

ГЕОМЕХАНИКА

УДК 622.235

ВЛИЯНИЕ БАЧАТСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ В КУЗБАССЕ НА ЭМИССИЮ МЕТАНА В ГОРНЫЕ ВЫРАБОТКИ УГОЛЬНЫХ ШАХТ

М. В. Курленя, М. Н. Цупов, А. В. Савченко

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
E-mail: lion_ltd@ngs.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Приведены геологические сведения об угольном месторождении полей шахт “Чертинская-Южная” и “Чертинская-Коксовая” Кузбасса, расположенных в окрестности очага землетрясения. Установлена эмиссия метана в горные выработки и получена типовая диаграмма изменения его концентрации до и после землетрясения. Дана оценка сейсмического воздействия на угольные пласты.

Землетрясение, сейсмическая энергия, метан, угольный пласт, горные выработки

DOI: 10.15372/FTPRPI20190501

В [1, 2] при изучении влияния землетрясений на фильтрационно-емкостные свойства резервуара флюидонасыщенных пород отмечено, что после прохождения сейсмических волн через массив, содержащий флюид, меняются свойства флюида и напряженно-деформированное состояние резервуара [3–6]. Наблюдениями за динамическим уровнем грунтовых вод в скважинах, проводимых на Камчатском полигоне, установлена зависимость поднятия уровня жидкости при сжатии горных пород и падения его при растяжении резервуара во время прохождения сейсмических волн, что объясняется изменением трещиноватости резервуара [7, 8].

Результаты наблюдений за сейсмической активностью на угольных шахтах Китая показали, что проницаемость угольного массива и проницаемость флюидонасыщенного массива после прохождения сейсмических волн меняется, но есть свои особенности [9–11]. Техногенные землетрясения 7–8 октября 2002 г. с магнитудой $M_L=3.2$ и 12–14 августа 2003 г. с $M_L=2.6$ на угольной шахте “Лаохутай” вызвали падение фонового уровня эмиссии метана в пространство выработки до наступления событий, а затем резкий рост, сопровождающийся большим выбросом метана, в результате чего его концентрация достигла 7.7 и 2.8% соответственно, а спустя 24 ч она стабилизировалась и показания сравнялись с фоновыми значениями. В [10] получена связь радиуса влияния сейсмического события от энергии, выделившейся в очаге землетрясения.

Цель настоящей работы — установление зависимости эмиссии метана в горные выработки от сейсмической энергии, облучающей угольный пласт. Рассмотрена динамика изменения притока метана в горные выработки от Бачатского землетрясения и приведена оценка энергии, дошедшей до шахт “Чертинская-Южная” и “Чертинская-Коксовая” Беловского района Кузбасса.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Землетрясение магнитудой 5.3 произошло 19 июня 2013 г. с интенсивностью в эпицентре 7 баллов. Очаг находился на глубине 9.8 км, в 3 км к западу от пос. Старобочаты и на расстоянии 21 км от г. Белово [12]. В 17 км от эпицентра расположены шахты “Чертинская-Южная” и “Чертинская-Коксовая” (рис. 1). Глубина залегания пластов 150–350 м, их рабочая мощность 0.9–2.7 м, влажность до 3%. Массив горных пород представлен алевролитами и песчаниками, а также пластами и пропластками угля, аргиллитами.



Рис. 1. Схема расположения эпицентра землетрясения и угольных шахт

Мониторинг газовой обстановки на шахтах осуществлялся с помощью переносных приборов АТЕСТ-1 и автоматической системы “Гранч”, включающей стационарные датчики постоянного контроля концентрации метана и углекислого газа, расположенных в горных выработках. При достижении критической концентрации газа на стационарных приборах контроля автоматически срабатывала защита, электропитание в выработке отключалось с повышенным содержанием метана.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ НА ЭМИССИЮ МЕТАНА В ГОРНЫЕ ВЫРАБОТКИ

В момент землетрясения содержание метана в воздушном потоке в горных выработках на отдельных участках шахт возросло в 40 раз. На рис. 2 показано его изменение на западном конвейерном уклоне шахты “Чертинская-Южная” [13, 14]. Аналогичные изменения концентрации метана получены приборами газового контроля и в других горных выработках. Фактические данные о газовом контроле аппроксимированы в пакете прикладных программ “Octave” методом нелинейных наименьших квадратов для регрессионной модели, представленной суммой двух ненормализованных гауссовых функций с коэффициентом детерминации $R^2 = 0.98$.

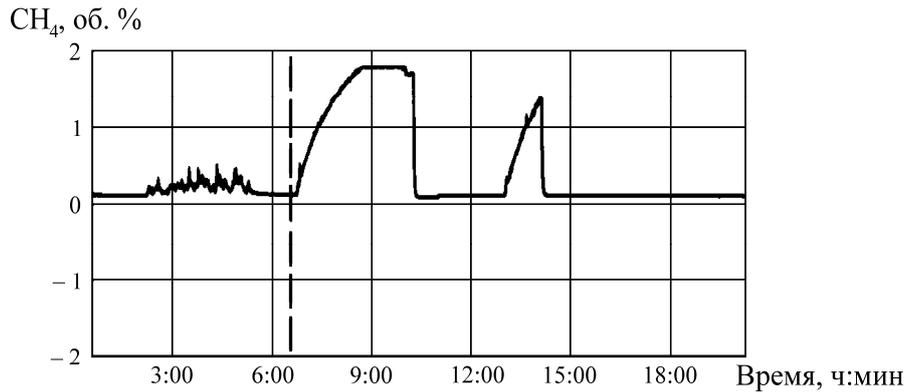


Рис. 2. Показания датчика контроля метана в горной выработке до и после землетрясения 19.06.2013 г.

На рис. 3 приведены кривые изменения концентрации метана в горных выработках, вызванные землетрясением и его афтершоком. Получена эмпирическая зависимость скорости нарастания и продолжительности концентрации метана в горные выработки от энергии упругих волн, излучаемых в массив. С ее помощью можно оценить объем дополнительно выделяющегося газа в рудничную атмосферу при землетрясениях и взрывах.

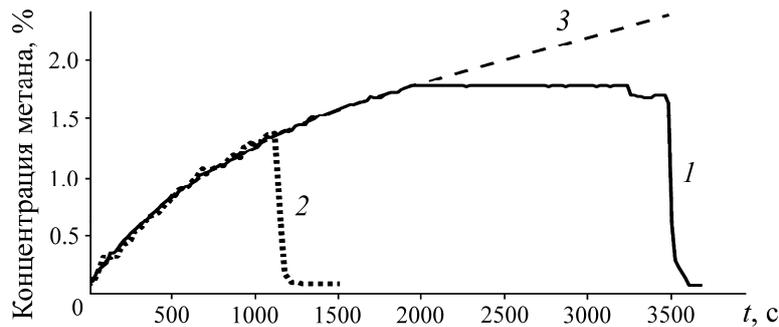


Рис. 3. Изменение концентрации в горных выработках во время землетрясения (1) и афтершока (2); 3 — расчетная кривая концентрации метана по регрессионной модели

Наблюдения за изменением концентрации метана в выработках позволяют сделать следующие суждения о сейсмическом воздействии на угольный пласт. Его основная роль состоит в создании условий для перехода метана из адсорбированного состояния в свободное и миграции в угольной среде вследствие раскрытия трещин [15–17]. При их смыкании молекулы газа вовлекаются в процесс фильтрации, смещаясь в область пониженного горного давления массива вокруг выработки, обладающий повышенной проницаемостью.

Сейсмическая энергия, прошедшая через площадку A , в окрестности выработки за время $\Delta t = t_f - t_0$ рассчитывается по формуле

$$E_s = \int_{t_0}^{t_f} \frac{\partial E_s}{\partial t} dt = \int_{t_0}^{t_f} \iiint_A \rho \left(\frac{\partial \vec{s}}{\partial t} \right)^2 \vec{v} d\vec{s} dt, \quad (1)$$

где ρ — плотность породы; s — смещение частиц среды; v — скорость волны; t — время [18].

Формула (1) применима для расчета энергии вблизи очага, ограниченного некоторой поверхностью, на которой скорость смещения $\partial s / \partial t$ известна. На практике приходится оперировать с сейсмическими данными скорости смещения грунта в точке наблюдения, расположенной на дневной поверхности, на расстоянии Δ от эпицентра события. В этом случае до-

пускают, что область разрыва сплошной среды, в которой произошло сейсмическое событие, ограничена фокальной сферой радиуса r_0 , точка наблюдения находится на расстоянии $r = \sqrt{h^2 + \Delta^2}$ от очага (рис. 4). Глубина расположения очага h вычисляется по данным наблюдений с нескольких станций.

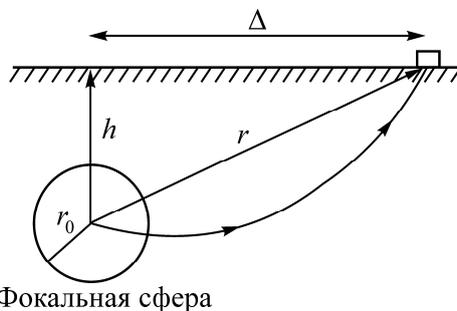


Рис. 4. Распространение сейсмической волны от очага землетрясения до точки наблюдения

В [19] уравнение (1) проинтегрировано по времени и получена оценка сейсмической энергии, переносимой поперечной волной для высокоэнергетических землетрясений в южной Калифорнии. Если скорость смещения не зависит от азимута, для поперечной волны справедлива оценка энергии:

$$E_{\beta} = 4\pi r^2 C_f^{-2} \left[\frac{r_0 q(r_0)}{r q(r)} \right]^2 \rho v_s \int_0^{\infty} v^2 dt.$$

Здесь C_f — коэффициент усиления для выхода сейсмической волны на дневную поверхность; v_s , $v(t)$ — скорость поперечной волны и смещения грунта в точке наблюдения; $q(r) = cr^{-n} e^{-kr}$ — функция, учитывающая расхождение сейсмических лучей, $c = 0.4971$, $n = 1.2178$, $k = 0.0053 \text{ км}^{-1}$ [19].

Эффективный радиус источника (радиус Брюна) находится по формуле

$$r_0 = \frac{2.34 v_s}{2\pi f_c},$$

f_c — угловая частота, определяемая по изменению характерного для низких частот линейного тренда спектральной плотности [20].

Воспользуемся соотношением для угловой частоты f_c излучаемого спектра и скалярным сейсмическим моментом M_0 [21]:

$$f_c = 67.33 v_s M_0^{-0.33}. \quad (2)$$

Сейсмический момент в зависимости от расстояния до очага r для поперечной волны:

$$M_0 = \frac{\Omega_0}{\Psi_{\theta\varphi}} 4\pi \rho r v_s^3,$$

где $\Psi_{\theta\varphi} = 0.64$ — фактор направленности излучения из очага (для источника, описываемого скачком смещения на плоскости разрыва); Ω_0 — низкочастотная составляющая спектра поперечной волны [22, 23].

Скорость смещения грунта в точке наблюдения, расположенной на расстоянии r от очага, исходя из [21] рассчитывается как

$$v = \frac{\pi \Psi_{\theta\varphi} M_0 f_c^2}{\rho r v_s^3} (1 - 2\pi f_c t) e^{-2\pi f_c t}, \quad t \geq 0. \quad (3)$$

Отношение сейсмической энергии, излучаемой продольной волной, к поперечной имеет вид:

$$\frac{E_\alpha}{E_\beta} = \frac{1}{6} \frac{v_p^2}{v_s^2}, \quad (4)$$

E_α , v_p — энергия, излучаемая продольной волной, и ее скорость [24].

При $v_p / v_s = \sqrt{3}$ [25] энергия продольной волны определяется из (4):

$$E_\alpha = \frac{1}{18} E_\beta.$$

Сейсмическая энергия, выделившаяся в очаге E_s , оценивается по эмпирической зависимости $\log E_s = 1.8M + 4$, где M — магнитуда землетрясения [26]. По данным Европейско-Средиземноморского сейсмологического центра, моментная магнитуда события M_w составила 5.3. Сейсмический момент M_0 связан с моментной магнитудой M_w эмпирической зависимостью $M_w = 2/3(\log M_0 - 9.1)$, из которой $M_0 = 1.12 \cdot 10^{17}$ Н·м. Средняя скорость поперечных волн для Алтае-Саянского региона $v_s = 3.5$ км/с [25]. Угловая частота, рассчитанная по (2), $f_c = 0.56$ Гц, радиус Брюна $r_0 = 2.3$ км, плотность горной породы $\rho = 2.4$ г/см³ [27], расстояние от центра очага до шахты “Чертинская-Южная” $r = 23.3$ км. Максимальная скорость смещения грунта на шахте оценивалась по (3) при $t = 0 - v_{\max} = 0.029$ м/с. На рис. 5 показана скорость смещения грунта, полученная по (3).

Суммарная энергия воздействия сейсмическими волнами на горные выработки от основного события составила 176 Дж/м². Этого оказалось достаточно для аномального газовыделения в горные выработки, приведшего к увеличению концентрации метана выше фонового уровня в 40 раз. При повторном облучении угольного массива сейсмическими волнами, вызванными афтершоком от основного землетрясения, динамика выхода метана в пространство выработки повторилась. Энергия воздействия оказалась меньше, чем основного события, и фоновый уровень метана в пространство выработки превышен более чем в 13 раз.

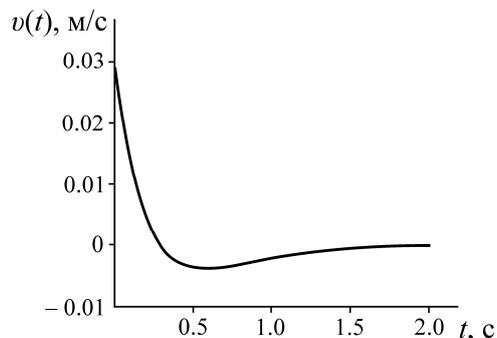


Рис. 5. Скорость смещения грунта на шахте “Чертинская-Южная”

ВЫВОДЫ

Установлено изменение концентрации притока метана в горных выработках при землетрясении и определена сейсмическая энергия, способствующая этому процессу. Оценена величина упругой сейсмической энергии, подводимой к угольному массиву, в контексте выброса метана. Эффект воздействия землетрясения на геомеханическое состояние геологической среды следует рассматривать как одно из направлений развития технологии дегазация угольных месторождений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Монахов Ф. И., Божкова Л. И.** Гидрогеодинамический предвестник Курильских землетрясений // Гидрогеохимические предвестники землетрясений. — 1985. — С. 112–115.
2. **Киссин И. Г.** Землетрясения и подземные воды. — М.: Наука, 1982. — 176 с.
3. **Механизм интенсификации добычи нефти в вибросейсмическом поле // Активная сейсмология с мощными вибрационными источниками / А. С. Алексеев, Н. И. Геза и др. — Новосибирск: СО РАН, 2004. — С. 255–261.**
4. **Гадиев С. М.** Использование вибрации в добыче нефти. — М.: Недра, 1977. — 159 с.
5. **Смирнова М. Н.** Возбужденные землетрясения в связи с разработкой нефтяных месторождений (на примере Старогрозненского землетрясения) // Влияние инженерной деятельности на сейсмический режим. — М.: Наука, 1977. — С. 128–141.
6. **Боярка В. И.** Изменение добычи нефти в связи с афтершоками Старогрозненского землетрясения // Геология, поиски и разведка месторождений горючих полезных ископаемых. — 1975. — № 1. — С. 141–144.
7. **Копылова Г. Н.** Изменения уровня воды в скважине ЮЗ-5, Камчатка, вызванные землетрясениями // Вулканология и сейсмология. — 2006. — № 6. — С. 1–13.
8. **Болдина С. В.** Гидрогеодинамические эффекты землетрясений в системе “скважина – водовмещающая порода”: дис. ... канд. геол.-мин. наук. — Петропавловск-Камчатский, 2015. — 136 с.
9. **Si G., Durucan S., Jamnikar S., Lazar J., Abraham K., Korre A., Shi Ji-Q., Zavšek S., Mutke G., and Lurka A.** Seismic monitoring and analysis of excessive gas emissions in heterogeneous coal seams, *J. Coal Geol.*, 2015, Vol. 149. — P. 41–54. doi: 10.1016/j.coal.2015.06.016.
10. **Li T., Cai M. F., and Cai M.** Earthquake-induced unusual gas emission in coalmines — a km-scale in-situ experimental investigation at Laohutai mine, *J. Coal Geol.*, 2007, Vol. 71. — P. 209–224.
11. **Wen Z., Wang X., Tan Y., Zhang H., Huang W., and Li Q.** A study of rockburst hazard evaluation method in coal mine, *Shock and Vibration*, 2016, Vol. 2016. — P. 1–9. doi:10.1155/2016/8740868.
12. **Информационное сообщение** об ощущимом землетрясении в Кузбассе 18 июня 2013 г. / Единая Геофизическая служба РАН [Электронный ресурс]. Режим доступа http://www.ceme.gsras.ru/cgi-bin/info_quake.pl?mode=1&id=221#tab1.
13. **Цупов М. Н., Савченко А. В.** Влияние сейсмических событий на дебет жидких и газообразных полезных ископаемых // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2014. — Т. 2. — № 4. — С. 252–256.
14. **Савченко А. В., Цупов М. Н.** Влияние сейсмических событий на метановыделение угольных пластов // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2014. — Т. 1. — № 2. — С. 35–42.
15. **Крейнин Е. В.** Нетрадиционные углеводородные источники: новые технологии их разработки. — М.: Проспект, 2015. — 168 с.
16. **Алексеев А. Д., Васильковский В. А., Стариков Г. П., Спожакин А. И.** Распределение метана в угле и метод экспресс-диагностики метановой подсистемы в угольном пласте // ГИАБ. — 2009. Отд. вып. 11 “Метан”. — С. 273–292.

17. **Васильковский В. А., Калугина Н. А., Молчанов А. Н.** Фазовые состояния и механизмы десорбции метана из угля // Физико-технические проблемы горного производства. — 2006. — Вып. 9. — С. 62–70.
18. **Wu F. T.** Lower limit of the total energy of earthquakes and partitioning of energy among seismic waves, Ph.D, Thesis, California Institute of Technology, 1966. — 161 p.
19. **Kanamori H., Mori J., Hauksson E., Heaton Th. H., Hutton L. K., and Jones L. M.** Determination of earthquake energy release and ML using TERRAScope, Bulletin of the Seismological Society of America, 1993, Vol. 83, No. 2. — P. 330–346.
20. **Brune J.** Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes, J. Geophys. Res., 1970, Vol. 75, No. 26. — P. 4997–5009.
21. **Беседина А. Н., Кабыченко Н. В., Кочарян Г. Г.** Особенности сейсмического мониторинга слабых динамических событий в массиве горных пород // ФТПРПИ. — 2013. — № 5. — С. 20–36.
22. **Keilis-Borok V. I.** Investigation of the mechanism of earthquakes, Sots. Res. Geophys, 1960. — P. 4–29.
23. **Ризниченко Ю. В.** Проблемы сейсмологии. — М.: Наука, 1985. — 408 с.
24. **Hanks Th. C. and Wyss M.** The use of body-wave spectra in the determination of seismic-source parameters, Bulletin of the Seismological Society of America, 1972, Vol. 62, No. 2. — P. 561–589.
25. **Жалковский Н. Д., Цибульчик Г. М., Цибульчик И. Д.** Годографы сейсмических волн и мощность земной коры Алтае-Саянской складчатой области по данным регистрации промышленных взрывов и местных землетрясений // Геология и геофизика. — 1965. — № 1. — С. 173–179.
26. **Раутиан Т. Г.** Затухание сейсмических волн и энергия землетрясений // Труды Института сейсмологии и сейсмостойкого строительства АН ТаджССР. — 1960. — № 7. — С. 41–96.
27. **Ловчиков А. В., Савченко С. Н.** О техногенной природе Бачатского землетрясения 18.06.2013 г. // Четвертая тектонофизическая конференция в ИФЗ РАН Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле. — М.: ИФЗ РАН, 2016. — Т. 1. — С. 478–480.

Поступила в редакцию 9/IX 2019

После доработки 9/IX 2019

Принята к публикации 23/IX 2019