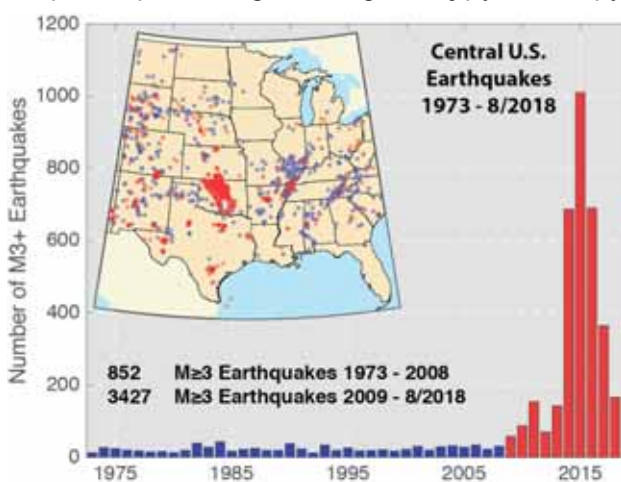


O przemyśle i trzęsieniach ziemi

Zbigniew Wiśniewski

Jeśli przeciętnego, czytającego człowieka spytać o przyczyny trzęsień ziemi odpowie nam, że jego źródłem są ruchy płyt tektonicznych. Występują one w rejonach aktywnych sejsmicznie, gdzie płyty te się zderzają. W wyniku tego całą powierzchnię Ziemi można podzielić na reiony sejsmicznie czynne i nieczynne. Tymczasem okazuje się, że trzęsienia ziemi zaczynają się pojawiać tam, gdzie nikt ich się nie spodziewa. Są one związane z działalnością człowieka. Niektóre z nich są znane praktycznie od wieków. Nosiły kiedyś nazwę szkód górniczych. Są one związane z wydobywaniem surowców z wnętrza Ziemi. Oczywiście tego typu zjawiska nie zniknęły. Są one obecne do dzisiaj.

Ponieważ różnorodność naszej aktywności wzrasta, zwiększa się też ilość procesów powodujących wstrząsy



Rys. 1. Liczba trzęsień ziemi w centralnych rejonach USA od 1970 roku. Źródło: Wikipedia.

sejsmiczne. Należy przy tym rozróżnić dwie sytuacje. Pierwsza, to trzęsienia ziemi indukowane (induced seismicity) działalnością człowieka. Są to trzęsienia, które towarzyszą działalności ludzkiej i na ogół po jej zakończeniu ustają. Druga kategoria to trzęsienia ziemi wywołane przez działalność człowieka tzw. (triggered seismicity). One mają bardziej długotrwały przebieg i często trwają po ustaniu ludzkiej działalności.

Dzięki rozwojowi techniki wydobywczej możemy sięgać na głębokości dawniej całkowicie niedostępne. Procesom tym towarzyszy zazwyczaj wprowadzanie dodatkowych naprężeń zaburzających równowagę skał. Relaksacja tych naprężeń może prowadzić do powstawania trzęsień ziemi. Jest to wspólny mechanizm dla wszystkich procesów omawianych w dalszej części artykułu.

Gaz i ropa naftowa

Jako przykład może tu posłużyć proces wydobywania gazu łupkowego, lub ropy naftowej. Trzęsienia ziemi mogą być wywołane podczas samego procesu rozkruszania skał, kiedy to zaburzeniu ulega sama struktura skały. W czasie wydobywania ropy lub gazu często wtłacza się w strukturę skały brudną wodę. Wynikiem tego jest nagromadzenie się w skale dodatkowych naprężeń, które mogą prowadzić do powstawania dodatkowych pęknięć w skale, co objawia się jako trzęsienia ziemi.

Pierwszy taki przypadek, gdzie występowanie trzęsień ziemi powiązано z wstrzykiwaniem wody miał miejsce w Denver w Colorado. Proces wpompowywania wody przeprowadzano w latach 1960-1965. Skutkiem tego procesu było wystąpienie około 1500 wstrząsów sejsmicznych. Dwa z nich miały amplitudę powyżej 4.5 i spowodowały poważne zniszczenia budynków. Ogólnie w środkowych stanach USA proces wydobywania gazu

i ropy naftowej doprowadził do gwałtownego wzrostu sejsmiczności (Rys. 1).

Podobne zjawiska mają też miejsce w Europie. Przykładem może tu być okręg Groningen w Holandii. W okręgu tym wydobywa się najwięcej gazu ziemnego w Europie. Jego eksploatacja rozpoczęła się w 1963 roku. Do tej pory wydobyto ok 75% dostępnego tam gazu. Skutkiem tych procesów było pojawienie się sejsmiczności w tym, uprzednio praktycznie asejsmicznym, rejonie. Pierwsze wstrząsy zaobserwowano w 1986 roku. Aktywność sejsmiczna osiągnęła tam maksimum w 2013 roku, kiedy to wystąpiło trzęsienie ziemi o amplitudzie 3.6.

Składowanie podziemne dwutlenku węgla i gazu

Podobny efekt może wywoływać modne obecnie składowanie dwutlenku węgla pod powierzchnią ziemi. Aby tego dokonać trzeba w skale nawiercić dziury, co skutecznie zmienia równowagę skały. Jednak większym zagrożeniem jest zmiana ciśnienia gazów (cieczy) znajdujących się w porach skały (pore pressure) będącego efektem wprowadzenia dwutlenku węgla. Znow może to powodować powstawanie dodatkowych naprężeń. Proces relaksacji naprężeń prowadzić może do pojawienia się trzęsień ziemi.

Co więcej, ponieważ dwutlenek węgla włacza się na znaczne głębokości, to powstające tam pole naprężeń może aktywować uśpione uskoki tektoniczne. W związku z tym wybierając miejsca na składowiska CO₂ należy unikać miejsc, gdzie są duże uskoki. Niestety stosując znane nam obecnie metody geofizyczne możemy wykryć tylko te duże uskoki. Te małe, kilkukilometrowe pozostają niewykryte, one właśnie mogą być aktywowane przez składowanie CO₂.

Takie zjawiska obserwowano już w Kanadzie i USA. (Mark D. Zoback and Steven M. Gorelick). Uskoki te na szczęście nie są duże, więc nie zaobserwowano dużych zniszczeń, jednakże takie antropomorficzne trzęsienia ziemi mogą prowadzić do rozszczelnienia skał, w których gromadzony jest CO₂ co w rezultacie może prowadzić do ucieczki CO₂ i takie składowisko przestaje pełnić swoją funkcję.

Największe trzęsienie ziemi związane z podziemnym składowaniem gazu miało miejsce w Portugalii 4 października 2013 roku, gdzie odnotowano wstrząsy o amplitudzie 4.3. Ciekawym pomysłem jest gromadzenie dwutlenku

węgla w miejscach, z których uprzednio wybrano surowce naturalne. W miejscach takich pojawiają się bowiem groźne naprężenie. Właczanie CO₂ powoduje efekt przeciwny przywracając naturalną równowagę skały, co zapobiega występowaniu antropomorficznych trzęsień ziemi.

Wykorzystanie źródeł geotermalnych

Innym źródłem trzęsień ziemi może być wykorzystanie źródeł geotermalnych do celów grzewczych lub energetycznych. Nie chodzi tu o wykorzystywanie wody wypływającej naturalnie np. z gejzerów, tylko o często stosowaną hydrauliczną stymulację. Otóż tak jak w przypadku wydobycia gazu łupkowego, symulacja hydrauliczna polega na wtłoczeniu w głębokie warstwy skały wody, aby doprowadzić do powstania dodatkowych szczelin w skale albo by podwyższyć jej ciśnienie, aby mogła, tak jak w układzie centralnego ogrzewania, wypływać na zewnątrz.

Oczywiście, tak jak w poprzednich przypadkach, relaksacja dodatkowych naprężeń w skale objawia się trzęsieniami ziemi. Takie zjawisko miało miejsce w Basel w Szwajcarii. W miejscowości tej w trakcie budowy elektrowni geotermalnej wywiercono szyb o głębokości 5 km, przez który wtłoczono do wnętrza skał 11 500 m³ wody. W czasie tego procesu zanotowano tysiące wstrząsów sejsmicznych. Największe trzęsienie ziemi miało amplitudę 2.6, co spowodowało decyzję o przerwaniu właczania wody. Jednakże przerwanie procesu wpompowywania wody nie przerwało występowania sejsmiczności. Przez pewien czas nawet rosła. Największe trzęsienie miało amplitudę 4.7 i spowodowało znaczne straty materialne. Opisywane wydarzenia doprowadziły ostatecznie do zamknięcia inwestycji.

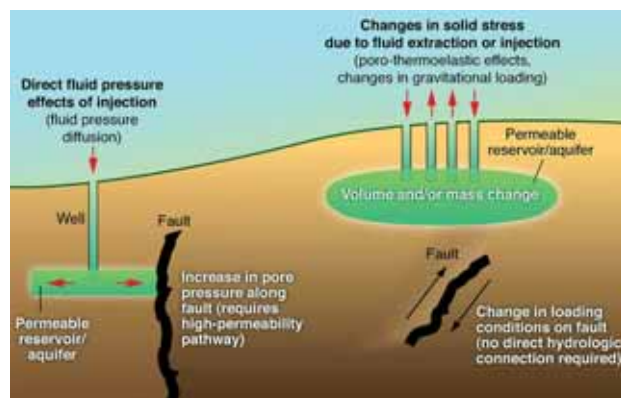
Zapory i sztuczne zbiorniki wodne

Omawiając kwestie indukowanej sejsmiczności nie możemy oczywiście zapomnieć o kwestii tam i innych sztucznych zbiorników wodnych. W tym przypadku naprężenia powstają zarówno podczas budowy tamy, jak i podczas jej napełniania wodą. W tym przypadku aktywność sejsmiczna rośnie stopniowo wraz z procesem napełniania. Maksymalne wstrząsy następują najczęściej kilka miesięcy lub kilka lat od osiągnięcia wypełnienia tamy. Potem jednak następuje stopniowy zanik.

Istnieje jednak sytuacja, w której aktywność sejsmiczna nie zanika całkowicie po wypełnieniu tamy. Tak najczęściej dzieje się, jeśli poziom wody w zbiorniku jest zmienny. W wyniku tego naprężenia w skale również zmieniają się periodycznie, czego skutkiem jest występująca periodycznie aktywność sejsmiczna.

Po raz pierwszy związek między aktywnością sejsmiczną udokumentowano w przypadku jeziora Mead w latach 1939-1940. Jezioro Mead jest to sztuczny zbiornik wodny na pograniczu stanów Nevada i Arizona. Największe trzęsienie ziemi tego typu miało miejsce w 1967 r. w Koynanagar w Indiach. Jego amplituda wyniosła 6.3. W wyniku tego śmierć poniosło 180 osób a ponad 1800 zostało rannych.

Innym przypadkiem katastrofy wywołanej przez wstrząsy antropogeniczne był wypadek mający miejsce w 1963 roku we Włoszech. Feralna tama nosi nazwę Va-



Rys. 2. Wpływ procesów gromadzenia substancji na naprężenia w skorupie ziemskiej.



Jezioro Mead

iont Dam. Podczas jej budowy nastąpiła wzmożona aktywność sejsmiczna w rejonie. Skutkiem tego olbrzymia masa ziemi z pobliskich wzgórz osunęła się do zbiornika. W efekcie olbrzymia masa błota przelała się przez tamę powodując śmierć ponad 1800 osób. Ta katastrofa jest przykładem zlekceważenia znaków ostrzegawczych wysyłanych przez naturę, gdyż symptomy zbliżającej się katastrofy można było wykryć co najmniej trzy lata wcześniej. Należy podkreślić, że zwłaszcza w rejonach aktywnych sejsmicznie nie zawsze można jednoznacznie rozstrzygnąć czy dane trzęsienie ziemi ma pochodzenie naturalne, czy antropogeniczne.

Rozkład geograficzny

Jeśli przeanalizuje się mapę świata pod względem zjawisk indukcyjności indukowanej można stwierdzić, że obecnie tego typu zjawiska występują na wszystkich kontynentach, lecz bardzo nierównomiernie. Stosunkowo najwięcej takich zjawisk ma miejsce w Europie i Ameryce Północnej. Stosunkowo najmniej jest ich w Ameryce Południowej. Jeśli wierzyć źródłom w Chile, gdzie występują najsilniejsze naturalne trzęsienia ziemi, kraj ten jest wolny od trzęsień indukowanych. Jak nietrudno się domyśleć, rejony o większym uprzemysłowieniu są bardziej zagrożone niż tereny słabo rozwinięte.

Eksplozje atomowe

Ostatnią kategorią trzęsień ziemi wywoływanych działalnością człowieka są eksplozje atomowe dokonywane w podziemiach. Przodownikiem w produkcji tego typu wstrząsów sejsmicznych jest obecnie Korea Północna.

Konsekwencje

Jak wynika z przytoczonych przykładów, sejsmiczność antropogeniczna ma poważne konsekwencje zarówno społeczne, jak i gospodarcze. Mogą one powodować uszkodze-

nia budynków w okolicy oraz ofiary śmiertelne. Wystąpienie takich zjawisk powoduje zazwyczaj reakcje społeczeństwa. Przy czym siła tych reakcji zależy od kilku czynników. Najbardziej oczywisty jest to czynnik związany z gęstością populacji. Jeśli tereny, na których pojawia się aktywność sejsmiczna są niezaludnione to najprawdopodobniej nikt ich nie zauważy. Przy czym nikt oznaczać może nie tylko ludność, ale też naukowców. Ponieważ aby wstrząs został wykryty musi istnieć sieć monitoringu sejsmicznego.

Zagrożenia wywoływane sejsmicznością antropogeniczną są w Europie większe ze względu na 10 krotnie większą gęstość ludności, jak również na fakt występowania większej ilości starych budynków. Drugim czynnikiem jest kwestia przyzwyczajenia ludności. W przypadku regionów o długoletniej tradycji aktywności górniczej ludność jest bardziej przyzwyczajona niż w przypadku rejonów, gdzie ludzie takiej aktywności nie prowadzą. Różnica w podejściu do tego typu kwestii wystąpi też w rejonach, gdzie występuje naturalna aktywność sejsmiczna i w tych, gdzie takich zjawisk nie ma.

Rejony o naturalnej aktywności sejsmicznej z natury swojej są lepiej przygotowane do aktywności sztucznej. Jedną z ważniejszych reakcji są te o charakterze administracyjnym jakie mogą być podjęte wskutek pojawienia się indukowanych trzęsień ziemi – jest to zazwyczaj nakaz ograniczenia lub zaprzestania działalności wydobywczej. Tak było np. w stanie Oklahoma. Wskutek pojawienia się trzęsień ziemi (ok. 900 wstrząsów rocznie) władze stanowe doprowadziły do ograniczenia działalności wydobywczej o 40%.

Inną reakcją na wzrastające zagrożenie sejsmicznością indukowaną jest wprowadzenie wymogu, aby firmy prowadzące działalność wydobywczą prowadziły monitoring sejsmiczny terenów, na których działają. Taki obowiązek wprowadziły już Włochy, Holandia i Szwajcaria.

Zbigniew Wiśniewski
Europejska Uczelnia w Warszawie

LITERATURA

- [1] Mark D. Zoback, and Steven M. Gorelick „Earthquake triggering and large-scale geologic storage of carbon dioxide” www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1202473109
- [2] Francesco Grigoli et al. „Current challenges in monitoring, discrimination, and management of induced seismicity related to underground industrial activities: A European perspective” *Reviews of Geophysics* 10.1002/2016RG000542
- [3] Pradeep Talwani „On the Nature of Reservoir-induced Seismicity” *Pure appl. geophys.* 150 (1997) 473–492

