

УДК 550.34

«Я не сейсмолог, и никогда не собирался отдаться этой науке полностью. Однако мои жизненные пути складывались так, что при всяком их изменении приводили к задачам, непосредственно связанным именно с наукой о землетрясениях...»

М. А. Садовский

РАЗВИТИЕ КОНЦЕПЦИИ БЛОЧНО-ИЕРАРХИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ В РАБОТАХ ИДГ РАН

© 2024 г. Г. Г. Кочарян*

Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, Москва, Россия

**E-mail: kocharyan.gg@idg.ras.ru*

В предлагаемой статье сделана попытка проследить эволюцию некоторых базовых положений модели геофизической среды М. А. Садовского в работах сотрудников ИДГ РАН. Богатый экспериментальный материал, накопленный на протяжении многих лет участия в испытаниях ядерного оружия, послужил фундаментом для развития динамики деформирования массивов горных пород на разном иерархическом уровне. Показано, что многие современные подходы и результаты последних лет в том или ином виде были предсказаны в работах М. А. Садовского. Продемонстрирована ключевая роль разломных зон в эволюции деформационных процессов в земной коре. Развитие нового научного направления Геомеханика разломов открывает новые возможности в решении фундаментальных и прикладных задач физики твердой Земли.

Ключевые слова: сейсмичность, землетрясение, структурный блок, разлом, разрушение геоматериала.

Для цитирования: Кочарян Г.Г. Развитие концепции блочно-иерархического строения земной коры в работах ИДГ РАН // Динамические процессы в геосферах. 2024. Т. 16. № 3. С. 23–35. https://doi.org/10.26006/29490995_2024_16_3_23

Введение

Блоки земной коры и разделяющие их тектонические разломы и трещины многие десятилетия изучаются учеными геологических специальностей. Даже беглый взгляд на участок массива горных пород демонстрирует присутствие большого количества нарушений сплошности разного масштаба, которые делят его на структурные составляющие. При этом, любой выделенный в массиве объем имеет определенное внутреннее строение. По выражению М. А. Садовского «..любой объем дискретной среды обладает внутренней структурой» [Садовский и др., 1983; Садовский и др., 1987]. В отличие от чисто геологического подхода, фундаментальный подход М. А. Садовского, основанный не только на анализе структуры массива, но и на физике процессов, происходящих в земной коре, обеспечил понимание того, что дискретность земной коры определяет закономерности зарождения и эволюции многих геофизических явлений. Именно блоковое строение коры обеспечивает необходимые условия функционирования процессов обмена энергией и веществом между различными геосферами, биосферой Земли и космическим пространством, а также такие фундаментальные свойства твердой Земли, как подвижность коры и ее проницаемость для флюидов [Кочарян, 2016].

Известная монография «Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс» [Садовский и др., 1987] заканчивается следующей фразой: «Иерархически блоковая модель горной

породы, качественно объясняя некоторые эффекты, необъяснимые с помощью линейно-упругой сплошной модели, заслуживает внимания и дальнейшей разработки».

В Спецсекторе ИФЗ АН СССР/ИДГ РАН идея блочно-иерархического строения массива горных пород была воспринята «на ура», как естественный шаг за пределы механики сплошной среды. Этот переход давал возможность объяснить существенные иногда отклонения от «средних» зависимостей, наблюдаемые, например, в крупномасштабных экспериментах со взрывами. Богатый экспериментальный материал, накопленный в Спецсекторе на протяжении многих лет участия в испытаниях ядерного оружия, послужил прекрасным фундаментом для развития концепции М. А. Садовского. Ранее «необычные» экспериментальные данные приписывались методическим погрешностям, а механики и сейсмологи до определенного времени как бы не замечали, кажется, очевидной разницы между блочным горным массивом и континуумом [Кочарян, Спивак, 2003]. Дело здесь, очевидно, в том, что при решении значительного класса традиционных задач механики горных пород и геофизики важно было иметь возможность использовать в полной мере мощный аппарат механики сплошных сред. Ситуация изменилась коренным образом и при решении фундаментальных задач физики землетрясений, и в прикладных задачах нагружения среды взрывом, когда стала очевидной необходимость адекватного описания именно локальных эффектов, проявляющихся, главным образом, на границах структурных блоков.

Многие положения, которые были кратко сформулированы в основополагающих трудах М. А. Садовского, получили дальнейшее развитие в трудах его ближайших соратников, прежде всего, В. Н. Родионова, а также В. В. Адушкина, В. Н. Костюченко и других сотрудников ИДГ РАН.

В настоящей статье сделана попытка проследить эволюцию некоторых базовых положений концепции «новой модели геофизической среды» М. А. Садовского в работах сотрудников Института динамики геосфер РАН.

Блочно-иерархическая модель

Важным дополнением модели геофизической среды М. А. Садовского явилась разработанная В. Н. Родионовым с соавторами модель твердого тела со структурой, в которой твердое тело представляется некоторой идеальной средой, где равномерно по объему рассеяны разномасштабные неоднородности, на которых концентрируются и со временем релаксируют напряжения [Родионов и др., 1986]. Распределение неоднородностей по размеру задается таким образом, чтобы тело оставалось подобным самому себе при изменении масштаба длины:

$$\frac{l^3 dn}{d \ln l} = const, \quad (1)$$

где l – размер неоднородности, n – число неоднородностей в единице объема.

Напряжения внутри твердого тела складываются из двух компонентов: упругих напряжений и локальных напряжений на неоднородностях, которые ответственны за необратимые деформации в твердом теле.

Скорость релаксации напряжений на неоднородности пропорциональна величине неоднородности и обратно пропорциональна размеру неоднородности. При нагружении в начальные моменты времени напряжения на неоднородности нарастают со временем по линейному закону. В дальнейшем рост напряжений замедляется и на неоднородности каждого размера устанавливается свое напряжение:

$$\Delta \sigma_l = \rho C^2 \dot{\epsilon} \frac{l}{v}. \quad (2)$$

Здесь $\Delta \sigma_l$ – избыточное (над упругим уровнем) напряжение на неоднородности, ρ – плотность, C – скорость поперечных волн, $\dot{\epsilon}$ – точка смещения, v – константа, отражающая скорость релаксации напряжений.

Чем больше размер неоднородности, тем выше напряжение на ней при заданной скорости деформации. При предельно возможном напряжении на неоднородности σ^* минимальный размер неоднородности, на которой концентрируется напряжение равно предельному:

$$l_0 = \frac{\sigma^*}{\rho C^2} \frac{v}{\varepsilon}. \quad (3)$$

Таким образом, при постоянной скорости деформации среди параметров появляется параметр с размерностью длины и свойства твердого тела становятся зависимы от масштаба.

Разработанная модель позволила по-новому рассмотреть целый ряд проблем геофизики и геомеханики. Удалось связать повторяемость землетрясений с блочной структурой массива, объяснить механизм дезинтеграции массива горных пород при разных скоростях деформирования, оценить максимально возможный размер землетрясения, рассмотреть ряд горных задач и т.д. [Родионов и др., 1986; Родионов, Шемякин, 1990; Родионов, 1996].

Было введено понятие «свободного блока» – элемента блочной среды разгруженного относительно своих соседей [Садовский и др., 1988]. Концепция «свободного» блока сыграла важную роль в построении новой методологии размещения в массиве горных пород фортификационных сооружений высшей степени защищенности.

Использование блочно-иерархического подхода позволило построить численные модели, описывающие реологию скального массива при больших деформациях в окрестности метеоритных кратеров и в дальнотрассовых лавинах [Ivanov, Koctuchenko, 1997; Ivanov, Artemieva, 2002; Иванов, 2021].

При выявлении блочной структуры массива горных пород на разных иерархических уровнях одной лишь иерархии и самоподобия оказалось недостаточно. Установление местоположения разломов различного ранга, успешно проводимое геологическими и геофизическими методами, не решает

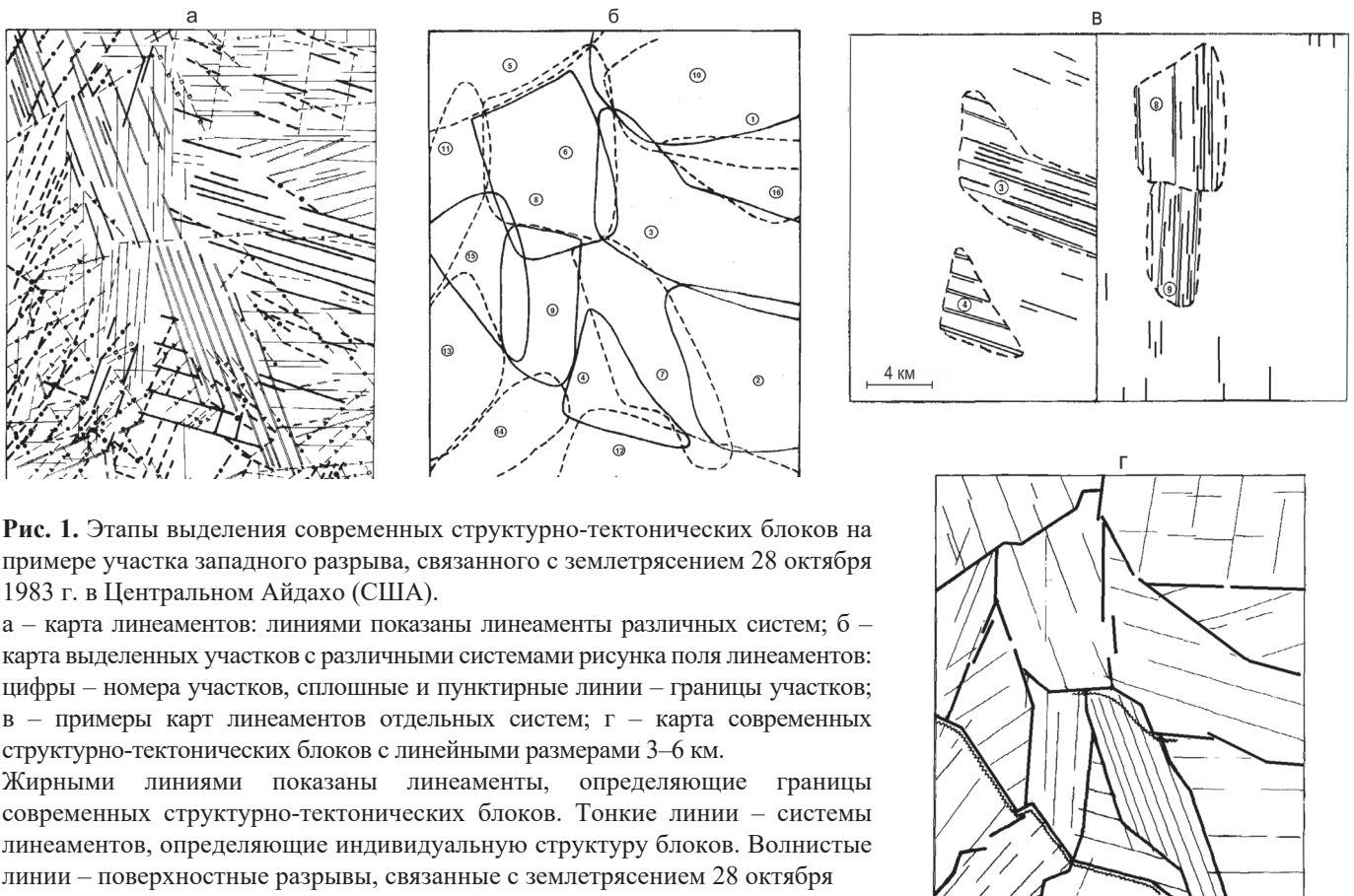


Рис. 1. Этапы выделения современных структурно-тектонических блоков на примере участка западного разрыва, связанного с землетрясением 28 октября 1983 г. в Центральном Айдахо (США).

а – карта линеаментов: линиями показаны линеаменты различных систем; б – карта выделенных участков с различными системами рисунка поля линеаментов: цифры – номера участков, сплошные и пунктирные линии – границы участков; в – примеры карт линеаментов отдельных систем; г – карта современных структурно-тектонических блоков с линейными размерами 3–6 км.

Жирными линиями показаны линеаменты, определяющие границы современных структурно-тектонических блоков. Тонкие линии – системы линеаментов, определяющие индивидуальную структуру блоков. Волнистые линии – поверхностные разрывы, связанные с землетрясением 28 октября 1983 г. [Бенедик и др., 1995].

поставленной задачи, поскольку существующие методы морфоструктурного анализа не обеспечивают однозначного выделения согласованных сетей тектонических блоков и их ранжирования на фоне многочисленных разрывных нарушений. Ошибки при определении порядка межблоковых границ зачастую приводят к искажениям блоковой модели, что препятствует выявлению корреляционных связей между элементами структуры земной коры и различными деформационными, геологическими и геохимическими процессами. Неплохих результатов удалось достичь, применяя, наряду с иерархическим подходом, методы линеamentного анализа, которые позволяют выделить участки заданного размера с однородной индивидуальной структурой (рис. 1) [Бенедик и др., 1995; Кочарян, Спивак, 2003; Иванченко, Горбунова, 2015].

Деформационные свойства разломов

В отличие от тектонических блоков, линейные размеры которых можно довольно уверенно определить с той или иной степенью достоверности, оценить деформационные характеристики разломной зоны в условиях естественного залегания намного сложнее. Вплоть до 90-х годов прошлого века не существовало инструментальных методов прямого определения свойств разломных зон.

Работа М. А. Садовского и В. Н. Костюченко [Костюченко, 1985; Садовский, Костюченко, 1988] положила начало интенсивному развитию сейсмических методов оценки механических свойств разломов и трещин. Анализируя закономерности изменения параметров волн сжатия при подземных ядерных взрывах, авторы показали, что степень затухания амплитуды с расстоянием во многом зависит от наличия на пути распространения волны разломов и крупных тектонических трещин.

В дальнейшем был разработан метод, который позволил исследовать зависимость жесткости разлома от амплитуды деформации и, даже, при надлежащем обеспечении измерений, построить реологическую кривую напряжение – деформация для разломной зоны в условиях естественного залегания [Костюченко и др., 2002]. Он основывается на анализе изменения динамических характеристик сейсмических волн при их взаимодействии с нарушениями сплошности массива горных пород. Было показано, что в качестве интегральной характеристики их деформационных свойств целесообразно использовать не модули деформации геоматериала, а удельные жесткости нарушения сплошности – скорости изменения напряжений на разломе в процессе относительного смещения берегов. Проведенные в ИДГ РАН, не имеющие аналогов в мире экспериментальные работы по диагностике разломов и трещин, позволили впервые определить механические свойства разломных зон разного масштаба в условиях естественного

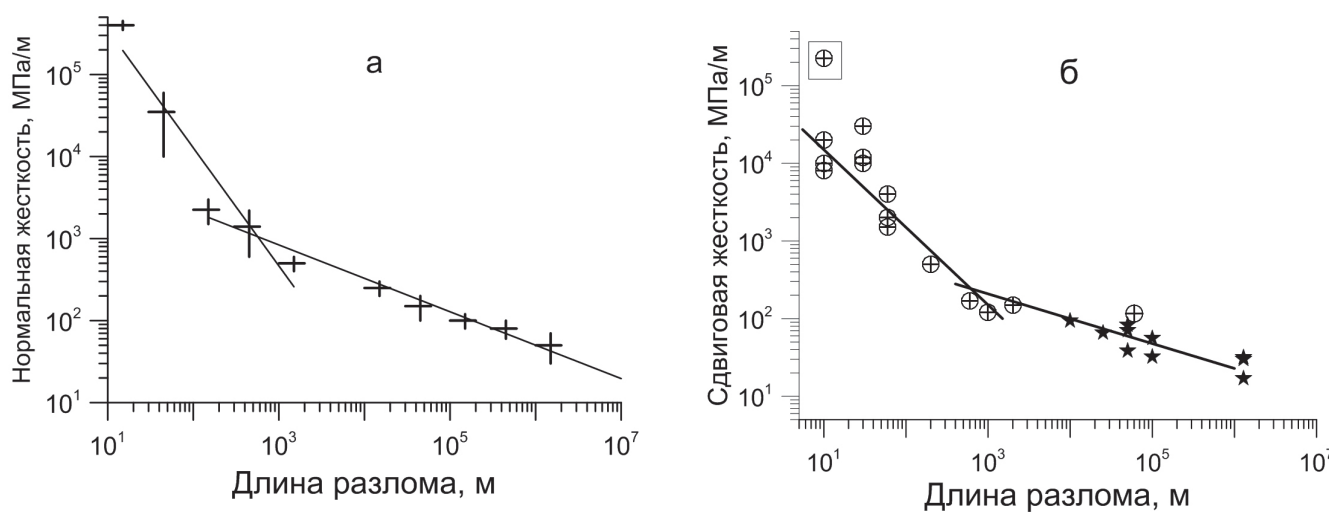


Рис. 2. Изменение величины жесткости разлома с масштабом [Кочарян, 2016]: а – нормальная жесткость. Вертикальные и горизонтальные линии – разброс измеренных значений для каждого иерархического уровня, б – сдвиговая жесткость. Светлые значки – данные получены методом сейсмического просвечивания. Точка, обведенная в рамку, не использовалась при построении регрессионной зависимости. Черные значки – данные получены методом каналовых волн

залегания. Выявленные закономерности динамического деформирования разломных зон имеют фундаментальное значение для механики скальных пород и теории распространения сейсмических волн. Экспериментально установленные зависимости нормальной и сдвиговой жесткости разлома от его длины показаны на [рис. 2](#). Оказалось, что скейлинговые соотношения для этих характеристик оказываются разными для сформировавшихся и несформировавшихся разломов, соответствуя, тем самым, геометрическим характеристикам разломов [[Кочарян, 2016](#)].

Сдвиговая жесткость или скорость снижения сопротивления сдвигу в процессе относительного смещения берегов является макроскопическим параметром, контролирующим эффективность подвижки по разлому, как сейсмического источника. Закономерности изменения этого параметра с масштабом определяют несколько иерархических уровней, внутри которых изменение характеристик землетрясений с масштабом происходит по разным законам [[Кочарян, 2016](#)].

Наблюдения «*in situ*» и лабораторные опыты показали, что жесткость разлома не остается неизменной во времени, изменяясь в ходе процесса деформирования разломной зоны. Результаты модельных экспериментов и натурных наблюдений демонстрируют возможность «быстрого» изменения этих характеристик как за счет процессов нарушения и залечивания, так и вследствие вариаций напряженного состояния среды.

Накопление малых возмущений

М. А. Садовский не раз подчеркивал свой интерес к проблемам накопления микродеформаций под воздействием сейсмических колебаний и вибраций [[Садовский и др., 1981](#); [Садовский и др., 1989](#)]. В программной статье «Прикладная сейсмология последних десятилетий века» он писал: «малые остаточные деформации при повторных эффектах могут накапливаться и в результате приводят к существенным изменениям свойств среды (прочности, проницаемости, электропроводности и т.п.) на больших удалениях от очагов деформирования, т.е. там, где ранее учитывались только упругие деформации, не меняющие свойств среды» [[Садовский, 1992](#)]. Помимо большого фундаментального значения, М. А. Садовский отмечал прикладное значение эффекта накопления деформаций, например, в нефтедобыче [[Садовский и др., 1986](#)].

Отсутствие физической модели эффекта накопления воздействий слабых вибраций на массив горных пород сдерживало развитие этого направления. В ИДГ РАН были развернуты лабораторные и полевые экспериментальные работы по изучению эффекта накопления малых возмущений и созданию модели этого явления.

По-видимому, первая экспериментальная работа, в которой была продемонстрирована принципиальная возможность трансформации низкоамплитудного знакопеременного динамического воздействия в поступательное движение блоков, была выполнена Г. Г. Кочаряном и В. Н. Родионовым и представлена М. А. Садовским в ДАН в 1988 г. [[Кочарян, Родионов, 1988](#)]. После этого эффекты долговременного вибровоздействия на блочную среду были изучены детально в экспериментах [[Кочарян и др., 2002](#); [Кочарян, 2016](#)]. Было установлено, что нелинейность зависимости $\sigma_s(u)$ и различие в жесткостях ветвей нагрузки и разгрузки у разломов и трещин определяет возможность накопления деформаций при низкоамплитудных воздействиях на контакт при условии, что интегральная скорость деформирования контакта достаточно велика для того, чтобы эффект «залечивания» не приводил к быстрому возрастанию эффективной прочности.

Взаимодействие сейсмических волн с квазистатически нагруженным нарушением сплошности приводит к возникновению остаточных перемещений берегов ([рис. 3](#)). При больших кумулятивных перемещениях ($u > u_p$) жесткость нагружения начинает постепенно снижаться из-за снижения значения текущей прочности контакта, что приводит к увеличению скорости накопления перемещений ([рис. 3б](#)).

При малых амплитудах циклического воздействия и низких уровнях статических напряжений обычно наблюдается постепенное снижение скорости относительного перемещения берегов ([рис. 3в](#)) из-за «привыкания» среды к уровню динамической нагрузки (эффект увеличения жесткости контакта

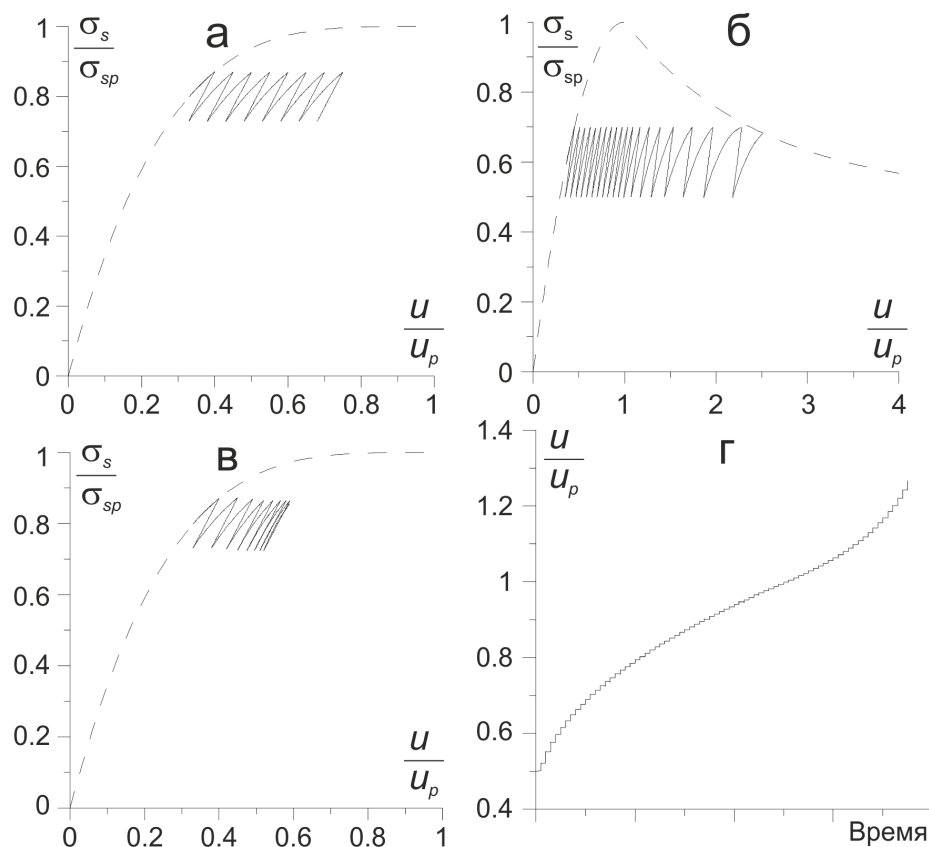


Рис. 3. Результаты расчета циклического нагружения контакта динамическим импульсом [Кочарян, 2016]:

а – расчет без учета эффекта изменения динамической жесткости – остаточное перемещение одинаково при каждом цикле нагружения;

б – расчет с учетом снижения текущей прочности контакта при $u > u_p$ – после превышения кумулятивным значением накопленного перемещения величины u_p величина остаточного перемещения за цикл возрастает вплоть до возникновения динамической неустойчивости;

в – расчет с учетом увеличения жесткости при повторных нагружениях – остаточное перемещение снижается при каждом следующем цикле нагружения;

г – расчетная зависимость кумулятивного перемещения для одного из вариантов расчета

при повторных нагружениях). В этой связи порогом эффективного сейсмического воздействия скорее всего является амплитуда, превышающая уровень микросейсмического фона в соответствующем диапазоне частот. В процессе деформирования разломов и трещин происходит конкуренция процессов разупрочнения и залечивания. Воздействие низкочастотных сейсмических колебаний может оказаться эффективным механизмом изменения флюидодинамического режима разломной зоны и, как следствие, локального перераспределения порового давления [Кочарян, 2016].

В ИДГ РАН проводились высокоточные наблюдения за режимом деформирования естественных и техногенных нарушений сплошности [Адушкин и др., 1999; Адушкин и др., 2009; Кочарян, 2016] и др. Деформационные измерения выполнялись на обнажениях во фрагментах зон нескольких тектонических разломов в Прибайкалье: Тункинского, Главного Саянского, Ангарского надвига. Прецизионные долговременные наблюдения проводились в штольне сейсмостанции Талая в Слюдянском районе Иркутской области, здании Трапезной Сергиевской церкви Свято-Троицкой Сергиевой Лавры, административном здании Лебединского ГОКа. В верхней смотровой галерее бетонной плотины Братской ГЭС, Коршуновском железнодорожном тоннеле и подземной выработке Кировского рудника ОАО «Апатит» и т.д.

Амплитуды остаточных перемещений берегов нарушений сплошности ΔW , зарегистрированные на нескольких объектах при однократном динамическом воздействии с максимальной амплитудой скорости смещения V_m , приведены на рис. 4 значками. Линией на рисунке показана регрессионная зависимость:

$$\Delta W = 3.2 \cdot V_m^{1.06}. \quad (4)$$

Можно видеть, что сейсмические колебания с амплитудой, различающейся на 1–2 порядка, инициируют близкие остаточные эффекты, что объясняется различным уровнем статических напряжений в окрестности нарушений сплошности. В то же время, как видно из соотношения (4), тренд функции $\Delta W(V_m)$ демонстрирует пропорциональность амплитуде колебаний.

Интересно сопоставить полученные результаты с данными, регистрируемыми в другой тектонической обстановке при крупномасштабном сейсмическом воздействии. На рис. 4, в дополнение к нашим результатам, приведены данные измерений крипа, инициированного землетрясением Hector Mine 1999 г. $M = 7.1$ на разломах Imperial Valley (224–226 км от эпицентра), Superstition Hills (188–196 км от эпицентра), южной части зоны Сан-Андреас (107–139 км). Можно видеть, что данные по разломным зонам Калифорнии лежат несколько выше зависимости (4), что можно, вероятно, объяснить близостью этих разломов к метастабильному состоянию [Кочарян, 2016].

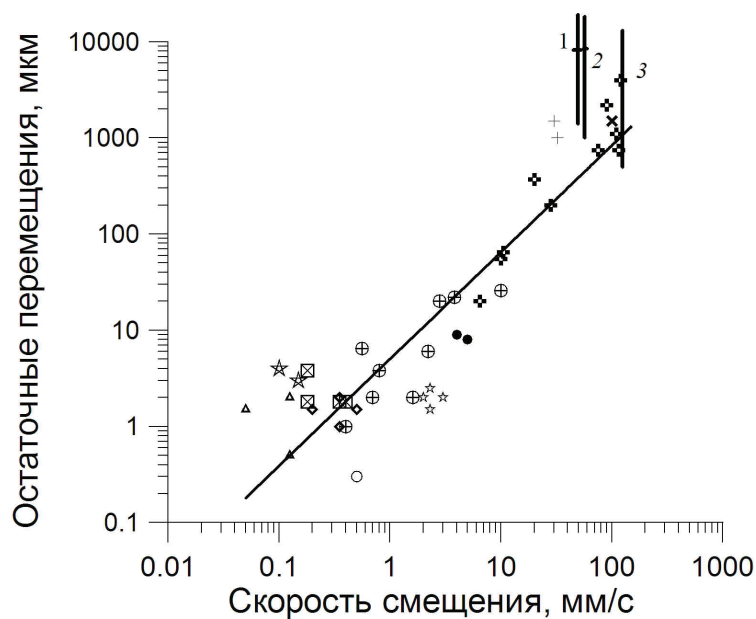


Рис. 4. Зависимость остаточных перемещений, зарегистрированных на нарушениях сплошности, от величины максимальной скорости смещения в сейсмической волне [Кочарян, 2016].

Значки – результаты измерений на различных природных и инженерных объектах. Кресты, обозначенные цифрами 1, 2, 3 – результаты измерения крипа, инициированного землетрясением Hector Mine 1999г. $M = 7.1$ на разломах Калифорнии: 1 – разлом Imperial Valley, 2 – Superstition Hills, 3 – San Andreas. Размер креста показывает разброс данных

Важнейшей является установленная закономерность соответствия знака остаточных деформаций, связанных с динамическим воздействием, знаку квазистатических перемещений бортов нарушения сплошности [Адушкин и др., 2009]. Этим объясняется то обстоятельство, что, несмотря на постоянно действующие динамические нагрузки, инженерные сооружения, как правило, остаются устойчивыми. Поскольку температурные, приливные и другие низкочастотные деформации носят обычно знакопеременный характер, кумулятивное значение накопленных деформаций обычно не достигает критической величины. Совершенно иная картина может наблюдаться на таких объектах, где имеет место направленный деформационный тренд, в том числе на активных разломах или, например, склонах, где направленная деформация может обеспечиваться гравитационными или тектоническими силами. В этом случае воздействие слабыми колебаниями приводит к накоплению остаточных перемещений одного знака, что может существенно увеличить скорость деформации [Кочарян, 2016].

Изменение гидравлических свойств подземных коллекторов при воздействии сейсмических колебаний было исследовано в лабораторных экспериментах [Кочарян и др., 2007], зарегистрировано при прямом воздействии многократных взрывов газовой смеси в скважине [Костюченко и др., 2004], а также сейсмических колебаний от удаленных землетрясений на массив в полевых условиях [Кочарян и др., 2010; 2011]. Была предложена модель, описывающая наблюдаемые эффекты, основанная на возможном разрушении сейсмическими колебаниями коллоидных пленок, заполняющих отдельные участки трещин, что приводит к перераспределению порового давления и изменению эффективных напряжений в локальных областях трещиноватого коллектора или разломной зоны [Кочарян, 2016].

Краткосрочный прогноз деформационных событий

М. А. Садовский с соавторами впервые обратили внимание на наличие низкочастотного ряда собственных частот в массиве блочной структуры [Садовский и др., 1988]. Они отметили, что «...существует некоторое количество разномасштабных блоков, отделенных от «соседей» относительно податливыми прослойками (разломами или трещинами), что позволяет им совершать свободные колебания при внешнем воздействии». Если добротность такой колебательной системы оказывается не слишком низкой, то эти собственные частоты колебаний «свободных», по терминологии [Садовский и др., 1988], блоков должны обнаруживать себя в спектре наблюдаемых сейсмических шумов.

В работе [Кочарян, Кабыченко, 2003] была предложена оценка частотного диапазона колебаний «свободных» блоков. Простейшая аналогия такой колебательной системы – колебания массы M на пружине жесткостью K . Соответствующая собственная частота:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}}. \quad (5)$$

Используя простую схему, в которой блок размером $L \times L \times L$ колеблется на прослойке – разломе и полагая, что жесткость прослойки k не зависит от амплитуды деформаций (хотя это предположение на самом деле не выполняется [Костюченко и др., 2002; Кочарян и др., 2006]), было предложено выражение для приближенных оценок:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k \cdot L^2}{\rho \cdot L^3}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{\rho \cdot L}}. \quad (6)$$

Оценка характерных частот этого ряда может быть выполнена на основе результатов измерений жесткости трещин и разломов разных иерархических уровней (см. рис. 2) и [Кочарян, 2016]. Расчеты показывают, что для блоков размером в десятки километров характерные периоды колебаний составляют десятки секунд [Кочарян и др., 2018].

Разработка сейсмического метода оценки динамической жесткости разломов и трещин позволила установить факт изменения этой характеристики в зависимости от вариаций напряженного состояния среды [Кочарян и др., 2004]. Если при переходе очаговой зоны в метастабильное состояние сдвиговая жесткость разлома уменьшается, то характерные собственные частоты, которые могут быть обнаружены в спектре сейсмического шума, должны заметно снижаться.

Возможность реализации описанного сценария проверялась в лабораторных экспериментах. В экспериментах [Кочарян и др., 2018; Kocharyan et al., 2018] было продемонстрировано снижение величины спектрального центроида спектра шума непосредственно перед эпизодами прерывистого скольжения (рис. 5).

В работе [Беседина и др., 2020] было проведено исследование параметров микросейсмического фона в окрестности Чилийской зоны субдукции с целью обнаружения колебаний системы блок-разлом, аналогичных тем, которые были идентифицированы при обработке результатов лабораторного

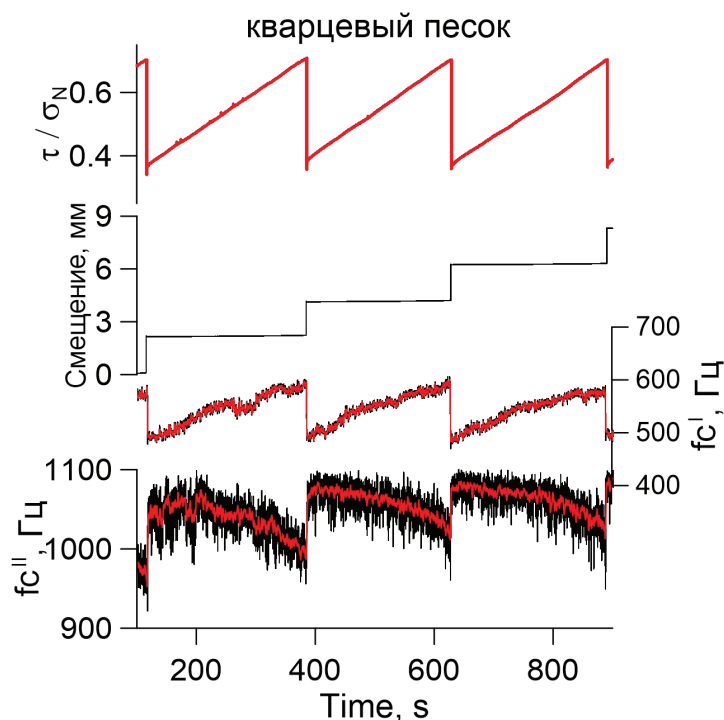


Рис. 5. Временные изменения параметров динамической системы лабораторного разлома. Сверху вниз: трение, смещение блоков и спектральный центроид микросейсмического шума в диапазонах частот 400–650 Гц и 750–1250 Гц [Kocharyan et al., 2018]

эксперимента. Перед тремя рассмотренными мега-землетрясениями, приуроченными к Чилийской зоне субдукции, выявлен эффект смещения величины спектрального центроида и проанализированы пространственно-временные закономерности его проявления. Выявлено, что перед землетрясениями с $M_w \geq 8$ наблюдается понижение рассчитанного значения спектрального центроида на 0.12–0.26 Гц. Длительность снижения величины спектрального центроида в диапазоне 0.008–0.45 Гц может достигать 2 суток. Предложенный подход может оказаться новым полезным инструментом для мониторинга активных разломов разного масштаба в режиме реального времени.

Мониторинг слабой техногенной сейсмичности

Как подчеркивал М. А. Садовский, «Тектоническая жизнь среды не может не включать слабые землетрясения. Слабые землетрясения – необходимое звено сейсмического режима, и даваемая ими информация о сейсмическом режиме по своей значимости намного выше их доли в энергии режима» [Садовский и др., 1987].

В работах сотрудников ИДГ РАН значительное внимание уделялось исследованию свойств сейсмического шума и очаговых параметров землетрясений малых магнитуд [Кишкина, Спивак, 2003; 2010; Беседина и др., 2013]. Весьма перспективным направлением является развитие методов определения фрикционных свойств зон скольжения по очаговым параметрам отдельных индуцированных микросейсмических событий [Беседина и др., 2020; 2021], и характеристикам сейсмоакустического шума, источники которого локализованы в зоне разлома [Морозова, Остапчук, 2022]. Регистрируя волновые формы микрособытий, в том числе наведенных горными работами, можно статистически оценивать величину приведенной сейсмической энергии (отношение величины излученной источником энергии к скалярному сейсмическому моменту) и скорости распространения разрыва. Основываясь на этом параметре, можно судить о вероятности реализации накопленной в массиве упругой энергии в виде динамических событий.

На рис. 6 в качестве примера приведены данные о скоростях распространения разрывов для Коробковского месторождения КМА и одного из Хибинских месторождений [Adushkin et al., 2024]. Для месторождения КМА скорость разрыва составляет $(0.008–0.5)C_s$ со средним значением $0.16C_s$ для трещин сдвига и $0.09C_s$ для трещин отрыва. Эти значения скорее соответствуют так называемым «медленным» землетрясениям. Для месторождения апатит-нефелиновых руд V_r составляет $(0.36–0.8)C_s$, что приближается к диапазону значений для «нормальных» землетрясений. Анализ очаговых параметров слабой сейсмичности может дать важную дополнительную информацию о склонности участка к динамическим подвижкам по разломам и крупным тектоническим трещинам.

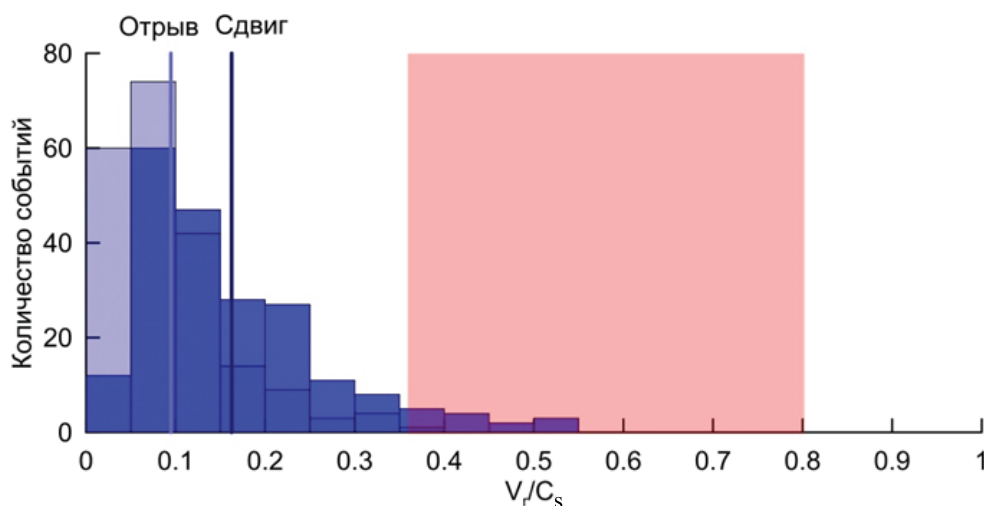


Рис. 6. Гистограмма скорости распространения разрыва для КМА: синяя – в предположении, что все события являются сдвиговыми событиями, голубая – что все события являются отрывными трещинами. Вертикальными линиями показаны средние значения скорости: для отрывной трещины $V_r/C_s = 0.09$, для сдвиговой трещины $V_r/C_s = 0.16$. Область значения скорости V_r/C_s для месторождения Хибинского массива показана красной заливкой [Адушкин и др., 2024]

Исследование условий возникновения медленных, пока слабо изученных, переходных режимов деформирования разломов представляет большой интерес как с точки зрения совершенствования фундаментальных представлений о механике очага землетрясений, так и при разработке научного направления, связанного с исследованиями возможности искусственной трансформации напряженно-деформированного состояния локальных участков массива горных пород. Некоторые авторы надеются снизить потенциальную угрозу именно путем изменения режима скольжения по разлому [Мирзоев и др., 2009; Ружич и др., 2022].

Анализ записей шума с применением новых методов обработки позволяет использовать для прогноза развития деформационных процессов в разломных зонах, и информацию, полученную от «анонимных» источников в зоне разлома. Детальное исследование акустических колебаний, сопровождающих разные режимы скольжения лабораторного разлома, выявило наличие различающихся по форме и амплитуде семейств акустических импульсов. Статистические свойства некоторых из них весьма чувствительны к изменению напряженно-деформированного состояния. Обнаруженные закономерности позволяют предположить, что завершающую стадию подготовки динамического события можно выявить при анализе формы, спектра и статистических характеристик регистрируемых сейсмоакустических сигналов [Ostapchuk et al., 2021; Морозова, Остапчук, 2022].

Заключение

Ретроспективный анализ некоторых публикаций М. А. Садовского показывает, что в работах, посвященных проблемам деформирования геофизической среды и сейсмичности, были предвосхищены

многие направления, которые получили интенсивное развитие в российской, да и в мировой науке, начиная со второй половины 90-х годов. Наверное, неверным было бы считать, что в течение 30 лет после кончины Михаила Александровича исследователи непосредственно руководствовались его идеями, однако, оглядываясь назад, видишь, что многие «новейшие» подходы и результаты в том или ином виде были предсказаны в его работах.

Одним из приоритетных направлений деятельности Института динамики геосфер РАН, который носит имя академика М. А. Садовского, является *геомеханика блочных структур и разломов земной коры, очагов динамических событий; триггерные эффекты в геосистемах; техногенная сейсмичность; подземная флюидодинамика и т.д.* (<https://idg.ras.ru/scientific-activity/>). В настоящей статье мы попытались проследить, как идеи М. А. Садовского получают развитие в трудах ученых и специалистов Института. Хотя выделенные в статье подразделы (блочно-иерархическая модель, деформационные свойства разломов, накопление малых возмущений, краткосрочный прогноз деформационных событий, мониторинг слабой техногенной сейсмичности) в достаточной мере условны, в совокупности они ясно демонстрируют особую роль разломных зон в эволюции деформационных процессов в земной коре. Понимание этой роли открывает новые возможности в решении фундаментальных и прикладных задач физики твердой Земли.

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 22-17-00204).

Список литературы

- Адушкин 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 // Доклады Академии наук. 2009. Т. 426. № 1. С. 98–100. <https://elibrary.ru/kavssr>.
- Адушкин В.В., Кочарян Г.Г., Родионов В.Н. О воздействии сейсмических колебаний малой амплитуды на инженерные сооружения // Докл. РАН. 1999. Т. 369. № 5. С. 816–817.
- Бенедик А.Л., Иванов А.В., Кочарян Г.Г. Построение структурных моделей участков земной коры на разном иерархическом уровне // ФТПРПИ. 1995. № 5. С. 31–42.
- Беседина А.Н., Кабыченко Н.В., Кочарян Г.Г. Особенности сейсмического мониторинга слабых динамических событий в массиве горных пород // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2013. № 5. С. 20–36. <https://elibrary.ru/rfskvx>.
- Беседина А.Н., Кишкина С.Б., Кочарян Г.Г. Параметры источников роя микросейсмических событий, инициированных взрывом на Коробковском железорудном месторождении // Физика Земли. 2021. № 3. С. 63–81.
- Беседина А.Н., Кишкина С.Б., Кочарян Г.Г., Ряховский И.А. Анализ микросейсмического фона до и после сильных землетрясений на примере Чилийской зоны субдукции // Физика Земли. 2020. № 2. С. 10–20.
- Иванов Б.А. Численное моделирование формы ударных кратеров с учетом аномального динамического разупрочнения // Физика Земли. 2021. № 5. С. 146–154. <https://doi.org/10.31857/S0002333721050094>
- Иванченко Г.Н., Горбунова Э.М. Использование дистанционного зондирования участков земной коры для анализа геодинамической обстановки. М. : ГЕОС. 2015. – 112 с. <https://elibrary.ru/wfybcp>
- Кишкина С.Б., Спивак А.А. Проявление резонансных свойств земной коры в микросейсмических колебаниях // Доклады Академии наук. 2003. Т. 392. № 4. С. 543–545. <https://elibrary.ru/oplwwf>.
- Кишкина С.Б., Спивак А.А. Микросейсмический шум севера европейской части России по результатам сейсмической регистрации в г. Воркуте // Вулканология и сейсмология. 2010. № 4. С. 69–80.
- Костюченко В.Н. О прохождении сейсмических волн через массив трещиноватых горных пород // Докл. АН СССР. 1985. Т. 285. № 2. С. 45–48.
- Костюченко В.Н., Кочарян Г.Г., Павлов Д.В. Деформационные характеристики межблоковых промежутков различного масштаба // Физ. мезомех. 2002. Т. 5. № 5. С. 23–42. <https://elibrary.ru/kwoseb>.
- Костюченко В.Н., Кочарян Г.Г., Бенедик А.Л., Будков А.М., Кабыченко Н.В., Павлов Д.В., Перник Л.М., Свинцов И.С. Опыт воздействия на трещиноватый коллектор низкоамплитудными сейсмическими колебаниями // Геоэкология. 2004. № 4. С. 367–377. <https://elibrary.ru/opmgwf>.

- Кочарян Г.Г. Геомеханика разломов. М. : ГЕОС. 2016. – 424 с. <https://elibrary.ru/yvwlrv>
- Кочарян Г.Г., Виноградов Е.А., Горбунова Э.М. Изменение флюидодинамического режима подземных коллекторов под действием сейсмических колебаний. Часть 1. Анализ результатов наблюдений // Динамические процессы в геосферах: Сб. научных трудов ИДГ РАН. М. : ГЕОС. 2010. С. 70–79.
- Кочарян Г.Г., Виноградов Е.А., Горбунова Э.М., Марков В.К., Марков Д.В., Перник Л.М. Гидрогеологический отклик подземных коллекторов на сейсмические колебания // Физика Земли. 2011. № 12. С. 50–62.
- Кочарян Г.Г., Кабыченко Н.В. Проявление блоковых движений в длиннопериодном сейсмическом фоне // Геофизические процессы в нижних и верхних оболочках Земли. Книга 1. 2003. С. 98–107.
- Кочарян Г.Г., Кулюкин А.А., Павлов Д.В. Роль нелинейных эффектов в механике накопления малых возмущений // Физическая мезомеханика. 2006. Т. 9. № 1. С. 5–14. <https://elibrary.ru/ijgipn>.
- Кочарян Г.Г., Костюченко В.Н., Павлов Д.В. Иницирование деформационных процессов в земной коре слабыми возмущениями // Физическая мезомеханика. 2004. Т. 7. № 1. С. 5–22. <https://elibrary.ru/ikzyxj>
- Кочарян Г.Г., Марков В.К., Марков Д.В. Исследование закономерностей процесса накопления макродеформаций в массиве блочной структуры под действием сейсмических колебаний // Нестационарные процессы в верхних и нижних оболочках Земли. М. : ИДГ РАН. 2002. С. 130–140.
- Кочарян Г.Г., Марков В.К., Марков Д.В., Перник Л.М. О механизме вариаций флюидодинамического режима подземных коллекторов под действием слабых возмущений // Физические поля и динамика взаимодействующих геосфер: Сборник научных трудов ИДГ РАН. М. : ГЕОС. 2007. С. 56–65.
- Кочарян Г.Г., Остапчук А.А., Павлов Д.В., Будков А.М. О перспективе обнаружения процесса подготовки землетрясения в спектре сейсмического шума. Лабораторный эксперимент // Физика Земли. 2018. № 6. С. 117–128. <https://doi.org/10.1134/S0002333718060066>
- Кочарян Г.Г., Родионов В.Н. О природе тектонических сил // Докл. АН СССР. 1988. Т. 302. № 2. С. 304–305.
- Кочарян Г.Г., Спивак А.А. Динамика деформирования блочных массивов горных пород. М. : ИКЦ «Академкнига», 2003. – 423 с.
- 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.
- Морозова К.Г., Остапчук А.А. Связь состояния сдвиговой трещины в гранулированном материале и акустоэмиссионных и деформационных данных // Акустический журнал. 2022. Т. 68. № 5. С. 543–549.
- Родионов В.Н. Очерк геомеханики. М. : Научный Мир. 1996. – 64 с.
- Родионов В.Н., Сизов И.А., Цветков В.М. Основы геомеханики. М. : Недра. 1986. – 301 с.
- Родионов В.Н., Шемякин Е.И. Горное производство: фундаментальные проблемы сохранения среды обитания // Вестник АН СССР. 1990. № 2.
- Ружич В.В., Вахромеев А.Г., Сверкунов С.А., Иванишин В.М., Акчурин Р.Х., Левина Е.А. Изучение, прогноз и управляемое снижение сейсмической опасности в выявленных сегментах магистральных разломов циклическими закачками в них жидкости через глубокие многозабойные наклонно направленные скважины // Геодинамика и тектонофизика. 2022. Т. 13. № 3. <http://doi.org/10.5800/GT-2022-13-3-0637>
- Садовский М.А. Прикладная сейсмология последних десятилетий века // Физика Земли. 1992. № 2. С. 10.
- Садовский М.А., Абасов М.Т., Николаев А.В. Перспективы вибрационного воздействия на нефтяную залежь с целью повышения нефтеотдачи // Вестник АН СССР. 1986. № 9. с. 95–99.
- Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. М. : Наука. 1987. – 100 с.
- Садовский М.А., Костюченко В.Н. О затухании сейсмических волн взрыва в массиве горных пород // ДАН СССР. 1988. Т. 301. № 6.
- Садовский М.А., Кочарян Г.Г., Родионов В.Н. О механике блочного горного массива // ДАН СССР. 1988. Т. 302. № 2. С. 306–307.
- Садовский М.А., Писаренко В.Ф., Родионов В.Н. От сейсмологии к геомеханике // Вестник АН СССР. 1983. № 1.
- Садовский М.А., Мирзоев К.М., Негматуллаев С.Х., Саломов И.Г. Влияние механических микроколебаний на характер пластических деформаций материалов // Физика земли. 1981. № 5. С. 32–42.
- Садовский М.А., Шамина О.Г., Стопинский З. Изменение физических свойств горных пород под влиянием ультразвуковых вибраций // Доклады Академии наук СССР. 1989. Т. 309. № 6. С. 1340
- Adushkin V.V., Besedina A.N., Kocharyan G.G., Semenova I.E., Zhukova S.A., Zhuravleva O.G. A New Approach to

Hazard Control of Human-Triggered Earthquakes near Mining Facilities // Doklady Earth Sciences. 2024. Vol. 519 (Part 1). P. 1930–1935. <https://doi.org/10.1134/S1028334X24603213>.

Ivanov B.A., Artemieva N.A. Numerical modeling of the formation of large impact craters. In: Koeberl C., MacLeod K. (eds.) Catastrophic Events and Mass Extinctions: Impact and Beyond, Geological Society of America Special Papers 356. 2002. P. 619–630. GSA, Boulder, Colorado. <https://doi.org/10.1130/SPE356>

Ivanov B.A., Koctuchenko V.N. Block oscillation model for impact crater collapse: 28th Annual Lunar and Planetary Science Conference (March 17–21, 1997, Houston). TX. P. 631.

Kocharyan G.G., Ostapchuk A.A., Pavlov D.V. Traces of laboratory earthquake nucleation in the spectrum of ambient noise // Sci. Rep. 2018. V. 8. P. 10764. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-28976-9>

Ostapchuk A., Morozova K., Markov V., Pavlov D., Popov M. Acoustic emission reveals multiple slip modes on a frictional fault // Frontiers in Earth Science. 2021. T. 9. C. 657487. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.657487>

EVOLUTION OF THE CONCEPT OF HIERARCHICAL BLOCK STRUCTURE OF THE EARTH'S CRUST IN THE WORKS OF THE IDG RAS

© 2024 G. G. Kocharyan*

Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**E-mail: kocharyan.gg@idg.ras.ru*

The article attempts to trace the evolution of some basic provisions of the model of the geophysical medium by M. A. Sadovsky in the works of the employees of the IDG RAS. Rich experimental material accumulated over many years of participating in nuclear weapons tests served as a foundation for developing the dynamics of rock mass deformation at different hierarchical levels. It is shown that many modern approaches and current results anyway were predicted in the works of M. A. Sadovsky. The key role of fault zones in the evolution of deformation processes in the Earth's crust is demonstrated. The development of a new scientific school «Geomechanics of Faults» opens up new possibilities in solving fundamental and applied problems in the physics of the solid Earth.

Keywords: seismicity, earthquake, structural block, fault, rock failure.