

**МОДЕЛЬ ПОДГОТОВКИ КУЛТУКСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 2008 г.  
С  $M_w = 6.3$  НА ЮГЕ БАЙКАЛА С УЧЕТОМ БЛОЧНОГО СТРОЕНИЯ  
ЗЕМНОЙ КОРЫ, СЕЙСМИЧЕСКОГО РЕЖИМА  
И ТЕКТОНОМАГНИТНЫХ АНОМАЛИЙ**

***Петр Георгиевич Дядьков***

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории естественных геофизических полей, тел. (383)333-03-99, e-mail: DyadkovPG@ipgg.sbras.ru

***Леонид Валерьевич Цибизов***

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, научный сотрудник лаборатории естественных геофизических полей, e-mail: TsibizovLV@ipgg.sbras.ru

***Леонид Анатольевич Назаров***

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, доктор физико-математических наук, зав. лабораторией горной информатики, тел. (383)205-30-30 (доп. 337), e-mail: naz@misd.ru

***Лариса Алексеевна Назарова***

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории горной информатики, тел. (383)205-30-30 (доп. 337), e-mail: lanazarova@ngs.ru

***Марина Петровна Козлова***

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории естественных геофизических полей, тел. (383)333-03-99, e-mail: KozlovaMP@ipgg.sbras.ru

***Юлия Михайловна Романенко***

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, младший научный сотрудник лаборатории естественных геофизических полей, тел. (383)333-03-99, e-mail: RomanenkoYM@ipgg.sbras.ru

Разработана геомеханическая 3D-модель участка земной коры юго-западного окончания Южно-Байкальской впадины, которая учитывает блочную структуру и включает аномальное магнитное тело, что позволяет рассчитать тектономагнитные аномалии для различных граничных условий и изменений состояния среды. Выполнено моделирование возможного сценария подготовки Култукского землетрясения 2008 года с  $M_w=6.3$  для случая зацепления жесткого Зун-Муринского блока с Сибирской платформой на Главном Саянском разломе.

**Ключевые слова:** геомеханическая модель, Култукское землетрясение 27 августа 2008 года, тектономагнитные аномалии, численное моделирование, Байкальский регион, подготовка землетрясения.

## MODEL OF THE 2008 KULTUK EARTHQUAKE (Mw 6.3) PREPARATION IN THE SOUTH OF BAIKAL CONSIDERING CRUSTAL BLOCK STRUCTURE, SEISMIC REGIME AND TECTONOMAGNETIC ANOMALIES

*Peter G. Dyadkov*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, Ph. D., Lead Senior, tel. (383)333-03-99, e-mail: DyadkovPG@ipgg.sbras.ru

*Leonid V. Tsibizov*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, Researcher Scientist, e-mail: TsibizovLV@ipgg.sbras.ru

*Leonid A. Nazarov*

Chinakal Institute of Mining, SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny Prospect, D. Sc., Head of Mining Information Science Laboratory, tel. (383)217-24-46, e-mail: naz@misd.ru

*Larisa A. Nazarova*

Chinakal Institute of Mining, SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny Prospect, D. Sc., Principal Researcher, Mining Information Science Laboratory, tel. (383)217-24-46, e-mail: lanazarova@ngs.ru

*Marina P. Kozlova*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, Ph. D., Researcher Scientist, tel. (383)333-03-99, e-mail: KozlovaMP@ipgg.sbras.ru

*Yuliya M. Romanenko*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Russia, 630090, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, Junior Research, tel. (383)333-03-99, e-mail: RomanenkoYM@ipgg.sbras.ru

3D geomechanical model of the crust of southwestern end of the South-Baikal basin is developed. Model considers a block structure and includes an anomalous magnetic body. The approach enables calculating tectonomagnetic anomalies under different boundary conditions and media states. Presumable scenario of the 2008 Kultuk earthquake (Mw 6.3) preparation is modeled for the case of the rigid Zun-Murinian block and the Siberian platform coupling on the part of the Main Sayan fault.

**Key words:** geomechanical model, Kultuk earthquake of 27 August 2008, tectonomagnetic anomalies, numerical modeling, Baikal region, earthquake preparation.

При изучении процессов формирования областей подготовки сильных землетрясений важное значение имеет знание реологических особенностей сейсмогенной среды, что позволяет создавать близкие к реальности геомеханические модели. Это существенно расширяет возможности исследования геодинамических и сейсмических процессов методами численного моделирования.

Блочная структура участка земной коры в районе южного окончания байкальской впадины, которая включает асейсмичные жесткие структурные элементы, зоны повышенной сейсмичности и разломные зоны, определена ранее в работе [4]. Для этого использовались алгоритмы расчета сейсмической активности  $A_8$  и анализ карт аномального магнитного поля  $dT_a$ .

Следующий этап был связан с разработкой численной геомеханической 3D-модели исследуемого участка земной коры. Для моделирования была выбрана область размером 400 x 400 км (кривизна земной поверхности не учитывалась) мощностью 40 км, включающая участок Байкальской рифтовой зоны – Южно-Байкальскую впадину и окрестности (рис. 1).

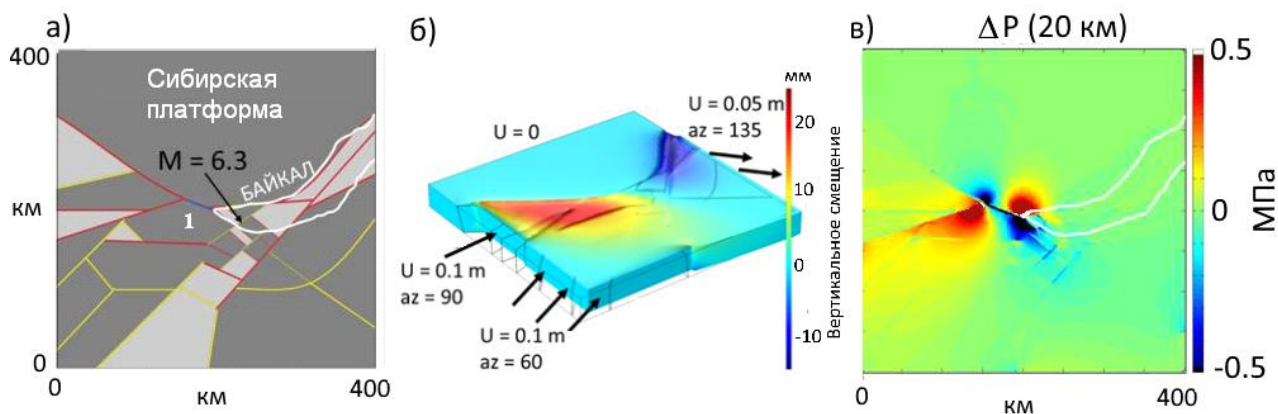


Рис. 1. Общий вид модели:

а) «жесткие» блоки окрашены темно-серым цветом, «мягкие» блоки – светло-серым, 1 – Зун-Муринский блок; «активные» разломы – красным, прочие разломы – желтым, интервал зацепа на Главном Саянском разломе – синим цветом; стрелкой обозначен эпицентр Култукского землетрясения 2008 года с  $M = 6,3$ ; б) приложенные внешние воздействия и смещения приведены в масштабе 1:25000 к размеру модели, цветом показано вертикальное смещение поверхности; в) рассчитанные изменения давления (срез на глубине 20 км), обусловленные возникновением зоны деформационной тени при сцеплении Зун-Муринского блока (1) с Сибирской платформой

Расчеты выполнялись в рамках линейно-упругой среды. Структурные элементы (блоки и разломы) различаются по механическим свойствам, значения которых обоснованы в работе [2]. Граничные условия-подбирались согласно информации о смещениях бортов разломов и GPS данным [1, 6]. Гравитация в данной модели не учитывается, поскольку рассматриваются лишь разности состояний до и после приложенного внешнего воздействия. Смещение блоков относительно друг друга обеспечивается за счет сильно пониженного (на 2 порядка) модуля сдвига в разломах относительно блоков.

Численный эксперимент производился в два этапа: сначала выполнялись расчеты напряжений и деформаций для случая без зацепления блока 1 с Сибирской платформой (рис. 1, а), на втором этапе – с зацеплением этого блока. Затем анализируется разность этих двух состояний. На рис. 1, б, в приведены результаты моделирования.

Были заданы следующие граничные условия и свойства геомеханической модели: Сибирская плита жестко зафиксирована ( $U=0$ ) на боковых границах;

на нижней границе всей модели допускается горизонтальное проскальзывание; смещения на границах блоков указаны на рис. 1, б, на этих границах  $U_z=0$ , остальные границы свободны. Упругие свойства блоков находятся в пределах:  $E = 23\text{--}67$  ГПа,  $\mu = 15\text{--}43$  ГПа,  $\rho = 2650\text{--}2850$  кг/м<sup>3</sup>. Модуль сдвига на разломах понижен на 2 порядка по отношению к блокам.

Результаты моделирования с использованием геомеханической модели свидетельствуют о том, что в районе расположения будущего очага Култукского землетрясения, в так называемой зоне деформационной тени, действительно имеет место область пониженного давления (рис. 2, в), вследствие чего может происходить разупрочнение среды, а учитывая присутствие в этом районе также высоких значений максимальных касательных напряжений, возникают удобные условия для реализации сильного землетрясения [3].

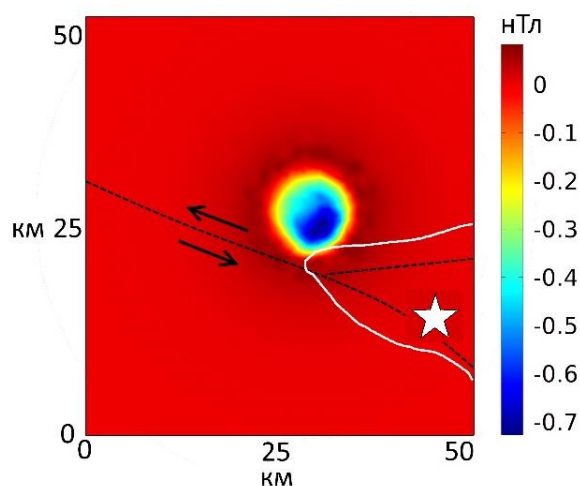


Рис. 2. Моделирование изменений аномального магнитного поля за счет магнитоупругого механизма. Тектономагнитная аномалия, вызванная магнитоупругим эффектом при изменении напряжений в земной коре вследствие левостороннего сдвига вдоль участка Главного Саянского разлома (пунктир). Белой сплошной линией отмечен контур оз. Байкал, звездой – эпицентр Култукского землетрясения 27.08.2008 года,  $M_w=6.3$

Для моделирования магнитоупругого эффекта вблизи Главного Саянского разлома, по которому происходит сдвиг, в геомеханическую модель включено магнитное тело. Важно отметить, что, в отличие от работы [2], включение магнитного тела в саму геомеханическую модель позволяет рассчитывать тектономагнитные (магнитоупругие) аномалии для различных граничных условий и изменений состояния среды. Параметры тела подобраны так, чтобы аномальное магнитное поле над ним приблизительно соответствовало по амплитуде самой интенсивной магнитной аномалии, в пределах которой располагаются пункты тектономагнитных наблюдений. Модель магнитного тела представляет из себя диск диаметром 10 км и толщиной 3 км, его верхняя граница совпадает

с земной поверхностью. Магнитная восприимчивость тела составляет  $50 \cdot 10^{-3}$  СИ, коэффициент магнитоупругости –  $3 \cdot 10^{-9}$  Па<sup>-1</sup> [5]. Амплитуда магнитной аномалии над телом достигает 1400 нТл. Вмещающая среда в модели обладает нулевой магнитной восприимчивостью. Намагничивающее поле направлено вертикально и составляет 60 000 нТл. Изменение намагниченности от приложенной нагрузки задано в виде (Sasai 1991):

$$\Delta J = \frac{3}{2} \beta \sigma T' J, \quad (1)$$

где  $\Delta J$  – изменение намагниченности,  $J$  – намагниченность,  $\beta$  – магнитоупругий коэффициент,  $T'$  выражается в виде:

$$T' = T - \frac{1}{3} (\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}), \quad (2)$$

где  $T$  – тензор напряжений,  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$ ,  $\sigma_{zz}$  – элементы его главной диагонали. Расчет магнитного поля производился на высоте 1 км над поверхностью, что позволило пренебречь влиянием рельефа.

Полученный при моделировании результат (рис. 2, б) важен для интерпретации зарегистрированных тектономагнитных аномалий в этом районе [7]. Он свидетельствует о том, что разрядка упругой деформации в районе эпицентра Култукского землетрясения в 2008 году могла инициировать левостороннее смещение на некотором участке Главного Саянского разлома, что, в свою очередь, снижает интенсивность близгоризонтального сжатия. Следствием таких изменений напряженного состояния является снижение значений аномального магнитного поля над магнитным телом вследствие магнитоупругого эффекта. Именно такого знака аномалии были зарегистрированы после Култукского землетрясения на пунктах ежегодных тектономагнитных наблюдений вблизи Главного Саянского разлома [7]. Кроме того, в последние 3–4 года перед землетрясением на ближайших к разлому пунктах наблюдалась стабилизация изменений во времени значений модуля вектора магнитной индукции, что может подтверждать наличие зоны деформационной тени.

Таким образом, разработана геомеханическая 3D-модель участка земной коры в районе юго-западного окончания байкальской впадины. Модель учитывает основные структурные элементы – блоки, разломные зоны. В модель включено аномальное магнитное тело, что позволяет рассчитывать тектономагнитные (магнитоупругие) аномалии для различных граничных условий и изменений состояния среды. Выполнено моделирование возможного сценария подготовки Култукского землетрясения 2008 года с  $M=6.3$  для случая зацепления относительно жесткого Зун-Мурунского блока с Сибирской платформой на одной из секций Главного Саянского разлома. Показано, что в такой ситуации происходит формирование области разуплотнения в зоне деформационной тени в районе будущего очага при одновременном присутствии вблизи этой зоны

интенсивных касательных напряжений. Возможность такого сценария подготовки подтверждается наличием сейсмического затишья перед Култукским землетрясением и характером изменений напряженного состояния по данным тектономагнитных наблюдений.

*Работа выполнена при частичной поддержке Программы ФНИ IX.128.2 и проектов Комплексной программы СО РАН П.2П/IX.128.1/128.5, РФФИ № 15-05-06977, РФФИ № 17-05-01234а.*

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вращения и деформации земной поверхности в Байкало-Монгольском регионе по данным GPS-измерений / А.В. Лухнев, В.А. Саньков, А.И. Мирошниченко и др. // Геология и геофизика. – 2010. – Т. 51, № 7. – С. 1006–1017.
2. 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.
3. Дядьков П.Г. О модели подготовки землетрясения с зоной деформационной тени // Физические основы разрушения горных пород: тезисы докладов IX Международной школы-семинара (Иркутск, 2-6 сентября 2013 г.). – ИЗК СО РАН, 2013. – 35 с.
4. Жесткие структурные элементы земной коры юго-запада Байкальского рифта по данным сейсмической активности / П. Г. Дядьков, М. П. Козлова, Л. В. Цибизов и др. // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. Т. 2. – С. 113–117.
5. Калашников А.Г., Капица С.П. Магнитная восприимчивость горных пород при упругих напряжениях // Доклады Академии наук СССР. – 1952. – Т. 86, № 3. – С. 521–523.
6. Парфеевец А.В., Саньков В.А. Напряженное состояние земной коры и геодинамика юго-западной части Байкальской рифтовой системы / ИЗК СО РАН. – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2006. – 151 с.
7. Тектономагнитный мониторинг изменений напряженного состояния массивов горных пород в связи с сейсмическими активизациями в районе Южно-Байкальского промышленного узла / П.Г. Дядьков, Л.В. Цибизов, М.П. Козлова и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2016. – № 12. – Вып. 35. – С. 1–16.

*© П. Г. Дядьков, Л. В. Цибизов, Л. А. Назаров, Л. А. Назарова,  
М. П. Козлова, Ю. М. Романенко, 2017*