

Л.А. Назаров, Л.А. Назарова, Н.А. Мирошниченко, А.В. Панов,  
П.Г. Дядьков, Л.В. Цибизов

## СЕЗОННЫЕ ВАРИАЦИИ УРОВНЯ ОЗЕРА БАЙКАЛ И СЛАБАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ\*

Разработана и методом конечных элементов численно реализована (в среде COMSOL Multiphysics) объемная геомеханическая модель Байкальской рифтовой зоны, учитывающая детальную разломно-блоковую структуру, данные о физических свойствах пород и межблочных нарушений, которые оценивались по геофизической и сейсмотектонической информации. С использованием данных каталога сейсмических событий GlobalCMT (Harvard, USA) и результатов модельных расчетов об эволюции геомеханических полей для выделенных участков Байкальской рифтовой системы выполнен пространственно-временной линейный корреляционный анализ природной сейсмичности за период 1963—2017 гг. Установлены количественные зависимости числа слабых сейсмических событий (магнитуда от 2,7 до 4,5) от приращения максимальных касательных напряжений, вызванных сезонным изменением уровня оз. Байкал. Полученные эмпирические соотношения имеют место вдоль разломных структур, окаймляющих северо-восточный и юго-западный берега озера, и могут быть использованы для прогноза уровня сейсмической активности указанных некоторых участков Байкальского рифта.

Ключевые слова: массив горных пород, геомеханическая модель, Байкальская рифтовая зона, слабая сейсмичность, метод конечных элементов, корреляционный анализ.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-2-0-140-147

### Введение

Известно, что создание крупных водохранилищ повышает сейсмичность региона, при этом сезонные вариации уровня воды могут увеличить количество и магнитуду техногенных динамических событий [1, 2, 3]. Аналогичные закономерности наблюдаются и для природных объектов [4], в частности, крупных водоемов [5]. Предложены различные механизмы, на качественном уровне объясняющие причинно-следственные связи между сейсмичностью и сезонной вариацией физических полей (температуры, порового давления...) [4, 6, 7]. Трудность

установления количественных связей, например, числа и энергии землетрясений в некоторой области с вариацией параметров поля напряжений заключается в стохастической природе первых и, порой, недостатке информации для оценки и/или моделирования вторых.

В настоящей работе сделана попытка адаптировать предложенный в [8] подход (комплексная интерпретация данных о техногенной сейсмичности и эволюции напряжений при отработке рудного месторождения) для совместного пространственно-временного анализа природной сейсмичности и напряженно-

\* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-05-06977). Авторы благодарят ИВЦ Новосибирского государственного университета за предоставленные вычислительные ресурсы.

го состояния Байкальской рифтовой зоны (БРЗ).

### Геолого-геофизическое обоснование геомеханической модели

Выделенный для моделирования участок Байкальской рифтовой системы включает в себя Байкальский рифт, а также ее юго-западный и северо-восточный фланги. Общее структурное положение и развитие Байкальского рифта определяются, в первую очередь, его приуроченностью к зоне сочленения двух главных тектонических элементов Восточной Сибири — Сибирского кратона и Центрально-Азиатского подвижного пояса [9].

Характерные структурные особенности этой зоны и ее раздвиг на современном этапе развития могут быть обусловлены как пассивным рифтингом («отталкивание» Амурской плиты от Сибирского кратона под действием сил Индо-Евразийской коллизии [10, 11]), так и активным — вследствие восходящего потока мантийного вещества [12].

Выполненное авторами геомеханическое моделирование напряженно-де-

формированного состояния литосферы Центральной Азии [13, 14] показало, что, по всей видимости, в районе БРЗ действуют эти оба источника рифтогенеза [15]. Как в первом, так и во втором случае, вкрест простирания рифта имеют место деформации удлинения, на что указывают данные о механизмах очагов землетрясений и результаты GPS наблюдений [16, 17]. Условия пассивного рифтогенеза предполагают также действие сил сжатия в северо-восточном направлении, вдоль простирания рифта.

Разломно-блоковое строение данной территории изучалось в [18, 19]. Известно, что разломы в континентальных рифтовых зонах, в том числе и в Байкальской, расположены, в основном, близвертикально. Эта информация, а также данные о физических свойствах пород, нарушениях сплошности БРЗ [13, 14, 15, 17, 20] и пространственном распределении эпицентров землетрясений с магнитудой  $M > 2,5$  [21], которые в большинстве своем приурочены к разломным зонам, были использованы для разработки численной модели литосферы Байкальского рифта.

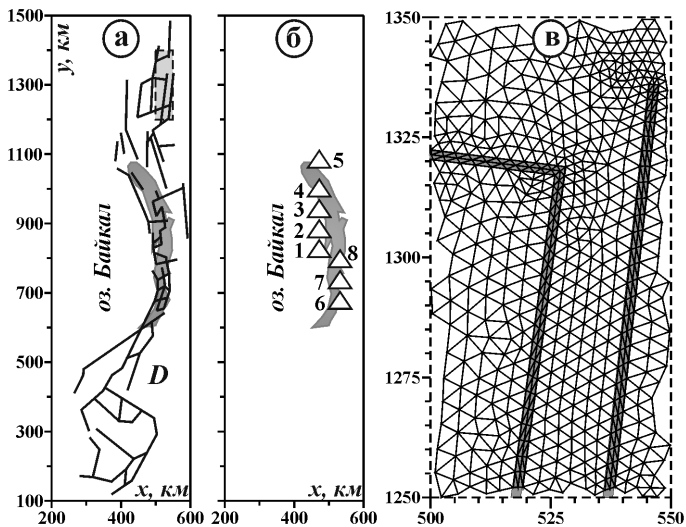


Рис. 1. Разломная структура БРЗ (а); расположение анализируемых блоков (б); фрагмент конечно-элементной дискретизации расчетной области (в)

Расчетная область  $D$  представляла собой параллелепипед с размерами  $800 \times 1800 \times 150$  км по соответствующим осям декартовой системы координат  $(x, y, z)$ , в центральной части которой расположена БРЗ, ось ординат ориентирована на северо-восток (рис. 1, а), ось аппликат — вертикально вниз. Деформирование блоков описывалось упругой моделью, межблочных нарушений — в соответствии с подходом [22]. Цель настоящей работы — установление связи слабой сейсмичности БРЗ и сезонных вариаций уровня оз. Байкал, поэтому боковые грани  $D$  были свободны от напряжений, на нижней границе задавались нулевые вертикальные смещения, а на дневной поверхности в акватории озера прикладывались вертикальные напряжения  $\sigma_{zz} = \rho gh$  ( $\rho$  — плотность воды,  $g$  — ускорение свободного падения,  $h = 1$  м — максимальный перепад уровня озера в соответствии с Федеральным законом № 94 ФЗ от 01.05.1999). Геомеханическая модель реализована методом конечных элементов в среде COMSOL Multiphysics v.4.4, область  $D$  разбивалась на 87425 тетраэдров. Рис. 1, в демонстри-

рует фрагмент сетки на дневной поверхности, тоном выделены разломы.

На рис. 2 представлен пример численного моделирования — распределение максимального касательного напряжения  $\tau$  в различных горизонтальных сечениях  $D$  (выполнено пространственное сглаживание расчетов с окном 25 км). Можно видеть, что поле напряжений весьма неоднородно (что является следствием сложной тектонической структуры БРЗ), однако прослеживается ожидаемая тенденция уменьшения  $\tau$  с глубиной.

### Анализ слабой сейсмичности

По данным [21] за период 1963–2017 г. в исследуемой области произошло свыше 15 тыс. землетрясений с магнитудой  $M$  от 2,7 до 7,8, при этом глубина гипоцентров определяется приблизительно. Для пространственно-временного анализа слабой сейсмичности область  $D$  разбивалась на параллелепипеды  $B_{ij}$  ( $i = 1, \dots, 16; j = 1, \dots, 36$ ) с размерами в плане  $50 \times 50$  км, в каждом из них подсчитывалось число землетрясений  $N_{ij}(t)$  с  $2,7 \leq M \leq 4,5$  (рис. 3) с 1963

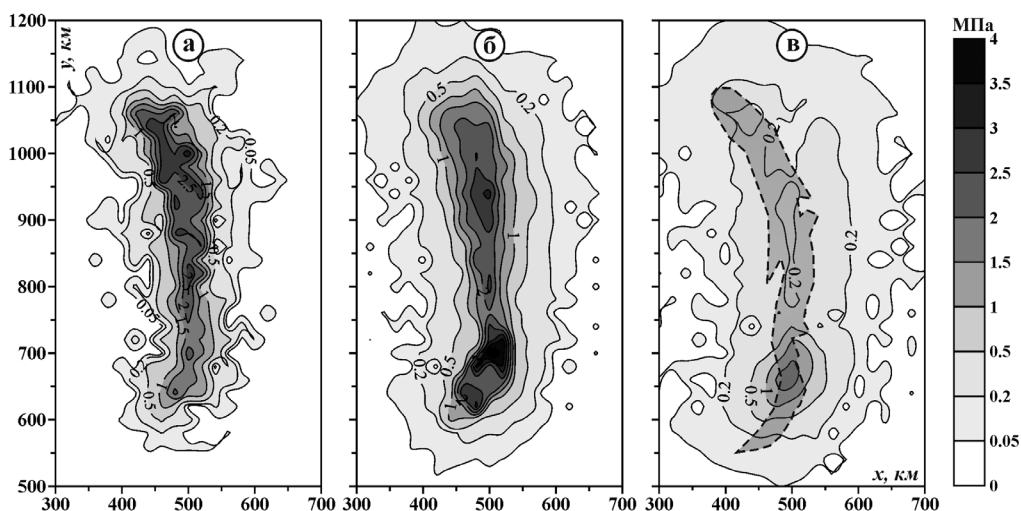


Рис. 2. Амплитуда максимального касательного напряжения  $\tau$  (МПа) при сезонном колебании уровня оз. Байкал на глубине: 10 км (а); 20 км (б); 50 км (в)

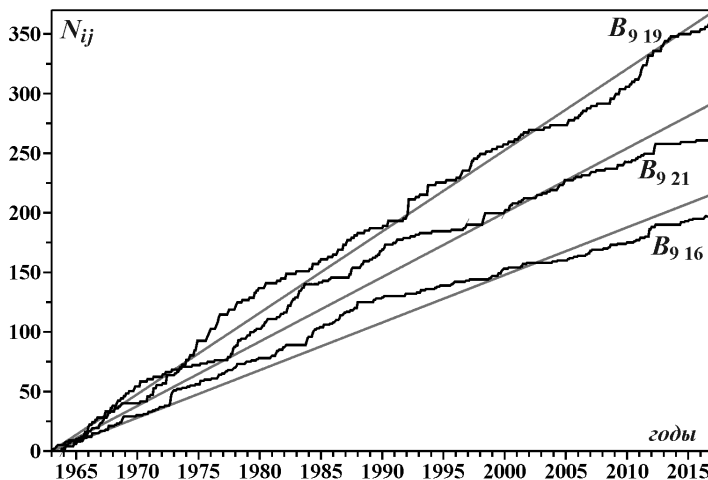


Рис. 3. Количество слабых землетрясений в различных блоках, расположенных в окрестности северо-западного берега оз. Байкал (рис. 1, б) за период 1963–2017 гг.

Таблица 1

**Результаты пространственно-временного анализа сейсмической активности и напряжений Байкальской рифтовой зоны**

№ на рис. 1, б	Блок	$X_b$ , км	$Y_b$ , км	$N_{ij}$ (2017)	$K_{ij}$	$\delta$ , %	$\tau$ , МПа
1	$B_{9\ 16}$	475	825	200	0,333	9,90	1,008
2	$B_{9\ 17}$	475	875	250	0,398	8,81	1,282
3	$B_{9\ 18}$	475	925	228	0,316	14,59	1,158
4	$B_{9\ 21}$	475	975	358	0,569	5,22	1,789
5	$B_{9\ 16}$	475	1075	262	0,450	9,07	1,299
6	$B_{10\ 13}$	525	675	183	0,296	7,20	1,427
7	$B_{10\ 14}$	525	725	211	0,324	4,81	1,509
8	$B_{10\ 15}$	525	775	235	0,381	5,43	1,593

Примечание:  $X_b$  и  $Y_b$  – координаты центра блока.

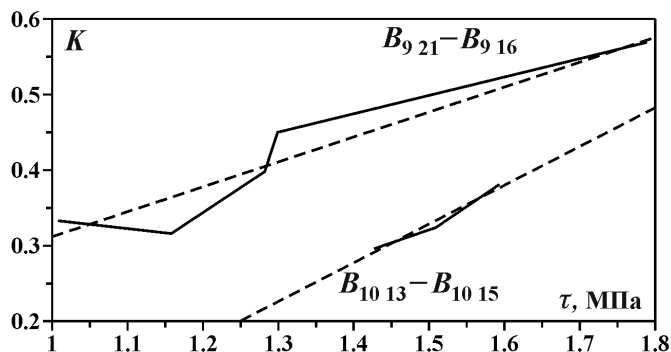


Рис. 4. Зависимость коэффициентов  $K_{ij}$  от напряжений  $\tau$  для двух систем блоков

Таблица 2

**Коэффициенты в эмпирической зависимости (2)**

Блоки	$A_1$	$A_2$	$\delta, \%$
$B_{9\ 16} - B_{9\ 21}$	0,330	0,018	7,13
$B_{10\ 13} - B_{10\ 15}$	0,513	0,440	1,98

по 2017 г. (шаг дискретизации по времени  $t$  — месяц) и выполнялась линейная аппроксимация

$$N_{ij}(t) \cong K_{ij}t. \quad (1)$$

В табл. 1 сведены результаты расчетов для всех блоков  $B_{ij}$  в окрестности оз. Байкал, где относительная ошибка  $\delta$  аппроксимации (1) не превышает 15% и  $N_{ij}(t) > 150$ .

Как и следовало ожидать, они расположены вдоль разломных структур, окаймляющих озеро (рис. 1, б).

В последней строке табл. 1 показаны значения  $\tau$  в соответствующих блоках. Оказалось, что число событий  $N_{ij}(t)$  и коэффициенты  $K_{ij}$  увеличиваются с ростом  $\tau$  и могут быть аппроксимированы

линейными функциями (рис. 4, штриховые линии), например,

$$K(\tau) \cong A_1\tau + A_2, \quad (2)$$

где коэффициенты  $A_1$  и  $A_2$  сведены в табл. 2.

**Заключение**

Соотношения (1) и (2) устанавливают количественную связь между слабой сейсмичностью БРЗ и вариацией параметров напряженного состояния, обусловленной сезонным колебанием уровня оз. Байкал. Эти зависимости, выполняющиеся в окрестности озера, ассоциированы с разломными структурами и могут быть использованы для прогноза уровня сейсмической активности некоторых участков Байкальской рифтовой зоны.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Talwani P.* On the nature of reservoir-induced seismicity // *Pure Appl. Geophys.* 1997. Vol. 150. pp. 473–492.
2. *Liu S., Xu L., Talwani P.* Reservoir-induced seismicity in the Danjiangkou Reservoir: a quantitative analysis // *Geophys. J. Int.* 2011. Vol. 185. pp. 514–528.
3. *Ташлыкова Т., Рященко Т.* Возбужденная сейсмичность при создании водохранилищ: анализ первых фактов и возможных причин // *Инженерная защита.* — 2015. — Вып. 11.
4. *Асминг В.Э., Баранов С.В., Виноградов А.Н., Виноградов Ю.А.* Сезонный характер сейсмичности в районе архипелага Шпицберген // *Вестник МГТУ.* — 2009. — Т. 12. — № 4. — С. 571–575.
5. *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.
6. *Ellsworth W.L.* Injection-induced earthquakes // *Science.* 2013. Vol. 341, Issue 6142, 1225942.
7. *Huang Y., Ellsworth W.L., Beroza G.C.* Stress drops of induced and tectonic earthquakes in the central United States are indistinguishable // *Science Advances.* 2017 August 3(8): e1700772.
8. *Назаров Л.А., Назарова Л.А., Ярославцев А.Ф. и др.* Эволюция геомеханических полей и техногенная сейсмичность при отработке месторождений полезных ископаемых // *ФТПРПИ.* — 2011. — № 6. — С. 6–13.
9. *Логачев Н.А.* История и геодинамика Байкальского рифта // *Геология и геофизика.* — 2003. — Т. 44. — № 5. — С. 391–406.
10. *Molnar P., Tapponier P.* Cenozoic tectonics of continental collision // *Science.* 1975. Vol. 189, no 4201. pp. 419–426.
11. *Зоненшайн Л.П., Савостин Л.А.* Введение в геодинамику. — М.: Недра, 1979. — 311 с.

12. Logachev N. A., Florensov N. A. The Baikal system of rift valleys // *Tectonophysics*. 1978. no 45. pp. 1–13.

13. 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.

14. Дядьков П. Г., Назаров Л. А., Назарова Л. А. и др. 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.

15. Дядьков П. Г., Назаров Л. А., Назарова Л. А. Трехмерная вязкоупругая модель литосферы Центральной Азии: методология построения и численный эксперимент // *Физическая мезомеханика*. — 2004. — Т. 7. — № 1. — С. 91–101.

16. Мельникова В. И., Радзиминович Н. А. Механизм очагов землетрясений Байкальского региона за 1991–1996 гг. // *Геология и геофизика*. — 1998. — Т. 39. — № 11. — С. 1598–1607.

17. Лухнев А. В., Саньков В. А., Мирошниченко А. И., Ашурков С. В., Кале Э. Вращения и деформации земной поверхности в Байкало-Монгольском регионе по данным GPS-измерений // *Геология и геофизика*. — 2010. — Т. 51. — № 7. — С. 1006–1017.

18. Шерман С. И., Семинский К. Ж., Черемных А. В. Разломно-блоковая тектоника Центральной Азии: опыт тектонофизического анализа / *Актуальные вопросы современной геодинамики Центральной Азии*. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. — 297 с.

19. Лунина О. В., Гладков А. С., Гладков А. А. Систематизация активных разломов для оценки сейсмической опасности // *Тихоокеанская геология*. — 2012. — Т. 31. — № 1. — С. 49–60.

20. Назарова Л. А. Моделирование объемных полей напряжений в разломных зонах земной коры // *Доклады Академии наук*. — 1995. — Т. 342. — № 6. — С. 804–808.

21. Harvard Seismology Group. URL: [www.seismology.harvard.edu/data](http://www.seismology.harvard.edu/data).

22. Barton N. R. Deformation phenomena in jointed rock // *Geotechnique*. 1986. Vol. 36, no 2. pp. 147–167. **VIAS**

## КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Назаров Леонид Анатольевич<sup>1</sup> — доктор физико-математических наук, зав. лабораторией, e-mail: [mining1957@mail.ru](mailto:mining1957@mail.ru),

Назарова Лариса Алексеевна<sup>1</sup> — доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, e-mail: [larisa@misd.ru](mailto:larisa@misd.ru),

Мирошниченко Нели Александровна<sup>1</sup> — кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, e-mail: [mna@misd.ru](mailto:mna@misd.ru),

Панов Антон Владимирович<sup>1</sup> — младший научный сотрудник, e-mail: [anton-700@yandex.ru](mailto:anton-700@yandex.ru),

Дядьков Петр Георгиевич<sup>2</sup> — кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, e-mail: [DyadkovPG@ipgg.sbras.ru](mailto:DyadkovPG@ipgg.sbras.ru),

Цибизов Леонид Валерьевич<sup>2</sup> — младший научный сотрудник, e-mail: [tsibizov.lv@gmail.com](mailto:tsibizov.lv@gmail.com),

<sup>1</sup> Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения РАН,

<sup>2</sup> Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН им. А.А.Трофимука.

---

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018. No. 2, pp. 140–147.

L.A. Nazarov, L.A. Nazarova, N.A. Miroshnichenko, A.V. Panov, P.G. Dyadkov, L.V. Tsibizov

## SEASONAL VARIATION IN THE WATER LEVEL OF THE BAIKAL LAKE AND WEAK SEISMICITY IN THE BAIKAL RIFT ZONE

Developed and implemented using the finite element method (with COMSOL Multiphysics), the 3D geomechanical model of the Baikal Rift Zone includes the detailed block and faulting structure of rocks mass and physical properties of structural blocks and joints estimated using geophysical and

seismo-tectonic information. Based on the data of seismicity catalog GlobalCMT (Harvard, USA) and model calculations of evolution of physical fields in the selected areas within the Baikal Rift System, the linear correlation has been performed between space and time of natural seismic events over a period from 1963 to 2017. The quantitative dependence between the number of weak seismic events (magnitude 2.7–4.5) and the increment in the major shearing stresses induced by the seasonal variation in the water level of the Baikal Lake is determined. The resultant empirical relations are valid along the faulting structures bordering the north-east and south-west shores of the Lake, and are applicable in prediction of seismic activity level in the mentioned areas of the Baikal Rift.

Key words: rock mass, geomechanical model, Baikal Rift Zone, weak seismicity, finite element method, correlation analysis.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-2-0-140-147

## AUTHORS

Nazarov L.A.<sup>1</sup>, Doctor of Physical and Mathematical Sciences,  
Head of Laboratory, e-mail: mining1957@mail.ru,

Nazarova L.A.<sup>1</sup>, Doctor of Physical and Mathematical Sciences,  
Chief Researcher, e-mail: larisa@misd.ru,

Miroshnichenko N.A.<sup>1</sup>, Candidate of Physico-Mathematical Sciences,  
Researcher, e-mail: mna@misd.ru,

Panov A.V.<sup>1</sup>, Junior Researcher, e-mail: anton-700@yandex.ru,

Dyadkov P.G.<sup>2</sup>, Candidate of Geologo-Mineralogical Sciences,  
Senior Researcher, e-mail: DyadkovPG@ipgg.sbras.ru,

Tsibizov L.V.<sup>2</sup>, Junior Researcher, e-mail: tsibizov@gmail.com

<sup>1</sup> Chinakal Institute of Mining of Siberian Branch

of Russian Academy of Sciences, 630091, Novosibirsk, Russia,

<sup>2</sup> Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian,

Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 630090, Novosibirsk, Russia.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The study has been partly supported by the Russian Foundation for Basic Research, Project No. 15-05-06977. The authors extend their thanks to the Computation Center of the Novosibirsk State University for the provision of computational resources.

## REFERENCES

1. Talwani P. On the nature of reservoir-induced seismicity. *Pure Appl. Geophys.* 1997. Vol. 150. pp. 473–492.
2. Liu S., Xu L., Talwani P. Reservoir-induced seismicity in the Danjiangkou Reservoir: a quantitative analysis. *Geophys. J. Int.* 2011. Vol. 185. pp. 514–528.
3. Tashlykova T., Ryashchenko T. *Inzhenernaya zashchita*. 2015. Vyp. 11.
4. Asming V. E., Baranov S. V., Vinogradov A. N., Vinogradov Yu. A. *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2009. Vol. 12, no 4, pp. 571–575.
5. Dyad'kov P. G. *Fizicheskaya mezomekhanika*. 2003. Vol. 6, no 1, pp. 55–61.
6. Ellsworth W. L. Injection-induced earthquakes. *Science*. 2013. Vol. 341, Issue 6142, 1225942.
7. Huang Y., Ellsworth W. L., Beroza G. C. Stress drops of induced and tectonic earthquakes in the central United States are indistinguishable. *Science Advances*. 2017 August 3(8): e1700772.
8. Nazarov L. A., Nazarova L. A., Yaroslavtsev A. F. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2011, no 6, pp. 6–13.
9. Logachev N. A. *Geologiya i geofizika*. 2003. Vol. 44, no 5, pp. 391–406.
10. Molnar P., Tapponier P. Cenozoic tectonics of continental collision. *Science*. 1975. Vol. 189, no 4201. pp. 419–426.
11. Zonenshayn L. P., Savostin L. A. *Vvedenie v geodinamiku* (Introduction to geodynamics), Moscow, Nedra, 1979, 311 p.
12. Logachev N. A., Florensov N. A. The Baikal system of rift valleys. *Tectonophysics*. 1978. no 45. pp. 1–13.

13. Dyad'kov P.G., Nazarov L.A., Nazarova L.A. *Geologiya i geofizika*. 1997. Vol. 38, no 12, pp. 2001–2010.
14. Dyad'kov P.G., Nazarov L.A., Nazarova L.A. *Geologiya i geofizika*. 1999. Vol. 40, no 3, pp. 373–386.
15. Dyad'kov P.G., Nazarov L.A., Nazarova L.A. *Fizicheskaya mezomekhanika*. 2004. Vol. 7, no 1, pp. 91–101.
16. Mel'nikova V.I., Radziminovich N.A. *Geologiya i geofizika*. 1998. Vol. 39, no 11, pp. 1598–1607.
17. Lukhnev A.V., San'kov V.A., Miroshnichenko A.I., Ashurkov S.V., Kale E. *Geologiya i geofizika*. 2010. Vol. 51, no 7, pp. 1006–1017.
18. Sherman S.I., Seminskiy K.Zh., Cheremnykh A.V. *Aktual'nye voprosy sovremennoy geodinamiki Tsentral'noy Azii* (Current issues of the modern geodynamics in the Central Asia), Novosibirsk, Izd-vo SO RAN, 2005, 297 p.
19. Lunina O.V., Gladkov A.S., Gladkov A.A. *Tikhookeanskaya geologiya*. 2012. Vol. 31, no 1, pp. 49–60.
20. Nazarova L.A. *Doklady Akademii nauk*. 1995. Vol. 342, no 6, pp. 804–808.
21. *Harvard Seismology Group*. URL: [www.seismology.harvard.edu/data](http://www.seismology.harvard.edu/data).
22. Barton N.R. Deformation phenomena in jointed rock. *Geotechnique*. 1986. Vol. 36, no 2, pp. 147–167.

## FIGURE

Fig. 1. BRZ faulting structure (a); layout of blocks under analysis (b); fragment of finite-element discretization of the computational domain (c).

Fig. 2. Amplitude of the maximum shearing stress  $\tau$  (MPa) under seasonal variation in the water level of the Lake Baikal at a depth of: 10 km (a); 20 km (b); 50 km (c).

Fig. 3. Weak earthquakes in blocks in the area of the northeastern shore of the Lake Baikal (see Fig. 1b) over the period of 1963–2017.

Fig. 4. Relationship of the coefficient  $K_{ij}$  and stresses  $\tau$  for two systems of blocks.

## TABLES

Table 1. Analysis of space and time of seismic activity and stress state in the Baikal Rift Zone.

Table 2. Coefficients in the empirical dependence (2).



## НОВИНКИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ГОРНАЯ КНИГА»



Кутузов Б.Н.

**Методы ведения взрывных работ.**

**Ч. 2. Взрывные работы в горном деле и промышленности:**

**Учебник для вузов**

Год: 2018, 3-е изд., стер.

Страниц: 512

ISBN: 978-5-98672-471-3

UDK: 622.233:622.235

Рассмотрены методы ведения взрывных работ при добыче полезных ископаемых, в строительстве и промышленности, способы бурения шпуров и скважин при добыче, геологоразведочных работах, при проведении подземных выработок в шахтах, опасных по взрыву газа и пыли, методы защиты персонала и оборудования от воздействия ударных воздушных волн при производстве массовых взрывов. В приложениях 1–4

даны примеры расчета массовых взрывов с использованием компьютерных программ, в приложении 5 — пути решения проблемы достижения горной промышленностью России мирового конкурентоспособного уровня. Для студентов вузов, обучающихся по специальности «Взрывное дело» направления подготовки «Горное дело».