Biura Prognoz Pogody w Bergen od Sverre'a Petterssena (1898-1974) i objął stanowisko profesora meteorologii w Instytucie Geofizycznym, które zostało dla niego ustanowione w Muzeum w Bergen (dziś Uniwersytet w Bergen).

Ponieważ dane z radiosond w latach 30. XX wieku stały się wystarczająco liczne, aby umożliwić systematyczną diagnozę ruchów w górnej troposferze, Jacob Bjerknes szybko wykorzystał te nowe możliwości. W wielu artykułach, częściowo we współpracy z fińskim geofizykiem Erikiem Palménem (1898-1985), skonstruował przekroje przez fronty i tropopauzę oraz pokazał, jak zimna powierzchnia frontalna jednego cyklonu zamienia się w ciepły front następnego. W pracy z 1937 r. (*Investigations of selected European cyclones by means of serial ascents*) wskazali na gradient południkowy siły Coriolisa jako ważną wielkość w dynamice fal górnych. Ta praca zainspirowała Carla-Gustafa Rossby'ego (1898-1957) do opracowania jego słynnej pracy na temat fal długich („Relations between variations in the intensity of the zonal circulation of the atmosphere and the displacements of the semipermanent centers of action” – 1939). Bliskim współpracownikiem Jacoba Bjerknesa w latach 30. XX wieku był też Carl Ludvig Godske, asystent Vilhelma Bjerknesa w Carnegie, który później zastąpił Jacoba na stanowisku w Bergen. Godske i Jacob Bjerknes napisali razem interesującą pracę na temat niestabilności frontów (*On the theory of cyclone formation at extratropical fronts* – 1936). Godske napisał również większą część obszernego tomu zatytułowanego *Dynamic Meteorology and Weather Forecasting*, którego współautorami byli C.L. Godske, T. Bergeron, Jacob Bjerknes i R.C. Bundgaard. Książka została zaplanowana przez Vilhelma Bjerknesa jeszcze w latach 30. XX wieku, ale została opóźniona przez II wojnę światową i ukazała się drukiem dopiero w 1959 roku. Praca Jacoba Bjerknesa w Bergen wzbudziła duże zainteresowanie wielu jego kolegów meteorologów i geofizyków. Przyjmował gości z wielu krajów i sam wyjeżdżał do Szwajcarii, Anglii, Holandii, Niemiec, Kanady i Stanów Zjednoczonych jako zaproszony gościnny wykładowca.

LATA II WOJNY ŚWIATOWEJ

W lipcu 1939 roku Jacob Bjerknes wraz z rodziną udał się w ośmiomiesięczną podróż z wykładami do Stanów Zjednoczonych. Ale 1 września tego roku rozpoczęła się II wojna światowa, a później nastąpiła niemiecka inwazja na Norwegię (9 kwietnia – 10 czerwca 1940). Dla Jacoba Bjerknesa i jego rodziny miało to taki skutek, że pozostali w Ameryce i następnie zostali obywatelami USA. Groźna sytuacja międzynarodowa sprawiła, że Stany Zjednoczone musiały wykształcić znaczną liczbę meteorologów do operacji wojskowych. Jacob Bjerknes został poproszony o zorganizowanie kursów szkoleniowych dla oficerów meteorologicznych Sił Powietrznych USA na Uniwersytecie Kalifornijskim. Jego żona wspomina, że wybrał na to przedsięwzięcie kampus w Los Angeles, aby być w pobliżu Instytutu Oceanograficznego Scrippsa w La Jolla; gdyż uważał, że ważna jest w tym przypadku współpraca z oceanografami. W 1940 roku Jacob Bjerknes rozpoczął pracę na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Kalifornijskiego w Los Angeles jako profesor meteorologii i kierownik Katedry Meteorologii. Wraz z Bjerknesem na Uniwersytet Kalifornijski przyjechał Jørgen Holmboe (1902-1979), norweski meteorolog z Bergen Weather Service, który w latach 1936-1940 pracował jako adiunkt w katedrze Rossby'ego w Massachusetts Institute of Technology. Podczas wojny Jacob Bjerknes odwiedził Anglię, Włochy, Hawaje i Guam jako konsultant Korpusu Powietrznego Armii USA.

NOWY DZIAŁ METEOROLOGII

W 1945 roku na Uniwersytecie Kalifornijskim w Los Angeles rozbudowano Katedrę Meteorologii i utworzono nowy Wydział Meteorologii, którego szefem został Jacob Bjerknes. Nowy wydział szybko się rozwijał i wkrótce stał się jednym z wiodących światowych ośrodków nauczania i badań w naukach o atmosferze. Podczas wojny Jacob Bjerknes, we współpracy z J. Holmboe, próbował teoretycznie potraktować problem rozwijającego się cyklonu z towarzyszącą mu górną falą. Nie można powiedzieć, że rozwiązali problem, ale rzucili na niego nowe światło, a ich praca (*On the theory of cyclones* – 1944) zainspirowała ich pierwszego doktoranta, Jule Charney'a (1917-1981), do opracowania pierwszego matematycznego rozwiązania opisującego fale rozwijające się na prądzie baroklinowym.

Od wielu lat wiadano, że intensywność przenosu zachodniego w umiarkowanych szerokościach geograficznych zwiększa się wraz z wysokością i zwykle osiąga maksimum w pobliżu tropopauzy. Na przykład obliczony rozkład średniego wiatru zachodniego w płaszczyźnie południkowej podany jest w *Physikalische Hydrodynamik: Mit Anwendung Auf Die Dynamische Meteorologie*, opublikowanym przez V. Bjerknesa, J. Bjerknesa, H. Solberga i T. Bergerona w 1933 roku. W czasie wojny działania lotnictwa ujawniły, że górne fale zachodnie – i wyznaczający ich przebieg prąd strumieniowy – są często znacznie silniejsze niż wcześniej zakładano. Jak ten silny prąd okrążający Ziemię, po jednym na każdej półkuli, był utrzymywany przed rozproszeniem tarcia? Angielski matematyk i geofizyk Harold Jeffreys (1891-1989) już w 1933 roku zaproponował odpowiedź na to palące pytanie, sugerując, że moment pędu może być przenoszony z niskich do umiarkowanych szerokości geograficznych za pomocą fal i wirów atmosferycznych. Opierając się na teorii H. Jeffreysa, Jacob Bjerknes rozpoczął duży projekt badawczy dotyczący ogólnej cyrkulacji atmosfery (UCLA General Circulation Project). Jego głównym współpracownikiem był Yale Mintz (1916-1991, dyplomant Jacoba Bjerknesa); ale uczestniczyli w nim również zaproszeni naukowcy z wielu krajów. Mintz zorganizował dużą grupę studentów i programistów-amatorów, którzy zebrane dane z całej półkuli północnej przesyłali za pomocą papierowej taśmy do pierwszego na Wydziale Meteorologii komputera. Działania te pozwoliły

na obliczenie południkowych strumieni momentu pędu i energii oraz wiele innych statystyk. Uzyskane wyniki zweryfikowały tezę H. Jeffreysa i były zgodne z wynikami Victora Starra i jego grupy z MIT, którzy w tym samym czasie prowadzili podobny projekt. Dzięki tym dwóm projektom badawczym znacznie pogłębiła się nasza wiedza ilościowa o ogólnej cyrkulacji atmosferycznej. Realizowany projekt dał podwaliny pod modelowanie numeryczne ogólnej cyrkulacji atmosfery.

INTERAKCJE OCEAN – ATMOSFERA W SKALI GLOBALNEJ

Pod koniec lat 50. XX wieku, Jacob Bjerknes miał około sześćdziesięciu lat i skierował swoją uwagę na nową dziedzinę badań, w którą zaangażował się do końca życia – interakcję atmosfery i oceanu. Inspirację i zachętę do zajęcia się tą nową dziedziną Jacob Bjerknes przypisuje C.G. Rossby'emu, H.U. Sverdrupowi i Bjørnowi Helland-Hansenowi. Wszyscy ci trzej naukowcy zmarli w 1957 roku, kiedy Jacob rozpoczął swoje badania oceanograficzne. Helland-Hansen należał do starszego pokolenia; dokonał pionierskich badań nad Oceanem Atlantyckim we współpracy z Fridtjofem Nansenem, przed i podczas I wojny światowej. Jacob Bjerknes był jego kolegą w Bergen przez dwadzieścia lat i znał pracę jego i Nansena („Temperaturaschwankungen des Nordatlantischen Ozeans” – 1917). Jacob Bjerknes po raz pierwszy zajął się badaniem ocieplenia Północnego Atlantyku na początku wieku i odkrył, że można to wytłumaczyć zwiększonymi naprężeniami tangencjonalnymi (stycznymi) wiatru, które przyspieszyły Prąd Zatokowy. Międzyroczne wahania temperatury powierzchni morza na Północnym Atlantyku były jego następnym przedmiotem studiów. Jacob Bjerknes odkrył, że te zmiany temperatury są związane z siłą wiatrów zachodnich. Lata ze szczególnie silnymi wiatrami zachodnimi na średnich szerokościach geograficznych wykazywałyby typowy wzór anomalii temperatury powierzchni morza, z niezwykle zimną wodą na południe od Islandii i Grenlandii oraz cieplejszą wodą w Prądzie Zatokowym poza Wielkimi Ławicami. W serii artykułów omówił zachodzące procesy fizyczne i przedstawił jakościowe wyjaśnienia zaobserwowanych anomalii temperatury powierzchni morza (m.in. *Related fluctuations of trade winds and northern climates* – 1958, *The recent warming of the North Atlantic* – 1959). Fundamentalnym dziełem Jacoba Bjerknesa na ten temat była wydana w 1964 roku praca *Atlantic Air-Sea Interaction*. Idee zawarte w tej pracy są aktualne do chwili obecnej i szereg z nich oczekuje na dalszą kontynuację.

Badania Jacoba Bjerknesa nad Oceanem Spokojnym są jeszcze bardziej niezwykle. Zaczął od zbadania zjawiska El Niño. Raz na dwa do pięciu lat chłodne, bogate w składniki odżywcze wody u wybrzeży Peru są zastępowane w czasie lata (na półkuli południowej) cieplejszą, pozbawioną składników odżywczych wodą, co ma katastrofalne skutki dla peruwiańskiego rybołówstwa i produkcji nawozu guano z ptaków morskich. Epizody te znane są jako El Niño. Jacob Bjerknes odkrył, że El Niño nie jest zjawiskiem lokalnym, ograniczonym do peruwiańskiego wybrzeża, ale przejawem procesu oscylacyjnego w systemie ocean-atmosfera, który wpływa na atmosferę i ocean na całym tropikalnym Pacyfiku (*El Niño, Study based on analysis of ocean surface temperatures 1935-57 – 1961*). W latach El Niño ogromny obszar wschodniego i środkowego równikowego Pacyfiku może być nawet o 2 K cieplejszy niż normalnie. Dla atmosfery, tak zaburzone pole SST na Pacyfiku, musi być bardzo silnym dodatkowym źródłem ciepła i wilgoci. Bezpośrednim tego efektem jest wzrost opadów lokalnie w rejonie ciepłej powierzchni morza. Ale Jacob Bjerknes szukał również przejawów wzmocnionej cyrkulacji w komórce Hadley'a i znalazł wzmocniony wiatr zachodni na północnym Pacyfiku, z odległym wpływem na pogodę w Ameryce Północnej i prawdopodobnie także w Europie (m.in. *A possible response of the atmospheric Hadley circulation to equatorial anomalies of ocean temperature* – 1966). Te telekoneksje na duże odległości powtórzyły się, gdy pojawiły się nowe epizody El Niño. Jack Bjerknes ustalił również związek między zjawiskiem El Niño a Oscylacją Południową, nieregularną pulsacją ciśnienia atmosferycznego między Pacyfikiem a Oceanem Indyjskim, odkrytą przez Sir Gilberta Walkera w latach 20. XX wieku, wykazując, że stanowią one połączone ze sobą kompleks zjawisk (ENSO; El Niño – Southern Oscillation). Aby uwzględnić różnice w opadach, Jack Bjerknes przewidział pionową cyrkulację powietrza wzdłuż równika w rejonie Pacyfiku, którą nazwał cyrkulacją Walkera (komórką Walkera), ponieważ jej siła zmienia się wraz z południową oscylacją Walkera (SO). W wyniku jego badań mamy teraz spójny obraz tych wielkoskalowych procesów na równikowym Pacyfiku (m.in. *Global ocean-atmosphere interaction* – 1972).

Badania Jacoba Bjerknesa nad interakcjami w systemie ocean – atmosfera są szczególnie ważne, ponieważ procesy te odgrywają istotną rolę, sterując naturalną zmiennością klimatu. Badania te położyły teoretyczny fundament w tej dziedzinie. Te fundamentalne prace Jacoba Bjerknesa, mimo wyjaśnienia genezy ENSO oraz wprowadzenia pojęcia telekoneksji i wyjaśnienia jej mechanizmów, nie zostały przez większość klimatologów zrozumiane, a może, mimo cytowania tych prac, nie zostały przeczytane. Skutkuje to tym, że do tej pory liczni badacze prowadzą, z nienajlepszym skutkiem, badania mające na celu wyjaśnienie, procesów dawno już wyjaśnionych, genezy ENSO czy mechanizmów funkcjonowania telekoneksji.

Jacob Aall Bonnevie Bjerknes zmarł 7 lipca 1975 roku w Los Angeles, Kalifornia, USA.

Wybrane publikacje Jacoba A.B. Bjerknesa:

- 1917 – Über die Fortbewegung der Konvergenz- und Divergenzlinien. Meteorologische Zeitschrift, Heft 34 (2), s. 345-349.
- 1918 – On the structure of moving cyclones. Geofysiske Publikationer, Vol. 1, No. 2, s. 1-8.
- 1919 – On the structure of moving cyclones. Monthly Weather Review, February, 1919, s. 95-99.
- 1921 – Meteorological conditions for the formation of rain. Geofysiske Publikationer, Vol. 2, No. 3, s. 3-60 (wspólnie z Halvorem Solbergiem).
- 1922 – Life cycle of cyclones and the polar front theory of atmospheric circulation. Geofysiske Publikationer, Vol. 3, No. 1, s. 3-18 (wspólnie z Halvorem Solbergiem).
- 1924 – Diagnostic and prognostic application of mountain observations. Geofysiske Publikationer, Vol. 3, No. 6, s. 3-38.
- 1924 – An analysis of a retrograde depression in the Eastern United States of America. Monthly Weather Review, Vol. 52, No. 11, s. 521-527 (wspólnie z M.A. Gibletem).
- 1930 – Practical examples of polar front analysis over the British Isles in 1925-1926. Geophysical Memoirs, No. 50 (10), Air Ministry Publication 307, London: HMSO, s. 1-50.
- 1932 – Exploration de quelques perturbations atmosphériques à l'aide de sondages rapprochés dans le temps. Geofysiske Publikationer, Vol. 9, No. 9, s. 3-54.
- 1933 – Investigations of selected European cyclones by means of serial ascents. Case 1: March 28-30, 1928. Beiträge zur Physik der freien Atmosphäre, Band 21, Heft 1.
- 1933 – Investigations of selected European cyclones by means of serial ascents. Case 2: December 26-28, 1928. Geofysiske Publikationer, Vol. 9, No. 9, s. 3-18.
- 1933 – Physical Hydrodynamics with Applications to Dynamical Meteorology. Berlin, s. 1-790 (wspólnie z Vilhelmem Bjerknesem, Torem Bergeronem, Halvorem Solbergiem).
- 1933 – Physikalische Hydrodynamik: Mit Anwendung auf die Dynamische Meteorologie. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, s. 1-797 (wspólnie z Vilhelmem Bjerknesem, Torem Bergeronem, Halvorem Solbergiem).
- 1934 – Aerologische Analyse einer Zyklone. Ergänzung der Uccle-Serie vom 28. bis 30. März 1928. Beiträge zur Physik der freien Atmosphäre, Heft 21, s. 53-62 (wspólnie z Erikiem Palménem).
- 1934 – Hydrodynamique physiques avec applications à la météorologie dynamique. Vol. 1-3, Les Presses Universitaires de France, Paris, XX + 864 s. (wspólnie z Vilhelmem Bjerknesem, Torem Bergeronem, Halvorem Solbergiem).
- 1935 – Investigations of selected European cyclones by means of serial ascents. Case 3: December 30-31, 1930. Geofysiske Publikationer, Vol. 11, No. 4, s. 3-18.
- 1935 – La circulation atmosphérique dans les latitudes sous-tropicales. Scientia, LVII (225), s. 114-123.
- 1936 – On the theory of cyclone formation at extratropical fronts. Astrophysica Norvegica, Vol. 1, No. 6, s. 198-235 (wspólnie z Carlem Ludvigiem Godske).
- 1936 – The Upper Perturbations. Mémoires présentés à l'Association de Météorologie de l'UGGI (Edinbourg).
- 1937 – Investigations of selected European cyclones by means of serial ascents. Case 4: February 15-17, 1935. Geofysiske Publikationer, Vol. 12, No. 2, s. 1-62 (wspólnie z Erikiem Palménem).
- 1937 – Theorie der Aussertropischen Zyklonenbildung. Meteorologische Zeitschrift, Heft 54, Vol. 12, s. 462-466.
- 1938 – Saturated-adiabatic ascent of air through dry-adiabatically descending environment. Quarterly Journal of Royal Meteorological Society, Vol. 64, s. 325-330.
- 1939 – Aerologische Analyse einer Warmfrontflache. Beiträge zur Physik der Atmosphäre, Vol. 25: s. 115-129 (wspólnie z Erikiem Palménem).

- 1939 – Synoptisch-aerologische Untersuchung der Wetterlage während der internationalen Tage vom 13. bis 18. Dezember 1937. Veröff. Geophysik. Inst. Uni Leipzig, Band XII, Heft 1 (wspólnie z P. Mildnerem, E Palménem i L. Weickmannem).
- 1940 – The deepening of extra-tropical cyclones. Quarterly Journal of Royal Meteorological Society, Vol. 66, suppl., s. 57-59.
- 1944 – On the theory of cyclones. Journal of Meteorology, Vol. 1, Issue 1-2, s. 1-22 (wspólnie z Jørgenem Holmboe).
- 1948 – Practical application of H. Jeffreys' theory of the general circulation. Résumé des Mémoires Réunion d'Oslo, s. 13-14.
- 1951 – Detailed analysis of synoptic weather as observed from photographs taken on two rocket flights over White Sands, New Mexico, July 26, 1948. RAND Report R-218.
- 1951 – Extratropical cyclones. [w:] T.F. Malone (ed.), Compendium of Meteorology. American Meteorological Society, Boston, s. 577-598.
- 1951 – The maintenance of the zonal circulation of the atmosphere. [w:] Procés-Verbaux des Séances de l'Association de Météorologie. UGGI, Bruxelles, s.1-21. Presidential Address.
- 1954 – The diffluent upper trough. Archiv fur Meteorologie, Geophysik, und Bioklimatologie, Serie A, Band 7, s. 41-46.
- 1954 – The problem of cyclogenesis from Helmholtz's time to the present. [w:] Proceedings of the Toronto Meteorology Conference, s. 133-138.
- 1955 – The transfer of angular momentum in the atmosphere. [w:] Scientific Proceedings of the International Association of Meteorology, s. 407-408.
- 1957 – A Model of the General Circulation of the Tropics in Winter. Final report, General Circulation Project, Contract No. AF 19(604)-1286, U.S. Air Force Cambridge Research Center (wraz z Sekharipuramem V. Venkateswaranem).
- 1957 – Detailed Analysis of Synoptic Weather as Observed from Photographs Taken on Two Rocket Flights over White Sands. New Mexico, July 26, 1948, Paper P-887. Santa Monica, Calif.: Rand Corporation.
- 1957 – Dynamic Meteorology and weather forecasting. Published by American Meteorological Society, Boston – Carnegie Institution of Washington, s. 1-800 (wraz z Carlem Ludvigiem Godske, Torem Bergeronem i Robertem C. Bundgaardem).
- 1958 – Related fluctuations of trade winds and northern climates. Geophysica, vol. 6, no. 3-4, 169-177.
- 1959 – Temperaturforandringen i Golfstrømmen i tidsrummet for klimaforbedringen i Norden (The temperature change in the Gulf Stream within the period of climatic improvement in the northern countries). Vega Lecture, Ymer, Vol. 79, heft 2, s. 148-158.
- 1959 – The recent warming of the North Atlantic. [w:] Rossby Memorial Volume, ed. B. Bolin, New York: Rockefeller Institute Press in association with Oxford University Press, s. 65-73.
- 1960 – Ocean temperatures and atmospheric circulation. WMO Bulletin, Vol. 9, No. 3, s. 151-157.
- 1961 – Climatic change as an ocean-atmosphere problem. [w:] Proceedings of the Rome Symposium, organized by UNESCO and the World Meteorological Organization, UNESCO, s. 297-321.
- 1961 – El Niño, Study based on analysis of ocean surface temperatures 1935-57. Bulletin Inter-American Tropical Tuna Commission, Vol. 5, No. 3, s. 219-303.
- 1962 – Synoptic survey of the interaction of sea and atmosphere in the North Atlantic. Geofysiske Publikationer, Geophysica Norvegica, Vol. 24, No. 3, s. 115-147.
- 1964 – Atlantic air-sea interaction. [w:] Advances in Geophysics 10, s. 1-82. New York: Academic Press.
- 1964 – Half a century of change in the "meteorological scene". Bulletin American Meteorological Society, Vol. 45, No. 6, s. 312-315.
- 1966 – A possible response of the atmospheric Hadley circulation to equatorial anomalies of ocean temperature. Tellus, Vol. 18, No. 4, s. 820-829.

- 1966 – Atmospheric teleconnections responding to equatorial anomalies of ocean temperature. [w:] Proceedings of the Symposium on the Arctic Heat Budget and Atmospheric Circulation, Lake Arrowhead, Calif., Jan. 31-Feb. 4. Rand Memorandum No. RM-5233-NSF, s. 473-496.
- 1968 – Further studies on large-scale interaction of the atmosphere and the oceans. Progress Report on N.S.F. Contract GP-3193, University of California, Los Angeles, Calif.
- 1969 – Atmospheric teleconnections from the Equatorial Pacific. Monthly Weather Review, Vol. 97, No. 3, s. 163-172.
- 1969 – Satellite mapping of the Pacific tropical cloudiness. Bulletin American Meteorological Society, Vol. 50, Issue 5, s. 313-322 (wraz z: Lewisem J. Allisonem, Earlem R. Kreinsem, Fredericem A. Godshallem i Guenterem Warnecke).
- 1970 – Studies in climate dynamics for environmental security: Large-scale ocean/atmosphere interaction resulting from variable heat transfer at the equator. The Rand Corporation, RM-6353-ARPA, s. 1-23.
- 1972 – Global ocean-atmosphere interaction. [w:] Rapports et Procés-Verbaux, vol. 162, s. 108-99. International Council for the Exploration of the Sea.
- 1972 – Large-scale atmospheric response to the 1964-65 Pacific equatorial warming. Journal of Physical Oceanography, Vol. 2, Issue 3, s. 212-217.
- 1974 – Atmospheric Teleconnections from the Equatorial Pacific During 1963-67. Final report to the National Science Foundation under NSF Grant No. GA 27754, s. 1-66.

Andrzej A. Marsz

Opracowano na podstawie:

- Eliassen A., 1995, Jacob Aall Bonnevie Bjerknes: November 2, 1897– July 7, 1975. A Biographical Memoir, vol. 68. National Academy of Sciences. National Academy Press, Washington D.C. 3-21 s.
- Eliassen A., 1999, Vilhelm Bjerknes's Early Studies of Atmospheric Motions and Their Connection with the Cyclone Model of the Bergen School. [w:] Shapiro M.A., Grønås S. (eds), The Life Cycles of Extratropical Cyclones. American Meteorological Society, Boston, MA.; 5-13. https://doi.org/10.1007/978-1-935704-09-6_2
- Friedman R.M., Jacob Aall Bonnevie Bjerknes – <https://www.encyclopedia.com/science/dictionaries-thesauruses-pictures-and-press-releases/bjerknes-jacob-aall-bonnevie>
- McPeak W.J., Jacob Aall Bonnevie Bjerknes – <https://honors.agu.org/bowie-lectures/bjerknes/>