

ВІДЧАЙДУШНІ ПОШУКИ СИГНАЛУ

Одного прохолодного вечора у квітні 2009 року жителі італійського містечка Л'Аквіла вже готувались до сну, коли відчули кілька дещо незвичних поштовхів. Вони були трохи сильнішими за ті, що спостерігалися, коли проходив вантажний потяг. Перший поштовх був зафіксований о 23:00 за місцевим часом й мав магнітуду 3,9 бала. Такої сили поштовх здатний похитнути меблі в деяких помешканнях та змусити місцевих жителів трохи понервувати, але не більше того. Другий підземний поштовх виявився трохи слабшим — його магнітуду становила 3,5 бала. Поштовх такої сили навряд чи може розбудити людину, яка міцно спить.

Однак жителі міста Л'Аквіла, розташованого біля підніжжя Апеннінських гір і відомого своїми гірськолижними курортами та середньовічною архітектурою, відчули занепокоєння. Загалом, невеликі землетруси у цій місцевості вважаються нормою, але за умови, що вони відбуваються не частіше, ніж два чи три рази на місяць. Однак згадані підземні поштовхи були вже відповідно сьомим і восьмим за останній тиждень. Тобто частота підземних поштовхів зросла приблизно у 100 разів.

Довелося понервувати і жителям сусіднього міста Сульмони, що розкинулося біля підніжжя гори. Інженер італійського Національного інституту ядерної фізики Джанпаоло Джуліані зауважив, що його прилади фіксують в регіоні незвично високу концентрацію радону. Він висунув припущення, що цей факт може свідчити про наближення сильного землетрусу. За підра-

хунками чоловіка, він міг статися 29 березня. Своїми прогнозами Джуліані поділився з мером міста Сальмони, який наказав за допомогою гучномовців попередити місцевих жителів про наближення природного катаклізму¹.

Але зазначеного дня землетрусу в Сальмоні не сталося. Оскільки передбачення Джуліані не справдилось, місцева влада звинуватила його у *procurato allarme*, тобто надмірній паніці. Застереження інженера порівнювали з хуліганськими викриками про пожежу в переповненому театрі. Не витримавши такого тиску, Джуліані здався і прибрав з інтернету своє повідомлення про можливість землетрусу, щоб не нагнітати паніку начебто на рівному місці.

Адміністрація Л'Аквіли теж запевнила місцеве населення, що їм не слід даремно перейматись через «рій невеликих землетрусів» (цей термін доволі часто вживають у колах сейсмологів на позначення серії невеликих землетрусів). Зі слів Бернардо де Бернардініса², заступника керівника Департаменту громадської оборони Італії, так званий «рій невеликих землетрусів» дав змогу надрам землі «випустити пару» і суттєво зменшити можливість серйозного землетрусу. Репортер, який брав інтерв'ю у Бернардініса, розповідав: під час розмови вони дійшли згоди, що не слід зайвий раз нервувати, а краще насолодитись келихом вина³, і Бернардініс порекомендував хороший сорт місцевого вина монтепульчіано.

Проте сильного землетрусу магнітудою 6,4 бала жителям Л'Аквіли уникнути не вдалося. Він стався у понеділок о 03:32 за місцевим часом. Будівлі добряче хитало, їхні покрівлі руйнувалися, меблі в будинках ламалися. Цей землетрус забрав життя понад 300 осіб. Без даху над головою залишилось 65 000 людей, а загальний обсяг завданих стихією збитків перевищив 16 мільярдів доларів США⁴.

Як ми діємо, коли все йде не за планом

Л'Аквілі слід було краще підготуватися до землетрусу, адже місто розташоване неподалік від особливо небезпечного розлому земної кори, що називається зоною субдукції. Це місце, в якому Африканська тектонічна плита, одна із восьми основних тектонічних плит, з яких, власне, і складається поверхня Землі, поступово просувається під Євразійську плиту.

Перший серйозний землетрус у цьому регіоні було зафіксовано 1315 року, після чого землетруси відбувалися у 1349, 1452, 1461, 1501, 1646, 1703

та 1706 роках⁵. Найсильніший землетрус стався у 1786 році, — він забрав життів понад 5000 осіб. Проте кожного разу місто відбудовувалось і заново заселялось, причому подеколи за безпосереднім розпорядженням Папи Римського⁶.

Згодом настало двохсотрічне затишшя. За цей період було зафіксовано лише кілька землетрусів. Один із них стався у 1958 році, проте він був не надто сильним — його магнітуда становила 5 балів⁷, і згадують про цей землетрус хіба що старожили. Натомість землетрус 2009 року виявився значно потужнішим. Шкала магнітуд оцінює землетруси за логарифмічною шкалою, тобто зростання по шкалі на 1 бал означає збільшення кількості вивільненої енергії у 32 рази. Таким чином, землетрус 2009 року магнітудою 6,3 бала виявився у 75 разів потужнішим від землетрусу 1958 року. Загалом він був у 3000 разів потужнішим за «рій невеликих землетрусів», що стався у Л'Аквілі трохи раніше того самого вечора.

Та хоча землетрус 2009 року вважався доволі серйозним у масштабах Італії, однак у глобальному плані він нічим особливим не вирізнявся. Землетрус, що у 2011 році змусив здригнутися Японію, за шкалою магнітуд оцінювався у 9,0–9,1 бала, тобто він був приблизно в 11 000 разів потужнішим. А найбільший землетрус за всю історію точних спостережень стався у 1960 році в Чилі. Магнітуда цього землетрусу сягнула 9,5 бала, тобто він був майже у 60 000 разів потужнішим, аніж землетрус у Л'Аквілі.

Але чому тоді Л'Аквіла — процвітаюче місто у доволі багатій, промислово розвиненій країні, зазнало настільки серйозних руйнувань? Першою причиною, звісно, є геологічна структура місцевості. Місто Л'Аквіла розташоване на стародавньому озерному пласті, сама природа якого певною мірою посилює будь-які земні коливання. На схожому озерному пласті, до речі, збудовано місто Мехіко⁸, що також зазнало руйнівного впливу землетрусу, який стався у 1985 році і забрав 10 000 життів, хоча епіцентр його був на відстані близько 300 кілометрів від міста.

Та головною причиною трагедії стала недалекоглядність і занадто спокійне ставлення жителів до сейсмічної загрози, епіцентр якої перебував на глибині усього лише 15 кілометрів під землею. Того дня місто жило своїм звичним життям, не проявляючи жодних ознак занепокоєння й не вживаючи заходів щодо підготовки до землетрусу⁹: влада не подбала про запаси предметів першої потреби, також серед населення не проводилися спеціальні тренінги. Та й переважна більшість будівельних компаній не зважала на спеціальні норми щодо спорудження сейсмостійких будівель.

Відтак землетрус зруйнував не тільки більш як сторічні будівлі, а й нові споруди, наприклад, нове крило лікарні, збудоване на початку 2000-х років. Якби в місті хоч якось відреагували на загрозу землетрусу, жертв трагедії було б значно менше.

Проте чи можна слова Джанпаоло Джуліані вважати застереженням у буквальному розумінні цього слова? З часом цього чоловіка з м'яким голосом і кудлатим волоссям, що доволі часто одягався у спортивну форму місцевої футбольної команди і своєю зовнішністю нагадував чи то скромного держслужбовця, чи дивакуватого професора, стали вважати ледь не мучеником. На його застереження не звернули уваги. Джуліані попередив про землетрус у Л'Аквіла всіх своїх друзів і членів родини, однак, як він стверджував, поліція заборонила говорити про небезпеку іншим жителям міста. Згодом Джанпаоло почав вимагати, щоб місцева влада принесла свої вибачення — не йому особисто, а жителям Л'Аквіли.

Однак не все із цим передбаченням виявилось так просто, як може здатися на перший погляд. По-перше, Джуліані попереджав про землетрус не у Сульмоні, а в Л'Аквілі. По-друге, сам землетрус він передбачав не в березні, а у квітні. По-третє, Джуліані сам сповістив у місцевій газеті, що загроза начебто обійшла місто стороною. «Якщо пояснити простими словами, — сказав він, перш ніж розпочати не надто логічну розповідь про місячні цикли, — Земля із Місяцем опинились у перигелії... на мінімальній відстані одне від одного і на одній лінії з Венерою... я вважаю, що моїм співвітчизникам можна зітхнути з полегшенням, адже «рій землетрусів» під кінець березня почне потроху стихати¹⁰.

Перигелій і планета Венера? Газ радон? Що спільного між цим усім і власне землетрусом? І до чого тут невдалий прогноз Джуліані щодо Сульмони? На перший погляд могло здатися, що нічого спільного тут немає. Коли трапляються катастрофи, сейсмологи одразу ж кидаються на пошуки сигналу в шумі, тобто намагаються знайти хоч якесь пояснення того хаосу, що спостерігається навкруги, щоб якимось чином навести порядок у цьому світі. А на той час у їхньому розпорядженні не було нічого кращого, ніж дещо плутані пояснення Джуліані.

Землетрус — це саме той вид природних катастроф, який значно більше за інші руйнує наше внутрішнє відчуття порядку в світі. Підземні поштовхи влаштовують землетрус не тільки наяву, а й у нашому світогляді. Якщо, наприклад, урагани спускаються з небес і можуть асоціюватися деяким людьми як воля Господня (японське слово «камікадзе» спочатку означало

«божественний вітер»; ним описано тайфуни в Японії у 1274 та 1281 роках, що допомогли потопити монгольські кораблі, які збирались атакувати Японію), то землетруси виникають глибоко під землею, тож інколи сприймаються як гнів Господа¹¹ або його байдужість¹². Так, землетрус у Лісабоні, що стався 1755 року, взагалі став підґрунтям для великої кількості дискусій на межі філософії та релігії¹³. І якщо урагани та повені, торнадо й виверження вулканів можна доволі легко прогнозувати, то зусилля великої кількості вчених за останніх сто років так і не змогли надати нам інструменти, що допомогли б у передбаченні землетрусів.

Зачаровані жаби та пошук Святого Грааля

Місто Пасадена, що у штаті Каліфорнія, вважається світовим центром досліджень землетрусів. Саме тут розташований Каліфорнійський технологічний інститут, у якому працював Чарльз Ріхтер і де він розробив у 1935 році свою відому логарифмічну шкалу оцінки сили землетрусу. У Пасадені діє також один із відділів Геологічної служби Сполучених Штатів — The United States Geological Survey (USGS), який налічує доволі великий штат фахівців, що працюють над дослідженням землетрусів. Я приїхав туди у 2009 році, щоб зустрітися з доктором Сьюзен Хоф — одним із провідних сейсмологів USGS, а також автором кількох книг, присвячених проблемі прогнозування землетрусів. Пані Хоф дуже уважно дослідила телевізійне інтерв'ю Джуліані й написала доволі яскраву статтю в газету *The New York Times*¹⁴, в якій розкритикувала як самого Джуліані, так і увагу, що приділялася йому в засобах масової інформації.

На думку доктора Хоф, успіх і подальша популярність Джуліані виявились звичайним збігом обставин. «Передбачення Джуліані набуло широкого розголосу тільки тому, що сплило на поверхню, — писала доктор Хоф, — проте мені відомо і про величезну кількість інших [хибних] прогнозів, про які суспільство так і не дізналось». Якщо у світі налічується кілька сотень людей, які намагаються привернути увагу людства до своїх прогнозів, і щороку відбувається близько сотні землетрусів, то рано чи пізно хтось із них поцілить «у яблучко».

Вчені неодноразово перевіряли теорії Джуліані про радон і місячні цикли¹⁵, й визнані світом сейсмологи дійшли висновку, що ці теорії не дають змоги робити більш-менш точні прогнози стосовно можливості землетру-

су. Йому просто пощастило, як пощастило мавпі, яка, випадковим чином натискаючи клавiшi друкарської машинки, надрукувала текст п'єси Шекспіра, або популярному восьминогу, який успішно передбачив результат фіналу Кубка світу з футболу.

Кабiнет доктора Хоф у USGS розташований в тихому закутку університетського кампусу, де евкаліптових дерев росте значно більше, ніж мешкає студентів. Під час нашої зустрічі Сьюзен Хоф мала трохи стомлений від постійних подорожей вигляд. Вона нещодавно повернулася з Туреччини, де вивчала систему розломів земної кори, що з'явилися внаслідок чергового землетрусу. Та й взагалі ця жінка з темними очима та хвилястим волоссям досить ввічлива, і спілкується вона зазвичай трохи стомленим голосом. «А чим ви займаєтесь?» — запитала вона вже через кілька хвилин після нашого знайомства.

Під час розмови доктор Хоф узяла в руки невеликий глобус, на кшталт того, що продається у сувенірних крамничках в аеропортах, і провела вказівним пальцем лінію у східному та південно-східному напрямку від Японського моря.

«Найбільша кількість руйнівних землетрусів сконцентрована саме у цьому поясі — від південного Китаю до Греції, — пояснила мені Хоф, — і ситуація тут дуже складна, оскільки в цьому місці споруджено чимало хитких будинків. Потужний землетрус десь під Тегераном здатний знищити близько мільйона людей».

І справді, майже всі найжахливіші землетруси у сучасній історії сталися саме у зазначеній доктором Хоф зоні, що проходить через «колиску цивілізації» на Близькому Сході та деякі найбільш густонаселені райони планети, включаючи Китай та Індію. У цій зоні чимало бідних і густонаселених регіонів, які просто не в змозі належним чином підготуватись до чергового землетрусу, навіть якщо він відбувається не частіше ніж один раз на 300 років. Та коли ці землетруси все ж трапляються, то рахунок кількості жертв йде на сотні тисяч. (Землетрус у Гаїті, що стався 2010 року, був винятком, що стосується географії, але не стосовно кількості жертв, бідності та відсутності достатньо чітких стандартів будівництва.)

Що важливо, землетруси забирають життя у значно більшій кількості людей, ніж це роблять урагани¹⁶, хоча останні відбуваються набагато частіше¹⁷. Це можна пояснити, зокрема, тим, що час і місце землетрусу важче передбачити заздалегідь. Якщо за останніх 35 років точність передбачення місця та часу удару урагану зросла більш як у три рази, то прогнозування

землетрусів ледве зрушило з місця відтоді, як у IX столітті японці вперше заявили, що вміють передбачати землетруси, спостерігаючи за поведінкою сомів¹⁸. Інколи також з'являлась інформація, що перед землетрусами починають хвилюватись корови, свині, вугрі, пацюки, папуги, чайки, черепахи, золоті рибки, змії та інші тварини.

Натомість «віщунів» землетрусів на кшталт Джуліані люди й досі продовжують сприймати всерйоз, причому не тільки в Італії¹⁹. Каліфорнійський Центр прогнозування землетрусів щороку отримує близько сотні різних прогнозів землетрусів, і, за словами представника цього центру, більшість із них пов'язана з «дивною поведінкою домашніх тварин, інтуїцією, ниючим болем в кістах тітки Агати, а також з чималою кількістю інших магічних ознак, що не перестають постійно дивувати вчених»²⁰. Деякі «наукові» публікації в пресі доволі важко відрізнити від якогось середньовічного японського фольклору. Наприклад, в одній зі статей, опублікованих у доволі серйозному журналі *The Journal of Zoology*²¹, повідомлялось про те, що в ставку, розташованому за 80 кілометрів від міста Л'Аквіла, за п'ять днів до досить сильного землетрусу раптом перестали квакати жаби²². Що цікаво, на думку авторів статті, цього факту було більше ніж достатньо для твердження, що жаби здатні передбачувати землетруси.

Саме такі «дослідження» найбільше засмучують Сьюзен Хоф. «Якщо озирнутись назад, скажімо, у 1970-і роки, то можна побачити, як у людей періодично з'являлась якась ідея, що вселяла в них оптимізм, однак минало років із десять і від цієї ідеї відмовлялись, — розповіла мені доктор Хоф. — Ще через десять років у нас в методиці знову з'являлося щось новеньке, а через наступних десять років від нього знову відмовлялись. Більшість вчених-сейсмологів наразі займаються пошуками якогось своєрідного Святого Грааля, якого, втім, можливо, взагалі не існує».

Спростувати версії, подібні до запропонованої Джуліані — про вплив Венери на землетруси чи, наприклад, щодо здатності жаб передбачати їх наближення — не так вже й важко. Але чи є у нас хоч би якийсь дієвий спосіб прогнозування? Про що нам може сказати «рій невеликих землетрусів», що спостерігався в Л'Аквілі та довкола міста перед серйозним ударом стихії? Чи був це звичайний збіг обставин? Загалом, спільнота вчених-сейсмологів відома як доволі консервативна. Вони дуже неохоче сприймали поширені в наш час теорії щодо тектонічних плит²³, згідно з якими основною причиною виникнення землетрусів є рух тектонічних плит Землі. Ця ідея була запропонована ще у 1912 році, проте серйозне визнання у колах вчених от-

римала лише у 1960-х роках. Можливо, скептична точка зору доктора Хоф вже перетворилась на справжній цинізм?

Офіційна позиція USGS пригнічує ще більше: мовляв, землетруси неможливо передбачити. «Ані USGS, ані Каліфорнійському інституту, як і будь-яким іншим вченим, жодного разу не вдалось передбачити серйозний землетрус. Ми не знаємо, як це зробити, і не сподіваємось найближчим часом про це дізнатись», — зазначається на сайті USGS²⁴.

Чи справді землетруси не піддаються жодному передбаченню? Ця книга розповідає про передбачення, *а не займається* ними, однак просто зараз я хочу виступити із заявою: прогноую, що наступного року в Японії буде більше землетрусів, ніж у Нью-Джерсі. Також я вважаю, що впродовж наступних ста років відбудеться серйозний землетрус і десь у Каліфорнії²⁵.

Поняття «передбачення» та «прогноз» у різних сферах людської діяльності вживаються у різних значеннях. В одних випадках ці два поняття виступають як синоніми, в інших між ними з'являється помітна різниця. Та напевно ви знайдете галузь, що виявиться більш чутливою до відмінностей у цих поняттях, ніж сейсмологія.

Передбачення — це конкретне та обґрунтоване твердження про те, коли і де відбудеться землетрус. Наприклад: 28 червня в Кіото, Японія, станеться сильний землетрус.

Прогноз — імовірнісне твердження, яке говорить нам про те, що у певний період часу очікується землетрус. Наприклад: імовірність землетрусу в Південній Каліфорнії протягом найближчих 30 років становить близько 40 відсотків.

Офіційна позиція USGS полягає в тому, що землетрус неможливо передбачити. Однак його можна *прогнозувати*.

Що нам відомо про частоту землетрусів

Якщо ви уважно передивитесь сайт служби USGS, то знайдете там чимало інструментів, що використовуються для *прогнозування* землетрусів. Один із них допомагає визначати їхню довгострокову ймовірність. Інший, якщо ви введете конкретну широту та довготу будь-якої точки на території Сполучених Штатів, продемонструє ймовірність землетрусу саме в цьому місці у довгостроковій перспективі²⁶. Отримані за їх допомогою дані щодо ймовірності землетрусу у великих містах США (показники взято з USGS) подано у табл. 5.1.

Ми знаємо, що Каліфорнія — сейсмічно активний регіон. За підрахунками USGS, в околицях Сан-Франциско кожних 35 років слід очікувати землетрусу магнітудою від 6,8 бала. Чимало землетрусів трапляється й на Алясці. Більше того, в 1964 році в районі міста Анкоридж стався один із найпотужніших серед відомих нам землетрусів, магнітуда якого досягла 9,4 бала.

Таблиця 5.1. Частота виникнення землетрусів магнітудою від 6,75 бала в радіусі 80 кілометрів від великих міст США

Місто	Частота виникнення землетрусів
Анкоридж	Раз на 30 років
Сан-Франциско	Раз на 35 років
Лос-Анджелес	Раз на 40 років
Сієтл	Раз на 150 років
Сакраменто	Раз на 180 років
Сан Дієго	Раз на 190 років
Солт-Лейк-Сіті	Раз на 200 років
Портланд	Раз на 500 років
Чарльстон	Раз на 600 років
Лас-Вегас	Раз на 1 200 років
Мемфіс	Раз на 2 500 років
Фінікс	Раз на 7 500 років
Нью-Йорк	Раз на 12 000 років
Бостон	Раз на 15 000 років
Філадельфія	Раз на 17 000 років
Сент-Луїс	Раз на 23 000 років
Атланта	Раз на 30 000 років
Денвер	Раз на 40 000 років
Вашингтон	Раз на 55 000 років
Чикаго	Раз на 75 000 років
Х'юстон	Раз на 100 000 років
Даллас	Раз на 130 000 років
Маямі	Раз на 140 000 років

Та чи чули ви про Чарльстон, що у штаті Південна Кароліна? Це місто також розташоване у сейсмічно активній зоні. У 1886 році там стався землетрус магнітудою 7,3 бала. За даними USGS, в цьому регіоні сильного зем-

летрусу слід очікувати 1 раз на 600 років. А якщо ви живете у Сієтлі, то вам варто завжди мати під рукою план дій на випадок надзвичайної ситуації, адже у USGS вважають, що в цьому місці ймовірність виникнення землетрусу вища, ніж на більшості території штату Каліфорнія. Водночас у жителів Денвера немає серйозних причин для хвилювання: загалом план дій на випадок сильного землетрусу цьому місту не потрібен, адже воно розташоване на достатній відстані від так званої зони ризику.

Загалом на сайті USGS є чимало конкретної інформації, на основі якої можна зробити доволі серйозний аналіз. Хоча це може здатись трохи дивним, адже, нагадаю, USGS наполягає на неможливості передбачення землетрусів. Водночас службою успішно застосовується доволі популярний у цій сфері сейсмологічний інструмент під назвою «закон Гутенберга – Ріхтера». В основу його дії покладено розроблену в 1944 році Чарльзом Ріхтером та його товаришем із Каліфорнійського технологічного університету Бено Гутенбергом теорію, що ґрунтується на звичайній емпіричній статистиці землетрусів і констатує очевидну залежність між магнітудою землетрусів і частотою їх виникнення.

Порівнюючи частоту землетрусів та їхню магнітуду, можна дійти висновку, що слабкі землетруси відбуваються помітно частіше, ніж потужні. Інакше кажучи, катастрофічної сили землетруси бувають рідко, тоді як слабких ми спостерігаємо величезну кількість: щороку на нашій планеті фіксується близько 1,3 мільйона землетрусів магнітудою від 2,0 до 2,9 бала²⁷. Щоправда, більшість із цих землетрусів залишаються непоміченими, причому як людьми, так і сейсмометрами²⁸. На сьогодні вчені здатні виявити практично всі землетруси на Землі магнітудою від 4,5 бала. Хоча і в цьому випадку бувають неточності, оскільки їм непросто визначити епіцентр таких не надто потужних землетрусів. Експоненціальну залежність між частотою землетрусів²⁹ та їхньою магнітудою показано на рис. 5.1, *а*. За основу взято статистичні дані про землетруси за 48 років спостережень³⁰.

Однак якщо трохи змінити цей графік, очевидною стане інша цікава закономірність. На рис. 5.1, *б* по вертикальній осі координат відкладено частоту землетрусів із різною магнітудою в логарифмічному масштабі. (Як ми вже з'ясували, шкала магнітуди за своєю сутністю є логарифмічною, а отже, фактично маємо подвійну логарифмічну шкалу.) Після застосування цих змін наш графік майже ідеально вирівнюється й починає нагадувати графіки зі ступеневим розподілом. Ось це і є основою закону Ріхтера – Гутенберга.

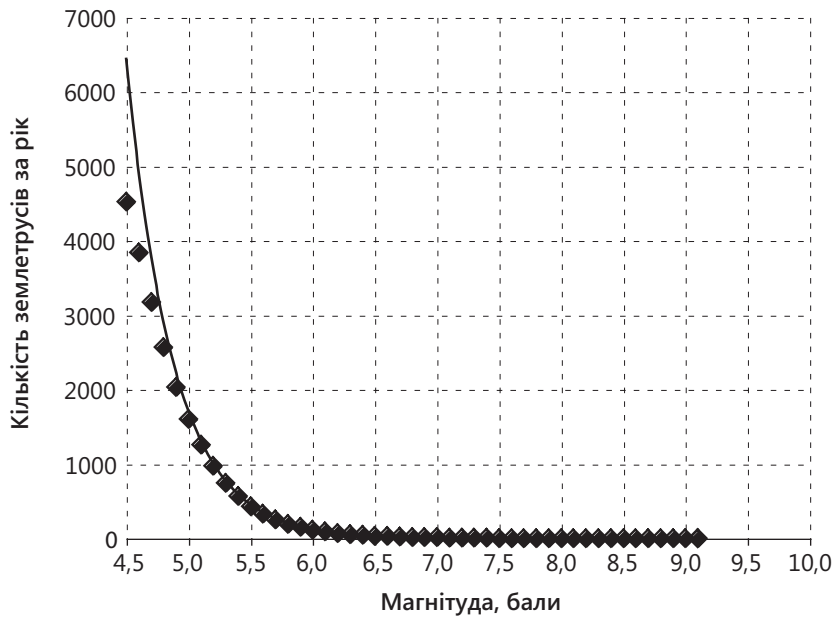
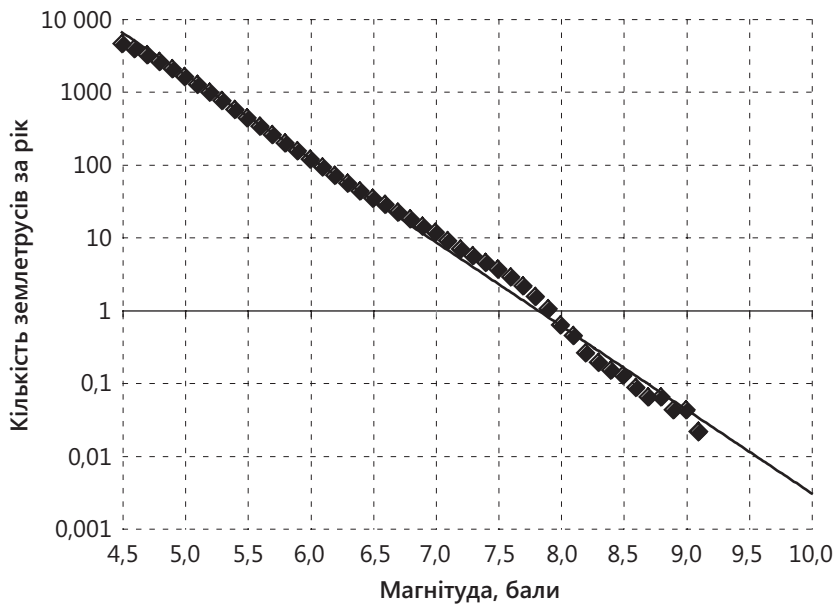
*a**b*

Рис. 5.1. Частота землетрусів, що сталися у світі в період із січня 1964 по березень 2012 року

Завдяки такому розподілу ми отримуємо можливість прогнозувати потужні землетруси на основі інформації про серію слабших підземних поштовхів. У разі збільшення магнітуди на 1 бал частота землетрусів знижується приблизно у 10 разів. Тобто підземні поштовхи з магнітудою 6 балів трапляються у 10 разів частіше, ніж землетруси магнітудою 7 балів і, відповідно, у 100 разів частіше за підземні поштовхи магнітудою 8 балів.

Ба більше, закон Гутенберга — Ріхтера залишається справедливим як для окремих регіонів, так і для всієї планети. Уявімо, що нам потрібно підготувати прогноз землетрусів для столиці Ірану — міста Тегеран. На щастя, за час сейсмологічних спостережень у цьому регіоні не було виявлено жодного катастрофічного землетрусу. Однак на околицях столиці за період з 1960 по 2009 роки спостерігалось близько 15 землетрусів із магнітудою від 5,0 до 5,9 бала³¹. Тобто в середньому кожних три роки буває доволі потужний землетрус. Відповідно до висновків, зроблених Гутенбергом і Ріхтером, в околицях Тегерана землетрус магнітудою від 6,0 до 6,9 бала має траплятись у середньому раз на 30 років. Ця теорія також свідчить про те, що раз на 300 років у цьому регіоні може статися землетрус магнітудою понад 7,0 балів. Сьюзен Хоф серйозно непокоїть можливість такого землетрусу і в самому Тегерані. Землетрус магнітудою 7 балів у 2010 році стався у Гаїті й забрав 316 000 людських життів³². Ця катастрофа — яскравий приклад можливих апокаліптичних наслідків потужних землетрусів у густонаселених регіонах країн, що розвиваються. Проблеми Ірану дуже подібні до гаїтянських — бідність, недостатній контроль над нормами будівництва, корупція у владі³³; до того ж густота населення Ірану значно вища, ніж у Гаїті. За підрахунками USGS, які враховували і звичайні показники смертності в країні, у разі потужного землетрусу може загинути від 15 до 30 відсотків населення Тегерану³⁴. А оскільки в цьому місті та його околицях проживають приблизно 13 мільйонів осіб, імовірна кількість жертв може становити від 2 до 3 мільйонів.

Проте той факт, що частота землетрусів та їхня магнітуда успішно характеризується законом Гутенберга — Ріхтера, зовсім не означає, що ми маємо можливість точно дізнаватись, коли ж саме станеться той чи інший землетрус. Також це не означає, що відповідно до цього закону землетрус у Тегерані неминує статися. І у таких країн, як Іран чи Гаїті, немає можливості реалізувати відповідний план у разі подій, що відбуваються раз на 300 років. Та й взагалі, прогнози землетрусів на основі закону Гутенберга — Ріхтера лише дають можливість побачити загальну картину ступеня загрози

землетрусу в тому чи іншому регіоні. Схожа ситуація спостерігається і при складанні прогнозу погоди. Статистика історії погоди свідчить про те, що в березні у Лондоні 35 відсотків часу йде дощ. Однак ці знання майже неможливо застосувати на практиці, адже вони не дають нам конкретної відповіді на запитання, чи слід у той чи інший день брати з собою парасольку.

Уся складність полягає в тому, що геологія вивчає процеси, які відбуваються протягом сотень, а то й тисяч років.

Підступний сигнал

Практично всі сейсмологи користуються «Святим Граалем» сейсмології, тобто працюють із прогнозами, розтягнутими в часі, згідно з якими землетруси не є рівномірно розподіленими у тому ж самому часі. Та навіть найсуморіші скептики прогнозування землетрусів усе ж визнають, що в розподілі землетрусів у часі простежуються певні закономірності. Найбільш очевидно з них є повторні сейсмічні удари, так звані афтершоки.

Після потужних землетрусів завжди фіксуються десятки, сотні, а інколи й тисячі афтершоків. Наприклад, після землетрусу в Японії у 2011 році сейсмологи нарахували щонайменше 1200 невеликих підземних поштовхів. Ці афтершоки доволі передбачувані³⁵. Найбільша кількість таких невеликих землетрусів фіксується одразу після потужного підземного поштовху, через декілька днів їх інтенсивність помітно зменшується, а через кілька тижнів вони взагалі практично зникають.

Проте знання цієї закономірності практично жодним чином не допомагає нам у порятунку людських життів. Насамперед через те, що потужність афтершоків не йде в жодне порівняння з першим катастрофічним землетрусом.

Зазвичай після потужного землетрусу відбувається певна кількість невеликих афтершоків, після чого в регіоні на якийсь час настає спокій. Але так буває не завжди. Для прикладу можна навести дуже потужний землетрус, який стався 16 грудня 1811 року на кордоні штатів Міссурі і Теннессі. Цей підземний поштовх сейсмологи оцінили у 8,2 бала. Однак уже через шість годин стався другий землетрус майже тієї самої сили. Але стихія й на цьому не заспокоїлась. Після двох потужних землетрусів через місяць, 23 січня, було зафіксовано ще один підземний поштовх силою 8,1 бала. А згодом, 3 лютого, стався ще потужніший землетрус — його сила оцінювалась

у 8,3 бала. І які ж із цих землетрусів слід вважати провісниками катастрофи, а які — афтершоками? Хай там як, але названий підхід у цьому випадку жодним чином не працює.

Тож знову постають питання, чи здатні ми передбачити землетрус заздалегідь і чи можемо відрізнити провісника від афтершока? І коли розглядаємо графік розподілу землетрусів у часі та просторі, в нас зароджується солодка спокуса спробувати відшукати сигнал у шумі.

Для прикладу розглянемо рис. 5.2, *а*, на якому зображено розподіл землетрусів, зафіксованих неподалік міста Л'Аквіла³⁶ за період із 2006 до моменту удару в 2009 році³⁷ землетрусу магнітудою 6,3 бала. На графіку чорними невеликими кружечками позначено землетруси-провісники, а більшим кружечком — катастрофічний землетрус. У випадку з Л'Аквілою загальна картина в принципі зрозуміла. Перед потужним підземним поштовхом 2009 року в регіоні спостерігалась низка менших поштовхів силою до 4 балів, що суттєво перевищує звичайну місцеву сейсмічну активність.

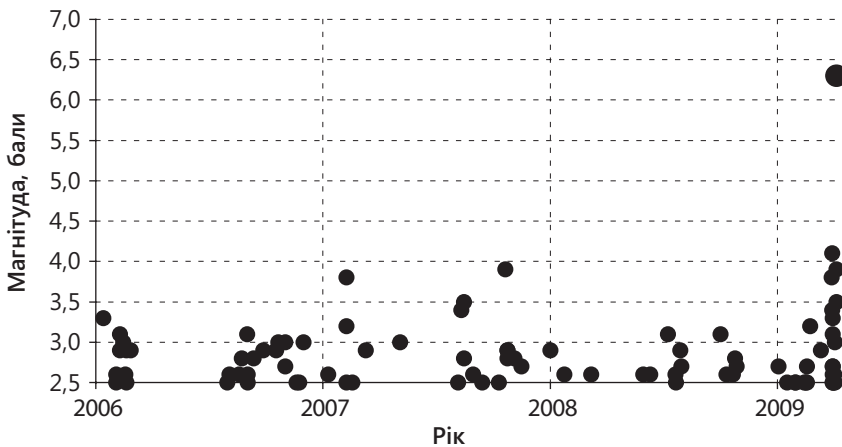


Рис. 5.2, *а*. Землетруси, що сталися неподалік міста Л'Аквіла, Італія, за період з 1 січня 2006 по 4 червня 2009 року

Однак із землетрусом, що стався 2011 року в Японії, все не так просто. На графіку землетрусів в регіоні Тохоку (рис. 5.2, *б*) можна помітити, що ця місцевість значно більш сейсмічно активна, ніж регіон навколо італійського міста Л'Аквіла. Чи можна і тут виявити певні закономірності в розподілі землетрусів у часі? Схоже, так. Наприклад, окремо від інших виділяється

група землетрусів силою від 5,5 до 7 балів, що сталися у середині 2008 року. Однак більш масштабного землетрусу в цей період не було зафіксовано. Натомість 9 березня 2011 року стався потужний підземний поштовх силою 7,5 бала, а через 50 годин після нього в районі Тохоку – катастрофічний землетрус потужністю 9,1 бала³⁸.

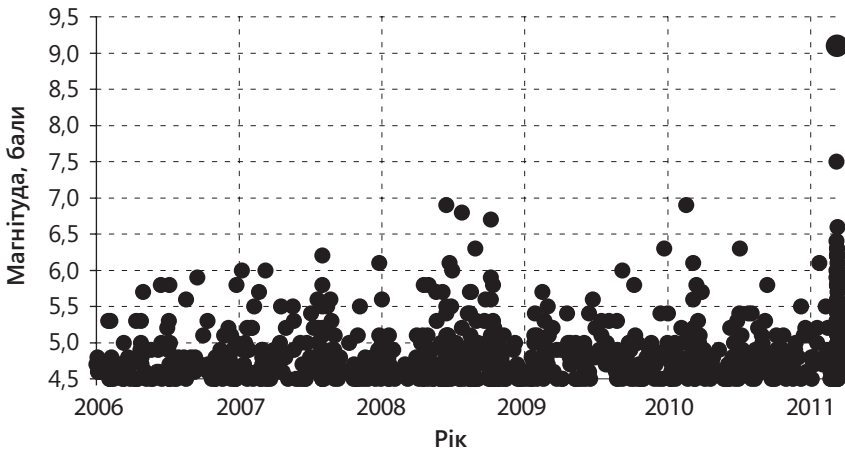


Рис. 5.2, б. Землетруси в регіоні Тохоку, Японія, за період з 1 січня 2006 по 3 листопада 2011 року

Варто зауважити, що землетруси-провісники спостерігалися лише у половині випадків із насправді потужними підземними поштовхами³⁹. Так, перед потужним землетрусом у Гаїті жодних провісників не було (рис. 5.2, в). На жаль, на території Карибських островів розміщена недостатня кількість сейсмографів та інших приладів для відстеження сейсмічної активності, тож ми не маємо даних про землетруси потужністю 2–3 бали. А сейсмометри, встановлені на території США, спроможні помітити лише відлуння підземних поштовхів потужністю від 4 балів. Востаннє подібний землетрус було зафіксовано у 2005 році, тобто за п'ять років до потужного землетрусу в 7 балів, що стався у 2010-му. Отже, можемо констатувати факт: жодних тривожних сигналів ми не отримували.

Ще більше ускладнюють ситуацію хибні сигнали тривоги. Йдеться про періоди підвищеної сейсмічної активності, які, втім, не завершувались потужним землетрусом. Для прикладу можна навести низку невеликих землетрусів, що відбулись у 2008 році неподалік міста Ріно, штат Невада.

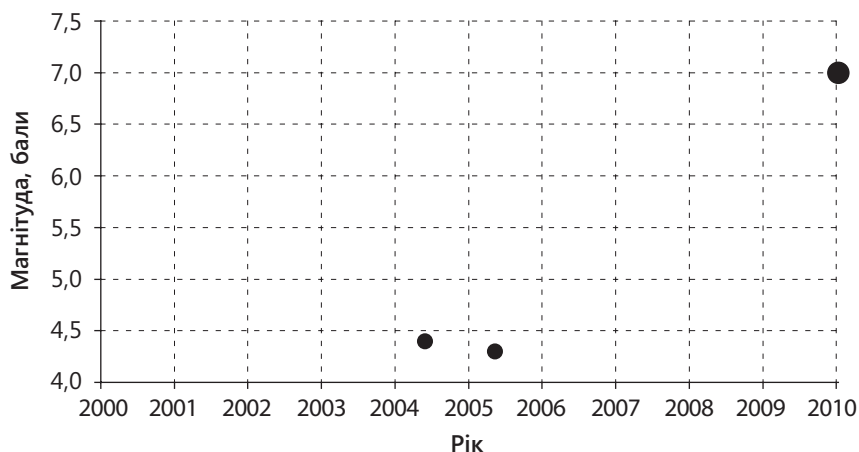


Рис. 5.2, в. Землетруси, що сталися в регіоні Леогана, Гаїті, за період із 1 січня 2000 по 1 грудня 2010 року

«Рій землетрусів» у Ріно дуже схожий на аналогічний «рій», що спостерігався у 2009 році неподалік міста Л'Аквіла. Проте більш сильних підземних поштовхів не сталося. Амплітуда найпотужнішого землетрусу із цієї серії становила 5,0 бали (рис. 5.2, г).

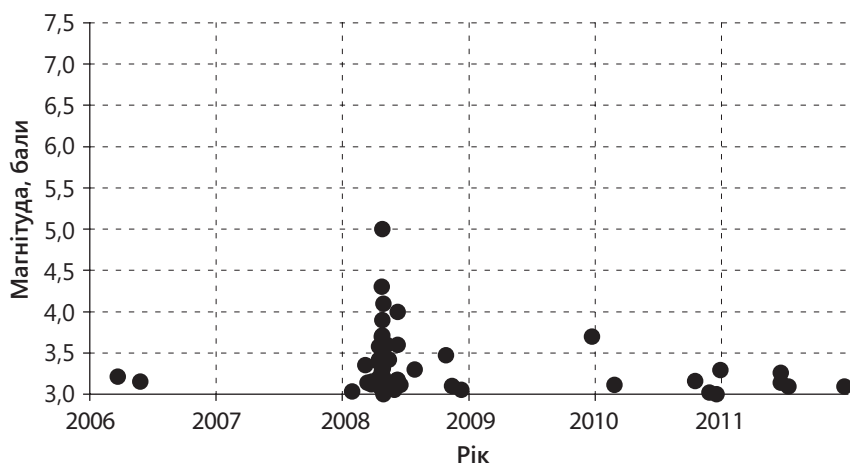


Рис. 5.2, г. Землетруси, що сталися в регіоні міста Ріно, США, упродовж 2006–2011 років

Та все це лише невелика частина гігантського масиву даних, з якими працюють сейсмологи. І ця неймовірна кількість інформації серйозно їм

докучає. З одного боку, було б невіглаством назвати наявні відомості абсолютно випадковими та хаотичними. З іншого боку, ці дані недостатньо передбачувані. Можливо, ми все-таки можемо сподіватись на суттєвий прогрес у сфері прогнозування землетрусів. Однак до сьогодні всі спроби передбачити землетрус майже завжди завершувалися провалом.

Парад хибних прогнозів

У 2009 році Сьюзен Хоф опублікувала книгу «Передбачення непередбачуваного: недосяжна наука прогнозування землетрусів» (Hough S. Predicting Unpredictable: Tumultuous Science of Earthquake Prediction). В ній ідеться про історію спроб передбачення землетрусів. Виявляється, такі спроби були не набагато успішнішими за прогнози політичних «експертів», про яких свого часу писав Філ Тетлок.

Вочевидь, особливого прогресу в цій сфері не сталося. Натомість читачі змогли дізнатись про величезну кількість хибних сигналів.

Ліма, Перу

Одна із найбільш провальних спроб передбачити землетрус пов'язана із доктором Массачусетського технологічного університету (Massachusetts Institute of Technology, MIT) Браїєном Бреді, який, окрім того, працював у Колорадському гірничому училищі. За його розрахунками, у 1981 році в місті Ліма, Перу, мав статись потужний землетрус магнітудою 9,2 бала. Очікувалось, що підземні поштовхи будуть найсильнішими за всю історію спостережень⁴⁰. Спочатку це передбачення отримало певну підтримку спільноти сейсмологів, а одна із його перших версій була розроблена у тісній співпраці з експертами USGS. Проте згодом до цього прогнозу спеціалісти почали додавати все нові й нові змінні, виходячи з аналізу гірських порід, заснованому на власному досвіді досліджень у цій сфері, теорії відносності А. Ейнштейна тощо. Згодом теорія Бреді ускладнилась настільки, що його колеги перестали її розуміти⁴¹. Деякі з них навіть почали схилитись до думки, що вчений збожеволів. Одного разу Бреді заявив, що землетрус магнітудою 9,2 бала буде лише першим із низки потужних землетрусів у Перу, а кульмінацією навали стихії стане рекордний землетрус магнітудою 9,9 бала, на який можна очікувати у серпні 1981 року.⁴²

Перуанські ЗМІ не обійшли увагою це передбачення, і воно добряче налякало місцеве населення. Серйозний американський вчений, принаймні за такого він намагався себе видавати, був переконаний, що столиця Перу от-от опиниться в руїнах. Тривога жителів посилилась іще більше, коли стало відомо, що перуанський Червоний Хрест у рамках підготовки до можливої катастрофи замовив 100 000 мішків для поховання жертв. Слідом за цим різко скоротився потік туристів у країну, згодом розпочався обвал цін на нерухомість⁴³. Уряд США вирішив прийти на допомогу країні й направив у Перу групу вчених і дипломатів, щоб вони вгамували знервованих жителів. Новина про те, що катастрофічний землетрус у Перу в 1981 році не відбувся, одразу ж потрапила на перші шпальти газет.

Паркфілд, штат Каліфорнія, США

Хоча приклад із Лімою яскраво продемонстрував, якої психологічної та економічної шкоди може завдати хибна тривога, сейсмологи продовжували пошуки свого «Святого Грааля». Бредлі, по суті, був одинаком у своєму переконанні, що Перу не омине землетрус катастрофічної потужності. Однак бували випадки, коли над конкретними передбаченнями землетрусів працювали команди вчених із USGS та їхні партнери з інших сейсмологічних спільнот. Проте й ці передбачення вкрай рідко справджувалися.

Паркфілд, штат Каліфорнія, простягнувся вздовж розлому Сан-Андреас. Цей регіон — один із найбільш досліджуваних сейсмологами у світі. Впродовж тривалого часу тут фіксувались землетруси з інтервалами приблизно у 22 роки — у 1857, 1881, 1901, 1922, 1934 та 1966 роках. USGS профінансувало наукове дослідження⁴⁴, що виявило певний тренд у землетрусах, а також дало змогу зробити прогноз із імовірністю 95 відсотків про черговий землетрус у період із 1983 по 1993 роки, швидше за все, у 1988 році. Але насправді більш-менш помітний землетрус у Паркфілді було зафіксовано лише у 2004 році, тобто і це передбачення виявилось хибним.

Та хоча цей прогноз і не справдився, він суттєво зміцнив хибну впевненість у тому, що землетруси в зазначеному регіоні з певною періодичністю відбуватимуться завжди і що в Паркфілді от-от станеться новий землетрус, раз його вже давно не було.

Землетруси виникають унаслідок посилення напруження вздовж лінії розлому тектонічних плит. Це напруження наростає доти, доки зрештою не станеться викид енергії, як, наприклад, це відбувається із гейзером,

коли з нього б'є струмінь гарячої води. Потім напруження спадає, і циклічний процес починається спочатку⁴⁵.

Таким чином можна зробити висновок: якщо у Сан-Франциско потужний землетрус буває в середньому раз на 35 років, то це зовсім не означає, що катастрофи відбуватимуться кожних 35 років, тобто у 1900, 1935 та 1970 роках. Землетруси не розподіляються в часі рівномірно. Більш точним передбаченням вважатиметься таке: ймовірність землетрусу в регіоні щороку становить 1 до 35, і це відношення є доволі сталим, тобто не буде суттєво змінюватись із часом, при цьому не має значення, скільки часу минуло з моменту останнього землетрусу.

Пустеля Мохаве, штат Каліфорнія

Здавалося б, після невдалого передбачення Бредлі щодо Перу та колективного хибного прогнозу землетрусу в Паркфілді інтерес до подібних спроб завчасно визначити його місце та дату певною мірою вщухне. Однак у 2000-х роках інтерес до передбачень землетрусів спалахнув із новою силою, адже з'явилася нова методологія прогнозування, що базувалась на масивах статистичних даних.

Один із таких методів розробив Володимир Кейліс-Борок, уродженець Росії, математик і геофізик за фахом. Хоча йому вже далеко за 80, він і зараз продовжує викладати у Каліфорнійському університеті. Кейліс-Борок зробив чималий внесок у розвиток теорії землетрусів. Уперше про його передбачення заговорили в 1986 році. Тоді під час зустрічі на найвищому рівні в Рейк'явіку між Михайлом Горбачовим та Рональдом Рейганом останньому передали лист, у якому містилося передбачення потужного землетрусу, що мав статись у Сполучених Штатах протягом найближчих п'яти років. Згодом стало зрозуміло, що йшлося про землетрус 1989 року в Лома-Прієта, що у Сан-Франциско⁴⁶.

У 2004 році Кейліс-Борок і його команда заявили, що їм вдалося досягти «суттєвого прогресу» щодо передбачення землетрусів⁴⁷. Дослідники стверджували, що отримали можливість виявляти закономірності виникнення невеликих землетрусів у певному конкретному регіоні й на основі цих закономірностей передбачати більш серйозні підземні поштовхи. Для створення цих передбачень Кейліс-Борок використовував доволі складні й певною мірою туманні методи⁴⁸. Кожен землетрус, що відбувся в минулому, він описував системою із восьми рівнянь, що застосовувались залежно від

різних комбінацій часу та місця події. За словами вчених цієї групи, їм вдалося доволі точно передбачити землетруси 2003 року у Сан-Симеоні, штат Каліфорнія, та на острові Хоккайдо⁴⁹, Японія.

Щоправда, перевірити цей факт виявилось непросто. Пошук у газетах за 2003 рік із застосуванням системи Lexis-Nexis не дав жодних результатів⁵⁰. Отже, той факт, що команда Кейліса-Борока дійсно змогла передбачити землетруси у Сан-Симеоні та на острові Хоккайдо, викликає сумніви. Оцінюючи успіх того чи іншого методу прогнозування, вкрай важливо розуміти різницю між поняттями «власне передбачення» та «розповіді про подію де факто». Передбачення події, що сталася в минулому, — це не більше ніж оксюморон. І, звісно, такі випадки не слід розглядати як приклади однозначного успіху⁵¹.

Однак у січні 2004 року Кейліс-Борок гучно заявив про те, що протягом наступних дев'яти місяців відбудеться землетрус потужністю від 6,4 бала в пустелі Мохаве, на півдні штату Каліфорнія⁵². Це передбачення привернуло до себе неабияку увагу. Дослідженням Кейліса-Борока було присвячено статті в журналі Discover, газеті the Los Angeles Times і ще десятку подібних періодичних видань. Вченому зателефонували з офіса губернатора штату Каліфорнія Арнольда Шварценеггера. Місцева влада зібрала надзвичайне засідання. І навіть консервативні та скептично налаштовані співробітники з USGS приділили чимало уваги цій інформації. На сайті організації зазначалося, що «робота команди Кейліса-Борока ґрунтується на раціональному підході до досліджень у сфері передбачень землетрусів»⁵³.

На щастя, прогнозованого землетрусу в пустелі Мохаве так і не сталося. Причому як того року, так і впродовж наступного десятиліття. Команда Кейліса-Борока продовжувала публікувати свої передбачення землетрусів у Каліфорнії, Італії та Японії, але досягти успіху їй так і не вдалось. У 2010 році було проаналізовано найважливіші передбачення цієї команди і з'ясовано, що вони виявились точними лише у трьох випадках із двадцяти трьох⁵⁴.

Суматра, Індонезія

У передбаченнях землетрусів трапляються й помилки іншого типу. Йдеться про ті випадки, коли вважається, що у тому чи іншому регіоні землетруси великої амплітуди або вкрай малоїмовірні, або взагалі неможливі, а насправді вони там відбуваються. Девід Боумен, учень Кейліса-Борока, що наразі очолює департамент геологічних наук в університеті штату Калі-

форнія в Фулertonі, серйозно сконцентрувався на питанні передбачення землетрусів після трагічних подій 2004 року на острові Суматра. То була справжня катастрофа. Землетрус мав магнітуду 9,2 бала. Внаслідок цього підземного поштовху виникнуло цунамі, що забрало життя 230 000 осіб.

Методика Боумена, як і його вчителя Кейліса-Борока, ґрунтувалась на серйозних математичних обчисленнях, дані для яких брали з відомостей про землетруси середньої сили і на їх підставі формулювали передбачення більш потужних підземних поштовхів⁵⁵. Проте цього разу дослідник застосував, так би мовити, більш елегантний і значно амбіційніший підхід. Боумен запропонував теорію, в межах якої намагався дати кількісну оцінку величині напруження в різних точках системи розломів земної кори. І, на відміну від теорії Кейліса-Борока, підхід Боумена давав змогу робити передбачення імовірності землетрусів у абсолютно будь-якій частині розлому. Таким чином, вчений вирішив, що отримав можливість не тільки передбачати зони з високою ймовірністю виникнення землетрусів, а й визначати місцевості, де їх можна вважати малоімовірними.

Спочатку Боумен і його команда досягали певних успіхів. Нова методика дала змогу визначити зону ризику на острові Суматра, де у 2005 році зафіксували епіцентр серйозного афтершоку з магнітудою 8,6 бала. Але далі почалися проблеми. У своєму науковому дослідженні, опублікованому в 2006 році, Боумен висловив припущення, що в іншій частині розлому — в Індійському океані неподалік від індонезійської провінції Бенкулу ризик серйозного землетрусу дуже низький⁵⁶. Але вже через рік, у вересні 2007-го, там було зафіксовано низку потужних землетрусів, магнітуда найбільшого з яких значалась на рівні 8,5 бала. На щастя, ця серія землетрусів трапилась доволі далеко від населених берегів Індонезії, а отже, не призвела до серйозних людських втрат. Але для теорії Боумена ці землетруси стали фатальними.

Між молотом і ковадлом

Після того як модель Боумена у 2007 році продемонструвала свою неспроможність, дослідник вчинив те, що фахівці з прогнозування майже ніколи не роблять. Замість того, щоб вважати хибний прогноз звичайною невдачею, адже модель все ж таки допускала певну ймовірність землетрусу біля Бенкулу, Боумен іще раз дослідив її і дійшов висновку, що вона була фундаментально помилковою. І в підсумку вчений здався.

«Я не зміг стати успішним фахівцем із прогнозування, — розповів мені у 2010 році сам Боумен. — Я вчинив сміливо, але нерозумно. Я висловив передбачення, яке згодом можна було легко перевірити. Загалом, так і слід діяти, але у разі невдачі ми зазнаємо болю, який нас серйозно засмучує».

Підхід Боумена передбачав можливість виявлення основоположних причин землетрусів як таких, і на цій основі мали створюватись подальші прогнози. Вчений насамперед намагався зрозуміти, яким саме чином змінюється й поширюється напруженість по всій системі розломів. В основу цього підходу Боумен вирішив покласти теорію хаосу.

Теорія хаосу — це демон, якого можна спробувати приручити. Певною мірою це змогли зробити синоптики. Їм значно краще вдається зрозуміти процеси, що відбуваються в атмосфері, аніж сейсмологи розуміють процеси, які проходять під землею. Синоптики також непогано тямлять в атмосфері як системі загалом, а також в окремих аспектах атмосферних явищ на молекулярному рівні.

«Аналізувати процеси в атмосфері просто, — розповідає Боумен. — Якщо ви хочете щось дослідити, вам треба лише підвести очі догори. Ми ж вивчаємо процеси всередині материка. Основні події сейсмології відбуваються на глибині 15 кілометрів під землею. На відміну від безлічі фільмів фантастичного жанру, у нас немає абсолютно жодного дієвого способу туди потрапити. І це фундаментальна проблема. Також у нас немає жодних методів для об'єктивної оцінки процесів у земній корі».

Отже, за відсутності теоретичного розуміння процесів на кшталт того, яким оперують синоптики, сейсмологам залишається спиратися виключно на статистичні методи передбачення землетрусів. Так, звісно, ви можете спробувати ввести в рівняння статистичну змінну, яку називають «напруженням», як це зробив Боумен. Проте оскільки немає жодної можливості просто визначити цю величину, то в нас залишається лише один вихід — виразити її як математичну функцію, взявши до уваги параметри колишніх землетрусів у регіоні. Боумен на власному досвіді переконався, що підхід, заснований виключно на статистиці, в більшості випадків зазнає невдачі. «Масив [сейсмологічних] даних містить у собі величезну кількість шуму, — вважає Боумен, — і у нас просто немає достатньої кількості дієвих інструментів, щоб відділити шум від сигналу».

Прогнозування процесів на підставі даних із занадто великою часткою шуму і без наявної якісно розробленої теорії (це стосується не тільки сейсмології, а й значною мірою економіки та політики), як правило, прохо-

дить у два етапи. Спочатку люди починають помилково сприймати шум за сигнал, потім він заповнює собою статті журналів, випуски новин і вміст інтернет-блогів, при цьому відчайдушно намагаючись видати себе за сигнал. У підсумку це підриває будь-яку довіру суспільства до науки, перешкоджає її розвитку в різних напрямках.

Перенавчання як найбільш вагома наукова проблема, про яку ви ніколи не чули

Коли фахівці зі статистики помилково сприймають шум за сигнал, вони називають це явище перенавчанням. Уявімо собі, що ви дрібний злодій, а я — ваш бос. Я довіряю вам розробку надійного методу добору цифрових комбінацій для кодових замків на кшталт тих, які замикають камери схову. Можливо, ми плануємо щось звідти викрасти. Я хочу, щоб ви назвали спосіб, завдяки якому можна з високою ймовірністю підібрати необхідну комбінацію цифр, щоб відімкнути замок, причому в будь-якому місці й у будь-який час. Для навчання я даю вам три замки — червоний, чорний і синій.

Потренувавшись із замками кілька днів, ви повертаєтесь до мене й заявляєте, що змогли знайти рішення для поставленого завдання. Скажімо, ви стверджуєте, що для червоного замка правильною є комбінація 27-12-31, для чорного — 44-14-19, а для синього — 10-3-32.

Але все, що я можу сказати в цьому випадку, — ви провалили завдання. Так, звісно, ви зрозуміли, як відімкнути ці три конкретних замки. Але у вас так і не з'явилась теорія щодо того, як відкривати всі подібні замки. Насправді ж я хотів би дізнатись, чи можливо відімкнути ці замки за допомогою скріпки, виготовленої з високоякісної сталі, або ж чи можна використати який-небудь характерний для такого типу замків механічний дефект. Та навіть якби вам не вдалося цього зробити, ви, принаймні, сказали б, що можна застосувати яку-небудь хитрість, наприклад, те, що певні цифри використовуються частіше за інші. Натомість ви запропонували занадто чітко та конкретне вирішення доволі складної проблеми. Ось це і є перенавчання системи, і таке явище може стати причиною погіршення якості прогнозів.

Щоб краще пояснити поняття перенавчання, варто звернутися до його оригінального значення англійською мовою — *overfitting*. Воно пов'язане з тим, що статистичні моделі підганяються (*fit*) під результати здійснюваних раніше спостережень. Ступінь такої підгонки може бути як надто конкрет-

ним, так і надто загальним. Коли підгонка надто загальна, це явище називається недонавчанням, тобто *underfitting*. У такому разі ви не наражаєтесь на велику кількість шуму, однак втрачаєте певну частину сигналу, що міг би допомогти покращити якість вашої моделі. Або ж, навпаки, охоплюєте надто значну частину інформації, разом з якою до вашої системи потрапляє велика кількість шуму, — тоді це *overfitting*, тобто власне перенавчання. Таким чином, через надто велику зашумленість моделі втрачається можливість її структурного аналізу. На практиці частіше доводиться стикатися з перенавчанням.

Щоб краще зрозуміти, про що йдеться, візьмімо за основу припущення, яке в реальному житті є майже неможливим, і ми будемо *точно* знати, який вигляд матимуть реальні дані. На рис. 5.3 зображено плавну параболічну криву із максимумом посередині. Такою кривою можна описати величезну кількість явищ із реального світу. Наприклад, вона дуже підходить для опису змін у результативності бейсболістів із віком, про що ми говорили у третьому розділі, адже ці спортсмени демонструють найбільшу результативність приблизно в середині своєї спортивної кар'єри.

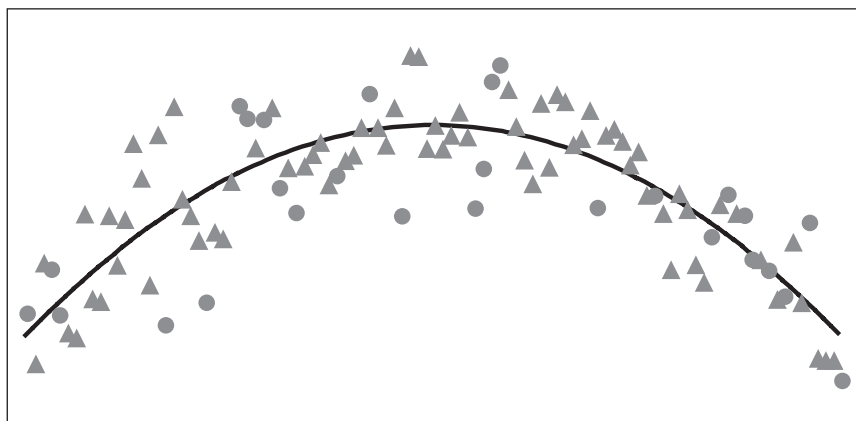


Рис. 5.3. Графік істинного розподілу даних

Проте абсолютно точної відповідності годі й шукати. Натомість ми маємо набір окремих точок, що відповідають конкретним даним, на підставі яких можна спробувати знайти певні закономірності. Ці точки також зазнають значного впливу величезної кількості різних обставин. Отже, окрім сигналу в наших даних наявна і певна частка шуму.

На розглядуваний графік нанесено 100 точок, що відповідають певним даним. Усі точки я оформив у вигляді кружків і трикутників. Такої кількості позначок буде достатньо, щоб виявити сигнал серед шуму. На схемі, звісно, присутній і вплив ефекту випадковості, але, загалом, цілком очевидним є той факт, що зображена крива відповідає загальній тенденції розміщення точок.

Але що буде, коли обсяг наявних у нас даних зменшиться? А саме так досить часто і трапляється. Зрозуміло, що така зміна у вихідних даних призведе до збільшення похибки. На рис. 5.4, *а* я залишив близько чверті точок із сотні. Яку тенденцію ви бачите тут тепер і, відповідно, яку криву намалюєте?

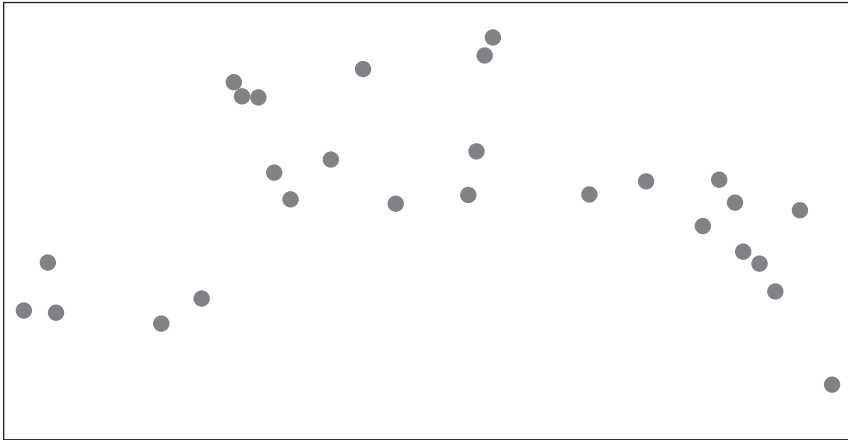


Рис. 5.4, *а*. Розподіл обмеженої кількості даних

Так, звісно, тепер ви знаєте, про яку тенденцію йдеться, тож інтуїтивно будете поєднувати точки між собою за допомогою відповідної кривої. Насправді ж вирішення подібних завдань реалізується за допомогою квадратного рівняння, яке справді допомагає знайти залежність між точками, що буде доволі схожою на істинну, як це показано на рис. 5.4, *б*.

Натомість у ситуаціях, коли невідомо, який вигляд повинен мати графік, ми завжди намагатимемось віднайти так званий «платонічний ідеал», під час пошуків якого часто проявляємо своєрідну жадібність. Подібну жадібність відображає рис. 5.4, *в*, а наша модель набуває ознак перенавчання. Поданий графік є прикладом комплексної функції⁵⁷, що намагається «піді-

брати» майже кожну точку, в результаті чого крива містить не надто адекватні звивини. Як наслідок, ми ще більше віддаляємось від істини, а наші прогнози стають дедалі менш точними.

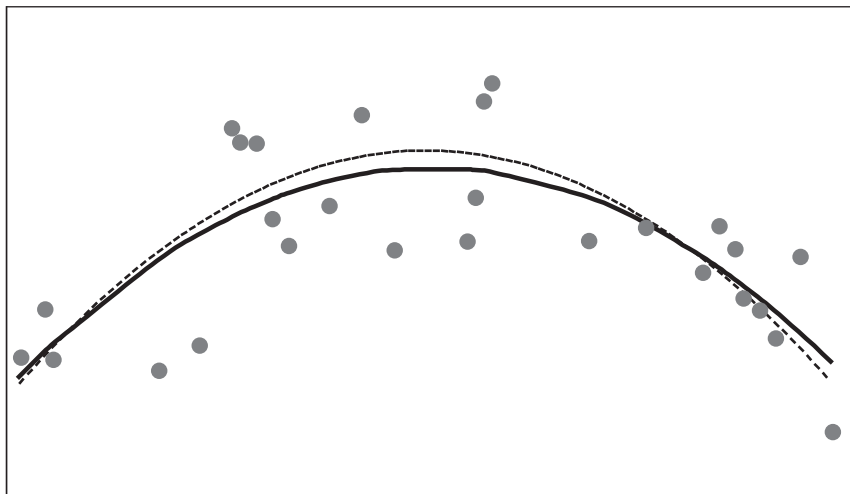


Рис. 5.4, б. Вдало адаптована модель

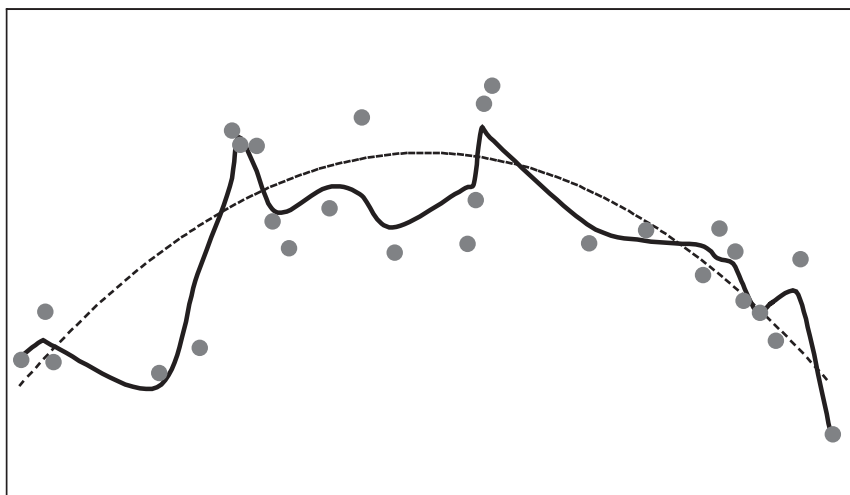


Рис. 5.4, в. Перенавчена модель

На перший погляд може здатись, що уникнути такої помилки неважко. Але це було б можливим тільки в тому випадку, якби ми вміли проникати в суть речей і наперед знали, що і як між собою пов'язано. Але, на жаль, все зовсім не так. Тож майже завжди ми змушені шукати вихід індуктивно, визначаючи структуру даних на основі обмеженої кількості наявної інформації про цю структуру. І якщо вихідної інформації недостатньо, а та, яку ви маєте, зашумлена, якщо у вас доволі слабе розуміння фундаментальних основ системи, ви практично приречені на створення перенавченої моделі. Тож цей аспект неодмінно варто враховувати під час прогнозування землетрусів.

Коли ми не знаємо, які істинні зв'язки існують між фактами та подіями, то наш розум починає знаходити безліч оманливих причин, що будуть схилити нас до створення перенавченого графіка. Однією з таких причин є той факт, що перенавчена модель краще за інші проходить більшість статистичних тестів, які періодично застосовують у своїй роботі фахівці з прогнозування. Найпопулярнішим із них є банальна оцінка відхилень між даними. За результатами тесту перенавчена модель дає змогу пояснити близько 85 відсотків дисперсії (рис. 5.4, *в*). Завдяки цьому вона має дещо кращий вигляд, ніж добре підігнана модель (рис. 5.4, *б*), яка охоплює лише близько 56 відсотків дисперсії. Але істина полягає в тому, що перенавчена модель демонструє високі результати за рахунок певного обману — вона звертає більше уваги на шум, ніж на сигнал. Тобто така модель дасть нам значно менше корисної інформації, коли ми спробуємо застосувати її для реальної потреби⁵⁸.

Комусь, певно, може видатись, що таке пояснення є в буквальному сенсі очевидним. Однак чимало фахівців із прогнозування цю проблему ігнорують. Через велику кількість методів обробки статистичних даних деякі спеціалісти поведуться, як діти, що дивляться на хмари і намагаються розгледіти в них образи різних звірів. Безперечно, таке заняття дуже цікаве, однак воно абсолютно антинаукове. Влучно висловився з цього питання Джон фон Нейман: «Криву із чотирма змінними я можу підігнати під слона, а якщо змінних буде п'ять, я змушу цього слона махати хоботом»⁵⁹.

Перенавчена модель, з одного боку, має дуже гарний вигляд на папері, однак під час перевірки реальністю вона демонструє низькі результати. Це означає, що прогнози, які базуються на перенавченій моделі, рано чи пізно нас підведуть. А занадто привабливий вигляд на папері може ввести нас в оману і не дасть змоги вчасно виявити всю підступність ситуації. Певний

час прогнози на основі подібної моделі вважатимуться прогресивними, точними, а отже, такими, що заслуговують на довіру. Наступним кроком буде публікація моделі в наукових виданнях, звідки вона почне витісняти інші моделі — не настільки привабливі, але такі, що демонструють значно більш чесну картину того, що відбувається. Таким чином, у науці шум може почати витісняти сигнал, а це неодмінно завдасть чималої шкоди.

Як ви вже, напевно, здогадалися, модель Кейліса-Борока була надто перенавченою. Вона використовувала дуже складну систему рівнянь, вихідні дані для яких були серйозно зашумлені. І за цю помилку досліднику довелося розплачуватись — із 23 прогнозів, здійснених на основі цієї моделі, справдились лише три. Однак Девід Боумен зрозумів, що його модель потрапила в пастку перенавчання, і вчасно перестав над нею працювати.

Варто зауважити, що подібні помилки не є умисними. Здебільшого всі вони засновані виключно на добрих намірах. Н. Н. Талеб написав книгу, присвячену цій проблематиці, й дав їй дуже влучну назву: «Обдурені випадковістю». Вади перенавчених моделей можуть, на перший погляд, здаватись допустимими, і їм можна буде знайти раціональне пояснення. Ба більше, ми можемо доволі довго не помічати фундаментальної проблеми, продовжувати рухатись у вибраному напрямку, створювати начебто переконливі теорії, знаходити відповіді на запитання, які постійно виникають, і, того не розуміючи, обманювати як самих себе, так і інших людей. «У своїй науковій праці ми намагаємось віднайти баланс між зацікавленістю та скептичністю», — так висловився про цю проблему Майкл Бабяк⁶⁰.

І, звичайно, зацікавленість переважає.

Чи була сейсмологічна модель Японії перенавченою?

Наша схильність помилково сприймати шум за сигнал час від часу може призводити і до справжніх трагедій у реальному житті. Як відомо, Японія розташована у доволі сейсмічно активному регіоні, проте, незважаючи на це, вона виявилась зовсім не готовою до землетрусу 2011 року. Ядерний реактор на АЕС у Фукусімі був спроектований таким чином, щоб витримати землетрус магнітудою до 8,6 бала⁶¹, але аж ніяк не 9,1. Археологічні знахідки свідчать про те, що висота цунамі, які час від часу атакували японське узбережжя, могла досягати 40 метрів⁶². Приблизно така сама картина спо-

стерігалась і в 2011 році. Проте, судячи з усього, про цю інформацію забули або ж її безвідповідально проігнорували.

Загалом землетруси магнітудою 9,1 бала у світі бувають нечасто. Тому передбачити їх у край важко, навіть з точністю до десятиліття, не кажучи вже про якусь конкретну дату. Але в Японії вчені та сейсмологи пішли іще далі, повністю проігнорували можливість того, що в регіоні може статись настільки сильний землетрус. Така впевненість може свідчити про наявність у їхніх розрахунках перенавчання.

На рис. 5.5, а показано, як співвідносяться частоти повторень достовірно зафіксованих землетрусів та їхніх магнітуд з епіцентром в Японії⁶³. Цей графік враховує всі зафіксовані землетруси, окрім того, що стався 11 березня і мав магнітуду 9,1 бала. Як бачите, землетруси в регіоні формують практично лінійний графік. Приблизно таким чином підземні поштовхи й повинні співвідноситись, якщо вірити методу Гутенберга та Ріхтера. Але в точці графіка, де магнітуда становить близько 7,5 бала, лінія ламається. Від 1964 року в регіоні не спостерігалось землетрусів магнітудою понад 8 балів, тому зміна напрямку графіка з огляду на цей факт видається цілком закономірною.

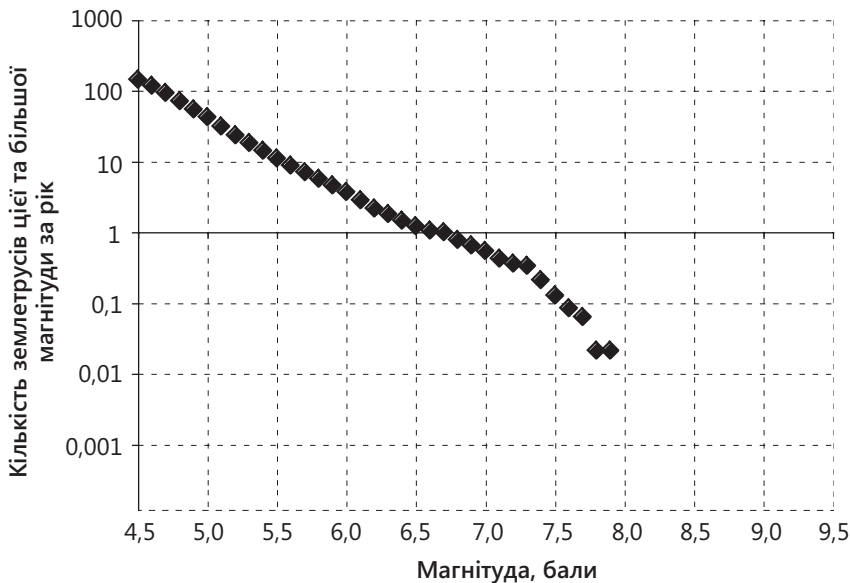


Рис. 5.5, а. Частота землетрусів, що сталися в Тохоку, Японія, в період з 1 січня 1964 по 3 жовтня 2011 року

То як нам поєднати ці точки на графіку? Якщо ви будете керуватись методом Гутенберга – Ріхтера, тобто проігноруєте злам лінії, у вас вийде пряма, аналогічна поданий на рис. 5.5, б.

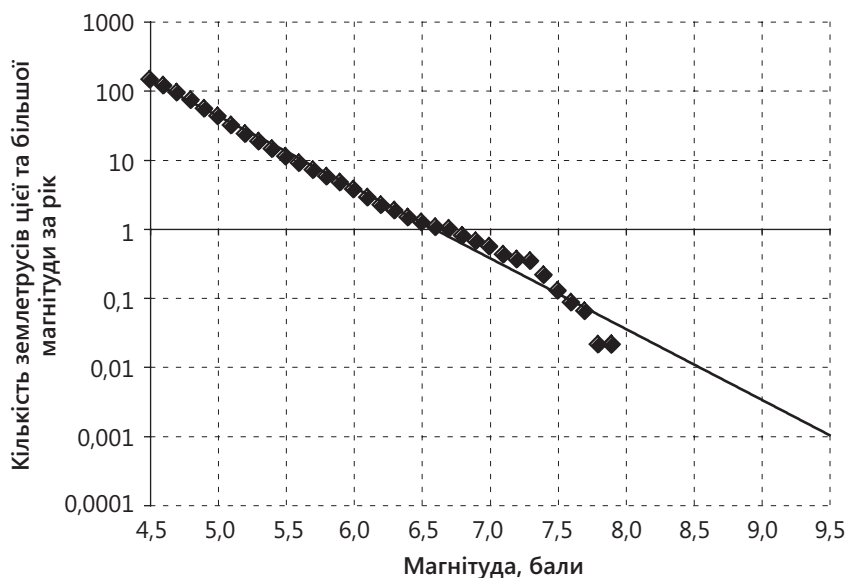


Рис. 5.5, б. Частота землетрусів у Тохоку, Японія, відповідно до методу Гутенберга – Ріхтера

Але графік можна також підігнати під так звану *характеристичну* відповідність (рис. 5.5, в). Цей метод передбачає, що достовірно зафіксовані в минулому землетруси можуть допомогти у створенні об'єктивної сучасної картини. А отже, ви не повинні ігнорувати згин на графіку, а обов'язково взяти його до уваги. Відтак маєте припустити, що існує вагома причина того, що землетруси магнітудою понад 7,6 бала у цьому регіоні малоймовірні.

Така зміна поведінки графіка є ще одним прикладом того, як вибір зробленого першим припущення призводить до кардинально різних висновків. У нашому випадку ми говоримо про ймовірність землетрусу силою 9 балів у конкретному регіоні Японії. І якщо оцінювати наявні дані з точки зору характеристичної відповідності, то можна зробити висновок, що землетруси такої сили в Японії практично неможливі, вони виникатимуть лише приблизно раз на 13 000 років. Натомість оцінка за методом Гутенберга –

Ріхтера свідчить, що землетруси такої потужності відбуватимуться кожних 300 років. Отже, можна сказати, що землетруси магнітудою 9 балів у японському Тохоку бувають доволі рідко, але вони однозначно можливі. Відповідно ризик, пов'язаний із можливістю такого землетрусу, обов'язково слід брати до уваги. Більше того, такій економічно розвиненій країні, як Японія, це під силу, і вона може собі дозволити якісно підготуватися до подібного землетрусу⁶⁴.

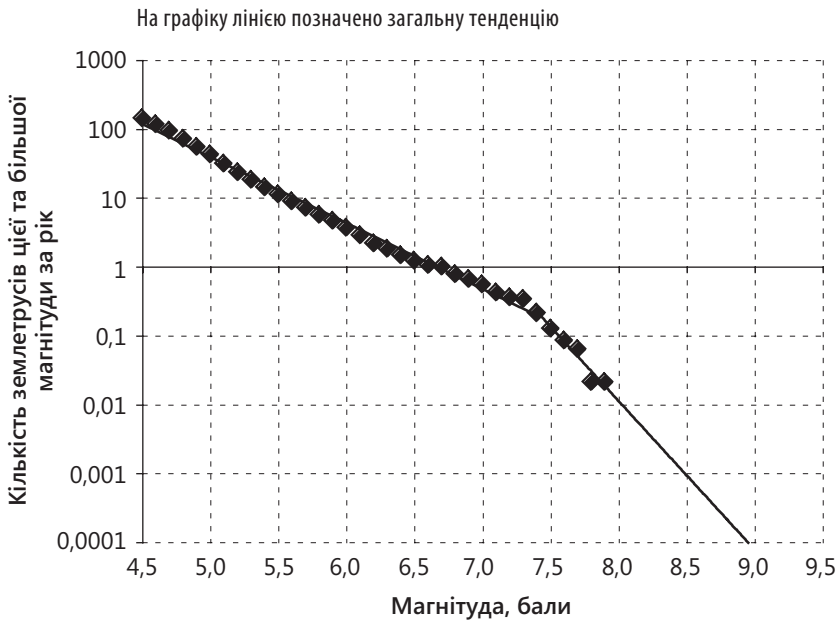


Рис. 5.5, в. Частота землетрусів, що сталися у Тохоку, Японія, в період з 1 січня 1964 по 3 жовтня 2011 року

Характеристична відповідність непогано підходила для Тохоку за вказаний період спостережень. Та, як з'ясувалось на практиці, цей метод періодично може давати збій. Застосована методика також інколи супроводжується явищем перенавчання, а отже, ще більше ускладнює роботу з виявлення об'єктивної істини. У прикладі з Японією перенавчена модель призвела до катастрофічної недооцінки ймовірності надпотужного землетрусу в Тохоку.

Головна проблема, пов'язана із застосуванням методу характеристичної відповідності, полягає в тому, що система починає залежати від доволі

незначного відсотка сигналу. Як уже згадувалося раніше, за останніх сорок п'ять років у названому регіоні не було жодного землетрусу магнітудою понад 8 балів. Але варто зауважити, що підземні поштовхи такої потужності взагалі трапляються не так часто. Відповідно до закону Гутенберга — Ріхтера землетруси такої сили в цьому районі можливі лише приблизно один раз на 30 років. Тож немає нічого неймовірного в тому, що подія, яка зазвичай повторюється в середньому раз на 30 років⁶⁵, одного разу змусила себе чекати 45 років⁶⁶. Так буває — так само, як буває, що навіть у зіркового бейсболіста настає темна смуга в кар'єрі.

Що цікаво, хоча землетруси магнітудою 7 балів у Тохоку відбувалися досить рідко, але зазвичай повсюди на планеті землетруси такої сили є провісниками значно масштабніших підземних поштовхів. То чому ж вчені-сейсмологи вирішили, що Тохоку є якимось особливим у цьому плані регіоном?

Варто зауважити, що і японські, і зарубіжні дослідники знайшли цьому факту раціональне пояснення. Було висунуто припущення, що особливість складу океанічного дна, а також холодна, а отже, більш щільна товща вод Тихого океану не залишають можливості для катастрофічно потужних землетрусів⁶⁷. Дехто із вчених звернув увагу й на те, що до 2004 року в регіонах із подібним типом океанічного дна не було зафіксовано жодного землетрусу магнітудою понад 9 балів.

Але такого роду твердження можна порівняти із тим, що жоден із жителів Пенсильванії ніколи не виграє джекпот в лотерею, оскільки нічого подібного не трапилось за останніх три тижні. Фактично, до 2004 року у світі було зафіксовано лише три землетруси такої потужності. Поза сумнівом, цих даних явно недостатньо, аби робити будь-які конкретні висновки про обставини, за яких можуть статись подібні катастрофічні підземні поштовхи. І наведений приклад такого надмірного спокою далеко не поодинокий. Схожі висновки було зроблено і щодо Суматри⁶⁸, де також фіксувалось чимало землетрусів магнітудою 7 балів⁶⁹, але не більше. Проте у грудні 2004 року на Суматрі стався гігантської сили підземний поштовх — його магнітуда становила 9,2 бала⁷⁰.

Закон Гутенберга — Ріхтера не давав змоги назвати точну дату землетрусу в Японії та на Суматрі, проте він цілком припускав можливість виникнення землетрусів такої потужності⁷¹. Тож цей закон і досі залишається актуальним, тоді як величезна кількість інших моделей зазнали нищівної критики.

На що здатні землетруси і що ми про це знаємо

Надпотужні землетруси останніх років змушують сейсмологів серйозно замислитися над верхньою позначкою їхньої шкали магнітуд. Коли ми ще раз поглянемо на рис. 5.4, *б*, де позначено всі землетруси, що сталися, починаючи з 1964 року включно з катастрофічними підземними поштовхами на Суматрі та Тохоку, то побачимо практично пряму лінію, яка проходить через усі точки наявних даних. Так, якби ми побудували цей графік років із 10 тому, то він містив би дещо більшу кількість згинів на кшталт тих, які ми бачимо на рис. 5.5, *а*. Звідси випливає, що справді неймовірно потужні землетруси траплялись трохи рідше, ніж мало бути за законом Гутенберга — Ріхтера. Однак в останні роки їх кількість почала зростати.

Оскільки землетруси магнітудою 9 балів бувають украй рідко, нам знадобиться щонайменше ще кілька століть для того, щоб більш точно з'ясувати, як часто насправді відбуваються землетруси подібної сили. Ще більше часу нам потрібно для того, аби зрозуміти, чи можливі землетруси потужністю понад 9,5 бала. Доктор Хоф розповіла мені, що географія системи розломів певним чином обмежує силу та масштаб землетрусів. Якщо з'єднається найбільша у світі система розломів, що тягнеться від Терра Дель Фuego на південному узбережжі Південної Америки до Алеутських островів, то може статись і землетрус магнітудою 10 балів. Проте наразі невідомо, чи можливе таке взагалі.

Але якби навіть у нас були сейсмологічні записи за останніх тисячу років, це навряд чи змогло б суттєво допомогти. Не виключено, що землетруси мають певну граничну межу даних, які можна використовувати для передбачень.

Землетруси за своєю природою — досить складний, або, якщо використовувати наукову термінологію, *комплексний* процес. Тут починає діяти розроблена фізиком Пером Баком так звана теорія складності. До речі, її часто поєднують із теорією хаосу, хоча між ними є суттєві відмінності.

Бак полюблив для наведення прикладу використовувати аналогію з купкою піску на пляжі. Якщо кинути на неї ще одну піщинку, то це залежно від розміру купки може спричинити три можливі наслідки. По-перше, можливо, жодних помітних змін не станеться. По-друге, падіння піщинки може викликати сповзання до підніжжя купки кількох інших піщинок. Нарешті, може відбутися дещо зовсім інше: падіння піщинки дестабілізує всю систему, чим спровокує своєрідну піщану лавину. Таким чином поводяться усі

комплексні системи. Для них також характерні тривалі періоди затишшя, що рано чи пізно закінчуються катастрофічними наслідками. Загалом ці процеси зовсім не випадкові, проте вони настільки складні, що точне їх передбачення — це вже за межею нашого розуміння.

Привабливість шуму

Якщо розглядати комплексні процеси у правильному масштабі, тобто з до-
сить значної відстані, в них можна помітити впорядкованість і своєрідну
привабливість. У цій книзі я на власний розсуд вживаю терміни «сигнал» і
«шум», хоча насправді це конкретні терміни, що використовуються в галузі
електротехніки. Інженери вирізняють кілька різних типів шуму. З одного
боку, всі вони характеризуються як майже повністю випадкові, а з іншо-
го — добре підходять під певні приклади ймовірнісного розподілу. Скажі-
мо, якщо ви послухаєте «білий шум», що за своєю природою є випадковими
сплесками звуку, він може вам здатись занадто грубим та неприємним. А от
інший тип шуму — так званий броунівський шум⁷², пов'язаний із комплек-
сними системами, буде для вас певною мірою заспокійливим, він нагадува-
тиме звук водоспаду*.

Тектонічні сили, що викликають землетруси та створюють розломи
глибоко під поверхнею землі, створюють неймовірно красиві гори, родючі
долини та мальовничі береги річок і морів. А отже, люди, швидше за все,
ніколи не залишать ці милі їхньому серцю місця, навіть незважаючи на по-
стійну сейсмічну загрозу.

Суд над наукою

Історія із землетрусом в Л'Аквілі закінчилась безглуздо: у 2011 році семеро
вчених і чиновників постали перед судом: їх звинувачували у ненавмисному
вбивстві⁷³. Прокурори з Л'Аквілі стверджували, що підсудні не забезпечи-
ли адекватне інформування місцевих жителів про наближення небезпеки,
про яке свідчив цілий «рій невеликих землетрусів».

* Найпростішим прикладом «білого шуму» є звук радіо чи телевізора, якщо їх неправильно
налаштувати на потрібну частоту; про броунівський шум докладніше можна почитати за
адресою https://uk.wikipedia.org/wiki/Червоний_шум.

Безперечно, цей суд був дурницею. Та все ж чи є підстави вважати, що вчені могли краще зробити свою справу? Швидше за все — так. Існує чимало свідчень того, що після виникнення «рою невеликих землетрусів» суттєво (інколи у 100, а то й у 500 разів⁷⁴) зростає ризик серйозного землетрусу. І все ж ризик залишався вкрай низьким. Та й взагалі «рої» дрібних землетрусів здебільшого не передують серйозному підземному поштовху. Однак вченим і посадовцям не слід було запевняти місцевих жителів, що нічого поганого не станеться, і пропонувати їм краще розслабитись і випити келих вина.

Червоною ниткою через цю книгу проходить переконання у тому, що головний обов'язок будь-якого фахівця з прогнозу полягає у збереженні вірності об'єктивній істині. Проте спільнота сейсмологів не надто рішуча у своїх передбаченнях, вона досі певним чином налякана наслідками невдалих передбачень у Лімі та Паркфілді. Їм постійно заважають і такі досить сильні опоненти, як Джуліані. Всі ці чинники постійно шкодять вченим, відволікають їх від роботи. Таким чином, ми побачили ще один приклад того, як хибні та безвідповідальні прогнози легко перекривають собою всі достовірні, якісні передбачення.

Можливо, доктор Хоф має рацію, стверджуючи, що нам ніколи не вдасться відкрити «Святий Грааль» у передбаченні землетрусів. Сейсмологія переповнена тисячами гіпотез щодо їх прогнозування. Однак наявні дані яскраво свідчать, що практично всі вони виявились хибними. А це означає, що універсальні підходи до передбачення землетрусів, швидше за все, неможливі.

Проте не все так погано. Сейсмологія змогла досягти певного прогресу в питаннях короткострокового прогнозування землетрусів. І це наукове досягнення могло б врятувати чимало життів у Л'Аквілі. Окрім закону Гутенберга — Ріхтера, сейсмологія також активно послуговується знанням про те, що після кожного потужного землетрусу відбувається серія афтершоків. Власне, відомості про афтершоки і є підґрунтям для того самого короткострокового прогнозування. Джон Рандл із Каліфорнійського університету в Девісі і Том Йордан з Університету Південної Каліфорнії — сейсмологи, з якими я особисто поспілкувався, займаються короткостроковими прогнозами афтершоків і намагаються переконати колег, що інформація про можливі афтершоки обов'язково має доноситися до широкого загалу.

Дослідження Йордана доводять, зокрема, що інколи вдається передбачити рух афтершоків уздовж заздалегідь відомої лінії розлому. Якщо афтершоки рухатимуться в бік населених пунктів, вони становитимуть

серйозну загрозу для їхніх жителів, навіть з огляду на те, що афтершоки зазвичай слабші, ніж перший землетрус. Так, унаслідок землетрусу магнітудою 5,8 бала, що стався у 2011 році в Крастчерчі, Нова Зеландія, загинуло 185 осіб. Показово, що цей землетрус був афтершоком по відношенню до 7-бального землетрусу, який стався у вересні 2010 року⁷⁵. Взагалі, коли йдеться про афтершоки, у вчених на руках з'являється значно більше сигналів, тобто їм є над чим працювати.

На допомогу сейсмологам приходять також здобутки у сфері технологій. Особливо цікавою є спроба Джона Рандла у співпраці із NASA виміряти напруження в розломах за допомогою дистанційного зондування супутниками GPS⁷⁶. Хоча на сучасному етапі результати досліджень залишають бажати кращого, однак у майбутньому ця технологія може надати сейсмологам величезний масив надзвичайно корисних даних, що допоможуть їм зрозуміти саму основу причин виникнення землетрусів.

Не викликає сумнівів, що з часом застосування новітніх методів зумовить прогресивні зміни у сейсмології. Так, звісно, ми вже кілька тисяч років фактично стоїмо на місці в питаннях передбачення землетрусів, однак не варто забувати, що всього лише 40 років тому точно такою самою була ситуація із доволі успішним нині прогнозуванням погоди. Можливо, в майбутньому ми навчимося краще оперувати теорією складності, що наразі сприймається як новітня, а тому ще недостатньо вивчена наукова концепція. І відтак ми зможемо дійти висновку, що природа землетрусів не така вже й непередбачувана.

Втім, на шляху до успіху в справі прогнозування землетрусів на нас чекає ще чимала кількість невдалих передбачень. Та рано чи пізно ми ступимо на правильний шлях, проберемося «через терни до зірок», в нашому випадку — до сигналу.