

УДК 553.982.2

СКАЧКООБРАЗНОСТЬ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ И ВОЗМОЖНОСТИ УПРАВЛЯЕМОГО СНЯТИЯ НАКОПЛЕННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

© 2015 г. К.М. Мирзоев¹, А.В. Николаев¹, А.А. Лукк¹,
А.В. Дещеревский¹, В.К. Мирзоев²

¹ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

² ЗАО Кройл Инвест, г. Москва, Россия

В серии лабораторных опытов на образцах, изготовленных из разных материалов как кристаллической, так и аморфной структуры и находящихся под постоянной нагрузкой и вибровоздействием, установлена скачкообразность пластических деформаций. При этом носящие триггерный характер скачки, могут быть обусловлены внешними, относительно слабыми, механическими воздействиями, например, микросейсмами Земли.

Аналогичные процессы наблюдаются и в естественных условиях возбужденной сейсмичности, которая может рассматриваться как результат совместного воздействия на горные породы проникновения воды под давлением на глубине и внешних механических вибраций как природного, так и техногенного характера.

Значительные скачки деформаций в нагружаемых образцах, равно как и сильные землетрясения в земной коре, могут преобразовываться в большое число малых скачков при создании определенных условий – снижении упругих свойств материала путем инъекции в него жидкости, воздействии относительно равномерных по амплитуде внешних вибраций, согласованных во времени с приливными движениями Земли. При этом упругие напряжения, накопленные в материале ранее, реализуются не в одном достаточно сильном акте, а в серии мелких скачков деформации (в серии слабых землетрясений). Тем самым определяется принципиальная возможность регулирования проявления скачкообразности пластических деформаций напряженных сред.

Ключевые слова: скачкообразность пластической деформации, приливные деформации, вибровоздействия, возбужденная сейсмичность, прочность и коррозиестойчивость металлов.

История вопроса

В 1834 г. при проведении серии опытов на металлах французский инженер Луи Жозеф Вика обнаружил, что свинец, медь и железо при постоянной нагрузке, близкой к разрушающей, вплоть до разрушения деформируются скачкообразно [Белл, 1984]. В настоящее время это явление, известное как “ползучесть” металлов, широко изучается.

Подобные опыты, проводимые разными авторами на протяжении десятилетий, подтвердили наличие скачков деформации при пластическом разрушении металлов. На рис. 1 приведены результаты опытов по растяжению и сжатию алюминиевого стержня при постоянной нагрузке, проведенных Дж.Ф. Беллом в 1962–1966 гг. [1984]. Существенная особенность представленных данных заключается в том, что предыдущие деформации у подножия “ступенек” сохраняются в течение часов и даже дней. Прослеживаемый эффект “лестницы” на графике напряжения–деформации в 1923 г. был объяснен А. Портевеном и Ф. Ле-Шатилье [Portevin, Le Chatelier, 1923], после чего стал называться эффектом Портевена–Ле Шателье.

Аналогичные эффекты наблюдались и другими исследователями, например Д. Хансоном и М.А. Уиллером [Белл, 1984].

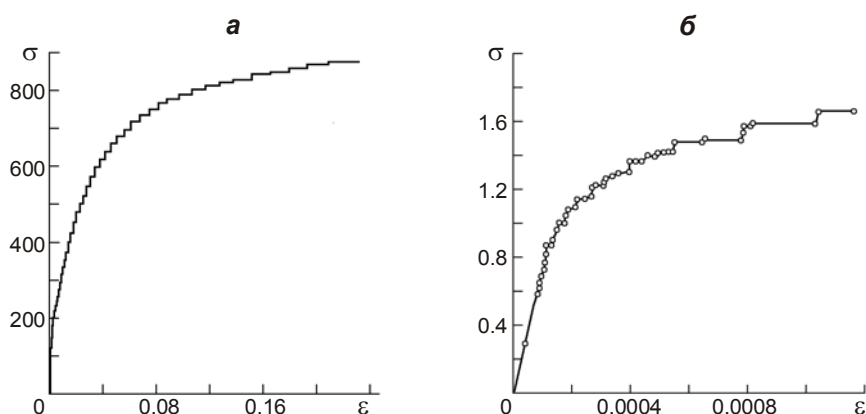


Рис. 1. Ход скачкообразной деформации, протекающей в поликристаллическом алюминии при близкой к разрушающей постоянной нагрузке [Белл, 1984]

а – опыты на растяжение образца (1966 г.), *б* – на сжатие (1962 г.). Вертикальная ось – напряжение σ , кгс/мм², горизонтальная – деформация ε , мк

В русскоязычной литературе рассматриваемый эффект, описанный в [Иоффе, Кирпичова, Левитская, 1924; Иоффе, 1929; Классен-Неклюдова, 1927, 1928], больше известен как эффект Иоффе–Эренфеста [Классен-Неклюдова, 1960; Френкель, 1977]. Скачки пластической деформации, наблюдаемые при экспериментах с кристаллами каменной соли при температуре, превышающей некоторое критическое значение, сопровождались акустическим излучением, напоминавшим по звуку тиканье часов. Как бы ни была мала нагрузка, деформация протекала не плавно, а микронными скачками, происходившими в течение длительного времени с неизменной частотой. Более подробно это явление изучено М.В. Классен-Неклюдовой [1927, 1928, 1960].

Учет выявленного эффекта скачкообразности пластических деформаций крайне важен в металловедении, поскольку он приводит к ухудшению механических свойств материалов, затрудняя их промышленную обработку. Этот эффект, представляющий фундаментальный интерес и для физики дислокаций, привлек к себе внимание широкого круга исследователей, экспериментировавших с деформированием монокристаллов [Иоффе, Кирпичова, Левитская, 1924; Иоффе, 1929; Классен-Неклюдова, 1927, 1928, 1960; Иденбом, Томиловский, 1958; Рожанский, 1958; Лебедкин, 2002].

Хотя представляемые ниже результаты получены К.М. Мирзоевым с коллегами под руководством академика М.А. Садовского более 30 лет назад [Садовский и др., 1981], они не потеряли своего значения до сих пор. На сегодняшний день авторам статьи не известны лабораторные исследования обсуждаемого явления в столь же широком диапазоне свойств испытуемых материалов со структурой от кристаллической до аморфной. По этой причине с учетом важности результатов ранее выполненных экспериментов для рассматриваемой проблемы авторы сочли целесообразным привести их в достаточно полном объеме.

Скачкообразность пластических деформаций образцов кристаллической и аморфной структуры в лабораторном эксперименте

Работы по изучению скачкообразности пластических деформаций проводились в 1970–1980 гг. в Институте сейсмостойкого строительства и сейсмологии АН Республики Таджикистан (ТИССС) и Институте физики Земли АН СССР (ИФЗ АН СССР) [Садовский и др., 1981]. Регистратором деформаций служил индукционный (без трения)

датчик с увеличением до 10^9 , разработанный в ТИССС специально для этого эксперимента¹.

В качестве примера на рис. 2 приводится запись хода деформации цементного образца, содержащего мелкую фракцию туфа. Образец с площадью сечения 49 кв. см находился на поверхности Земли под постоянной нагрузкой 3 т. Ход деформации (кривые 1, 2) записывали два независимых регистратора, синхронно фиксируя происходившие скачки, в промежутках между которыми деформация практически отсутствует.

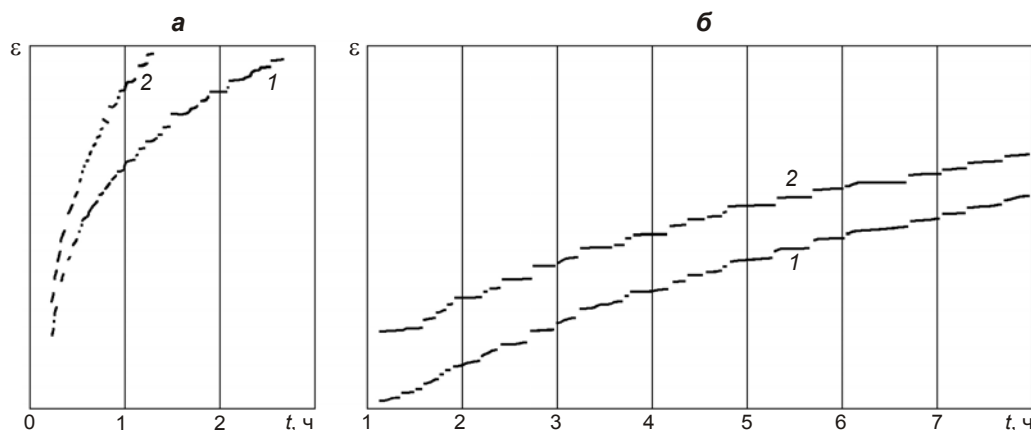


Рис. 2. Ход деформации цементного образца, содержащего мелкую фракцию туфа, записанный двумя независимыми регистраторами 1, 2 в первые часы нагрузки (а) и через 5 суток (б). На оригинальных записях деформация в 1.5 мм соответствует 1 мк

В первые часы эксперимента (рис. 2, а) деформация происходит достаточно быстрыми (частыми) мелкими скачками. Через 5 сут скорость деформации постепенно снижается, скачков становится меньше, но амплитуда их увеличивается. Такой характер хода деформации наблюдается от начала опыта до полного разрушения образцов из любых материалов как кристаллической, так и аморфной структуры. Есть основания считать, что наблюдаемые скачки возникают или под влиянием слабых внешних воздействий, например пиковых микросейсм Земли, превышающих средний уровень фоновых колебаний, или же под влиянием резких колебаний воздушного пространства вблизи установки. Для проверки первого предположения в месте проведения экспериментов с помощью сейсмографа регистрировались микросейсмы Земли. Оказалось, что практически каждому скачку деформации соответствует своя пиковая микросейсма, превышающая средний фон в два и более раз.

Ход пиковых микросейсм, зарегистрированных в промежуток времени, соответствующий записи деформации того же образца в ночное и утреннее время (от полуночи до 10 ч утра), приведен на рис. 3; здесь же представлены и амплитуды наблюдаемых скачков деформации. Выше уже было отмечено, что практически все скачки деформации могут быть соотнесены во времени с возникновением пиковых микросейсм. Однако не все пиковые микросейсмы вызывают заметные скачки деформации. Более того, некоторые относительно небольшие пиковые микросейсм, как, например, наблюдаемые около 5 ч утра на рис. 3, вызывают большие скачки деформации, а более интенсивные микросейсм, следующие вскоре после них, вызывают скачки меньшей амплитуды или не вызывают их вовсе. Это может быть объяснено следующим образом.

¹ Изобретение № 2337009/25, форма № 1/19 от 29.09.1976 г., автор В.И. Старков.

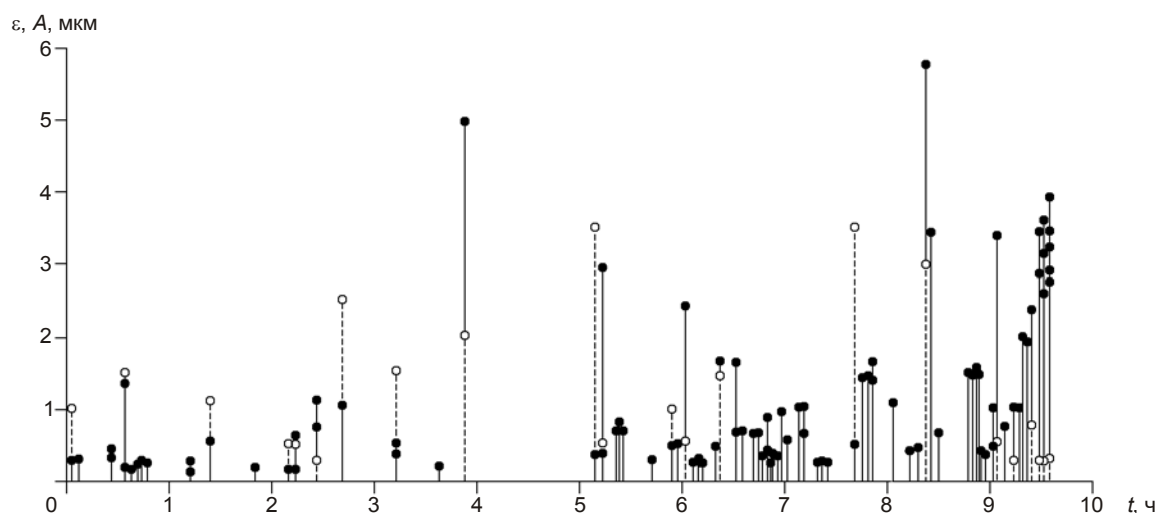


Рис. 3. Амплитуды пиковых микросейсм Земли (залитые кружки), зарегистрированных во время проведения эксперимента по деформированию цементного образца с туфом, в сопоставлении с записанными в тот же период скачками деформации этого образца (кружки без заливки). На горизонтальной оси – время проведения эксперимента от полуночи до 10 ч утра

После большого скачка, вызванного микросейсмой, при последующем длительном отсутствии ощутимых пиковых микросейсм в образце происходит накопление упругих напряжений. В дальнейшем эти напряжения могут разряжаться в виде достаточно интенсивного скачка деформации под влиянием даже малой по амплитуде микросейсм. Однако следующий скачок может или произойти при появлении достаточно большой по амплитуде микросейсм, или же вообще не проявиться из-за отсутствия в образце достаточных для этого накопленных напряжений. Следует отметить, что после 5 ч утра (см. рис. 3), когда средний уровень амплитуд пиковых микросейсм (в основном антропогенного характера) и их количество значительно возрастают по сравнению с ночным временем, заметно увеличивается и число скачков деформации.

Подобная картина наблюдалась при экспериментах и на образцах из других материалов – железа, меди, латуни, алебастра, алюминия, гранита, даже пластилина. На рис. 4 показан ход деформации двух не связанных между собой образцов из пластилина (кривые 1 и 2) под действием слабой постоянной нагрузки (0.12 кг).

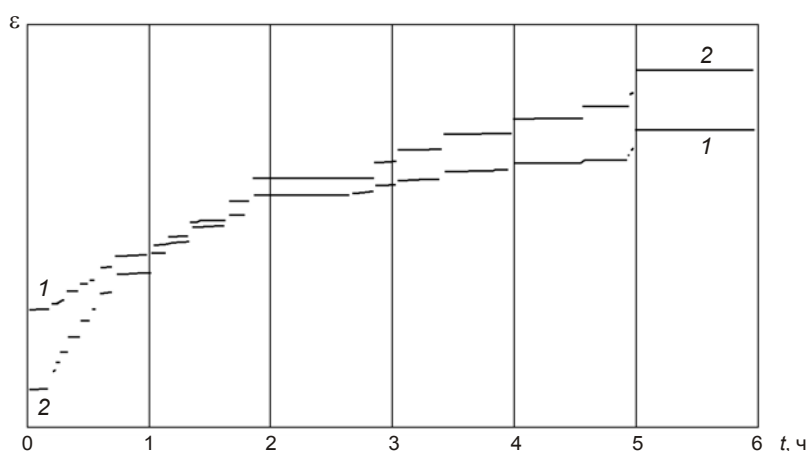


Рис. 4. Ход деформации двух образцов из пластилина (кривые 1 и 2) под действием слабой постоянной нагрузки (0.12 кг). Площадь сечения образцов – 3 кв. см. Опыт на Земле без изоляции от микросейсм. На горизонтальной оси – время проведения эксперимента, ч

Образцы размещались на поверхности Земли без изоляции от влияния микро-сейсм. По записям прослеживается синхронная скачкообразность деформации обоих образцов, подобная той, что описана выше для образца из цемента (см. рис. 2).

Таким образом, все испытанные материалы как кристаллической, так и аморфной структуры под постоянной нагрузкой деформируются скачкообразно; пластическая составляющая деформации в ее классическом понимании практически отсутствует.

Обнаружение высокой чувствительности деформируемых материалов разной прочности и структуры к микросейсмам Земли определило необходимость проверки хода деформации в условиях изоляции от них. Изоляция обеспечивалась подвешиванием деформометрической установки на мягких резиновых растяжках. Для дополнительной изоляции и от микросейсм, и от внешних триггерных звуковых сигналов стены и потолок в месте проведения экспериментов покрывались звукопоглощающими листами.

Было показано, что в условиях изоляции деформация происходит плавно; скачки возникают лишь в отдельных случаях при больших импульсах внешних воздействий. В моменты возникновения скачков заметных колебаний платформы, на которой находился образец, не наблюдалось – это контролировалось сейсмографом, установленным на платформе [Садовский и др., 1981]. Наблюдаемые скачки могут возникать под воздействием частично проникающих сквозь изоляцию внешних триггерных воздействий антропогенной природы, например, вибрации воздушного пространства, связанной со звуками от пролетающего самолета, тяжелого транспорта, случайными звуками в помещении и т.п.

На разных образцах были проведены специальные эксперименты, при которых источником звука служили хлопки в ладоши. Важно, что в обычных условиях (опыты на поверхности Земли без изоляции) хлопки не вызывают скачков деформации, так как их энергия существенно меньше энергии механических вибраций (микросейсм), распространяющихся в Земле и достигающих экспериментальной платформы. Интенсивность колебаний от хлопков составляет порядка 10^{-12} Вт/см² (30–40 дБ), амплитуды смещения воздуха при этом порядка 10^{-3} мкм [Гинкин, 1962], что существенно меньше энергии микросейсм.

На рис. 5 приведен ход деформации цементного образца, размещенного на платформе, изолированной от микросейсм.

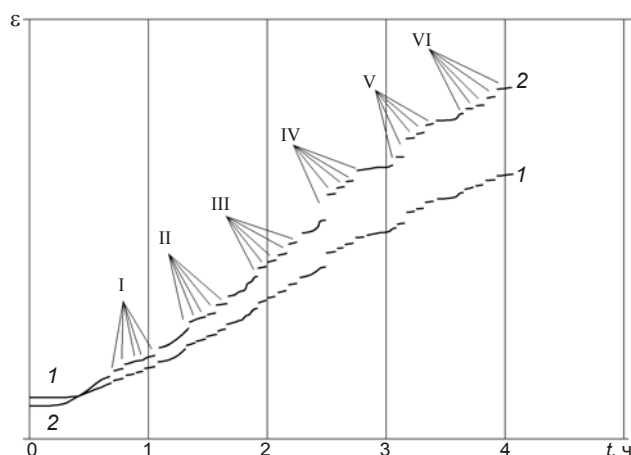


Рис. 5. Ход деформации цементного образца с тупфом под воздействием постоянной нагрузки 4.6 т, записанный двумя регистраторами (кривые 1, 2). Опыт в условиях изоляции от влияния микросейсм. Римскими цифрами обозначены серии испытаний с хлопками (I, VI), бросками шариков из пластилина (II), резины (III) и стали (IV, V)

Рядом с платформой каждые 5 мин осуществлялись хлопки в ладоши (серии I, VI); кроме того на платформу с разных высот (от 5 до 25 см) бросались одинаковые по весу (2.7 г) шарики из разных материалов – резины (серия III), пластилина (серия II), стали (серии IV, V). Промежуток между сериями испытаний составлял 15 мин [Садовский и др., 1981]. В промежутках между хлопками и бросками шариков деформация была преимущественно плавной; на записях в более крупном масштабе можно видеть, что она происходит частыми мелкими и близкими по амплитуде скачками. Каждый хлопок приводит к заметному скачку деформации (см. рис. 5, серии I, VI). Интересно, что после каждого воздействия и каждой серии испытаний наступает временный период практически полного отсутствия деформации (скачки становятся сопоставимыми с шириной линии записи). Чем бóльшей была деформация после серии воздействий, тем более длительным оказывалось время её отсутствия.

Обращает на себя внимание и то, что наибольший скачок деформации наблюдается после первого броска стального шарика в начале серии IV (см. рис. 5). Последующие скачки в этой серии меньше, несмотря на рост энергии удара по мере увеличения высоты броска. Общий наклон кривой деформации (её скорость) сохраняется, не завися от разницы частот колебаний, вызываемых ударами шариков из разных материалов и бросаемых с разной высоты. Это означает, что средняя скорость деформирования и соответственно средняя скорость снятия накопленных напряжений определяются величиной постоянной нагрузки, а не интенсивностью воздействия на испытуемый образец.

Деформация напряженных сред под воздействием равномерных по амплитуде вибраций

Результаты исследований влияния вибраций и микросейсм на характер высвобождения акустической эмиссии в образцах кристаллической структуры находят применение и при описании закономерностей высвобождения сейсмической энергии в естественных условиях. Равномерные по амплитуде вибрации приводят к импульсному раскрытию трещин и увеличению относительно плавных деформаций напряженных сред в виде слабых землетрясений, одновременно уменьшая долю накопленной в процессе тектонического деформирования упругой сейсмической энергии.

Серия проведенных лабораторных и натуральных экспериментов с вибрациями от разных искусственных и естественных источников свидетельствует о возможности управляемого, относительно плавного снятия накопленных напряжений в земной коре и снижения энергии сильных землетрясений с помощью специально задаваемых вибраций. Картина хода деформации образца из любого материала под постоянной (близкой к разрушающей) нагрузкой в присутствии регулярных равномерных по амплитуде вибраций, включаемых на отдельных этапах эксперимента [Мирзоев, Негматуллаев, 1983, 1990, 1992; Мирзоев и др., 2009, 2010а,б], схематически представлена на рис. 6. Можно видеть, что до включения вибраций деформация развивалась резкими скачками, и, как было показано выше, каждому скачку соответствовала своя пиковая микросейсма, в несколько раз превышающая средний фон природных микросейсм (триггерный эффект). В момент включения равномерных по амплитудам вибраций с частотой около 50 Гц (I на рис. 6) происходит большой скачок деформации ε_1 , после чего её скорость увеличивается от значения C_1 до значения C_2 , и вся деформация становится на вид плавной [Мирзоев, Негматуллаев, 1990, 1992; Мирзоев, Виноградов, Рузибаев, 1991]. И чем больше амплитуды равномерных вибраций, тем бóльшие средние скорости деформации наблюдаются в экспериментах, и, соответственно, с большей скоростью происходит снятие упругих напряжений в образце.

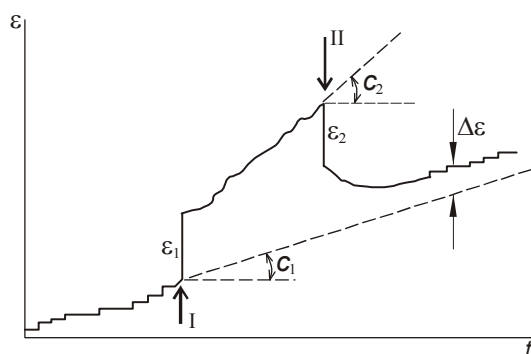


Рис. 6. Схема развития во времени пластической деформации образца, изготовленного из любого материала, под воздействием близкой к разрушающей нагрузки в присутствии регулярных вибраций с частотой ~ 50 Гц. I – момент включения вибраций, II – момент их выключения; ε , C – скачки и скорости деформации в моменты включения (нижний индекс 1) и выключения (нижний индекс 2); $\Delta\varepsilon$ – остаточная необратимая деформация после воздействия вибраций

После отключения вибраций (II на рис. 6) происходит скачок деформации ε_2 , который имеет ту же амплитуду, что ε_1 , но обратный знак [Мирзоев, Негматуллаев, 1990, 1992; Мирзоев, Виноградов, Рузибаев, 1991]. Отметим, что этот скачок направлен против действующей на образец силы сжатия, обусловленной постоянной нагрузкой, которая составляет около 90 % от предельной разрушающей. Можно говорить о частичном возврате части деформации, возникшей за счет вибраций. Криволинейный участок графика после обратного скачка отражает деформацию, продолжающуюся в обратном направлении (дилатансия). Эта деформация поднимает верхнюю плиту пресса, постепенно вновь приобретая свое “правильное” направление в сторону действующей силы сжатия; первоначальная скорость деформации C_1 восстанавливается. С этого момента деформация вновь становится скачкообразной под влиянием пиковых микросейсм, как и до включения вибраций. Однако при этом остается частичная необратимая пластическая деформации $\Delta\varepsilon$, снявшая часть напряжений в образце.

Рассмотрим правомочность представлений о возможности плавного снятия накопленных напряжений, используя результаты многолетнего сейсмического мониторинга в районе водохранилища Нурекской ГЭС в Таджикистане и на разрабатываемом Ромашкинском месторождении нефти в Республике Татарстан.

Возбужденная сейсмичность района водохранилища Нурекской ГЭС

Длительные сейсмические наблюдения, проводимые в районе водохранилища Нурекской ГЭС, позволили проследить влияние режима водохранилища на сейсмичность района. Установлено, что после заполнения водохранилища в период 1972–1987 гг. нормированное по времени число землетрясений увеличилось вдвое по сравнению с предшествующим периодом 1955–1971 гг. [Возбужденная ..., 1975; Симпсон, Соболева, 1976; Мирзоев, Негматуллаев, 1979, 1983, 1990, 1992; Simpson, Negmatullaev, 1981; Мирзоев, Негматуллаев, Дастури, 1987; Мирзоев, и др., 1987]. Кроме того, динамика заполнения водохранилища нашла свое отражение в согласованных с ней вариациях чисел представительных землетрясений (рис. 7).

При сопоставлении временного хода уровня воды в водохранилище с временным ходом месячных значений чисел представительных землетрясений с $K \geq 8$ установлено, что периодам резкого увеличения уровня воды соответствуют периоды резкого возрастания числа землетрясений в районе; это наблюдалось в конце 1972 – начале 1973,

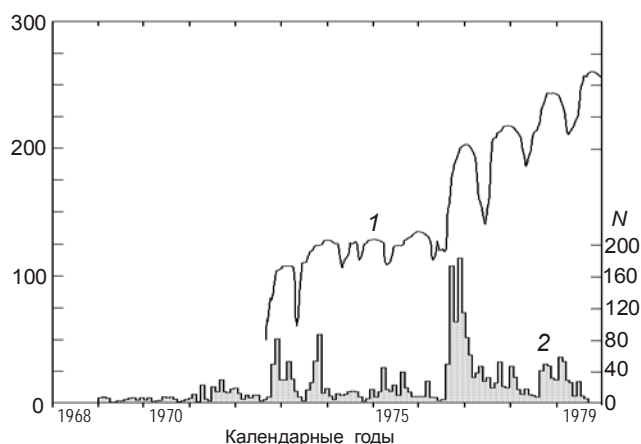


Рис. 7. Сопоставление динамики уровня воды в Нурекском водохранилище при его заполнении (кривая 1, левая шкала, м) с месячными числами представительных землетрясений с $K \geq 8$, зарегистрированных в рассматриваемом районе (кривая 2, правая шкала N) по [Simpson, Leith, Scholz, 1988]

в конце 1973, начале 1977 и 1979 гг. При этом увеличился наклон графика повторяемости возбужденных землетрясений γ – если до заполнения водохранилища его значение было -0.41 , то после стало -0.53 . Соответственно значительно уменьшилось количество относительно сильных землетрясений – до начала заполнения в 1955–1971 гг. в районе произошло десять землетрясений с $K \geq 12$, среди которых было одно сильное событие с $K=14$ ($M=5.3$) (интенсивность 7–8 баллов), три с $K=13$ ($M=5.0 \pm 0.2$) и шесть с $K=12$ ($M=4.5 \pm 0.2$). После заполнения за 1972–1987 гг. произошло всего шесть землетрясений с $K=12$ и ни одного более сильного.

То, что в течение более чем 40 лет (с 1972 г. по настоящее время) на территории возникновения возбужденной сейсмичности площадью около 1800 кв. км не произошло ни одного землетрясения с $K > 12$, – факт не тривиальный, поскольку согласно нормативной карте сейсмического районирования, в районе Нурекского водохранилища возможны максимальные землетрясения с $K=15$ ($M=6$) при 50-летнем периоде повторения [Бабаев, Кошлаков, Мирзоев, 1978; Сейсмичность . . ., 1993/1995]. Отметим, что после создания водохранилища существенно возросло количество более слабых сейсмических событий с $K < 12$ за счет преобразования энергии возможных сильных землетрясений в квазипластические деформации и многочисленные слабые сейсмические толчки.

В этой связи представляют интерес результаты наблюдений за изменением частотного состава колебаний возбужденных землетрясений, полученные в [Голубятников, Павлова, 1982]. Так, если в начале заполнения водохранилища в 1972 г. в его непосредственной окрестности преобладали высокочастотные (“жесткие”) землетрясения с максимумом частотного спектра около 10 Гц, то через семь лет стали преобладать “мягкие” толчки с более низкими частотами (максимум спектра в области 3 Гц). Зона возникновения “мягких” землетрясений вокруг плотины постепенно расширялась – радиус площади их распространения увеличился от ~ 10 км до ~ 35 км. При этом сброс напряжений в очагах высокочастотных землетрясений примерно одного энергетического уровня ($K=6-7$) составлял порядка 1.0–4.0 бар, а в очагах низкочастотных – 0.03–0.4 бар [Мирзоев, Негматуллаев, 1983; Мирзоев, Негматуллаев, Саломов, 1983; Мирзоев, Негматуллаев, Дастури, 1987]. Налицо эффект перекачки накопленной тектонической энергии от нереализованных сильных сейсмических событий в область слабых землетрясений и крипповых явлений.

Возможна следующая природа наблюдаемого эффекта. Проникновение воды на большие глубины под водохранилищем уменьшает величину сцепления на разломах и трещинах, облегчая частые малые подвижки и препятствуя накоплению энергии для возникновения сильных землетрясений. Кроме того, за счет увеличения порового давления в горной породе под воздействием проникающей воды происходит уменьшение объемной составляющей действующих тектонических сил (перераспределение кругов Мора на эпюре напряжений). Одновременно уменьшается эффективное трение в среде, что, в принципе, снижает потенциальные возможности возникновения сильных землетрясений [Мирзоев, Негматуллаев, Дастури, 1987; Мирзоев и др., 1987].

В окрестности плотины Нурекской ГЭС в периоды водосбросов происходят вибрации земной коры двух видов. Первые (эпизодические), связанные собственно со сбросом воды, регистрируются на удалениях до 25 км; вторые (постоянные), связанные с работой агрегатов ГЭС, регистрируются на удалениях до 7 км [Мирзоев, Негматуллаев, 1992]. Во времени с периодами повышенных или пониженных значений энергии сброшенной воды через водосбросы четко согласуется количество возбужденных землетрясений [Мирзоев, Негматуллаев, 1979, 1983, 1990, 1992; Мирзоев, Негматуллаев, Саломов, 1983; Мирзоев, Негматуллаев, Дастури, 1987]. Наиболее ярко это проявляется в периоды высокого уровня воды в водохранилище, когда возрастают амплитуды вибраций от водосбросов.

График среднесуточной выделяемой энергии землетрясений в окрестности водохранилища, отнесенной к площади 1000 кв. км, в зависимости от уровня микросейсм на разных расстояниях и в разные периоды времени для постепенно удаляющихся зон в радиусе до 25 км от водосброса приведен на рис. 8 [Мирзоев, Негматуллаев, 1990; Мирзоев и др., 2009]. Выделяемая среднесуточная энергия представительных землетрясений ($K \geq 7$) уменьшается по мере возрастания амплитуд постоянных техногенных вибраций, что демонстрируется наклоном прямой, ограничивающей предельные значения энергии. В отдельные периоды, когда амплитуды вибраций достигают 0.5 мкм (на рис. 8 не приводится), представительные землетрясения практически полностью исчезают.

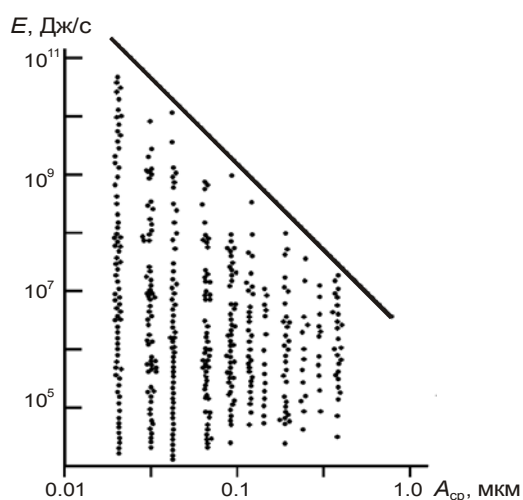


Рис. 8. График среднесуточной выделенной энергии представительных землетрясений ($K \geq 7$), отнесенной к площади 1000 кв. км, в окрестности водохранилища Нурекской ГЭС в зависимости от уровня микросейсм на разных расстояниях в разные периоды времени для постепенно расширяющихся зон в радиусе до 25 км от водосброса [Мирзоев и др., 2009]

За пределами зоны повышенных вибраций (на удалении более 25 км от плотины), где амплитуды техногенных микросейсм, понижаясь до 0.01–0.02 мкм, соответствуют фоновому уровню естественных микросейсм, число землетрясений заметно возрастает. Здесь случаются и достаточно сильные события, провоцируемые единичными пиковыми микросейсмными, заметно превышающими по амплитуде средние фоновые значения.

Таким образом, постоянные вибрации, превышающие по амплитуде фон естественных микросейсм, приводят к заметному снижению уровня сейсмической активности. Снятие накопленных тектонических напряжений в такие моменты происходит посредством усиленных пластических деформаций (аналогично влиянию вибраций на напряженную среду в технике). Этот вывод согласуется с результатами экспериментов по деформированию образцов из разных материалов под постоянной нагрузкой в условиях дополнительной вибрации (см. рис. 2–5 и их описание в тексте).

В свете полученных результатов несомненный интерес представляет тот факт, что на крупнейшем разломе Сан-Андреас, простирающемся вдоль Тихоокеанского побережья США, нередко инструментально наблюдаются достаточно большие и быстро развивающиеся остаточные пластические подвижки при отсутствии сильных землетрясений. Иногда их интерпретируют как “мягкие” или “медленные” землетрясения, которые, несомненно, снимают значительную часть накапливаемых напряжений на отдельных участках разлома [*Linde et al.*, 1996].

Аналогичные пластичные подвижки вдоль разлома, не сопровождаемые землетрясениями, наблюдались и в районе Курильских островов [*Науменко*, 1979]. Они могут быть связаны с триггерным воздействием штормовых микросейсм прибрежной зоны Тихого океана. По расчетам, приводимым в [*Островский*, 1990], дополнительные напряжения, возникающие в верхней части земной коры при распространении штормовых микросейсм, имеющих периоды колебаний порядка 10 с, на два порядка превышают напряжения, вызываемые лунными приливами. Еще бóльшие напряжения, естественно, возникают от штормовых микросейсм с периодами <10 с в связи с их большей энергоёмкостью.

Подобные повышенные вибрации земной коры, особенно возникающие одновременно вдоль всего побережья, могут служить дополнительным мощным инструментом снятия упругих напряжений и на разломе Сан-Андреас как в виде относительно медленных пластических деформаций (“тихие” землетрясения), так и в виде всплесков слабых землетрясений.

Возбужденная сейсмичность территории Ромашкинского месторождения нефти в Республике Татарстан

Естественная сейсмическая активность центральной части Восточно-Европейской платформы, где на территории Республики Татарстан находится Ромашкинское месторождение нефти (ОАО “Татнефть”), невысока. Максимально возможные магнитуды землетрясений здесь не превышают $M=5$ ($K=13$) [Сейсмичность . . ., 1993/1995; *Мирзоев, Рахматуллин, Гатиятуллин*, 2000; *Мирзоев и др.*, 2001а,б]; в период с 1845 по 1914 гг. на рассматриваемой территории произошло всего шесть таких ощутимых землетрясений [*Ананьин и др.*, 1977].

Схема эпицентров возбужденных землетрясений с энергетическим классом $K \geq 8$ ($M \geq 2$), произошедших на территории разработки Ромашкинского месторождения нефти в 1986–2000 гг. [*Мирзоев и др.*, 2001а,б], приведена на рис. 9. О триггерной природе этих событий, обусловленной техническими условиями разработки месторождения, свидетельствует, в первую очередь, четкая приуроченность эпицентров к расположенному в центре Татарского свода центральному куполу месторождения. С удалением от купола землетрясения практически исчезают, хотя приведенный на рис. 9 контур предствительной регистрации сейсмических событий с $K \geq 7$ предполагает, что такие события были бы обязательно зарегистрированы, если бы они имели место в природе.

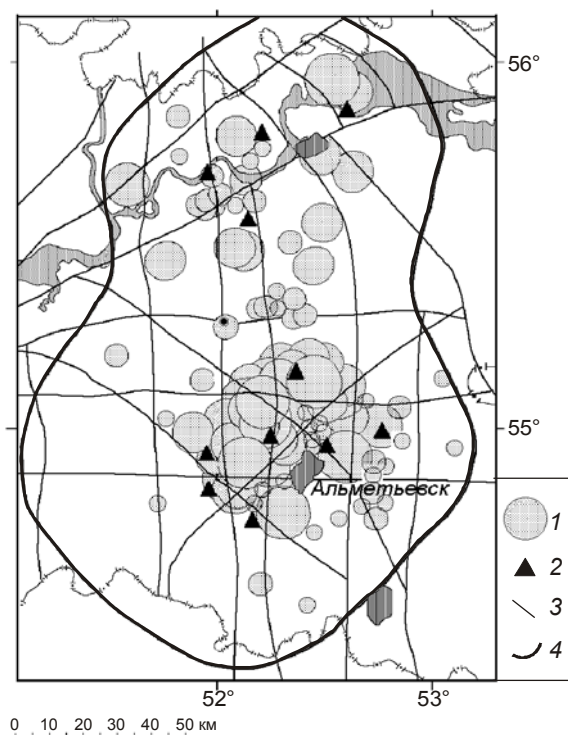


Рис. 9. Схема эпицентров возбужденных землетрясений с энергетическим классом $K \geq 8$ ($M \geq 2$), произошедших на территории разработки Ромашкинского месторождения нефти в 1986–2000 гг. [Муслимов и др., 1998; Мирзоев и др., 2001а,б]

1 – эпицентры землетрясений в диапазоне энергий $K=8-11$; 2 – сейсмические станции; 3 – глубинные разломы по [Степанов, Мирзоев, Степанов, 2005]; 4 – граница области представительной регистрации землетрясений с $K \geq 7$

Отмеченное можно рассматривать как прямое свидетельство техногенного генезиса сейсмичности, наблюдаемой на Ромашкинском месторождении.

Промышленная разработка месторождения началась в конце 1950-х годов с закачки воды в нефтеносный горизонт и достигла максимума к середине 1980-х (объемы добычи на площади размером 60×70 км составили более 100 млн. м^3 в год) [Муслимов, 1985; Мирзоев и др., 2005; Муслимов и др., 2006].

В конце 1960-х годов на рассматриваемой территории начали возникать ощутимые местные землетрясения. По нашим ретроспективным расчетам, охватывающим период до начала инструментальных наблюдений в 1986 г., таких землетрясений должно было быть ежегодно 20–30. В 1986 г. для уменьшения обводненности добываемого флюида, достигшей на большей части месторождения 85 %, началось общее снижение объемов закачки воды в скважины, в результате чего к 1996 г. объем закачки уменьшился в 2 раза. Следствием этого стало снижение сейсмической активности района. Если в 1987–1988 гг. происходило примерно по 50 инструментально зарегистрированных ощутимых землетрясений с $K=8-11$ в год, то с 1989 г. их количество стало ежегодно уменьшаться; в 1996 г. было зарегистрировано только семь землетрясений, энергия сильнейших событий при этом уже не превышала $K=8$ ($M \approx 2$).

Изменение во времени давления в нефтеносном пласте Березовской площади Ромашкинского месторождения практически за все время его разработки (с 1980 по 1995 гг.) было сопоставлено с вариациями числа возбужденных землетрясений за 1987–1995 гг. на той же территории (рис. 10).

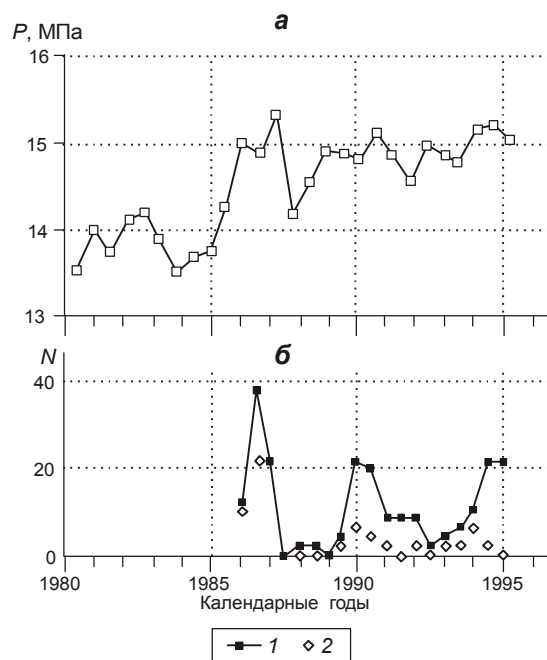


Рис. 10. Изменение во времени давления в нефтеносном пласте Берёзовской площади Ромашкинского месторождения за 1980–1995 гг. (а) и вариации числа возбуждённых землетрясений на той же территории в 1986–1995 гг. (б) [Муслимов и др., 1998]

1 – полугодовые числа землетрясений с $K > 6$ на всей территории Ромашкинского месторождения; 2 – то же на территории Берёзовской площади

Четко прослеживается сходство динамики временного хода сопоставляемых величин – во время локального резкого увеличения пластового давления возрастает число землетрясений. Это может означать, что наблюдаемая на Ромашкинском месторождении сейсмичность является возбужденной.

На некоторых участках Ромашкинского месторождения с целью увеличения нефтеотдачи эпизодически проводились вибровоздействия на нефтеносный пласт. Сейсмические наблюдения, организованные нами на месторождении в 1988 г., показали, что в эти периоды на участках проведения вибровоздействий не было зафиксировано ни одного даже слабого землетрясения.

График снижения суммарной годовой энергии землетрясений в сопоставлении с кривой изменения объемов закачки воды на Ромашкинском месторождении в период 1982–2002 гг. приведен на рис. 11. Можно видеть, что в течение названного периода при уменьшении объемов закачки в 2.7 раза суммарная годовая сейсмическая энергия уменьшилась на четыре порядка. Заметим, что до 1988 г. в связи с недостаточной плотностью наблюдательной сейсмической сети возможны существенные пропуски в регистрации землетрясений, в связи с чем полученные на этом временном интервале результаты могут рассматриваться лишь как оценочные (вероятнее всего, как заниженные по величине суммарной энергии E).

С 1990 г. на Ромашкинском месторождении начала работать сеть геодезических нивелирных измерений. Выполненные измерения показали, что на рассматриваемой площади с периодичностью 1–2 года происходят знакопеременные вертикальные деформации земной поверхности, достигающие 10–20 см [Мирзоев и др., 2001а,б].

При этом за пределами Ромашкинского месторождения скорости вертикальных движений не превышают 2 мм в год, не считая прибрежных зон крупных рек Волги,

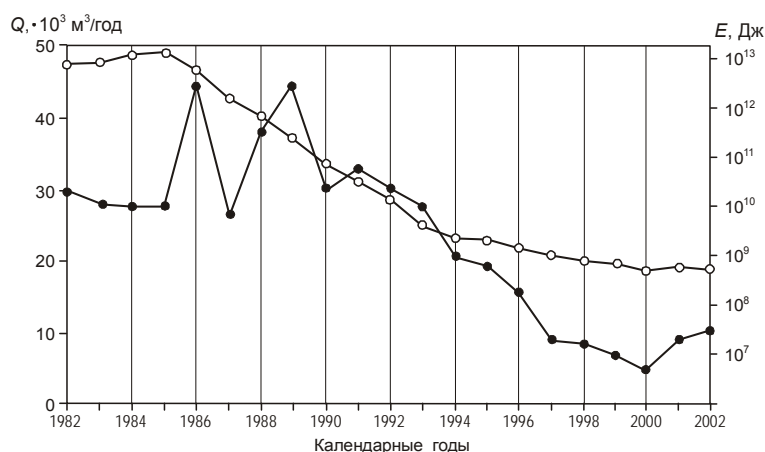


Рис. 11. Изменения суммарной годовой энергии землетрясений на Ромашкинском месторождении нефти с 1982 по 2002 гг. (залитые кружки, правая шкала) в связи с уменьшением объемов закачки воды в скважины (кружки без заливки, левая шкала) и периодическими вибрациями нефтеносного пласта [Мирзоев и др., 2005]

Камы и Вятки, где интенсивность просадок достигает 6 мм в год в связи с карстовыми процессами в земной коре. Столь большие знакопеременные вертикальные движения земной поверхности на самом месторождении естественно связывать не с тектоникой, а с закачкой воды в скважины, откачкой нефтяного флюида, а также с приемистостью скважин, которая изменяется под влиянием лунно-солнечных приливов в зависимости от сезона, года и т.д. На возможность использования лунно-солнечных среднесезонных функций для учёта вариаций геофизических данных указывалось в [Дещеревский, Сидорин, 1999, 2012]. В летнее и зимнее время, когда размах ежесуточных лунно-солнечных приливов достигает наибольших значений и амплитуды расширения и сжатия трещин увеличиваются, значительно (до 30 %) изменяется приемистость закачивающих скважин [Муслимов и др., 2006]. В связи с этим обстоятельством объемы закачки воды зимой и летом автоматически увеличиваются примерно вдвое по сравнению с осенью и весной.

Помимо сезонных изменений амплитуд приливов земной коры происходят также их ежесуточные изменения, определяющие суточные изменения приемистости закачивающих и добывающих скважин, так как уровень жидкости в скважинах изменяется в противофазе земным приливам [Боканенко, Галаганов, Передерин, 1999; Гаврилов, Морозова, Сторчеус, 2006; и др.].

Практическое применение результатов лабораторных и натуральных исследований процесса деформирования материала под постоянной нагрузкой

Анализ результатов лабораторных и натуральных исследований процесса деформирования материала под постоянной нагрузкой свидетельствует о существовании единого механизма деформации любых напряженных сред, справедливого и для слабых микроскопических скачков, и для тектонических сейсмических событий. В рамках этого механизма тектонические события понимаются как отдельные скачки деформации в процессе “сейсмического течения” горных масс [Ризниченко, 1965]. Поэтому полученные результаты изучения развития процесса деформации на образцах и его зависимости от внешних воздействий (техногенных и природных вибраций) вполне резонно могут быть перенесены на развитие тектонических деформаций, сопровождающихся сейсмичностью.

Возможность управляемого уменьшения накопленных тектонических напряжений в земной коре. Наблюдавшаяся в натуральных экспериментах зависимость возбужденной сейсмичности от темпов закачки воды в горные породы и вибраций была использована нами при разработке способа управляемого уменьшения накопленных тектонических напряжений в земной коре [Мирзоев и др., 2006, 2009, 2010а,б,в]. Этот способ предназначен для использования в областях концентрации напряжений в земной коре, устанавливаемых разными методами, например, по зонам возникновения сейсмического затишья в пределах сейсмогенерирующей тектонической структуры. Предполагается проведение периодической закачки воды в скважины в режиме, согласованном во времени с лунно-солнечными приливами (в фазе расширения среды), и вибровоздействий, превышающих по интенсивности микросейсмический фон. Предельные объемы нагнетаемой жидкости контролируются интенсивностью возбужденной сейсмичности [Healy et al., 1968; Healy, Hamilton, Raleigh, 1970; Raleigh, Healy, Bredehoeft, 1976; и др.]. В случаях заметного по сравнению с фоновыми значениями увеличения числа землетрясений с $K \geq 9$ ($M \geq 3$) объемы закачки следует уменьшать, чтобы не спровоцировать спонтанного сброса уже накопленной сейсмической энергии в виде разрушительного события.

Возможности получения отливок повышенной прочности и коррозиестойчивости. Выше при анализе скачкообразности пластических деформаций было отмечено, что внешние механические воздействия, включая слабые естественные микросейсмические Земли и вибрации воздушного пространства, влияют на характер пластических деформаций любых напряженных материалов как кристаллической, так и аморфной структуры. Воздействия вызывают остаточные подвижки (скачки деформации) по вновь образованным или существовавшим ранее плоскостям скольжения и трещинам. При этом возникают (или обновляются) микродефекты среды в материалах кристаллической структуры, нарушения кристаллической решетки, нитевидные кристаллы – “усы” в металлах, плоскости скольжения. Перечисленные дефекты впоследствии под воздействием внешних сил и диффузий газов способствуют образованию трещин, что в итоге приводит к снижению прочности материала, ускоряя процесс его коррозии.

Расплавленные металлы в период кристаллизации проходят через вязкопластическую стадию. На этой стадии их поведение при нагружении аналогично поведению пластилина, скачкообразность пластических деформаций которого вызывается приложением даже небольшой колебательной внешней нагрузки (~ 30 г/см²). Вызываемые такой нагрузкой напряжения соизмеримы с напряжениями внутри расплавленных металлов, возникающими под воздействием температурного градиента, гравитации и т.д. (см., например, [Давиденков, 1936; Мирзоев, Негматуллаев, Саломов, 1983] и др.). Следовательно, механические колебания окружающей среды (в том числе и микроколебания) вызывают в металлах в период кристаллизации скачки деформаций – остаточные дефекты, ухудшающие их физико-механические свойства. На этих соображениях основано изобретение, позволяющее улучшать физико-механические свойства металлов путем снижения (изоляции) внешнего механического воздействия на отливку [Мирзоев, Негматуллаев, Саломов, 1983]. При этом, чем больше изоляция, тем выше физико-механические свойства отливок. Полное устранение внешних воздействий на отливку достигается при плавлении металлов в вакууме.

Сила воздействия внешних механических колебаний окружающей среды на кристаллизующиеся металлы на Земле в условиях их изоляции от высокочастотных механических воздействий рассчитывается по формуле $F = ma$, где m – масса металла; a – ускорение воздействия. Естественные микроколебания поверхности Земли имеют максимальные амплитуды вплоть до десятков микрон в области частот 10–30 Гц. При средних значениях амплитуд микроколебаний земной поверхности $A_1 = 0.5$ мкм и

периода колебаний $T_1=0.05$ с ускорение воздействия, вычисляемое по формуле $a_1 = A_1/T_1^2$, составляет $2 \cdot 10^2$ мкм/с².

Изолированная от внешних механических воздействий платформа с застывающим металлом в наших экспериментах трансформировала сравнительно высокочастотные дрожания поверхности Земли (микросейсмы) в плавные колебания с периодом $T_2=2$ с и амплитудами A_2 , равными 0.5 мкм. Ускорение воздействия при этом существенно снижаются до $a_2 = A_2/T_2^2 = 1.25 \cdot 10^{-1}$ мкм/с². Как видно, различие в ускорениях составляет более трех порядков, что является достаточно значимым.

Обратимся к результатам плавки стержней из алюминия при температуре 900 °С в обычных условиях и при описанной выше изоляции (на платформе). В двух графитовых кокилях выплавлялась серия из 10 стержней длиной 180 мм и диаметром 15 мм. Прочность на разрыв стержней, выплавленных в обычных условиях (на Земле), составила 3127 ± 348 кг, в условиях изоляции (на платформе) – 3647 ± 247 кг, т.е. можно говорить о повышении прочности на 17%. Коррозиестойчивость металла при этом увеличивается почти в два раза. При испытаниях тех же стержней на изгиб наблюдается повышение примерно на 16 % усилия на изгиб у стержней, выплавленных на платформе. Аналогичные результаты получены для плавки свинца и меди.

Металлы, выплавленные в условиях изоляции от внешних механических воздействий, имеют меньшую зернистость и более яркий блеск, сохраняющийся в течение десятков лет. Эффективность изолированной плавки оценивается даже на слух по чистоте звучания отливки при ударе по ней. Не исключено, что искусство древних мастеров по отливке церковных колоколов состояло в интуитивном понимании необходимости изоляции отливок при их кристаллизации от сотрясений, что и осуществлялось обкладыванием отливок мощными слоями глины. К аналогичному эффекту – дополнительному сжатию и упрочнению внутренней структуры материала – приводит и интенсивнаяковка раскаленных металлов.

Заключение

Представленные в работе результаты исследований свидетельствуют, что деформация напряженных сред разных материалов как кристаллической, так и аморфной структуры происходит скачкообразно. При этом скачки деформации носят триггерный характер и могут быть обусловлены внешними относительно слабыми механическими воздействиями (например, микросейсмами Земли).

Землетрясения могут рассматриваться как скачки тектонических деформаций. При этом, чем больше амплитуда скачков, тем сильнее землетрясения.

Потенциальные большие скачки деформации в нагружаемых образцах, равно как и сильные землетрясения, могут быть преобразованы в большое число малых скачков при создании определенных условий, например, при снижении упругих свойств материала путем инъекции в него жидкости или при воздействии внешних вибраций. При этом накопленные ранее упругие напряжения реализуются не в одном достаточно сильном акте деформации, а в большой серии мелких скачков (слабых землетрясений).

Полученные результаты позволили разработать способ снятия упругой энергии в напряженных средах для предотвращения землетрясений [Мирзоев и др., 2006], который предполагает преобразование энергии сильных землетрясений в большое число малых толчков и сравнительно плавные остаточные подвижки среды. Для достижения этого используются нагнетание флюида в напряженные среды и техногенные вибрации

земной коры, имеющие относительно равномерные амплитуды и согласованные по времени с фазами лунно-солнечных приливов.

Показано, что эффект скачкообразности пластических деформаций играет большую роль в образовании дефектов в металлах при их кристаллизации. Изоляция отливков от внешних механических воздействий (например, проведение плавки в Космосе) способствует получению монолитных сплавов с повышенной прочностью и коррозионной устойчивостью [Мирзоев, Негматуллаев, Саломов, 1983].

Литература

- Ананьин И.В., Вороновская А.И., Ломакин В.С., Силина И.К., Смирнов В.А., Шебалин Н.В. Сейсмологические данные по регионам: Европейская часть СССР, Урал и Западная Сибирь // Новый каталог сильных землетрясений территории СССР с древнейших времен до 1975 г. М.: Наука, 1977. С.465–470.
- Бабаев А.М., Кошларов Г.В., Мирзоев К.М. Сейсмическое районирование Таджикистана / Ред. С.Х. Негматуллаев. Душанбе: Дониш, 1978. 69 с.
- Белл Дж.Ф. Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел. Ч.1. Малые деформации. М.: Наука, ФМЛ, 1984. 600 с.
- Боканенко Л.И., Галаганов О.Н., Передерин В.П. Вариации уровня подземных вод Гармского полигона (Таджикистан) и возможности прогнозирования землетрясений // Физика Земли. 1999. № 5. С.72–82.
- Возбужденная сейсмичность вблизи Нурекского водохранилища / Под ред. С.Х. Негматуллаева. Душанбе, Дониш, 1975. 90 с.
- Гаврилов В.А., Морозова Ю.В., Сторчеус А.В. Вариации уровня геоакустической эмиссии в глубокой скважине Г-1 (Камчатка) и их связь с сейсмической активностью // Вулканология и сейсмология. 2006. № 1. С.52–67.
- Гинкин Г.Г. Логарифмы, децибелы, децилоги. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1962. 352 с.
- Голубятников В.Л., Павлова А.И. Исследования спектральных характеристик землетрясений Нурекского района // Прогноз землетрясений. Душанбе: Дониш, 1982. № 1. С.352–362.
- Давиденков Н.Н. Динамические испытания металлов. М.; Л.: ОНТИ, 1936. 394 с.
- Децеровский А.В., Сидорин А.Я. Некоторые вопросы методики оценки среднесезонных функций для геофизических данных. М.: ОИФЗ РАН, 1999. 40 с.
- Децеровский А.В., Сидорин А.Я. Поиск влияния гравитационных приливов на региональную сейсмичность Греции разными методами: 1. Спектральный и периодограммный анализ // Сейсмические приборы. 2012. Т. 48, № 4. С.5–26.
- Иденбом В.Л., Томиловский Г.Е. Микроструктура напряжений в линиях скольжения и дислокации // Докл. АН СССР. 1958. Т. 123, № 4. С.673–675.
- Иоффе А.Ф. Физика кристаллов. М.; Л., 1929. 253 с.
- Иоффе А.Ф., Курпичева М.В., Левицкая М.А. Деформация и прочность кристаллов // ЖРФХО. Часть физ. 1924. Т. 56, вып. 5/6. С.489–504.
- Классен-Неклюдова М.В. О природе пластических деформаций // ЖРФО. 1927. Т. 59. С.509.
- Классен-Неклюдова М.В. Закономерности скачкообразности деформации // ЖРФО. 1928. Т. 60. С.373.
- Классен-Неклюдова М.В. Механическое двойникование кристаллов. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 261 с.
- Лебёдкин М.А. Самоорганизация и коллективные эффекты при неустойчивой пластической деформации кристаллов: Дисс. . . докт. физ.-мат. наук. Черноголовка, 2002. 248 с.
- Мирзоев К.М., Негматуллаев С.Х. Возбужденная сейсмичность в зонах водохранилищ на примере района Нурекской ГЭС // Сб. Советско-Американских работ по прогнозу землетрясений / Гл. ред. акад. М.А. Садовский. Т. 2, кн. 1. Душанбе; Москва: Дониш, 1979. С.124–151.

- Мирзоев К.М., Негматуллаев С.Х. Влияние механических вибраций на выделение сейсмической энергии // Прогноз землетрясений. № 4 / Гл. ред. акад. М.А. Садовский. Душанбе; Москва: Дониш, 1983. С.365–372.
- Мирзоев К.М., Негматуллаев С.Х. Влияние механических вибраций на сейсмичность // Докл. АН СССР. 1990. Т. 313, № 1. С.78–83.
- Мирзоев К.М., Негматуллаев С.Х. Влияние механических вибраций на сейсмичность и пластические деформации / Гл. ред. акад. М.А. Садовский. Душанбе: Дониш, 1992. 51 с.
- Мирзоев К.М., Виноградов С.Д., Рузубаев З.Р. Влияние микросейсм и вибраций на акустическую эмиссию // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1991. № 12. С.69–72.
- Мирзоев К.М., Негматуллаев С.Х., Дастури Т.Ю. Влияние механических вибраций на характер высвобождения сейсмической энергии в районе водохранилища Нурекской ГЭС // Сейсмологические исследования в районах строительства крупных водохранилищ Таджикистана. Душанбе: Дониш, 1987. С.101–119.
- Мирзоев К.М., Негматуллаев С.Х., Саломов Н.Г. Способ получения отливок: А.с. на изобретение № 1039087. 3 мая 1983 г.
- Мирзоев К.М., Рахматуллин М.Х., Гатиятуллин Р.Н. Татарстан (с древнейших времен по 1994 г.) // Землетрясения Северной Евразии в 1994 году. М.: Изд-во РАН, 2000. С.44–56.
- Мирзоев К.М., Гатиятуллин Н.С., Степанов В.П., Гатиятуллин Р.Н. Карты детального сейсмического районирования территории Республики Татарстан масштаба 1:500000 // Современная геодинамика, глубинное строение и сейсмичность платформенных территорий и современных регионов. Материалы международной конференции. Воронеж: Изд-во Воронежского университета, 2001а. С.123–126.
- Мирзоев К.М., Гатиятуллин Н.С., Степанов В.П., Каишуркин П.И., Гатиятуллин Р.Н. Активные разломы земной коры Ромашкинского месторождения нефти по геолого-геофизическим и геодезическим данным // Современная геодинамика, глубинное строение и сейсмичность платформенных территорий и современных регионов: Материалы международной конференции. Воронеж: Изд-во Воронежского университета, 2001б. С.126–129.
- Мирзоев К.М., Негматуллаев С.Х., Симпсон Д., Соболева О.В. Возбужденная сейсмичность в районе водохранилища Нурекской ГЭС. Душанбе; Москва: Дониш, 1987. 403 с.
- Мирзоев К.М., Николаев А.В., Лукк А.А., Юнга С.Л. Способ снятия упругой энергии в напряженных средах для предотвращения землетрясений: Патент № 2289151. 2006.
- Мирзоев К.М., Николаев А.В., Лукк А.А., Юнга С.Л. Наведенная сейсмичность и возможности регулируемой разрядки накопленных напряжений в земной коре // Физика Земли. 2009. № 10. С.49–68.
- Мирзоев К.М., Николаев А.В., Лукк А.А., Юнга С.Л. Способ снятия упругой энергии для предотвращения землетрясений // Материалы Всероссийского семинара-совещания, 22–24 июня 2010 г. М.: ГЕОС, 2010а. С.87–96.
- Мирзоев К.М., Николаев А.В., Мирзоев В.К., Лукк А.А., Харламов А.И., Децеровский А.В. Способы увеличения добычи нефти с учетом приливных движений Земли // Экспозиция НЕФТЬ ГАЗ. Специализированное издание. Республика Татарстан, Набережные Челны. 2010б. Вып. № 4/Н (10). С.56–62.
- Мирзоев К.М., Николаев А.В., Мирзоев В.К., Лукк А.А., Децеровский А.В., Харламов А.И. Способ увеличения нефтеотдачи месторождения и добычи нефти: Патент РФ № 2387817. 2010в.
- Мирзоев К.М., Хисамов Р.С., Гатиятуллин Н.С., Гатиятуллин Р.Н., Муслимов Р.Х., Файзуллин И.Н., Ахмадиев Р.Г., Мирзоев В.К. Оценка оптимальных объемов и режима закачки воды в скважины Ромашкинского месторождения // Нефтяное хозяйство. 2005. № 8. С.128–131.
- Муслимов Р.Х. Повышение эффективности освоения нефтяных месторождений Татарии. Казань: Таткнигоиздат, 1985. 177 с.
- Муслимов Р.Х., Мирзоев К.М., Гатиятуллин Н.С., Лукк А.А., Юнга С.Л. Техногенные проявления сейсмичности Татарстана. Науч.-техн. отчет НТЦ ПТ. Казань, 1998. 32 с.

- Муслимов Р.Х., Мирзоев К.М., Ахмадиев Р.Г., Агафонов В.А., Хузин Р.Р., Тимиров В.С., Мирзоев В.К., Лукк А.А., Децеровский А.В. Влияние гравитационных лунно-солнечных приливов земной коры на добычу нефти // Нефтяное хозяйство. 2006. № 8. С.111–115.
- Науменко Б.Н. Явление частичной ликвидации тектонических напряжений штормовыми микросейсмками // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1979. № 8. С.72–75.
- Островский А.А. Возможная причина сезонной периодичности некоторых Калифорнийских землетрясений // Докл. АН СССР. 1990. Т. 313, № 1. С.83–86.
- Ризниченко Ю.В. О сейсмическом течении горных масс // Динамика земной коры. М.: Наука, 1965. С.56–63.
- Рожанский В.Н. Неравномерности пластической деформации кристаллов // Успехи физ. наук, 1958. № 65, вып. 3. С.387–406.
- Садовский М.А., Мирзоев К.М., Негматуллаев С.Х., Саломов Н.Г. Влияние механических микроколебаний на характер пластических деформаций материалов // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1981. № 6. С.32–42.
- Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии / Ред. В.И. Уломов. М.: ОИФЗ РАН, 1993. Вып. 1. 303 с.; 1995. Вып. 2/3. 490 с.
- Симпсон Д., Соболева О.В. Механизм возбужденной сейсмичности в районе Нурекского водохранилища // Сб. Советско-Американских работ по прогнозу землетрясений / Под ред. С.Х. Негматуллаева. Т. 1, кн. 1. М.; Душанбе: Дониш, 1976. С.70–79.
- Степанов В.П., Мирзоев К.М., Степанов А.В. Методические основы построения карт глобальной трещиноватости земной коры способом детальной обработки данных магнитных аномалий на примере Татарстана. Казань: “Плутон”, 2005. 84 с.
- Френкель В.Н. Пауль Эрэнфест. М.: Атомиздат, 1977. 192 с.
- Healy J.H., Griggs D.F., Rubey W.W., Raleigh S.B. The Denver earthquakes // Science. 1968. V. 161 (3848). P.1301–1310.
- Healy J.H., Hamilton R.M., Raleigh S.B. Earthquakes induced by fluid injection and explosion // Tectonophysics. 1970. V. 9, N 2/3. P.205–214.
- Linde A.T., Gladwin M.J., Johnston S., Gwyther R.L., Bilham R.G. A slow earthquake sequence on the San Andreas fault // Nature. 1996. V. 383. P.65–68.
- Portevin A., Le Chatelier F. Sur un phenomena observe lors de l’essai de fraction d’alliages en cours de transformation // Compt. Rend. Acad. Sci. Paris. 1923. V. 176. P.356–368.
- Raleigh C.B., Healy J.H., Bredehoeft J.D. An experiment in earthquake control at Rangely, Colorado // Science. 1976. V. 191. P.1230–1237.
- Simpson D.W., Negmatullaev S. Kh. Induced seismicity at Nurek reservoir, Tajikistan, USSR // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1981. V. 71, N 5. P.1561–1586.
- Simpson D.W., Leith W.S., Scholz C.H. Two type of reservoir-induced // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1988. V. 78, N 6. P.2025–2040.

Сведения об авторах

МИРЗОЕВ Камиль Мамедович – доктор физико-математических наук, член-корреспондент Тадж. АН, главный научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр.1. Тел.: 8(915) 241-61-76. E-mail: kmmirzoev@yandex.ru

НИКОЛАЕВ Алексей Всеволодович – доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, профессор, главный научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: 8(926) 295-05-34. E-mail: nikavs@ifz.ru

ЛУКК Альберт Артурович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: 8(916) 110-28-33. E-mail: lukk@ifz.ru

ДЕЩЕРЕВСКИЙ Алексей Владимирович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел. 8(916) 026-46-86. E-mail: adeshere@ifz.ru

МИРЗОЕВ Виталий Камилевич – генеральный директор, ЗАО Кройл-Инвест. 113035, Москва, ул. Большая Ордынка, д. 10. Тел.: 8(916) 917-59-44. E-mail: vminform1@yandex.ru

DISCONTINUITY OF PLASTIC DEFORMATION AND WAYS OF RELEASING ACCUMULATED STRESSES

К.М. Mirzoyev¹, А.В. Nikolaev¹, А.А. Lukk¹, А.В. Descherevsky¹, V.K. Mirzoyev²

¹ *Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

² *Kroyl Invest ZAO, Moscow, Russia*

Abstract. In a series of laboratory tests on samples of various materials of crystalline and amorphous structures, under constant load and vibration stimulus, it was found that the plastic strain discontinuity occurs in any materials. At the same time, the jumps are triggers and may be driven by relatively weak external mechanical impacts (e.g., Earth's microseismic activity).

Similar processes are observed in nature for the induced seismicity, which can be seen as the result of joint influence on rocks of water permeability under pressure at depth and external mechanical vibrations, both natural and technogenic.

Large jumps in the deformation of loaded samples, as well as strong earthquakes in the crust, can be converted into a large number of small jumps when creating certain conditions: a decrease in the elastic properties of the material due to injection of liquids and to external vibrations relatively uniform in amplitude and consistent in time with tidal movements of the Earth. In this case, elastic stresses previously accumulated in the material are released in a large series of small deformation jumps (small earthquakes) rather than in a sufficiently strong act. Thus, a principal ability to control discontinuous plastic deformation in stress media is stated.

Keywords: Sudden plastic deformation; tidal deformation; vibration; induced seismicity; metal's strength and stainless.