

ИНГГ СО РАН, научный сотрудник  
Цибизов Леонид Валерьевич  
tsibizovlv@ipgg.sbras.ru

Сотрудник НГУ (ассистент)

Кафедра геофизики

Специальность 25.00.10

Работа проводится в рамках написания кандидатской диссертации

Научные руководители: Назарова Л. А. (lanazarova@ngs.ru), Дядьков П. Г. (dyadkovpg@ipgg.sbras.ru)

Состав коллектива:

1. Цибизов Леонид Валерьевич, ИНГГ СО РАН, инженер, tsibizovlv@ipgg.sbras.ru, исполнитель
2. Назарова Л. А., ИНГГ СО РАН, г. н. с., НГУ, профессор, д.ф.-м.н., lanazarova@ngs.ru, научный руководитель
3. Дядьков П. Г., ИНГГ СО РАН, в. н. с., НГУ, доцент, к.г.-м.н., dyadkovpg@ipgg.sbras.ru, научный руководитель
4. Козлова М. П., ИНГГ СО РАН, н. с., к. г. - м. н., kozlovamp@ipgg.sbras.ru, исполнитель
5. Михеева А. В., ИНГГ СО РАН, н. с., к. г. - м. н., mikheevaav@ipgg.sbras.ru, исполнитель
6. Романенко Ю. М., ИНГГ СО РАН, н. с., romanenkoym@ipgg.sbras.ru, исполнитель

Тема работы:

Тектономагнитная модель участка земной коры в пределах Южно-Байкальской впадины для изучения процессов подготовки сильных землетрясений

Постановка задачи:

Диагностика напряжённо-деформированного состояния массива горных пород в процессе подготовки землетрясения по данным тектономагнитного мониторинга в сейсмоактивных зонах Южно-Байкальской впадины с применением численного моделирования

Современное состояние проблемы:

Технологическое развитие магнитометрической и сейсмологической аппаратуры, увеличение качества и объёма получаемых данных вместе с появившимися в последнее десятилетие методами обработки данных и доступностью инструментов численного моделирования открывают новые возможности для изучения ряда феноменов, связанных с подготовкой землетрясений. В частности, интерес вызывает связь эволюции напряжений в окрестности гипоцентра готовящегося землетрясения с режимом сейсмичности (за счёт изменения распределения упругой энергии в массиве горных пород) и аномальным магнитным полем (за счёт эффекта магнитоупругости).

Вопрос о проявлениях магнитоупругого эффекта при подготовке землетрясений неоднократно поднимался в научной среде на протяжении последнего столетия. Первые предположения о проявлении эффекта магнитоупругости в тектонических процессах появились в конце XIX в, когда во время землетрясения в Лигурии (северная Италия) в 1887 г. сетью магнитных обсерваторий были зафиксированы вариации магнитного поля. Позже было установлено, что наблюдаемые изменения были вызваны, вероятно, вибрацией датчиков, связанной с сейсмическими событиями [Stacey, 1964], но идея возможности наблюдения за состоянием недр при помощи магнитных наблюдений стала активно развиваться в XX в. В 1922 г. Уилсоном описаны лабораторные наблюдения

магнитоупругого эффекта, также он предположил возможность использования данного эффекта для определения деформаций в земной коре [Wilson, 1922].

Активно данное направление начало развиваться во второй половине XX в. Был проведён ряд лабораторных исследований магнитных свойств минералов и горных пород под действием напряжений [Фингер, 1951; Грабовский, Пархоменко, 1953; Калашников, Капица, 1952; Капица, 1955; Nagata, 1969; Kapicka, 1988; Kapicka, 1990], в том числе вблизи разрывных нарушений [Bogradale, 1988], разработаны теоретические подходы к объяснению магнитоупругого эффекта в горных породах [Stacey, Jonston, 1971; Stacey, 1974]. Так, причиной этого эффекта в горных породах, содержащих магнетит, может быть зависимость магнитокристаллической анизотропии от напряжений [Stacey, 1974]. По оценкам различных исследователей относительное изменение магнитной восприимчивости под действием сжимающих напряжений порядка 10 МПа может достигать от 0,0001 [Калашников, Капица, 1952] до 0,01 для магнетитсодержащих пород [Nagata, 1969; Kapicka, 1990]. При этом магнитная восприимчивость уменьшается в направлении соосном сжатия на указанные значения и увеличивается в перпендикулярном направлении не более чем на 0,5 этих величин.

Опубликованы работы о натуральных наблюдениях тектономагнитного эффекта в Неваде [Breiner, 1964], в Калифорнии [Johnston, 1975; Johnston, 2006, Chen, 2010], Японии [Nagata, 1976], в Южно-Атлантическом регионе на Соломоновых островах и в Папуа Новой Гвинее [Gladwin, 1984], в Италии [Mele, 1994]. Наблюдаемые аномалии в магнитном поле в основном составляют около 1 нТл в максимуме, длительность наблюдения этих аномалий достигает нескольких месяцев в течение периода подготовки землетрясения. В одной из последних работ по данной тематике [Gawali, 2011] рассматриваются в сравнении электрокинетический, магнитоупругий в сейсмоактивной зоне Нармада-Сан в Центральной Индии. В работе [Takla, 2012] о землетрясении 2007 г. в Перу также выдвигаются предположения о магнитоупругой, электрокинетической и других природах наблюдаемых магнитных аномалий. Аномалии в вариациях магнитного поля перед землетрясением 2011 г. в Тохоку в Японии, достигающие 5 нТл также обсуждаются в работах [Guangjing, 2013; Takla, 2013] как следствие нескольких различных факторов.

Одни из первых численных оценок проявлений магнитоупругого эффекта в зоне активных разломов сделаны в работах [Лапина, 1953; Stacey, 1964]. Начиная с 70-х годов прошлого столетия интерес к данной теме возростал, был опубликован ряд работ, включающих как численные оценки эффекта, так и данные аппаратных наблюдений: расчёт магнитоупругого эффекта при напряжениях в породном массиве, созданных техногенным водоёмом [Davis, 1974]; расчёт зависимости магнитоупругого эффекта от глубины в приложении к прогнозам землетрясений [Carmichael, 1977]. С 80-х годов для расчёта магнитоупругого эффекта стали активно применяться численные методы [Hao, Hastie, Stacey, 1982; Zlotnicki, Cornet, 1986; Sasai, 1993; Stuart, 1995; Utsugi, Nishida, Sasai, 1999; Breiner, 2006; Yamazaki, 2009]. Численное моделирование проводилось на основе модели представляющей из себя, как правило, среду с однородными либо монотонно изменяющимися механическими и магнитными свойствами и одним нарушением сплошности. Моделирование магнитоупругого эффекта в среде с неоднородными магнитными свойствами выполнено в работе [Yamazaki, 2009].

Вопросы напряжённо-деформированного состояния земной коры в окрестности Байкальской рифтовой зоны, а также связанных с ним эффектов в магнитном поле и особенностей сейсмического процесса, активно разрабатывались в Институте нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Расчёт напряжённо-деформированного состояния производился методом конечных элементов [Дядьков, Назаров, Назарова, 1996; Дядьков, Назаров, Назарова, 1997; Дядьков, Мельникова, Назаров, 1999; Дядьков, Мельникова, Саньков, 1999; Polyansky, 2002]. Также стоит отметить зарубежные работы [Lesne, 1998, Lesne, 2000]. Тектономагнитные эффекты рассмотрены в работах [Дядьков, 1987; Дядьков, Мандельбаум, Татьков, 1999], в них произведены оценки напряжений,

способных вызвать магнитные аномалии достаточной для регистрации амплитуды и выявлены некоторые периодичности в аномалиях магнитных вариаций, соответствующие сейсмическому режиму. В последние годы также опубликованы некоторые материалы в этой области [Дядьков, Дучкова, 2014; Дядьков, Кулешов, 2014; Дядьков, Ибатуллина, 2013]. Что касается особенностей сейсмических закономерностей в Байкальской рифтовой зоне, то этой теме посвящено множество исследований, рассматривающих, как правило, геолого-геофизическую обстановку в целом. Следует отметить труды сотрудников Института земной коры СО РАН по разработке тектонофизической модели [Шерман, 2012] и изучению геодинамики и тектонической структуры Байкальской рифтовой зоны [Лунина, 2009; Леви, 2009], обзорную работу зарубежных коллег, включающую всесторонний анализ различных данных [Petit, 2006], лабораторное моделирование тектонических процессов [Chemenda, 2002], а также ряд других публикаций по исследованиям строения [Крылов, 1981; Мордвинова, 2000; Серёдкина, 2013] и сейсмичности Байкальской рифтовой зоны [Гольдин, 2001; Дядьков, 2003].

На сегодняшний день научным сообществом собрана обширная информация по строению Байкальской рифтовой зоны, разработан ряд подходов в анализе закономерностей сейсмических процессов, получены численные оценки напряжений, отмечена корреляция магнитных аномалий с тектоническими процессами. Всё это предоставляет достаточную базу для попыток выявления на примере отдельной сейсмоактивной зоны связи между сейсмическим режимом в процессе подготовки землетрясения и изменениями в аномальном магнитном поле, имеющем источник в зоне подготовки землетрясения. Развитие этого подхода требует обоснования такой связи, которое можно получить при помощи численного моделирования напряжённо-деформированного состояния массива горных пород и магнитоупругого эффекта. Перспектива подобных исследований заключается в разработке методики диагностики методами магнитометрии напряжённо-деформированного состояния массива горных пород, находящегося в критическом состоянии, как на природных, так и на техногенных объектах, что в дальнейшем может послужить критерием для заблаговременной оценки рисков землетрясений и горных ударов.

#### Описание работы:

Первый этап работы состоял в разработке блоковой модели юго-западного участка земной коры Байкальской впадины. Моделирование производилось в пакете Comsol Multiphysics v. 4.4 при помощи модуля Structural Mechanics. Для моделирования была выбрана область размером приблизительно 400x400 км (кривизна земной поверхности не учитывалась) мощностью 40 км, включающая участок Байкальской рифтовой зоны – Южно-Байкальскую впадину и окрестности (рис. 1). Модель представляет собой сплошную линейно упругую среду. Элементы среды различаются по механическим свойствам (табл. 1). Механические свойства подобраны на основе сейсмологических данных [Крылов и др., 1981], зоны с пониженной активностью считаются «жесткими» блоками [Дядьков и др., 2015], разломы между такими блоками также разделены по свойствам на основе анализа сейсмоактивности при помощи системы EEDB [Михеева и др., 2013], углы падения разломов приняты согласно «Новой электронной карте активных разломов юга Восточной Сибири» [Лунина и др., 2010], включающей данные множества исследований. Граничные условия подбирались согласно информации о смещениях бортов разломов и GPS данным [Timofeev et al., 2014]. Гравитация в данной модели не учитывается, поскольку рассматриваются лишь разности состояний до и после приложенного внешнего воздействия. Проскальзывание блоков относительно друг друга обеспечивается за счёт сильно пониженного в разломах по отношению к блокам модуля сдвига (табл. 1).

#### Граничные условия:

- 1) Сибирская плита жёстко зафиксирована ( $U=0$ ) на боковых и нижней границах

2) Смещения на границах блоков указаны на рис. 1, на этих границах  $U_z=0$ , остальные границы свободны

Свойства блоков и разломов приведены в таблице 1. «Зацеп», обозначенный на рис. 1а синим цветом является сегментом главного Саянского разлома, на котором длительное время (около двух десятилетий) наблюдалось сейсмическое затишье. Для изучения влияния предположительного «зацепа» на подготовку Култукского землетрясения 2008 г.  $M = 6.3$  был произведён расчёт для двух случаев: в модели А «зацеп» имеет свойства «активного» разлома, в модели В – «жёсткого» блока, т.е. к Сибирской плите присоединяется соответствующий блок (рис. 1а).

Были рассчитаны давления  $P$  и максимальные касательные напряжения для моделей А и В, а также вычислены их изменения, т.е. разности в распределениях  $P$  и в моделях А и В. Как видно из приведённых на рис. 2 распределений, в районе эпицентра Култукского землетрясения (рис. 1) в случае возникновения «зацепа» возрастают касательные напряжения и одновременно падает давление, что является благоприятной обстановкой для разрядки накопленных напряжений, если таковые имели место.

Второй этап заключался в моделировании магнитоупругого эффекта в горных породах на примере аномалий, выявленных в сейсмоактивной зоне вблизи эпицентра Култукского землетрясения 2008 г. Сеть тектономагнитных пунктов на Култукском участке пересекает магнитную аномалию амплитудой до 1500 нТл, расположенную вблизи Саянского разлома. На этом участке начиная с 1998 г. наблюдается сейсмическое затишье - практически отсутствуют события с  $M > 2.6$ , что позволяет предположить возникновение «зацепа» на данном участке разлома, т.е. жёсткой связи соответствующего блока с Сибирской плитой, поскольку общий уровень сейсмоактивности в районе южной оконечности Байкала остался на прежнем уровне. Модель представляет собой один из блоков, включающий источник локальной магнитной аномалии. Считая напряжённое состояние внутри каждого блока при отсутствии крупных включений относительно однородным, можно предположить, что локальные тела с повышенной (или пониженной) магнитной восприимчивостью могут выполнять роль индикаторов напряжённого состояния блока благодаря эффекту магнитоупругости. Были выполнены численные тесты, позволяющие выявить некоторые характерные взаимосвязи между напряжённым состоянием блока и магнитоупругими аномалиями от включений, имитирующих геологические тела. Тесты выполнялись следующим образом: при различных граничных условиях, имитирующих внешнее воздействие, рассчитывалось напряжённое состояние блока, содержащего включение с упругими и магнитными свойствами, отличными от свойств блока, затем рассчитывались магнитные аномалии, вызванные изменением напряжённого состояния относительно начального состояния (в отсутствие внешнего воздействия). Свойства включения варьировались.

Параметры модели были приняты исходя из характерных для реальных объектов значений: размер блока - 50x50x20 км; модуль Юнга - 40 ГПа; коэффициент Пуассона - 0.3; включение имитирует интрузивное тело протяжённостью порядка 10-ти км и вертикальной мощностью до 2-х км и представляет из себя эллипсоид с полуосями 5, 5 и 1 км с центром на глубине 2 км под поверхностью блока; модуль Юнга включения варьировался от 20 до 60 ГПа, магнитная восприимчивость принята равной  $10^{-1}$  СИ [Stacey, 1974]. Кроме того, угол между ориентацией механического воздействия и горизонтальной компонентой магнитного поля варьировался в пределах от 0 до 90, при постоянном значении модуля вектора магнитной индукции  $T = 60\ 000$  нТл, наклоне  $I = 75^\circ$ ,  $D = 0^\circ$ . Были рассмотрены два типа напряжённого состояния – сжатие (состояние А) и сдвиг (состояние В) (рис. 3).

Величины задаваемых смещений на границах выбраны такими, чтобы напряжения в блоке достигали значений порядка первых МПа, характерных для реальной среды. Расчёт магнитоупругих аномалий производился на высоте 1 км над поверхностью.  $E_0 = 40$  ГПа

(модуль Юнга блока),  $E$  (модуль Юнга включения) варьировался от 20 до 60 ГПа,  $\kappa_0 = 10^{-3}$  СИ (магнитная восприимчивость блока),  $\kappa$  (магнитная восприимчивость включения) варьировалась от  $10^{-4}$  до  $10^{-2}$  СИ. Результаты тестов для некоторых значений варьируемых параметров приведены на рис. 4.

Анализируя результаты тестов можно отметить следующие закономерности:

Различные комбинации модуля Юнга блока и локального тела в пределах от 20 до 60 ГПа незначительно изменяют форму магнитоупругой аномалии, амплитуда аномалии при этом изменяется не более чем в 2 раза.

Ориентация напряжений относительно горизонтальной компоненты магнитного поля ( $\mathbf{H}$ ) при сжатии незначительно сказывается на форме и амплитуде магнитоупругой аномалии (амплитуда изменяется менее чем на 10%), при сдвиге наблюдается незначительное изменение амплитуды, при этом прослеживается чёткая зависимость ориентации оси аномалии от взаимной ориентации напряжений и  $\mathbf{H}$ : изменение направления сдвига относительно  $\mathbf{H}$  на угол  $\varphi$  приводит к повороту аномалии на угол  $2\varphi$  в том же направлении, что позволяет в данной модели по форме аномалии определить ориентацию действующих напряжений. Под осью аномалии в данном случае понимается линия в горизонтальной плоскости, соединяющая максимум и минимум  $\Delta T$

Результаты:

Построена и протестирована численная модель блочной геомеханической среды для описания процесса подготовки Култукского землетрясения 2008 г.  $M = 6.3$  в Южно-Байкальской впадине. Полученные данные свидетельствуют о возможном наличии в процессе подготовки крупных землетрясений факторов, связанных с блочным строением среды и, соответственно, о необходимости рассмотрения таких факторов при анализе геодинамических явлений, предшествующих крупным сейсмическим событиям. В частности, построенная модель указывает на возможный механизм накопления сильных напряжений и последующую их разрядку за счёт вариаций всестороннего сжатия, вызванных взаимодействием блоков земной коры.

Разработана модель тектономагнитных аномалий, вызванных локальными геологическими телами-индикаторами напряжений в земной коре. Протестированы некоторые случаи возникновения тектономагнитных аномалий при изменениях напряжённо-деформированного состояния, характерных для сейсмической зоны вблизи участка Култукского землетрясения 2008 г.

Результаты данных этапов работы представлены в публикациях:

1. Дядьков П.Г., Козлова М.П., Михеева А.В., Романенко Ю.М., Цибизов Л.В. Жёсткие структурные элементы земной коры и их роль в подготовке сильных землетрясений // Тез. докл. X Международной школы-семинара «Физические основы прогнозирования разрушения горных пород» и VI Российско-китайского научно-технического форума «Проблемы нелинейной геомеханики на больших глубинах», Апатиты, 13-17 июня 2016 г. – 2016. – С. 66
2. Цибизов Л. В., Романенко Ю. М. Геомеханическая модель земной коры южно-байкальской впадины для моделирования сейсмогеодинамических процессов. // Наука. Технологии. Инновации: Сборник научных трудов в 9 ч. / под ред. проф. Б.Ю. Лемешко, проф. А.А. Попова, проф. М.Э. Рояка, доц. В.С. Тимофеева. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – Часть 2. – 262 с.

Эффект от использования кластера:

Использование узлов с большим объёмом оперативной памяти позволило произвести расчёты на достаточно детальной конечно-элементной сетке, что привело к увеличению точности результатов.

## Приложение 1

Иллюстрации и таблицы:

Рис. 1. Общий вид модели: а) «жесткие» блоки (тёмно-серым), «мягкие» блоки (светло-серым), «активные» разломы (красным), прочие разломы (жёлтым), область «зацепа» (синим); стрелкой обозначен эпицентр Култукского землетрясения 2008 г.  $M = 6,3$  б) приложенные внешние воздействия и смещение в масштабе 1:25000 к размеру модели, цветом показано вертикальное смещение поверхности

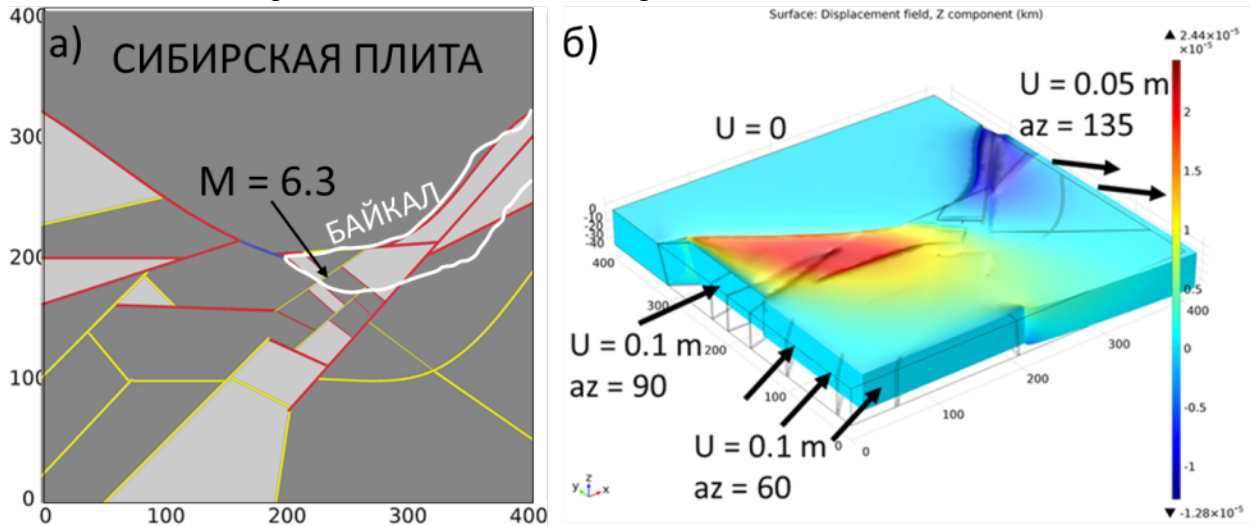


Рис. 2. Результаты моделирования: срез на глубине 20 км, а) максимальные касательные напряжения в модели А, б) изменение, вызванное «зацепом»; в) и г) – аналогичные распределения для давления

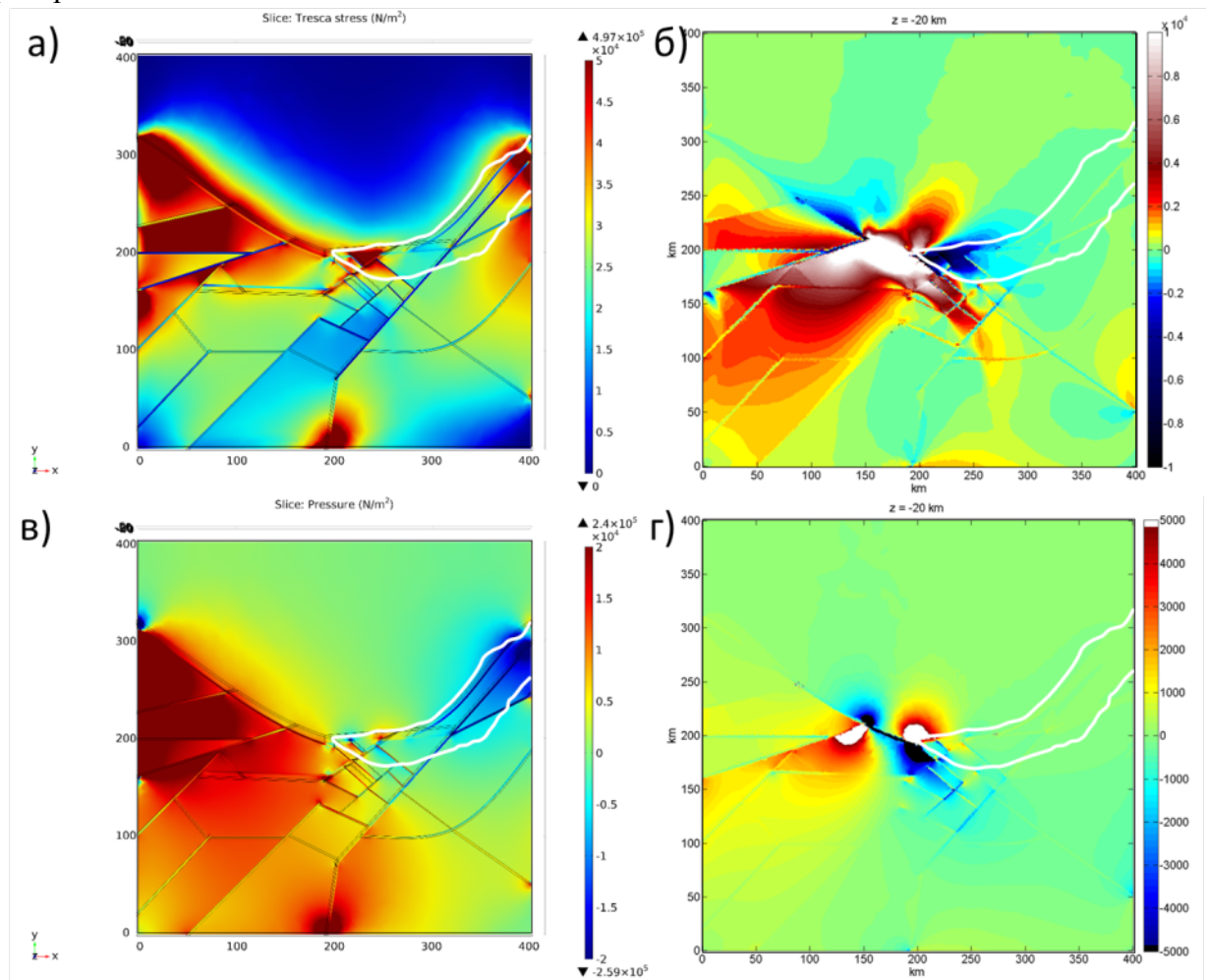


Рис. 3. Схема модели (слева) и два варианта граничных условий в плане (справа): А – на двух боковых гранях задано смещение  $U_y = 5$  м, на двух других боковых гранях  $U_x = 0$ , но допускается проскальзывание вдоль  $Y$ ; В – смещение  $U_x$  задано на всех боковых гранях, величина смещения меняется линейно вдоль  $Y$  от 5 до -5 м,  $U_y = 0$ ; в вариантах А и В на нижней грани  $U_z = 0$ , но допускается горизонтальное проскальзывание, верхняя грань свободна, включение отмечено серым цветом.

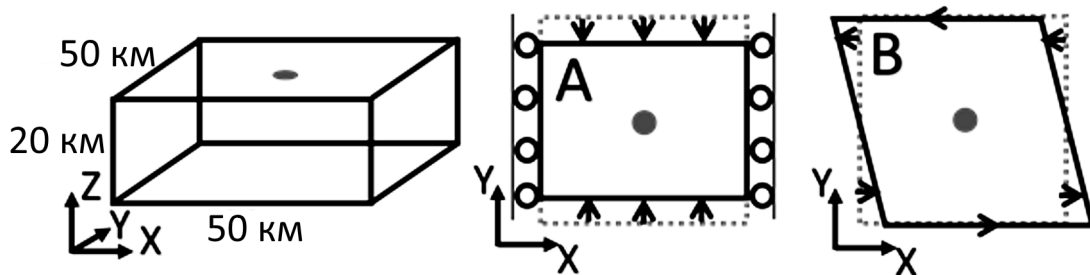


Рис. 4. Магнитоупругие аномалии при сжатии (слева) согласно схеме А (рис. 3) и сдвиге (справа) согласно схеме В (рис. 3),  $E_{\text{среды}} = E_{\text{тела}} = 40$  ГПа



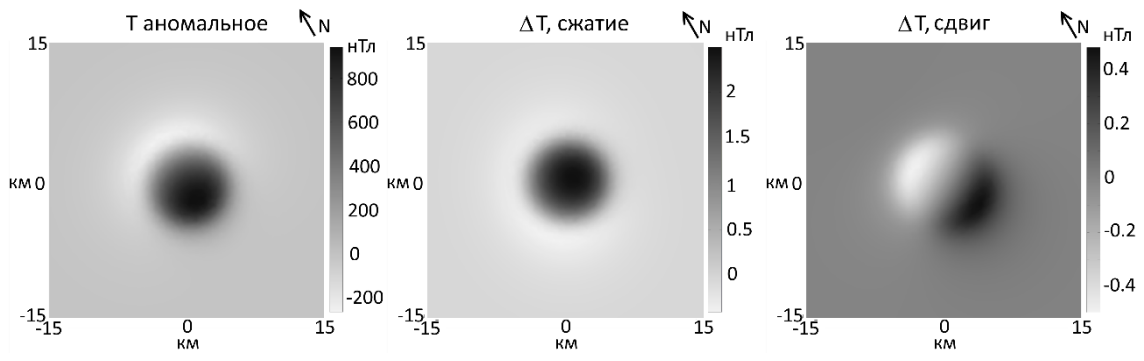


Таблица 1. Механические свойства элементов модели

| Тип                | E, ГПа | $\mu$ , ГПа | $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> |
|--------------------|--------|-------------|----------------------------|
| «Жёсткие» блоки    | 65     | 37          | 2800                       |
| «Мягкие» блоки     | 30     | 20          | 2750                       |
| «Активные» разломы | 20     | 1,6         | 2600                       |
| Прочие разломы     | 20     | 16          | 2600                       |

## Приложение 2

### Список литературы:

1. Borradaile G.J. Magnetic susceptibility, petrofabrics and strain// *Tectonophysics*, 156. – 1988. - pp 1-20.
2. Breiner S. Geomagnetic Indications of Apparent Deep Crustal Deformation (Draft of proposed paper to follow lab and field confirmation)//not published: <http://breiner.com/sheldon/papers/Piezomagnetic%20Effect%20May09.pdf>
3. Breiner S. Piezomagnetic effect at the time of local earthquakes//*Nature*. - 1964. – Volume 202. – pp 790-791.
4. Carmichael R. S. Depth calculation of piezomagnetic effect for earthquake prediction// *Earth and Planetary Science Letters*. – 1977. - №36. – pp. 309-316.
5. Chemenda A., Deverche`re J., Calais E. Three-dimensional laboratory modelling of rifting: application to the Baikal Rift, Russia// *Tectonophysics*. – 2002. - № 356. – pp. 253– 273.
6. Chen C.H., Liu J.Y., Lin P.Y., Yen H.Y., Hattori K., LiangW.T., Chen I.Y., Yeh .H., Zeng X. Pre-seismic geomagnetic anomaly and earthquake location// *Tectonophysics* 489. – 2010. – pp. 240–247.
7. Davis P.M. The Piezomagnetic Computation of Magnetic Anomalies Due to Ground Loading by a Man-Made Lake// *Pageoph*. – 1974. - Vol.112. – pp. 812 -819.
8. Gawali P.B., Waghmare S.Y., Carlo L., Patil A.G. Geomagnetic secular variation anomalies investigated through tectonomagnetic monitoring in the seismoactive zone of the Narmada-Son Lineament, Central India// *J. Ind. Geophys. Union*. – 2011. - Vol.15, №2, pp.61-76.
9. Gladwin M.T. Piezomagnetic Monitoring in the South Pacific Region// *Pageof*. – 1984. - Vol. 122. – pp.921-932.
10. Guangjing X., Peng H., Qinghua H., Katsumi H. Feby F. Hiroki Y. Anomalous behaviors of geomagnetic diurnal variations prior to the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake (Mw9.0)// *Journal of Asian Earth Sciences* 77. – 2013. – pp. 59–65.
11. Hao J. Q., Hastie L. M., Stacey F. D. Theory of the seismomagnetic effect: a reassessment// *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. – 1982. - №28. - pp. 129—140.
12. Johnston J. S., Sasai Y., Egbert G. D., Mueller R. J. Seismomagnetic Effects from the Long-Awaited 28 September 2004. // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 2006. – Vol.96. - №4B. – pp. 206-220.
13. Johnston J.S., Myren G.D., O'Hara N.W., Rodgers J.H. A possible seismomagnetic observation on the garlock fault, California// *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 1975. - Vol. 65, №. 5. - pp. 1129-1132.
14. Kapicka A. Anisotropy of magnetic susceptibility in a weak magnetic field induced by stress// *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 51. - 1988. - pp 349—354.
15. Kapicka A. Variations of the mean susceptibility of rocks under hydrostatic and non-hydrostatic pressure//*Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 63. - 1990. – pp 78—84.
16. Lesne O., Calais E., Deverchbre J., Chery J., Hassani R. Dynamics of intracontinental extension in the north Baikal rift from two-dimensional numerical deformation modeling//*Journal of Geophysical research*. – 2000. – Vol. 105. - №9. – pp. 727-744.
17. Lesne O., Calais E., Deverche`re J. Finite element modelling of crustal deformation in the Baikal rift zone: new insights into the active–passive rifting debate// *Tectonophysics*. – 1998. - №289. – pp. 327–340.
18. Mele G., Meloni A., Palangio P. A tectonomagnetic effect detected in Central Italy//*Annaly Di Geofizika*. – 1994. - №1. – pp. 17-25.
19. Nagata T. Anisotropic Magnetic Susceptibility of Rocks under Mechanical Stresses//*Pure and applied geophysics*.-1969.-Volume 78.- Issue 1.- pp 110-122.
20. Nagata T. Tectonomagnetism in Relation to Seismic Activities of the Earth's Crust: Seismomagnetic Effect in a Possible Association with the Niigata Earthquake in 1964// *J. Geomag. Goelectr*. – 1976. - №28. – pp. 99-111.

21. Petit C., Deverche`re J. Structure and evolution of the Baikal rift: A synthesis// *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. – 2006. – Vol. 7. – p. 26.
22. Polyansky O.P. Dynamic causes for the opening of the Baikal Rift Zone: a numerical modelling approach// *Tectonophysics*. – 2002. - № 351. – pp. 91– 117.
23. Sasai Y. Piezomagnetic fields produced by dislocation sources// *Surveys in Geophysics*. – 1993. -№ 15. – pp. 363-382.
24. Stacey F.D. The Seismomagnetic Effect// *Pure and applied geophysics*. – 1964. - Volume 58. - Issue 2. - pp 5-22.
25. Stacey F.D., Banerjee S.K. The Physical Principles of rock magnetism//Elsevier scientific publishing company. - 1974. – 103 p .
26. Stacey F.D., Jonston J.S. Theory of the Piezomagnetic Effect in Titanomagnetite-Bearing Rocks//*Pure and applied geophysics*. – 1972. - Volume 97. - Issue 1. - pp 146-155.
27. Stuart W. D., Banks P. O., Sasais Y., Liu S.W. Piezomagnetic field for Parkfield fault model//*Journal of Geophysical research*. – 1985. – Vol.100. - №12. – pp. 101-110.
28. Takla E. M. , Yumoto K., Ishitsuka J., Rosales D., Dutra S., Uozumi T., Abe S. Geomagnetic variations possibly associated with the Pisco earthquake on 15 August 2007, Peru// *Tectonophysics* 524–525. – 2012. – pp. 24-35.
29. Takla E.M. , Yumoto K., Okano S., Uozumi T., Abe S. The signature of the 2011 Tohoku mega earthquake on the geomagnetic field measurements in Japan// *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*. – 2013. - №2. – pp. 185–195.
30. Timofeev V., Ducarme B., Ardyukov D., Stus Y., Timofeev A., Kalish E., Sizikov I., Nosov D. Gravity and GPS Measurements at South-West Part of Baikal Rift // *Journal of Earth Science and Engineering*. – 2014. – Т. 4. – № 7. – С. 400-409
31. Utsugi M., Nishida Y., Sasai Y. Piezomagnetic potentials due to an inclined rectangular fault in a semi-infinite medium// *Geophys. J. Int.* – 1999. - №140. – pp. 479-492.
32. Wilson, E.: 1922, ‘On the susceptibility of feebly magnetic bodies as affected by compression’, *Proc. Roy. Soc. A*. 101, 445–452.
33. Yamazaki K. Calculation of the piezomagnetic field arising from uniform regional stress in inhomogeneously magnetized crust// *Earth Planets Space*. – 2009. - №61. – pp. 1163–1168.
34. Zlotnicki J., Cornet F. H. A Numerical Model of Earthquake-Induced Piezomagnetic Anomalies// *Journal of Geophysical research*. – 1986. – Vol. 91. - №1. – pp. 709-718.
35. Гольдин С.В., Дядьков П.Г., Дашевский Ю.А. Стратегия прогноза землетрясений на Южно-Байкальском геодинамическом полигоне // *Геология и геофизика*. – 2001. – Т. 42. – № 10. – С. 1484-1496.
36. Грабовский М.А., Пархоменко Э.И. Об изменении магнитных свойств магнетитов под действием больших сжимающих напряжений//*Известия академии наук СССР*.-1953.-№5-С.404-417.
37. Дядьков П.Г. О решении обратной задачи магнитоупругого эффекта горных пород // *Геология и геофизика*. – 1987. – № 2. – С. 69-77
38. Дядьков П.Г. Особенности проявления вызванной сейсмичности на оз. Байкал: зависимость от скорости нагружения и региональных активизаций сейсмогеодинамического процесса // *Физическая мезомеханика*. – 2003. – Т. 6. – № 1. – С. 55-61
39. Дядьков П.Г., Ибатуллина А.А., Кулешов Д.А., Кесельман С.И., Козлова М.П., Левичева А.В., Романенко Ю.М. Тектономагнитные аномалии, сопровождающие Култукское землетрясение 27.08.2008 г., M=6.3 // *Современная геодинамика Центральной Азии и опасные природные процессы: результаты исследований на количественной основе: Материалы Всероссийского совещания и молодежной школы по современной геодинамике (г. Иркутск, 23-29 сентября 2012 г.)*. В 2-х т. – 2012. – Т. 2. – С. 27-2
40. Дядьков П.Г., Ибатуллина А.А., Кулешов Д.А., Михеева А.В., Романенко Ю.М. Тектономагнитные исследования в Сибири: опыт совместного анализа магнитных и сейсмологических данных // *50 лет сейсмологического мониторинга Сибири: Тезисы*

докладов Всероссийской конференции с международным участием (Новосибирск, 21-25 октября 2013 г.). – 2013. – С. 37-41

41. Дядьков П.Г., Кулешов Д.А., Дучкова А.А. Аномалия векового хода магнитного поля в районе центрального Байкала в период сейсмической активизации 2008-2011 гг. // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. (г. Новосибирск, 8-18 апреля 2014 г.): Междунар. науч. конф. "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология": Сб. материалов в 4 Т. 2. – 2014. – С. 63-67
42. Дядьков П.Г., Мандельбаум М.М., Татьков Г.И., Ларионов В.А., Жирова Н.В., Михеев О.А., Низамутдинов Р.С., Чебаков Г.И. Особенности развития сейсмотектонического процесса и процессов подготовки землетрясений в Центральной части Байкальской рифтовой зоны по результатам тектономагнитных исследований // Геология и геофизика. – 1999. – Т. 40. – № 3. – С. 346-359
43. Дядьков П.Г., Мельникова В.И., Назаров Л.А., Назарова Л.А., Саньков В.А. Сейсмотектоническая активизация Байкальского региона в 1989-1995 годах: результаты экспериментальных наблюдений и численное моделирование изменений напряженно-деформированного состояния // Геология и геофизика. – 1999. – Т. 40. – № 3. – С. 373-386
44. Дядьков П.Г., Мельникова В.И., Саньков В.А., Назаров Л.А., Назарова Л.А., Тимофеев В.Ю. Современная динамика Байкальского рифта: эпизод сжатия и последующее растяжение в 1992-1996 гг. // Доклады РАН. – 2000. – Т. 372. – № 1. – С. 99-103
45. Дядьков П.Г., Назаров Л.А., Назарова Л.А. Моделирование напряженного состояния земной коры в окрестности сейсмогенного разлома в центральной части Байкальского рифта // Геология и геофизика. – 1996. – Т. 37. – № 9. – С. 77-86
46. Дядьков П.Г., Назаров Л.А., Назарова Л.А. Численное моделирование напряженного состояния земной коры и условий возникновения динамической неустойчивости сейсмоактивных разломов при рифтогенезе // Геология и геофизика. – 1997. – Т. 38. – № 12. – С. 2001-2010
47. Калашников А. Г., Капица С. П. Магнитная восприимчивость горных пород при упругих напряжениях // Доклады Академии наук СССР. -1952. Т. 86, № 3. - С. 521-523.
48. Калашников А. Г., Капица С. П. Магнитная восприимчивость горных пород при упругих напряжениях // Доклады Академии наук СССР. -1952. Т. 86, № 3. - С. 521-523.
49. Капица С. П. Магнитные свойства изверженных горных пород при механических напряжениях // Известия АН СССР: сер. геофиз. — 1955. — № 6. С. 489-504.
50. Капица С. П. Магнитные свойства изверженных горных пород при механических напряжениях // Известия АН СССР: сер. геофиз. — 1955. — № 6. С. 489-504.
51. Крылов С.В., Мандельбаум М.М., Мишенькин Б.П., Мишенькина З.Р., Петрик Г.В., Селезнев В.С. Недр Байкала (по сейсмическим данным). Новосибирск: Наука. 1981. 105 с.
52. Лапина М.И. Геомагнетизм и сейсмические явления// Изв. АН СССР, серия геофиз.. – 1953. - № 5. - с. 393-404.
53. Леви К. Г., Шерман С. И., Саньков В. А. Современная геодинамика Азии: карта, принципы составления, геодинамический анализ//Геотектоника. – 2009. - № 2. – с. 78 – 93.
54. Лунина О.В., Гладков А.С., Неведрова Н.Н.; Рифтовые впадины Прибайкалья: тектоническое строение и история развития//Академическое изд-во "Гео". - 2009. – 316 с.
55. Мордвинова В.В., Винник Л.П., Косарев Г.Л., Орешин С.И., Треусов А.В. Телесеismicкая томография литосферы Байкальского рифта // Доклады Академии Наук, 2000, том 372, No 2, с. 248–252.
56. Середкина А. И. Скоростные неоднородности земной коры и верхней мантии и сейсмические структуры центральной части Азии//не знаю, как оформить диссертацию.
57. Фингер Д.Л. Влияние переменных нагрузок на магнитные свойства магнетита//Известия академии наук СССР.-1951.-№5.-С.50-66.

57. Шерман С. И., Лысак С. В., Горбунова Е. А. Тектонофизическая модель байкальской сейсмической зоны, ее тестирование и возможности среднесрочного прогноза землетрясений//Геология и геофизика. – 2012. Т. 53. - № 4. – с. 508-526.