

УДК 550.334

НЕКОТОРЫЕ ПРИЧИНЫ НЕТОЧНОСТЕЙ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ С УЧЕТОМ ЛАБОРАТОРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

© 2021 г. Член-корреспондент РАН Г. А. Соболев^{1,*}

Поступило 27.08.2021 г.

После доработки 03.09.2021 г.

Принято к публикации 09.09.2021 г.

Выполнены серии опытов на модели землетрясения типа stick-slip, состоящей из двух блоков гранита, находящихся в условиях двухосного сжатия. Регистрировались механические напряжения, деформации и акустическая эмиссия. Модель подвергалась калиброванным механическим воздействиям. Обнаружены стадии экспоненциального ускорения движений на контакте, но это свойство не было универсальным. Энергия воздействий была на три порядка меньше накопленной моделью энергии, что указывало на триггерный механизм вызова скольжений на контакте. Если после воздействий возникали небольшие подвижки на контакте, то это уменьшало накопленную моделью энергию. Но если после какого-то воздействия происходила большая подвижка, то ее энергия была даже больше по сравнению с подвижками без воздействий. Эксперименты выявили неоднозначность уменьшения опасности землетрясений при воздействиях упругими импульсами.

Ключевые слова: лабораторное моделирование, динамическая подвижка, прогноз землетрясений

DOI: 10.31857/S2686739721120124

Предпринятые с конца XX века многочисленные попытки ученых разных стран разработать методы краткосрочного прогноза землетрясений не привели к успехам. Время от времени в научной литературе появлялись публикации о выявлении за несколько дней до опасного сейсмического события разнообразных предвестников. Однако публикации об успешных прогнозах появлялись ретроспективно, т.е. уже после прошедшего землетрясения. Под краткосрочным прогнозом обычно понимается интервал в несколько суток, поскольку за этот срок можно провести некоторые мероприятия для уменьшения числа жертв, вплоть до эвакуации населения из опасного района.

Главным методическим подходом обоснования краткосрочного прогноза был и остается поиск отклонений разнообразных геофизических полей от долговременного фона. Спектр исследований включает сейсмические волны и сейсмический шум, деформации земной коры, электросопротивление, магнитные свойства горных массивов, флуктуации подземных вод, эманиации радона и разнообразных газов, изменения

свойств ионосферы и другие свойства. Общим недостатком такого подхода является отсутствие доказательств о генетической связи аномальных изменений этих полей с процессом в очаге готовящегося землетрясения. В подавляющем количестве случаев интерпретируемые как предвестники землетрясения аномалии порождены флуктуациями геофизических полей разного происхождения и их взаимодействием. В результате прогностические алгоритмы дают большое количество ложных тревог, не позволяющих осуществлять краткосрочный прогноз на практике. Надо признать малую эффективность такого подхода.

По нашему мнению, одной из главных целей прогностических исследований должен быть поиск физических связей между явлением, интерпретируемым как предвестник, и очагом будущего землетрясения. Необходимым шагом является обнаружение в сейсмоактивном районе области будущего большого сейсмического события. Назовем эту область широко применяемым в науке и технике термином — метастабильная. Важным ее свойством является возможность перехода в неустойчивое состояние при добавочном энергетическом воздействии E_m . В свою очередь находящаяся в неустойчивом состоянии среда переходит в новое качество при добавочном воздействии $E_n \ll E_m$. В нашем случае это реализуется

¹ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта
Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: sobolev@ifz.ru

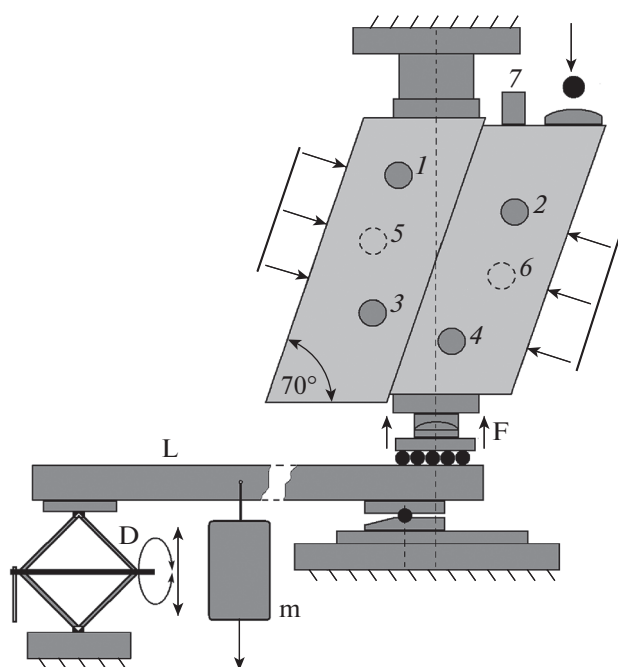


Рис. 1. Схема экспериментального устройства. А, А – два соприкасающихся гранитных блока, F – вертикальная нагрузка, D – металлический домкрат, m – груз, пьезодатчики: 1–4 – на лицевой, 5–6 – противоположной, 7 – верхней гранях. Стрелкой и черным шариком обозначено место удара.

превращением условно сплошной горной среды в разрушенную – разрыв при землетрясении.

Возникает вопрос, как осуществлять поиск метастабильной сейсмоопасной области. Можно предположить, что она включает районы разного размера, находящиеся на различном уровне близости к неустойчивости. Это открывает перспективу получения ее отклика на внешнее воздействие, например, в форме регистрации возникающих в такой области сейсмических импульсов. Для слежения за динамикой процесса во времени нужно, чтобы внешние сигналы повторялись. Возможным направлением поисков может быть изучение реакции на магнитные бури [1, 2]. Хорошим периодическим источником являются земные приливы, но их наибольшие по величине сигналы лежат в полосе 12 и 24 ч с длиной упругих волн в тысячи км. Не ясно, насколько эффективно можно будет следить за откликом из очага на сейсмических частотах с длинами волн в несколько км.

Допустим, что метастабильная область найдена. Позволяет ли слежение за ее эволюцией осуществить с требуемой точностью и надежностью прогноз грядущего землетрясения?

Рассмотрим пример из лабораторных экспериментов. В работе [3] были выполнены серии опытов на модели землетрясения типа stick-slip

[4], состоящей из двух блоков гранита, находящихся в условиях двухосного сжатия (рис. 1). Размеры модели по высоте – 242 мм, по толщине – 90 мм; основания каждого из блоков по горизонтали – 102.5 мм. Вертикальная нагрузка F в начале эксперимента составляла 74 кН и постепенно возрастала при повторяющихся подвижках вследствие поочередного разрушения зацеплений повышенной прочности на контакте блоков. Нагружение проводилось рычажным прессом L, к которому был подвешен груз m. Длинный конец рычага опирался на металлический домкрат D. Это увеличивало жесткость системы, позволяя получать большое количество последовательных подвижек разной величины.

Нагружающая вертикальная сила F сначала возрастала с постоянной скоростью. Нагружение останавливалось на последовательно возрастающей величине F и через 5 с проводился удар падающим шариком, вызывавший во многих случаях динамическую подвижку на контакте. Возникшие упругие колебания – “микроземлетрясения” (мкз) регистрировались восемью акустическими датчиками и вычислялись координаты их источников. Удалось получить 142 мкз в течение 4 мес без разгрузки модели.

На рис. 2 показаны изменения вертикальных усилий F и перемещений D во время развития трех последовательных динамических подвижек, сопровождавшихся генерацией мкз. Субгоризонтальные участки на графике F демонстрируют стадии метастабильности; их начальные вертикальные значения приравнены на данном рисунке к “0”. В интервале времени 227–290 с была добавлена нагрузка dF, повышающая стадию метастабильности до стадии неустойчивости. Удар шариком вызвал динамическую подвижку на контакте, длившуюся 2 с. Аналогичным образом были осуществлены следующие подвижки. Существенное отличие проявлено на рис. 3. Там в интервале 511–557 с добавочная нагрузка и удар (красная стрелка) не вызвали динамическую подвижку, соизмеримой с другими амплитуды. Она произошла после следующего нагружения и удара в интервале 813–842 с.

Большое количество аналогичных опытов позволило выявить некоторые закономерности. Здесь надо отметить, что при всех отличиях модельных опытов от естественной ситуации моделирование имеет, по крайней мере, одно преимущество. Там можно повторять опыты при одних и тех же контролируемых внешних условиях. В описываемых экспериментах схема нагружения не менялась, энергия ударов от падающих на модель датчиков была одной и той же, а сейсмограммы возникавших при ударах колебаний, типа показанной на рис. 2, демонстрировали высокую воспроизводимость по амплитуде и частотам.

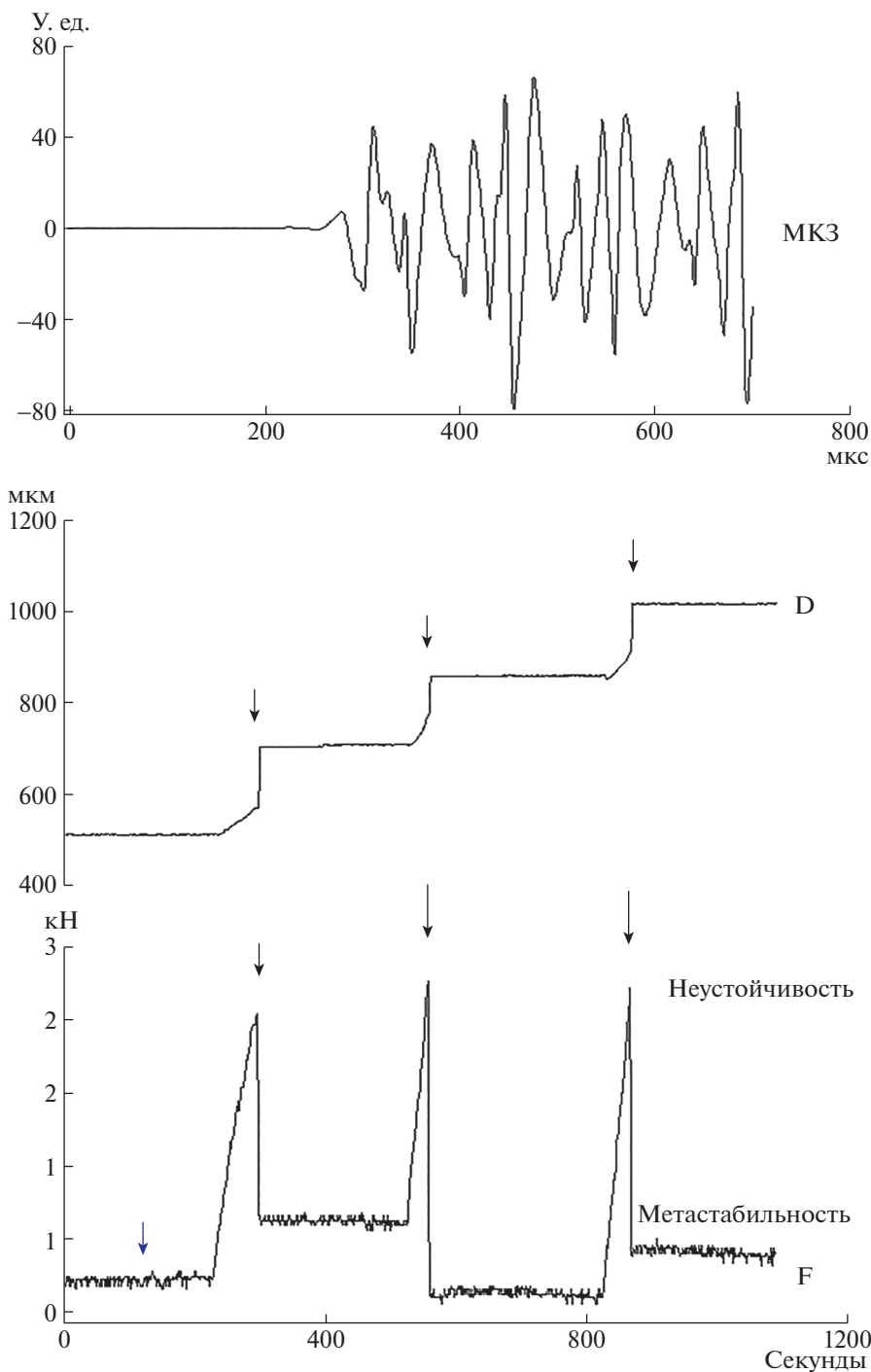


Рис. 2. Изменения нагрузки F и перемещения D берегов контакта блоков при ударах (стрелки).

Энергия ударов шариком была на 3–4 порядка меньше по сравнению с энергией, накопленной моделью и высвобождавшейся во время подвижки. Поэтому мы можем квалифицировать удары как триггеры, инициирующие возникновение ответных явлений большей мощности.

В рамках поставленных в данной статье вопросов прогнозирования землетрясений и на основе

всех проведенных опытов выделим следующие результаты. 1) Энергии триггеров было недостаточно, чтобы инициировать микроземлетрясения на стадии метастабильности. Это продемонстрировано на рис. 2, где показано время удара (первая стрелка, 114 с). 2) В единичных случаях применение триггера не срабатывало и на стадии неустойчивости (красные стрелки на рис. 3), где

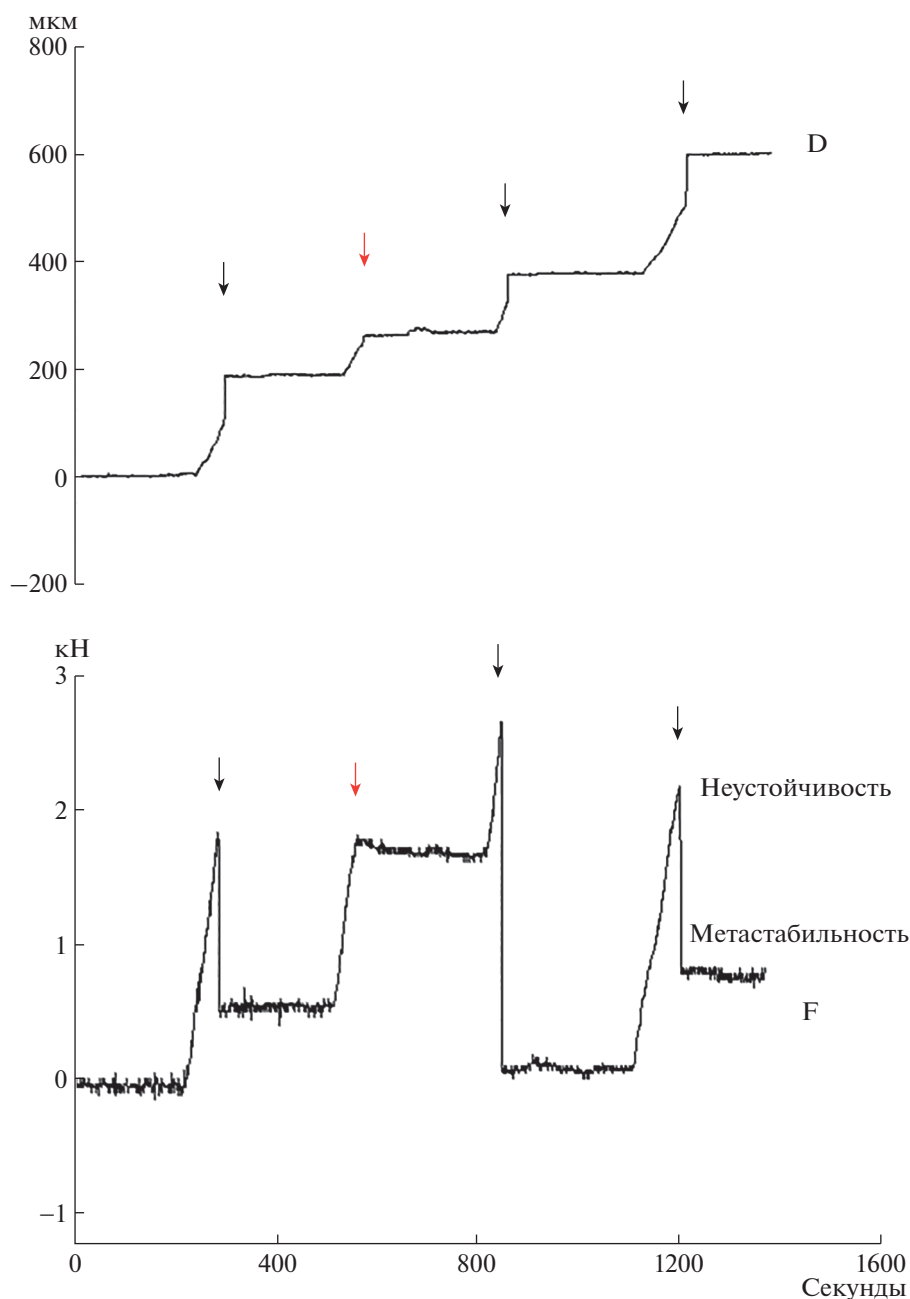


Рис. 3. Изменения нагрузки F и перемещения D берегов контакта блоков при ударах (стрелки).

динамические подвижки возникали регулярно. 3) Отмечен разброс величины уменьшения нагрузки F и приращения подвижки D в разных опытах при соизмеримых уровнях F. 4) В результате анализа осциллограмм было установлено, что координаты зарождения подвижек перемещались по плоскости контакта. Это связано с влиянием находящихся на контакте зацеплений разной прочности, определяющих место зарождения и динамику развития неустойчивой подвижки.

Следующие факторы следует особо выделить, имея в виду высокие требования к точности и на-

дежности краткосрочного прогноза землетрясений. Этапы осуществления прогноза включают учет сейсмического затишья, сейсмической активации и триггерной активности [5]. Последняя входит в стадию краткосрочного прогноза. Порог эффективности триггера уменьшается по мере приближения нагрузки к предельной [6]. Из вышеописанных результатов моделирования следует, что триггеры одной и той же энергии могут вызывать или не вызывать ожидаемое микроземлетрясение в зависимости от уровня метастабильности (неустойчивости) исследуемой среды. Это означает

неизбежность ложных тревог и пропусков цели. Эти факторы определяют только вероятностное осуществление прогноза, что ограничивает его практическое использование. Наличие в сейсмоактивном районе одновременно нескольких потенциально опасных разломов еще более усложняет задачу надежного прогноза. Тем не менее, судя по результатам моделирования, изучение реакции среды на триггеры методически целесообразно для выявления областей метастабильности и слежения за их эволюцией в целях оценки прогностической ситуации.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках Госзадания ИФЗ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sobolev G.A., Zakrzhevskaya N.A., Migunov I.N., Sobolev D.G., Boiko A.N.* Effect of Magnetic Storms on Low-Frequency Seismic Noise // *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 2020. V. 56. № 3. P. 291–315.
2. *Соболев Г.А.* Возникновение берегового эффекта тектонических деформаций вследствие магнитной бури // *ДАН. Науки о Земле*. 2020. Т. 495. № 1. С. 48–52.
3. *Соболев Г.А., Пономарев А.В., Майбук Ю.Я.* Иницирование неустойчивых подвижек — микроземлетрясений упругими импульсами // *Физика Земли*. 2016. № 5. С. 51–69.
4. *Brace W.F., Byerlee J.D.* Stick-slip as Mechanism for Earthquakes // *Science*. 1966. V. 153. № 3739. P. 62–64, 990–992.
5. *Sobolev G.A.* Seismicity Dynamics and Earthquake Predictability // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2011. V. 11. P. 445–458. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-445-2011.5>
6. *Авагимов А.А., Зейгарник В.А.* Оценка энергии триггерного воздействия в процессе разрушения модельного образца // *Физика Земли*. 2008. № 1. С. 77–80.

SOME REASONS OF INACCURACY OF SHORT-TERM EARTHQUAKE PREDICTION TAKING INTO ACCOUNT LABORATORY EXPERIMENTS

Corresponding Member of the RAS **G. A. Sobolev**^{a, #}

^a *Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

[#] *E-mail: sobolev@ifz.ru*

A series of laboratory experiments have been carried out with a model of two granite blocks under biaxial compression loading. The mechanical stresses, strains, and acoustic emission were recorded. The model was subjected to calibrated mechanical impacts. The stages of exponential speeding-up of the relative motion of the sides of the block contact were observed. This feature was not universal. The energy of the impacts was by three orders of magnitude lower than the energy accumulated by the model, which points to the triggering mechanism of slip initiation. The series of strokes resulting in the small displacements partially reduced the accumulated energy and prevented the emergence of large motions. If after a series of such blows a large sliding event still occurred, its energy was higher than in the slips unrelated to the impacts. The experiments revealed the difficulties in solving the problem of earthquake hazard reduction by elastic impacts.

Keywords: laboratory modeling, dynamic slip, earthquake prediction