



На правах рукописи

Рожин Петр Николаевич

**ГЕНЕРАЦИЯ СКОЛОВ РИДЕЛЯ R и R'
И ИХ СВЯЗЬ С ЦУНАМИГЕННЫМИ
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ**

Специальность **25.00.03** – геотектоника и геодинамика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Москва 2013

Работа выполнена на кафедре динамической геологии
геологического факультета Московского государственного университета
имени М.В. Ломоносова

Научный руководитель:

Доктор геолого-минералогических наук,
заведующий Лабораторией тектонофизики и геотектоники
им. В. В. Белоусова

Гончаров Михаил Адрианович

Официальные оппоненты:

Доктор геолого-минералогических наук

Разницин Юрий Николаевич,

ведущий научный сотрудник Геологического института РАН

Доктор геолого-минералогических наук

Корженков Андрей Михайлович,

главный научный сотрудник Института Физики Земли РАН

Ведущая организация:

Институт земной коры Сибирского отделения РАН (г. Иркутск)

Защита состоится 29 ноября 2013 г. в 16 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 501.001.39 при Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова по адресу: 119234, Москва, Ленинские горы, МГУ, сектор А, геологический факультет, аудитория 415.

С диссертацией можно ознакомиться в читальном зале Научной библиотеки Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, в Отделе диссертаций Фундаментальной библиотеки по адресу: Ломоносовский проспект, 27.

Автореферат разослан 28 октября 2013г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор геол.-мин. наук,



профессор А.Г. Рябухин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В многочисленных экспериментах по воспроизведению обстановки сдвига в одних случаях вначале формируются сколы Риделя двух типов, соответственно, R и R' . Однако по мере дальнейшего сдвигания довольно скоро начинают резко преобладать R -сколы. В других случаях сколы R' не возникают вовсе. В природе сколы R' также встречаются крайне редко. В то же время чередующиеся по времени своего проявления полого падающие и круто падающие сейсмические очаги на материковом склоне островной дуги могут быть трактованы как сколы Риделя, соответственно, R и R' . Эти сколы, в отличие от экспериментальных данных и данных натуральных наблюдений, *равноправны* и формируются в геодинамической обстановке сдвига вдоль полого наклоненной плоскости субдукции, обусловленного поддвигом океанической плиты. Учитывая сказанное выше о решительном преобладании или единственности при экспериментальном сдвиге сколов R , можно предположить, что для равноправного развития сколов R и R' в зонах субдукции требуется некий дополнительный фактор.

Представляется, что после Суматринского землетрясения 2004 г. и Японского землетрясения 2011 г. проблема поиска принципиальных различий между очагами сильнейших землетрясений, сопровождающихся цунами, и очагами столь же сильных землетрясений, но не генерирующими это катастрофическое явление в океане, является актуальной.

Цель работы и основные задачи исследования: 1) обоснование причины *резкого преобладания* сколов R в различных природных и экспериментальных сдвиговых обстановках; 2) выявление фактора, который обеспечивает *равноправное* развитие в зонах субдукции сколов R и R' , являющихся очагами, соответственно, не-цунамигенных и цунамигенных землетрясений.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Анализ литературы по формированию и эволюции сколов Риделя R и R' в обстановке сдвига.
2. Физическое моделирование формирования и эволюции сколов Риделя R и R' в обстановке сдвига.
3. Численное моделирование этой эволюции для подтверждения природных и экспериментальных данных о преобладании сколов R в обстановке сдвига.
4. Анализ литературы по местоположению и кинематике сильных цунамигенных и не-цунамигенных землетрясений.
5. Анализ литературы, касающейся современных моделей генезиса цунамигенных землетрясений.
6. Привлечение данных сравнительного анализа: 1) эволюции гравитационного поля; 2) GPS – до и после наступления цунами.
7. Объяснение закономерного чередования цунамигенных и не-цунамигенных землетрясений.
8. Формулировка гипотезы образования цунамигенных землетрясений.

Фактический материал и личный вклад автора. В основу диссертационной работы положены результаты физического моделирования формирования и эволюции сколов Риделя R и R' автором и многими другими российскими (Институт земной коры СО РАН, Лаборатория тектонофизики и геотектоники МГУ, Институт физики Земли РАН и др.) и зарубежными исследователями. При постановке экспериментов изучена модель формирования и эволюции сколов Риделя в зоне сдвига, их характеристики и соотношение. Для экспериментов были подобраны эквивалентные материалы со способностью реагировать на нагрузку как пластической, так и разрывной деформацией, безотносительно к их вязкости и прочности. Такими свойствами обладали глина и смесь песка с солидолом.

Также автором с помощью диаграмм Мора было проведено численное моделирование эволюции сколов Риделя в разных условиях – при различной величине литостатического давления и при разных углах скалывания горных пород.

Для подтверждения установленного вероятного фактора, «уравнивающего в правах» сколы R и R' в зонах субдукции, а именно – тенденции к изостатическому равновесию, были самостоятельно отобраны, систематизированы и проанализированы данные, опубликованные в литературе и интерактивных ресурсах. Они включают в себя сведения как об эволюции сколов Риделя как таковых, так и о не-цунамигенных и цунамигенных землетрясениях (очаги которых трактуются автором как сколы Риделя) в некоторых зонах субдукции, данные GPS-наблюдений, а также данные сравнительного анализа эволюции гравитационного поля до и после цунамигенного землетрясения для объяснения его генезиса.

Объекты исследования. Основным объектом исследования, в качестве примера, является Японская островная дуга, вспомогательными – Курило-Камчатская и Алеутская островные дуги. Также привлечена информация о других зонах субдукции (Андской, Зондской).

Научная новизна работы

Проведенное исследование представляет собой новый подход к проблеме соотношения сколов Риделя R и R' в различных природных и экспериментальных обстановках сдвига и особенностях этого соотношения в зонах субдукции, обильных на сильные как не-цунамигенные, так и цунамигенные землетрясения, который заключается в следующем:

1. Проведено численное моделирование формирования и эволюции сколов Риделя R и R' в обстановке сдвига, которое подтвердило природные и экспериментальные (а том числе авторские) данные о резком преобладании сколов R .

2. Предложена гипотеза о том, что цунамигенные землетрясения в зонах субдукции, в которых господствует геодинамическая обстановка поддвига (субгоризонтального сдвига вдоль субгоризонтальной же плоскости), обусловлены, тем не менее, развитием именно субвертикальных мегасколов Риделя R' . В то время как субгоризонтальные сколы R являются очагами хотя и сильных, но не-цунамигенных землетрясений.

3. Рассмотрены данные, свидетельствующие о роли изостатического фактора в формировании очагов цунамигенных землетрясений.

Практическое и теоретическое значение работы. Новый подход к проблеме цунамигенных землетрясений актуален в решении проблемы оценки опасности цунами, прогнозирования этого катастрофического явления и создания систем оповещения, а также для дальнейшего развития представлений о природе и эволюции тектонических и геодинамических процессов в зонах сдвига как вдоль вертикальной, так и вдоль горизонтальной плоскости; частным случае последних являются зоны субдукции.

Защищаемые положения:

1. Подтверждено, посредством *физического* моделирования с применением *различных* эквивалентных материалов, что в обстановке горизонтального сдвига как вдоль вертикальной, так и вдоль горизонтальной плоскости, сколы Риделя R' , в отличие от сколов R , развиты слабо или отсутствуют вовсе, т.е. явно неравноправны.

2. Установлена, посредством *численного* моделирования, причина такого неравноправия при отсутствии влияния силы тяжести (с учетом только литостатического давления) – повышенная скорость вращения сколов R' , в обстановке названного сдвига, по сравнению с почти отсутствующим вращением сколов R в этой обстановке. На глубинах, на которых литостатическое давление превышает половину максимального касательного напряжения, а угол скалывания приближается к 45° , всегда доминируют R -сколы.

3. Геологическим проявлением сколов Риделя R и R' можно считать пологопадающие и крутопадающие очаги, соответственно, сильнейших не-цунамигенных и цунамигенных землетрясений, характерные для зон субдукции и сформированные в геодинамической обстановке субгоризонтального сдвига вдоль субгоризонтальной плоскости, характерной для таких зон. Эти очаги зафиксированы на глубинах, упомянутых в п. 2.

4. Тот факт, что названные очаги равноправны по частоте встречаемости и чередуются по времени своего проявления, противоречит закономерностям, установленным в пп. 1 и 2, и требует привлечения дополнительного фактора для устранения этого противоречия. В качестве вероятного фактора, «уравнивающего в правах» сколы R и R' в зонах субдукции, можно рассматривать тенденцию к изостатическому равновесию, нарушенному процессом субдукции.

Апробация работы. Основные результаты работы были представлены на XL Тектоническом совещании (Москва, 2007); Первой молодежной тектонофизической школе-семинаре (Москва, 2009); VIII Международной школе-семинаре «Физические основы прогнозирования разрушения горных пород» (Санкт-Петербург, 2010); XVII Всероссийской конференции с международным участием «Проблемы сейсмотектоники» (Москва, 2011); Научной конференции «Ломоносовские чтения–2011» (Москва, 2011); Третьей тектонофизической конференции в ИФЗ РАН «Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле» (Москва, 2012); Международной научно-практической

конференции Sworld (Интернет, 2012); Втором Всероссийском симпозиуме с международным участием (Иркутск, 2013).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 16 работ, из них 5 статей в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, 3 глав и заключения. Ее объем составляет 148 страниц, включая 100 иллюстраций, 4 таблицы. Список литературы состоит из 131 наименования, из них 55 иностранных.

Благодарности. Автор выражает особую благодарность своему научному руководителю д.г.-м.н. М.А. Гончарову за постоянную помощь в работе, полезные советы и поддержку на протяжении всех этапов исследования. Автор также признателен Е.А. Рогожину – автору концепции, положенной в основу трактовки диссертантом сильных землетрясений в зонах субдукции как сколов Риделя. Автор выражает благодарность Н.С. Фроловой за предоставленную опорную информацию и советы. Также за обсуждения и ценные советы автор благодарит зав. кафедрой динамической геологии профессора Н.В. Короновского и профессора Е.П. Дубинина

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и решаемые задачи, отмечена научная новизна, практическая и теоретическая значимость работы, сформулированы главные защищаемые положения.

Глава 1. Эволюция сколов Риделя R и R' . В данной главе приведены общие сведения о сколах Риделя и их моделировании в различных условиях.

Терминология и краткая история. Сколы Риделя – это трещины или разрывы скалывания, образующиеся в обстановке сдвига. Они представляют собой систему сопряженных синтетических сколов R и антитетических R' , эшелонировано расположенных в зоне сдвига и возникающих симметрично относительно оси максимального сжатия σ_3 под углом $\leq 45^\circ$ к этой оси (рис. 1).

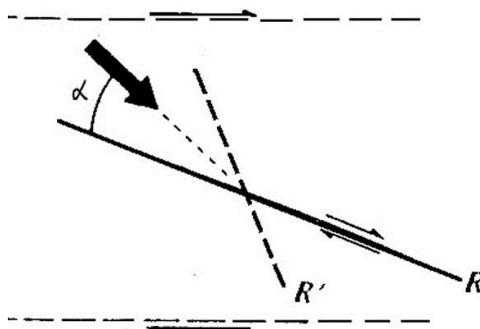


Рис. 1. Ориентировка сколов Риделя R и R' и оси максимального сжатия:

- 1) при правостороннем сдвиге вдоль вертикальной плоскости (вид сверху);
- 2) при надвиге-поддвиге вдоль горизонтальной плоскости (вид в вертикальном разрезе)

Показана хорошая изученность структурообразования в зонах сдвига. Например, сколы R и R' и последующие трещины (P , L , T и др.) были обстоятельно изучены коллективом Лаборатории тектонофизики Института земной коры Сибирского Отделения РАН под руководством д.г.-м.наук, профессора С.И. Шермана (Разломообразование в литосфере. Зоны сдвига / С.И. Шерман, К.Ж. Семинский, С.А. Борняков и др.; Семинский, 2003; Семинский, Гладков, Лунина; Тугарина, 2005; и др.). – как в полевых условиях, так и с применением уникальной экспериментальной установки "Разлом" (рис. 2).

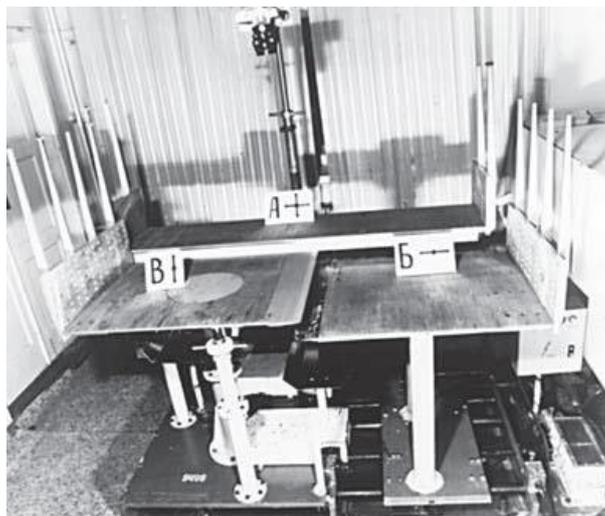


Рис. 2. Установка «Разлом», созданная на Иркутском опытном заводе ИНЦ СО РАН для моделирования процесса формирования разломов при сжатии, сдвиге и растяжении

В дальнейшем изложении автор опирался на подразделение геодинамических обстановок простого сдвига на два основных типа: горизонтального сдвига вдоль вертикальной плоскости («сдвиговая» обстановка в геологическом смысле этого слова, рис. 3, *а*) и горизонтального сдвига вдоль горизонтальной же плоскости («надвиго-поддвиговая» обстановка в геологическом смысле, рис. 3, *б*) [Гончаров и др., 2005].

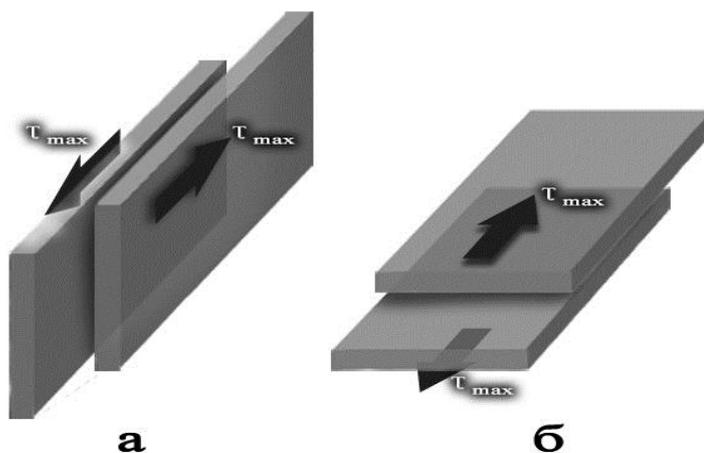


Рис. 3. Геодинамические обстановки:

а – горизонтального сдвига вдоль вертикальной плоскости;

б – горизонтального сдвига вдоль горизонтальной же плоскости.

Физическое моделирование. Описана методика примененного в работе физического моделирования, проведенного в Лаборатории тектонофизики и геотектоники МГУ (рис. 4). Проведен обзор результатов моделирования сколов Риделя R и R' разными исследователями, а также самого автора (поскольку он являлся участником проведения экспериментов). При постановке экспериментов ставилась цель изучить модель формирования и эволюции развития сколов Риделя R и R' в зоне сдвига, их характеристики и соотношение.

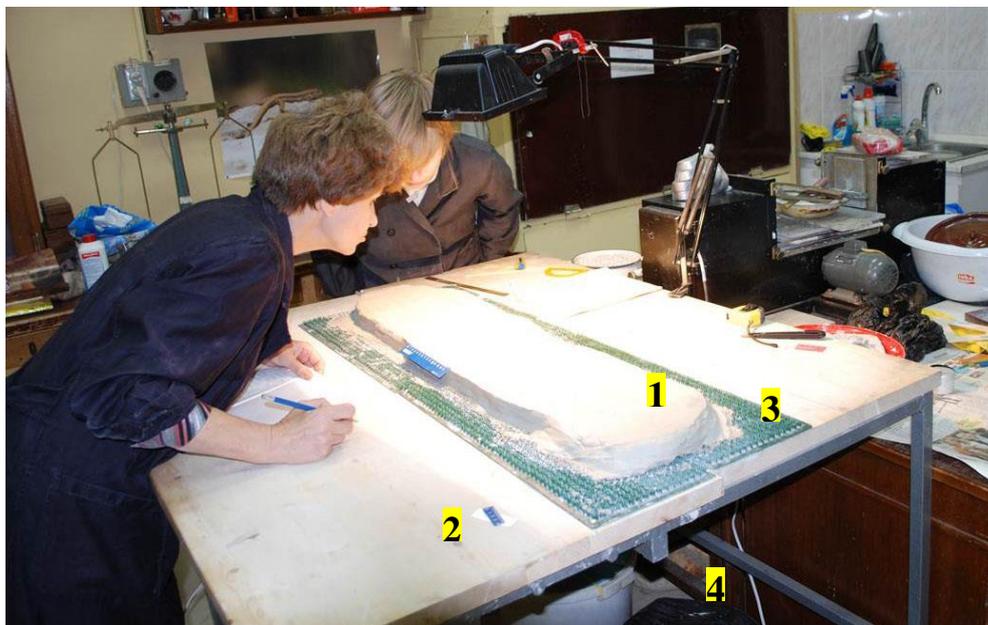


Рис. 4. Экспериментальная установка Лаборатории тектонофизики и геотектоники МГУ:

1 – образец (глина), 2 – деревянная поверхность стола, 3 – подложка для сцепления образца с «фундаментом», 4 – двигатель.

Показаны особенности развития сколов Риделя R и R' на моделях из глины и песка (рис. 5, 6, 7). На моделях из глины оба типа вначале развиваются равноправно, но при дальнейшем сдвигании резко преобладают сколы R . На моделях из песка (более близких к природной, *блочной* среде) сколы R' практически не развиваются, а сколы R возникают лишь при объединении более мелких и ранних кулисообразно расположенных трещин отрыва.

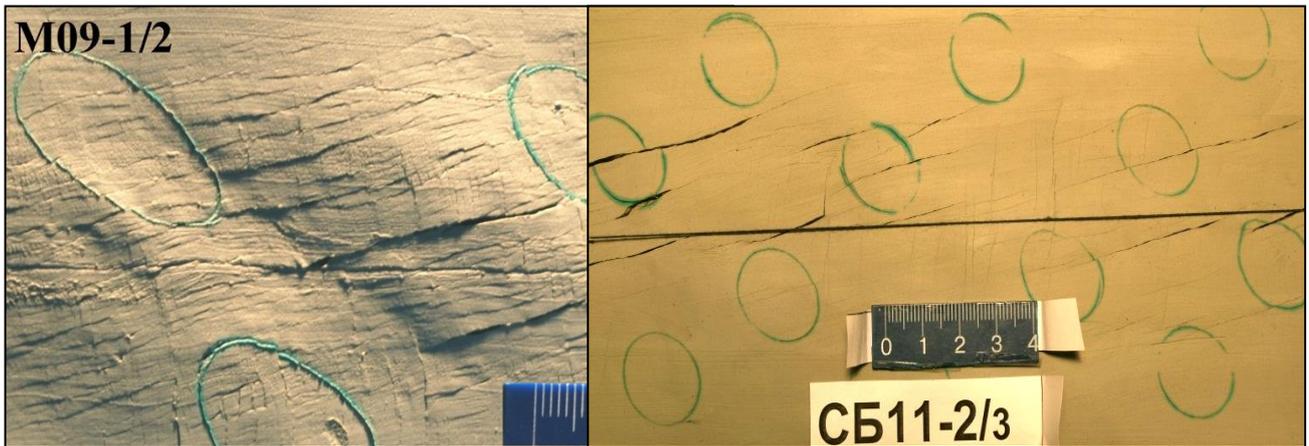


Рис. 5. Опыты на глине в Лаборатории тектонофизики и геотектоники МГУ. Левостороннее сдвигание маркируется эллипсами (первоначальными кругами). Преобладание сколов R , образующих острый угол с направлением сдвига (горизонтальной линией).



Рис. 6. Опыт на песке в Лаборатории тектонофизики и геотектоники МГУ. Преобладание сколов R , образующих острый угол с направлением сдвига.

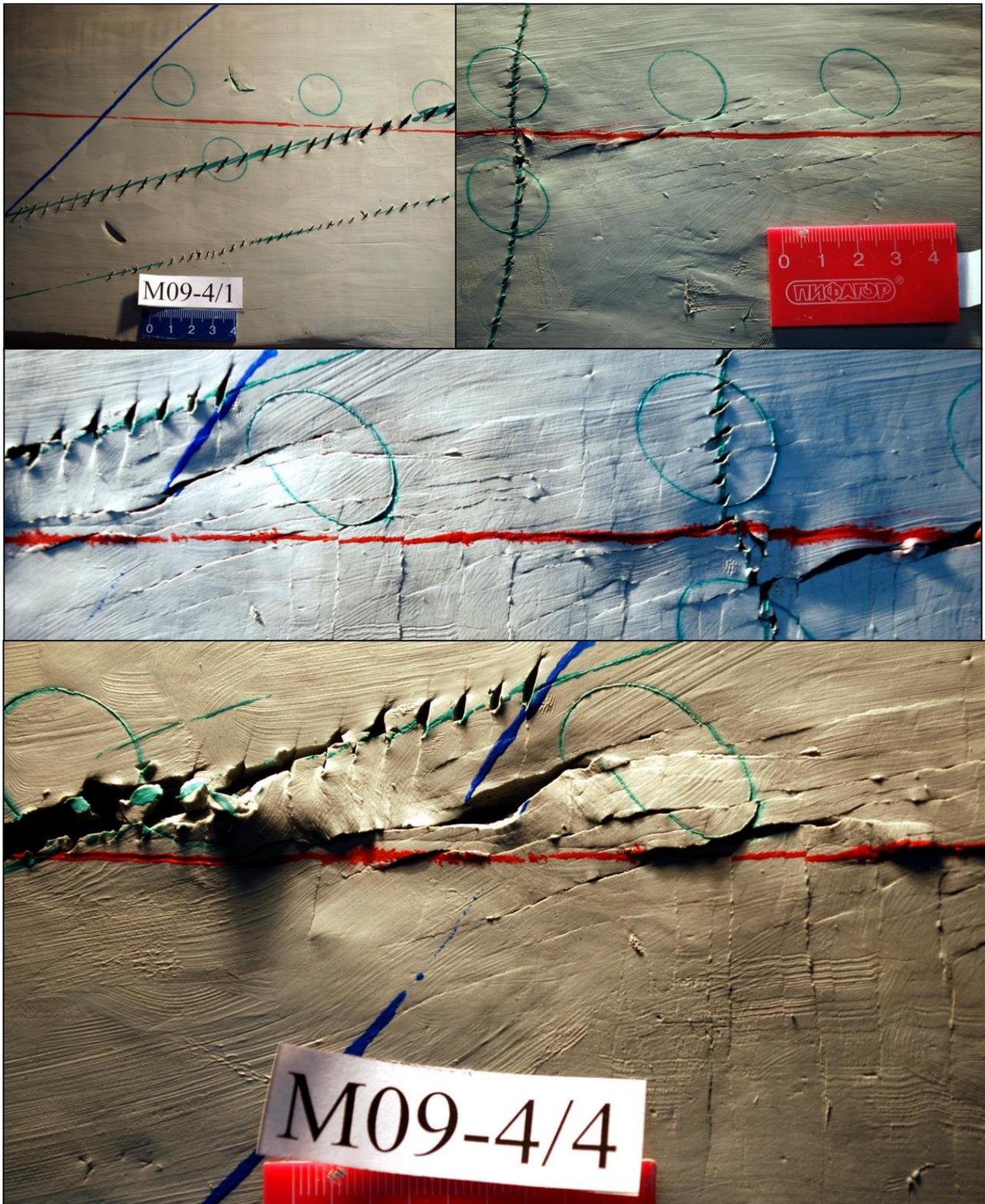


Рис. 7. Опыт на глине с заранее нанесенными трещинами отрыва в Лаборатории тектонофизики и геотектоники МГУ.

Кулисообразно расположенные трещины отрыва были прорезаны до начала эксперимента вдоль трасс будущих сколов R к R' . В процессе последующего левостороннего сдвига параллельно красной линии эти трассы вращаются, а трещины отрыва стремятся к объединению в единую систему скола. В отличие от трасс сколов R' , трассы R -сколов практически не вращаются, что способствует быстрейшему объединению трещин отрыва в единый скол R .

Численное моделирование. С помощью диаграмм Мора проведено численное моделирование эволюции сколов Риделя R и R' в разных условиях – при различной величине литостатического давления и при разных углах скалывания горных пород. Это моделирование основано на следующих положениях.

Оба типа сколов после их возникновения, в процессе последующего сдвига, вращаются в одну и ту же сторону (см. рис. 1). Однако на этом сходство в их эволюции заканчивается.

Сколы R при этом вращении постепенно *увеличивают* свой угол с плоскостью сдвига, параллельной плоскости максимальных касательных напряжений τ_{max} . Одновременно угол нормали к их плоскости с осью максимального растяжения σ_1 *уменьшается*. Это означает, что касательное «сдвигающее» напряжение вдоль их плоскости уменьшается, но одновременно уменьшается и нормальное напряжение, перпендикулярное к этой плоскости, прямо пропорциональное величине трения на этой плоскости и тем самым препятствующее сдвиганию.

Сколы же R' , напротив, постепенно *уменьшают* свой угол с нормалью к плоскости сдвига, параллельной сопряженной плоскости максимальных касательных напряжений τ_{max} . Одновременно угол нормали к их плоскости с осью максимального растяжения σ_1 *увеличивается*. Это означает, что касательное «сдвигающее» напряжение вдоль их плоскости увеличивается, но одновременно увеличивается и нормальное напряжение, перпендикулярное к этой плоскости, прямо пропорциональное величине трения на этой плоскости и тем самым препятствующее сдвиганию. Все это в наглядном виде отображается диаграммой Мора (рис. 8, левый).

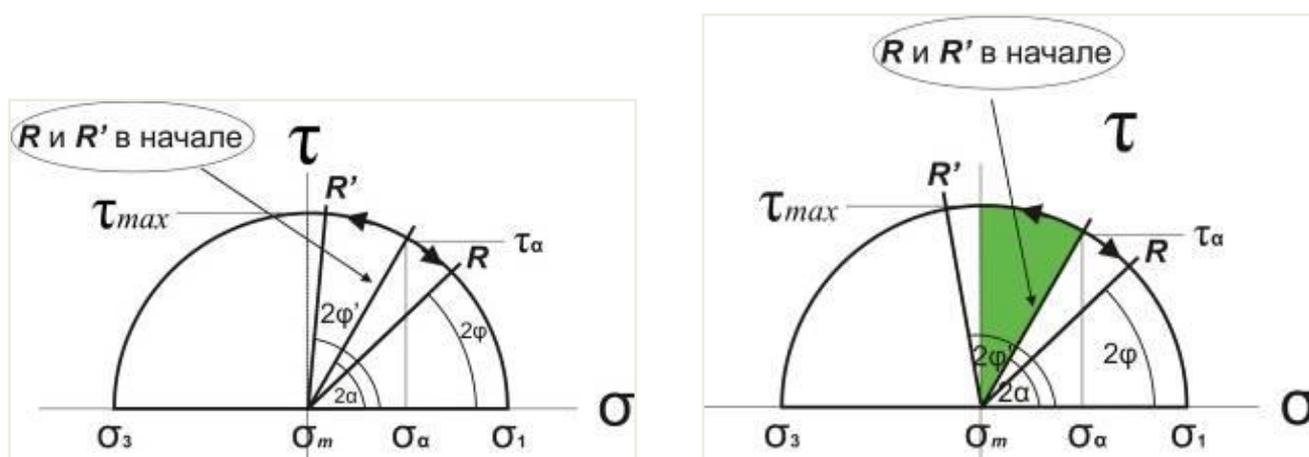


Рис. 8. Эволюция ориентировки сколов R и R' на диаграмме Мора при продолжении сдвига

α – угол скалывания между нормалью к *возникшему* сколу и осью максимального растяжения σ_1 ;

φ – угол между нормалью к *вращающемуся* сколу и той же осью

На диаграмме Мора нормали к сколам вращаются в противоположных направлениях. При определенной величине сдвига сколы R' становятся параллельными плоскости максимальных касательных напряжений τ_{max} .

До этого момента сдвигания сколы R и R' были относительно «равноправны», что подтверждается вышеописанными экспериментами. А вот при дальнейшем сдвигании их «равноправие» нарушается (рис. 8, правый). Если у сколов R сохраняется прежняя тенденция, то у сколов R' постепенно уменьшается «сдвигающее» напряжение и одновременно увеличивается напряжение, пропорциональное величине трения.

На рис. 8 (правый) зеленым цветом обозначен сектор «равноправия» обоих типов сколов. Этот сектор «вырождается» по мере того, как угол скалывания α стремится к своему предельному значению 45° . Такое стремление происходит одновременно с глубиной от поверхности Земли, при нарастающем литостатическом давлении (Гинтов, Исай, 1988). Это и предопределяет неуклонное доминирование сколов R с глубиной. В особенности начиная с тех глубин, на которых литостатическое давление превышает половину максимального касательного напряжения.

Таким образом, получил теоретическое подтверждение давно установленный факт преобладания сколов R над сколами R' в обстановке горизонтального сдвига вдоль вертикальной плоскости.

Глава 2. Цунамигенные и не-цунамигенные землетрясения в зонах субдукции северо-западной части Тихого океана. В главе излагаются результаты анализа очаговых параметров сильных землетрясений северо-западной части Тихого океана, проведенного Е.А. Рогожиным и А.И. Захаровой [2006]. Данными авторами выявлены два типа очагов сильных землетрясений в зонах субдукции – внутриплитного и межплитного типов, которые возникают в одних и тех же местах материкового склона примерно в одинаковых количествах, периодически сменяя друг друга во времени (см. ниже рис. 10). Исследование этих авторов показало, что высокие волны цунами возникают в основном в связи с сильными землетрясениями внутриплитного типа, очаги которых имеют взбросовый характер. Межплитные, хотя и сильные, сейсмические события порождают либо небольшое цунами, либо не сопровождаются волнами цунами вовсе. Эти результаты явились *отправной точкой* следующего этапа данного исследования и более подробно описаны в следующей главе.

Рассмотрено сейсмотектоническое положение очагов сильнейших землетрясений в Курило-Камчатской, Японской и Алеутской островных дугах.

В качестве примечательных сейсмических событий Курило-Камчатской островной дуги в главе были рассмотрены Шикотанское землетрясение 1994 г. на Южных Курилах и Кроноцкое землетрясение 1997 г. на Восточной Камчатке. Очаг цунамигенного Шикотанского землетрясения представляет собой взброс, в то время как в очаге не-цунамигенного Кроноцкого землетрясения фиксируется поддвиг.

Японское землетрясение 2011 г. в Японской островной дуге и землетрясение 1 апреля 1946 г. в архипелаге Лисьих островов в Алеутской островной дуге сопровождались разрушительным цунами, и вместе с этим в очагах обоих землетрясений интерпретируется крутой взброс, сместитель которого имеет падение в сторону океана.

Данное рассмотрение подтвердило состоятельность упомянутой сеймотектонической модели Е.А. Рогожина и А.И. Захаровой.

Глава 3. Мегасколы Риделя R' как возможная причина формирования очагов цунамигенных землетрясений. В главе рассмотрены существующие в настоящее время модели образования цунамигенных землетрясений. Автор счел целесообразным рассмотреть отдельно некоторые модели отечественных исследователей и зарубежных.

К отечественным моделям относятся «клавишная» модель Л.И. Лобковского и упомянутая выше сеймотектоническая модель Е.А. Рогожина и А.И. Захаровой.

«Клавишная» модель Л.И. Лобковского [1988] не объясняет непосредственно образование цунамигенных землетрясений, однако автор решил ее включить, поскольку она является популярной моделью возникновения сильнейших землетрясений (в том числе цунамигенных) в зоне субдукции. Суть ее состоит в следующем. Островная дуга зоны поддвига литосферных плит разбита крутыми поперечными разломами на мелкие микроблоки протяженностью 100–200 км – «клавиши». При поддвиге клавиши верхней плиты поджимаются за счет трения и неоднородностей поверхности поддвигаемой плиты. При катастрофических землетрясениях не плита скачкообразно поддвигается под дугу, а, наоборот, соответствующий сейсмогенный блок смещается в сторону океана (рис. 9). Эта модель хорошо объясняет постепенное разрастание по простиранию сейсмогенного разлома при Суматринском землетрясении 2004 года. Однако в этой модели основное движение – горизонтальное, и остается непонятным, почему такое движение в одних случаях сопровождается цунами, а в других случаях «обходится» без него.

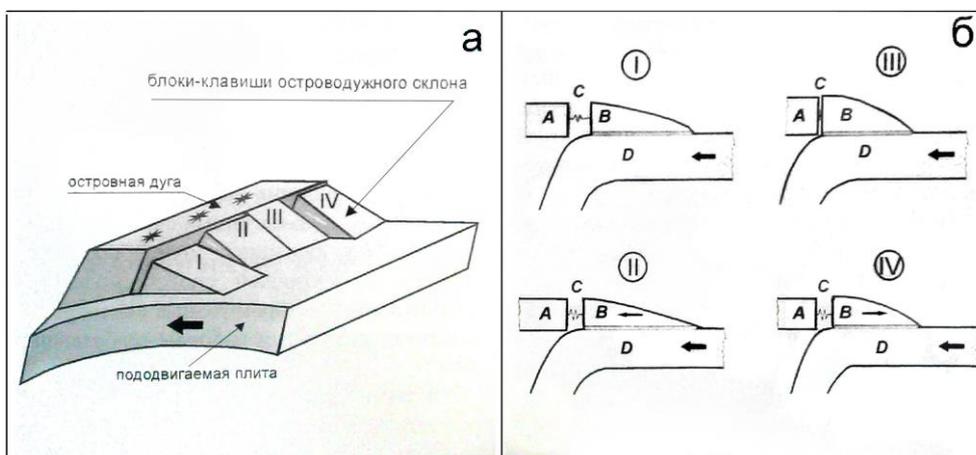


Рис. 9. Клавишная модель блоковой структуры фронтальной части островной дуги и взаимодействия ее основных элементов с поддвигаемой плитой и друг с другом, по [Лобковский, 1988; Лобковский и др., 2004]

Сеймотектоническая модель Е.А. Рогожина и А.И. Захаровой. В этой модели уже имеется четкое разделение по генезису не-цунамигенных и цунамигенных землетрясений. Результаты анализа очаговых параметров сильных землетрясений северо-западной части Тихого океана и анализа сеймотектонического положения очагов некоторых сильнейших землетрясений рассматриваемого региона, проведенного Е.А. Рогожиным и А.И. Захаровой [2006], привели упомянутых авторов к созданию сеймотектонической модели возникновения цунамигенных и не-цунамигенных сейсмических очагов, отраженной на рис. 10).

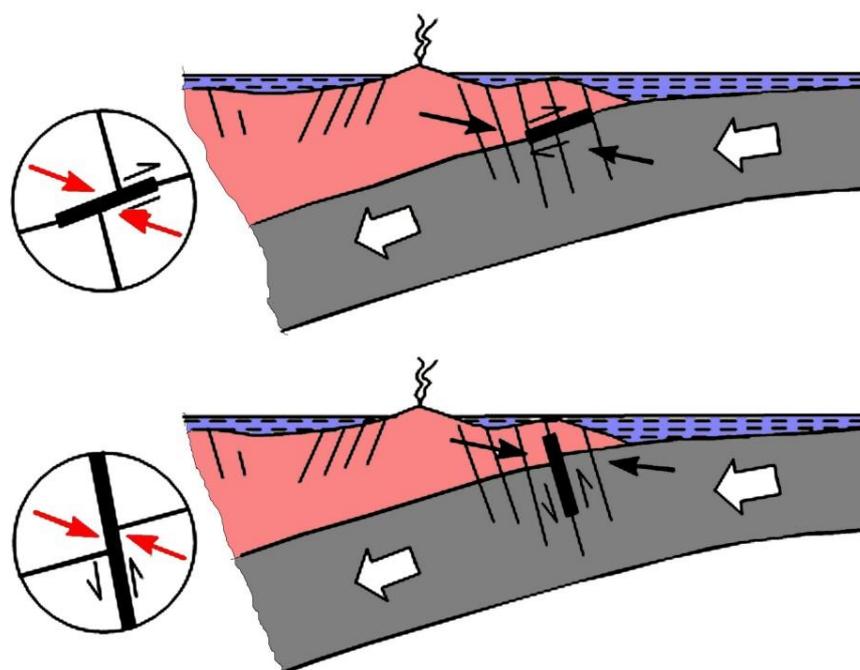


Рис. 10. Модель возникновения крутопадающих (внутриплитных) и пологопадающих (межплитных) сейсмических очагов (на рис. – толстые черные отрезки линий) на материковом склоне островной дуги. Белые стрелки – направление движения океанической плиты, черные стрелки – оси напряжения сжатия, односторонние черные стрелки – смещение крыльев действующей плоскости в очаге. В кружках слева показаны в укрупненном виде смещения в очагах внутриплитных и межплитных землетрясений, по [Рогожин, Захарова, 2006] с сокращением.

Очаги наиболее сильных землетрясений в Курило-Камчатской, Японской и Алеутской островных дугах могут быть разделены, по [Рогожин, Захарова, 2006], на два основных типа согласно решению фокального механизма и результатам исследования афтершокового процесса (рис. 10). К первому типу относятся поддвиговые подвижки по пологой плоскости, погружающейся к западу, под островные дуги (рис. 10), и они наиболее полно соответствуют понятию о *межплитных* землетрясениях [Katsumata et al., 1995; Kikushi, Kanamori, 1995]. Смещение в очаге прямо отражает процесс субдукции -

пододвигание Тихоокеанской плиты под Охотскую микроплиту. Другой тип сейсмических очагов можно назвать *внутриплитным* [Katsumata et al., 1995, Kikushi, Kanamori, 1995]. Действующая плоскость в очагах этих сейсмических событий ориентирована параллельно островной дуге и очень круто погружается в восточном направлении под глубоководный желоб. Сейсмогенерирующая подвижка в очаге такого землетрясения представляет собой взброс нижней части приостровного склона относительно его верхней части. Поскольку очаг землетрясения значительной магнитуды имеет огромные размеры, то он должен проникать в недра на всю толщину литосферы, разрезая сейсмофокальную зону Бенъофа на всю ее мощность [Рогожин, Захарова, 2006]. По результатам наблюдений [Рогожин, Захарова, 2006], сейсмические очаги этого типа совершенно не вписываются в традиционные представления о сейсмичности, вызванной процессом субдукции (однако ниже будет показано, что и эти очаги возникают, с некоторой спецификой, также в поле напряжений, возникающем при пододвигании океанической плиты).

В зарубежных исследованиях возникновение цунамигенных землетрясений связывают с заклиниванием зоны субдукции, а также рассматривают в модели «оперяющих разломов».

Цунамигенные землетрясения как результат заклинивания зоны субдукции. Поиски моделей генезиса цунамигенных землетрясений среди зарубежных исследований привели автора к одной из наиболее популярных моделей, связанной с заклиниванием зоны субдукции (рис. 11а-г) [www.iris.edu/educate]. Как показано на рис. 11а, в процессе субдукции океанической плиты под континентальную островную дугу происходит заклинивание зоны субдукции и вследствие этого нарастание напряжения вдоль заблокированного контакта плит (рис. 11б). За счет сцепления нижележащая плита тянет за собой часть вышележащей в районе заклинивания (рис. 11в). В результате высвобождения напряжения, приокеаническая часть островной дуги «отскакивает» в сторону желоба, порождая тем самым землетрясение и цунами (рис. 11г,д). Заклинивание зоны субдукции возможно вследствие ее столкновения с крупным внутриплитным поднятием, другой островной дугой или микроконтинентом [Хаин, Ломизе, 1995]. Однако и в этой модели основное движение – горизонтальное, и остается непонятным, почему такое движение в одних случаях сопровождается цунами, а в других случаях «обходится» без него.

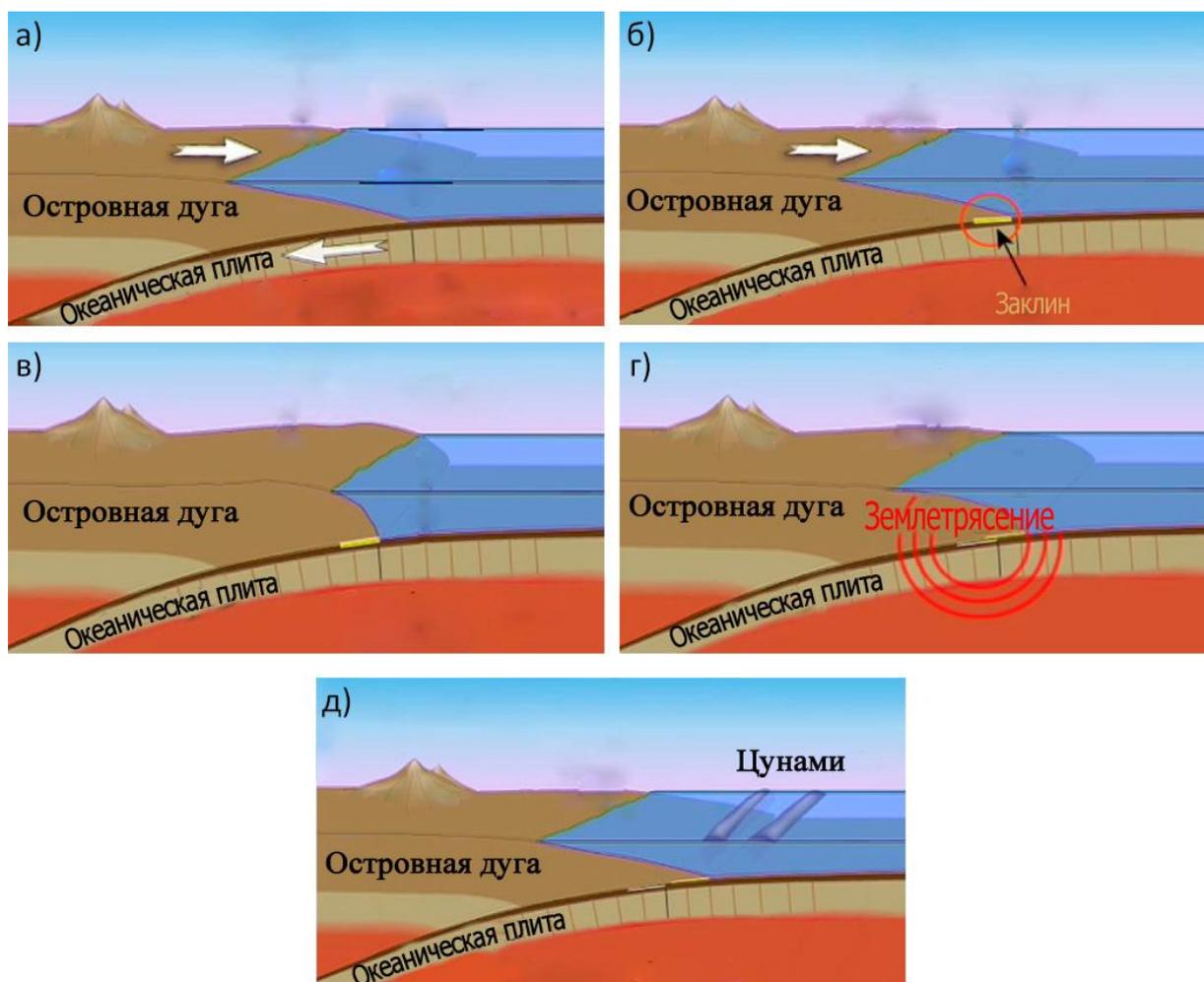


Рис. 11. Модель возникновения цунамигенных землетрясений в зоне субдукции, по [www.iris.edu/educate].
а – процесс субдукции океанической плиты под островную дугу,
б – заклинивание зоны субдукции,
в – «оттягивание» края островной дуги в направлении материка,
г-д – резкое высвобождение напряжений в виде землетрясения и сопровождающего его цунами

Модель «оперяющих разломов». Модель возникновения цунамигенных землетрясений, связанная с заклиниванием зоны субдукции, получила более детальное развитие в так называемой модели «оперяющих разломов» [Heidarzadeh, 2011; Hori et al., 2001; Wendt et al., 2009; Tsuji et al., 2011 и др.]. Считается [Baba et al., 2006], что при сильных землетрясениях в зонах субдукции общая величина сдвига может распределяться между плоскостью субдукции и разломами, ее оперяющими (рис. 12). Эти разломы представляют собой надвижки, чаще всего являющиеся частью аккреционной призмы [Sykes and Menke, 2006], и именно они предполагаются ответственными за возникновение цунами, способными вызвать вертикальную подвижку морского дна [Fukao, 1979; Heidarzadeh, 2011; Hori et al., 2001; Wendt et al., 2009; Tsuji et al., 2011 и др.].

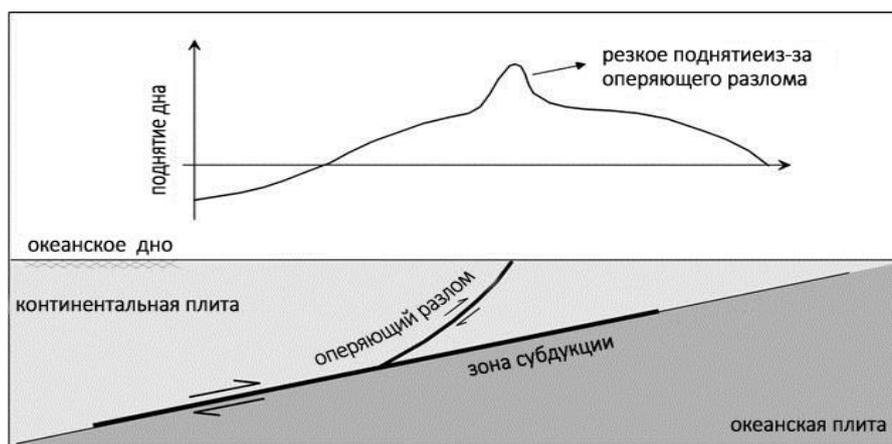


Рис. 12. Модель, в которой ответственными за возникновение цунами считаются разломы, «оперяющие» плоскость субдукции (splay fault); показана корреляция максимального поднятия морского дна с выходом «оперяющего» разлома на поверхность, по [Heidarzadeh, 2011]

По сути, все упомянутые модели дополняют друг друга, являясь разными сторонами рассмотрения одной проблемы.

Однако, если Е.А. Рогожин [2012] предпринимает попытку объяснить природу формирования очагов цунамигенных землетрясений, указывая на их некоторые геодинамические особенности, то авторы зарубежных моделей приводят противоречивые объяснения (модель заклинивания зоны субдукции) либо не берут во внимание геодинамические причины вовсе (модель оперяющих разломов).

Главные недостатки этих моделей, по мнению автора, таковы:

1. Поддвиг океанической плиты под островную дугу не может быть *прямой* причиной надвигания этой дуги в противоположном направлении.
2. *Косвенная* причина такого надвигания – «обратная» деформация при снятии напряжений во время землетрясения – несостоятельна, поскольку эта «обратная» деформация оказывается на порядок больше предшествовавшей ей «прямой» упругой деформации [Gutscher, Peacock, 2003].
3. Такое надвигание, помимо горизонтальной компоненты, должно иметь некоторую направленную вверх вертикальную компоненту, в то время как при островной склон глубоководного желоба во время цунамигенного землетрясения испытывает опускание (см. ниже).
4. Такое надвигание способно породить лишь приповерхностный крутой взброс (splay fault, см. рис. 12) с поднятым приостровным крылом, опущенным приокеанским крылом и сместителем, падающим в сторону островной дуги, в то время как в реальности такой взброс характеризуется, наоборот, поднятым приокеанским крылом, опущенным приостровным крылом и сместителем, падающим в сторону океана (см. рис. 10).

Не удовлетворенный результатами вышеописанных исследований, автор предлагает свою модель, в которой он постарался указать на геодинамический процесс, по его мнению, являющийся причиной формирования очагов цунамигенных землетрясений.

Как было показано выше, Е.А. Рогожиным и А.И. Захаровой [2006] выявлены два типа очагов сильных землетрясений в зонах субдукции – внутриплитного и межплитного типов. Высокие волны цунами возникают в основном в связи с сильными землетрясениями внутриплитного типа, очаги которых характеризуются крутым падением плоскости сместителя в недрах и имеют взбросовый характер (рис. 13а). Межплитные сейсмические события порождают либо небольшое цунами, либо не сопровождаются волнами цунами вовсе.

Анализ этих данных привел к предположению, что крутые и пологие плоскости сместителя являются мегасколами Риделя R' и R . Сколы Риделя, как было показано в главе 1, — это такие сколы, которые возникают в обстановке простого сдвига. Именно такая обстановка — субгоризонтального сдвига вдоль субгоризонтальной же плоскости — должна иметь место в верхней части субдуцирующей океанической плиты, и обусловлена она силами трения, возникающими при ее движении (рис. 13б).

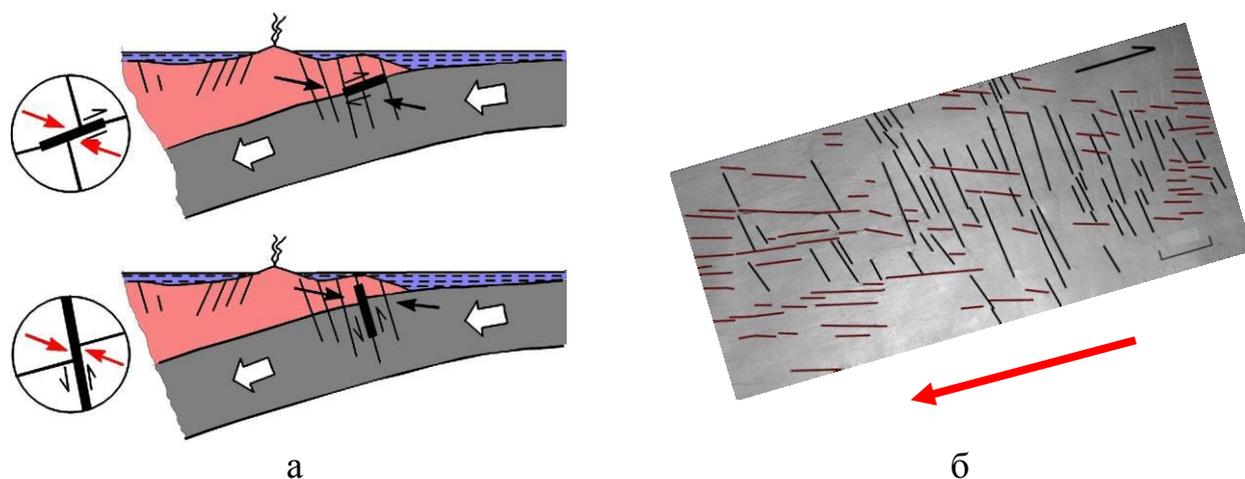


Рис. 13: а – Модель возникновения крутопадающих (внутриплитных) и пологопадающих (межплитных) сейсмических очагов (на рис. – толстые черные отрезки линий) на материковом склоне островной дуги. Белые стрелки – направление движения океанической плиты, черные стрелки – оси напряжения сжатия, односторонние черные стрелки – смещение крыльев действующей плоскости в очаге. В кружках слева показаны в укрупненном виде смещения в очагах внутриплитных и межплитных землетрясений, по [Рогожин, Захарова, 2006] с сокращением.

б – Результаты моделирования простого сдвига на образце из влажной глины.

Черные отрезки – сколы Риделя R' , коричневые – сколы Риделя R .

Чтобы разрешить возникшее противоречие, необходимо признать влияние дополнительных факторов.

Одним из факторов, способным разрешить противоречие относительно равноправности сколов Риделя R и R' в зонах субдукции, является сила тяжести. В анализируемой обстановке субдукции происходит сдвиг вдоль слабонаклонной плоскости. В этом случае сама по себе сила тяжести должна препятствовать формированию крутопадающих сколов Риделя R' (на глубинах, где всестороннее давление превышает половину величины максимального

касательного напряжения, с самого начала доминируют *R*-сколы, что отмечалось в главе 1 (см. рис. 14)).

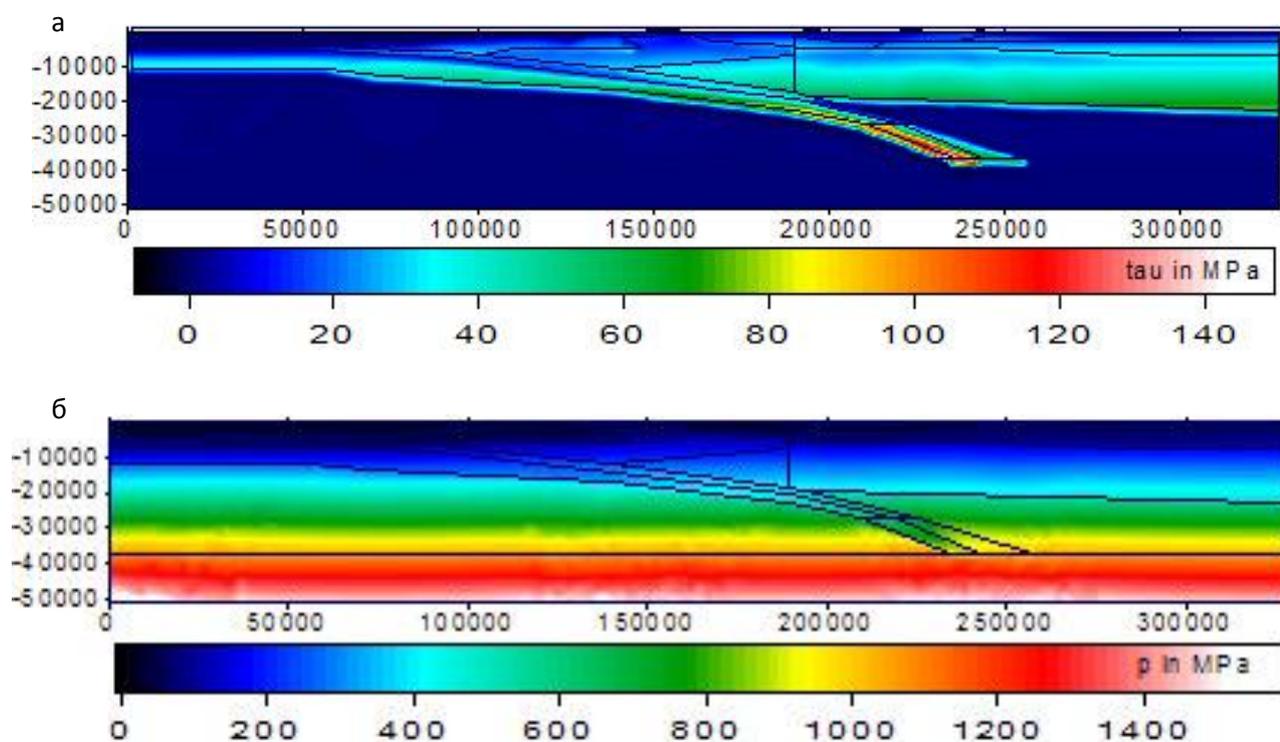


Рис.14. Распределение инвариантных характеристик тензора напряжений в зоне субдукции:

а) всестороннее давление, МПа;

б) максимальные касательные напряжения, МПа [Погорелов, 2011]

Начиная с глубины 10 км, всестороннее давление значительно превышает половину величины максимального касательного напряжения.

Однако одно из проявлений силы тяжести – ее аномалия в зонах субдукции – потенциально способна вызвать противоположный эффект. Дело в том, что субдукция порождает не только «структурную пару» – глубоководный желоб и островную дугу, но и резкое нарушение гравитационного потенциала – отрицательную аномалию силы тяжести в области желоба и положительную аномалию в зоне дуги. Это нарушает изостатическое равновесие. Формирование же крутого склона – взброса, направленного со стороны желоба, должно восстанавливать это равновесие [Гончаров, Фролова, Захаров, Рожин., 2011].

На примере Японского землетрясения 11 марта 2011 г. выявлены некоторые важные особенности кинематики, свидетельствующие о влиянии изостатического фактора.

По данным анализа GPS и гравитационного поля, во время землетрясения и после него наблюдалось опускание юго-восточной части о. Хонсю (одновременно со смещением масс островной дуги в сторону желоба) и поднятие северо-западного борта желоба.

Опускание литосферы островной дуги может являться результатом тенденции к восстановлению изостатического равновесия. При этом происходит не просто опускание поверхности островной дуги, а еще и горизонтальное «расползание» того материала, который расположен под этой поверхностью, как это наблюдается при образовании оползней. «Заплывание» желоба породными массами островной дуги, а также схождение на нет амплитуды как горизонтальной, так и вертикальной компоненты смещения на западном склоне островной дуги – все это свидетельствует о том, что горизонтальные смещения не вызваны некой внешней силой, направленной с северо-запада, со стороны Японского моря, а являются результатом изостатического сглаживания контраста рельефа между островной дугой и желобом [Рожин, 2012].

Также отмечена особенность, связанная с локализацией очага землетрясения и, в связи с этим, характер гравитационных аномалий до и после землетрясения.

Дано возможное объяснение закономерного чередования цунамигенных и не-цунамигенных землетрясений, установленного в работе [Рогожин, Захарова, 2006], состоящее в том, что «обратная» деформация, облегчающая формирование сейсмогенного мегаскола Риделя R' , может быть своеобразной релаксацией прямой деформации, обусловленной поддвигом океанической литосферы (с его частным проявлением – сейсмогенным мегасколом R) и соответствующим, пусть даже и небольшим, увеличением гравитационной аномалии.

Дано краткое описание процесса цунами как следствия тенденции к восстановлению изостатического равновесия. Как отмечает большинство исследователей, цунами возникает обычно в случае, когда очаг подводного землетрясения выходит на поверхность дна в виде крутого уступа. Однако, это всего лишь место, где опускание дуги сопрягается с поднятием желоба. Цунами возникает, когда происходит опускание дна вблизи дуги с соответствующим опусканием поверхности океана, т.е. отступлением моря от суши. Но одновременно происходит поднятие дна вблизи желоба с соответствующим поднятием поверхности океана. Вода устремляется из области поднятия ее уровня в область опускания ее уровня. Этот процесс и есть цунами.

Освещена проблема выбора плоскости очагов цунамигенных землетрясений на примере очага Японского землетрясения. Несмотря на то, что для главного толчка Японского землетрясения было использовано решение фокального механизма, предложенное Е.А. Рогожиным [2012] – крутой взброс, большинство зарубежных исследователей в качестве активной выбирают другую плоскость – пологий надвиг (соответствующую субдукционной плоскости) [Fujii et al., 2011; Nettles et al., 2011; Lekkas et al., 2011]. Такой выбор осуществляется в соответствии с популярной моделью образования цунамигенных землетрясений (см. рис. 12). Однако подобный выбор автор считает неправомерным по обозначенным в главе причинам.

Приводятся данные о так называемых сейсмических «гвоздях», обнаруженных В.Н. Вадковским [2006], которые могут косвенно свидетельствовать в пользу выбора крутой плоскости в очагах цунамигенных землетрясений. Также они могут говорить о том, что очаги как цунамигенных, так и не-цунамигенных сильных землетрясений представляют собой не ослабленные зоны сформированных ранее

разрывных нарушений, которые способны генерировать только слабые землетрясения, а мегатрещины скалывания, возникшие заново в результате объединения кулисообразно расположенных мегатрещин отрыва, каждая из которых представляет собой слабый предвестник сильного землетрясения. Такой способ формирования сколов Риделя подтвержден экспериментами, упомянутыми в главе 1.

Сформулирована гипотеза и предложена модель образования цунамигенных землетрясений как следствия восстановления изостатического равновесия (рис. 15). Цунамигенные землетрясения в зонах субдукции, в которых господствует геодинамическая обстановка поддвига, обусловлены развитием субвертикальных мегасколов Риделя R' , потенциально возможных, но по другим причинам нехарактерных для обстановки сдвига. Данные сравнительного анализа гравитационного поля и GPS на примере Японского землетрясения 2011 г. указывают на тенденцию к восстановлению изостатического равновесия в виде опускания островной дуги и поднятию глубоководного желоба во время землетрясения, которое и способствует формированию мегаскола Риделя R' .

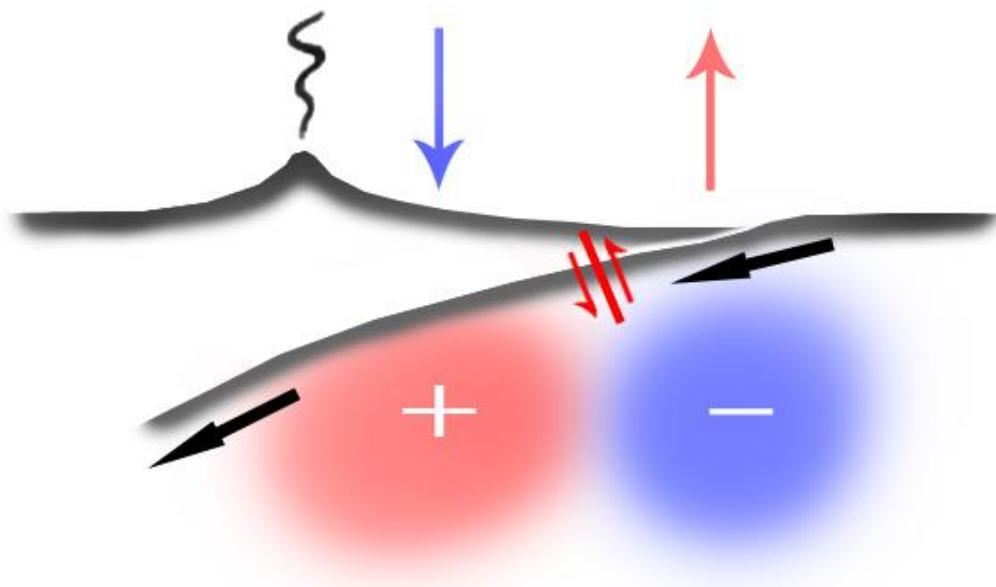


Рис. 15. Модель формирования цунамигенных землетрясений как следствия восстановления изостатического равновесия.

Красный и синий овалы – положительная и отрицательная аномалии в зоне островной дуги и желоба до сильного землетрясения, соответственно. Красная и синяя стрелки – поднятие и опускание поверхности желоба и дуги во время землетрясения. Очаг цунамигенного землетрясения показан красным – крутой взброс (мегаскол Риделя R'). Черными стрелками показано направление субдукции.

Предлагаемая гипотеза с небольшой модификацией может быть применена и к ситуациям в иной, не-сдвиговой геодинамической обстановке. В 2006 и 2007 годах произошли последовательно два сильных Симуширских землетрясения. Очаг первого из них был расположен под *внутренним* склоном Курильского желоба, а очаг второго – под *внешним* склоном этого желоба. Первый из них представлял собой пологий поддвиг, а второй – крутой сброс с падением плоскости сместителя

в сторону океана, который явился *ответной* реакцией на первое землетрясение (Мировой океан, 2013). Этот сброс образовался в обстановке *горизонтального растяжения* литосферы (Ребецкий и др., 2008). Очаг первого землетрясения, по терминологии автора, – это мегаскол R . А вот очаг второго, цунамигенного землетрясения, хотя и не является мегасколом R' (поскольку геодинамическая обстановка здесь не сдвиговая), но тем не менее может быть квалифицирован как мегатрещина тоже скалывания. И тот факт, что поднятое крыло этого мегаскола-сброса обращено в сторону желоба, также свидетельствует о поднятии на этот раз внешнего склона желоба как возможной изостатической реакции как на первое землетрясение, так и на всю гравитационно-аномальную ситуацию в зоне субдукции.

Заключение

1. Проведено обобщение и анализ литературы по формированию и эволюции сколов Риделя R и R' в обстановке сдвига. Проведено физическое моделирование формирования и эволюции сколов Риделя R и R' в обстановке сдвига, а также численное моделирование этой эволюции. Получил теоретическое подтверждение давно установленный факт преобладания сколов R над сколами R' в обстановке горизонтального сдвига вдоль вертикальной плоскости.

2. Проведен сбор, анализ и обобщение литературы по местоположению и кинематике сильных цунамигенных и не-цунамигенных землетрясений. Подтверждена модель Е.А. Рогожина [2012]. Анализ очаговых параметров сильных землетрясений северо-западной части Тихого океана показывает, что высокомагнитудные землетрясения не всегда бывают цунамигенными. Высокие волны цунами возникают в основном в связи с сильными землетрясениями внутриплитного типа, очаги которых характеризуются крутым падением плоскости сместителя в недрах в сторону океана и имеют взбросовый характер. Межплитные сейсмические события порождают либо небольшое цунами, либо не сопровождаются волнами цунами вовсе.

3. Проведен анализ и обобщение литературы, касающейся современных моделей генезиса цунамигенных землетрясений. По сути, все модели дополняют друг друга, являясь разными сторонами рассмотрения одной проблемы, однако ни в одной из них не наблюдается указания причины формирования цунамигенных землетрясений с точки зрения тектонофизики. По этой причине автор предлагает свою модель, в которой он постарался указать на геодинамический процесс, по его мнению, являющийся причиной формирования очагов цунамигенных землетрясений.

4. Проведен анализ геодинамической обстановки субгоризонтального сдвига вдоль субгоризонтальной же плоскости (характерной для зон субдукции), с учетом влияния силы тяжести, которая в обстановке горизонтального сдвига вдоль вертикальной плоскости (характерной для зон сдвига) вызывает только литостатическое давление. Привлечены данные сравнительного анализа: гравитационного поля и GPS – до и после наступления цунами. Дано возможное

объяснение закономерного чередования цунамигенных и не-цунамигенных землетрясений. Проверено предположение о том, что очаги как цунамигенных, так и не-цунамигенных сильных землетрясений представляют собой не ослабленные зоны сформированных ранее разрывных нарушений, которые способны генерировать только слабые землетрясения, а мегатрещины скалывания, возникшие заново в результате объединения кулисообразно расположенных мегатрещин отрыва, каждая из которых представляет собой слабый предвестник сильного землетрясения. Сформулирована гипотеза и предложена модель образования цунамигенных землетрясений как следствия восстановления изостатического равновесия.

Цунамигенные землетрясения в зонах субдукции, в которых господствует геодинамическая обстановка поддвига (субгоризонтального сдвига вдоль субгоризонтальной же плоскости), обусловлены развитием субвертикальных мегасколов Риделя R' , потенциально возможных, но по другим причинам нехарактерных для обстановки сдвига.

Особенность зоны субдукции заключается в том, что в ней наблюдается резкое нарушение гравитационного потенциала – отрицательная аномалия силы тяжести в области желоба и положительная аномалия в зоне дуги, что обусловлено самим процессом субдукции, который способствует поднятию островной дуги и углублению глубоководного желоба. Данные сравнительного анализа гравитационного поля и GPS на примере Японского землетрясения 2011 г. указывают на тенденцию к восстановлению изостатического равновесия в виде опускания островной дуги и поднятию глубоководного желоба во время землетрясения, которое и способствует формированию мегаскола Риделя R' .

Непосредственно само цунами возникает в результате опускания поверхности океана при опускании дна вблизи дуги и одновременного поднятия поверхности океана за счет поднятия дна вблизи желоба. Затем вода устремляется из области поднятия ее уровня в область опускания ее уровня.

Таким образом, фактор изостатического равновесия и является возможной первопричиной формирования очагов цунамигенных землетрясений.

Однако этот фактор не единственно возможный. Например, недавно появилась концепция, согласно которой важную роль играет флюидная фаза с соответствующими вариациями обусловленного ею эффективного всестороннего давления [Rebetsky, Tatevossian, 2013]. В этой концепции важная роль отводится *градиенту* такого давления, т.е. опять-таки *неравновесному* состоянию, которое стремится к равновесию посредством формирования сейсмического очага.

Рекомендацией по прогнозу цунамигенных землетрясений, в соответствии с выводами автора, может являться непрерывный мониторинг высокоточных и высокочастотных измерений GPS и гравитационного поля для выявления намечающейся тенденции к инверсии тектонических движений и гравитационных аномалий в «тектонопарах» островная дуга – глубоководный желоб.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в реферируемых журналах из списка ВАК

1. Гончаров М.А., Фролова Н.С., **Рожин П.Н.**, Селезенева, Н.Н. Проблема выявления абсолютной кинематики противоположных крыльев разрывных нарушений // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2007. № 4. С. 12–19.
2. **Рожин П.Н.** Влияние фактора изостатического равновесия на формирование очагов цунамигенных землетрясений в зонах субдукции // Сборник научных трудов Sworld по материалам Международной научно-практической конференции. Т. 35. 2012. С. 60–66. (<http://www.sworld.com.ua/konfer28/301.pdf>)
3. **Рожин П.Н.** Влияние фактора изостатического равновесия на формирование очагов цунамигенных землетрясений в зонах субдукции // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология, 2013. № 2. С. 58–62.
4. Goncharov M.A., Frolova N.S., **Rozhin P.N.**, Selezneva N.N. The problem of revealing the absolute kinematics of the opposite walls of faults // Moscow University Geology Bulletin. 2007. Vol. 62. N 4. P. 220–228. DOI: 10.3103/S0145875207040023
5. **Rozhin P.N.** The influence of isostatic equilibrium on the formation of the sources of tsunamigenic earthquakes // Moscow University Geology Bulletin. 2013. Vol. 68. N 2. P. 118–122. DOI: 10.3103/S0145875213020099 <http://link.springer.com/article/10.3103/S0145875213020099>

Статьи в сборниках

6. **Рожин П.Н.** Компьютерное моделирование кинематики пассивного рифтинга // Актуальные проблемы региональной геологии и геодинамики / Под ред. Н.В. Короновского. М., 2006. С. 22–26.
7. **Рожин П.Н.** Компьютерное моделирование кинематики активного рифтинга // Актуальные проблемы региональной геологии и геодинамики / Под ред. Н.В. Короновского. М., 2007. С. 37–39.
8. Гончаров М.А., **Рожин П.Н.**, Селезенева Н.Н. Плечи активных континентальных рифтов как результат компенсационного «листрического» сжатия // Фундаментальные проблемы геотектоники. (Материалы XL Тектонического совещания.) Том 1. М.: ГЕОС, 2007. С. 198–201.
9. **Рожин П.Н.**, Селезенева Н.Н. Различная эволюция сколов Риделя R и R' в связи с проблемой генезиса цунамигенных землетрясений // Современная тектонофизика. Методы и результаты. ИФЗ РАН, 2009. С. 195–202.
10. Гончаров М.А., Фролова Н.С., Захаров В.С., **Рожин П.Н.** Цунамигенные землетрясения в зонах субдукции как результат быстротечного формирования мегасколов Риделя R' при объединении кулисообразно расположенных мегатрещин отрыва // Проблемы сейсмотектоники. Материалы XVII

- Всероссийской конференции с международным участием, Москва, 2011. С. 184–188.
11. Гончаров М.А., Фролова Н.С., Захаров В.С., **Рожин П.Н.** Мегасколы Риделя R' как возможная причина цунамигенных землетрясений в зонах субдукции // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле. Т. 2, ИФЗ РАН М., 2012. С. 105–109.
12. Гончаров М.А., Фролова Н.С., **Рожин П.Н.** Конвективная эволюция перехода от пассивного к активному рифтогенезу // Континентальный рифтогенез, сопутствующие процессы: Материалы Второго Всероссийского симпозиума с международным участием и молодежной научной школы, посвященных памяти академиков Н.А. Логачева и Е.Е. Милановского / Под редакцией С.В. Рассказова, А.М. Никишина, С.П. Приминной. Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2013. Т. 1. С. 86–89. (<http://izk.irkmail.ru/2013riftV1.pdf>)
13. Goncharov M.A., Frolova N.S., **Rozhin P.N.** Convective evolution of the transition from passive to active rifting // Continental rifting, accompanying processes: Proceedings of the Second All-Russia symposium with international participation and training school for young scientists, dedicated to the memory of academicians N.A. Logatchev and E.E. Milanovsky / Editors-in-Chief: S.V. Rasskazov, A.M. Nikishin, S.P. Primina. Irkutsk: Institute of the Earth's Crust SB RAS, 2013. Vol. 1. P. 89–92. (<http://izk.irkmail.ru/2013riftV1.pdf>)

Тезисы докладов

14. Гончаров М.А., Фролова Н.С., **Рожин П.Н.**, Селезенева Н.Н. Сколы Риделя R и R' и проблема генезиса цунамигенных землетрясений. // Физические основы прогнозирования разрушения горных пород: тезисы докладов 8-й Международной школы-семинара, Санкт-Петербург, 24–29 мая 2010 г, ИФЗ РАН Москва, 2010. С. 34–35.
15. Гончаров М.А., Фролова Н.С., Захаров В.С., **Рожин П.Н.** Цунамигенные землетрясения в зонах субдукции как проявление мегасколов Риделя R' // Научная конференция Ломоносовские чтения – 2011. Секция Геология, Москва, 2011.
16. Гончаров М.А., Фролова Н.С., Захаров В.С., **Рожин П.Н.** Мегасколы Риделя как возможная причина цунамигенных землетрясений в зонах субдукции // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле: Тезисы 3-й тектонофизической конференции в ИФЗ РАН, ИФЗ РАН М., 2012.