

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Остапчука Алексея Андреевича

«Режимы межблокового скольжения: условия формирования и трансформации», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.10 «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых»

Диссертационная работа А.А.Остапчука посвящена исследованию на основе физических экспериментов (лабораторных и природных) закономерностей реализации различных режимов межблокового скольжения и разработке модели их возникновения в приложении к проблеме сейсмичности разломных зон.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, приложения, списка литературы и содержит 135 страниц текста, 70 рисунков. Рисунки отличного качества и по необходимости они выполнены в цвете, что существенно улучшает восприятие материала. Список литературы насчитывает 170 наименований (список не пронумерован). Диссертация написана в хорошем стиле понятным языком.

Введение диссертации состоит из 6 стр., и в нем представлены рубрики, в которых согласно требованиям ВАК обсуждаются вопросы актуальности работы, цели и задачи, новизна, вклад автора и другие важные показатели научной работы. Здесь представлено пять защищаемых положений. Защищаемые положения удовлетворяют требованиям ВАК по новизне и обоснованности фактическим материалом. По теме диссертации опубликовано 33 работы, из которых 15 в рецензируемых журналах. В журналах из списка ВАК опубликовано 9 работ. Различные разделы диссертации докладывались на российских и международных конференциях.

**Первая глава диссертации** посвящена анализу общих закономерностей разломных зон по геологическим, геофизическим и сейсмологическим данным. Дается представление о характерах сейсмических режимов земной коры и способах разрядки напряжений в разломных зонах. Отмечается, что одним из основных элементов, характеризующих разломы, является не только их протяженность и глубина проникновения в земную кору, но и ширина. На основе обзора работ дается характеристика состояния пород разлома и их изменения по мере удаления от его осевой части. В диссертации при описании разлома используется понятие «зона влияния» (damage zone). Ее ширина связывается с областью повышенной трещиноватости или областью наибольших вариаций геофизических полей. В работе не указано, как эта зона соотносится с введенным в работах иркутских тектонофизиков понятием «зона динамического влияния разлома». В обзоре упоминается

также переходная зона, характеризующаяся наличием измененных минералов (alteration zone), и центральная – ядерная часть (fault core). По результатам обзора построен ряд обобщающих графиков, связывающих ширину зоны влияния и амплитуду смещения по разлому. Главным из выводов (общее число 3) к первой главе является положение о невыполнении условия подобия для разломов разного линейного ранга с наличием переходной области для длин 500-1000 м. Этот вывод составил первое защищаемое положение диссертации.

**Во второй главе диссертации** представлены результаты лабораторных экспериментальных исследований А.А. Остапчука на установке типа stick-slip (прерывистое скольжение). Здесь приведены сведения по параметрам установки, моделирующей геологический разлом в виде зоны сочленения между двумя гранитными блоками. В работе эта зона именуется "межблоковый контакт". Он имеет разное наполнение: песок, гранитная крошка, стеклянные шарики и др. Описание материалов наполнителя дано в таблицах Приложения. Исследуется закономерность реализации сдвигового смещения верхнего гранитного блока относительно нижнего при создании двух типов нагрузки: 1) вертикальной – прижимной (0.002-0.2 МПа), определяющей силу трения; 2) горизонтальной – сдвиговой, действующей через растягиваемую пружину (жесткость пружины  $1 \cdot 10^4$  до  $4 \cdot 10^5$  Н/м). Скорость натяжения пружины от  $8 \cdot 10^{-8}$  до  $2 \cdot 10^{-5}$  м/с (6.9-1700 мм/сутки). Точность измерения смещения блока 0.1 и 1 мкм. Диапазон сдвиговых напряжений в период реализации механизма прерывистого скольжения составлял 0.07-0.08 МПа, что отвечает коэффициенту трения 0.35-0.4, усредненного вдоль всей поверхности контакта.

Изучались скорости сдвиговых смещений и характер их проявления для различных типов материалов, заполняющих МБК, а также влияние на процесс сдвигания увлажнения заполнителя МБК и вибрации. Отдельное место в главе занимает эксперимент, проведенный на природном объекте совместно с В.В.Ружичем.

В выводах по главе (общее число 7) следует отметить: 1) создание лабораторной экспериментальной установки воспроизведения различных режимов межблокового скольжения; 2) установлено, что на заключительном этапе подготовки динамического срыва жесткость трещины радикально снижается, что является надежным индикатором перехода контакта в метастабильное состояние и может быть обнаружено сейсмическими методами; 3) показано, что небольшие вариации вещественного состава, которые слабо сказываются на эффективной прочности разлома, могут приводить к существенному изменению его сдвиговой жесткости, достаточному для смены режима скольжения и значительному изменению доли энергии, излучаемой в виде сейсмических волн; внешнее

низкоамплитудное вибрационное воздействие при развитом stick-slip режиме способно снизить амплитуды отдельных динамических событий, но кумулятивная величина излученной энергии остается неизменной.

**В третьей главе диссертации** представлены результаты исследования природных деформаций разломов, формирующихся в естественных условиях. Исследования выполнялись в период с 2010 по 2015 гг совместно с ИЗК СО РАН в зоне Ангарского надвига (на дневной поверхности и в штольне сейсмостанции Талая) и Приморского разлома с использованием деформографов длиной 30-60 см. В главе дается описание приборов и детально излагается методика измерений и наблюдаемые закономерности деформирования локальных участков разломов. Основным выводом главы является заключение, что в зависимости от напряженно-деформированного состояния и факторов, инициирующих межблоковые движения, интегральный режим деформирования определяется разными локальными областями межблокового контакта, которые имеют различную жесткость. Т.е. фактически признается наличие неоднородности напряженного состояния вдоль малых участков трещин, для которых наблюдаются эпизоды сдвигов.

**Четвертая глава диссертации** посвящена разработке геомеханической модели формирования различных режимов межблокового скольжения на основе данных, полученных в ходе выполнения диссертационных исследований. Начинается глава с выдвигания пяти положений новой модели возникновения и трансформации режимов скольжения по разломам, которые в следующих разделах обосновываются и обсуждаются. Эти положения связываются со сдвиговой жесткостью разлома и горного массива, главный из которых состоит в том, что вероятным механизмом сейсмического события является вариация сдвиговой жесткости отдельных участков разломной зоны в результате иного по сравнению с соседними участками или другими разломами вещественного состава зоны магистрального сместителя, сублитостатического уровня порового давления флюида, ряда других механических, геологических и геохимических процессов.

**Новизна** диссертации в большей части опирается на результаты, представленные во второй главе, и относится к лабораторному эксперименту по исследованию режимов скольжения для спектра различных материалов, заполняющих зону между гранитными блоками. Полученные здесь результаты позволяют понять причины возникновения разных режимов межблоковых скольжений. Определенные элементы новизны относятся и к изучению деформаций природных разломов, представленных в третьей главе. Эта глава важна и для понимания взаимосвязи лабораторного эксперимента с реальным природным явлением. Существенно новыми также являются результаты анализа, сделанные на основе

обзора работ других авторов по природной сейсмичности (первое защищаемое положение), и теоретический анализ результатов собственных исследований, представленный в четвертой главе, на основе которого разработана геомеханическая модель процесса межблокового скольжения.

**Замечания и комментарии оппонента.** У оппонента практически нет замечаний по работе. Отмечу только неполноту подписи к рисунку 1.5 (нет разъяснения различий графиков а, б, в). Также хотелось бы большей четкости в употреблении терминов межблоковое скольжение, межблоковый контакт и др. В геологии имеется термин разлом, который, конечно же, не подходит при описании результатов лабораторного моделирования нарушения сплошности. Но в диссертации иногда термин «... межблоковое ...» употребляется и для природных разломов. Приведу примеры: «открытию новых режимов межблоковых тектонических движений» (стр. 18) - привычнее звучит: ... режимов тектонических движений по разлому; «инициирования межблоковых перемещений приливными деформациями, удаленными землетрясениями и взрывами» (стр. 94) - более привычно – инициирование разрывных смещений..... На мой взгляд, там, где уже есть устоявшиеся термины, новые термины необходимо вводить очень деликатно.

На мой взгляд, положения геомеханической модели формирования различных режимов межблокового скольжения прописаны недостаточно четко и фактически только словесно. Так, для важнейшего наблюдения (второй вывод четвертой главы) "одним из вероятных механизмов, который в широких пределах регулирует долю энергии, излучаемой в результате подвижки по нарушению сплошности земной коры, является вариация сдвиговой жесткости отдельных участков разломной зоны " не дано объяснения его практического приложения. Имеется лишь уточнение, что эти вариации связываются с вещественным составом зоны магистрального сместителя, с сублитостатическим уровнем порового давления флюида, ряда других механических, геологических и геохимических процессов.

У оппонента есть одно принципиальное соображение, которое даже не следует рассматривать как замечание, т.к. оно относится не только к данной работе, но и ко всем экспериментальным работам в области изучения закономерности формирования очага землетрясения.

После работ Дж.Байерли стал в целом понятен механизм периодичности сейсмических событий в сейсмогенных разломных зонах (прерывистое скольжение). Конечно, важны детали этого процесса, влияние на него свойств разломной зоны и способов нагружения. Но нас на самом деле интересует не просто механизм

возникновения сейсмического события, а почему в сейсмогенном разломе, периодически генерирующем среднесильные и слабые землетрясения (см. рис. 2.4, б), вдруг возникает аномально большое – катастрофическое землетрясение. Вероятно, моделью такого явления можно рассматривать рис. 2.7, где на фоне высоко периодических дрожаний натяжения нагрузочной пружины (ультра мелкомасштабные сдвиги внутри межблоковой зоны) имеются пики, отвечающие акту прерывистого скольжения.

В работе особое место отводится параметрам жесткости межблоковой зоны: вариация сдвиговой жесткости отдельных участков разломной зоны является одним из наиболее вероятных механизмов, регулирующих долю энергии, излучаемой при землетрясении (четвертое защищаемое положение); режим деформирования определяется мезоструктурой центральной части разлома и особенностями контактного взаимодействия геоматериала в областях концентрации напряжений (пятое защищаемое положение). Как эти заключения можно связать с землетрясениями магнитудой более 8.0 (линейный размер более 100-150 км)? Что, вся эта область в 100 км являлась концентратором напряжений (и о каких напряжениях идет речь) и аномальной жесткости разлома, она – источник специфических низкочастотных колебаний, наблюдавшихся А.А.Любушиным для природных катастрофических землетрясений (стр. 53), которые в диссертации предлагается связывать с зонами изменения жесткости разломов? Ответа на эти вопросы оппонент в работе не увидел.

В настоящее время имеются данные о закономерности распределения напряжений (девиаторных и эффективного давления) в области подготовки катастрофических землетрясений [Ребецкий, Маринин, 2006]. Они позволяют утверждать, что главным элементом сейсмоопасности является неоднородность напряженного состояния вдоль зоны сейсмогенного разлома. Важную роль в генезисе катастрофических землетрясений играют участки с низкими фрикционными свойствами разлома (низким уровнем сил трения), которые в поле напряжений выглядят как участки пониженного эффективного давления. Именно линейный размер этих областей и отвечает за будущий размер очага землетрясения. Также важную роль играют участки резкой неоднородности напряжений – зоны градиента напряжений (девиаторных и эффективного давления). Эти участки составляют небольшую часть от очага землетрясения (менее 10%) и являются зонами, откуда начинает распространяться сейсмогенный разрыв, т.е. место, где маленькая трещина может превратиться в громадный разрыв. При этом активизирующийся разрыв (зона внутриразломного скольжения) распространяется не в область высокой концентрации сдвиговых напряжений, где высок и уровень обжимного всестороннего давления (здесь будет наблюдаться другой режим разломного скольжения – крип или

среднесильная сейсмичность), а в область разлома с низким уровнем всестороннего давления, где существует и низкий уровень сил трения. Другой вариант формирования катастрофического землетрясения природа продемонстрировала для Японии (2011). Здесь практически вся область реализованного очага землетрясения Тохоку являлась зоной градиента напряжений, который был направлен вкост сейсмофокальной области [Ребецкий, Полец, 2014].

На самом деле, в цитированных выше двух защищаемых положениях как раз и говорится о неоднородности сдвиговой жесткости (напряжений) разломов, определяющей ее сейсмоопасность. Но, на мой взгляд, эти положения требуют от АА. Остапчука дополнительного осмысления и привлечения указанных мною природных данных по катастрофическим землетрясениям. Надеюсь, мои комментарии будут учтены АА.Остапчуком в своих дальнейших исследованиях.

В целом, диссертационная работа А.А.Остапчука является завершенным исследованием, оформленным в соответствии с требованием ВАК и выполненным на высоком научном уровне. Приведенные в работе результаты следует определить как новые, обоснованные и имеющие практическое и научное значение. Диссертация написана грамотно, на хорошем русском языке, аккуратно оформлена и иллюстрирована качественным графическим материалом. В своей диссертации А.А.Остапчук продемонстрировал высокий уровень знания специальных вопросов сейсмологии, геофизики и геомеханики, а также свое умение использовать эти знания для решения конкретных научных проблем.

В автореферате диссертации в достаточной для понимания форме изложено содержание всех глав диссертации.

Работа отвечает требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, а ее автор А.А.Остапчук заслуживает присуждения ему степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.10 «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых».



Доктор физико-математических наук,  
заведующий лабораторией 204 ИФЗ  
РАН Ю.Л.Ребецкий

Дата

Подпись

Почтовый адрес: 123242, г.Москва, Б.Грузинская ул., д.10, стр. 1; e-mail: reb@ifz.ru;  
телефон:84992549350

Название организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН)  
Должность: Заведующий лабораторией фундаментальных и прикладных проблем  
тектонофизики ИФЗ РАН, доктор физико-математических наук по специальности 25.00.10  
– «геофизика, геофизические методы поиска полезных ископаемых».

---

Я, Ребецкий Юрий Леонидович, согласен на включение моих персональных  
данных в документы связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую  
обработку.



(подпись)