

Збудження землетрусів мікросейсмічними шумами і погодними явищами

© П. В. Анахов¹, М. В. Макарець², 2013

¹ ПАТ "Укртелеком", Київ, Україна

² Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Надійшла 7 вересня 2012 р.

Представлено членом редколегії О. В. Кендзерою

Для описания роли динамики водообмена в возбуждении слабых землетрясений использовано понятие гидросейсмичности, которая характеризуется действием физико-химических процессов в геологической среде и соответствующими им изменениями свойств самой среды (трещиноватостью среды, поровым давлением грунтовых вод, гидрогеохимической миграцией элементов). Показано, что на сейсмичность опосредованно, через микросейсмические шумы среды и механизмы электросейсмического эффекта, влияют погодные явления.

To describe the role of hydrological cycle dynamics in stimulation of weak earthquakes the conception of hydroseismicity is used; hydroseismicity is characterized by the influence of physical-chemical processes in the geological environment and the corresponding changes in properties of environment (fractured of crust, pore pressure diffusion of groundwater, solubility of minerals). It is shown that seismicity stimulated by weather impacts — microseisms of environment and mechanisms of electro-seismic phenomena.

Вступ. Вплив погодних умов на сейсмічність проявляється опосередковано, через мікросейсмічні шуми середовища [Мирзоев, 2009]. Їх дія може полягати в тому, що під час двигтіння ініціюються крипові переміщення і низькочастотні "тихі землетруси" вздовж сейсмогенних розломів. Крім того, є повідомлення про реакцію середовища на електромагнітні впливи, що зумовлено дією электросейсмічного ефекту. Теоретичне обґрунтування цього ефекту [Ярославский, Капустян, 1990] підтверджено результатами лабораторних дослідів [Анциферов, 1964; Фатеев, 2004, 2005; Закупин и др., 2006], модельними експериментами [Плескач, 1986; Тарасов, 1997] і спостереженнями в натурних умовах [Плескач, 1986; Адушкин и др., 2002]. Є підстави вважати, що электросейсмічний ефект формується за рахунок комплексу відгуків середовища: руху води або зважених у ній часточок (зворотний електрокінетичний ефект) [Анциферов, 1962, 1964], деформацій окремих квар-

цових включень у гірських породах (зворотний п'езоефект) [Ярославский, Капустян, 1990], деформацій кристалів (електрострикція) [Черняк, 1976], варіацій електромагнітних властивостей [Costain et al., 1987; Макарець, Анахов, 2008]. Добре відомо, що поблизу земної поверхні існує електричне поле. Його величина у безхмарну погоду становить приблизно 100 В/м, а в грозовій хмарі зростає до 15 кВ/м і більше [Адушкин и др., 2002; Капустян, 2002]. Такі зміни, за умови прямо пропорційної залежності механічного відгуку від електромагнітної дії, не можуть не впливати на перебіг сейсмотектонічного процесу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Автори праці [Мирзоев, 2009], враховуючи важливість проблеми наведеної сейсмічності, запропонували відкрити дискусію з цього питання. Вони наголошують, що на сейсмічність впливають такі природні процеси: 1) земні припливи, зумовлені зміною сили гравітаційного

тяжіння Місяця і Сонця; 2) нерівномірність обертання Землі, яка проявляється у варіаціях швидкості обертання, рухах полюсів і змінах положення осі обертання; 3) афтершоки віддалених сильних землетрусів; 4) дія мікросейсмів як природний механізм розрядки напружень земної кори у вигляді слабких коливань; 5) погодні явища: зміни атмосферного тиску, температури повітря, кількості опадів, швидкості вітру, а також циклонічна активність, тайфуни, торнадо.

Як правило, впливу погоди на сейсмічність приділяють мало уваги, частіше як природному курйозу, а не як самостійному явищу. Багато дослідників вказує на порівняно слабкий вплив погодних явищ на тверду Землю. Водночас надходять епізодичні повідомлення про встановлення ознак можливого зв'язку катастрофічних погодних явищ із сейсмічністю (табл. 1).

Після землетрусу 19 грудня 1899 р. з епіцентром в м. Ахалкалакі (Грузія) Ф. Мольденгауер виявив, що дебіт (добовий об'єм) джерела мінеральної води в м. Боржомі (Грузія), на відстані понад 100 км від епіцентру, різко збільшився в 1,3—1,7 раза. У подальшому виявилось, що дебіт почав змінюватися безпосередньо перед початком землетрусу [Moldenhauer, 1912]. Сейсмічна комісія і Геологічний комітет Росії зазначили, що виявлений факт має велике теоретичне і практичне значення, оскільки відкриває новий спосіб прогнозування землетрусів [Голицын, 1960].

Відомо, що підземна гідросфера є середовищем зародження сейсмотектонічних процесів. Для описання ролі динаміки водообміну в разі збудження землетрусів було уведено нове поняття — гідросейсмічність [Costain et al., 1987]. Згідно із визначенням, гідросейсмічність характеризує дію фізико-хімічних процесів у геологічному середовищі та відповідні їм зміни властивостей середовища, а саме: а) його тріщинуватості; б) порового тиску ґрунтової води; в) гідрогеохімічної міграції елементів.

Тріщинуватість середовища. За сучасними уявленнями, землетруси слід розглядати як результат механічного руйнування в земній корі, пов'язаного із зародженням дрібних розривів суцільності і злиттям їх у більші розриви. Попри різноманіття чинників, що впливають на кінетику виникнення і розвитку мікротріщин, з переходом від мікро- до макроруйнування вирішальним виявляється концентраційний критерій [Журков и др., 1977]:

$$K = \frac{N^{-1/3}}{L} \approx \text{const},$$

де N — концентрація зародкових тріщин у передрозривному стані; L — розмір початкових зародкових тріщин.

Справедливість концентраційного критерію підтверджена великим обсягом експерименталь-

Т а б л и ц я 1. Кореляція між зливами і сейсмічністю: землетруси з епіцентрами в межах літосферної тектонічної плити [Costain et al., 2010]

№ п/п	Опис	Джерело
1	Статистичний аналіз землетрусів, які сталися на Балканському півострові за період 1901—1970 рр., дав змогу виявити зони, де сильні зливи можуть вплинути на сейсмічну діяльність	[Muço, 1999]
2	За даними статистичного аналізу 211 землетрусів магнітудою $M \geq 4,5$, які сталися в Албанії за період 1901—1990 рр., третина з них (33 %) припадає на листопад—грудень, сезон дощів	[Muço, 1995]
3	За даними статистичного аналізу кількості опадів і мікроземлетрусів на вулканічному острові Тенеріфе (Іспанія) за період 12.1987—10.1992 рр. їх кореляційна залежність становить 99 %	[Jiménez, García-Fernández, 2000]
4	За даними статистичного аналізу 31 землетрусу в штаті Керала (Індія) за період 1821—2001 рр., у 22 випадках вони тяжіють до сейсмічно активних лінементів і формуються в сезон дощів	[Raj et al., 2001]
5	За даними спостережень сейсмічності на г. Хохстауфен (Hochstaufen, Німеччина) за період 2001—2006 рр., причиною землетрусів з епіцентром на глибині 1—4 км можуть бути незначні варіації порового тиску, спричинені опадами	[Hainzl et al., 2006]

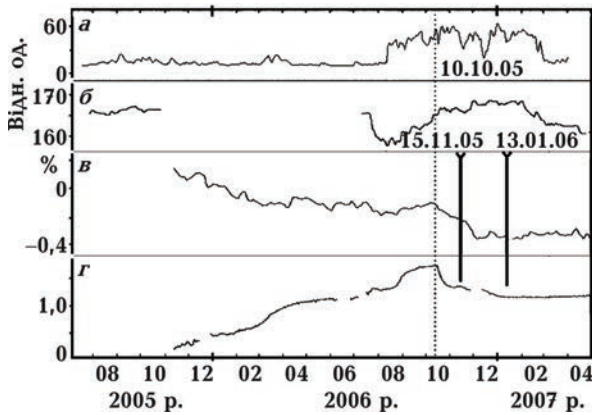


Рис. 1. Результати вимірювань у районі Авачинської бухти [Гаврилов, 2008]. Зміна фонового рівня: а — електромагнітної емісії частоти 160 Гц; б — геоакустичної емісії частоти 160 Гц у св. Г-1; зміна відносної густини води: в — св. Г-1; г — св. Р-2.

них даних, у тому числі на прикладі землетрусів [Уломов, 2007].

У 2006—2007 рр. у районі Авачинської бухти (Росія) сталося 2 катастрофічні Сімуширські землетруси. Згідно з даними моніторингу (рис. 1), 10 жовтня 2006 р. почалося різке зниження відносної густини води у свердловинах, що передувало землетрусу 15 листопада. Надалі спад продовжився, що призвело до повторного землетрусу 13 січня 2007 р. Затримка між датою різкого зниження відносної густини води 10 жовтня і датою землетрусу 15 листопада становить 36 діб. Ці події пояснюються з позиції концентраційного критерію укрупнення тріщин (за [Соболев, Завьялов, 2007], критерій Журкова — Куксенко) — відбулася поступова перебудова системи тріщин геологічного середовища із збільшенням середніх розмірів тріщин і зменшенням їх середньої об'ємної концентрації [Гаврилов, 2008].

Поровий тиск ґрунтової води. Вплив ґрунтових вод на сейсмічність зафіксований в районах розміщення глибоких свердловин. На Рейнджельському нафтовому родовищі (США) був проведений експеримент щодо здійсненності контролювання землетрусу. Виявилось, що епіцентри групуються в зоні розлому, а зміни сейсмічності ініціюються керованими варіаціями тиску закачаної рідини [Raleigh et al., 1976].

У м. Мацушіро (Японія) було пробурено свердловину завглибшки 1800 м для захоронення каналізаційних відходів під тиском 14—50 атм. У результаті закачування у цій місцевості почалися землетруси. Виявилось, що зміни сейс-

мічності були ініційовані дією фільтрованої через тектонічний розлом рідини, що зумовило зниження міцності порід в околі розлому і врешті-решт призвело до тектонічного напруження середовища та збудження сейсмічної емісії (рис. 2). Затримки часу 4,8—9,3 доби між зростанням тиску в свердловині та сейсмічними подіями 25 січня, 6 і 11 лютого були пояснені перебудовою системи тріщин геологічного середовища [Ohtake, 1974].

В основу механізму збудження землетрусів покладено модель пружності середовища з порами, насиченими ґрунтовими водами [Parotidis et al., 2003]. Зміна тиску рідини у порах викликає механічні напруження в середовищі, а поширення рідини в останньому автори описують рівнянням дифузії. Цей процес є повільним, середню відстань поширення водного розчину r за час t оцінюють, як

$$r = \sqrt{4\pi Dt},$$

де D — коефіцієнт гідралічної дифузії, який оцінено авторами в межах від 0,01 до 10 м²/с. За таких значень коефіцієнта дифузії проникнення водного розчину на відстань, наприклад, 1 км відбудеться за час від кількох годин до декількох місяців.

Вважають, що сильним режимоутворювальним фактором формування інфільтраційного живлення є атмосферні опади [Шестаков, 1995; Costain et al., 2010]. Якщо рівень ґрунтової води розміщується близько до земної поверхні, а проникність зони аерації порівняно велика, то навіть у разі короткочасних опадів він може істотно (до 20—40 см) підвищуватися в результаті надходження води по тріщинах у ґрунті.

На рис. 2 показано два максимуми сейсмічності 5 і 26 березня 1970 р., які приурочені до сильних злив 25 лютого (затримка 8 діб) і 16 березня (затримка 10 діб) [Ohtake, 1974].

Під час обводнення зони розлому дощами у вимірювальній свердловині на полігоні "Листвянка" рівень води підвищувався на 30—50 см і більше. Результатом стало помітне зростання швидкості та амплітуди зміщення по зоні розлому. На рис. 3 стрілками вказано час випадіння дощу; на графіку чітко видно відповідну реакцію геологічного середовища — саме зміщення.

Автори [Пат. ..., 2006] вважають, що одним з головних чинників, що можуть впливати на режим зміщень країв тектонічного розлому, є його насиченість водою, оскільки це призводить до зниження в'язкості матеріалу в зоні розлому. Механізм подібного ефекту пов'язаний зі зниженням зсувного опору в площині роз-

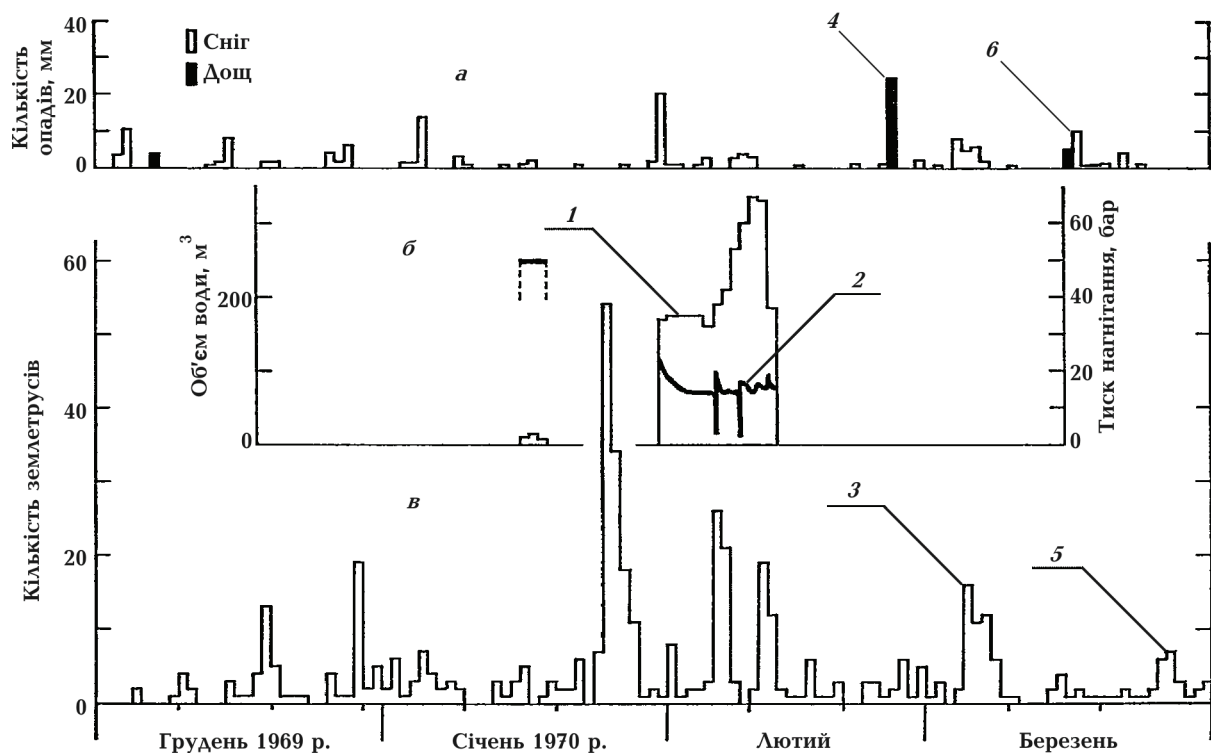


Рис. 2. Сейсмічна обстановка у м. Мацушіро в період з 1 грудня 1969 р. до 31 березня 1970 р. [Ohtake, 1974]: *a* — кількість опадів у м. Нагано, 10 км на північ від м. Мацушіро (4 — дощ 25 лютого, 6 — дощ 16 березня); *б* — дані щодо води, яку подають у свердловину (1 — гістограма об'єму, 2 — крива тиску нагнітання); *в* — щоденна кількість землетрусів, які відбувалися в межах зони впливу (3 — землетруси 5 березня, 5 — землетруси 26 березня).

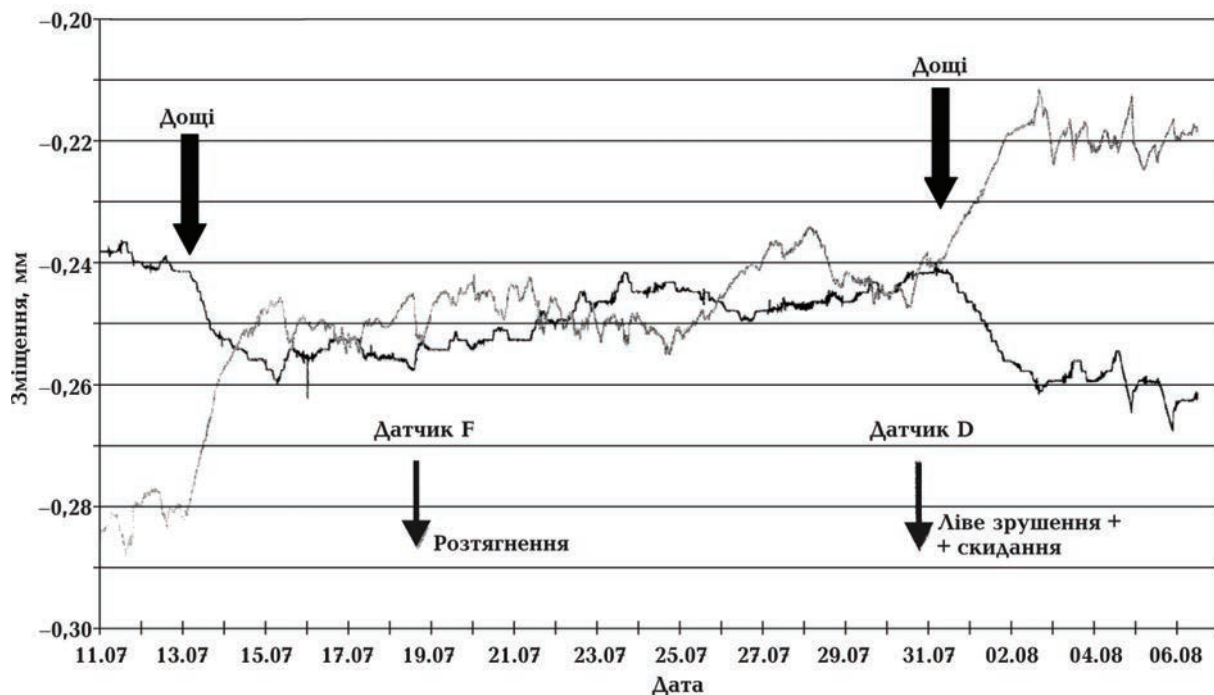


Рис. 3. Вплив проливних дощів на зміщення по зоні розлому (геодинамічний полігон "Листвянка", липень—серпень 2003 р., Іркутська обл., Росія). Датчики зміщення розташовані в порожнині тріщини [Пат. ..., 2006].

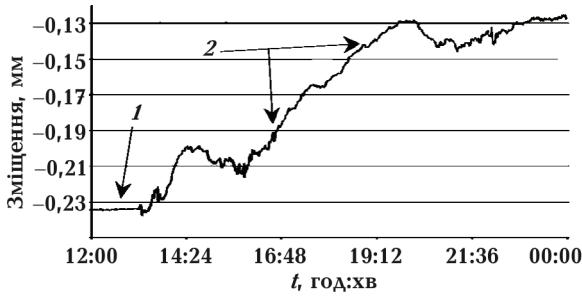


Рис. 4. Фрагмент запису зміщень, ініційованих заливанням рідини у зону Ангарського тектонічного розлому (геодинамічний полігон "Листвяна", Іркутська обл., Росія) в ході експерименту 10 липня 2003 р. [Пат. ..., 2006]: 1 — початок наповнення водою; 2 — зміщення.

лому. Під час експерименту в натурних умовах із штучним насиченням тектонічного розлому водою були ініційовані зміщення його крил (рис. 4).

Гідрогеохімічна міграція елементів. Фільтраційний потік у породах приводить до виникнення процесів гідрогеохімічної міграції, які зумовлюють зміни якісного складу підземної води. Крім масопереносу гідрогеохімічна міграція включає обмін хімічних компонентів складу водного розчину (мігрантів) між рідкою і твердою фазами, а також гідрохімічні перетворення у водному розчині в системі вода—порода [Шестаков, 1995]. Карбонати кальцію і магнію, з яких складаються кальцит і доломіт — породоутворювальні мінерали вапняків, крейди, доломіту і мармурів, є важкорозчинними сполуками (табл. 2). Сульфат кальцію, з якого складаються гіпс і ангідрит, — середньорозчинний. Хлорид натрію, як і хлорид калію, з яких складаються кам'яна і калійна солі, є легкокорозчинними.

Т а б л и ц я 2. Розчинність породоутворювальних мінералів гірських порід під дією карсту (розчинення або вилугування) у дистильованій воді [Ломтадзе, 1977]

Мінерал	Температура, °С	Розчинність, г/л
CaCO ₃	16	0,013
CaCO ₃ · MgCO ₃	25	0,015
CaSO ₄	18—25	2,02—2,10
NaCl	10	357,2

Вище наголошено, що на сейсмічність також впливають *мікросейсми*. Хитні рухи призводять до крипових переміщень і низькочастотних "тихих землетрусів" уздовж сейсмогенних розломів [Мирзоев, 2009].

Реакція геосередовища на електромагнітне поле. На розривному порушенні геологічної ділянки Поор-Порог (середня течія р. Суна, Кондопозький р-н, Росія) досліджували дію грозових розрядів на гірські породи, що містять кварц, які виходять тут на земну поверхню [Адушкин и др., 2002]. Було встановлено, що відгуком на проходження грози є амплітудомодульовані високочастотні коливання, обвідна яких повторює варіацію електромагнітного поля атмосфери (рис. 5).

Мета статті. Огляд літературних даних дав змогу дійти висновку, що погодні явища, як і мікросейсми, здатні ініціювати сейсмічні події. Встановлено відгук середовища на електромагнітні дії. Перелічені дані визначають мету статті: аналіз механізму ініціювання сейсмотектонічних подій на прикладі землетрусів, які виникають під дією погодних явищ; побудова моделі сейсмотектонічного процесу.

Виклад основного матеріалу. Вплив мікросейсмічних коливань на геологічне середовище, згідно з [Псахье и др., 2000; Кочарян, 2007; Адушкин и др., 2009], може полягати в тому, що їх дія забезпечує спрямовану еволюцію деформаційних процесів у земній корі. Крім того, вібрація посилює механічний (зниження тертя)

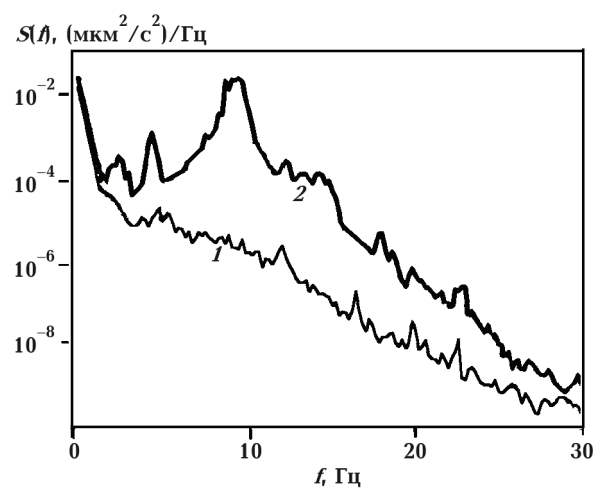


Рис. 5. Результати натурних спостережень реакції середовища на електромагнітні дії. Спектри: 1 — потужності мікросейсм у ясну погоду, 2 — за максимуму грозової активності у тій самій точці [Адушкин и др., 2002].



Рис. 6. Додаткові деформації ϵ і прискорення a_k , зумовлені природними впливами на земну кору [Капустян, 2002]: 1 — місячно-сонячний приплив; 2 — власні коливання Землі; 3 — атмосферні циклони; 4 — морські припливи; 5 — варіації рівня моря.

і фізико-хімічний (ефект Ребіндера) вплив рідини на утворення тріщин й деформацій зсуву, що підтверджується натурними експериментами [Киссин, 2009].

Результати дослідження кількісних показників дії мікросейсмічних коливань, зумовлених деяким впливом природного походження, у вигляді додаткових деформацій, створених вібрацією і прискореннями, показано на рис. 6.

Під час обстеження ділянки борту Георгіївського розлому (м. Севастополь) було виявлено, що в полі мікросейсм (реєстрацію виконували у смузі частот 0,5—20 Гц) систематично спостерігаються інтенсивні низькочастотні імпульси, поява яких корелює із різкими варіаціями атмосферного тиску (рис. 7).

На полігоні "Листвянка" розташована вежа сонячного оптичного телескопа заввишки 30 м.

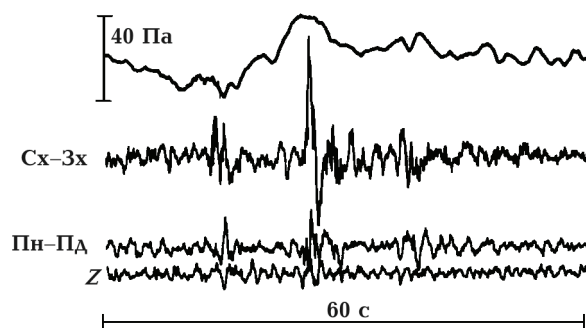


Рис. 7. Результати спостережень геофізичних полів за дії вітру [Капустян и др., 2004]: Сх—3х — запис сейсмічної компоненти "схід — захід"; Пн—Пд — запис сейсмічної компоненти "північ—південь"; Z — запис вертикальної компоненти.

Її фундамент вбудований в одне із крил Ангарського тектонічного розлому. Встановлено, що в бурю, під впливом поривів сильного вітру, металева вежа телескопа сильно розгойдується. Її пружні вимушені коливання ініціюють вібрації з періодом 3—4 с ($f \approx 0,25$ Гц), які передаються через фундамент вежі і, відповідно, позначаються на режимі зміщення країв розлому. Таким чином, вежа телескопа під час бурі слугує низькочастотним вібратором і при цьому виконує механічну зсувну дію на одне з крил зони Ангарського розлому. На рис. 8 показано відгук тектонічного розлому на низькочастотні коливання вежі за швидкості вітру приблизно 10—15 м/с. Правосторонні підки-



Рис. 8. Характер зміщень по зоні Ангарського тектонічного розлому в період шторму, але без дощу, за низького водонасичення (жовтень 2003 р.) [Пат. ..., 2006]. Датчики зміщення розташовані в порожнині тріщини.

до-зсуви, які спостерігалися по розлому північно-західного простягання, після вітрової дії на вежу (і на розлом) практично припинилися (датчик D), тоді як по розривному порушенню північно-східного простягання (датчик F2) сталося ініційоване уповільнене скидання, яке порушило характерний добовий хід більш ніж на добу [Пат. ..., 2006].

Згідно з результатами польового вивчення реакції розломів на вібрацію, характер зміщень зумовлює істотне насичення зон розломів рідиною (рис. 9, 10).

Записи поведінки Ангарського тектонічного розлому отримані по двох датчиках, що зафіксували характер зміщень у період потужного штормового циклону (рис. 10). Буря супроводжувалася сильним дощем, і зона розлому ви-

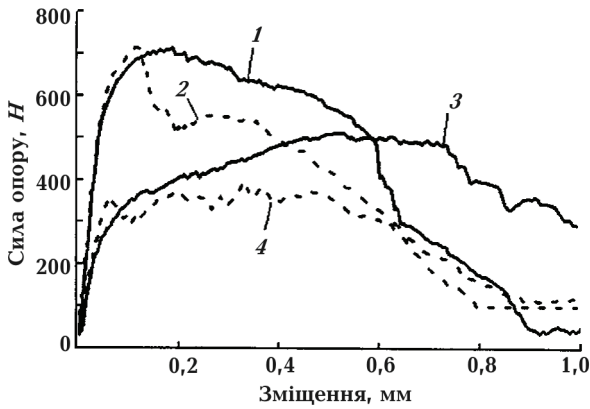


Рис. 9. Зміни сили зсувного опору розлому в процесі відносного тангенціального зміщення крил розлому [Пат. ..., 2006]: 1 — без вібраційної дії; 2 — в умовах вібраційної дії; 3 — водонасичення без вібраційної дії; 4 — водонасичення з вібраційною дією.

явилася дуже водонасиченою в її приповерхневій частині. Про це свідчить значне (півметрове) підвищення рівня води у свердловині завглибшки 15 м, розташованої поблизу розлому. Зазначено, що комбінована дія призвела до аномального за амплітудою і швидкістю зміщення по розлому в прискореному, порівняно з крипом, режимі повзучості. У нижній частині рис. 10 показано збільшений фрагмент запису пакета квазіпружних імпульсів з періодами 2—4 с — момент прояву прискореного вібраційного ко-

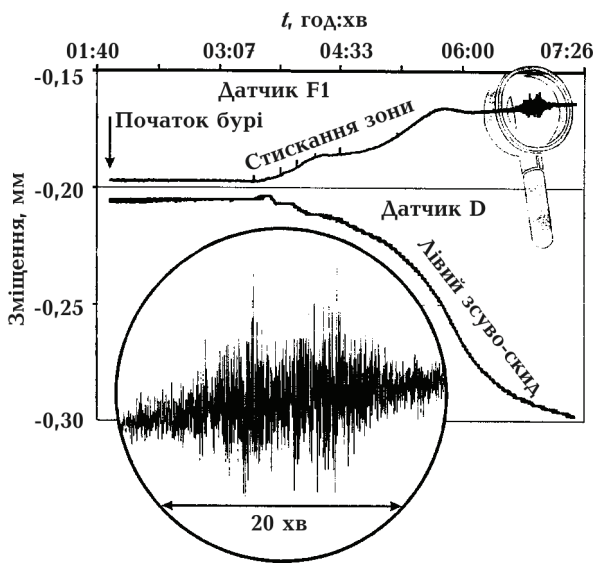


Рис. 10. Характер зміщень по зоні Ангарського тектонічного розлому в період потужного штормового циклону [Пат. ..., 2006]. Датчики зміщення розташовані в порожнині тріщини.

ливання стінок розриву, до яких прикріплені датчики. Цей запис віддалено нагадує запис коливань під час землетрусу. Проте аналіз показав, що швидкість коливального руху вимірюється десятками мікрометрів за секунду, тобто дуже низька [Пат. ..., 2006].

Електросейсмічний ефект. У 1962 р. М.С. Анциферов повідомив про існування електросейсмічного ефекту, який полягає у виникненні коливальної деформації гірської породи (що містить у порах дисоційований розчин металевих солей), якщо до неї прикладено змінну різницю потенціалів [Анциферов, 1962].

Теоретичне обґрунтування [Ярославский, Капустян, 1990] електросейсмічного ефекту дово-

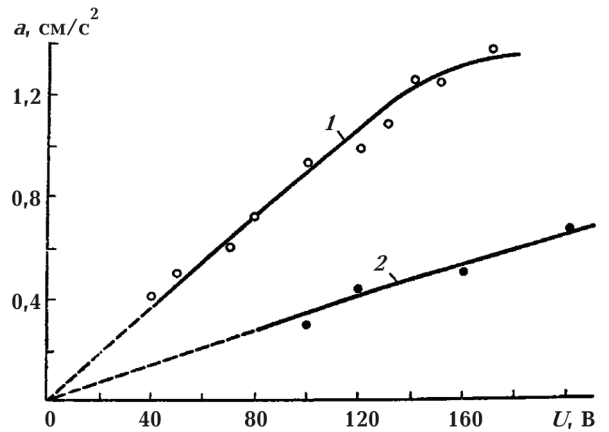


Рис. 11. Амплітудна характеристика електросейсмічного ефекту [Анциферов, 1964]: 1 — для гіпсового стрижня, просоченого мідним купоросом; 2 — для стрижня із глинистого сланцю; a — амплітуда коливального прискорення; U — напруга на виході генератора.

дить існування кореляцій електричного і сейсмічного полів Землі, коли зміни електричного поля зумовлюють варіації характеристик сейсмічних полів.

Для лабораторного виявлення електросейсмічного ефекту були виконані досліді: а) на зволжених стрижнях — вилитих із глинистих сланців та з гіпсу, просоченого розчином мідного купоросу [Анциферов, 1964]; б) на природних кристалогідратних діелектриках і льоді [Фатеев, 2004, 2005]; в) на зразках гранодіоритів [Закупин и др., 2006]. Результати [Анциферов, 1964] засвідчують існування практично лінійного зв'язку амплітуд діючого електричного поля та наведеного ним пружного поля (рис. 11).

Модельні експерименти в натурних умовах. У 1976—1978 рр. було проведено глибинне електричне зондування кори поодинокими імпульсами від МГД-генератора на Гармському полігоні (Таджикистан). Було виявлено, що імпульси викликають помітну активізацію місцевих землетрусів. Так, сумарна енергія, виділена протягом 40 діб після 34 пусків МГД-генератора, виявилася більшою за енергію, виділену до пусків за такий самий термін, на $1,1 \cdot 10^{12}$ Дж на кожен зондувальний імпульс у середньому. При цьому до живильного диполя щоразу підводили енергію 8,5 МДж, що на 5 порядків менше за енергію відгуку. Автор праці [Тарасов, 1997] дійшов висновку, що електромагнітні імпульси ініціювали виділення енергії, накопиченої середовищем у ході попередніх тектонічних процесів.

В експериментах 1986 р. [Плескач, 1986] для електричного зондування було використано електричний диполь з базою 1,2 км, електродами якого слугували обсадні труби свердловини завглибшки 0,8 км, на які подавали змінний струм частотою 2,6 Гц і силою 150 А. На відстані 7 км реєстрували сейсмічні коливання з $A = 2 \cdot 10^{-11}$ м (рис. 12).

Теоретичне обґрунтування підвищення рівня сейсмічності через електричну дію на земну кору, а також лабораторні дослідження і модельні експерименти підтверджуються спостереженнями в натурних умовах.

1. У результаті аналізу даних, отриманих у 1978—1983 рр. у різних районах

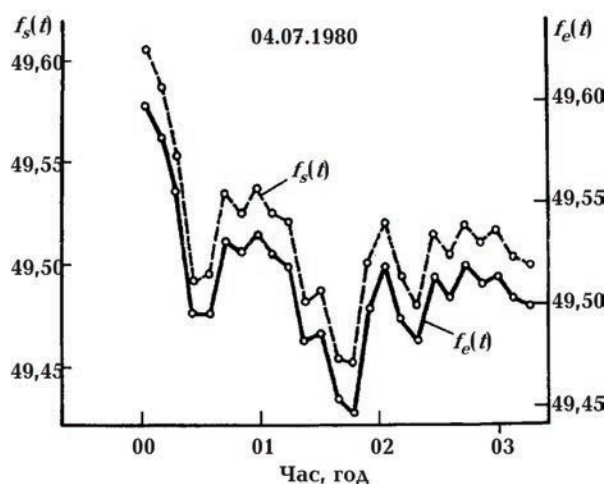


Рис. 12. Результати натурних спостережень електросейсмічного ефекту: частоти наведеної сейсмічності $f_s(t)$ та промислової електромережі $f_e(t)$ [Плескач, 1986].

СРСР, у статті [Плескач, 1986] було висунуто гіпотезу про можливість трансформації електромагнітного поля у механічні збурення середовища. Для перевірки гіпотези були проведені синхронні вимірювання частоти сейсмічних коливань $f_s(t)$ та електричної мережі $f_e(t)$. Порівняння їх значень (рис. 12) показало, що практично завжди $f_s(t) = f_e(t)$.

2. Реакцію геосередовища на електромагнітне поле було досліджено на розривному порушенні геологічної ділянки Поор-Порог (див. рис. 5).

Непрямим доповненням до доказів існування сейсмoeлектричного ефекту можна вважати збіг горизонтів дії досліджуваних ефектів:

- епіцентри землетрусів на г. Хохстауфен розміщуються на глибині 1—4 км [Hainzl et al., 2006];
- низхідні фільтраційні потоки підземної води забезпечуються різницею напорів між зонами живлення і переважно обмежуються межами зон гідростатичного тиску на глибинах від 1 до 6 км [Киссин, 2009];
- у верхньому, 5-км шарі кори виділено єдиний інтервал часу, в межах якого значний приріст деформації досягається внаслідок великої кількості відносно слабких землетрусів [Тарасов, 2010];
- опромінення кори електромагнітними імпульсами МГД-генератора викликало активізацію сейсмічності, яка найяскравіше проявилася у верхньому, 5-км, шарі кори [Тарасов, 1997];
- максимальні прояви дії електричного струму спостерігаються на глибинах 0—5 км [Авагимов и др., 2005].

На цей час стосовно механізмів електросейсмічного ефекту єдиної думки не сформовано. Для його пояснення запропоновано використати зворотний сейсмoeлектричний ефект другого роду [Уруцкоев, 2000]. Проте більшість дослідників сходиться на тому, що джерелом пружного поля в геологічному середовищі є визначені електромеханічні перетворювачі [Анциферов, 1962; Ярославский, Капустян, 1990; Тарасов, 1997; Адушкін и др., 2002; Фатеев, 2004]. Однак немає єдності щодо визначення конкретного перетворювача з визначеного переліку. Тому є підстави вважати, що електросейсмічний ефект, або, на думку Г. Кочаряна, електросейсмічне явище [Кочарян, 2007], формується за рахунок комплексу дій.

Зворотний електрокінетичний ефект (електроосмос або електрофорез). Згідно з [Анциферов, 1962, 1964], цей ефект виявляється у русі рідини або зважених у ній часточок під дією зовнішнього електричного поля змінної частоти. Тому виникають коливальні деформації гірської породи, яка містить в порах дисоційований розчин металевих солей.

У роботі [Фатеев, 2005] проаналізовано механізми механічного та діелектричного відгуку діелектриків на їх сильне одноосне стиснення та слабкі наднизькочастотні електричні поля і встановлено, що існує складова, яка не пов'язана з діелектричними втратами, п'єзо- і сегнетоелектричним відгукми, а також з пробом. На основі якісного розгляду комплексних взаємодій у ланцюжку диполів із змінними моментами запропоновано механізм надчутливих відгуків у гетерогенних середовищах з подвійним електричним шаром.

Детальнішу теорію розвинуто у праці [Куликов и др., 2002]. Полярні молекули флюїду, особливо води, розгортаються в напрямку силових ліній внутрішнього електричного поля, дрейфують під дією градієнта цього поля і жорстко зв'язуються з поверхнями пор і тріщин, утворюючи подвійний електричний шар. У результаті встановлюється рівноважний стан між поровою рідиною і скелетом породи. Довготривала дія на масив гірської породи зовнішнього електричного поля змінює константу реакції електрохімічної рівноваги у бік утворення найменш розчинних речовин унаслідок протікання електричного струму. Ці речовини (іони), переміщуючись у протилежних напрямках, скупчуються у найвужчих порах і тріщинах субкапілярного масштабу, де концентрація їх швидко перевищує рівноважну і де вони випадають в осад. Процес накопичення речовини в порах і тріщинах, спровокований електролітичним характером дії постійного електричного поля, приводить до поступового зменшення пористості породи, а зрештою — до зміни пружних характеристик породи унаслідок їх прямої залежності від пористості речовини. Таке явище і було виявлене за зміною швидкості поширення хвиль у сейсмічному і акустичному діапазонах частот.

Зміна швидкості відбувається за час, набагато менший за тривалість електрокінетичних процесів і електролізу. Залежність поздовжньої швидкості поширення звуку C_s від ефективного дипольного моменту матиме вигляд [Куликов и др., 2002]

$$C_s^2 = C_{s0}^2 \sqrt{1 - KD^2},$$

де знак коефіцієнта K залежить від мінералізації флюїду; D — ефективний дипольний момент, який залежить від поляризованості молекул флюїду. При цьому в породі, насиченій прісною водою, швидкість зменшуватиметься, а насиченій солоною водою — збільшуватиметься. Оцінки показують, що цей ефект має приводити і до зміни орієнтації диполів приблизно на $2-6^\circ$ [Куликов и др., 2002].

Зворотний п'єзоелектричний ефект [Ярославский, Капустян, 1990]. Зміни електричного поля ведуть до деформацій окремих кварцових включень у гірських породах і дають усереднений макроефект. Середовище з кварцовими включеннями, які найбільш поширені в літосфері, поводить як єдиний п'єзоелектричний об'єкт. Зміна напруженості електричного поля E приводить до деформацій окремих зерен кварцу і до порушення їх акомодатії в масиві. При цьому енергія електричного поля W_e перетворюється в механічну енергію W_m з ефективністю $K = (W_e / W_m)^{0,5}$, де коефіцієнт електромеханічного зв'язку K виражають через п'єзомодулі мікророзрідка d_{ijk} . П'єзомодулі полікристалічного кварцу d можуть бути на два порядки менші, ніж у монокристалі, для якого $d_{11} = 6,76 \cdot 10^{-8}$ од. СГСЕ; $d_{14} = 2,56 \cdot 10^{-8}$ од. СГСЕ. Тому для монокристала кварцу $K \sim 10-14\%$, для полікристала $K < 1\%$ і може сягати сотих і тисячних часток відсотка. Крім того, зміна дрібномасштабної мозаїки локальних внутрішніх напружень приводить до перерозподілу поля локальних деформацій, зокрема до мікророзтріскувань. Подібні процеси в середовищі можуть бути причиною варіацій характеру поширення сейсмічних хвиль, а також джерелами сейсмічної емісії.

Електрострикція. Г. Черняк [1976] не виключає, що принаймні одним із можливих механізмів виникнення сейсмоелектричного ефекту в капілярно-пористих гірських породах є електрострикція, яка зумовлена особливими структурними властивостями зв'язаної води.

Якщо вважати що тиск T_{SEP} , якого зазнає п'єзоприймач під час спостережень електросейсмічного ефекту, є наслідком періодичної пружної деформації (подовження) зразка і, отже, його можна розглядати як періодичне механічне напруження, що виникає в породі під дією прикладеного до зразка змінного електричного поля напруженістю E , то за відсутності поля зміщення

$$T_{SEP} = kE^2, \quad (1)$$

де k — коефіцієнт пропорційності.

Рівняння (1) описує ефект електрострикції, тобто деформацію матеріалу під дією електричного поля, яка не залежить від зміни поля на зворотне і пропорційна квадрату напруженості поля. Як відомо, електрострикція існує в усіх діелектриках, але зазвичай вона дуже мала. Виключенням є сегнетоелектричні речовини і деякі рідкі та газоподібні діелектрики з жорсткими електричними диполями. Прикладом може слугувати неполяризована кераміка з титаніту барію. Внаслідок полікристалічної будови вона має симетрію вищого порядку, ніж симетрія окремих кристалів, через хаотичний розподіл кристалічних осей у просторі. Тому така кераміка не може мати (і не має) п'єзоелектричного ефекту (ефекту першого порядку) і усі типи коливальних в ній пов'язані з ефектом другого порядку, тобто з електрострикцією.

Отже, аналогія між електрострикційними і п'єзоелектричними явищами в полікристалічних сегнетоелектриках та явищами, спостережуваними під час збудження електросейсмічного ефекту, досить повна для того, щоб розглядати його як різновид електрострикції.

Як відомо, аналітично електрострикція може бути виражена залежністю між двома тензорами другого рангу — тензором механічного напруження (пружної деформації) і тензором квадрата напруженості (індукції) електричного поля, тобто

$$T = HE^2, \text{ або } T = GP^2, \quad (2)$$

де T — механічне напруження; H і G — електрострикційні коефіцієнти, що є тензорами четвертого порядку; E — напруженість електричного поля; $P = D/4\pi$ — поляризація; D — індукція.

Згідно з припущенням автора статті [Черняк, 1976], пружні деформації порід за елект-

росейсмічного ефекту зумовлені індукцією електричного поля (2).

Електромагнітні властивості геологічного середовища. У результаті досліджень виявлено, що формування фізико-хімічних властивостей пов'язане також з дією механізмів електросейсмічного ефекту, а саме (табл. 3): фільтрація води і газів зумовлена дією зворотного електрокінетичного ефекту; деформація середовища — дією зворотного електрокінетичного ефекту, зворотного п'єзоефекту, електрострикції.

Варіації атмосферної електрики. Електричне поле над заданою точкою земної поверхні не залишається постійним і з часом змінюється. За даними [Моргунов, 2005], середня напруженість електричного поля в нижніх шарах тропосфери становить близько 130 В/м, а в грозу зростає до 50 кВ/м і більше.

Напруженість повітря різко підвищується під хмарами — особливо в районі потужних грозових хмар. Згідно з роботою [Френкель, 2007], середня напруженість електричного поля повітря зростає приблизно в 100 разів щодо напруженості його в безхмарних районах, досягаючи 10 кВ/м і більше.

Характерні пікові значення напруженості електричного поля для гроз, які наведені в праці [Капустян, 2002], становлять близько 100 кВ/м.

Згідно з працею [Адушкін і др., 2002], оцінка напруженості електричного поля в атмосфері в грозу є дуже приблизною і становить, за повідомленнями різних джерел, понад 1 або в межах 10—1000 кВ/м.

Такі зміни за умови прямо пропорційної залежності механічного відгуку на електромагнітні дії не можуть не впливати на перебіг сейсмотектонічного процесу.

Т а б л и ц я 3. Зв'язок між фізико-хімічними та електромагнітними властивостями геологічного середовища [Макарець, Анахов, 2008]

Фізико-хімічні процеси	Проводимість σ	Діелектрична проникність ϵ	Магнітна проникність μ
Поровий тиск ґрунтової води:			
фільтрація води і газів	+	+	—
деформація	+	—	—
теплові явища	+	—	+
Тріщинуватість середовища	+	—	—
Гідрогеохімічна міграція елементів	+	+	—

Висновки. Відповідно до аналізу літературних даних, на перебіг сейсмотектонічного процесу можуть впливати гідросейсмічні процеси, мікросейсмічні коливання, електромагнітні поля. Затримка часу між погодним і сейсмічним явищами, яка триває від діб до місяців, ви-

значається перебудовою системи тріщин геологічного середовища і поширенням по них ґрунтових вод.

У рамках фізико-хімічної моделі землетрусів, зумовлених дією погодних явищ, досліджено механізми електросейсмічного ефекту.

Список літератури

- Авагимов А.А., Зейгарник В.А., Файнберг Э.Б. О пространственно-временной структуре сейсмичности, вызванной электромагнитным воздействием // Физика Земли. — 2005. — № 6. — С. 55—65.
- Агушкин В.В., Кочарян Г.Г., Павлов Д.В., Виноградов Е.А., Гончаров А.И., Куликов В.И., Кулюкин А.А. О влиянии сейсмических колебаний на развитие тектонических деформаций // Докл. РАН. — 2009. — 426, № 1. — С. 98—100.
- Агушкин В.В., Капустян Н.К., Спунгин В.Г. Регистрация электросейсмического эффекта в натурных условиях // Докл. РАН. — 2002. — 385, № 4. — С. 537—540.
- Анциферов М.С. Электросейсмический эффект // Докл. АН СССР. — 1962. — 144, № 6. — С. 1295—1297.
- Анциферов М.С. Электросейсмический эффект в горных породах // Применение сейсмоакустических методов в горном деле. — Москва: Наука, 1964. — С. 180—185.
- Гаврилов В.А. Динамика микротрещиноватости геосреды в связи с катастрофическими Симуширскими землетрясениями 2006—2007 гг. по данным комплексных скважинных измерений на Камчатке // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле: Материалы докл. Всерос. конф. — В 2 т. — Москва: Ин-т физики Земли, 2008. — Т.2. — С. 295—302.
- Голицын Б.Б. Новая организация сейсмической службы в России // Избранные труды. — Москва: Изд-во АН СССР, 1960. — Т.2. Сейсмология. — С. 417—427.
- Журков С.Н., Куксенко В.С., Савельев В.Н., Султанов У. О прогнозировании разрушения горных пород // Физика Земли. — 1977. — № 6. — С. 11—18.
- Закупин А.С., Авагимов А.А., Богомолов Л.М. Отклики акустической эмиссии геоматериалов на воздействие электроимпульсов при различных величинах сжимаемого напряжения // Физика Земли. — 2006. — № 10. — С. 43—50.
- Капустян Н.К., Рогожин А.Е., Сусин О.А. Опыт сейсмических наблюдений воздействий ветра на нарушенный массив горных пород // Физика Земли. — 2004. — № 3. — С. 54—59.
- Капустян Н.К. Сейсмический мониторинг воздействий техногенных вибраций на земную кору: Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. — Москва, 2002. — 355 с.
- Киссин И.Г. Флюиды в земной коре: геофизические и тектонические аспекты. — Москва: Наука, 2009. — 328 с.
- Кочарян Г.Г. Исследования по влиянию малых возмущений напряженно-деформированного состояния земной коры на эволюцию деформационных процессов: Нац. отчет Междунар. ассоциации сейсмологии и физики недр Земли Междунар. геодез. и геофиз. союза. 2003—2006. — Москва, 2007. — С. 73—78.
- Куликов В.А., Манштейн А.К., Нефедкин Ю.А., Побережный М.Ю., Сибиряков Е.Б. Электросейсмическая активность рыхлых пористых горных пород // Труды школы-семинара "Физика нефтяного пласта". — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. — С. 95—101.
- Ломтадзе В.Д. Инженерная геология. Инженерная геодинамика. — Ленинград: Недра, 1977. — 479 с.
- Макарець Н.В., Анахов П.В. Механизмы формирования сейсмoeлектрического эффекта // Геофиз. журн. — 2008. — 6, № 30. — С. 113—120.
- Мирзоев К.М., Николаев А.В., Лукк А.А., Юнга С.Л. Наведенная сейсмичность и возможности регулируемой разрядки накопленных тектонических напряжений в земной коре // Физика Земли. — 2009. — № 10. — С. 49—68.
- Моргунов В.К. Основы метеорологии, климатологии. Метеорологические приборы и методы наблюдений. — Ростов н/Д: Феникс; Новосибирск: Сиб. соглашение, 2005. — 331 с.
- Пат. 2273035 Российской Федерации, МПК G01V 9/00. Способ управления режимом смещений

- во фрагментах сейсмоактивных тектонических разломов / С.Г. Псахье, В.Л. Попов, Е.В. Шилько и др.; заявитель и патентообладатель Ин-т физики прочности и материаловедения СО РАН, Ин-т земной коры СО РАН. — № 2004108514/28; Заявл. 22.03.04; Опубл. 27.03.06, Бюл. № 9.
- Плескач Н.К.* Электроэнергетический сейсмический эффект // Докл. АН СССР. — 1986. — **290**, № 6. — С. 1342—1346.
- Псахье С.Г., Смолин А.Ю., Татаринцев Е.М., Шваб Е.А.* Эффект аккумуляции упругой энергии и возможность управления процессом разрушения в сложных структурах // Письма в Журн. техн. физики. — 2000. — **26**, вып. 2. — С. 13—18.
- Соболев Г.А., Завьялов А.Д.* Физика землетрясений и предвестники // Нац. отчет Междунар. ассоциации сейсмологии и физики недр Земли Междунар. геодез. и геофиз. союза. 2003—2006. — Москва, 2007. — С. 62—73.
- Тарасов Н.Т.* Влияние сильных электромагнитных полей на скорость сеймотектонических деформаций // Докл. РАН. — 2010. — **433**, № 5. — С. 689—692.
- Тарасов Н.Т.* Изменение сейсмичности коры при электрическом воздействии // Докл. РАН. — 1997. — **353**, № 4. — С. 542—545.
- Уломов В.И.* О глобальных изменениях сейсмического режима и уровня водной поверхности Земли // Физика Земли. — 2007. — № 9. — С. 3—17.
- Уруцкоев Л.И.* О возможном механизме землетрясений // Прикл. физика. — 2000. — № 4. — С. 55—61.
- Фатеев Е.Г.* Электрическая сверхчувствительность диэлектриков при сильном сжатии: Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. — Екатеринбург, 2004. — 338 с.
- Фатеев Е.Г.* Электрическая сверхчувствительность природных кристаллогидратов при высоких давлениях // Физика Земли. — 2005. — **41**, № 12. — С. 58—65.
- Френкель Я.И.* Теория явлений атмосферного электричества. — 2-е изд., перераб., доп. — Москва: КомКнига, 2007. — 160 с.
- Черняк Г.Я.* О физической природе сейсмоэлектрического эффекта горных пород // Изв. АН СССР. Физика Земли. — 1976. — № 2. — С. 108—112.
- Шестаков В.М.* Гидрогеодинамика. — 3-е изд. — Москва: Изд-во МГУ, 1995. — 368 с.
- Ярославский М.А., Канустян Н.К.* О возможности электросейсмического эффекта // Докл. РАН. — 1990. — **315**, № 2. — С. 352—354.
- Costain J.K., Bollinger G.A., Speer J.A.* Hydroseismicity: a Hypothesis for the Role of Water in the Generation of Intraplate Seismicity // Seismol. Res. Let. — 1987. — **58**, № 3. — P. 41—64.
- Costain J.K., Bollinger G.A.* Review: Research Results in Hydroseismicity from 1987 to 2009 // Bul. Seismol. Soc. Amer. — 2010. — **100**, № 5A. — P. 1841—1858.
- Hainzl S., Kraft T., Wassermann J., Igel H.* Evidence for rainfall-triggered earthquake activity // Geophys. Res. Let. — 2006. — **33**. — P. 1—5.
- Jiménez M.-J., García-Fernández M.* Occurrence of shallow earthquakes following periods of intense rainfall in Tenerife, Canary Islands // J. Volcan. Geotherm. Res. — 2000. — **103**, iss. 1—4. — P. 463—468.
- Moldenhauer Fr.* Seismische Einwirkungen auf den Charakter der Lebenstätigkeit intermittierender Quellen // Изв. Постоянной центральной сейсмической комиссии. — 1912. — **5**, вып. I. — С. 1—33.
- Muço B.* Statistical investigation on possible seasonality of seismic activity and rainfall-induced earthquakes in Balkan area // Phys. Earth Planet. Int. — 1999. — **114**, iss. 3—4. — P. 119—127.
- Muço B.* The seasonality of Albanian earthquakes and cross-correlation with rainfall // Physics of the Earth and Planetary Interiors. — 1995. — **88**, iss. 3—4. — P. 285—291.
- Ohtake M.* Seismic Activity Induced by Water Injection at Matsushiro, Japan // J. Phys. Earth. — 1974. — № 22. — P. 163—176.
- Parotidis M., Rothert E., Shapiro S.A.* Pore-pressure diffusion: A possible triggering mechanism for the earthquake swarms 2000 in Vogtland / NW-Bohemia, central Europe // Geophys. Res. Let. — 2003. — **30**, № 20. — P. 1—4.
- Raj K.G., Paul M., Hegde V., Nijagunappa R.* Lineaments and seismicity of Kerala — a remote sensing based analysis // J. Indian Soc. Remote Sensing. — 2001. — **29**, № 4. — P. 203—211.
- Raleigh C.B., Healy J.H., Bredehoeft J.D.* An Experiment in Earthquake Control at Rangely, Colorado // Science. — 1976. — **191**, iss. 4233. — P. 1230—1237.