

РАЗВИТИЕ ТЕХНОГЕННО-ТЕКТОНИЧЕСКОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ В КУЗБАССЕ**В.В. Адушкин***Институт динамики геосфер РАН, 119334, Москва, Ленинский просп., 38, корп. 1, Россия*

Представлен анализ развития современной сейсмической обстановки на территории Кузнецкого угольного бассейна, которая характеризуется ростом различных форм техногенно-наведенной сейсмичности, появляющейся под воздействием длительных и интенсивных горно-взрывных работ. По мере развития техногенеза заметный рост техногенной сейсмичности в Кузбассе начался примерно в 70-80-е годы прошлого столетия, когда их количество стало превышать число природных землетрясений. Среди различных форм наведенной сейсмичности особое внимание в работе уделено сильным тектоническим землетрясениям техногенного происхождения, характеризующимся величиной региональной магнитуды $M_b \geq 3$ и, соответственно, выделением сейсмической энергии свыше 10^9 Дж, т. е. энергетического класса $K > 9$, которые будучи мелкофокусными сопровождаются зачастую разрушениями подземных выработок, обрушениями бортов карьеров и разрезов, повреждениями наземных сооружений и оборудования и другими негативными последствиями. Подобные землетрясения определены в данной работе как техногенно-тектонические, подчеркивая тем самым двойственную природу их происхождения – наличие техногенных воздействий и последующая релаксация образовавшихся очагов тектонических напряжений. Отмечено также, что недра Кузбасса изначально характеризовались собственной природной сейсмичностью и развитой системой тектонических разломов. В результате сочетания природной сеймотектонической активности, постоянно возрастающих объемов горных работ и потребления взрывчатых веществ (ВВ) наблюдается увеличение потоков техногенных сейсмических событий и рост их интенсивности. Ярким примером такого события явилось Бачатское землетрясение 18 июня 2013 г. с региональной магнитудой $M_b = 5.8$ и интенсивностью сейсмических колебаний 7 баллов в эпицентральной зоне, ставшее крупнейшим в мире техногенным землетрясением при добыче твердых полезных ископаемых. В работе изложены возможные причины образования этого катастрофического землетрясения. Обсуждаются также условия образования очагов подобных техногенно-тектонических землетрясений, возникающих в результате изменений геодинамического и гидрогеологического режимов в земной коре под воздействием внешней техногенной нагрузки. Эти вынужденные изменения природных процессов сопровождаются соответствующей перестройкой напряженно-деформированного состояния, в результате которой на неоднородностях и в разломных зонах возникают очаги концентрации тектонических напряжений, становясь источниками техногенно-наведенной сейсмичности.

В работе обсуждается современный период возникновения и роста подобной техногенной сейсмичности на территории Кузбасса, который развивается в условиях увеличения масштабов добычи каменного угля и горно-взрывных работ. Так, потребление ВВ на предприятиях Кузбасса за последние 20 лет возросло от 100—200 до 500—600 тыс. т/год, и, соответственно, выросли объемы разрушенной и перемещаемой горной породы от нескольких млн т/год до млрд т/год, что нарушало динамическое равновесие в недрах земной коры и изменяло существующее поле тектонических напряжений. Более того, непрерывный рост потребления ВВ также дополнительно увеличивал техногенное воздействие на структуры земной коры. По расположению эпицентров крупномасштабных массовых взрывов, создающих сейсмические события с региональными магнитудами в диапазоне $M_b = 3.0—4.5$, на территории Кузбасса выделены регионы с наибольшей величиной техногенной нагрузки. Проведено разделение сейсмических событий указанного диапазона магнитуд на дневные и ночные по данным сейсмологического каталога ISC. Ночные события на основании запрета проведения взрывных работ в ночное время отнесены к категории техногенно-тектонических землетрясений (критерий «ночные события»). Была определена также величина максимальной магнитуды сейсмического события, создаваемого взрывными работами в условиях Кузбасса, которая составила величину $M_b \leq 4.4$. На основании критерия «ночные события» установлено ежегодное число техногенно-тектонических землетрясений в диапазонах магнитуд $3.0 \leq M_b \leq 3.4$; $3.5 \leq M_b \leq 3.9$; $4.0 \leq M_b \leq 4.4$ и $M_b \geq 4.5$. По расположению эпицентров техногенно-тектонических землетрясений выделены регионы их возникновения.

*Техногенез, сейсмичность, техногенное землетрясение, магнитуда.***TECHNOGENIC TECTONIC SEISMICITY IN KUZBASS****V.V. Adushkin**

This paper presents an analysis of the development of the current seismic state of the Kuznetsk coal basin, which is characterized by an increase in technogenic seismicity of different types under the influence of prolonged intensive mining operations. The development of technogenesis led to a significant increase in technogenic seismicity in the Kuznetsk Basin in the 1970–1980s, when the number of technogenic earthquakes began

to exceed the number of natural earthquakes. Among the various types of induced seismicity, special attention is paid to strong technogenic tectonic earthquakes with a regional magnitude $M_b \geq 3$ and, accordingly, a seismic energy release of more than 10^9 J, i.e., earthquakes of energy class $K > 9$. These small-focus earthquakes are often accompanied by destruction of underground mines, collapse of quarries and pits, damage to surface facilities and equipment, and other adverse effects. In this paper, such earthquakes are defined as technogenic tectonic to emphasize their dual origin: technogenic impacts and the subsequent relaxation of tectonic stresses. It is also noted that the Earth's interior in Kuzbass initially had its own natural seismicity and a developed system of tectonic faults. Natural seismotectonic activity combined with constantly increasing scales of mining and explosive consumption has led to an increase in the number of technogenic seismic events and their intensity. A striking example of such an event was the 18 June, 2013 Bachat earthquake with a regional magnitude $M_b = 5.8$ and a seismic intensity of 7 in the epicentral zone. It was the world's largest man-made earthquake induced by the mining of solid minerals. We consider the possible causes of this catastrophic earthquake and discuss the conditions favoring the formation of foci of such technogenic tectonic earthquakes resulting from changes in the geodynamic and hydrogeological conditions in the Earth's crust under man-caused impacts. These induced changes in natural processes are accompanied by a change in the stress-strain state, resulting in the concentration of tectonic stresses at heterogeneities and in fault zones, which become sources of induced technogenic seismicity.

The paper discusses the current period of the occurrence and increase in such anthropogenic seismicity in the Kuzbass region with increasing scales of coal mining and blasting. Over the last 20 years, the consumption of explosives at Kuzbass enterprises increased from 100–200 to 500–600 thousand tons per year, and, accordingly, the amounts of broken and transported rock increased from several million tons per year to a billion tons per year, which disturbed the dynamic equilibrium in the Earth's crust and changed the existing field of tectonic stresses. Moreover, the continuously increasing consumption of explosives has also increased the technogenic impact on the crust structures. The location of the epicenters of large-scale blasts inducing seismic events with regional magnitudes $M_b = 3.0$ –4.5 has made it possible to identify regions with the greatest technogenic impact in Kuzbass. Using the data of the ISC seismological catalog, we separated seismic events with the above magnitudes into day and night ones. Since blasting work is forbidden at night, night seismic events are referred to as technogenic tectonic earthquakes (night event criterion). The maximum magnitude of seismic events induced by blasting operations in the Kuznetsk Basin was estimated at $M_b \leq 4.4$. The annual number of technogenic tectonic earthquakes with $3.0 \leq M_b \leq 3.4$, $3.5 \leq M_b \leq 3.9$, $4.0 \leq M_b \leq 4.4$, and $M_b \geq 4.5$ was determined based on the night event criterion. The regions of their occurrence were identified from the location of the epicenters of technogenic tectonic earthquakes.

Technogenesis, seismicity, technogenic earthquake, magnitude

ВВЕДЕНИЕ

Техногенная сейсмичность является неизбежным следствием техногенеза, развивающегося в окружающей среде, в частности, в той ее жизненно важной сфере, которая связана с ростом объемов и глубины добычи полезных ископаемых из недр Земли, а также эволюцией энергообразующих отраслей промышленности и освоением подземного пространства. Среди различных форм техногенной сейсмичности выделяются своими катастрофическими последствиями наведенные сильные землетрясения триггерного происхождения, характеризующиеся региональной магнитудой $M_b \geq 3.0$ (энергетический класс $K > 9$) и излучаемой сейсмической энергией на уровне $E > 10^9$ Дж. Очаги таких землетрясений формируются в тектонически напряженных, неоднородных и блочных структурах земной коры под воздействием внешних техногенных нагрузок, нарушающих существующее динамическое равновесие, приводя к перестройке напряженно-деформированного состояния и образованию зон концентрации напряжений. Подобные землетрясения, обладая, может быть, не очень высокой магнитудой по сравнению с природными катастрофическими землетрясениями, опасны тем, что их очаги расположены в приповерхностных слоях земной коры и образуют сейсмические колебания высокой балльности.

В более ранних работах автор определил такие землетрясения, как техногенно-тектонические [Адушкин, 2015, 2016], подчеркнув тем самым двойственную природу их происхождения – наличие техногенного воздействия и последующая релаксация очага тектонических напряжений. Возникновение техногенно-тектонических землетрясений в случае горных работ происходит под воздействием на породный массив всего комплекса буровзрывных работ, включая разрушение, извлечение и перемещение значительных объемов горной породы и потоков сейсмической (кинетической) энергии, создаваемых массовыми взрывами. Эти динамические воздействия порождают вибрационно-колебательные движения и относительные смещения блоковых структур земной коры, а также необратимые деформации по контактам и зонам разломов, приводя к концентрации на них тектонических напряжений как очагов землетрясений, сейсмическая энергия которых может превышать энергию массовых взрывов. Таким образом, техногенно-тектонические землетрясения отличаются от природных тем, что образование их очагов происходит в результате вынужденной техногенными воздействиями перестройки геодинамического режима и поля тектонического напряженного состояния, существующего в структурах

земной коры. Очаги подобных землетрясений образуются обычно в верхних слоях земной коры в зоне внешних техногенных воздействий, при отсутствии которых землетрясение не появилось бы. При возникновении подобных землетрясений может отсутствовать очевидная связь месторасположения очага и время его релаксации с местом и временем техногенных воздействий. Скрытый саморегулируемый характер подготовки таких техногенно-тектонических землетрясений при одновременном участии собственной энергонасыщенности породного массива и энергетических потоков от внешних техногенных источников существенно осложняет изучение причин и механизмов их возникновения.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В данной работе рассмотрены и обсуждаются условия образования и развития сильных техногенно-тектонических землетрясений триггерного характера на территории Кузнецкого угольного бассейна (Кузбасса). Дело в том, что Кузбасс уже много лет привлекает к себе внимание тем, что на его территории получили развитие многочисленные формы техногенеза, обусловленные его индустриальным развитием на базе горно-добывающих отраслей промышленности. Проводимые горные работы по добыче полезных ископаемых сопровождаются разномасштабными горными ударами, провалами поверхности и развитием на ней глубоких трещин, внезапными выбросами и взрывами метана при подземной добыче, а также различными типами наведенной сейсмичности, образованием газопылевых облаков, сейсмических и ударных волн в атмосфере при открытой добыче на разрезах и карьерах. Ниже из отмеченных негативных факторов техногенеза более подробно будут рассмотрены процессы образования наведенных техногенно-тектонических землетрясений. Кузбасс в отношении их возникновения и развития располагает основными необходимыми для этого условиями — большая техногенная нагрузка на земную кору и изначально, еще до начала добычи угля, высокий уровень природной сейсмичности и развитая система тектонически-активных разломов. В результате сочетания природной сеймотектонической активности и возрастающих объемов добычи угля и перемещаемой горной массы на территории Кузбасса отмечается увеличение потока техногенных сейсмических событий и рост интенсивности отдельных техногенно-тектонических землетрясений. Кульминационным событием в развитии техногенно-тектонической сейсмичности явилось катастрофическое Бачатское землетрясение 18 июня 2013 г. в 23 ч 02 мин по всемирному времени (или 19 июня 2013 г. в 6 ч 02 мин утра местного времени), которое, по данным Геофизической службы РАН и Международного сейсмологического центра (ISC), характеризовалось региональной магнитудой $M_b = 5.8$ и глубиной очага 10—14 км. По данным местных сейсмологов, локальная магнитуда составила $M_L = 6.1$ и глубина очага 4 км [Еманов и др., 2014]. Эпицентр землетрясения располагался практически в центре Кемеровской области, вблизи г. Белово на территории Бачатского угольного разреза — одного из крупнейших угледобывающих предприятий Кузбасса. В эпицентральной зоне интенсивность колебаний составила 7 баллов и много зданий было разрушено и повреждено. В 5-балльной зоне оказались города Белово и Гурьевск, в 4-балльной — Прокопьевск, Киселевск, Новокузнецк, в 2-балльной — Новосибирск и Барнаул, расположенные на расстоянии около 200 км. Расположение эпицентра на территории Бачатского разреза, небольшая глубина и высокая энергия очага, на 2—3 порядка выше энергии массовых взрывов, несомненно, свидетельствуют о техногенно-тектонической природе этого землетрясения. Бачатское землетрясение стало знаменательным сейсмическим событием на территории Кузбасса, возникшим на фоне природной и активно развивающейся техногенной сейсмичности, в том числе сейсмических событий от взрывных работ. Представляется важным разобраться в причинах возникновения Бачатского землетрясения и особенностях развития техногенно-тектонической сейсмичности на территории Кузбасса.

Кузбасс расположен на территории Кемеровской области на юго-востоке Западно-Сибирской равнины в Кузнецкой котловине между горными сооружениями Кузнецкого Алатау на востоке и Салаирским кряжем на западе, протянувшимся от Новосибирска до Алтайских гор. На рис.1 показана карта региона, на которой выделены территория Кузбасса, где происходит добыча каменного угля, и территория Горной Шории на юге Кемеровской области, на которой разрабатываются железорудные месторождения Таштагола и Шерегеша. Показано также месторасположение эпицентра Бачатского землетрясения. В целом территория Кузбасса ограничена географическими координатами 53.0—56.5° с.ш. и 85—89° в.д. и занимает площадь свыше 150 тыс. км². Штриховыми линиями отмечены основные зоны сейсмического районирования территории Кузбасса и указана величина их балльности в соответствии с картами сейсмического районирования ОСР-97 [Комплект ..., 1998].

Крупные залежи каменного угля на территории Кемеровской области были открыты в 1721 г. Широкое освоение Кузнецкого угольного бассейна началось в 1930 г. Общие геологические запасы угля оцениваются в 600—700 млрд т. Примерно половина угля — антрациты, пригодные для коксования. Угольное месторождение расположено в приповерхностных слоях земной коры до глубины 1800—2000 м в виде многочисленных пластов среди осадочных пород, представленных перемежающимися

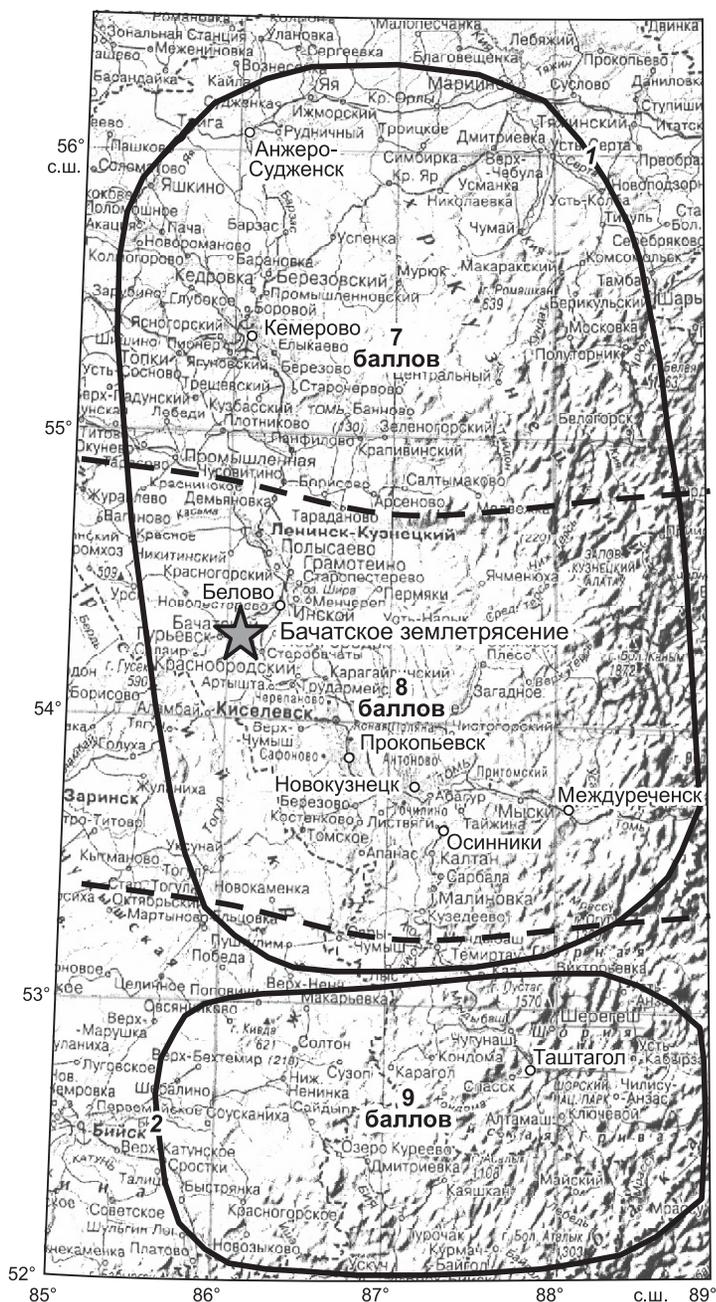


Рис. 1. Схема расположения эпицентра Бачатского землетрясения.

1, 2 — территории: Кузбасса (1) и Горной Шории (2), штриховыми линиями отмечены зоны сейсмического районирования ОСР-97.

слоями песчаника, алевролитов и аргиллитов. Так, разрез Бачатский разрабатывает месторождение, содержащее до 120 угольных пластов, разрез Междуреченский представлен примерно 30 угольными пластами толщиной до 12 м с наклоном 6—8°, которые местами рассечены разрывами с углами падения до 45°.

Важным фактором возникновения и развития техногенной сейсмичности на территории Кемеровской области является высокий уровень техногенных воздействий на земную кору. Техногенная нагрузка в Кузбассе характеризуется огромными объемами горных и взрывных работ. За длительный, более 80-летний период добычи извлечено порядка 10 млрд т угля и перемещена примерно такого же порядка масса вскрышных пород. Добыча угля в настоящее время приближается к 300 млн т/год. Разработка месторождения ведется подземным способом более чем на 60 крупных шахтах глубиной до 500—1000 м, и открытым способом примерно на 50 угольных разрезах с применением массовых взрывов в сотни и тысячи тонн ВВ. Буровые работы и механизированные системы добычи с применением угледобывающих комбайнов, экскаваторов и погрузочных механизмов оказывают вибрационное воздействие на породный массив. Взрывные работы характеризуются рекордным среди горно-добывающих регионов России потреблением ВВ, которое возросло в настоящее время до 600 тыс т/год. Такое

потребление ВВ обеспечивает объемы разрушения не менее 1 млрд м³/год, поскольку из данных по удельному расходу ВВ известно, что 1 кг ВВ разрушает в среднем 2 м³ горной породы. Взрывы такой массы ВВ создают в структурах земной коры потоки сейсмической (кинетической) энергии порядка 10¹³—10¹⁴ Дж/год, так как излучаемая сейсмическая энергия при взрыве ВВ в твердой скальной породе составляет 2—3 % начальной энергии взрыва [Взрывы..., 2013].

Возникновение техногенных землетрясений отмечено также на территории действующих шахт. Так, техногенная сейсмичность стала отчетливо проявляться с 2006 г. в районе г. Польшаево, где расположены поля действующих шахт Октябрьская и Польшаевская [Еманов и др., 2009]. Причем, по данным инструментальных наблюдений, гипоцентры многих сейсмических событий располагаются на глубинах 2—3 км, заметно ниже разрабатываемых пластов угля. Кроме того, значительный вклад в усиление техногенного воздействия на структуры земной коры внесло массовое закрытие и последующее затопление более 20 нерентабельных угольных шахт в период 1995—2005 гг. на территории Кемеровской и Анжеро-Судженской областей [Батугин и др., 2015].

Техногенное воздействие на структуры земной коры оказывают также вибрационные и ударные нагрузки от крупных промышленных предприятий, таких как Кузнецкий металлургический комбинат, Беловский цинковый, Новокузнецкий алюминиевый и др., а также систематические вибрационные воз-

действия от разветвленной сети железных и автомобильных дорог с крупнотоннажными перевозками каменного угля, железных и цветных руд.

В свою очередь, породные массивы Кузбасса характеризуются собственной высокой энергонасыщенностью, о чем свидетельствует природная сейсмоактивность региона, отмеченная еще до начала разработки месторождения. Так, в работе [Лутиков и др., 2003] приведены сведения о происходивших здесь землетрясениях начиная с 1875 г. и о сильных землетрясениях ($M \approx 6$) в районе Новокузнецка в период 1900—1915 гг. Подробная сеймотектоническая характеристика региона представлена в работе [Овсюченко и др., 2010], в которой по результатам полевых сеймотектонических и палеосейсмологических исследований в районе г. Полысаево отмечена связь образования провалов и разрывов дневной поверхности с наблюдаемой сейсмической активностью и разработками угольного месторождения. Упомянуты также сильные землетрясения с интенсивностью 7—8 баллов, произошедшие в доиндустриальное время (Кузнецкие землетрясения 1898.06.19, $M_s = 5.7$ и 1903.03.12, $M_s = 6.1$). Отмечено, что в сеймотектоническом отношении территория Кузнецкого угольного бассейна является переходной между низкоактивной, в сейсмическом отношении, Западно-Сибирской платформой и высокоактивной Алтае-Саянской сеймотектонической провинцией. Территория бассейна характеризуется развитой системой глубинных тектонических разломов северо-западного простирания с преобладанием сдвиговой составляющей и субширотного простирания с преобладанием взбросовых и надвиговых структур [Геолого-промышленная..., 2000]. С периодической активизацией этих тектонических структур и разломов связаны исторические землетрясения и происходящие в настоящее время техногенно-наведенные события. Так, в работе [Яковлев и др., 2013] отмечается приуроченность гипоцентров сильных горно-тектонических ударов к системам глубинных разломов меридионального и субширотного простираний и почти вертикального падения. В целом высокая природная сейсмичность Кузбасса отражена в материалах сейсмического районирования ОСР-97 [Сейсмическое районирование..., 2000] и составляет 7 баллов в северной части региона и 8—9 баллов – в центральной и южной (см. рис. 1).

Наличие природной сейсмичности и естественных сеймотектонических процессов в сочетании с техногенной нагрузкой в виде длительной и возрастающей добычи угля с участием взрывных работ создали в регионе сложную сейсмическую обстановку. В результате возникающие сейсмические события складываются из природных землетрясений, техногенно-наведенной сейсмичности и сейсмических колебаний от проведения массовых взрывов на разрезах и шахтах. Из анализа исторического каталога за 1734—1966 гг. и каталогов Алтае-Саянского региона 1962—1989 гг. и 1999—2005 гг. в работе [Яковлев и др., 2013] отмечено, что на территории Кузбасса начиная с 1960-х годов, когда наступил период инструментальных наблюдений, происходил постоянный рост сейсмической активности. С конца 1980-х годов наряду с ростом общего числа сейсмических событий стала увеличиваться интенсивность техногенных землетрясений, включая сильные горные и горно-тектонические удары. При этом число наведенных техногенных событий стало превышать число природных землетрясений. Техногенно-наведенная сейсмичность, которая характеризуется в указанной работе величиной энергетического класса $K = \lg E$, где E – излучаемая сейсмическая энергия в Дж, представлена сейсмическими событиями двух энергетических уровней. Первый связан с появлением сейсмических событий низкого энергетического уровня в диапазоне энергетического класса $1 \leq K \leq 7-8$ в виде различных геодинамических явлений, роевых потоков сейсмических событий и слабых землетрясений на глубине добычи в разрезах 0.2—0.5 км и в шахтах 0.5—1.0 км, а также более сильных горных ударов, происходящих на глубине до 1.5—2.5 км в районе проведения горных работ. В целом подобного рода индуцированные землетрясения невысокого энергетического класса регистрируются ежесуточно в количестве до 20—30 толчков. Второй уровень техногенной сейсмичности представлен более интенсивными сейсмическими событиями энергетического класса $K \geq 8-9$ (диапазон региональных магнитуд $M_b \geq 3.0$). Такой энергетический класс включает главным образом сейсмические события от взрывных работ, природную и наведенную техногенную сейсмичность, в том числе сильные горные и горно-тектонические удары, а также техногенно-тектонические землетрясения триггерного характера, которые являются предметом изучения данной работы.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Подробные исследования техногенной сейсмичности на территории Кузбасса в период с 1962 по 2004 г. были выполнены в работе [Яковлев и др., 2013]. По материалам этой работы составлена табл. 1, в которой по 10-летним отрезкам времени представлено количество техногенных землетрясений в различных диапазонах энергетического класса $K \geq 8.5$ ($M_b \geq 3.0$), зарегистрированных в этот период.

Из данных табл. 1 следует, что с самого начала инструментальных наблюдений, датируемых 1960 г., отмечается появление редких техногенных землетрясений в диапазоне энергетического класса от 8.5 до 11.5. Так, в начальный 22-летний период инструментальной регистрации (1962—1984 гг.) в

Таблица 1.

Распределение сильных техногенных землетрясений по диапазонам энергетического класса в период 1962—2004 гг.

Период, годы	Энергетический класс				Всего
	$8.5 \leq K \leq 9.4$	$9.5 \leq K \leq 10.4$	$10.5 \leq K \leq 11.4$	$K \geq 11.5$	
1962—1974	12	5	1	1	19
1975—1984	12	6	1	—	19
1985—1994	38	8	2	—	48
1995—2004	16	15	4	1	36
Всего	78	34	8	2	122

указанном диапазоне было зарегистрировано всего три сильных землетрясения с величиной $K \geq 10.5$ (магнитуда $M_b \geq 4$) и лишь одно энергетического класса $K = 12$ ($M_b \approx 5$) в районе г. Осинники 20 сентября 1966 г. Тем не менее эти сильные землетрясения уже в те годы привлекли внимание к проблеме влияния техногенных воздействий на сейсмичность Кузбасса.

Сейсмические события этого периода были дополнены проведением 18 сентября 1984 г. в северной части Кемеровской области на расстоянии около 50 км к юго-юго-западу от г. Мариинска единственного на территории Кузбасса мирного подземного ядерного взрыва мощностью 10 кт на глубине 557 м в массиве гранитов по программе глубинного сейсмического зондирования (профиль Кварц). Сейсмический эффект взрыва характеризовался величиной региональной магнитуды $M_b = 5.0$ (координаты эпицентра 55.87° с.ш. и 87.44° в.д.).

Заметная активизация техногенной сейсмичности произошла после 1985 г., когда число техногенных землетрясений во всех диапазонах энергетического класса $K > 8.5$ в последующие 20 лет увеличилось в 2—4 раза. Показателем усиления техногенной сейсмичности в эти годы стало более частое (в среднем один раз в год) появление эпизодических техногенных землетрясений в диапазоне $K = 9.5—11.4$ и возникновение, в частности, двух сильных землетрясений в районе г. Осинники: 14 сентября 1995 г. энергетического класса $K \approx 11.4$ ($M_b \approx 4.5—5.0$) и 6 марта 2002 г. энергетического класса $K > 11.5$ ($M_b = 4.6$).

Всего за период 1962—2004 гг. (см. табл. 1) представлены 122 техногенных землетрясений в диапазоне энергетического класса $8.5 \leq K \leq 12.0$, которые в работе [Яковлев и др., 2013] были названы природно-техногенными. Из этих событий к числу техногенно-тектонических уверенно можно отнести только 10 в диапазоне энергетического класса $K \geq 10.5$ (магнитуда $M_b \geq 4$), которые помещены в двух последних столбцах табл. 1. Не исключено, что в числе остальных техногенных событий табл. 1 могли оказаться сейсмические события, связанные с проведением крупных массовых взрывов, величина энергетического класса которых в те годы варьировала в диапазоне $K = 6—10$ [Землетрясения..., 2007].

С целью продолжить исследования техногенно-тектонических землетрясений, возникавших на территории Кузбасса после 2004 г., в данной работе к анализу были привлечены материалы каталога Международного сейсмологического центра (ISC), который включает также данные Международного центра данных (IDC) и отечественной Геофизической службы (ГС РАН). По материалам каталога ISC составлена табл. 2, в ней за период 1998—2016 гг. представлены четыре группы ежегодно происходивших на территории Кузбасса сейсмических событий с региональными магнитудами $M_b \geq 3$ ($K > 9.0$), $M_b \geq 3.5$ ($K > 10$), $M_b \geq 4$ ($K > 10.5$), $M_b \geq 4.5$ ($K > 11.5$). В трех последних столбцах табл. 2 указано ежегодное потребление ВВ, его рост и величина ежегодного потока сейсмической энергии, создаваемого массовыми взрывами в окружающем горном массиве при условии, что величина сейсмического КПД при взрывах в твердых скальных породах составляет 2—3 % полной энергии взрыва [Взрывы ..., 2013].

Из данных табл. 2 следует, что в период 1998—2016 гг. происходил постоянный рост числа ежегодных сейсмических событий во всех диапазонах магнитуд, особенно в диапазонах $M_b \geq 3.0$ и $M_b \geq 3.5$. Также ежегодно увеличивалось потребление ВВ, и происходил соответствующий рост потока сейсмической энергии. Так, если в 1998—2000 гг. потребление ВВ составляло 110—150 тыс. т/год и ежегодный рост потребления ВВ достигал в среднем 20 тыс. т/год, то в период 2010—2012 гг., накануне Бачатского землетрясения, потребление ВВ составляло уже 400—500 тыс. т/год и ежегодный рост потребления ВВ достигал 60—80 тыс. т/год. В 2012 г. объем потребления ВВ составил уже 583 тыс. т/год, т. е. в 5 раз больше по сравнению с 1998 г. В соответствии с ростом потребления ВВ величина ежегодного потока сейсмической энергии также возросла в 5 раз и в 2016 г. достигла величины $6.1 \cdot 10^{13}$ Дж/год, создавая мощность воздействия на структуры земной коры на уровне $10^5—10^6$ Вт.

Что касается сейсмических событий, то в их количественном составе, в частности, в диапазонах магнитуд $M_b \geq 3$ и $M_b \geq 4$ выделяются два периода: первый — 1998—2006 гг., когда ежегодное число таких событий исчислялось единицами, и второй — 2007—2016 гг., когда их ежегодное число стало превышать уровень 100 событий в год. События первого периода представлены как данными каталога

Таблица 2. Ежегодное число сейсмических событий в заданных диапазонах региональных магнитуд и потребление ВВ в горно-взрывных работах на территории Кузбасса в период 1998—2016 гг.

Год	$M_b \geq 3$	$M_b \geq 3.5$	$M_b \geq 4$	$M_b \geq 4.5$	Потребление ВВ, тыс. т/год	Прирост ВВ, тыс. т/год	Поток сейсмической энергии, 10^{13} Дж/год
	$K \geq 9.5$	$K \geq 10$	$K \geq 10.5$	$K \geq 11.5$			
1998	2 (5)	2 (3)	1	—	110	10	1.1
1999	(4)	(3)	—	—	130	20	1.3
2000	3	1 (2)	1 (1)	—	150	20	1.5
2001	(3)	—	—	—	180	30	1.8
2002	19	16 (2)	2	1	220	40	2.2
2003	9 (4)	8 (2)	1	—	240	20	2.4
2004	6	3 (3)	1 (1)	—	257	17	2.6
2005	9	3	1	—	310	53	3.1
2006	40	32	4	—	337	27	3.4
2007	299	94	10	—	368	31	3.7
2008	340	113	12	3	404	36	4.0
2009	341	148	20	—	388	-16	3.9
2010	548	182	22	—	429	41	4.3
2011	459	152	17	2	512	83	5.1
2012	503	169	14	1	583	71	5.8
2013	511	145	14	1	573	-10	5.7
2014	558	156	7	—	533	-40	5.3
2015	627	157	3	—	606	73	6.1
2016	763	145	10	5	608	2	6.1

Примечание. В скобках данные из работы [Яковлев и др., 2013].

ISC, так и данными из работы [Яковлев и др., 2013], которые указаны в скобках. Можно отметить, что начиная с 2002 г. данные каталога ISC содержат больше событий во всех диапазонах магнитуд $M_b \geq 3$. В результате к выделенным выше за период 1962—2004 гг. 44 техногенным землетрясениям энергетического класса $K \geq 9.5$ —11.5 ($M_b \geq 3.0$ —4.5) из табл. 1 следует добавить около 30 подобных сейсмических событий с величиной магнитуды $M_b \geq 3.5$ —4.5 ($K \geq 10.0$ —11.5) из каталога ISC.

Второй период 2007—2016 гг. выделяется не только значительным увеличением числа ежегодных сейсмических событий практически во всех диапазонах магнитуд, но также появлением отдельных техногенно-тектонических землетрясений в диапазоне $M_b \geq 4.5$. Такой рост ежегодного числа сейсмических событий и их интенсивности связаны не только с продолжавшимся увеличением потребления ВВ, но и более широким применением крупномасштабных массовых взрывов, создававших сейсмические события во всех указанных диапазонах магнитуд. Так, уже в начале второго периода 2007—2009 гг., когда потребление ВВ выросло до уровня 400 тыс.т/год, число сейсмических событий с магнитудами $M_b \geq 3$ достигло 340 событий в год. В числе этих событий в 2008 г. были зарегистрированы три техногенно-тектонических землетрясения с региональными магнитудами $M_b \geq 4,5$ ($K \geq 11,5$), два из которых произошли в районе г. Междуреченск: 11 января 2008 г. (магнитуда $M_b = 4,5$, координаты эпицентра $53,6^\circ$ с.ш. и $88,3^\circ$ в.д.) и 2 апреля 2008 г. (магнитуда $M_b \geq 4,6$, координаты эпицентра $54,0^\circ$ с.ш. и $88,1^\circ$ в.д.), третье землетрясение в районе г. Белово 13 октября 2008 г. (магнитуда $M_b \geq 4,6$, координаты эпицентра $53,86^\circ$ с.ш. и $85,9^\circ$ в.д.). После этих трех сильных землетрясений потребление ВВ в 2009 г. было снижено (см. табл. 2) и в течение последующих двух лет сильных событий с $M_b \geq 4,5$ не появлялось. В 2010—2011 гг. потребление ВВ вновь возросло до 429—512 тыс. т/год и, соответственно, увеличился поток сейсмических событий примерно до 500 в год. При таком потреблении ВВ объемы разрушения, извлечения и перемещения горных пород находятся на уровне порядка 1 млрд м³/год. В условиях такого роста объемов потребления ВВ и горных работ в период 2010—2012 гг., как видно из табл. 2, не только увеличилось ежегодное число событий во всех диапазонах магнитуд, но вновь стали возникать техногенно-тектонические землетрясения в диапазоне магнитуд $M_b \geq 4,5$. Так, в 2011 г. два таких землетрясения были зарегистрированы в районе г. Осинники и одно в 2012 г. в районе Бачатского разреза. Этот подъем техногенно-тектонической активности завершился Бачатским землетрясением в июне 2013 г.

После Бачатского землетрясения в этом же году было снижено потребление ВВ на 10 тыс. т/год и в следующем 2014 г. на 40 тыс. т/год. В результате в 2014 г. в 2 раза и в 2015 г. в 4 раза уменьшилось число сейсмических событий в диапазоне магнитуд $M_b \geq 4,0$ и не возникали события с магнитудами

$M_b \geq 4.5$, что напомнило ситуацию после сильных землетрясений 2008 г. Наряду с этим заметно увеличилось число событий в диапазоне магнитуд $M_b \geq 3.0$ —3.4 и практически сохранилось число событий в диапазоне $M_b \geq 3.5$ —3.9. Очевидно, такие изменения в составе сейсмических событий стали следствием того, что уменьшилась доля крупномасштабных взрывов, создававших события с $M_b \geq 4$, и увеличилась доля взрывов, создававших события в диапазоне $M_b \geq 3.0$ —3.4. Однако в 2015—2016 гг. потребление ВВ вновь возросло до уровня около 600 тыс. т/год, число событий в диапазоне $M_b \geq 3$ увеличилось до 627 в 2015 г. и достигло рекордного уровня 763 события в 2016 г. Такое развитие сейсмических событий свидетельствует о том, что объемы горно-взрывных работ не только стали такими же, как перед Бачатским землетрясением, но и несколько превзошли их за счет увеличения числа взрывов, создающих события в диапазоне $M_b \geq 3.0$ —3.4. В результате в 2016 г. число событий в диапазоне магнитуд $M_b \geq 4.0$ выросло до 10 и в диапазоне магнитуд $M_b \geq 4.5$ были зарегистрированы сразу пять сильных сейсмических событий. Подобное развитие сейсмической активности вызывает опасения возможного дальнейшего возникновения сильных техногенно-тектонических землетрясений. Поэтому проблема возникновения и развития техногенно-тектонической сейсмичности под воздействием горно-взрывных работ нуждается в дальнейших исследованиях.

В целях выделения регионов, на территории которых развивается техногенно-тектоническая сейсмичность, эпицентры сейсмических событий из табл. 2 нанесены на карту-схему территории Кузбасса (рис. 2). Кружками различного размера представлены три группы сейсмических событий $M_b \geq 3.0$ —3.4; $M_b \geq 3.5$ —3.9 и $M_b \geq 4.0$. По расположению эпицентров указанных событий, несмотря на обычный разброс в определении координат эпицентров по материалам их регистрации на региональных расстояниях, возможно произвести своего рода сейсмическое районирование территории Кузбасса и выделить регионы с различным уровнем региональных магнитуд. В свою очередь, магнитуды различных диапазонов характеризуют величину техногенной нагрузки от воздействия взрывных работ. Контуры нескольких выделенных таким образом

регионов показаны на рис. 2. В структурах земной коры выделенных регионов развиваются вынужденные техногенными воздействиями изменения геодинамического режима, приводящие к формированию очагов техногенно-тектонических землетрясений, отличающихся своим внезапным образованием и непредсказуемой магнитудой.

Чтобы выделить техногенно-тектонические землетрясения в общем потоке событий были применены два критерия: критерий «максимально допустимой магнитуды» и критерий «ночные события». Критерий «максимально допустимой магнитуды» основан на правилах сейсмической безопасности, в соответствии с которыми величина магнитуды сейсмических событий, возникающих при проведении взрывных работ, не должна превышать определенную максимально допустимую величину. Согласно этим правилам, для обеспечения сейсмической безопасности объектов

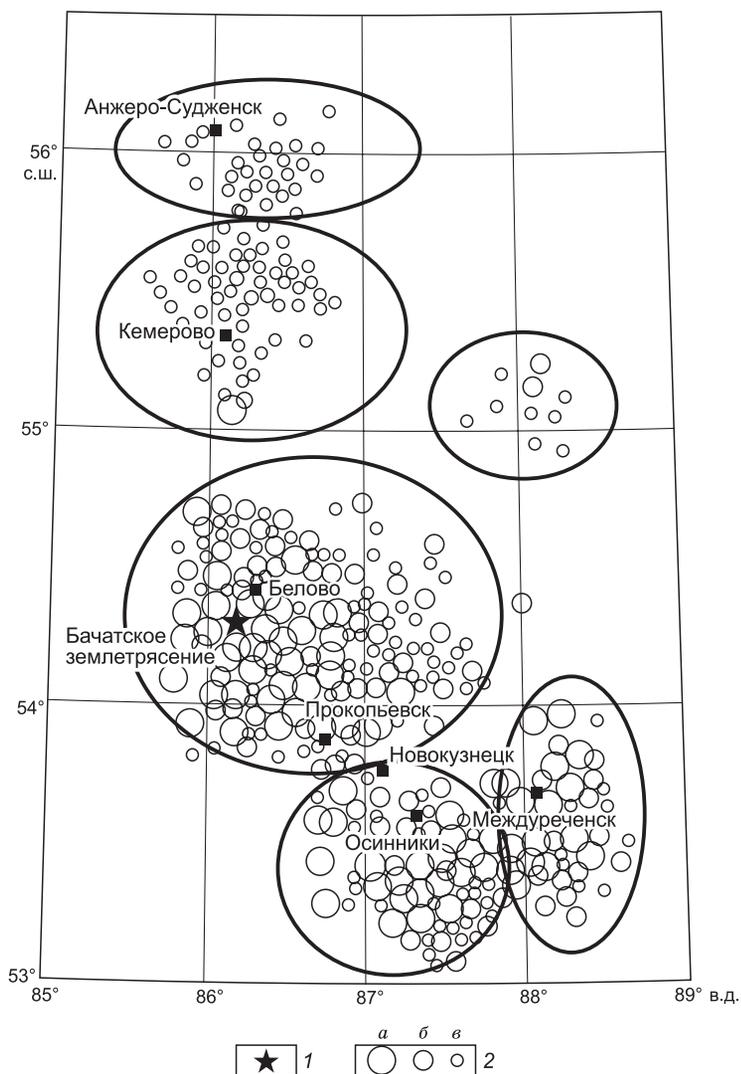


Рис. 2. Схема расположения эпицентров сейсмических событий на территории Кузбасса в период 1998—2016 гг., по данным каталога Международного сейсмологического центра (ISC).

1 — эпицентр Бачатского землетрясения; 2 — магнитуда (M_b): а — ≥ 4 ; б — 3.5—3.9, в — 3.0—3.4.

окружающей среды, включая промышленные, административные и жилые здания, подземные выработки и оборудование добычного комплекса, применяют методы короткозамедленного взрывания, чтобы уменьшить амплитуду сейсмических колебаний и, соответственно, величину магнитуды до допустимого значения. В этом отношении известен многолетний опыт обеспечения сейсмической безопасности при проведении массовых взрывов на карьерах Курско-Белгородского региона, на Кольском полуострове, на Урале, в Карелии и других регионах [Взрывы ..., 2013]. Так, при взрывных работах на карьере Лебединского ГОКа, где применяют самые крупные в стране массовые взрывы до 2500 т, величина максимальной магнитуды не превышает $M_b \geq 3.7$ [Адушкин, 2013]. На территории Кузбасса энергетический класс сейсмических событий взрывных работ составлял $K = 6-10$ [Землетрясения ..., 2007], что соответствует диапазону региональных магнитуд $M_b \geq 1.0-3.7$. Этот диапазон магнитуд был подтвержден в более поздней работе [Еманов и др., 2014], где отмечено, что сейсмический эффект массовых взрывов в Кузбассе соответствует диапазону локальных магнитуд $M_L = 1-4$, величина которых обычно выше значения региональной магнитуды. При таком выборе максимально допустимой магнитуды в категорию техногенно-тектонических землетрясений попадали сейсмические события энергетического класса $K \geq 9,5$ из табл. 1 и десятки ежегодных событий с региональной магнитудой $M_b \geq 4$ из табл. 2, источником которых были в основном крупномасштабные взрывы на уровне 500—900 т, применяемые на разрезах Кузбасса после 2006 г. Следовательно, в случае взрывных работ Кузбасса критерий «максимально допустимой магнитуды» оказался неэффективным и по нашему опыту работы с данными каталога ISC он составляет величину $M_b \leq 4.4$.

В связи с такой ситуацией для выделения техногенно-тектонических землетрясений был использован критерий, основанный на запрете проведения взрывных работ в ночное время (критерий «ночные события»). При выделении ночных событий было принято, что местное время, в течение которого возможно проведение взрывных работ, начинается в 7 ч утра и заканчивается в 21 ч вместо принятых обычно 19—20 ч. Таким образом, время выделения ночных событий было продлено на 1—2 часа с учетом возможной задержки подрыва в конце рабочего дня, иногда возникавшей, как это следует из опыта использования данных каталога. В результате для ночных событий в системе всемирного времени отводится интервал от 14 до 24 ч, поскольку время в Кузбассе на 7 ч опережает мировое. Результаты разделения сейсмических событий на ночные и дневные представлены в табл. 3, в которой события дополнительно распределены по четырем диапазонам магнитуд M_b : 3.0—3.4; 3.5—3.9; 4.0—4.4 и ≥ 4.5 . В табл. 3 даны диапазоны изменения энергии массовых взрывов, соответствующие значениям магнитуд и энергетического класса. При оценках энергии взрывов подразумевается, что подрыв отдельных зарядов массового взрыва производился последовательно при минимальных временах замедления.

Также в табл. 3 приведены данные о ежегодном числе дневных («день») и ночных («ночь») событий в каждом диапазоне магнитуд. Отметим, что в начальный период 1998—2006 гг., когда ежегодное число сейсмических событий исчислялось единицами, всего было зарегистрировано пять ночных событий, причем по 1—2 в каждом диапазоне магнитуд. Это означает, что уже в этот начальный период в структурах земной коры, на территории выделенных на рис. 2 регионов, происходил процесс вынужденного изменения геодинамического режима, который сопровождался образованием очагов техногенно-тектонических землетрясений, в том числе ночных. Масштаб воздействий со стороны горных и взрывных работ в этот период характеризовался ростом потребления ВВ от 110 до 400 тыс. т/год. Однако величина отдельных взрывов в эти годы оставалась невысокой, поскольку создаваемые ими сейсмические события не превышали уровня магнитуд $M_b \geq 3$, о чем свидетельствует их отсутствие в табл. 3. Очевидно рост потребления ВВ был связан с тем, что либо взрывные работы стали проводиться чаще, либо увеличивалось число добывающих предприятий. Исключением являются 12 событий 2002 г. и 7 событий 2003 г. в диапазоне магнитуд $3.5 \leq M_b \leq 3.9$, их регулярное появление связано с ежемесячным применением в эти два года более крупных массовых взрывов на уровне нескольких сотен тонн ВВ. Таким образом, из данных табл. 3 следует, что в период 1998—2006 гг. за исключением 2002 и 2003 гг. произошло около 30 техногенно-тектонических землетрясений с магнитудами в диапазоне $M_b = 3.0-4.4$.

В последующий период 2007—2016 гг., в течение которого потребление ВВ выросло в среднем от 400 до 600 тыс. т/год, во всех диапазонах магнитуд увеличилось число как дневных, так и ночных сейсмических событий. Число дневных, содержащих в основном сигналы от взрывных работ, достигало десятки и сотни событий в год. Число ночных событий на фоне дневных было небольшим, грубо говоря на два порядка меньше, и исчислялось единицами в год (в данном случае от 1 до 11 в год). При этом ночные события в этот период появились сразу во всех диапазонах магнитуд и в последующие годы возникали ежегодно и часто по несколько событий в год. Значительное увеличение ежегодного числа дневных событий во всех диапазонах магнитуд, очевидно, связано с тем, что в этот период в технологию добычи были включены крупномасштабные массовые взрывы. По нашим оценкам, сейсмические события в диапазоне магнитуд $3.0 \leq M_b \leq 3.4$, число которых выросло примерно от 200 до 600—700 в год, образованы массовыми взрывами на уровне 100—300 т, в диапазоне $3.5 \leq M_b \leq 3.9$ число событий

Таблица 3.

**Число ежегодных сейсмических событий на территории Кузбасса
в различных диапазонах магнитуд свыше $M_b \geq 3$**

Год	$3.0 \leq M_b \leq 3.4$		$3.5 \leq M_b \leq 3.9$		$4 \leq M_b \leq 4.4$		$M_b \geq 4.5$	
	$9.0 < K < 10$		$10 < K < 10.5$		$10.5 < K < 11.5$		$K \geq 11.5$	
	$100 < q < 300$		$300 < q < 600$		$600 < q < 900$		$q > 900$	
	День	Ночь	День	Ночь	День	Ночь	День	Ночь
1998	3	—	1	—	—	1	—	—
1999	1	—	3	—	—	—	—	—
2000	1	—	1	—	—	1	—	—
2001	3	—	—	—	—	—	—	—
2002	3	—	12	1	2	—	1	—
2003	1	—	7	—	1	—	—	—
2004	2	1	2	—	1	—	—	—
2005	5	1	2	—	1	—	—	—
2006	8	—	28	—	4	—	—	—
2007	201	4	82	2	0	1	—	—
2008	224	3	100	1	9	1	2	1
2009	187	6	124	4	20	—	—	—
2010	365	1	157	3	22	—	—	—
2011	302	5	133	2	15	2	2	—
2012	333	1	152	3	12	1	—	1
2013	359	7	127	4	8	5	—	1
2014	391	11	145	4	6	1	—	—
2015	465	5	150	4	3	—	—	—
2016	612	6	129	6	5	—	3	3
Всего	3468	51	359	34	117	11	8	6

Примечание. q — энергия массовых взрывов в тоннах ВВ ($1 \text{ т ВВ} = 4.19 \cdot 10^9 \text{ Дж}$).

составляло от 100 до 130—150 в год и, соответственно, величина массовых взрывов была на уровне 300—600 т, в диапазоне $4.0 \leq M_b \leq 4.4$ примерно от 10 до 20 событий в год и величина массовых взрывов достигала уровня 600—900 т. Отметим, что после Бачатского землетрясения (июнь 2013 г.) потребление ВВ было снижено, видимо, только за счет уменьшения числа самых крупных взрывов (свыше 500—600 т), поскольку число взрывов масштаба 100—300 т, создававших события с $M_b = 3.0$ —3.4, увеличилось в 1.5—2.0 раза. В этих условиях число ночных событий в целом уменьшилось, и в диапазоне $M_b \geq 4$ они в течение двух лет не возникали. Отсюда следует, что процесс генерации ночных событий, т. е. техногенно-тектонических землетрясений, более чувствителен к воздействиям именно крупномасштабных взрывов. Отметим еще некоторые особенности появления ночных событий, полезных для понимания механизмов возникновения и развития техногенно-тектонических землетрясений. Так, начиная с 2007 г. ночные события стали возникать ежегодно во всех диапазонах магнитуд. При этом активное появление ночных событий может быть связано с тем, что уровень воздействия взрывных работ качественно изменился за счет включения в добычу крупномасштабных массовых взрывов с зарядами не только свыше 300 т, но свыше 500 т. Увеличение масштабов отдельных взрывов сопровождалось не только ростом объемов разрушаемых пород, который до этого периода происходил в основном за счет количественного увеличения числа взрывов, но и тем, что выросла также интенсивность потоков сейсмической энергии от этих крупномасштабных взрывов, воздействующих на более глубокие и более крупные структуры земной коры. Именно после того, как вырос масштаб отдельных массовых взрывов, ночные события стали происходить ежегодно во всех диапазонах магнитуд. Причем количество ежегодно появлявшихся ночных событий было бессистемным, без какой-либо связи с изменениями числа взрывов той или иной массы ВВ. Отсюда следует, что если сам факт появления ночных событий естественно обусловлен ростом объемов горных и взрывных работ, то их ежегодное количество было произвольным. Следовательно, возникавшие в структурах земной коры процессы перестройки геодинамического режима и тектонического поля напряженного состояния после 2007 г. вступили в более активную стадию и развивались в дальнейшем практически самопроизвольно, реагируя только на уве-

Таблица 4. Техногенно-тектонические землетрясения магнитудой $M_b \geq 4.5$ ($K \geq 11.5$) на территории Кузбасса в период 1962—2016 г.

№ п/п	Всемирное время		Местное время		Координаты эпицентра		Магнитуда, M_b	Глубина очага, км
	Дата	Время ч : мин	Дата	Время ч : мин	град. с.ш.	град. в.д.		
1	20.09.1966	22:15	21.09.1966	5:15	53.40	87.40	~5.0	15
2	14.09.1995	4:24	14.06.1995	11:24	53.60	86.80	4.5—4.9	0.2; 31.6
3	6.03.2002	9:22	6.03.2002	16:22	53.40	87.30	4.6	0 <i>f</i>
4	11.01.2008	9:40	11.01.2008	16:40	53.60	88.30	4.5	8; 13.3
5	2.04.2008	19:31	3.04.2008	2:31	53.97	88.20	4.6	15; 14
6	13.10.2008	6:17	13.10.2008	13:17	53.86	85.88	4.6	0 <i>f</i>
7	12.02.2011	0:55	12.02.2011	7:55	53.48	87.50	4.5	10 <i>f</i> ; 0 <i>f</i>
8	17.04.2011	23:07	18.04.2011	6:07	53.39	87.15	4.5	0 <i>f</i> ; 33
9	9.02.2012	13:24	9.02.2012	20:24	54.27	86.05	4.6	10 <i>f</i> ; 5 <i>f</i>
10	18.06.2013	23:02	19.06.2013	6:02	54.28	86.17	5.8	11; 4
11	24.10.2016	16:14	24.10.2016	23:14	53.45	87.47	4.5	0 <i>f</i> ; 10 <i>f</i>
12	8.11.2016	21:38	9.11.2016	2:38	53.35	87.36	4.6	0 <i>f</i> ; 10 <i>f</i>
13	9.11.2016	12:57	9.11.2016	19:57	54.07	86.44	4.6	0 <i>f</i>
14	24.11.2016	11:08	24.11.2016	18:08	53.36	87.26	4.5	10; 0 <i>f</i>
15	9.12.2016	8:26	9.12.2016	15:26	53.36	87.49	4.6	0 <i>f</i>

Примечание. Символ *f* означает, что глубина очага установлена по совокупности сейсмических данных.

личение числа самых крупных взрывов. Такое самопроизвольное развитие процессов перестройки напряженного состояния происходит в земной коре на всех структурных уровнях, о чем свидетельствует появление ночных событий сразу во всех диапазонах магнитуд.

В конечном итоге из табл. 3 следует, что за период 2007—2016 гг. на территории Кузбасса в соответствии с критерием «ночные события» произошло как минимум 51 ночное техногенно-тектоническое землетрясение в диапазоне магнитуд $3.0 \leq M_b \leq 3.4$, 34 ночных землетрясения в диапазоне магнитуд $3.5 \leq M_b \leq 3.9$, 11 ночных землетрясений в диапазоне магнитуд $4.0 \leq M_b \leq 4.4$ и 6 ночных землетрясений в диапазоне магнитуд $M_b \geq 4.5$. В соответствии с критерием «минимально допустимая магнитуда», величина которой для взрывных работ в Кузбассе составляет $M_b \leq 4.4$, все 14 событий из табл.3 в диапазоне $M_b \geq 4.5$ являются техногенно-тектоническими землетрясениями. В результате, принимая во внимание данные из табл. 1, получим, что всего за период инструментальных наблюдений с 1960 до 2016 г. на территории Кузбасса произошло 15 сильных техногенно-тектонических землетрясений, характеризующихся магнитудой $M_b \geq 4.5$ (табл. 4).

Из табл. 4 видно, что если в прошлом столетии произошло только два техногенно-тектонических землетрясения, первое в 1966 г. и второе в 1995 г., то в новом столетии за период 2002—2016 гг., когда объемы добычи угля стали исчисляться сотнями млн т/год, потребление ВВ возросло до 600 тыс. т/год и в технологию горных работ было включено применение крупномасштабных массовых взрывов с зарядами свыше 300 т и даже 500 т, произошло уже 13 техногенно-тектонических землетрясений с магнитудами $M_b \geq 4.5$, включая Бачатское землетрясение. Далее из табл. 4 следует, что после Бачатского землетрясения, в течение 2014—2015 гг., когда было уменьшено потребление ВВ и исключено проведение самых крупных массовых взрывов, сейсмических событий с $M_b \geq 4.5$ не происходило. Однако затем, когда потребление ВВ вновь возросло (см. табл. 2), в 2016 г. было зарегистрировано уже пять техногенно-тектонических землетрясений с магнитудой $M_b \geq 4.5$. При этом четыре таких события произошли в регионе г. Осинники и одно в регионе г. Белово.

Таким образом, из данных таблиц 3 и 4 следует, что всего за период 1998—2016 гг. на территории Кузбасса произошло свыше 100 техногенно-тектонических землетрясений в диапазоне региональных магнитуд $M_b \geq 3$. Расположение эпицентров этих техногенно-тектонических землетрясений, выделенных по критериям «ночные события» и «максимально допустимая магнитуда», показано на рис. 3. Представлены три диапазона магнитуд: диапазон $3.0 \leq M_b \leq 3.4$, в котором оказалась приблизительно половина ночных событий, диапазон $3.5 \leq M_b \leq 3.9$ — около трети ночных событий и диапазон $M_b \geq 4$ — примерно пятая часть ночных событий. По распределению эпицентров этих событий возможно выде-

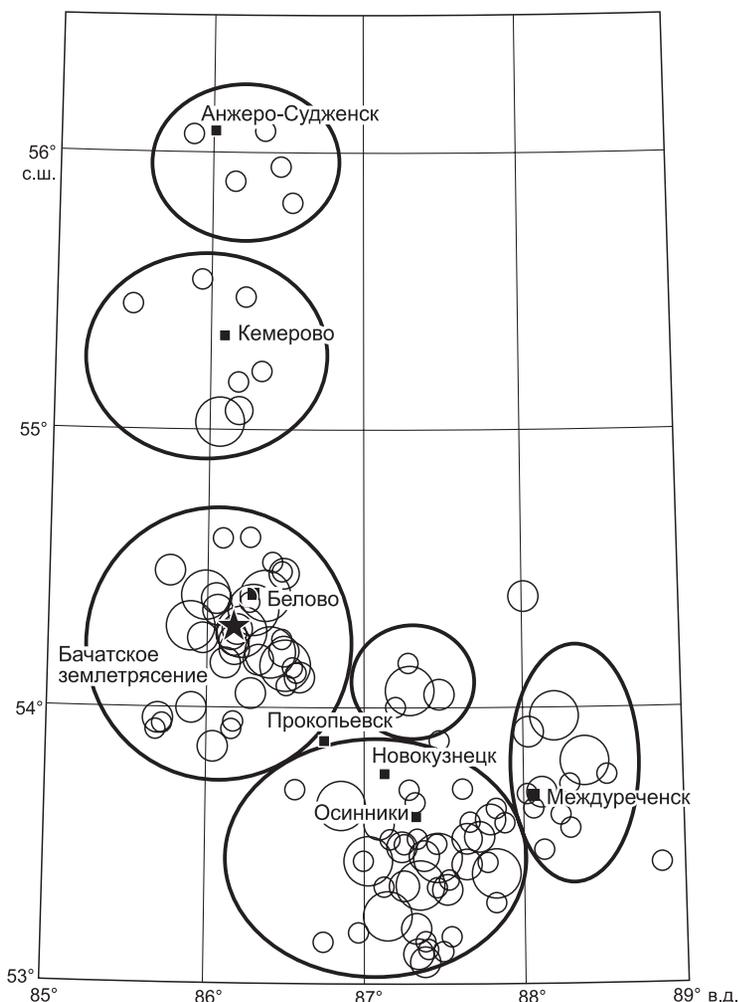


Рис. 3. Расположение эпицентров техногенно-тектонических землетрясений («ночные события») на территории Кузбасса в период 1998—2016 гг.

Усл. обозн. см. на рис. 2.

лить несколько регионов (их контуры обозначены на рис. 3), на территории которых возникают техногенно-тектонические землетрясения.

Два региона расположены на территории северной части Кузбасса, около г. Анжеро-Судженск и г. Кемерово. На процесс возникновения и развития техногенных землетрясений на территории этих регионов оказало массовое закрытие и затопление нерентабельных угольных шахт в конце прошлого столетия. Так, уже через 2 года после начала затопления шахт произошло подряд два техногенных землетрясения 25.04.97 г. и 27.04.97 г. с региональной магнитудой $M_b = 2.3$ и интенсивностью колебаний на поверхности до 5 баллов [Батугин, 2006]. Гипоцентры землетрясений были приурочены к полю законсервированной шахты Анжерская, глубина которой составляла более 700 м, площадь выработанного пространства около 4 км², подъем воды в шахте к апрелю 1997 г., когда произошли землетрясения, достигал

около 200 м, сдвиги по пластам составляли от 5 до 20 м. На следующий год 13 мая 1998 г. южнее г. Кемерово произошло еще одно техногенно-тектоническое землетрясение с региональной магнитудой $M_b = 4.1$.

Подобные техногенно-тектонические землетрясения в этом регионе возникали и в последующие годы. Так, Казахской сейсмической сетью были зарегистрированы такие землетрясения 15 марта 2011 г. южнее Кемерово с региональной магнитудой $M_b = 3.9$ (координаты эпицентра 55.17° с.ш. и 86.19° в.д.) и 9 февраля 2012 г. в районе г. Анжеро-Судженск с региональной магнитудой $M_b = 2.6$ (координаты эпицентра 55.9° с.ш. и 86.15° в.д.). Очевидно, что затопление выработанного подземного пространства шахтных полей, более трещиноватого и разуплотненного, чем исходный массив, изменяет гидродинамический режим за счет эффективной передачи гидравлического давления на структурные неоднородности и тектонические разломы, увеличивая поровое давление в тектонических нарушениях. Поступление воды снижает прочность пород и контактов блочных структур и разломных зон. В результате под действием горизонтальных компонент напряженного состояния происходит резкий сдвиг пластов, сопровождаемый излучением сейсмических волн.

Далее из рис. 3 следует, что наиболее активное развитие техногенно-тектонической сейсмичности отмечается в центральной части территории Кузбасса. Прежде всего, это регион вокруг г. Белово, где зарегистрированы многочисленные интенсивные ночные землетрясения, включая Бачатское землетрясение. Выделены также регион северо-восточнее г. Прокопьевск и регион в области г. Междуреченск, на территории которого регулярно возникают ночные техногенно-тектонические землетрясения с магнитудами в диапазоне $3.0 \leq M_b \leq 3.9$, а в период 2008—2009 гг. были зарегистрированы также ночные землетрясения с магнитудами $M_b \geq 4$. Например, техногенно-тектоническое землетрясение 3.04.2008 г. с магнитудой $M_b = 4.2$ (координаты 53.97° с.ш. и 88.20° в.д.).

Особый интерес представляет развитие техногенно-тектонической активности в регионе Бачатского землетрясения. Выборка наиболее характерных сейсмических событий, по большей части ночных, в период 1998—2016 гг. как до возникновения Бачатского землетрясения, так и после в период афтершоковой эмиссии представлена в табл. 5.

Таблица 5. Техногенно-тектонические землетрясения до и после Бачатского землетрясения в период 1998—2016 гг.

Всемирное время		Местное время		Координаты эпицентра		Магнитуда M_b
Дата	Время, ч:мин	Дата	Время, ч:мин	град. с.ш.	град. в.д.	
13.05.1998	23:40	14.05.1998	6:40	54.35	85.14	4.1
14.03.2000	0:52	14.03.2000	7:52	54.40	86.37	4.1
06.04.2002	8:02	06.04.2002	15:02	54.28	86.75	4.0
14.08.2007	18:55	15.08.2007	1:55	54.08	86.51	3.1
23.10.2009	14:55	23.10.2009	21:55	54.49	85.76	3.9
17.06.2010	14:29	17.06.2010	21:29	54.28	86.19	3.7
18.05.2011	12:45	18.05.2011	19:45	54.20	85.97	4.0
09.02.2012	6:25	09.02.2012	13:25	54.28	86.03	3.1
09.02.2012	6:56	09.02.2012	13:56	54.27	86.21	2.4
09.02.2012	8:09	09.02.2012	15:09	54.19	86.24	2.4
09.02.2012	13:24	09.02.2012	20:24	54.27	86.21	4.6
04.03.2013	17:30	05.03.2013	0:30	54.23	86.03	4.4
18.06.2013	23:02	19.06.2013	6:02	54.28	86.17	5.8
18.06.2013	23:37	19.06.2013	6:37	54.30	86.08	4.3
19.06.2013	1:11	19.06.2013	8:11	54.24	86.25	3.9
19.06.2013	6:00	19.06.2013	13:00	54.27	86.09	4.4
19.06.2013	12:40	19.06.2013	19:40	54.18	86.18	3.6
19.06.2013	14:53	19.06.2013	21:53	54.21	86.18	3.6
19.06.2013	16:10	19.06.2013	23:10	54.29	86.22	4.0
20.06.2013	9:52	20.06.2013	16:52	54.20	86.22	4.3
26.06.2013	16:09	26.06.2013	23:09	54.25	86.11	4.0
21.10.2013	17:24	22.10.2013	0:24	54.30	86.19	4.0
11.08.2014	18:31	12.08.2014	1:31	54.16	86.12	3.8
21.09.2014	10:47	21.09.2014	17:47	54.01	86.03	4.2
26.10.2014	19:49	27.10.2014	2:49	54.42	86.30	4.1
01.11.2015	13:58	01.11.2015	20:58	54.11	86.59	3.7
01.02.2016	18:24	02.02.2016	1:24	54.35	86.08	3.5

Примечание. Информация о Бачатском землетрясении выделена жирным шрифтом.

Отметим, что еще до применения крупномасштабных взрывов в период 1998—2002 гг. в районе Бачатского разреза происходили техногенно-тектонические землетрясения, из которых три с магнитудами $M_b = 4.0$ — 4.1 приведены в первых строках табл. 5. Следовательно, уже в те годы тектонические структуры земной коры региона были сейсмоактивными и энергетически насыщенными. При этом в дальнейшем в период 2007—2012 гг., еще до Бачатского землетрясения, техногенная нагрузка на недра угледобывающих регионов от проведения горных и взрывных работ продолжала увеличиваться. Так, объемы потребления ВВ выросли примерно от 400 до 600 тыс. т/год. Началось также регулярное проведение крупномасштабных массовых взрывов на уровне 100—500 т, а иногда до 800—900 т, под действием которых практически ежедневно возникали сейсмические события с магнитудами в диапазоне $3.0 \leq M_b \leq 3.4$, 2—3 события в неделю с магнитудами в диапазоне $3.5 \leq M_b \leq 3.9$ и по 1—2 событиям в месяц с магнитудами в диапазоне $4.0 \leq M_b \leq 4.4$. В указанных диапазонах магнитуд также регулярно регистрировали от 1—2 до 8—11 ночных событий в год, примеры некоторых из них, наиболее интенсивных, возникавших в районе Бачатского разреза в период 2007—2012 гг., приведены в табл. 5, причем 9 февраля 2012 г. произошла серия интенсивных сейсмических толчков, которая завершилась техногенно-тектоническим землетрясением с магнитудой $M_b = 4.6$. Наиболее сильные события этой серии приведены в табл. 5. За три месяца до Бачатского землетрясения 5 марта 2013 г. в ночное время произошло еще одно техногенно-тектоническое землетрясение с магнитудой $M_b = 4.4$. Кульминацией развития такой сейсмической активности стало Бачатское землетрясение, произошедшее ранним утром 19 июня 2013 г. в 6 ч 02 мин местного времени, которое, по данным каталога ISC, характеризовалось региональ-

ной магнитудой $M_b = 5.8$ и энергетическим классом $K = 13.86$, т. е. излученная сейсмическая энергия землетрясения составила $7.2 \cdot 10^{13}$ Дж. Учитывая, что величина сейсмического КПД взрывов в твердых скальных породах, как было отмечено выше со ссылкой на работу [Взрывы ..., 2013], составляет 2—3 % от полной энергии взрыва, получим, что величина эквивалентного взрыва в случае Бачатского землетрясения составляет примерно 700 тыс. т ВВ. Такая величина энергии в очаге Бачатского землетрясения, безусловно, свидетельствует о его тектонической природе. Землетрясение сопровождалось активной афтершоковой эмиссией до 30—50 толчков в сутки. Наиболее сильные афтершоки с магнитудой $M_b \geq 3.5$ приведены в табл. 5, причем семь таких афтершоков произошли в первые сутки. Так, сильный афтершок с магнитудой $M_b = 4.3$ произошел уже через 35 мин после основного удара. Выделяется также афтершок с магнитудой $M_b = 4.4$, произошедшей через 7 ч после основного удара. На следующий день 20 июня 2013 г. вблизи Бачатского разреза вновь произошло землетрясение с магнитудой $M_b = 4.3$. До конца 2013 г., который является рекордным по числу ночных событий, произошло еще не менее шести событий с $M_b \geq 3.5$, три из которых приведены в табл. 5. В 2014 г. появление ночных событий оставалось активным и до конца года произошло не менее девяти ночных землетрясений с магнитудами в диапазоне $M_b = 3.0—4.2$. В 2015—2016 гг. ночная сейсмическая активность заметно снизилась, и возможно привести примеры только двух подобных событий (две нижние строки в табл. 5). Таким образом, представляется, что причиной возникновения техногенно-тектонического Бачатского землетрясения стало постоянное нарастание техногенной нагрузки в виде горных и взрывных работ и, как следствие, накопление упругой тектонической энергии в разномасштабных структурах земной коры, которая не успевает релаксировать, в особенности в структурах большого размера. Массовые взрывы и затем само землетрясение с очагом десятки километров могли стать триггером отмеченных сейсмических событий.

Такое же пристальное внимание своей потенциальной опасностью в отношении возникновения катастрофических техногенно-тектонических землетрясений привлекает регион южнее г. Осинники, где расположены крупные угольные разрезы Калтинский и Осинниковский, а также шахта Алардинская. Этот регион, так же как Бачатский, характеризуется высокой энергонасыщенностью структур земной коры и их сеймотектонической активностью, поскольку еще до начала применения крупномасштабных массовых взрывов на его территории возникали сильные сейсмические события (см. табл. 1). Начиная с 2007 г., когда в технологию добычи включили крупномасштабные массовые взрывы, на территории региона стали ежегодно возникать ночные события, число которых по мере роста техногенной нагрузки увеличивалось. Так, если в 2007—2008 гг. возникало по 2—3 ночных события в год, то в 2014—2015 гг. по 4—6 ночных событий в год, и уже в 2016 г. было зарегистрировано 11 ночных событий, в их числе оказались два ночных землетрясения с магнитудами $M_b = 4.5$ и 4.6 (см. табл. 4). В конечном итоге за период 2007—2016 гг. в Осинниковском регионе было зарегистрировано как минимум 43 ночных техногенно-тектонических землетрясения с региональными магнитудами в диапазоне $M_b = 3.0—4.6$. Возможно, что более сильные техногенно-тектонические землетрясения в этом регионе пока не происходили потому, что систематическое воздействие крупномасштабных взрывов не только способствовало активизации геодинамических процессов, но и вместе с отмеченными выше техногенно-тектоническими событиями обеспечивали процесс релаксации напряженного состояния в очагах его концентрации, предотвращая достижение ими значительных размеров, определяющих величину выделяющейся сейсмической энергии. В целях контроля за развитием техногенно-тектонической сейсмичности в Осинниковском регионе необходима организация и проведение комплексных инструментальных наблюдений, в том числе в режиме мониторинга с применением сейсмических групп и современных методов обработки материалов регистрации.

Следует отметить, что подобные сейсмические наблюдения уже проводятся в последние годы в ряде угледобывающих регионов на территории Кузбасса и результаты таких наблюдений опубликованы [Еманов и др., 2008, 2009; Брыксин, Селезнев, 2012; Яковлев и др., 2013], в том числе информация о Бачатском землетрясении [Еманов и др., 2014]. Результаты инструментальных наблюдений позволят не только проводить идентификацию сейсмических событий и выделять техногенно-тектонические землетрясения из потока сейсмических событий, образованного взрывными работами и природными источниками, но и оценивать энергетический вклад этих источников в различных диапазонах магнитуд, выявлять места расположения очагов концентрации тектонических напряжений по данным регистрации релаксационных сигналов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время Кузбасс является территорией интенсивно развивающегося техногенеза. Здесь сосредоточена основная добыча коксующегося угля в России, развиваются современные геодинамические процессы с участием техногенных факторов, активно возмущающих естественное состояние структур земной коры. Именно на территории Кузбасса современная геодинамика как наука о напряженном

состоянии и сеймотектонических движениях земной коры сталкивается с необходимостью учета интенсивных воздействий внешних техногенных факторов в виде извлечения огромных объемов горных пород с применением буровзрывных технологий и крупномасштабных массовых взрывов. И хотя территория Кузбасса изначально отличалась высокой природной сейсмичностью, активное участие техногенных факторов оказывает решающее воздействие на развитие современных геодинамических процессов, возмущая и изменяя их развитие таким образом, что в окружающем породном массиве происходит перестройка существующего напряженного состояния, и в структурах земной коры возникают зоны концентрации тектонических напряжений, которые при достижении критического состояния становятся очагами техногенно-тектонических землетрясений различной интенсивности вплоть до катастрофической, как это произошло при Бачатском землетрясении.

Результаты проведенного исследования показали, что в настоящее время на территории Кузбасса в регионах разработки угольных месторождений активно развиваются процессы техногенно-тектонической сейсмичности. Об этом свидетельствует представленная в данной статье хронология ее возникновения, начиная с 60-х годов прошлого столетия, появление в его последнее десятилетие эпизодических, в том числе интенсивных сейсмических событий энергетического класса $K = 10—11$ ($M_b = 3.5—4$), а затем после 2007 г. ежегодных техногенно-тектонических землетрясений, и дальнейшего их развития вплоть до настоящего времени. Было установлено, что в период 2007—2016 гг. общее количество произошедших техногенно-тектонических землетрясений в диапазоне региональных магнитуд $M_b \geq 3$ составило 102 события, произошедших только в ночное время, и выделены регионы, на территории которых происходят такие сейсмические события. Установлено также количество возникших техногенно-тектонических землетрясений на различных этапах их развития по мере роста внешней техногенной нагрузки, состоящей главным образом из объемов разрушенной и перемещенной горной породы и воздействия взрывных работ. В целях выделения техногенно-тектонических землетрясений применены критерии «ночные события», обусловленные запретом проведения взрывных работ в ночное время, и «максимальнодопустимая магнитуда» из соображений сейсмической безопасности. Отмечена определяющая (триггерная) роль воздействия крупномасштабных взрывов (свыше 500 т) в процессе возникновения сильных техногенно-тектонических землетрясений с магнитудой $M_b \geq 4.5$. Более того, оказалось, что процесс генерации сильных техногенно-тектонических землетрясений в диапазоне магнитуд $M_b \geq 4$ более чувствителен к воздействиям именно крупномасштабных взрывов, чем их появление в диапазоне 3.0—3.9. Такой вывод опирается, в частности, на тот факт, что в периоды снижения потребления ВВ, например, в 2009 г. и в период после Бачатского землетрясения – вторая половина 2013 г. и весь 2014 г., в течение которых было не только уменьшено потребление ВВ, но и прекращено использование самых крупных массовых взрывов, техногенно-тектонические землетрясения с магнитудой $M_b \geq 4$ не возникали. В 2016 г., когда вновь возросло потребление ВВ и возобновили применение крупномасштабных взрывов, появились техногенно-тектонические землетрясения («ночные события») с магнитудами $M_b \geq 4.0$ и даже $M_b \geq 4.5$. В связи с напряженной обстановкой в отношении развития техногенно-тектонической сейсмичности в Кузбассе в статье отмечена необходимость проведения инструментальных комплексных сейсмических наблюдений в целях контроля и анализа геодинамической и сеймотектонической ситуации на территории выделенных угледобывающих регионов.

Работа выполнена при поддержке проекта РФФ 16-17-00095.

ЛИТЕРАТУРА

- Адушкин В.В. Сейсмичность взрывных работ на территории европейской части России // Физика Земли, 2013, № 2 с. 110—130.
- Адушкин В.В. Триггерная сейсмичность Кузбасса // Триггерные эффекты в геосистемах: материалы Третьего Всероссийского семинара-совещания. М., ГЕОС, 2015, с. 8—29.
- Адушкин В.В. Тектонические землетрясения техногенного происхождения // Физика Земли, 2016, № 2, с. 22—44.
- Батугин А.С. К механизму землетрясений 25.04.1997 и 27.04.1997 на севере Кузбасса // Горный информационно-аналитический бюллетень, 2006, № 2, с. 185—189.
- Батугин А.С., Батугина И.М., Головки И.В., Семенов В.А., Юй Лицзян, Цяо Цзяньюн, Чжао Цзинань, Ван Чжицян, Чжан Хунвей, Лань Тяньвей. Новые формы проявления геодинамической опасности на горных предприятиях // Труды международного научного симпозиума «Неделя Горняка – 2015»: Сб. статей. М., Изд-во «Горная книга», 2015, с. 234—246.
- Брыксин А.А., Селезнев В.С. Влияние техногенных факторов на сейсмичность районов Кузбасса и озера Байкал // Геология и геофизика, 2012, т. 53 (3), с. 399—405.
- Взрывы и землетрясения на территории европейской части России / Под ред. В.В. Адушкина, А.А. Маловичко. М., ГЕОС, 2013, 384 с.

Геолого-промышленная карта Кузнецкого бассейна (м-б 1:100 000). Новосибирск, СНИИГ-ГиМС, 2000.

Еманов А.Ф., Еманов А.А., Лескова Е.В., Колесников Ю.И. Промышленные взрывы и техногенная сейсмичность // Современная геодинамика массива горных пород верхней части литосферы: истоки, параметры, воздействие на объекты недропользования. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2008, с. 228—366.

Еманов А.Ф., Еманов А.А., Лескова Е.В., Фатеев А.В., Семин А.Ю. Сейсмические активации 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., Шевкунова Е.В., Подкорытова В.Т. Техногенная сейсмичность разрезов Кузбасса (Бачатское землетрясение 18 июня 2013) // ФТПРПИ, 2014, № 2, с. 41—46.

Землетрясения России в 2005 году. Обнинск, ГС РАН, 2007, 180 с.

Комплект карт ОСР-97 – А, В, С и другие материалы для строительных норм и правил – СНиП. Строительство в сейсмических районах. М., ОИФЗ РАН, 1998, 12 с.

Лутиков А.И., Донцова Г.Ю., Юнга С.Л. Сейсмологические аспекты землетрясения на Горном Алтае 27.09.2003, $M_s = 7.3$ (результаты предварительного анализа) // Вестник отделения наук о Земле РАН: электронный научно-информационный журнал, 2003, № 1(21).

Овсяченко А.Н., Рогожин Е.А., Новиков С.С., Мараханов А.В., Ларьков А.С., Акбиев Р.Т., Могушков И.П. Палеогеологические и тектонические исследования сейсмоопасных территорий юга Кузбасса // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2010, № 6, с. 35—45.

Сейсмическое районирование территории Российской Федерации / Под ред. В.Н. Страхова, В.И. Уломова. М., Роскартография, 2000. 8 листов.

Яковлев Д.В., Лазаревич Т.И., Цирель С.В. Природно-техногенная сейсмичность Кузбасса // ФТПРПИ, 2013, № 6, с. 20—34.

*Рекомендована к печати 20 сентября 2017 г.
В.С. Селезевым*

*Поступила в редакцию
26 мая 2017 г.*