УДК 550.34.622.83

ОБЪЕМНАЯ СТРУКТУРА АФТЕРШОКОВОЙ ОБЛАСТИ БАЧАТСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕ-НИЯ (*Кузбасс*) И НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ НЕДР ПОД РАЗРЕЗОМ А.А. Еманов^{1, 2}, А.Ф. Еманов¹, Е.В. Шевкунова¹, А.В. Фатеев^{1, 2}, Ю.Л. Ребецкий³

¹Алтае-Саянский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», 630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

> ²Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

³Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 123995, ул. Бол. Грузинская, 10, стр. 1, Москва, Россия

Бачатское землетрясение 18.06.2013 г. с магнитудой $M_L = 6.1$, с координатами эпицентра 54.29° с.ш., 86.17° в.д. произошло около одноименного угольного разреза. Оно является крупнейшим в мире техногенным землетрясением при добыче твердых полезных ископаемых. Зарегистрировано около 5000 афтершоков, рассмотрена структура афтершоковой области. Бачатское угольное месторождение находится в Присалаирской зоне Кузнецкой впадины и структурно является брахисинклиналью очень сложного строения с высокой степенью нарушенности и трещиноватости пород. Главное событие приурочено к борту разреза, а наибольшая плотность афтершоков наблюдается в его центральной части. В поперечном разрезе афтершоки образуют широкую область со смещением ее заглубленной части в сторону Кузнецкой впадины, в то время как ограничивающие впадину крупные разломы имеют наклон под Салаирский кряж. В срезе вдоль угольной выработки активизированная область похожа на ромб с горизонтальной диагональю на глубине 4 км на всю длину разреза и с уменьшением активизированной области в верхнем и нижнем направлениях. Активизирована область на глубину до 6 км, наблюдается локальная по размерам усиленная активизация недр на глубинах 1—3 км. На основе изучения очагов афтершоков обнаружено, что напряженное состояние недр Бачатского разреза, восстановленное по афтершокам, не соответствует механизму главного события.

Техногенные землетрясения, добыча угля, наведенная сейсмичность, напряженное состояние недр, Бачатское землетрясение, Кузбасс

VOLUMETRIC STRUCTURE OF THE BACHAT EARTHQUAKE (*Kuzbass*) AFTERSHOCK AREA AND STRESS STATE OF ROCK MASS UNDER OPEN-PIT MINE

A.A. Emanov, A.F. Emanov, E.V. Shevkunova, A.V. Fateev, Yu.L. Rebetsky

The Bachat earthquake (M = 6.1) with the epicenter coordinates of 54.29° N, 86.17° E occurred on June, 18 2013 near the Bachatsky coal strip mine, is the world's largest earthquake induced while mining solid minerals. More than 5000 aftershocks were registered and the spatial volumetric structure of the aftershock area was investigated. The Bachat coal field is located in the Salair zone of the Kuznetsk Depression and is represented by a brachysynclinal fold of a very complex structure characterized by the damage and fracturing behaviors of rocks. The main event is confined to the coal-mine pit wall, with the greatest density of aftershocks observed in its middle portion. In the cross section, aftershocks form a wide area with its deepened portion shifted towards the Kuznetsk Depression, while large faults bounding the depression dip down under the Salair Ridge. In the exposed pit wall, at a depth of 4 km, the activated area resembles a rhombus whose horizontal diagonal line runs across the entire length of the mine pit and decreases both in upward and downward directions. The area is seismically activated to a depth of 6 km, with more intense activation of rock mass observed within the 1–3 km depth interval. Results of the study of the mechanisms of aftershock sources revealed a disagreement between the stress state of rock mass of the Bachatsky open-pit coal mine modeled from the mechanisms of aftershocks, and the mainshock mechanism of the Bachat earthquake.

Human-induced earthquakes, coal mining, induced seismicity, Kuzbass, the stressed state of rock mass, the Bachat earthquake

введение

Добыча полезных ископаемых оказывает сильное воздействие на земную кору, техногенная сейсмичность возникает во всех регионах мира [Козырев и др., 2002; Холуб, 2007; Еманов и др., 2009, 2016, 2018; Мирзоев и др., 2009; Srinivasan et al., 2013; Malovichko, van Aswegen., 2013; Trifu, 2013; Адушкин, 2015, 2016; Адушкин, Турунтаев, 2015].

© Еманов А.А. [⊠], Еманов А.Ф., Шевкунова Е.В., Фатеев А.В., Ребецкий Ю.Л. [⊠]e-mail: referent@gs.sbras.ru

Угольный разрез Бачатский ведет добычу угля с 1948 г. К настоящему времени добыто около 400 млн т угля. В 2013 г. размеры выработки составляли 2.3 × 10 км при глубине около 320 м, а к 2018 г. размеры выросли до 3 × 11 км при глубине 400 м. Учитывая, что вокруг разреза за десятилетия выросли огромные горы отвалов, можно представить, какое техногенное воздействие на напряженное состояние недр оказывает данное рукотворное творение. В последние годы добыча угля составляят около 9.5 млн т/год, и это является фактором постоянного высокого уровня техногенного воздействия на земную кору.

Бачатское землетрясение 18.06.2013 г. с $M_L = 6.1$, с координатами эпицентра 54.29° с.ш., 86.17° в.д. и с глубиной очага 4 км в Кемеровской области является крупнейшим в мире техногенным землетрясением при добыче твердых полезных ископаемых. Оно породило мощнейший афтершоковый процесс.

Район Бачатского угольного разреза выделялся как зона с постоянным уровнем техногенной сейсмичности задолго до Бачатского землетрясения. В районе разреза в 2012 г. (до Бачатского землетрясения) были установлены 25 временных станций, что позволяло получать информацию с большей точностью о координатах событий, глубинах и изучать их механизмы [Еманов и др., 2016]. Афтершоковый процесс Бачатского землетрясения изучался 10 временными станциями в зоне разреза совместно с 17 стационарными станциями в Кузбассе и с привлечением станций Алтае-Саянского региона. Непрерывные сейсмологические исследования с плотной сетью станций в районе Бачатского разреза обеспечивают получение информации об объекте с высокой техногенной сейсмической активностью в условиях непрерывного воздействия на недра при продолжающейся добыче угля.

Главными задачами исследования являются изучение объемной структуры сейсмической активизации, мониторинг сейсмичности во времени в условиях непрерывного техногенного воздействия и восстановление напряженного состояния недр разреза по механизмам очагов землетрясений. Изучение ведется по сейсмограммам, полученным с плотных временных сетей станций в районе разреза совместно с данными станций региональной сети.

АФТЕРШОКОВЫЙ ПРОЦЕСС В РАЙОНЕ БАЧАТСКОГО УГОЛЬНОГО РАЗРЕЗА

После Бачатского землетрясения зарегистрировано около 5000 афтершоков. Согласно рис. 1, *а* сейсмический процесс полностью приурочен к разрезу, длинная ось афтершоковой области располагается вдоль него. Глубины большинства афтершоков составляют от 6 км до ложа разреза. Глубина Кузнецкой впадины достигает 11 км, соответственно, гипоцентры всех афтершоков фиксируются в осадочном чехле. Наиболее крупные землетрясения с $M_L = 3.5$ —4.0 концентрируются на юге разреза, где и произошло главное событие.

На рисунке 1, б дана карта плотности афтершоков Бачатского землетрясения. Главное событие и большинство крупных афтершоков приурочены к борту выработки, но в то же время максимальное число афтершоков происходит под выработкой. За пределами разреза повышенная плотность событий наблюдается под отвалами.

Большое количество землетрясений в районе разреза Бачатский позволяет более детально, чем это имеет место в районе других горных выработок, изучить объемную структуру сейсмически активизированных недр. Исследования структуры активизированных разломов по множеству слабых землетрясений дают очень важную информацию о процессах в очагах крупных землетрясений [Кочарян и др., 2010; Шерман, 2014; Еманов и др., 2021; Кочарян, Остапчук, 2022]. Для построения структуры сейсмической активизации под разрезом Бачатский использован каталог землетрясений без энергетических характеристик (рис. 2).

На рисунке 3 представлен разрез афтершоковой области. Можно видеть, что афтершоковая область в данном разрезе имеет ярко выраженное смещение на северо-восток с увеличением глубины. Угол наклона относительно вертикали составляет примерно 9°. Наибольшая плотность афтершоков наблюдается на глубинах около 2 км и около 4 км. Основное количество сильных ($M_L \ge 3$) афтершоков происходит на глубинах 3—5 км.

На рисунке 4 представлен вертикальный разрез афтершоковой области вдоль разреза. На глубине около 4 км отмечается сгущение гипоцентров землетрясений, вытянувшееся на всю длину угольного разреза. На ме́ньших и бо́льших глубинах активизированная область сужается. В целом афтершоковая область выглядит как ромб с наиболее сейсмоактивной горизонтальной диагональю.

Глубина Кузнецкой впадины достигает 11 км [Крылов и др., 1971]. Изучение напряженного состояния по механизмам очагов может быть выполнено в районе разреза для верхней части осадков.

График сейсмического процесса (рис. 5) заставляет задуматься: имеем мы дело с афтершоковым процессом одного землетрясения или же с техногенной активизацией, энергия которой связана с непрерывным воздействием горных работ на геосреду. Можно сделать выводы о свойствах сейсмического процесса:

 – сейсмический процесс около разреза Бачатский непрерывен и нестационарен: выделяются периоды пониженного уровня сейсмичности по энергии сильных землетрясений и пониженной частотой





Рис. 1. Афтершоки Бачатского землетрясения.

а — карта эпицентров афтершоков с 18.06 2013 по 12.12.2020 г.; *б* — карта плотности землетрясений для этого периода. *I* — города, *2* — сейсмические станции (2013 г.), *3* — разрезы, *4* — контуры разрезов, *5* — эпицентр землетрясения 18.06.2013 г. ($M_L = 6.1$), *6* — магнитуда землетрясений с 18.06.2013 по 12.06.2020 г.; *7* — плотность землетрясений в пределах круга с радиусом R = 0.8 км.

Рис. 2. Карта афтершоков Бачатского землетрясения и линии глубинных разрезов (А—В, С—D).

Пересечение линий соответствует координатам Бачатского землетрясения 2013 г. с $M_L = 6.1. 1$ — разрезы, 2 — землетрясения.

слабых, и периоды с сильными землетрясениями; длительность активизаций 1—3 месяца;

 изменчивость во времени сейсмической активности недр разреза свидетельствует о сильном влиянии процесса добычи угля на изменение напряженного состояния.

В результате непрерывного мониторинга сейсмического процесса в районе Бачатского землетрясения можно видеть (см. рис. 5), что в ноябре 2018 — феврале 2019 г. наблюдалась еще одна активизация недр разреза с магнитудами событий до $M_L = 4$. В дальнейшем в 2019 и 2020 гг. крупнейшие техногенные землетрясения имели магнитуды порядка $M_L = 3$.

В данной работе, прежде всего, интересует количество событий, для которых можно уверенно определять механизмы очагов землетрясений. Большинство слабых землетрясений не регистрируется достаточным для опре-



деления механизма числом станций, но даже определение механизмов очагов части событий позволяет сформировать достаточную выборку для изучения напряженного состояния недр. Каталог механизмов очагов содержит 96 определений. Фактически охвачена вся площадь разреза. Наиболее сильные землетрясения регистрировались большим количеством сети станций Алтае-Саянской области, и механизмы очагов определялись уверенно (рис. 6).

АЛГОРИТМЫ РАСЧЕТА НАПРЯЖЕНИЙ

Инверсия напряжений из данных о механизмах землетрясений выполнялась с помощью программы STRESSseism. Алгоритм программы базируется на методе катакластического анализа разрывных







Здесь и на рис. 4: красными точками обозначены события с $M_L \ge 3$.



Рис. 4. Вертикальный разрез афтершоковой области по линии А-В вдоль разреза.

смещений (МКА), который позволяет рассчитывать параметры стресс-эллипсоида (ориентация главных осей и форма эллипсоида) и нормированные величины шаровой (давление с обратным знаком) и девиаторной (максимальные касательные напряжения) компонент тензора напряжений [Rebetsky, 1996; Ребецкий, 2003а].

Главным элементом первого этапа обработки является создание однородных выборок землетрясений, характеризующих квазиоднородную фазу деформирования объема геосреды. Создание выборки выполняется по параметрам: расстояние от гипоцентра до точки расчета, время возникновения и магнитуда землетрясения. Подробнее данный этап обработки описан в работах [Ребецкий, 2003б, 2005].

По однородной выборке механизмов очагов землетрясений проводится определение параметров главных осей напряжений на нижней полусфере единичного радиуса. Алгоритм этой части МКА соответствует методам [Гущенко, 1979]. На его основе на полусферах выделяются сектора возможного нахождения осей главного сжатия и растяжения. Параллельно с этим производится расчет параметров тензора приращений сейсмотектонических деформаций. Он используется для определения единственного решения для областей возможного выхода осей главных напряжений.

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ НЕДР БАЧАТСКОГО РАЗРЕЗА

Расчеты напряженного состояния выполнялись по равномерной сетке $0.002 \times 0.002^{\circ}$. С использованием программы STRESSseism из каталога механизмов очагов создано 376 однородных выборок, для которых рассчитаны параметры тензора напряжений. Размер окна усреднения напряжений автоматически подбирала программа, оно меняется в диапазоне от 0.5 до 2 км по латерали. По времени окно усреднения меняется от нескольких дней до нескольких лет. Минимальное число событий в выборке 6. На рисунке 7 даны карты осей напряжений главного сжатия и растяжения, карта геодинамического типа напряженного



Дата, год-месяц-день

Рис. 5. Сейсмический процесс после Бачатского землетрясения на плоскости магнитуда—время с 18.06. 2013 по 01.07. 2021 г.

Рис. 6. Механизмы очагов некоторых афтершоков Бачатского землетрясения.

I — эпицентр Бачатского землетрясения, *2* — эпицентры землятресений с соответствующей магнитудой (*M_L*), *3* — год.

состояния и карта коэффициента Лоде—Надаи, определяющего форму эллипсоида напряжений.

На фоне преобладающего простирания главного сжатия в северо-западном и юго-восточном направлениях с пологими углами погружения (0—7°) выделяются области на северо-западе и на северо-северо-востоке с более крутыми углами погружения (8—30°), в юго-западной части виден участок с углами погружения до 60°. Главное растяжение характеризуется большим разнообразием углов погружения, при преобладающем юго-западном простираниии.

Простирание осей главного сжатия, полученного по реконструкции, отличается от ориентации оси наибольшего сжимающего напряжения (ось P) фокального механизма Бачатского землетрясения (рис. 8), а простирание оси T фокального механизма соответствует результатам реконструкции напряжений.

Несовпадение ориентации оси главного сжатия снимаемых напряжений фокального механизма Бачатского землетрясения и осей главного сжатия по результатам инверсии требует обсуждения. Важно отметить, что оси *P* и *T* фокального



механизма определяют ориентацию снимаемых напряжений. В этом случае наибольшее сжатие субгоризонтально, а оси главных напряжений растяжения субвертикальны. Поскольку вертикальное напряжение формируется весом горных пород, можно предположить, что в этом направлении оно мало изменяется после сильного землетрясения.

В интерпретации результатов восстановления напряженного состояния локального участка осадков Кузнецкой впадины под работающим угольным разрезом Бачатский может быть два подхода. Один подход основан на модели среды, в которой напряженное состояние не зависит от магнитуды землетрясений, а второй — на модели земной коры с иерархией напряженного состояния, в которой напряженное состояние восстанавливается по очагам разного уровня магнитуд [Осокина, 1987].

В первом случае мы полагаем, что в результате сильного техногенного землетрясения, имевшего характерный размер очага порядка 10 км, произошла перестройка поля напряжений за счет резкого снижения горизонтальных сжимающих напряжений северо-восточной и юго-западной ориентации. Полагаем, что до землетрясения оси главного сжатия и растяжения тектонических напряжений были близки по ориентации соответственно к осям *P* и *T* фокального механизма Бачатского землетрясения (см. рис. 8). При этом ось промежуточного главного напряжения субгоризонтальна и имеет северо-западную и юговосточную ориентацию (направление пересечения нодальных плоскостей фокального механизма Бачатского землетрясения).

Во втором случае модель напряженного состояния для крупных землетрясений одна, а для землетрясений с меньшими магнитудами — другая. Для изучения напряженного состояния земной коры во всем мире доминирует использование первой модели [Ребецкий, 2007]. Это можно объяснить недостаточно плотными сетями станций и отсутствием необходимого количества данных о механизмах очагов землетрясений для применения более сложной иерархической модели.

При исследовании афтершоков Чуйского землетрясения, когда десятки станций в афтершоковой области зарегистрировали более 50 тыс. событий с магнитудами от 0 до 7.3, данных было достаточно для применения иерархической модели напряженного состояния. Теоретические предсказания Д.Н. Осокиной [1987] были полностью доказаны, была построена иерархическая модель двух уровней для блоковой структуры всей афтершоковой области Чуйского землетрясения [Лескова, Еманов, 2011, 2013, 2014; Кучай, 2012]. Граница между событиями двух иерархических уровней проходила около $M_L \sim 4$. Для Бачат-





а, *б* — проекции на горизонтальную плоскость осей сжатия (σ_3) главных напряжений сжатия и осей растяжения (σ_1), построенные в направлении их погружения; точка определяет начало вектора погружения, а его длина зависит от угла погружения оси главного напряжения; *в* — геодинамический тип напряженного состояния: *I* — сдвиг с растяжением, *2* — горизонтальный сдвиг, *3* — горизонтальное сжатие, *4* — горизонтальный сдвиг со сжатием; *г* — вид эллипсоида напряжений (желтый — чистый сдвиг, красный — одноосное сжатие, светло-красный — состояние между чистым сдвигом и одноосным сжатием; синий — одноосное растяжение, голубой — состояние между чистым растяжением).

ского разреза нет достаточного количества землетрясений с магнитудами более 4, соответственно, нет возможности обосновать применение иерархической модели напряженного состояния недр разреза.

Мы обнаружили несоответствие механизма главного события модели напряженного состояния, полученного по механизмам афтершоков. В случае иерархической модели напряженного состояния



земной коры эти различия могли бы иметь совсем другое объяснение, чем представленные в данной работе, но обоснована модель без иерархии, поэтому дальнейшая интерпретация выполняется в рамках этой модели. В построениях использовались афтершоки Бачатского землетрясения. Следовательно, модель напряженного состояния соответствует периоду после главного толчка и перед Бачатским землетрясением напряженное состояние могло быть иным.

Рис. 8. Механизм очага главного толчка Бачатского землетрясения.

P — ось сжатия; T — ось растяжения.

В вопросе о природе Бачатского землетрясения к данному моменту наблюдается довольно хорошее единство мнений [Еманов, 2016; Батугин, 2018; Кочарян и др., 2019; Emanov et al., 2021]. Основная причина — это перемещение масс горной породы и создание нового рельефа местности. В Алтае-Саянской складчатой области природная сейсмичность концентрируется преимущественно в горных обрамлениях впадин [Еманов и др., 2006]. Развитие сейсмичности в Кузбассе за последние два десятилетия приурочено к горным предприятиям и осадочному бассейну впадины [Еманов и др., 2018]. Бачатское землетрясение и протекающая активизация недр около разреза имеют техногенную природу и связаны с непрерывным изменением рельефа местности и напряженного состояния верхней части земной коры.

выводы

Установлен факт отличия модели напряженного состояния района Бачатского разреза, восстановленного по механизмам афтершоков, от механизма главного толчка Бачатского землетрясения.

Наибольшая плотность очагов афтершоков наблюдается под выработкой от ее центра в виде вытянутой области к северо-западу, наиболее крупные землетрясения происходили вне этой области в юго-восточной части выработки и чаще приурочены к борту, а не к центру.

Объемная структура афтершоков, длинная ось которой располагается вдоль разреза, с увеличением глубины смещается на северо-восток. Угол наклона относительно вертикали примерно 9°. Наибольшая плотность афтершоков наблюдается на глубинах около 2 и 4 км. Основное количество сильных $(M_1 \ge 3)$ афтершоков происходит на глубинах 3—5 км.

Сейсмический режим техногенной активизации во времени непрерывен и нестационарен: выделяются периоды сейсмичности с пониженной энергией сильных землетрясений и с меньшим количеством слабых событий, а также периоды с сильными и крупными землетрясениями и увеличенной частотой слабых событий. Нестационарность сейсмического процесса, скорее всего, вызвана непрерывным техногенным воздействием на недра.

Авторы благодарны д. т. н. Ю.И. Колесникову и к.ф.-м. н. О.А. Кучай за полезные замечания, способствовавшие улучшению работы.

Работа выполнена в рамках государственного задания Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» по проекту № 075-01271-23 с использованием данных, полученных на УНУ СИЗК МАК (https://ckp-rf.ru/usu/507436/) и Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН по проекту ФНИ № FWZZ-2022-0021 «Региональные особенности структуры земной коры и верхов мантии платформенных и складчатых областей Сибири, их напряженнодеформированное состояние по данным сейсмологии, гравиметрии и геомеханики», а также в рамках договора № 07/23 от 09.01.2023 с АО «Кузбассразрезуголь» филиала Бачатский угольный разрез.

ЛИТЕРАТУРА

Адушкин В.В. Триггерная сейсмичность Кузбасса // Триггерные эффекты в геосистемах. М., ГЕОС, 2015, с. 8—28.

Адушкин В.В. Тектонические землетрясения техногенного происхождения // Физика Земли, 2016, № 2, с. 8—28.

Адушкин В.В., Турунтаев С.Б. Техногенная сейсмичность — индуцированная и триггерная. М., ИДГ РАН, 2015, 364 с.

Батугин А.С. Бачатское техногенное землетрясение как разрядка предельного напряженного состояния участка земной коры. // Горный информационно-аналитический бюллетень, 2018, № S49, с. 487—495.

Гущенко О.И. Метод кинематического анализа структур разрушения при реконструкции полей тектонических напряжений // Поля напряжений и деформаций в литосфере. М., Наука, 1979, с. 7—25.

Еманов А.Ф., Еманов А.А., Филина А.Г., Лескова Е.В., Колесников Ю.И., Рудаков А.Д. Общее и индивидуальное в развитии афтершоковых процессов крупнейших землетрясений Алтае-Саянской горной области // Физическая мезомеханика, 2006, т. 9, № 1, с. 33—44.

Еманов А.Ф., Еманов А.А., Лескова Е.В., Фатеев А.В., Семин А.Ю. Сейсмические активизации при разработке угля в Кузбассе // Физическая мезомеханика, 2009, т. 12, № 1, с. 37—43.

Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В., Лескова Е.В. Техногенное Бачатское землетрясение 18.06.2013 в Кузбассе — сильнейшее в мире при добыче твердых полезных ископаемых // Вопросы инженерной сейсмологии, 2016, т. 43, № 4, с. 34—60.

Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В., Шевкунова Е.В., Ворона У.Ю., Сережников Н.А. Сейсмический эффект промышленных взрывов в Западной Сибири и наведенная сейсмичность // Вопросы инженерной сейсмологии, 2018, т. 45, № 4, с. 63—79. **Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В.** Сейсмотектоника активизированной объемной структуры разломов: результаты исследования строения верхнекоровой очаговой области Чуйского землетрясения $M_s = 7.3$, произошедшего 27 сентября 2003 г. в Горном Алтае (Россия) // Геотектоника, 2021, № 2, с. 94—104.

Козырев А.А., Панин В.И., Савченко С.Н., Козырев С.А., Мальцев В.А., Рыбин В.В., Тимофеев В.В., Федотова Ю.В., Паничкин С.А., Каспарьян Э.В., Ловчиков А.В., Кузьмин И.А., Енютин А.Н., Семенова А.И., Завьялов А.Д., Смирнов В.Б., Свинин В.С., Аккуратов М.Б. Сейсмичность при горных работах. Апатиты, Изд-во Горного института КНЦ РАН, 2002, 319 с.

Кочарян Г.Г., Остапчук А.А. Мезоструктура зоны скольжения тектонического разлома // Физическая мезомеханика, 2022, т. 25, № 5, с. 94—105.

Кочарян Г.Г., Кишкина С.Б., Остапчук А.А. Сейсмический портрет разломной зоны. Что может дать анализ тонкой структуры пространственного расположения очагов слабых землетрясений? // Геодинамика и тектонофизика, 2010, т. 4, № 1, с. 419—440.

Кочарян Г.Г., Будков А.М., Кишкина С.Б., Иванченко Г.Н. О генезисе Бачатского землетрясения 2013 года // Геодинамика и тектонофизика, 2019, т. 10, № 3, с. 741—759.

Крылов С.В., Рудницкий А.Л., Суворов В.Д., Крылова А.Л. Глубинные сейсмические исследования в районе Салаирского кряжа // Геология и геофизика, 1971 (7), с. 79—83.

Кучай О.А. Особенности поля напряжений афтершоковых процессов землетрясений Алтае-Саянской горной области // Геодинамика и тектонофизика, 2012, т. 3, № 3, с. 59—68.

Лескова Е.В., Еманов А.А. Напряженно-деформированное состояние Чуйско-Курайской зоны (Горный Алтай) // Современная тектонофизика. Методы и результаты. Материалы Второй молодежной школы семинара. Т. 1. М., ИФЗ РАН, 2011, с. 154—160.

Лескова Е.В., Еманов А.А. Иерархические свойства поля тектонических напряжений в очаговой области Чуйского землетрясения 2003 года // Геология и геофизика, 2013, т. 54 (1), с. 113—123.

Лескова Е.В., Еманов А.А. Некоторые свойства иерархической модели напряженного состояния эпицентральной области Чуйского землетрясения 2003 г. // Физика Земли, 2014, № 3, с. 92—102.

Мирзоев К.М., Николаев А.В., Лукк А.А., Юнга С.Л. Наведенная сейсмичность и возможности регулируемой разрядки накопленных тектонических напряжений в земной коре // Физика Земли, 2009, № 10, с. 49—68.

Осокина Д.Н. Об иерархических свойствах тектонического поля напряжений и деформаций в земной коре // Поля напряжений и деформаций в земной коре. М., Наука, 1987, с. 136—151.

Ребецкий Ю.Л. Развитие метода катакластического анализа сколов для оценки величин тектонических напряжений // ДАН, 2003а, т. 400, № 3, с. 237—241.

Ребецкий Ю.Л. Напряженно-деформированное состояние и механические свойства природных массивов по данным о механизмах очагов землетрясений и структурно-кинематическим характеристи-кам трещин: Автореф. дис.... д.ф.-м. н. М., ОИФЗ РАН, 2003б, 54 с.

Ребецкий Ю.Л. Оценка относительных величин напряжений — второй этап реконструкции по данным разрывных смещений // Геофизический журнал, 2005, т. 27, № 1, с. 39—54.

Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность природных массивов. М., ИЦК Академ-книга, 2007, 406 с.

Холуб К. Наведенная сейсмичность при добыче угля лавами в шахтах Чехии // ФТПРПИ, 2007, № 1, с. 37—44.

Шерман С.И. Сейсмический процесс и прогноз землетрясений: тектонофизический аспект. Новосибирск, Изд-во «Гео», 2014, 359 с.

Emanov A.A., Emanov A.F., Rebetsky Y.L., Kuprish O.V., Fateev A.V., Shevkunova E.V. Induced seismicity of the Bachat coal mine and the stress state of the Earth's crust // J. Volcanol. Seismol., 2021, v. 15 (6), p. 435–444.

Malovichko D., van Aswegen G. Testing of the source processes of mine related seismic events // 8th Int. Symp. Rockbursts and Seismicity in Mines. St. Petersburg, Moscow, 1—7 September 2013. Obninsk, GS RAS, 2013, p. 93—106.

Rebetsky Yu.L. I. Stress-monitoring: Issues of reconstruction methods of tectonic stresses and seismotectonic deformations // J. Earthquake Prediction Res., 1996, v. 5 (4), p. 557—573.

Srinivasan C., Willy Y.A., Carter R.M. Characteristics of rockbursts in the flooded mines of Kolar Gold Fields // 8th Int. Symp. Rockbursts and Seismicity in Mines. St. Petersburg, Moscow, 1—7 September 2013. Obninsk, GS RAS, 2013, p. 517—524.

Trifu C.-I. Keynote Lecture: The use of moment tensor solutions in the analysis of mine seismicity: evaluation and interpretation // 8th Int. Symp. Rockbursts and Seismicity in Mines. St. Petersburg, Moscow, 1—7 September 2013. Obninsk, GS RAS, 2013, p. 109—120.