



Elżbieta Kobjek

Procesy geodynamiczne w przestrzeni zurbanizowanej

Uwarunkowania – zagrożenia – zapobieganie



Procesy geodynamiczne w przestrzeni zurbanizowanej

Uwarunkowania – zagrożenia – zapobieganie



WYDAWNICTWO
UNIWERSYTETU
ŁÓDZKIEGO

Elżbieta Kobojek

Procesy geodynamiczne w przestrzeni zurbanizowanej

Uwarunkowania – zagrożenia – zapobieganie

 **WYDAWNICTWO
UNIwersytetu
ŁÓDZKIEGO**

Łódź 2019

Elżbieta Kobołek – Uniwersytet Łódzki, Wydział Nauk Geograficznych
Instytut Zagospodarowania Środowiska i Polityki Przestrzennej
Zakład Fizjografii i Planowania Przestrzennego, 90-142 Łódź, ul. Kopcińskiego31

RECENZENT

Zbigniew Podgórski

REDAKTOR INICJUJĄCY

Beata Koźniewska

OPRACOWANIE REDAKCYJNE

Zuzanna Hejniak

SKŁAD I ŁAMANIE

Munda – Maciej Torz

KOREKTA TECHNICZNA

Leonora Gralka

PROJEKT OKŁADKI

Katarzyna Turkowska

Zdjęcie wykorzystane na okładce: © Depositphotos.com/milla74

© Copyright by Elżbieta Kobołek, Łódź 2019

© Copyright for this edition by Uniwersytet Łódzki, Łódź 2019

Wydane przez Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego
Wydanie I. W.09291.19.0.M

Ark. wyd. 16,5; ark. druk. 16,875

ISBN 978-83-8142-684-8

e-ISBN 978-83-8142-685-5

Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego

90-131 Łódź, ul. Lindleya 8

www.wydawnictwo.uni.lodz.pl

e-mail: ksiegarnia@uni.lodz.pl

tel. (42) 665 58 63

SPIS TREŚCI

1. Wprowadzenie	9
2. Trzęsienia ziemi i tsunami	15
2.1. Przebieg trzęsienia ziemi	15
2.2. Skale trzęsienia ziemi	19
2.3. Geneza trzęsienia ziemi i główne obszary sejsmiczne	22
2.4. Wstrząsy wywołane działalnością człowieka	25
2.5. Skutki trzęsienia ziemi i straty w obszarach zurbanizowanych ..	26
2.6. Przewidywanie trzęsień ziemi i próba ograniczenia zniszczeń ..	31
2.6.1. Zwiastuny trzęsień ziemi	33
2.6.2. Działania wpływające na ograniczenie strat	34
2.7. Przyczyny i skutki tsunami	38
3. Procesy wulkaniczne	45
3.1. Przebieg procesów wulkanicznych	46
3.2. Geneza i występowanie wulkanów	49
3.3. Główne rodzaje zagrożenia wulkanicznego dla obszarów zurba- nizowanych	50
3.3.1. Spływy piroklastyczne i lahary	53
3.3.2. Spływ lawy	59
3.4. Przewidywanie erupcji i próby ograniczenia ich negatywnych skutków	61
3.4.1. Zabezpieczenia przed niszczącymi laharami	64
3.4.2. Antropogeniczne oddziaływanie na potok lawy	66
3.4.3. Edukacja społeczeństwa na temat zagrożenia	67
4. Procesy na wybrzeżu morskim	69
4.1. Dynamika wód morskich kształtujących wybrzeże	72
4.2. Wybrzeża płaskie	75
4.2.1. Naturalne procesy kształtujące plaże	76
4.2.2. Plaża i pas wydmy w mieście	78
4.2.3. Wyspy barierowe i formy pokrewne	82
4.2.4. Zagospodarowanie wysp barierowych	85
4.3. Wybrzeża wysokie	91
4.3.1. Rozwój klifu w warunkach naturalnych	91

4.3.2. Miasta na wybrzeżu klifowym	94
4.4. Sposoby ochrony wybrzeża i ich skutki	101
5. Procesy krasowe i inne przyczyny osiadania terenu	109
5.1. Procesy krasowe	110
5.1.1. Istota procesów krasowych i główne formy mające wpływ na działalność człowieka	110
5.1.2. Wpływ działalności człowieka na przebieg procesów krasowych oraz osiadanie i zapadanie się terenów	116
5.1.3. Możliwości ograniczenia strat spowodowanych osiadaniem i zapadaniem się powierzchni na obszarach krasowych	125
5.2. Osiadanie terenu jako skutek poboru wód podziemnych w obszarach pozakrasowych	128
5.3. Zapadanie i osiadanie terenów w zasięgu podziemnych kopalni	133
6. Procesy fluwialne	137
6.1. Elementy doliny rzecznej i istota procesów fluwialnych	138
6.2. Historia wykorzystania rzeki i doliny w mieście	143
6.3. Przekształcenia rzek i zlewni w miastach oraz ich wpływ na procesy fluwialne	146
6.4. Duże rzeki i ich doliny w miastach	155
6.5. Mała rzeka w mieście	160
6.6. Powódź miejska	164
6.7. Rewitalizacja rzek w mieście	166
7. Ruchy masowe i splukiwanie	173
7.1. Mechanizmy fizyczne ruchów masowych	174
7.2. Rodzaje i przebieg ruchów masowych	176
7.3. Osuwiska w obszarach zurbanizowanych i ich skutki	184
7.4. Monitoring i ochrona obszarów zagrożonych osuwiskami	195
7.5. Splukiwanie w obszarach miejskich	201
8. Wietrzenie skał i kamieni budowlanych	207
8.1. Mechanizmy wietrzenia skał	207
8.2. Destrukcyjna rola wietrzenia w budownictwie	212
8.2.1. Skutki wietrzenia mrozowego	213
8.2.2. Wpływ wysokich temperatur	218
8.2.3. Skutki wietrzenia solnego	219
8.2.4. Wpływ procesów biologicznych na kamień budowlany ..	224
8.3. Rola zanieczyszczenia powietrza w przyśpieszeniu procesów wietrzeniowych	226

Spis treści	7
8.4. Tempo wietrzenia kamieni budowlanych	229
8.5. Wpływ wietrzenia na zmniejszenie nośności podłoża budowlanego	232
9. Podsumowanie	237
Spis ilustracji i tabel	245
Literatura	253

1. WPROWADZENIE

Obecnie w miastach mieszka już 54% ludności świata, podczas gdy w 1950 r. było to tylko 30%. Zgodnie z prognozami w 2050 r. aż 66% ludności będą stanowili mieszkańcy miast (*Revision of The World Urbanization Prospects 2014*). Tak duży wzrost wartości wskaźnika urbanizacji łączy się ze zwiększaniem przestrzeni zurbanizowanych i zajmowaniem pod zabudowę nowych terenów. Proces ten będzie ogromnym wyzwaniem dla zarządzających miastami w kwestiach społecznych i technicznych np. transportu, ale także przyczyną konfliktów na płaszczyźnie zabudowa – środowisko przyrodnicze. Przewodnymi elementami przestrzeni zurbanizowanych są struktury wprowadzone przez człowieka, np. zwarta zabudowa i duży udział terenów zakrytych. W wielu miejscach intensywność dokonywanych zmian jest tak duża, że sprawia wrażenie uniezależnienia się od środowiska przyrodniczego. Z analizy dokumentów planistycznych wynika, że elementy przyrodnicze są bardzo ważne w strukturze miasta, ale powinny być stabilne – niezmiennie. Jednak cechą charakterystyczną przyrody jest zmienność, czasem nawet bardzo gwałtowna. W zarządzaniu współczesnym miastem podkreślane są także odniesienia do idei ekorozwoju i rozwoju zrównoważonego, to znaczy w zgodzie ze środowiskiem przyrodniczym (Markowski 2008; Rogall 2010). Dotyczy to jednak głównie jakości powietrza, dostępności terenów zieleni i „błękitnej wstęgi”, czyli rzeki (por. Lewińska 2000; Burchard-Dziubińska i Rzeńca 2010; Kosmala 2011; Nyka 2013).

W początkowym okresie powstawania miast warunki geomorfologiczne należały do najważniejszych elementów decydujących o ich lokalizacji i rozwoju przestrzennym. Doceniano szczególnie znaczenie rzeźby terenu, obecności wód i dobrych warunków klimatycznych (Tołwiński 1948; Czarnecki 1964; Kulesza 2001). Małe miasta były doskonale dostosowane do lokalnych warunków przyrodniczych, a procesy geomorfologiczne zazwyczaj im nie zagrażały. Przestrzeń otoczona murami miejskimi była zakresłana odpowiednio do planowanej wielkości miasta, np. w średniowieczu przewidywano, że w mieście będzie mieszkało kilkanaście-kilkadziesiąt tysięcy osób. Dopiero w końcu XVIII w. miasta wykroczyły poza swoje mury, ale do końca XIX w. zajmowały jeszcze małe powierzchnie (Tołwiński 1948). W XX w. zachodziły już intensywne zmiany w przestrzeni miejskiej, które szczególnie nasiliły się w latach 90. (Ślodyczk 2012). Rozwój przestrzenny spowodował zajmowanie coraz to nowych terenów przyrodniczych, wcześniej nieprzewidzianych do zabudowy. Rozwinęło się budownictwo zarówno mieszkaniowe, logistyczne, jak i biznesowe. Kierując się minimalizacją

wysiłku, człowiek zagospodarowuje chętniej tereny łatwiejsze do zabudowy, tańsze inwestycyjnie i obiecujące wyższe profity. Z tego względu cechą charakterystyczną dużych i szybko rozwijających się miast jest koncentracja w nich funkcji rozwojowych przy jednocześnie postępującej dekoncentracji zagospodarowania. W ten sposób powstają rozległe obszary zurbanizowane. W licznych krajach udział terenów zabudowanych wzrasta nieproporcjonalnie do przyrostów ludnościowych, zmniejszając powierzchnie obszarów aktywnych przyrodniczo (Chmielewski 2012). Obszary zurbanizowane zajmują ogromną część przestrzeni, ingerując na dużą skalę w środowisko przyrodnicze. Dodatkowo w niektórych przypadkach rozwój przestrzenny miast powoduje włączenie w ich obręb terenów z aktywnymi procesami geodynamicznymi, np. laharami, powodziami, osuwiskami. Silnym przekształceniem funkcjonalnym podlegają obszary, których zagospodarowanie nigdy wcześniej nie było brane pod uwagę, o czym decydowały głównie czynniki przyrodnicze, np. obecność osadów ilastych lub torfowych w podłożu, niestabilnych wysokich stoków (Kobojek 2013). Dawniej obszary takie uważano za niebudowlane. Czasem zainteresowanie tanimi gruntami pod zabudowę jest tak duże, że nawet plany miejscowe dopuszczają sytuowanie zabudowy na obszarach zagrożonych występowaniem procesów geodynamicznych. Zagospodarowanie tych terenów rodzi liczne konflikty i jest przyczyną dużych strat gospodarczych. Dlatego wyznaczane są strefy zagrożeń i podejmowane próby ochrony.

Powierzchnia Ziemi jest środowiskiem dynamicznym poddanym wpływom różnorodnych procesów geomorfologicznych, z których jedne zależą bardziej od uwarunkowań geologicznych, a inne od klimatycznych (Easterbrook 1993; Allen 2000; Burbank i Anderson 2001; Migoń 2006). Niektóre z nich mają gwałtowny przebieg, np. powódzie, a inne, jak wietrzenie, są tak powolne, że niedostrzegalne w skali ludzkiego życia. Procesami geomorfologicznymi rządzą prawa przyrody, a człowiek nie jest w stanie ich zmienić ani ustanowić nowych, ale swoją działalnością może wpłynąć na intensywność niektórych z tych procesów, np. przyspieszyć obieg wody i tempo erozji wodnej albo ograniczyć zasięg i tempo wystąpienia małego osuwiska. Ponieważ wszystkie procesy geodynamiczne w obszarach zurbanizowanych rozpatrywane są w kategorii zagrożenia, człowiek szczególnie intensywnie próbuje ograniczyć ich zasięg, zmienić tempo i charakter oddziaływania. Czasem wydaje się, że to antropogeniczne środowisko jest niezależne od dynamicznych procesów przyrodniczych. Jednak intensywny rozwój miast w ostatnich kilkudziesięciu latach – przy małym zainteresowaniu lub nawet pomijaniu warunków przyrodniczych – doprowadził w wielu z nich do dużych strat.

W dobie globalizacji dominuje tendencja do ujednolicania nie tylko form zarządzania, ale także zagospodarowania różnorodnych terenu. Takie ujednolicenia nie są jednak dobre czy pożądane w przypadku przebiegu i skutków niektórych procesów geodynamicznych. Nawet w skali kontynentów nieco inne procesy są przyczyną zagrożeń i dużych strat. W Europie, Ameryce i Australii

najwięcej strat w XX w. przyniosły nagle zjawiska pogodowe, np. burze, trąby powietrzne czy tornada; następnie procesy geodynamiczne, czyli trzęsienia ziemi i powodzie (tab. 1.1). W Azji i Afryce dominowały straty spowodowane przez powodzie (w Afryce aż 54%) i nagle zjawiska atmosferyczne. Dodatkowo w Azji aż 17% strat łącznie jest z oddziaływaniem tsunami. Nie zawsze przyczyny nieszczęść wskazywane jako przeważające dla rozległych obszarów na poszczególnych kontynentach są dominujące w przestrzeniach zurbanizowanych. W miastach dodatkowym problemem jest np. osiadanie gruntów. Ważne są lokalne uwarunkowania przyrodnicze, które czasem wręcz determinują sposoby użytkowania i zagospodarowania terenów. Szczególnie dobrze uwidaczniają się te różnice w przypadku użytkowania dolin rzecznych w różnych strefach klimatycznych, wykorzystania brzegów morskich w zależności od ich budowy geologicznej, jeszcze inne trudności wynikają z zabudowy obszarów krasowych.

Tabela 1.1. Przyczyny nieszczęść i strat na świecie w latach 1900–1999

Przyczyny	Kontynent (udział w procentach)				
	Europa	Azja	Ameryka	Afryka	Australia i Oceania
Trzęsienia ziemi	30	14	16	16	17
Wybuchy wulkanów	3	3	3	2	3
Tsunami	–	17	–	–	–
Powodzie	27	35	30	54	27
Osuwiska	4	6	8	3	3
Nagle zjawiska atmosferyczne, np. burze, tornada	36	25	43	25	49

Źródło: na podstawie Alcántara-Ayala 2002.

Zagadnienia środowiska przyrodniczego w planowaniu przestrzennym obszarów zurbanizowanych dotyczą dwóch podstawowych grup. Pierwsza to ochrona systemów przyrodniczych miast, w tym różnorodności biologicznej i cennych ekosystemów, zasobów wodnych i stabilności warunków hydrologicznych oraz warunków bioklimatycznych. Druga grupa obejmuje zagadnienia minimalizacji różnego rodzaju zagrożeń związanych z procesami geomorfologicznymi. Zagadnienia z tej drugiej grupy wymagają bardzo dobrego poznania lokalnych uwarunkowań przyrodniczych. Znajomość praw rządzących naturalnymi procesami geomorfologicznymi na Ziemi jest potrzebna nie tylko do zrozumienia funkcjonowania środowiska, ale także do wyznaczania kierunków racjonalnego, zrównoważonego zagospodarowania. Źle zdiagnozowane procesy geodynamiczne w obszarach zurbanizowanych mogą być przyczyną konfliktów przestrzennych,

a przede wszystkim poważnych strat i kosztów związanych z usuwaniem negatywnych skutków tych procesów, a czasem odbudowy zniszczonej infrastruktury. Ważne jest dostosowanie sposobu i intensywności zagospodarowania terenu do jego naturalnych predyspozycji, walorów i odporności. Konieczne są przemyślane rozwiązania planistyczne dla obszarów potencjalnego zagrożenia procesem geodynamicznym.

Wiele procesów geodynamicznych zależne jest od wielkości opadów deszczu, a większość scenariuszy globalnych zmian klimatu zakłada do 2100 r. wzrost średniej rocznej temperatury powietrza o 1–3,5°C w umiarkowanej strefie klimatycznej (Wibig 2012). Zmianom tym ma towarzyszyć wzrost częstotliwości i intensywności opadów ulewnych, susz i powodzi. W związku z tym przewiduje się wzrost efektywności procesów o charakterze sekularnym. W wielu obszarach, np. na stokach wulkanów zbudowanych z popiołów, terenach ze skał krasowiejących, wysokich stokach zbudowanych z podatnego materiału, przewidywany jest wzrost natężenia procesów geodynamicznych. Skutki tych procesów powinny być uwzględniane w planach zagospodarowania przestrzennego (Thompson i Perry 1997).

Celem opracowania jest analiza wybranych procesów geodynamicznych i ich wpływu na funkcjonowanie obszarów zurbanizowanych. Niektóre z nich są zupełnie niezależne od działalności i woli człowieka, a inne zostały całkowicie przekształcone w przestrzeni miejskiej – zmieniły swoją naturę lub tempo. Nie spodziewane trzęsienie ziemi lub erupcja wulkaniczna wyzwalają energię potężniejszą, niż może wytworzyć człowiek. Sporadyczne katastrofalne trzęsienia ziemi wzbudzają duże zainteresowanie, ponieważ zwykle są przyczyną wielu ofiar i strat materialnych. W obszarach wulkanicznych zagrożenie związane jest ze sływem lawy i popiołów. Dla miast na wybrzeżu niebezpieczne są sztormy, tsunami, abrazia i podnoszenie się poziomu morza. Duże znaczenie ma osiadanie gruntów w obszarach zurbanizowanych związane z rozpuszczaniem wapieni oraz nadmiernym poborem wód podziemnych. Większość miast powstała nad rzekami, dlatego skala przekształceń procesów fluwialnych jest ogromna. Jedną z coraz ważniejszych kategorii zagrożenia są ruchy masowe, takie jak sływy i osuwiska. Występują też procesy powolne z natury, o długim czasie oddziaływania, ale szeroko rozpowszechnione, np. wietrzenie kamienia budowlanego. Zwrócono uwagę na geologiczną skalę przebiegu procesów geodynamicznych (także prognozowania tych procesów) w zestawieniu z ludzką skalą planowania i odczuwania zagrożenia. W rozwoju i krajobrazie miasta doceniane są stabilne elementy geomorfologiczne np. sylwetka dostojnego wulkanu przyczynia się do rozwoju turystyki, a rzeka traktowana jest jako woda potrzebna do rekreacji w mieście, ale podejmowane są prace mające na celu eliminowanie z natury dynamicznych procesów geomorfologicznych.

W przypadku każdego procesu geodynamicznego starano się przedstawić jego naturalne uwarunkowania i mechanizmy, obszary największego zagrożenia,

skalę modyfikacji spowodowanych przez człowieka, przebieg procesu w przestrzeni zurbanizowanej i jego skutki, sposoby zapobiegania lub ograniczania negatywnych skutków.

Praca została przygotowana na podstawie materiałów zgromadzonych przez ponad dziesięć lat badań i obserwacji środowiska przyrodniczego oraz przebiegu procesów geodynamicznych w miastach w różnych częściach świata. Przeanalizowano położenie topograficzne, geologiczne i przebieg procesów geomorfologicznych dla 130 miast położonych w Europie, Ameryce Północnej i Południowej, Azji i północnej Afryce. Analizowano pozycje literatury dotyczące badanego problemu oraz dokumenty planistyczne dla wybranych miast.

2. TRZĘSIENIA ZIEMI I TSUNAMI

Trzęsienia ziemi należą do najgroźniejszych naturalnych zjawisk geodynamicznych na Ziemi. Ich przebieg jest niezależny od woli człowieka, a gdy nawiedzają obszary gęsto zamieszkałe, skutki są szczególnie dramatyczne. Szacuje się, że około 403 mln ludzi żyje w miastach, w których występuje znaczące zagrożenie sejsmiczne (Achenbach 2010). Do miast takich należą niektóre bardzo duże metropolie np.: San Francisco, Los Angeles, Tokio, Sztambuł, Teheran, Meksyk, Caracas, New Delhi. W Azji na terenach z ryzykiem wystąpienia trzęsienia ziemi o sile 8 stopni w skali Richtera (na obszarze 100 km²) rozwinęło się 38 milionowych miast (Lisowski 1997). W strefach sejsmicznych położonych jest także bardzo wiele małych miast. Silne podwodne trzęsienia ziemi dodatkowo generują groźne tsunami, które powodują wyjątkowo duże straty na wybrzeżu. W latach 1994–2013 prawie pół miliona ludzi na całym świecie zmarło w wyniku trzęsień ziemi, ponad 118 mln zostało dotkniętych katastrofą, a 250 tys. zgonów było skutkiem tsunami (Giles 2017). Zagrożenie trzęsieniami ziemi jest ważnym elementem w planowaniu przestrzennym i powinno być brane pod uwagę przy wznoszeniu nowej zabudowy.

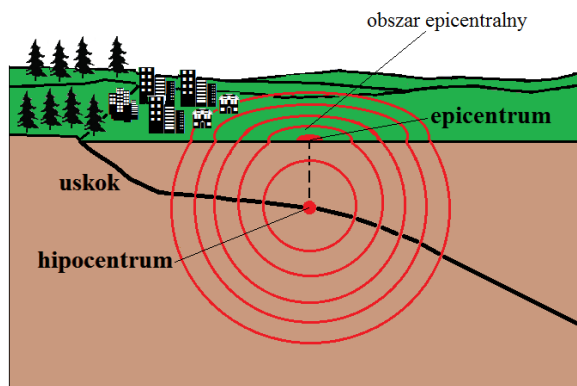
Coraz częściej działalność człowieka generuje drgania lub wstrząsy ziemi, ale ich skala jest nieporównywalnie mniejsza w stosunku do naturalnych trzęsień ziemi. Stwarzają one jednak duże zagrożenie, ponieważ występują najczęściej w obszarach zurbanizowanych położonych poza strefami sejsmicznymi.

2.1. Przebieg trzęsienia ziemi

Trzęsienie ziemi jest efektem nagłego rozładowania naprężeń skumulowanych w litosferze, w wyniku czego wyzwala się ogromna ilość energii, która następnie rozchodzi się w postaci fal sejsmicznych koncentrycznie od ogniska trzęsienia i dociera także do powierzchni terenu. Ognisko trzęsienia ziemi (hipocentrum) jest miejscem przesunięcia skał na głębokości zwykle do kilkudziesięciu km. Punkt na powierzchni terenu, znajdujący się bezpośrednio nad ogniskiem, do którego fale docierają najwcześniej, nosi nazwę epicentrum (ryc. 2.1).

Fale sprężyste (podłużne i poprzeczne) docierające do powierzchni terenu objawiają się jako krótkie wstrząsy i dodatkowo wzbudzają trzeci rodzaj drgań zwanych falami powierzchniowymi, które rozchodzą się z epicentrum. Wyróżniane są dwa rodzaje tych fal: Rayleigha (wywołujące przemieszczenia

w płaszczyźnie prostopadłej do powierzchni terenu) i Love'a (powodujące przemieszczenia w płaszczyźnie równoległej do powierzchni terenu). Długość fal powierzchniowych dochodzi do 100 km, a amplituda wynosi ułamek milimetra, tylko przy bardzo silnych trzęsieniach kilka centymetrów (np. w 1897 r. w Assam aż 35 cm, a 1906 r. w Kalifornii 10 cm). Fale powierzchniowe wywołują najsilniejszy wstrząs i powodują największe szkody.



Ryc. 2.1. Elementy trzęsienia ziemi – położenie hipocentrum i epicentrum

Źródło: opracowanie własne.

Trzęsienie ziemi jest bardzo krótkie i trwa zazwyczaj nie dłużej niż kilka sekund, tylko sporadycznie może osiągnąć minutę lub więcej. Trzęsienie w San Francisco w 1906 r. trwało 40 sekund, a w Anchorage na Alasce w 1964 ponad 7 minut, z tego 3 minuty ze szczególną siłą (Bryant 2005). Zwykle najpierw ma miejsce wstrząs główny, a potem występują wstrząsy potomne, które są efektem przemieszczania się skał dopasowujących się do stanu nowej równowagi.

Trzęsienie nie występuje jednocześnie i z jednakową siłą na całym obszarze objętym wstrząsem. Zaczyna się od niewielkiego ośrodka kolistego lub wydłużonego, gdzie wstrząs jest najsilniejszy, a im dalej od niego, tym słabszy i późniejszy (ryc. 2.1, 2.2). Wydłużony zasięg stref objętych wstrząsem o takiej samej sile przedstawiony na ryc. 2.2 wynika z równoległego do brzegu oceanu układu struktur geologicznych w Chile. Jeżeli hipocentrum leży na uskoku, także obraz izosejst (linii łączących punkty uderzone z taką samą siłą) jest wydłużony. W epicentrum silne trzęsienie ziemi wywołuje największą katastrofę, ponieważ domy wskutek uderzenia od dołu są podrzucane w górę, a przy spadaniu rozsypują się w gruzy. W zależności od trzęsienia ziemi obszar epicentralny (rozciągający się wokół epicentrum) może mieć różną powierzchnię. W zasięgu tego obszaru trzęsienie ziemi jest najsilniej odczuwalne i powoduje największe skutki morfologiczne oraz straty materialne i społeczne.



Ryc. 2.2. Zasięg wstrząsów i drgań podczas trzęsienia ziemi, przykład z Chile 2010

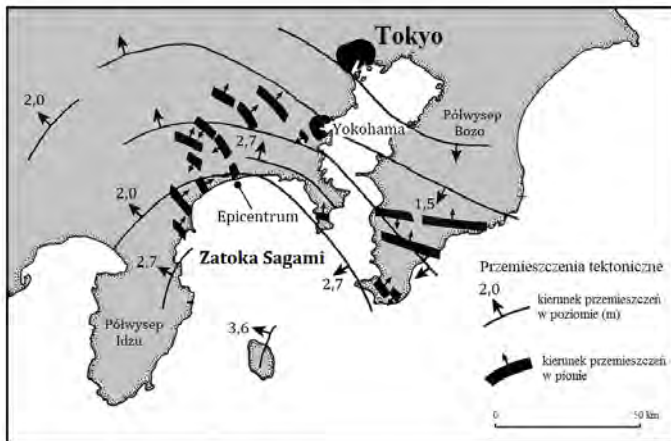
Źródło: na podstawie *BBC News 2010*.

Zasięg i skutki trzęsienia ziemi zależą od głębokości, na jakiej wystąpiło. Jeżeli było płytkie i silne, to szkody powierzchniowe mogą być większe. Ogniska większości trzęsień ziemi występują na głębokości do 60 km. Przykładowe głębokości ogniska trzęsień ziemi, które spowodowały wyjątkowo duże straty, wynosiły: 2–3 km w Agadirze w 1960 r. (zniszczone miasto), 10 km w Mesynie w 1908 r., 13 km w Turcji w 1939 r. (trzęsienie ziemi było przyczyną zniszczeń w wielu miastach), 18 km w Kalifornii w 1906 r., 35–40 km w Japonii w 1923 r. (Książkiewicz 1972). W Europie ogniska położone są zwykle na głębokości 20–30 km (Radlicz-Rühlowa i Wiśniewska-Żelichowska 1988). Jedynie w Japonii część ognisk zalega głębiej, od 200 do 700 km, ale to jest dość często spotykane zjawisko wokół Oceanu Spokojnego.

Szkody na powierzchni są uzależnione także od budowy geologicznej obszaru. Im skała jest bardziej zwięzła i elastyczna, tym słabiej jest wstrząsana. Dlatego starsze skały reagują słabiej na wstrząsy niż młodsze. Szczególnie silne oddziaływanie drgań jest tam, gdzie zwarty materiał w podłożu przykrywa cienka warstwa luźnych osadów. Drgania rozchodzą się dobrze wzdłuż uskoków lub biegu

warstw, znacznie trudniej w kierunku poprzecznym do ułożenia warstw, a uskoki biegnące prostopadle do kierunku rozchodzenia się drgań mogą je zatrzymać.

Na powierzchni terenu trzęsienia ziemi są odbierane jako serie wstrząsów, drgań lub kołysanie powierzchni topograficznej. W zależności od siły trzęsienia podłoże może łagodnie falować (np. do 1 m) albo gwałtownie unosić się w górę lub w dół. Czasem może wystąpić poziome przesunięcie gruntu nawet o kilka metrów. Trzęsienia ziemi o znacznej intensywności mogą doprowadzić do niezwykle szybkich i znacznych przeobrażeń powierzchni topograficznej. Powstają wtedy liczne formy linijne o długości nawet do 10 km i wysokości od 0,5 do 10 m. Podczas wielkiego trzęsienia ziemi w 1755 r. w centrum Lizbony powstała szczelina o szerokości 5 metrów, a epicentrum położone było 200 km od miasta na Oceanie Atlantyckim (*Lisbon Earthquake 1755*). Z kolei w czasie wielkiego trzęsienia w Japonii w 1891 r. powstała wyjątkowo długa na 112 km szczelina, a teren zapadł się o 7 m przy jednoczesnym przesunięciu poziomym o 4 m (Książkiewicz 1972). Podczas kolejnego trzęsienia ziemi w Japonii w 1923 r. grunt przesunął się horyzontalnie do 4,5 m i obniżył do 2 m (ryc. 2.3). W czasie trzęsienia ziemi na Alasce w 1964 r. niektóre partie terenu podniosły się o 20 m, a inne obniżyły o kilka metrów (Bryant 2005). Wyjątkowo silne trzęsienie ziemi o magnitudzie 8,9–9,1 w 2011 r. w Japonii w prefekturze Tōhoku spowodowało nie tylko zmiany w topografii terenu, ale także przesunięcie wyspy Honsiu o 2,4 m na wschód (Chang 2011). Początkowo trzęsienie ziemi spowodowało obniżenie i zalanie wodami Pacyfiku części wybrzeża Honsiu nawet o jeden metr, ale po około trzech latach powolnego podnoszenia wybrzeże przekroczyło nawet pierwotną wysokość.



Ryc. 2.3. Rozkład uskoków i kierunku przemieszczeń gruntu podczas trzęsienia ziemi w regionie Kanto w Japonii 1 września 1923 r.

Źródło: na podstawie Holmes 1965.