ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ, 2021, том 85, № 3, с. 440–444

УДК 550.3:550.34:550.385.43:523.982.8

ВОЗМОЖНАЯ РОЛЬ КОСМОФИЗИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ В ВОЗНИКНОВЕНИИ ГОРНЫХ УДАРОВ И ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

© 2021 г. О. И. Шумилов[1, 2, *], Е. А. Касаткина[1, 2], Д. В. Макаров[1]

[1]*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра Российской академии наук, Апатиты, Россия*

[2]*Федеральное государственное бюджетное научное учреждение Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия*

**E-mail: oleg@aprec.ru*

Поступила в редакцию 25.09.2020 г.
После доработки 20.10.2020 г.
Принята к публикации 27.11.2020 г.

Проанализировано более 700 событий горных ударов на рудниках севера России за период 1947–2004 гг. в контексте возможной роли космофизических факторов в их возникновении. Анализ выявил сходство сезонных распределений горных ударов и геомагнитных возмущений в авроральной зоне. Выявлена 22-летняя периодичность в возникновении горных ударов и природных землетрясений, которая, скорее всего, имеет внеземное происхождение. Обсуждаются возможные причины возникновения горных ударов и их связи с космофизическими факторами.

DOI: 10.31857/S0367676521030285

ВВЕДЕНИЕ

Горный удар – это интенсивное разрушение массива руды или породы, которое сопровождается выбросами разрушенной горной массы (до тысяч кубометров) и сейсмическим эффектом. Поскольку фокус горного удара расположен очень близко к земной поверхности, его интенсивность намного больше, чем у естественного землетрясения с такой же магнитудой [1, 2]. Горные удары и техногенные землетрясения (сейсмическая энергия $E > 10^8$ Дж) представляет серьезную опасность для горнодобывающей промышленности и могут привести к катастрофическим последствиям: повреждения шахтного оборудования, разрушения горных выработок, сопровождающиеся травмами и жертвами среди персонала [3–6]. Например, 20 января 1960 г. на угольной шахте “Коулбрук” в ЮАР произошел мощный горный удар, где разрушения были на площади более 3 млн м^2 и погибли 432 рабочих [2]. При горном ударе на шахте “Крюгерсхаль” (Германия) 24 мая 1940 г. в результате обрушений на площади около 600 тыс. м^2 погибло 42 человека [2].

В России впервые горные удары зафиксированы более 70 лет назад на шахтах Кизеловского угольного бассейна [7]. В дальнейшем в России горные удары фиксировались на территориях угольных бассейнов (Кузнецком, Печерском, Кизеловском, Челябинском), на апатитовых месторождениях Хибинского массива, на железнорудных, бокситовых, редкометалльных месторождениях [7–11]. Сильнейшие горно-тектонические удары и техногенные землетрясения происходят на Кольском п-ове на территориях Хибинского (апатитовое месторождение) и Ловозерского (редкометалльное месторождение) горных массивов [1]. Ловозерское редкометалльное месторождение в последнее время занимает первое место по сейсмической активности среди всех рудных месторождений России [12]. Так, 17 августа 1999 г. на руднике “Умбозеро” произошло сильнейшее за всю историю эксплуатации рудников России техногенное землетрясение (магнитуда $M = 4.0$–4.4, $E \sim 10^{11}$ Дж), разрушившее 650 тыс. м^2 горных выработок [1, 12].

Очевидно, что прогнозирование и профилактика горных ударов на рудниках является одной из важнейших проблем горного производства. В данной работе проанализирована периодичность горно-тектонических ударов на рудниках Севера России за период 1944–2007 гг. в связи с циклами солнечной и геомагнитной активности, рассмотрены возможные механизмы полученной взаимосвязи.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе использованы данные каталогов горных ударов на рудниках Кизеловского (59° с.ш., 58° в.д.), Североуральского (СУБР) (60° с.ш., 60° в.д.), Октябрьского (Норильск) (69° с.ш.,

88° в.д.), Воркутинского месторождений (67.5° с.ш., 64° в.д.) [7–11], а также месторождений Хибинского (67.6° с.ш., 33.7° в.д.) [10, 11] и Ловозерского (“Умбозеро”) (67.9° с.ш., 34.4° в.д.) [12] горных массивов за период 1947–2007 гг.

В работе использованы также записи значений среднегодовых чисел Вольфа и среднемесячных величин геомагнитного Ap-индекса, наиболее мощных (магнитуда $M > 7$) землетрясений и среднемесячные данные нейтронного монитора обс. Апатиты (67.6° с.ш., 33.4° в.д.). Значения геомагнитных индексов взяты на сайте Мирового центра данных по геомагнетизму в Киото WDCG (World Data Centre for Geomagnetism, Kyoto, Japan: http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp). Данные о наиболее мощных ($M > 7$) землетрясениях за период 1900–2004 гг. представлены на сайте геологической службы США: http://neic.usgs.gov/neis/eqlists).

Достоверность сезонных распределений проверялась при помощи критерия Стьюдента. Спектральный анализ проводился при помощи метода Томсона [13]. Метод Томсона является непараметрическим и основан на использовании вытянутых сфероидальных функций конечной длительности, обеспечивающих максимальную концентрацию энергии в заданной полосе частот [13].

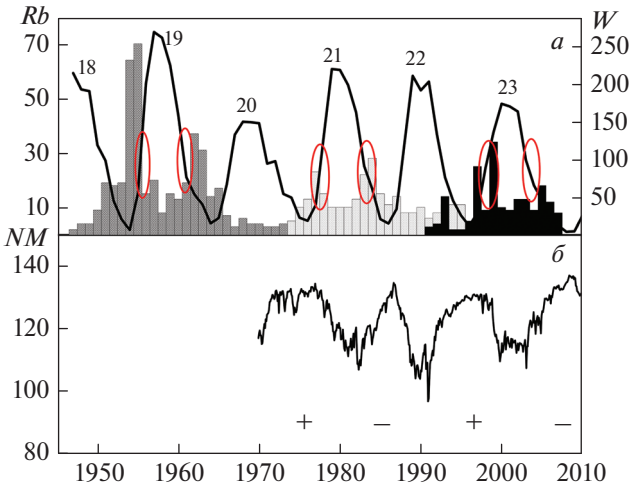

Рис. 1. (*а*) Гистограмма распределения горных ударов по годам: серые столбики – горные удары на Кизеловском бассейне, светло-серые – на СУБРЕ, черные – на Ловозерском месторождении [12] и кривая среднегодовых значений чисел Вольфа; (*б*) – среднемесячные значения вариаций галактических космических лучей по данным нейтронного монитора обс. Апатиты. Полярность магнитного поля Солнца обозначена знаками + (магнитное поле направлено от Солнца) и – (магнитное поле направлено к Солнцу).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Зависимость горных ударов от солнечной активности (СА) и солнечно-лунных приливов отмечалась ранее в ряде работ [14–19]. В настоящей работе исследована периодичность горных ударов на большой выборке данных и приведены возможные механизмы связи техногенной сейсмичности с активностью Солнца.

На рис. 1*а* приведены графики среднегодовых значений чисел Вольфа W и гистограммы количества горных ударов на рудниках Кизеловского бассейна, СУБР и Ловозерского редкометалльного месторождения за период 1947–2007 гг. Отчетливо видно, что частота горных ударов увеличивается на фазах подъема и спада нечетных циклов солнечной активности, тогда как четные циклы СА характеризуются минимальным количеством горных ударов (рис. 1*а*). Характер распределения указывает на существование 22-летней периодичности в вариациях числа горных ударов, хотя этот вывод нельзя считать достоверным на таком небольшом временном интервале. Следует отметить, что 22-летняя периодичность в вариациях числа горных ударов отмечалась и ранее, но на меньшей выборке данных [15, 16].

Известно, что 11-летние циклы солнечной активности (циклы Швабе) присутствуют в вариациях числа солнечных пятен, солнечной радиации и галактических космических лучей (ГКЛ). Что касается 22-летнего цикла солнечной активности (цикла Хэйла), связанного со сменой полярности общего магнитного поля Солнца, то он, хотя и присутствует в вариациях ГКЛ (рис. 1*б*), но практически не заметен в вариациях числа солнечных пятен и солнечной радиации. Смена полярности магнитного поля Солнца происходит вблизи максимумов СА, что приводит к изменению направления дрейфа потоков ГКЛ в гелиосфере. При этом интегральный поток ГКЛ увеличивается во время 11-летних циклов с положительной полярностью (т.е., когда магнитное поле направлено от Солнца) и уменьшается во время “отрицательных” 11-летних солнечных циклов [20], что проявляется в чередовании резких и плоских максимумов потоков ГКЛ по данным нейтронного монитора обс. Апатиты (рис. 1*б*).

Недостаточность исходной выборки не позволяет провести спектральный анализ для достоверного выделения 22-летней периодичности горных ударов. Учитывая, что механизмы формирования и реализации горных ударов и естественных землетрясений в некоторой степени можно считать аналогичными [21] мы провели спектральный анализ периодичности наиболее мощных ($M > 7$) землетрясений (рис. 2). Видно, что в спектре естественной сейсмичности присутствует пик ~22 г. Как известно, 22-летняя периодичность обнаружена в климатических записях во многих регионах земного шара, причем часто с амплитудой, превышающей амплитуду 11-летнего цикла [22–29] а также в вариациях геомагнитной

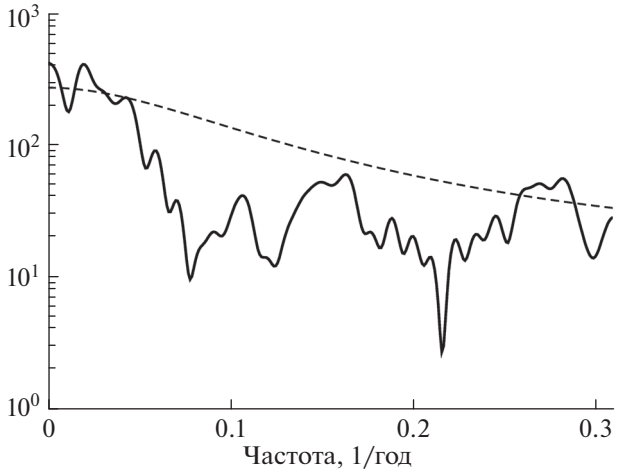

Рис. 2. Спектр вариаций мощных ($M > 7$) землетрясений за период 1900–2004 гг. Штриховая линия – граница 99%-ного доверительного интервала относительно красного шума.

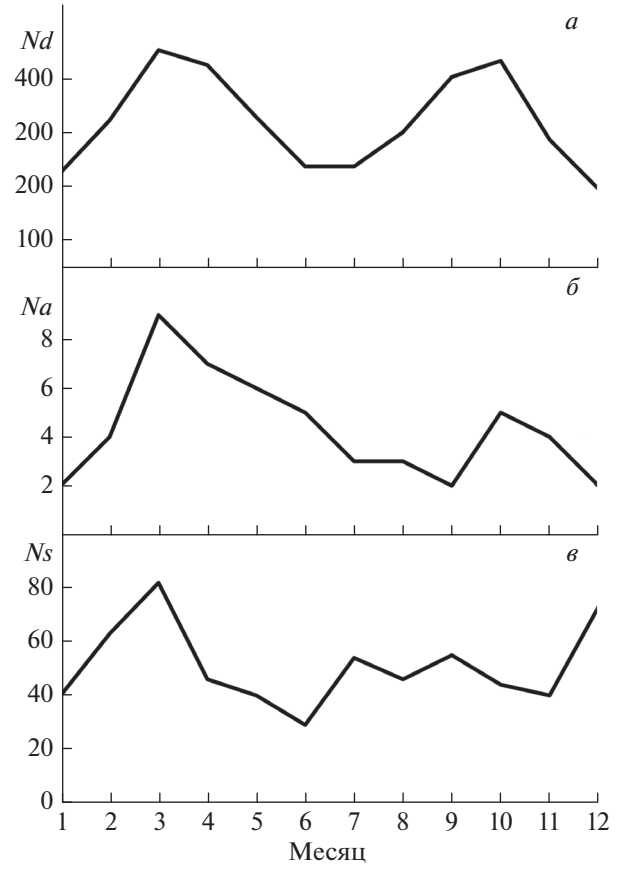

Рис. 3. Распределение по сезонам: *а* – геомагнитных возмущений (Ар > 25 нТл) за 1932–2014 гг.; *б* – горных ударов на месторождениях авроральной зоны (Воркутинское, Октябрьское и месторождений Хибинского горного массива) за 1966–1987 гг.; *в* – горных ударов на среднеширотных месторождениях Кизеловского бассейна и СУБР за 1972–1987 гг.

активности [30]. В работе [26] было высказано предположение, что 20–22-летняя периодичность, наблюдаемая в вариациях различных климатических параметров, связана с увеличением количества космической пыли внутри солнечной системы вследствие ослабления величины магнитного поля Солнца при смене знака во время солнечных максимумов. Результаты экспериментов, проведенных в рамках проекта DUST на борту космического аппарата Ulysses, показали, что экранировка магнитного поля Солнца была ослаблена во время 11-летнего солнечного максимума (2000 г.), и количество межзвездной пыли внутри Солнечной системы увеличилось втрое [31]. Вероятно, частицы космической пыли могут быть сфокусированы в плоскости эклиптики или отклоняться от нее в зависимости от полярности магнитного поля Солнца, которая изменяется каждые 11 лет, что подтверждается модельными расчетами [32]. Периодическое увеличение количества космической пыли внутри Солнечной системы, особенно в плоскости эклиптики, может повысить вероятность столкновения малых космических тел (мини-комет, комет и астероидов) друг с другом и Землей, что, в свою очередь, может привести к вариациям притока космического вещества на Землю с периодом в 22 г. [30, 32].

Выше отмечалось, что горные удары сосредоточены, в основном, на фазах спада и подъема нечетных циклов СА (рис. 1*а*). Похожим образом ведет себя локальный индекс геомагнитной активности в авроральной зоне [16]. На рис. 3 приведены вариации ежемесячных значений количества дней с геомагнитными возмущениями (Ар > 25 нТл) (рис. 3*а*), а также горных ударов на месторождениях, находящихся в авроральной (Воркутинское, Октябрьское, месторождения Хибинского горного массива) (рис. 3*б*) и среднеширотной (СУБР + Кизеловсий бассейн) зонах (рис. 3*в*). Видно, что в авроральной зоне, где геомагнитная активность максимальна, в сезонном распределении горных ударов наблюдаются два максимума: в марте ($p < 0.001$) и октябре (рис. 3*б*), которые совпадают с равноденственными пиками в распределении геомагнитных возмущений (Ар > 25 нТл) (рис. 3*а*), что косвенно подтверждает их геомагнитную природу. Первый максимум в распределении горных ударов на среднеширотных рудниках ($p < 0.001$) также совпадает с весенним равноденственным пиком геомагнитной активности (рис. 3*в*). При этом следует отметить, что осенний пик в сезонном распределении реализаций горных ударов в авроральной зоне не является статистически достоверным, что объясняется недостаточным количеством данных. Основным отличием в распределении горных ударов в средних широтах является наличие зимнего максимума в декабре ($p < 0.001$) (рис. 3*в*), который не соответствует бимодальному распределению геомагнитных возмущений средней ин-

тенсивности (рис. 3*а*). С другой стороны, известно, что в сезонном распределении короткопериодных геомагнитных пульсаций Pc1, характерных для средних широт, также присутствует зимний максимум, особенно в годы минимальной солнечной активности [33].

Приведенные выше результаты позволяют предположить, что геомагнитные возмущения могут быть причиной изменения режима существующих напряжений в земной коре и влиять на уровень сейсмичности. Наиболее известным механизмом, объясняющим преобразование энергии магнитного поля Земли в механическую энергию горных пород, является магнитострикция. В работе [34] показано, что эманация радиоактивного радона ^{222}Rn из земной поверхности связана с геомагнитными возмущениями через механизм магнитострикции:

$$J \sim \frac{\Delta H}{T} Qt, \qquad (1)$$

где J – количество выделяемого радона, ΔH – амплитуда геомагнитного возмущения, T и t – период и длительность геомагнитного возмущения соответственно, Q – резонансная характеристика горной породы. Радиоактивный радон ^{222}Rn выделяется из микропор на земную поверхность вследствие магнитострикционных сжатий/растяжений в высокочастотном поле геомагнитных возмущений, например, геомагнитных пульсаций и ОНЧ-излучений [34]. При этом амплитуда магнитострикции зависит от содержания в породе магнетита, а малое значение ΔH компенсируется высокой частотой: многократное малое сжатие оказывается эффективнее однократного большого сжатия [34]. Косвенным подтверждением влияния геомагнитных возмущений на уровень сейсмичности является установленная недавно синхронность геомагнитных вариаций импульсного типа и вариаций максимальной амплитуды поля микросейсмических колебаний [35].

Таким образом, рудные месторождения Кольского п-ова с большим содержанием магнитострикционных материалов, находящиеся в зоне наибольшей геомагнитной активности, являются потенциально сейсмически опасными. Примером является редкометалльное месторождение Ловозерского горного массива, сейсмичность которого была признана исключительно техногенной на основании того, что до 1990–1991 гг. сейсмических событий в районе месторождения не наблюдалось [12]. В настоящее время, несмотря на закрытие в 2004 г. одного из рудников (рудник “Умбозеро”), сейсмичность месторождения не только не прекратилась, а остается на постоянно высоком уровне [1, 12]. Результаты настоящей работы не находятся в противоречии с данным выводом, если рассматривать горные массивы, находящиеся под влиянием техногенных взрывных воздействий в качестве открытых неравновесных динамических систем [36]. В таких системах под действием внешнего источника могут возникать автоколебательные процессы [37]. В нашем случае таким внешним источником для Хибинского и Ловозерского горных массивов могут являться геомагнитные возмущения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенного анализа позволили на большой выборке данных (1947–2007 гг.) выделить 22-летнюю периодичность в возникновении горных ударов на рудниках России. Аналогичная периодичность выявлена в проявлении мощных ($M > 7$) естественных землетрясений. Анализ сезонного распределения горных ударов на рудниках авроральной и среднеширотной зоны свидетельствуют о возможной их связи с геомагнитной активностью. Полученные результаты могут быть использованы для прогнозирования и профилактики горных ударов на рудниках Севера России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Адушкин В.В.* // Физ. Земли. 2016. № 2. С. 22; *Adushkin V.V.* // Izv. Phys. Sol. Earth. 2016. V. 52. P. 173.
2. *Song D., He X., Wang E. et al.* Rockburst evolutionary process and energy dissipation characteristics. Singapore: Springer Nature Singapore Pte Ltd, 2020. 250 p.
3. *Ломов М.А., Константинов А.В., Терешкин А.А.* // Пробл. недропольз. 2019. № 4. С. 83.
4. *Cai M.* // J. Rock Mech. Geotech. Eng. 2016. V. 8. P. 204.
5. *Ghasemi E., Gholizadeh H., Adoko A.C.* // Eng. Comput. 2020. V. 36. P. 213.
6. *Pu Y., Apel D.B., Liu V., Mitri H.* // Int. J. Min. Sci. Technol. 2019. V. 29. P. 565.
7. Систематическое описание горных ударов на шахтах СССР. Ленинград: ВНИМИ, 1967. 634 с.
8. Каталог горных ударов на шахтах СССР. Ленинград: ВНИМИ, 1973. 184 с.
9. Каталог горных ударов на рудных и нерудных месторождениях. Североуральский бокситовый рудник. Ленинград: ВНИМИ, 1985. 258 с.
10. Каталог горных ударов на рудных и нерудных месторождениях. Таштагольсое, Криворожское, Октябрьское (Норильск), Кукисвумчоррское (п.о. “Апатит”) и др. месторождения. Ленинград: ВНИМИ, 1986. 186 с.
11. Каталог горных ударов на рудных и нерудных месторождениях. Северо-Уральское, Таштагольское, Октябрьское (Норильск), Юкспорское, кукмсвумчоррское (п.о. “Апатит”), Качкарское и др. месторождения. Ленинград: ВНИМИ, 1989. 182 с.
12. *Ловчиков А.В.* // Вест. МГТУ. 2008. Т. 11. С. 385.
13. *Thomson D.J.* // IEEE Proc. 1982. V. 70. P. 1055.
14. *Белов Н.И.* // Комплексная разработка рудных месторождений и вопросы геомеханики в сложных и

особо сложных условиях: Сб. научн. тр. Апатиты: КНЦ РАН, 1995. С. 63.
15. *Яковлев Д.В., Тарасов Б.Г., Цирель С.В.* // Горн. инф-аналит. бюлл. 2002. № 5. С. 175.
16. *Shumilov O.I., Kasatkina E.A., Morner N.-A.* // In: Earthquake prediction. Leiden: The Brill Academic Publishers, 2006. P. 53.
17. *Тарасов Б.Г., Оловянный А.Г., Бугаенко Л.В.* // Зап. горн. ин-та. 2010. Т. 188. С. 183.
18. *Жирова А.М., Жиров Д.В.* // Горн. инф-аналит. бюлл. 2015. № S56. С. 254.
19. *Опарин В.Н., Багаев С.Н., Маловичко Л.А. и др.* Методы и системы сейсмодеформационного мониторинга техногенных землетрясений и горных ударов. Т. 2. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2010. 261 с.
20. *Beer J., McCracken K., von Steiger R.* Cosmogenic radionuclides: Theory and applications in the terrestrial and space environments. Heidelberg: Springer, 2012. 426 p.
21. *Козырев А.А., Мальцев В.А., Панин В.И., Рыбин В.В.* // Горн. журн. 1998. № 4. С. 47.
22. *Башкирцев В.С., Машнич Г.П.* // Геомагн. аэрон. 2003. Т. 43. С. 132.
23. *Baliunas S., Frick P., Sokoloff D., Soon W.* // Geophys. Res. Lett. 1997. V. 24. P. 1351.
24. *Касаткина Е.А., Шумилов О.И., Канатьев А.Г.* // Метеорол. гидрол. 2006. № 1. С. 55.
25. *Rigozo N.R., Nordemann D.J.R., Echer E. et al.* // Adv. Space Res. 2002. V. 29. P. 1985.
26. *Kasatkina E.A., Shumilov O.I., Krapiec M.* // Adv. Geosci. 2007. V. 13. P. 25.
27. *Velasco V.M., Mendoza B.* // Adv. Space Res. 2008. V. 42. P. 866.
28. *Shumilov O.I., Kasatkina E.A., Mielikainen K. et al.* // Int. J. Environ. Res. 2011. V. 5. P. 855.
29. *Kasatkina E.A., Shumilov O.I., Timonen M.* // J. Atm. Sol. Terr. Phys. 2019. V. 193. Art. No. 105075.
30. *Russel C.T., McPherron R.L.* // J. Geophys. Res. 1973. V. 78. P. 92.
31. *Landgraf M., Kruger H., Altobelli N., Grun E.* // J. Geophys. Res. 2003. V. 108. Art. No. 8030.
32. *Frisch P.C.* // Amer. Sci. 2000. V. 88. P. 52.
33. *Гульельми А.В., Троицкая В.А.* Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы. М.: Наука, 1973. 208 с.
34. *Шемьи-заде А.Э.* // Биофиз. 1992. Т. 37. С. 690.
35. *Адушкин В.В., Рябова С.А., Спивак А.А., Харламов В.А.* // ДАН. 2012. Т. 444. С. 304; *Adushkin V.V., Ryabova S.A., Spivak A.A., Kharlamov V.A.* // Dokl. Earth Sci. 2012. V. 444. P. 642.
36. *Хачай О.А.* // Горн. инф.-аналит. бюлл 2013. № 7. С. 145.
37. *Хакен Г.* Синергетика. М.: Мир, 1985. 243 с.

Possible role of cosmophysical factors in rockburst and earthquake occurrence

O. I. Shumilov[a, b, *], E. A. Kasatkina[a, b], D. V. Makarov[b]

[a] *Institute of North Industrial Ecology Problems, Kola Science Centre RAS, 184209, Apatity, Russia*

[b] *Polar Geophysical Institute, Apatity, 184209 Russia*

**e-mail: oleg@aprec.ru*

The database of more than 700 rockburst events at northern Russian mines was analyzed over the period from 1947 to 2004 in context of a possible role of cosmophysical factors in rockburst occurrence. The analysis showed a similarity in the seasonal distributions of rockbursts and geomagnetic disturbances. It was revealed a 22-year periodicity in rockburst and earthquake occurrence that seems to have got extraterrestrial origin. These relations seem to be understood in terms of geomagnetic effects on bedrock magnetostriction.