

Kamil Leziak

Uniwersytet Warszawski, Wydział Geografii i Studiów Regionalnych,

Zakład Klimatologii

e-mail: k.leziak@uw.edu.pl

**WYSTĘPOWANIE TORNAD W AMERYCE PÓŁNOCNEJ W LATACH
2000-2011**

Tornadoes occurrence in North America in years 2000-2011

Słowa kluczowe: tornado, Ameryka Północna, skala Fujity, skala zniszczeń obszarowych
Key words: tornado, North America, Fujita scale, damage area scale

WSTĘP

Tornada należą do najbardziej niebezpiecznych zjawisk pogodowych występujących na Ziemi, stanowią duże zagrożenie dla ludzi oraz ich mienia. Choć przypadki pojawienia się tornad są notowane na wszystkich kontynentach, z wyjątkiem Antarktydy, największe i najbardziej niszczycielskie wiry powstają na obszarze Ameryki Północnej. Osiągają niekiedy siłę EF5 według rozszerzonej skali Fujity, ich średnica może przekraczać kilometr, a długość pasa zniszczeń – kilkaset kilometrów. Najgroźniejsze tornada powstają z superkomórek burzowych – układów konwekcyjnych cechujących się występowaniem mezocyklonu (układu cyrkulacyjnego prądów wstępujących, obracających się w płaszczyźnie poziomej, w podstawie chmury burzowej *Cumulonimbus*); prędkość wiatru w ruchu wirowym wewnątrz tornada superkomórkowego może przekraczać 500 km h⁻¹, a szybkość przemieszczania się samego leja po powierzchni Ziemi – przekraczać 100 km h⁻¹ (Pędziwoł 2003).

MATERIAŁY ŹRÓDŁOWE I METODY BADAŃ

W niniejszym opracowaniu wykorzystano dane dotyczące występowania tornad na obszarze Stanów Zjednoczonych Ameryki oraz Kanady w latach 2000-2011, uzyskane z instytucji badawczych tych krajów – *Storm Prediction Center* (Stany Zjednoczone) oraz *Environment Canada* (Kanada). Informacje z bazy danych

SPC zostały pobrane z ogólnodostępnego serwisu internetowego <http://www.spc.noaa.gov/wcm>, natomiast dane z *Environment Canada* zostały uzyskane w drodze indywidualnego porozumienia. Służba meteorologiczna Meksykańskich Stanów Zjednoczonych nie gromadzi danych dotyczących występowania tornad, dlatego kraj ten nie został uwzględniony w opracowaniu. Pozyskane dane obejmowały informacje o każdym zgłoszonym i potwierdzonym przypadku tornada, w tym: datę i godzinę wystąpienia zjawiska, miejsce pojawienia się oraz siłę według skali Fujity. Dodatkowo z obszaru Stanów Zjednoczonych pozyskano dane na temat długości oraz szerokości pasa zniszczeń (co pozwoliło przypisać każdy przypadek do odpowiedniego stopnia skali zniszczeń obszarowych A), wartości strat materialnych oraz liczby osób zabitych i rannych w wyniku przejścia tornada.

Rozkład przestrzenny tornad na obszarze Ameryki Północnej przedstawiono przy wykorzystaniu georeferencji danych źródłowych oraz rektyfikacji map podkładowych, wykorzystując reprezentację kartograficzną w formie metody sygnatur punktowych. Wszystkie dane były przetwarzane przy wykorzystaniu metod analiz przestrzennych w systemach informacji geograficznej. Obszary lokalnych alei tornad wyznaczono dzięki metodzie analizy rozkładu gęstości, określając, na których obszarach Ameryki Północnej wystąpiło najwięcej tornad w wieloleciu 2000-2011.

OBSZAR WYSTĘPOWANIA TORNAD

W wieloleciu 2000-2011 tornada wystąpiły w każdym stanie USA, włączając w to Hawaje oraz Alaskę, a z terytoriów zależnych – także Portoryko. W Kanadzie wystąpiły w każdej prowincji, z wyjątkiem Terytorium Yukon, Nunavut, Nowej Fundlandii z Labradorem i Nowej Szkocji (ryc. 1). Łącznie w ciągu wymienionych 12 lat w Ameryce Północnej zaobserwowano 16 644 tornada, z czego 604 w Kanadzie i 16 040 w Stanach Zjednoczonych Ameryki Północnej. Największa liczba przypadków kanadyjskich (powyżej 500) przypadała na cztery prowincje graniczące ze Stanami Zjednoczonymi w części środkowej kontynentu: Alberta, Saskatchewan, Manitoba i Ontario (w części sąsiadującej z Wielkimi Jeziorami). Na terytorium Stanów Zjednoczonych najczęściej tornada pojawiały się na wschodzie Wielkich Równin, na Nizinach Wewnętrznych, a także na Nizinie Zatokowej, Nizinie Atlantyckiej i półwyspie Floryda. Suma przypadków tego zjawiska w 10 najczęściej nawiedzanych stanach stanowi ponad 50% ogólnej liczby wszystkich przypadków na terytorium całego kraju. W 2 stanach łączna liczba przypadków w wieloleciu przekroczyła 1000 – były to Teksas (1687) i Kansas (1298). W 29 stanach wyniosła od 100 do 1000. W 15 stanach (oraz terytorium zależnym Portoryko) zawierała się między 10 a 100, a w 5 stanach nie przekraczała 10 (tab. 1).

McCarthy i Schaefer (1999) stwierdzili, że większość tornad pojawiających się na terenie Stanów Zjednoczonych powstaje na stosunkowo niewielkim obszarze, obejmującym stany: Teksas, Oklahoma, Nebraska, a także zachodnie części stanów Iowa, Missouri i Arkansas. Obszar ten, nazwany „Aleją Tornad” (ang. *Tornado Al-*

Tabela 1. Liczba tornad w poszczególnych stanach USA oraz terytoriach zależnych (2000-2011)**Table 1.** Number of tornadoes in states and dependent territories of USA (2000-2011)

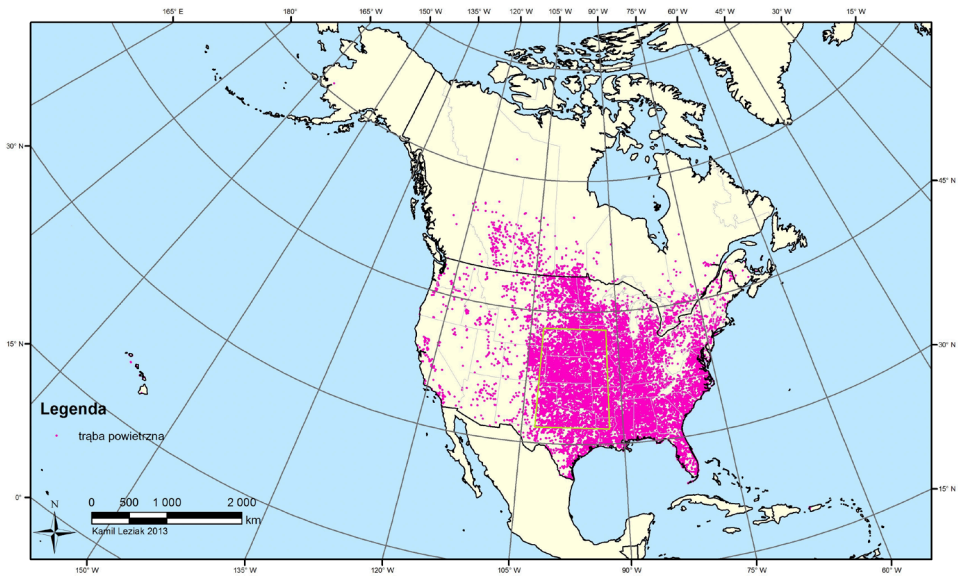
Stan lub terytorium zależne <i>State or dependent territory</i>	Liczba tornad <i>Number of tornadoes</i>	Stan lub terytorium zależne <i>State or dependent territory</i>	Liczba tornad <i>Number of tornadoes</i>	Stan lub terytorium zależne <i>State or dependent territory</i>	Liczba tornad <i>Number of tornadoes</i>
Texas	1687	South Dakota	383	Oregon	32
Kansas	1298	Wisconsin	346	Maine	29
Alabama	798	South Carolina	338	Utah	27
Missouri	721	Indiana	326	Connecticut	22
Oklahoma	716	Kentucky	320	West Virginia	20
Illinois	711	Virginia	301	New Jersey	17
Mississippi	701	Ohio	237	Nevada	17
Iowa	673	Michigan	184	Massachusetts	14
Nebraska	642	Pennsylvania	154	Hawaii	12
Florida	639	Maryland	116	Vermont	12
Arkansas	578	Wyoming	110	Puerto Rico	10
Minnesota	573	New York	110	New Hampshire	7
Colorado	527	California	101	Delaware	3
Louisiana	495	New Mexico	95	Alaska	3
North Dakota	467	Montana	83	Rhode Island	3
Georgia	426	Idaho	53	District of Columbia	1
Tennessee	417	Arizona	52		
North Carolina	397	Washington	36		

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych Storm Prediction Center.

Source: own work based on data from Storm Prediction Center.

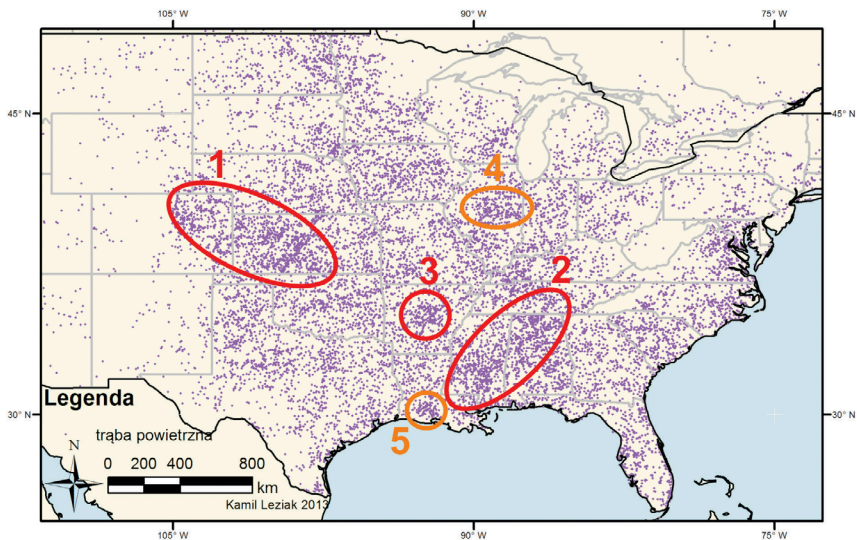
ley), został zaznaczony na rysunku 1 prostokątem. Wielu innych autorów (m.in. Petterssen 1964, Linacre, Geerts 1997, Schaeffer, Edwards 1999, Burdzy 2010) również wskazywało Aleję Tornad jako główny rejon występowania burz tornadogenetycznych, powstających w wyniku kontaktu skrajnie różnych mas powietrza: zimnego i suchego powietrza arktycznego oraz ciepłego i wilgotnego powietrza zwrotnikowego. Autor jednak stwierdził, że w latach 2000-2011 Aleja Tornad nie była rejonem najczęściej pustoszonego przez tornada. Jej dominujące znaczenie spadło na rzecz kilku mniejszych obszarów „lokalnych alei tornad”. Ponadto sama Aleja Tornad przestała być rejonem stosunkowo homogenicznym, w jej obrębie również powstały lokalne aleje. Wyznaczono 5 lokalnych alei tornad: 3 główne i 2 drugorzędne (ryc. 2). Najwięcej przypadków tornad występowało w alei oznaczonej numerem 1, ciągnącej się przez wschodnią część stanu Kolorado oraz środkową i zachodnią część stanu Kansas, na wschód od podnóża Gór Skalistych, wzdłuż górnego biegu rzek Arkansas i Arikaree. Część tej alei pokrywa się z północno-zachodnim fragmentem Alei Tornad. Aleja numer 2 znajduje się na obszarze stanów Missisipi, Alabama i Tennessee, na odcinku od równin aluwialnych dolnego biegu Missisipi i Alabamy po dolinę rzeki Tennessee. Aleja numer 3 obejmuje środkową część stanu Arkansas, na wschód od Gór Quachita. Aleja numer 4 jest położona na południo-zachód od Jeziora Michigan, w środkowej części stanu Illinois. Ostatnia, 5 aleja, położona jest nad Zatoką Meksykańską, w południowej części stanu Luizjana. Jak widać, żadna z lokalnych alei nie przebiega przez stany Teksas, Oklahoma czy Nebraska, które stanowią część tradycyjnie definiowanej Alei Tornad. Jednocześnie położenie wymienionych lokalnych alei tornad pokrywa się częściowo z wynikami badań Broylesa i Crosbie z 2004 roku. Wyzaczyli oni na obszarze Stanów Zjednoczonych 4 regiony o dużej liczbie przypadków tornad: dolną część Doliny Missisipi wraz z Doliną Tennessee (odpowiada jej lokalna aleja numer 2), środkowo-zachodnią część Wielkich Równin od stanu Oklahoma po Nebraskę (częściowo pokrywa się z lokalną aleją numer 1), dolinę Ohio wraz ze środkową częścią Doliny Missisipi (odpowiada jej lokalna aleja numer 4) oraz region nadatlantycki, obejmujący Karolinę Północną i Południową. Niewielkie rozbieżności między wynikami uzyskanymi przez wspomnianych badaczy i przez autora związane są z różnymi okresami, z których pochodziły dane (odpowiednio 1880-2003 i 2000-2011), a także selekcją wykorzystywanych danych – w badaniach Broylesa i Crosbie (2004) brano pod uwagę tylko tornada o sile F3 lub większej.

Liczba tornad zaobserwowanych w Kanadzie była blisko 30-krotnie mniejsza niż w Stanach Zjednoczonych, dlatego na obszarze tego kraju nie wydzielono żadnych alei tornad. Zdecydowana większość przypadków wystąpiła w południowych prowincjach kraju, szczególnie zaś na terenie 4 środkowych prowincji: Alberta, Saskatchewan, Manitoba i Ontario. Rozmieszczenia tornad w Kanadzie nie podlega tak znacznym zmianom jak w Stanach Zjednoczonych – rozkład przestrzenny w latach 2000-2011 (ryc. 1) pokrywa się z rozkładem przestrzennym z lat 1980-1997 (Etkin i in. 2001, s. 927). W obydwu okresach wyraźnie widoczna jest koncentracja zjawisk na południe od równoleżnika 55°N, na obszarze stanowiącym



Ryc. 1. Rozkład przestrzenny tornad w Ameryce Północnej (2000-2011)

Fig. 1. Spatial distribution of tornado cases in North America (2000-2011)



Ryc. 2. Lokalne aleje tornad w środkowej i wschodniej części Stanów Zjednoczonych. Kolorem czerwonym zaznaczone są aleje główne, kolorem pomarańczowym – aleje drugorzędne. Numery odpowiadają oznaczeniom w opisie

Fig. 2. Local tornado alleys in central and western parts of the USA. Primary alleys marked with red contour, secondary alleys marked with orange contour. Number are explained in description

przedłużenie Nizin Wewnętrznych i wschodniej części Wielkich Równin. W latach 2000-2010 tylko jeden przypadek miał miejsce na północy kraju, w prowincji Nunavut. Taki rozkład przestrzenny jest związany ze specyficznymi warunkami tornadogenetycznymi w wymienionych prowincjach.

W prowincji Alberta głównym czynnikiem wpływającym na powstawanie burz tornadogenetycznych jest ogrzewanie zboczy pogórza Gór Skalistych o wystawie wschodniej, które powoduje powstanie fali atmosferycznej inicjującej procesy konwekcyjne (Etkin i in. 2001). Początkowym stadium rozwoju burzy tego typu jest stacjonarna fala góraska indukowana wiatrem fenowym lub troposferycznym prądem strumieniowym o niskim pułapie; następnie fala propaguje w kierunku wschodnim i północo-wschodnim, wpływając na rozwój i dynamikę procesów konwekcyjnych. W prowincjach Saskatchewan i Manitoba ciepłe i wilgotne powietrze napływające znad Zatoki Meksykańskiej spotyka się z zimnym powietrzem arktycznym napływającym z północy. Dodatkowo z zachodu przemieszcza się suche powietrze transportowane w obrębie propagującej fali atmosferycznej, która powoduje znaczny wzrost pionowego uskoku wiatru (ang. VWS – *Vertical Wind Shear*). Powoduje to wytworzenie warunków podobnych do tych na obszarze Nizin Wewnętrznych, które sprzyjają powstawaniu komórek i superkomórek burzowych. W prowincji Ontario, na północo-wschód od Wielkich Jezior, występuje strefa o bardzo niewielkiej liczbie tornad, co jest związane z oddziaływaniem jezior na klimat lokalny, łagodzącym kontrasty termiczne i wpływającym na transformację mas powietrza zalegających nad nimi. Jej przeciwieństwem jest strefa największej aktywności tornadogenetycznej w Kanadzie, obejmująca wschodnią część prowincji, pomiędzy jeziorami Huron, Ontario i Erie. Z uwagi na dostawę pary wodnej do atmosfery, związaną z sąsiedztwem dużych zbiorników wodnych, na obszarze tym najczęściej powstają superkomórki o wysokich opadach, a same tornada zazwyczaj są zasłonięte kurtynami deszczu. Głównym czynnikiem warunkującym występowanie tego zjawiska we wschodnim Ontario jest oddziaływanie lokalnego frontu bryzowego indukującego procesy konwekcyjne i sprzyjającego tornadogenezie w osi od południo-zachodu do północo-wschodu (*ibidem*).

Rozkład przestrzenny częstości tornad w Ameryce Północnej zmienia się w poszczególnych porach roku. Najwięcej przypadków występuje wiosną, w maju i kwietniu. W miesiącach wiosennych najliczniej tornada pojawiają się na prawie całym obszarze środkowych i wschodnich Stanów Zjednoczonych (na wschodnich Wielkich Równinach, Nizinach Wewnętrznych, Nizinie Atlantyckiej i Nizinie Zatokowej), na południe od równoleżnika 42°N (ryc. 3A). W zachodniej części Wielkich Równin, Kordylierach i na wybrzeżu Oceanu Spokojnego pojawiają się sporadycznie, podobnie na północy, na terytorium Kanady. Taki rozkład przestrzenny jest związany ze zmianami cyrkulacji atmosferycznej – wiosna jest porą roku, w której najczęściej dochodzi do równoczesnej adwekcji południkowej chłodnego i suchego powietrza znad północnej Kanady i Arktyki oraz ciepłego i wilgotnego powietrza zwrotnikowego znad Zatoki Meksykańskiej. Obydwie masy powietrza spotykają się na Nizinach Wewnętrznych, gdzie powstają najsilniejsze burze torna-

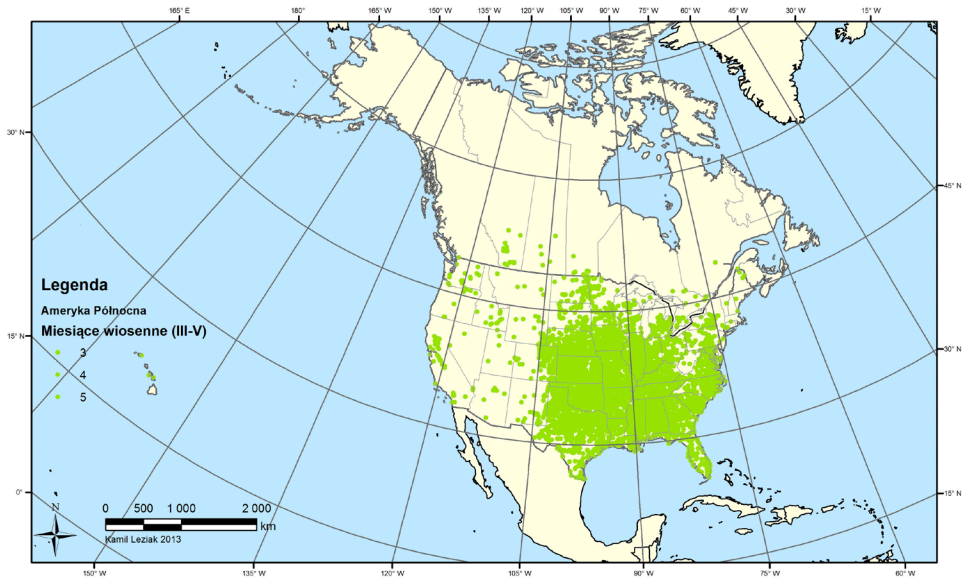
dogenetyczne (Chromow 1977; Battan 1979; Crowe 1987).

Latem adwekcja z południa przybiera na sile, wskutek czego ciepłe i wilgotne powietrze dociera dalej na północ, zanim spotka się z chłodnym powietrzem arktycznym. Powoduje to przesunięcie strefy występowania największej liczby tornad nad północną część Nizin Wewnętrznych oraz południową Kanadę (ryc. 3B). Jest to również przyczyna, dla której ponad 87% przypadków tornad w Kanadzie w badanym wieloleciu powstało w miesiącach letnich. Opisane zmiany położenia wyżej wymienionej strefy są zgodne z wynikami wcześniejszych badań, prowadzonych przez zespół D. Etkina (2001), który wykazał, że maksimum częstości tornad w Kanadzie następuje po około 1-2 miesiącach od wystąpienia takiego maksimum w środkowej części Nizin Wewnętrznych. Równocześnie na wschodnim wybrzeżu kontynentu powstaje druga, wąska strefa zwiększonej liczby tornad, która jest bezpośrednio związana z przemieszczaniem się cyklonów tropikalnych nad Oceanem Atlantyckim – lato i jesień to pory ich największej aktywności.

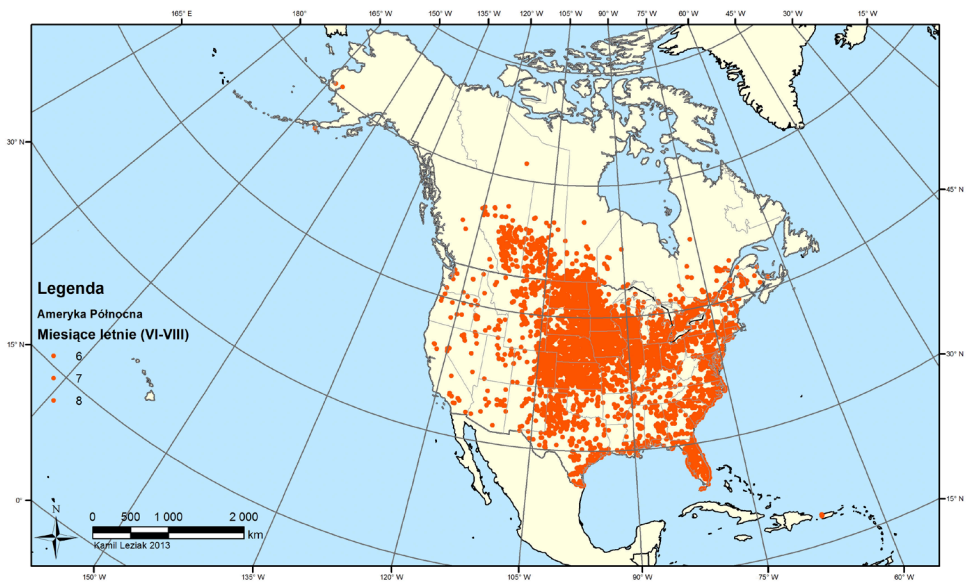
Jesienią przenos południowy słabnie, a północny przybiera na sile. Powietrze arktyczne dociera dalej na południe, jednocześnie mniejsza insolacja przyczynia się do osłabienia procesów konwekcyjnych i spadku ogólnej liczby burz tornadogenetycznych. Najwięcej tornad pojawia się w pasie przybrzeżnym, podlegającym wpływom cyklonów tropikalnych wchodzących nad ląd, oraz w rozległych dolinach i równinach aluwialnych dolnego biegu głównych rzek i ich odcinkach ujściowych, gdzie ukształtowanie terenu sprzyja adwekcji z południa (ryc. 3C).

Sytuacja ta utrzymuje się również zimą – występowanie tornad ogranicza się do południowej części Nizin Wewnętrznych, Niziny Zatokowej i Atlantyckiej oraz Półwyspu Floryda. Spadek liczby przypadków na wybrzeżu Oceanu Atlantyckiego jest związany z osłabieniem aktywności cyklonów tropikalnych. Główna aktywność tornadogenetyczna koncentruje się na obszarze nizin leżących na północ od Zatoki Meksykańskiej. Guyer i inni (2006 za: Galway, Pearson 1981) wskazali, że 68% przypadków tornad pojawiających się na obszarze Stanów Zjednoczonych od grudnia do lutego tworzy się na terytorium stanów leżących nad Zatoką Meksykańską. W latach 2000-2011 udział ten wyniósł 65%; zbliżone do siebie wartości mogą świadczyć o tym, że w ciągu lat czynniki odpowiedzialne za zimową tornadogenezę na tym obszarze nie uległy zmianie. Na miesiące zimowe przypada również maksimum aktywności tornadogenetycznej w Kalifornii (ryc. 3D). Prawdopodobnie jest to związane z oddziaływaniem ciepłego Prądu Davidsona, powstającego zimą i będącego przeciwprądem zimnego Prądu Kalifornijskiego. Dostarcza on dodatkową energię chwiejności do atmosfery, przyczyniając się do nasilenia procesów konwekcyjnych.

A



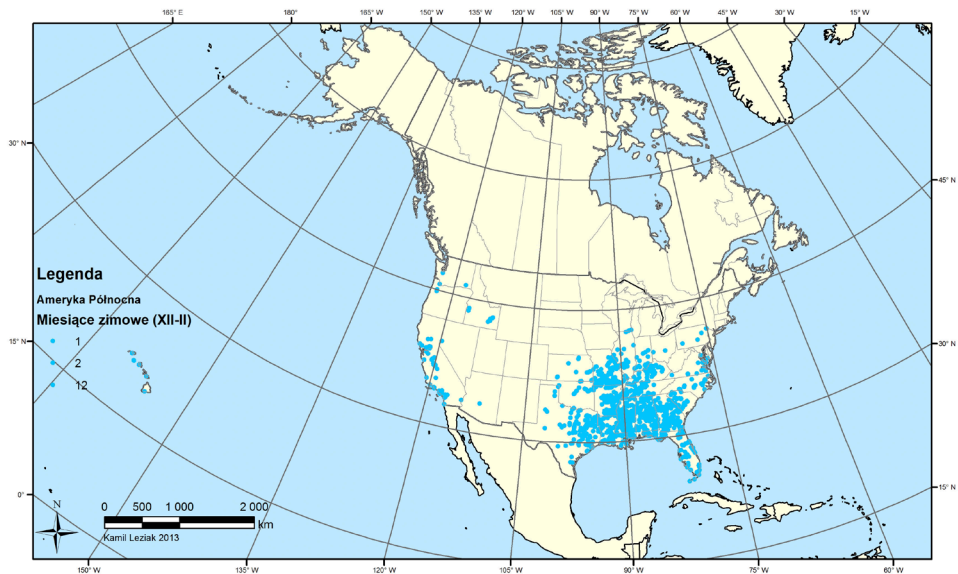
B



C



D



Ryc. 3. Rozkład przestrzenny tornad w Ameryce Północnej w różnych porach roku. A – wiosna (III-V), B – lato (VI-VIII), C – jesień (IX-XI), D – zima (XII-II) (2000-2011)

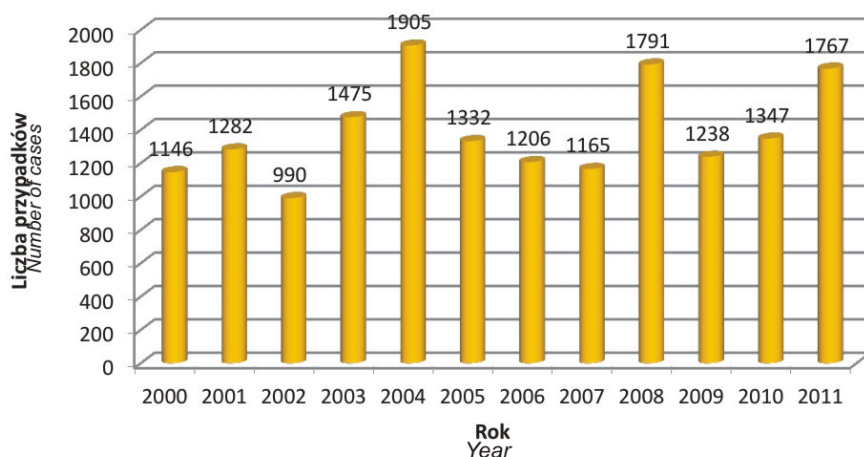
Fig. 3. Spatial distribution of tornado cases in North America in various seasons. A – Spring (3-5), B – Summer (6-8), C – Autumn (9-11), D – Winter (12-2) (2000-2011)

ZMIANY CZASOWE WYSTĘPOWANIA TORNAD

W latach 2000-2011 w Ameryce Północnej wystąpiły łącznie 16 644 tornada, co daje średnio 1387 przypadków w ciągu roku. Najmniej tornad zaobserwowano w roku 2002 (990), a najwięcej w roku 2004 (1905). W ciągu 12 lat nie dało się zauważyć trendu wzrostowego lub spadkowego liczby przypadków (ryc. 4), a seria danych jest zbyt krótka, aby można było zbadać okresowość zjawiska, uzyskując miarodajne wyniki. Warto zauważyć, że wyniki badań Burdzy z 2011 roku (odnoszące się tylko do terytorium Stanów Zjednoczonych), które obejmowały lata 1950-2009, wskazywały na występowanie wyraźnego trendu wzrostowego. Autorka stwierdziła, że „może to jednak mieć związek m.in. z coraz to lepszymi metodami monitorowania tornad w ciągu ostatnich kilkunastu lat” (Burdzy 2011, s. 496). Kontynuując ten tok rozumowania, można przyjąć, że brak trendu wzrostowego w ostatnich 12 latach jest związany z utrzymaniem stałego poziomu monitorowania tornad, gdyż ostatnie zmiany podejścia metodycznego spowodowane wprowadzeniem nowych metod badawczych w Stanach Zjednoczonych i Kanadzie miały miejsce w I połowie lat 90. XX w.

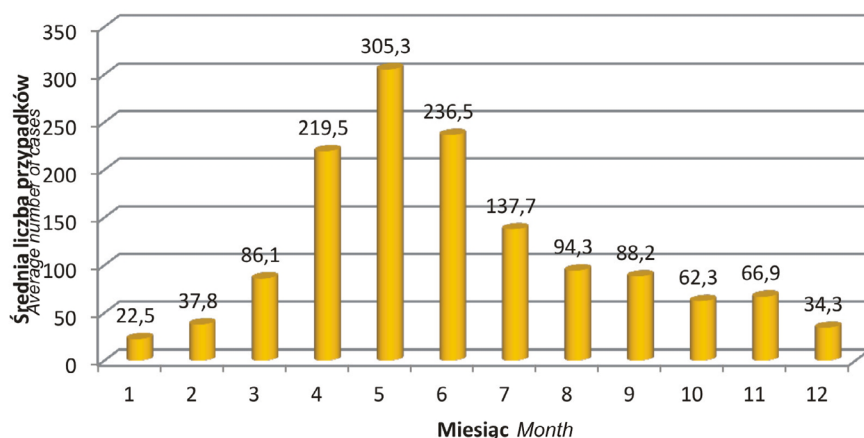
W ciągu ostatnich 20 lat wielokrotnie podejmowano próby powiązania zmiennej liczby tornad w kolejnych latach z cyrkulacją atmosferyczną w skali globalnej, w szczególności zaś z fazami Oscylacji Południowej (ENSO). Zarówno wyniki badaczy kanadyjskich (Etkin i in. 2001), jak i amerykańskich (Schaefer, Tatom 1998; Schaefer, Marzban 2000; Cook, Schaefer 2008) okazały się niejednoznaczne, a często nawet sprzeczne ze sobą. W zależności od rozdzielczości przestrzennej i czasowej danych źródłowych, metody statystycznej wybranej do potwierdzenia lub zaprzeczenia związku, założeń hipotezy zerowej, założeń dotyczących sposobu oceny fazy ENSO oraz położenia poligonu badawczego na terenie kontynentu amerykańskiego uzyskano statystycznie istotne wyniki zarówno potwierdzające, jak i zaprzeczające wpływowi Oscylacji Południowej na częstość lub siłę tornad pojawiających się na kontynencie.

Najwięcej tornad w Ameryce Północnej występowało w maju (średnio 305 przypadków – ryc. 5), następnie w czerwcu (średnio 236 przypadków) i kwietniu (220 przypadków). Po maksimum występującym na przełomie wiosny i lata liczba tornad maleje, osiągając minimum w styczniu (23). Należy jednak pamiętać, że maksima aktywności tornadogenetycznej występują w różnych miesiącach w Stanach Zjednoczonych i Kanadzie (ryc. 6). Najwięcej tornad w Stanach Zjednoczonych występowało w maju (średnio 301 przypadków) i w czerwcu (223), natomiast w Kanadzie – odpowiednio w lipcu (22) i czerwcu (14). Warto zauważyć, że średni przebieg roczny liczby tornad w Stanach Zjednoczonych w latach 2000-2011 był zupełnie różny od przebiegu w latach 1950-2009 przedstawionego przez Burdzy (2011, ryc. 7), ale zgadza się z przebiegiem w latach 1950-1997, opisanym przez Schaefera i Edwardsa (1999, s. 2). W latach 1950-2009 według Burdzy maksimum aktywności również przypadło na maj, jednak na drugim miejscu był kwiecień, nie czerwiec. Minimum częstości występowało zaś we wrześniu, nie w styczniu,



Ryc. 4. Przebieg wieloletni liczby tornad w Ameryce Północnej (2000-2011)

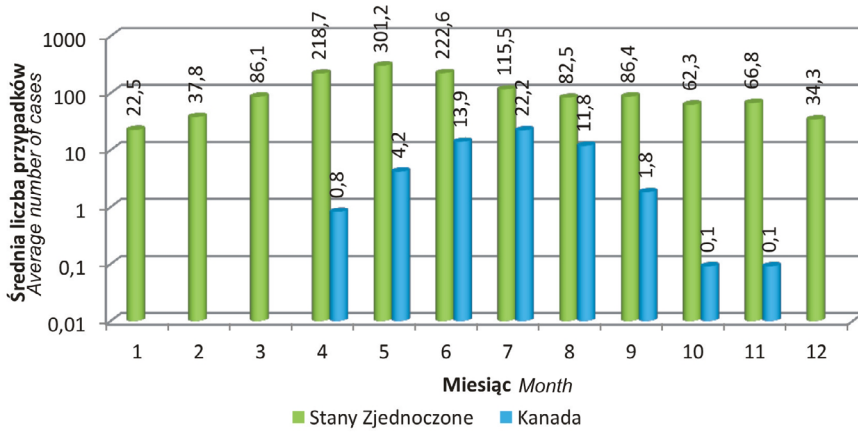
Fig. 4. The many years' course of tornado cases in North America (2000-2011)



Ryc. 5. Średni przebieg roczny liczby tornad w Ameryce Północnej (2000-2011)

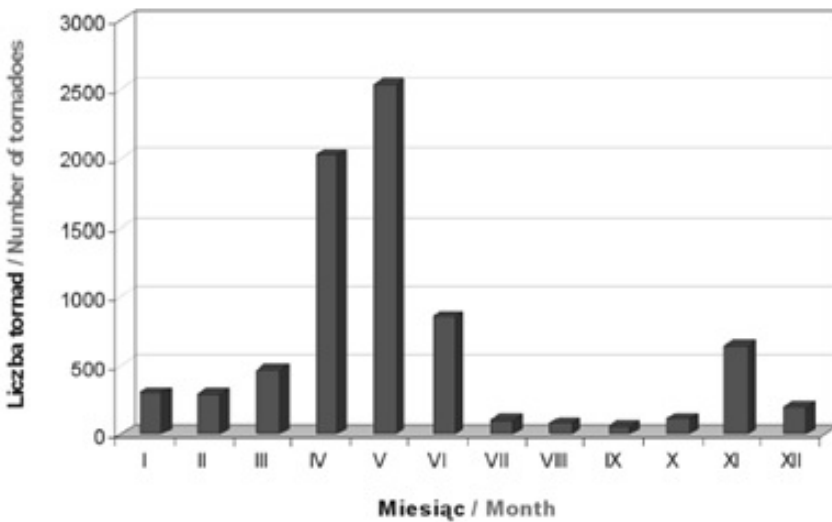
Fig. 5. Average annual number of tornado cases in North America (2000-2011)

a średnia liczba przypadków latem i jesienią była znacznie mniejsza niż w latach 2000-2011. W latach 1950-1997 według Schaefera i Edwardsa najczęściej tornad występowało w maju, następnie w czerwcu i w kwietniu, a najmniej w styczniu, grudniu i lutym. Rozbieżności w wynikach uzyskanych przez Schaefera i Edwardsa, Burdzy i autora są zastanawiające, gdyż wszystkie opierały się na danych pochodzących z tego samego źródła, czyli bazy danych SPC.



Ryc. 6. Średni przebieg roczny liczby tornad w Stanach Zjednoczonych (2000-2011) i Kanadzie (2000-2010)

Fig. 6. Average annual number of tornado cases in USA (2000-2011) and in Canada (2000-2010)



Ryc. 7. Przebieg roczny liczby tornad w Stanach Zjednoczonych (sumy z 60-lecia 1950-2009) (Burdzy 2011, s. 498)

Fig. 7. Total annual number of tornado cases in USA (total sum from period 1950-2009) (Burdzy 2011, p. 498)

Porównanie przebiegu rocznego liczby tornad w Kanadzie w latach 2000-2010 z przebiegiem w latach 1980-1997 (Etkin i in. 2001) wykazało pojawienie się pewnych niewielkich różnic, chociaż ogólny rozkład czasowy pozostał taki sam (tab. 2). W miesiącach letnich występuje przeważająca większość przypadków z całego roku (w latach 1980-1997 było to 78%, a 2000-2010 – 87%), a od listopada do marca tornada praktycznie nie tworzą się (w obydwu wieloletniach w tych miesiącach zaobserwowano tylko pojedyncze przypadki). W latach 1980-1997 najwięcej tornad stwierdzono w czerwcu (była to jedna trzecia przypadków z całego roku), natomiast w latach 2000-2010 w lipcu (na który przypadało 40% przypadków). W latach 2000-2010 mniej było przypadków w okresie od kwietnia do czerwca (35%, w porównaniu do 47% w latach 1980-1997), ale więcej w lipcu i sierpniu (odpowiednio 62 i 45%). O połowę spadł także udział przypadków we wrześniu (z 6 do 3%). Może to oznaczać niewielką zmianę charakteru cyrkulacji atmosferycznej nad Ameryką Północną, która powoduje skrócenie i opóźnienie okresu o szczególnie korzystnych warunkach do rozwoju burz tornadogenetycznych nad obszarem Kanady.

Tabela 2. Przebieg roczny tornad w Kanadzie, wyrażony w % sumy rocznej (1980-1997)
Table 2. Annual tornadoes occurrence in Canada, shown as a percentage of total annual occurrence (1980-1997)

Lata years	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	XIX	X	XI	XII
1980- 1997	0,3	0,2	0,2	2,8	11,3	32,5	30,3	14,4	6,3	1,6	0,1	0,0
2000- 2011	0,0	0,0	0,0	1,5	7,6	25,3	40,4	21,5	3,3	0,2	0,2	0,0

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych Environment Canada oraz Etkin i in. 2001.
 Source: own work based on data from Environment Canada and data from Etkin et al. 2001.

SILA TORNAD

W Ameryce Północnej występuje najwięcej tornad na świecie, tutaj również zjawiska te mają największą siłę. Jest to związane z ukształtowaniem powierzchni umożliwiającym swobodną adwekcję południkową mas powietrza o różnych właściwościach termicznych. Liczba przypadków jest odwrotnie proporcjonalna do siły tornada (ryc. 8). W latach 2000-2011 najwięcej obserwacji (ponad 10 tysięcy) dotyczyło najsłabszych tornad, o sile F0. Tornad o sile F1 było o połowę mniej (niewiele ponad 4,5 tysiąca), a tych o sile F2 – ponad siedmiokrotnie mniej (1349). Tornada o sile F3 pojawiły się 410 razy, o sile F4 – 94 razy. Tylko 12 razy (średnio raz w roku) występowało zjawisko o sile F5, będącej najwyższym stopniem w skali Fujity. Warto zwrócić uwagę na dysproporcję w rozkładzie przypadków: liczby tych najsłabszych i najsilniejszych różnią się aż o trzy rzędy wielkości. Proporcje

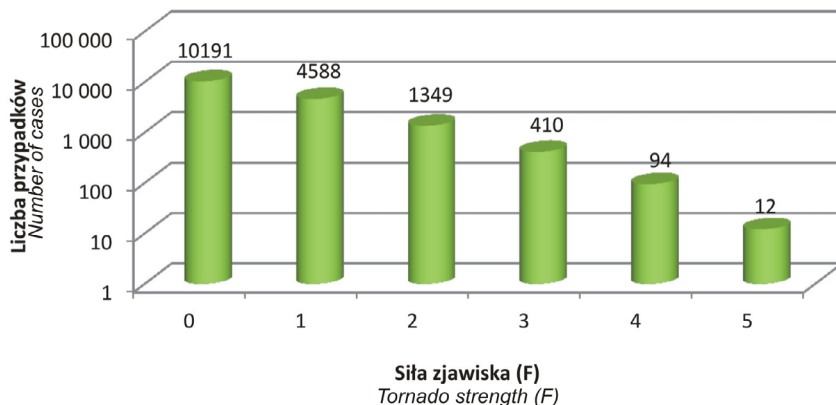
liczby tornad o różnym stopniu w skali F w latach 2000-2011 są zgodne z proporcjami w latach 1986-1995, 1996-2005 i 1950-2009, przedstawionymi odpowiednio przez Deana i Imy'iego (2006, s. 1) oraz Burdzy (ryc. 9, 2011), chociaż oczywiście sama liczba przypadków była różna.

W celu porównania sumarycznego udziału tornad o różnej sile z wartościami uzyskanymi przez innych badaczy w różnych okresach określono procentowy udział tornad o różnej sile w całym zbiorze danych (tab. 3). Zestawiono go razem z wynikami Etkina i in. (2001), McCarthy'iego i Schaefera (2004) oraz Burdzy (2011). W Ameryce Północnej w latach 2000-2011 siłę F0 miało 61% tornad, F1 – 28%, F2 – 8%, F3 – 3%. Zjawiska o sile F4 stanowiły niecały 1%, a te o sile F5 0,1% wszystkich przypadków.

Trochę inaczej przedstawia się siła tornad w podziale na Stany Zjednoczone oraz Kanadę. W Kanadzie najslabsze tornada miały większy udział niż w Stanach Zjednoczonych (odpowiednio 69% i 61%), a zatem udział wszystkich przypadków o sile większej niż F0 był mniejszy (np. tornad o sile F1 o 3,9 p.p., a tornad o sile F2 o 1,5 p.p.). Ze względu na ponad 40% brak danych w badaniach zespołu Etkina nie można przeprowadzić pełnego porównania siły tornad w Kanadzie w latach 2000-2010 i 1980-1997. W dostępnych danych widać jednak zachowanie podobnych proporcji, co w najnowszym okresie – zdecydowanie przeważały przypadki o sile F0.

Udział procentowy tornad o różnej sile w Stanach Zjednoczonych w latach 2000-2011 był najbardziej zbliżony do rozkładu opublikowanego przez zespół Etkina, obejmującego lata 1990-1998. W obydwu okresach dominowały najslabsze tornada, które stanowiły około 61% każdego zbioru, na drugim miejscu były tornada o sile F1 (27-28%), a na trzecim o sile F2 (8-9%). Wyniki badań McCarthy'iego i Schaefera oraz Burdzy wskazywały natomiast na bardzo podobny udział zjawisk o sile F0 i F1 (u McCarthy'iego i Schaefera ich udział wynosiły odpowiednio 39 i 36%, a u Burdzy – 37% i 33%) oraz odpowiednio większy udział zjawisk o sile F2-F5. Wyjaśnienie tej rozbieżności jest bardzo proste – w dwóch wspomnianych pracach były rozpatrywane dane ze znacznie dłuższych wieloleci (1970-2002 i 1950-2009). Przed końcem lat 80. XX w. w Stanach Zjednoczonych prowadzono jedynie wizualne obserwacje tornad, gdyż nie funkcjonowała jeszcze ogólnokrajowa sieć radarów dopplerowskich WSR-88D ani radarów mobilnych DoW. Dlatego też do bazy danych wprowadzano jedynie rekordy potwierdzone obserwacjami wizualnymi, np. takie, o których informacja trafiła do mediów lokalnych. Silne tornada były łatwiej zauważalne i doniesienia o nich częściej pojawiały się w mediach, dlatego zbiór danych z tego okresu odznacza się nadreprezentacją częstości umiarkowanie silnych i silnych zjawisk (F1-F5).

Tornada o sile F0 i F1 występują na przeważającej części Ameryki Północnej (ryc. 10). Tornada o sile F2 pojawiają się przede wszystkim na obszarze Nizin Wewnętrznych, Niziny Atlantyckiej, Niziny Zatokowej i półwyspu Floryda. Tornada o sile F3 występują na tym samym obszarze, oprócz wybrzeża Oceanu Atlantyckiego. Jest to zgodne z wynikami badań Edwardsa (2010) i wskazuje, że tornada



Ryc. 8. Liczba tornad o określonej sile (według skali F) w Ameryce Północnej (2000-2011)
Fig. 8. Number of tornadoes of a certain strength (in F-scale) in North America (2000-2011)

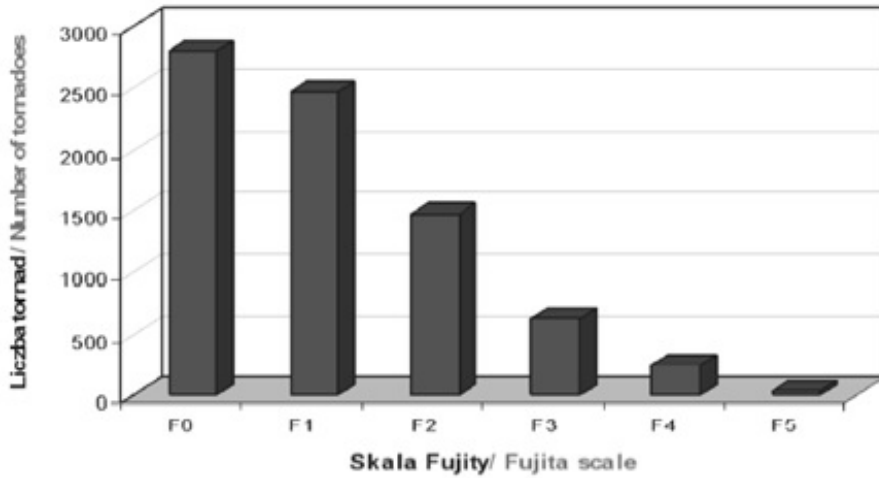
Tabela 3. Średni udział procentowy tornad o określonej sile (według skali F) w Ameryce Północnej, Kanadzie i Stanach Zjednoczonych, w różnych wieloletniach i według różnych autorów

Table 3. Average percentage of tornadoes of a certain strength (in F-scale) in North America, Canada and USA, in various time periods and according to various authors

	b. d. <i>no data</i>	F0	F1	F2	F3	F4	F5
Ameryka Północna (2000-2011, oprac. własne) North America (2000-2011), <i>own work</i>	0,0	61,2	27,6	8,1	2,5	0,6	0,1
Kanada (2000-2011), oprac. własne Canada (2000-2011), <i>own work</i>	0,0	69,0	23,8	6,0	1,0	0,0	0,2
Kanada (1980-1997) za: Etkin i in. 2001 Canada (1980-1997) Etkin et al. 2001	42,6	32,6	14,8	7,5	2,2	0,3	0,0
Stany Zjednoczone (2000-2011), oprac. własne USA (2000-2011), <i>own work</i>	0,0	60,9	27,7	8,2	2,5	0,6	0,1
Stany Zjednoczone (1990-1998) za: Etkin i in. 2001 USA (1990-1998), Etkin et al. 2001	0,0	60,5	27,2	8,8	2,7	0,7	0,1
Stany Zjednoczone (1970-2002) za: McCarthy i Schaefer 2004 USA (1970-2002), McCarthy and Schaefer 2004	0,0	39,0	36,0	19,0	5,0	1,0	0,0
Stany Zjednoczone (1950-2009) za: Burdzy 2011 USA (1950-2009), Burdzy 2011	0,0	36,9	32,6	18,5	8,2	3,4	0,5

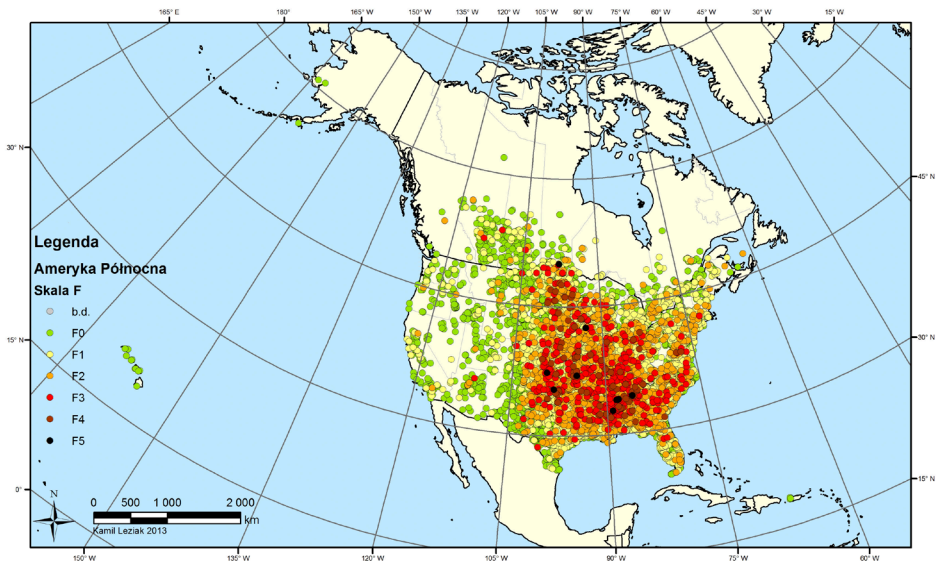
Źródło: opracowanie własne na podstawie danych Environment Canada i Storm Prediction Center, Etkin i in. 2001, McCarthy i Schaefer 2004, Burdzy 2011.

Source: own work based on data from Environment Canada, Storm Prediction Center and following authors: Etkin et al. 2001, McCarthy and Schaefer 2004, Burdzy 2011.



Ryc. 9. Liczba tornad o określonej sile (według skali F) w Ameryce Północnej (1950-2009) (Burdzy 2011, s. 497)

Fig. 9. Number of tornadoes of a certain strength (in F-scale) in North America (1950-2009) (burdzy 2011, p. 497)



Ryc. 10. Rozkład przestrzenny tornad według skali F w Ameryce Północnej (2000-2011)

Fig. 10. Spatial distribution of tornadoes of a certain strength (in F-scale) in North America (2000-2011)

związane z cyklonami tropikalnymi osiągają zwykle siłę nieprzekraczającą F1, a przypadki o większej sile (F2-F3) występują nieco dalej w głębi lądu, a nie bezpośrednio na wybrzeżu. Zjawiska o sile F3 i F4 występujące w środkowo-wschodniej części kontynentu (w szczególności na obszarze lokalnych alei tornad numer 1, 2 i 3) leżą na szlaku częstej adwekcji południkowej; można zatem przypuszczać, że występowanie silnych tornad jest związane z obszarem, nad którym stykają się masy ciepłego powietrza zwrotnikowego znad Zatoki Meksykańskiej z powietrzem arktycznym znad północnej Kanady. Jedenaście przypadków najsilniejszych tornad wystąpiło w badanym wieloleciu na terytorium Stanów Zjednoczonych, z czego najwięcej w północnej części lokalnej alei tornad numer 2. Jeden przypadek miał miejsce w Kanadzie, niedaleko południowej granicy państwa.

Miejsca pojawiania się tornad o sile F3 i wyższej w dużym stopniu pokrywają się z obszarami o dużej częstotliwości tornad F3-F5 wyznaczonymi przez Broylesa i Crosbiego w 2004 roku (Broyles, Crosby 2004, s. 2). Dotyczy to przede wszystkim stanów Missisipi, Alabama i Arkansas. Silne tornada w latach 2000-2011 pojawiały się też na podobnym obszarze, co tornada o trasie dłuższej niż 100 mil w latach 1950-2002, wskazane w artykule McCarthy'iego i Schaefera (2004).

W latach 2000-2011 nastąpiła zmiana częstości tornad o różnej sile (tab. 4). W drugiej połowie 12-letniego okresu zmniejszył się udział najsłabszych zjawisk, wzrósł natomiast udział tych silniejszych (F1-F5). Największa różnica wystąpiła między latami: 2000 i 2011 – udział zjawisk o sile F0 był mniejszy o 21 p.p., jednak brak danych za rok 2012 uniemożliwia określenie, czy tak duża różnica ma charakter epizodyczny czy też powtórzyła się w kolejnych latach. Niestety niedostateczna ilość dostępnych informacji uniemożliwia określenie prawdopodobnej przyczyny tej zmiany.

Przebieg roczny częstości tornad o różnej sile ma ciekawą właściwość: największy udział tornad o sile F1 lub wyższej przypada na miesiące o najniższej aktywności tornadogenetycznej (tab. 5). W badanym wieloleciu w listopadzie oraz styczniu tornada o sile F1-F5 stanowiły 57%. Ponadto w listopadzie był największy udział tornad o sile F2 lub wyższej (21%). W maju, kiedy liczba tornad była największa w roku, siłę F0 osiągnęło 62%, F1 – 27%, a F2 – 8%. W miesiącach letnich najsłabsze tornada stanowiły ponad 70% przypadków, a od czerwca do września tornada o sile F3-F5 stanowiły niespełna 10%. Należy jednak pamiętać, że średnia liczba przypadków w miesiącach zimowych jest ponad 10-krotnie mniejsza niż na przełomie wiosny i lata, dlatego opisane zmiany częstości nie mają przełożenia na bezwzględną liczbę obserwacji tornad o określonej sile. Można przypuszczać, iż wynikają one z większej trudności zauważenia słabych zjawisk w okresie wzmożonej cyklogenezy oraz większej liczby obserwatorów w okresie wakacyjnym.

Tabela 4. Przebieg wieloletni udziału procentowego tornad o określonej sile (według skali F) w Ameryce Północnej (2000-2011)

Table 4. The course of amany years' share (%) of tornadoes of a certain strength (in F-scale) in North America (2000-2011)

Rok Year	F0	F1	F2	F3	F4	F5
2000	67,0	25,1	5,7	1,9	0,3	0,0
2001	66,0	23,3	8,0	2,1	0,5	0,0
2002	65,6	23,6	7,4	2,8	0,5	0,0
2003	63,8	26,2	7,1	2,1	0,8	0,0
2004	66,5	26,1	5,8	1,4	0,3	0,0
2005	64,2	27,1	6,7	1,9	0,1	0,0
2006	61,4	26,6	8,6	3,2	0,3	0,0
2007	61,0	27,4	8,7	2,4	0,4	0,1
2008	57,4	29,6	9,1	3,2	0,6	0,1
2009	59,9	30,1	8,0	1,8	0,3	0,0
2010	58,9	26,7	10,0	3,2	1,2	0,0
2011	46,0	36,1	11,9	4,1	1,4	0,5

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych Environment Canada i Storm Prediction Center.
Source: own work based on data from Environment Canada and Storm Prediction Center.

Tabela 5. Średni przebieg roczny częstości (%) tornad o określonej sile (według skali F) w Ameryce Północnej (2000-2011)

Table 5. Average annual frequency (%) of tornadoes of a certain strength (in F-scale) in North America (2000-2011)

Miesiąc Month	F0	F1	F2	F3	F4	F5
I	43,0	38,9	10,4	7,8	0,0	0,0
II	42,5	37,4	13,4	4,8	1,8	0,0
III	55,8	30,1	10,1	3,8	0,3	0,0
IV	49,5	34,7	10,4	4,0	1,0	0,3
V	61,9	26,5	8,3	2,5	0,7	0,1
VI	73,2	20,5	4,6	1,3	0,4	0,0
VII	73,0	21,1	5,0	0,6	0,2	0,0
VIII	71,1	23,2	4,0	1,1	0,5	0,0
XIX	63,3	28,1	7,2	1,1	0,4	0,0
XX	59,8	29,7	8,7	1,7	0,0	0,0
XI	43,0	36,3	15,3	4,4	1,0	0,0
XII	56,1	28,2	12,9	2,7	0,2	0,0

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych Environment Canada i Storm Prediction Center.
Source: own work based on data from Environment Canada and Storm Prediction Center.

SKUTKI TORNAD

Tornado są najbardziej niszczycielskimi wielkoskalowymi zjawiskami pogodowymi na Ziemi, powodującymi skutki widoczne przez wiele lat. Najważniejszym jest śmierć ludzi, którzy znaleźli się na trasie przejścia takiego zjawiska i nie mieli możliwości ucieczki. Straty materialne, spowodowane uszkodzeniami lub zniszczeniem infrastruktury komunikacyjnej, budynków, pojazdów czy upraw, mają znaczenie drugorzędne, chociaż wielokrotnie ich wartość liczona jest w milionach dolarów. W dalszej części artykułu przedstawiono trzy aspekty skutków tornad: wielkość zniszczeń oszacowaną za pomocą skali A, liczbę osób rannych i zabitych oraz wartość strat.

Ponieważ skala F uwzględnia przede wszystkim zniszczenia obiektów antropogenicznych, nie jest ona miarodajnym wskaźnikiem skutków tornad w terenie zabudowanym i poza nim. Dlatego analizę skutków tornad oparto na specjalnej skali zniszczeń obszarowych, nazywanej skalą A. Stopień skali A przypisany danemu zjawisku zależy tylko od powierzchni pasa zniszczeń, jaki po sobie pozostawiło (tab. 6). Ani amerykańska, ani kanadyjska służba meteorologiczna nie podaje stopnia skali A. Z tego powodu określono ten stopień samodzielnie dla każdego przypadku, który zawierał informację o długości i średniej szerokości obszaru zniszczonego przez tornado. Jedynie amerykańskie Centrum Prognozowania Burz (ang. *SPC – Storm Prediction Center*) podaje wymiary pasa zniszczeń, dlatego 604 przypadki z obszaru Kanady nie mają przypisanych informacji o stopniu skali A (ryc. 11).

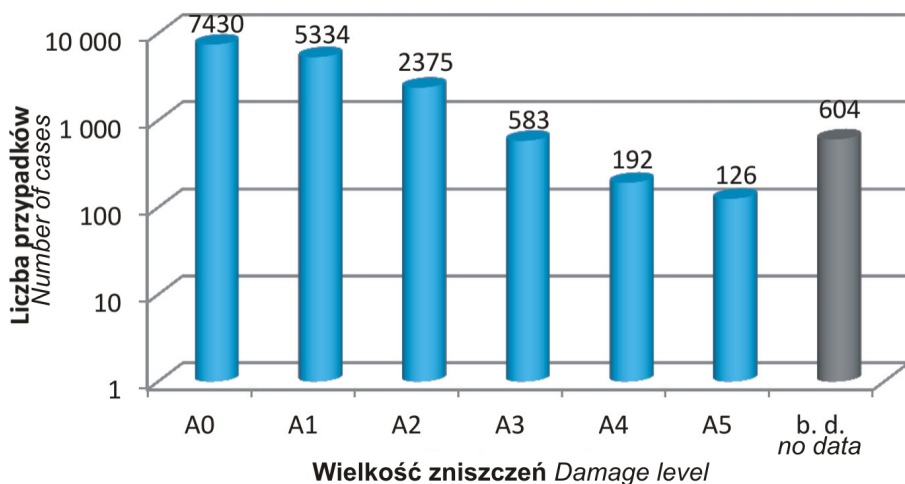
W badanym wieloleciu w Stanach Zjednoczonych wystąpiło najwięcej przypadków o stopniach A0 (7430 przypadków) i A1 (5334), oznaczających, że powierzchnia obszaru zniszczonego nie przekraczała 0,28 mi² (0,73 km²), przypadki dalszych stopni skali A wykazywały stopniowo zmniejszającą się liczebność, przy czym najmniej było tornad o powierzchni zniszczeń przekraczającej 15,8 mi² (40,9 km²) (A5) – tylko 126 przypadków. Jest to oczywista prawidłowość, przypominająca

Tabela 6. Skala zniszczeń obszarowych spowodowanych przez trąby powietrzne (Thompson 1998)

Table 6. Damage Area Scale (A-scale) for tornadoes (Thompson 1998)

Stopień skali zniszczeń obszarowych (skala A) <i>Level of Damage Area Scale (A-scale)</i>	Powierzchnia pasa zniszczeń [mi ²] <i>Area destroyed [mi²]</i>
A0	< 0,01
A1	0,02-0,28
A2	0,29-2,1
A3	2,2-7,8
A4	7,9-15,8
A5	> 15,8

Źródło: Thompson 1998 / Source: Thompson 1998

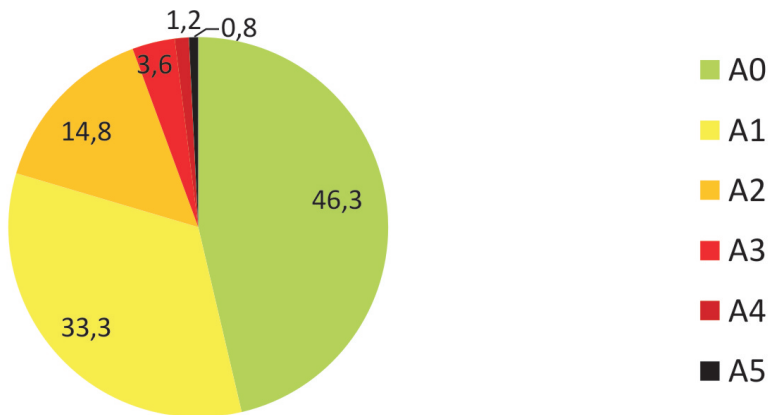


Ryc. 11. Liczba tornad powodujących określone zniszczenia obszarowe (według skali A) w Ameryce Północnej (2000-2011)

Fig. 11. Number of tornadoes causing certain area damage (in A-scale) in North America (2000-2011)

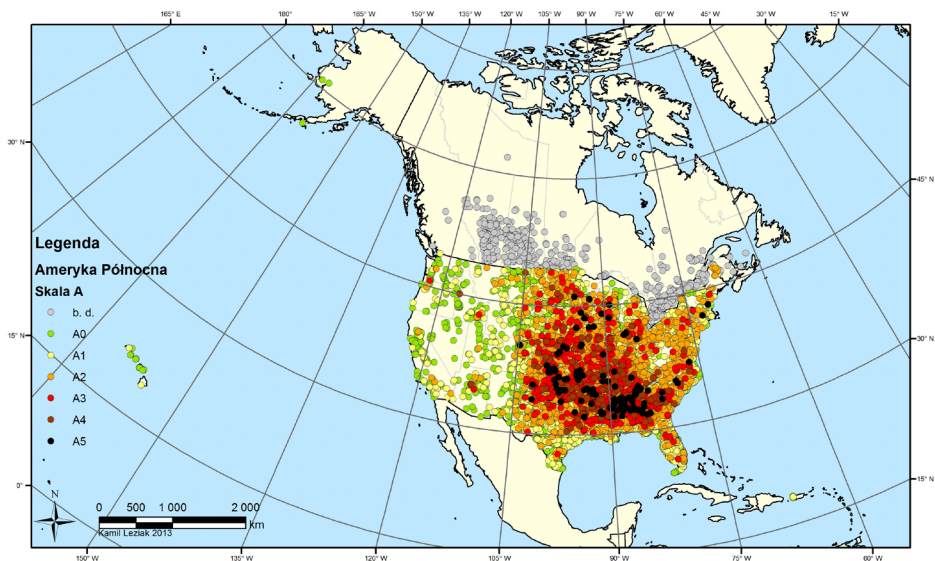
rozkład skali F – świadczy o tym, że słabe tornada powodują zniszczenia na niewielkiej powierzchni, a silne na dużej powierzchni. Ponad 46% wszystkich tornad w Stanach Zjednoczonych osiągnęło najniższy stopień w skali A, a ponad 33% – stopień A1 (ryc. 12). Blisko 15% przypadków to zjawiska powodujące zniszczenia odpowiadające trzeciemu stopniowi skali (A2), a niecałe 6% charakteryzowało się pasem zniszczeń o powierzchni powyżej 2,1 mi² (5,4 km²), przypisanym do stopni A3-A5. Tylko 0,8% przypadków osiągnęło największą powierzchnię zniszczeń obszarowych odpowiadającą stopniowi A5. Porównując tę częstość z częstością tornad o różnej sile (ryc. 18), widać wyraźnie, że nawet tornada o sile F0 mogą powodować zniszczenia stopnia A1 lub wyższego. Wynika to z odmiennego sposobu konstruowania obydwu skal – rozbudowane tornado na obszarze niezamieszkałym zostanie ocenione nisko na skali F, ale wysoko na skali A, a jednocześnie nawet niewielkie tornado w terenie zurbanizowanym może spowodować duże zniszczenia według skali F, ale na niewielkim obszarze, odpowiadającym niskiemu stopniowi skali A.

Rozkład przestrzenny liczby tornad według skali A (ryc. 13) przypomina przedstawiony wcześniej rozkład według skali F (ryc. 10). Największe zniszczenia obszarowe powodują tornada pojawiające się na terenie Nizin Wewnętrznych, w szczególności w granicach lokalnej alei tornad numer 2, gdzie zagęszczenie przypadków o stopniu A5 było największe. Pojedyncze tornada stopnia A5 pojawiają się także po wschodniej stronie Appalachów. Warto zauważyć, że na Wielkich Równinach występują zjawiska powodujące znacznie mniejsze zniszczenia obszarowe – dominują tam przypadki A0, z niewielkim udziałem przypadków A1,



Ryc. 12. Udział tornad powodujących określone zniszczenia obszarowe (według skali A) w Stanach Zjednoczonych (2000-2011)

Fig. 12. Share (%) of tornadoes causing certain area damage (in A-scale) in North America (2000-2011)



Ryc. 13. Rozkład przestrzenny tornad w Ameryce Północnej według skali A (2000-2011).

Fig. 13. Spatial distribution of tornadoes causing certain area damage (in A-scale) in North America (2000-2011)

a przypadki o stopniu wyższym niż A1 występują bardzo rzadko. Podobnie jak w przypadku skali F, w pasie pobraża Oceanu Atlantyckiego pojawiają się zjawiska o niższym stopniu niż w głębi kontynentu. Brak danych z terytorium Kanady uniemożliwia określenie, jak daleko na północy występują tornada stopnia A5.

W uwzględnionym 12-leciu jest wyraźnie widoczny trend wzrostowy udziału tornad powodujących zniszczenia obszarowe stopnia A1 i wyższego (tab. 7). W roku 2000 przypadki stopnia A0 stanowiły 61%, stopnia A1 – 27%, a stopni A2 – A5 – 12%. W roku 2011 udział przypadków stopnia A0 wynosił tylko 28%, stopnia A1 – 40%, a stopni A2-A5 – 32%. Przyczyna tej zmiany nie jest znana; możliwe jednak, że wiąże się ona ze zwiększeniem dokładności wyznaczania pasów zniszczeń tornad

Zróznicowanie przebiegu rocznego częstości zjawisk o różnym stopniu skali A ujawnia inną prawidłowość: w miesiącach letnich udział tych najslabszych (A0 i A1) jest największy (w czerwcu, lipcu i sierpniu jest bliski 90%), a w miesiącach jesiennych i zimowych – najmniejszy (w listopadzie, styczniu i lutym wynosi niepełna 70% – tab. 8). Wyjątek stanowi grudzień, w którym, podobnie jak latem, udział najslabszych tornad przekracza 80%. Jednak mimo że największy udział tornad o stopniach A2-A5 przypada na miesiące najniższej aktywności tornadogenetycznej, największy udział zjawisk o stopniach A4 i A5 przypada na miesiące najwyższej aktywności tornadogenetycznej.

Mimo tego, że Ameryka Północna jest kontynentem o największej częstości występowania oraz sile tornad na świecie, dzięki zaawansowanemu systemowi prognozowania oraz monitoringu niebezpiecznych zjawisk pogodowych, liczba osób rannych i zabitych w wyniku przejścia tornad jest stosunkowo mała. W latach 2000-2011 wystąpiło 14 776 przypadków tornad, w których nikt nie został ranny, 1005 przypadków, w których zostało ranne nie więcej niż 10 osób, 142 przypadki z liczbą osób rannych między 11 i 25 oraz 63 przypadki z liczbą osób rannych między 26 i 50. Tylko w 54 przypadkach liczba osób rannych przekroczyła 50, z czego w 29 przekroczyła 100 osób, w 7 – 200 osób, a w dwóch przypadkach wyniosła powyżej tysiąca osób. Brak jest informacji o liczbie osób rannych w 604 przypadkach w Kanadzie (ryc. 14). Pomijając dane pochodzące z Kanady, można stwierdzić, że w Stanach Zjednoczonych w latach 2000-2011 ponad 92% tornad nie spowodowało żadnych obrażeń u ludzi, a niewiele ponad 6% spowodowało poranienie od 1 do 10 osób. Przypadki z liczbą rannych większą niż 10 zdarzały się bardzo rzadko i stanowiły niecałe 2%.

W ciągu 12 lat w zaledwie 324 przypadkach zginęła przynajmniej jedna osoba, z czego w 4 przypadkach liczba ofiar przekroczyła 50, a tylko w jednym przekroczyła 100. Niestety brak jest danych z obszaru Kanady (ryc. 15). W Stanach Zjednoczonych w tym okresie 98% wszystkich tornad nie spowodowało żadnych ofiar śmiertelnych, a tylko 1,8% pochłonęło od 1 do 10 ofiar śmiertelnych. Przypadki o liczbie ofiar większej od 10 stanowiły zaledwie 0,2% wszystkich zdarzeń.

Porównując liczbę osób zabitych w rozpatrywanym 12-leciu z wartościami z lat 1950-2010 opisanymi przez Burdzy (2011), można zauważyć wyraźną tendencję

Tabela 7. Przebieg wieloletni udziału (%) tornad powodujących określone zniszczenia obszarowe (według skali A) w Ameryce Północnej (2000-2011)

Table 7. The course of a many years' share (%) of tornadoes causing certain area damage (in A-scale) in North America (2000-2011)

Rok Year	A0	A1	A2	A3	A4	A5
2000	60,6	27,2	9,6	2,0	0,5	0,0
2001	58,3	24,3	13,6	2,5	0,8	0,5
2002	55,9	30,1	9,4	2,7	1,4	0,5
2003	52,7	30,0	12,5	3,3	1,0	0,5
2004	57,8	27,4	12,1	2,3	0,2	0,2
2005	52,6	33,7	11,0	1,9	0,7	0,0
2006	45,6	34,6	14,4	3,7	1,2	0,5
2007	40,1	36,8	16,8	4,4	1,2	0,7
2008	38,0	34,9	19,3	5,1	1,4	1,3
2009	37,6	41,7	16,3	2,8	1,2	0,5
2010	36,9	38,0	17,9	4,7	1,7	0,8
2011	27,9	39,4	20,5	6,6	2,8	2,9

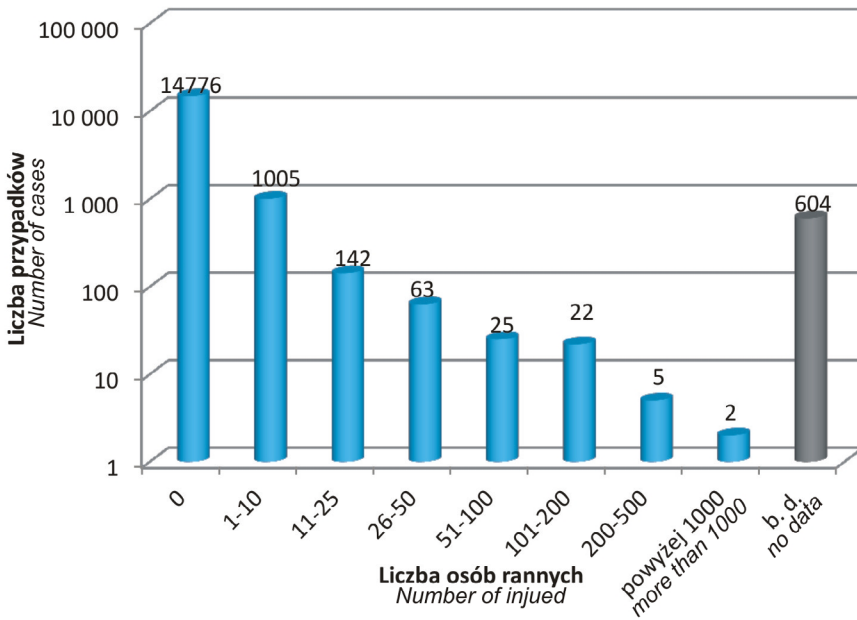
Źródło: opracowanie własne na podstawie danych Environment Canada i Storm Prediction Center.
Source: own work based on data from Environment Canada and Storm Prediction Center.

Tabela 8. Średni przebieg roczny udziału (%) tornad powodujących określone zniszczenia obszarowe (według skali A) w Ameryce Północnej (2000-2011)

Table 8. Average annual share (%) of tornadoes causing certain area damage (in A-scale) in North America (2000-2011)

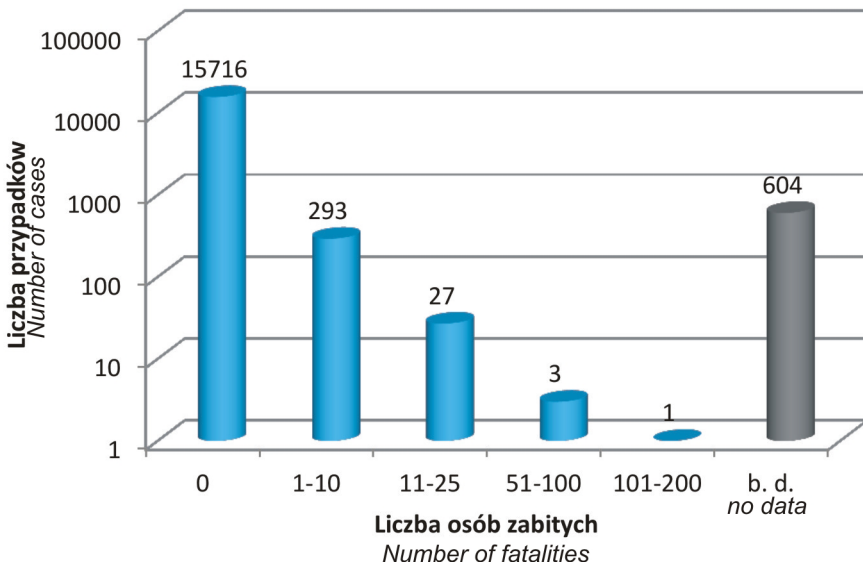
Miesiąc Month	A0	A1	A2	A3	A4	A5
I	31,9	35,9	24,1	5,6	1,9	0,5
II	31,5	34,8	21,6	8,1	2,0	2,0
III	35,9	36,8	19,4	5,6	1,8	0,5
IV	32,1	37,0	20,6	5,4	2,9	2,1
V	46,7	31,8	15,3	4,1	1,1	1,1
VI	58,3	30,1	9,6	1,5	0,3	0,2
VII	59,7	30,2	8,4	1,2	0,4	0,1
VIII	59,4	30,3	9,0	1,1	0,1	0,1
XIX	50,8	34,7	12,1	1,9	0,5	0,0
X	47,3	34,7	13,3	3,2	1,2	0,4
XI	36,3	32,8	21,9	6,6	1,7	0,6
XII	38,8	42,0	14,1	4,6	0,5	0,0

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych Environment Canada i Storm Prediction Center.
Source: own work based on data from Environment Canada and Storm Prediction Center.



Ryc. 14. Liczba tornad powodujących określoną liczbę osób rannych w Ameryce Północnej (2000-2011)

Fig. 14. Number of tornadoes causing certain number of injured in North America (2000-2011)



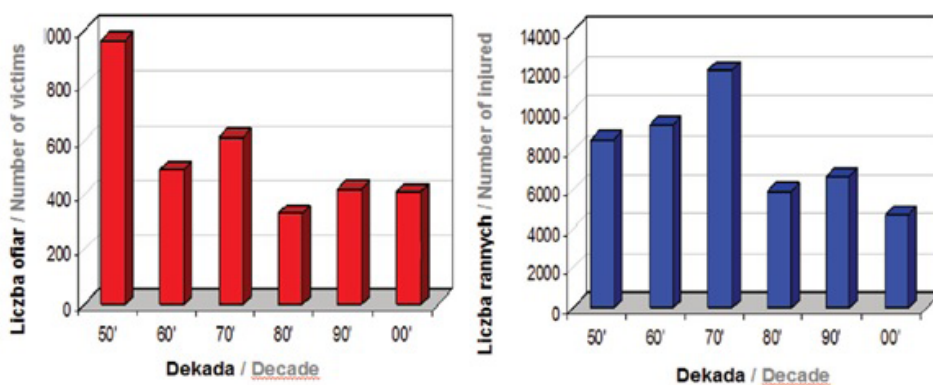
Ryc. 15. Liczba tornad powodujących określoną liczbę ofiar śmiertelnych w Ameryce Północnej (2000-2011)

Fig. 15. Number of tornadoes causing certain number of fatalities in North America (2000-2011)

spadkową w obydwu seriach danych (ryc. 15 i 16). Jak słusznie zauważyła Burdzy, wiąże się ona przede wszystkim z udoskonaleniem systemów ostrzegania przed tornadami. Warto również dodać, że ogromną rolę odgrywało rozpowszechnienie radia i telewizji, szczególnie na obszarach słabiej zaludnionych.

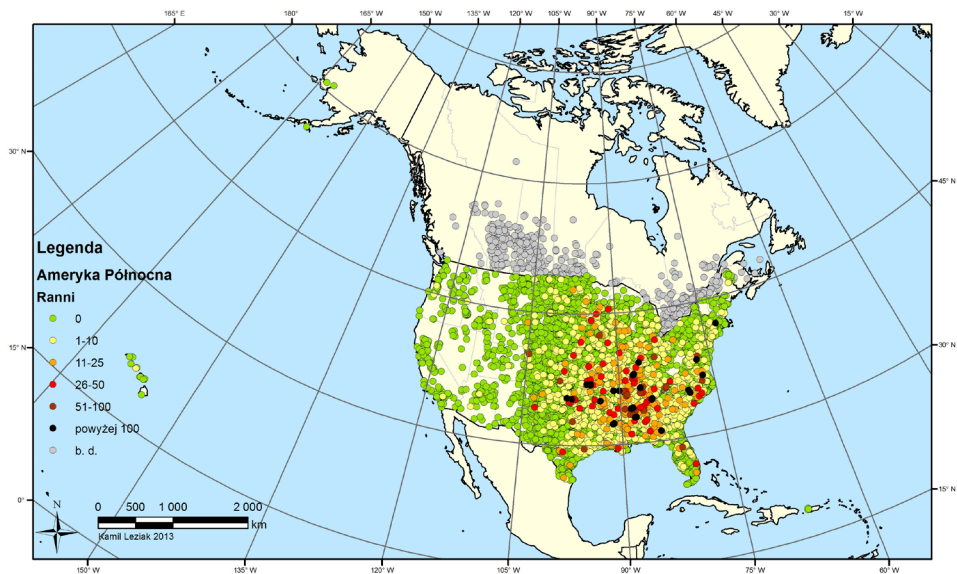
Rozkład przestrzenny przypadków, w których były osoby ranne, przypomina rozkład przypadków według stopni skali A. Niemal wszystkie tornada powodujące straty w ludziach występują na Nizinach Wewnętrznych oraz Nizinie Atlantyckiej i na Florydzie (ryc. 17). Na obszarze Wielkich Równin oraz na zachodnim wybrzeżu kontynentu pojawiają się jedynie pojedyncze przypadki, w których liczba rannych nie przekraczała 10 osób. Jeszcze bardziej skupiony jest rozkład tornad z ofiarami śmiertelnymi (ryc. 18). Wszystkie znane przypadki z osobami zabitymi mają miejsce na Nizinach Wewnętrznych i wschodnim krańcu Wielkich Równin – na wschód od południka 110°W, głównie na obszarze lokalnych alei tornad numer 1, 2 i 3. Tornada na wybrzeżu Oceanu Atlantyckiego nie powodują ofiar śmiertelnych – prawdopodobnie dlatego, że większość z nich (zwłaszcza w południowej części kontynentu) jest związana z cyklonami tropikalnymi; w czasie zbliżania się cyklonu do lądu ludność zazwyczaj jest ewakuowana, a w przypadku wystąpienia ofiar praktycznie niemożliwe jest jednoznaczne zidentyfikowanie, czy zginęły wskutek wiatru związanego z samym tornadem czy z cyklonem tropikalnym.

Straty materialne spowodowane tornadami w istotny sposób wpływają na gospodarkę regionu, w którym wystąpiły. Jednak nawet w Stanach Zjednoczonych, które mają najbardziej szczegółową bazę danych o tych zjawiskach, jedynie w 30% przypadków podana jest informacja o wartości strat materialnych powstałych w wyniku przejścia tornada. Nawet wtedy są to tylko szacunkowe



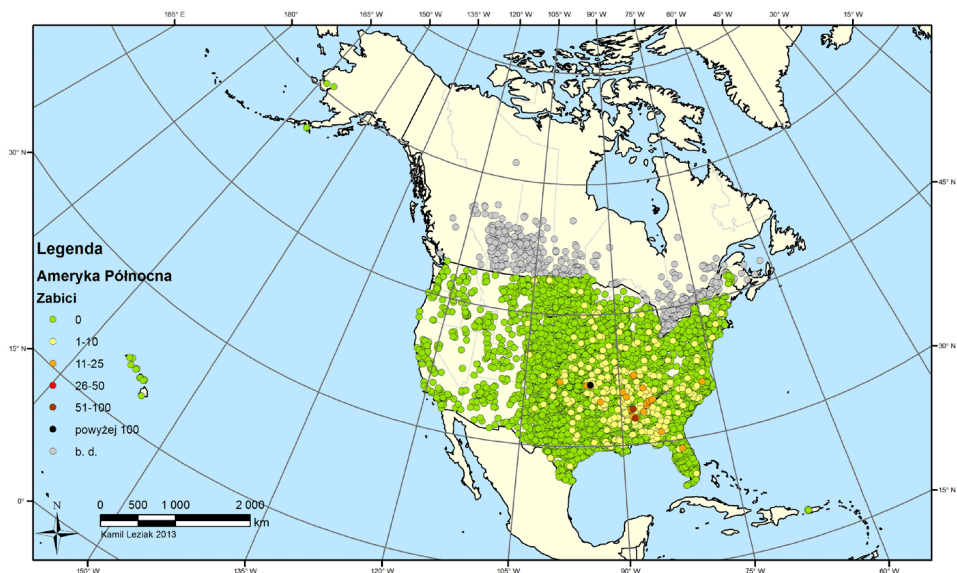
Ryc. 16. Liczba osób zabitych i rannych w wyniku tornad w Stanach Zjednoczonych (1950-2009) (Burdzy 2011, s. 499)

Fig. 16. Number of injured and killed by tornadoes in USA (1950-2009) (Burdzy 2011, p. 499)



Ryc. 17. Rozkład przestrzenny tornad powodujących różną liczbę osób rannych w Ameryce Północnej (2000-2011)

Fig. 17. Spatial distribution of tornadoes causing a certain number of injured in North America (2000-2011)



Ryc. 18. Rozkład przestrzenny tornad powodujących różną liczbę ofiar śmiertelnych w Ameryce Północnej (2000-2011)

Fig. 18. Spatial distribution of tornadoes causing certain number of fatalities in North America (2000-2011)

wartości, oparte na wyliczeniach firm ubezpieczeniowych, władz lokalnych i samych poszkodowanych, których dobytek uległ zniszczeniu. Ze względu na wymienione czynniki oraz charakter danych źródłowych, powinny one być traktowane jedynie jako szacunki.

Spośród przypadków o znanej wartości strat materialnych najczęściej tornad spowodowało straty od 30 do 300 tysięcy dolarów (1639 przypadków) oraz od 3 do 30 tysięcy dolarów (1460 przypadków). W 805 przypadkach nie zgłoszono żadnych strat materialnych w pasie zniszczeń, co może być związane z tym, że tornado przeszło przez obszar niezamieszkały lub będący nieużytkiem. W 552 przypadkach straty materialne wyniosły od 300 tysięcy do 3 milionów dolarów, w 147 przypadkach od 3 do 30 milionów dolarów. W 28 przypadkach straty materialne przekroczyły 30 milionów dolarów.

Wielkość strat materialnych zależy przede wszystkim od siły tornada i miejsca jego pojawienia się. Największe szkody powodują tornada o dużej sile, pojawiające się nad obszarami gęsto zaludnionymi, zwłaszcza miastami. Zniszczenia w miastach, związane z uszkodzeniem budynków, pojazdów oraz infrastruktury komunikacyjnej i sieciowej, często sięgają kilkudziesięciu milionów dolarów. Na obszarach o mniejszej gęstości zaludnienia i rozproszonej zabudowie straty na ogół wynoszą od kilkuset tysięcy do kilku milionów dolarów. Może się jednak zdarzyć, że na obszarach użytkowanych rolniczo wartość szkód wynikająca ze zniszczenia upraw oraz sprzętu nawadniającego (w szczególności irygatorów kołowych typu „pivot”) są większe niż zniszczenia budynków lub pojazdów (Guyer i Moritz 2003).

PODSUMOWANIE

Tornada są powszechnym zjawiskiem w Ameryce Północnej, o zróżnicowanym rozkładzie przestrzennym i częstości. Chociaż wielu badaczy (Petterssen 1964; Linacre, Geerts 1997; Schaeffer, Edwards 1999; Burdzy 2010) wskazuje tzw. Aleję Tornad jako obszar najczęściej pustoszony przez to zjawisko, w latach 2000-2011 jego znaczenie zmalało na rzecz innych obszarów „lokalnych alei tornad”. W rozpatrywanym 12-leciu najczęściej tornad pojawiło się w USA w stanach Texas, Kansas, Alabama, Missouri i Oklahoma, a w Kanadzie w prowincjach Alberta, Saskatchewan, Manitoba i Ontario. Najczęściej tornada w Stanach Zjednoczonych występowały w maju i kwietniu, a w Kanadzie w czerwcu i lipcu. W latach 2000-2011 nie wystąpił trend wzrostowy ani spadkowy liczby tornad w Ameryce Północnej; trend wzrostowy był natomiast widoczny w latach 1950-2009, co mogło mieć związek nie ze wzrostem częstości tornad, ale lepszymi możliwościami ich detekcji (por. Burdzy 2011).

W Ameryce Północnej występują najsilniejsze tornada na świecie, ale przeważają (87%) te najsłabsze, osiągające stopień F0 lub F1 w skali Fujity. Przypadki o sile F2 i wyższej mają miejsce na obszarze największej aktywności tornado-genetycznej, tj. Nizinach Wewnętrznych. Udział zjawisk o sile F1 lub większej

jest największy w miesiącach o najniższej aktywności tornadogenetycznej (listopad-styczeń). Chociaż tornada są jednymi z najbardziej niebezpiecznych zjawisk pogodowych, to ponad 46% z nich osiągnęło najniższy stopień (A0) w skali zniszczeń obszarowych, a mniej niż 1% spowodował zniszczenia najwyższego stopnia (A5). Większość tornad (92%) nie spowodowało ofiar w ludziach, ale w dwóch przypadkach liczba osób rannych przekroczyła 1000.

Literatura

- Battan L.J., 1979, *Fundamentals of Meteorology*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs.
- Broyles C., Crosbie C., 2004, Evidence of smaller tornado alleys across the United States based on a long track F3 to F5 tornado climatology study from 1880 to 2003, 22nd Conference on Severe Local Storms, 3-8 X 2004, Hyannis.
- Burdzy J., 2010, Zjawisko masowego występowania tornad w Stanach Zjednoczonych i w wybranych rejonach świata, praca magisterska wykonana w Zakładzie Klimatologii Wydziału Geografii i Studiów Regionalnych Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa.
- Burdzy J., 2011, Tornada w Stanach Zjednoczonych w latach 1950-2009, *Prace i Studia Geograficzne* 47, 493-501.
- Chromow S., 1977, *Meteorologia i klimatologia*, PWN, Warszawa.
- Cook A.R., Schaefer J.T., 2008, The Relation of El Niño–Southern Oscillation (ENSO) to Winter Tornado Outbreaks, *Monthly Weather review* 136 (8), 3121-3137.
- Crove P.S., 1987, *Problemy klimatologii ogólnej*, PWN, Warszawa.
- Dean A.R., Imy D.A., 2006, A Look at the Tornado Report and Watch Climatology for the Continental United States from 1986-2005, 23rd Conference on Severe Local Storms, 5-10 XI 2006, St. Luis.
- Etkin D., Soren E.B., Shabbar A., Joe P., 2001, Tornado climatology of Canada revisited: tornado activity during different phases of ENSO, *International Journal of Climatology* 21, 915-938.
- Guyer J.L., Davies J.M., 2006, Environment Characteristics Associated with Tornado Events near Closed Cold Core 500 MB Lows, 23rd Conference on Severe Local Storms, 5-10 XI 2006, St. Luis.
- Guyer J.L., Moritz M.L., 2003, On issues of tornado damage assessment and F-scale assignment in agricultural areas, 1st Symposium on F-Scale and Severe Weather Damage Assessment, 8-13 II 2003, Long Beach.
- Linacre E., Geerts B., 1997, *Climate and Weather Explained*, Routledge, New York.
- McCarthy D., Schaefer J.T., 1999, 1998, Weather: tornadoes, *Weatherwise*, III/IV 1999, 38-48.
- McCarthy D., Schaefer J.T., 2004, Tornado trends over the past thirty years, 14th Conference on Applied Climatology, 10-15 I 2004, Seattle.
- Pędzioł A., 2003, Dotyk Tornada, *Wiedza i Życie* 9, 60-65.
- Petterssen S., 1964, *Zarys meteorologii*, PWN, Warszawa.
- Schaefer J.T., Edwards R., 1999, The SPC Tornado/Severe Thunderstorm Database, 11th Conference on Applied Climatology, 10-15 I 1999, Dallas.
- Schaefer J.T., Marzban C., 2000, Tornadoes in the United States as Related to the Tropical Pacific Sea Surface Temperature, 20th Conference on Severe Local Storms, 11-15 IX 2000, Orlando.

Schaefer J.T., Tatom F.B., 1998, The Relationship between El Nino, La Nina and United States Tornado, 19th Conference on Severe Local Storms, 14-18 IX 1998, Minneapolis.
Thompson R.L., Vescio M.D., 1998, The Destruction Potential Index - a method for comparing tornado days, 19th Conference on Severe Local Storms, 14-18 IX 1998, Minneapolis.

Summary

Tornadoes are the most dangerous meteorological phenomena on Earth. Although they occur on every continent except of Antarctica, the most dangerous cases take place in North America, in the area known as 'The Tornado Alley'. In the period of 2000-2011 more than 16 thousands tornadoes occurred in the USA (mostly in Texas and Kansas) and more than 500 occurred in Canada (mostly in Alberta, Saskatchewan, Manitoba and Ontario). Both spatial distribution and number of tornado cases vary during the year: the highest number of cases occurs in Spring (in April and May), and they are situated on the whole mid-east and east territory of the United States. In Summer the number of cases is lower, but due to stronger advection from south their occurrence zone shifts to north, to the northern part of Great Plains and southern part of Canada. In Autumn convection weakens and number of cases decrease rapidly – vast majority of Autumn tornadoes is related to tropical cyclones occurring on the Atlantic Ocean. In Winter tornadoes occur very rarely, only on certain coastal areas in south-east part of the continent. There was not any visible trend in yearly number of cases, in years 2000-2011. Although tornadoes of every level of the Fujita scale were observed in the mentioned period, more than 60% of them was the weakest phenomena, rated as F0; less than 30% was rated as F1 and only 0,1% of all cases was rated as the highest level in Fujita scale – F5. The strongest tornadoes occurred in south-east part of continent, in areas of 'Local Tornado Alleys'. Rating tornadoes damage with Damage Area Scale (A-scale) revealed that in years 2000-2011 the share of A1 cases increased, while the share of A0 cases decreased. Most of A4+ cases occurred in Summer. Despite the fact that North America is a continent where the strongest and most dangerous tornadoes occur, both: number of injured and number of people killed by tornadoes are relatively low. This is because of high-tech monitoring and warning system implemented in USA and Canada.

