

УДК 622.831.32

О ВОЗНИКНОВЕНИИ КАТАСТРОФИЧЕСКОГО ГОРНО-ТЕКТОНИЧЕСКОГО УДАРА НА РУДНИКЕ “УМБОЗЕРО” В ЛОВОЗЁРСКОМ МАССИВЕ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ КОЛЬСКОГО ПОЛУОСТРОВА

© 2022 г. Академик РАН В. В. Адушкин¹, А. В. Ловчиков², А. Г. Гоев^{1,*}

Поступило 21.01.2022 г.
После доработки 04.02.2022 г.
Принято к публикации 05.02.2022 г.

Представлены параметры и особенности катастрофического горно-тектонического удара, произошедшего на редкометальном руднике “Умбозеро”, расположенном в центре Кольского полуострова в Ловозёрском массиве на расстоянии около 50 км от Хибинского массива. Магнитуда этого сейсмического события по данным сети сейсмостанций ГС РАН – $M_L = 5.1$, данных сейсмостанций на территории Норвегии $m_b = 5.9$. Выделившаяся в очаге энергия $E = 1.02 \times 10^{12}$ Дж. Размеры очага с таким запасом упругой энергии составляли десятки км и при глубине очага 4–7 км достигали выработки рудника. В результате произошли интенсивные разрушения горных выработок, добыча руды была прекращена, и рудник был закрыт. В работе выполнен также расчет выделившейся энергии не только по параметрам сейсмических волн разного типа, но и по величине сейсмического момента с привлечением экспериментальных данных о размерах подвижки в очаге 0.16 м и площади подвижки по разрыву порядка 3×10^5 м². В результате получена величина сейсмического момента $M_0 = 11.5 \times 10^{12}$ т м, значение энергетического класса $K = 11.8$ и выделившаяся энергия в очаге $E = 10^{12}$ Дж, что соответствует результатам расчета по параметрам сейсмических волн.

Ключевые слова: горный удар, тектоника, сейсмичность, разрушение, рудник

DOI: 10.31857/S2686739722050036

Особенность произошедшего 17 августа 1999 г. на Ловозёрском редкометальном руднике “Умбозеро” сильнейшего горно-тектонического удара заключается в том, что возникшие разрушения горных выработок были настолько значительными, что не позволили продолжить дальнейшую добычу руды [1]. Добыча была прекращена, рудник пришлось закрыть. При этом следует отметить, что в первые 6 лет эксплуатации рудника “Умбозеро” никакой сейсмичности в его массиве не возникало. Более того, Ловозёрское месторождение обрабатывается также рудником “Карносурт” с 1951 г. и вплоть до 90-х годов ни одного

сейсмического события там не регистрировалось. Ловозёрский массив, как и само месторождение, в течение 40 лет в сейсмическом отношении выглядел асейсмичной зоной [2].

Интерес к причинам возникновения подобных событий существует уже более 20 лет, но как правило, в качестве причины рассматривается изменение “равновесия” в среде, связанное с интенсивной разработкой месторождений без учета локального геолого-тектонического строения региона и связи приповерхностных структур с глубинными. Вместе с тем для исследуемого в работе Ловозёрского массива показаны существенная тектоническая неоднородность и высокий уровень тектонических напряжений в приповерхностных блочных структурах. Так, в работе [3] на основе комплекса геолого-геофизических данных продемонстрировано, что Ловозёрскому массиву соответствует аномалия скорости и плотности, имеющая коническую форму, а ее нижняя резкая граница соответствует глубинам 7–9 км.

¹Институт динамики геосфер
им. акад. М.А. Садовского

Российской академии наук, Москва, Россия

²Горный институт Кольского научного центра
Российской академии наук, Апатиты, Россия

*E-mail: andr.goev@gmail.com

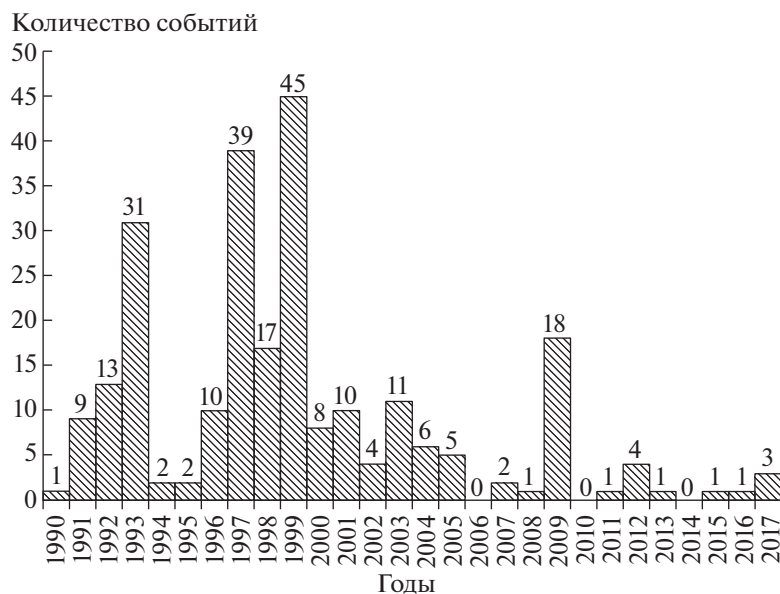


Рис. 1. Гистограмма распределения сильных сейсмических событий ($M_L > 1$) в массиве рудника “Умбозеро” (по данным Кольского регионального сейсмического центра ГС РАН и с/станции “Ловозеро” ГС РАН).

В другой работе на основе метода функций приемника [4] получены новые данные об особенностях скоростного строения земной коры и верхней мантии Центрально Кольского блока и, в частности, о строении Ловозёрской и Хибинской интрузий. В этих массивах также выявлена скоростная аномалия на глубинах 7–11 км и показано, в целом, сложное строение Ловозёрской интрузии с существенным утолщением земной коры под этим массивом. Кроме того, многолетние исследования сейсмичности Кольского полуострова, проводимые Кольским филиалом Единой геофизической службы РАН (ГС РАН), показывают увеличение количества сейсмических событий в районе Хибинского и Ловозёрского массивов. На основании этих результатов можно полагать, что, помимо техногенных воздействий, существенная роль в возникновении и развитии катастрофических техногенно-тектонических событий может принадлежать процессам взаимодействия приповерхностных структур с более глубокими слоями земной коры.

Сейсмичность в Ловозёрском массиве возникла в начале 90-х годов на руднике “Умбозеро”, построенном и начавшем добычу редкометалльных руд в 1984 г. В 1991 г., когда над выработанным пространством нижней пластообразной пологопадающей рудной залежи (мощность залежи 2.5 м) стала отрабатываться более мощная верхняя залежь (мощностью 5.0 м), в Ловозёрском массиве, на некотором расстоянии от рудника произошли сразу 3 горно-тектонических удара, магнитудой $M_L = 2.2–2.6$, разрушивших один из

очистных блоков рудника на нижней залежи на площади 80 тыс. м² [5].

Техногенная сейсмичность в массиве рудника “Умбозеро” в 90-х годах стремительно развивалась в зоне сближенной отработки двух параллельных пологопадающих залежей (расстояние между залежами по вертикали 50–60 м одна от другой), составляя более 10 событий в год с магнитудой $M_L > 1$. Техногенная сейсмичность в массиве рудника резко уменьшилась в 1993–1994 гг., когда рудник, вследствие экономических трудностей, прекращал добычу руды. Это обстоятельство свидетельствует о явно техногенном характере сейсмичности массива рудника. С возобновлением добычи руды в 1995 г. на двух сближенных залежах на руднике “Умбозеро” сейсмичность в массиве рудника снова стала стремительно возрастать, достигая нескольких десятков сейсмических событий $M_L > 1$ в год (по данным КРСЦ РАН и сейсмостанции “Ловозеро” ГС РАН). Распределение сильных сейсмических событий ($M_L > 1$) в массиве рудника “Умбозеро” с 90-х годов до нашего времени представлено на рис. 1.

Наконец, 17.08.1999 г. в руднике “Умбозеро” в зоне сближенной отработки двух залежей произошел мощнейший горно-тектонический удар, вследствие которого горные выработки на нижней отработанной залежи были разрушены на огромной площади 650 тыс. м².

Как показано в работах [1, 6, 7], это было самое мощное сейсмическое событие в шахтах и рудниках России за всю их историю. Это сейсмическое

Таблица 1. Основные параметры сейсмического события 17.08.1999 г. на руднике “Умбозеро” по данным различных источников

Источник	t_0	Lat	Lon	H	Магнитуды
КРСИ, Россия	04.44.35.7	67.88	34.50	4–7	$M_L = 5.1, M_s = 4.7, K = 12$
ISC, Англия	04.44.34.2	67.81	34.50	0	$m_b = 4.6, M_s = 4.3$
NEIC, США	04.44.36.0	67.86	34.38	10	$m_b = 4.6$
HEL, Финляндия	04.44.36.2	67.84	34.56	4	$M_L = 4.3, M_s = 4.2$
EIDS, США	04.44.34.4	67.87	34.43	0	$M_L = 4.6, M_s = 4.4, m_b = 4.2$
BER, Норвегия	04.44.39.1	67.82	34.23	0	$m_b = 5.9, M_L = 4.7$
ВЛ, Китай	04.44.33.9	67.76	34.38	9	$M_s = 5.0, m_b = 4.6, M_s = 4.9$
LDG, Франция	04.44.37.6	67.88	34.57	3.3	$M_b = 4.7$

событие следует отнести к категории техногенно-тектонических землетрясений [8], которое произошло в результате выделения значительного количества тектонической энергии под воздействием техногенной деятельности в виде горных работ, в частности, выемке и перемещении породы.

Основные параметры этого мощного сейсмического события приведены в табл. 1 по материалам его регистрации сейсмическими станциями КРСЦ Геофизической службы РАН с привлечением данных мировой сети сейсмических станций [9].

Параметры данного сейсмического события, зарегистрированные зарубежными станциями, взяты из работы [10]. Для события 17 августа 1999 г. по результатам регистрации локальной магнитуды $M_L = 5.1$ и магнитуды поверхностной волны $M_s = 4.7$ была рассчитана величина энергетического класса $K = \lg E$ и соответственно определена величина высвободившейся энергии $E = 1.02 \times 10^{12}$ Дж. Расчеты были выполнены с использованием уравнения Бата [11]:

$$\lg E = 5.24 + 1.44M_s$$

и соотношения Гутенберга–Рихтера [12]:

$$m_b = 1.7 + 0.8M_L - 0.01M_L^2$$

а также формулы из [13]:

$$m_b = 2.9 + 0.56M_s$$

Вычисленная величина энергетического класса данного сейсмического события также приведена в табл. 1 и составила $K = 12$. При этом по результатам инструментальных измерений очаг горного удара располагался на глубине 4–7 км в непосредственной близости к руднику “Умбозеро”. Высвободившаяся в очаге этого горно-тектонического удара величина энергии $E = 1.02 \times 10^{12}$ Дж, а также значение локальной магнитуды $M_L = 5.1$ и

магнитуды $M_s = 4.7$, определенной по максимальной амплитуде смещения в группе поверхностных волн, оказались самыми большими для Ловозёрского массива за весь период инструментальных наблюдений на Кольском полуострове с 1956 г. Землетрясение от этого горно-тектонического удара было зарегистрировано практически всеми станциями мировой сейсмической сети (табл. 1). В течение всего года с января по ноябрь 1999 г. землетрясение сопровождалось активной форшоковой (около 20 толчков интенсивностью 4–9 энергетических классов) и афтершоковой сейсмичности (около 30 толчков интенсивностью 5–8 энергетического класса).

Схема разрушения толщи покрывающих пород над обрабатываемыми рудными залежами показана на рис. 2. Как видно из рис. 2, Ловозёрское месторождение обрабатывает пологопадающую пластообразную залежь мощностью от 1 до 5 м, выходящую на поверхность и уходящую на глубину более 1000 м. На рис. 2 показано, что во время горно-тектонического удара от выработанного пространства нижней залежи через край отработанной части верхней залежи под углом 40° к горизонту проросла громадная трещина, толщиной 10–20 см. Трещина пересекла русло ручья, текущего по поверхности, который сдренировал в горные выработки, а после возникновения трещины исчез с дневной поверхности.

В контрольно-наблюдательном квершлага (горизонтальная подземная выработка, проводимая по пустым породам в простирации пласта), заложенном над отработанной частью нижней залежи, удалось точно измерить смещение по трещине во время горно-тектонического удара: 16 см по плоскости трещины (13 см по горизонтали и 9 см по вертикали). Самообразование трещины произошло под влиянием горизонтальных тектонических напряжений, величиной 50 МПа, действу-

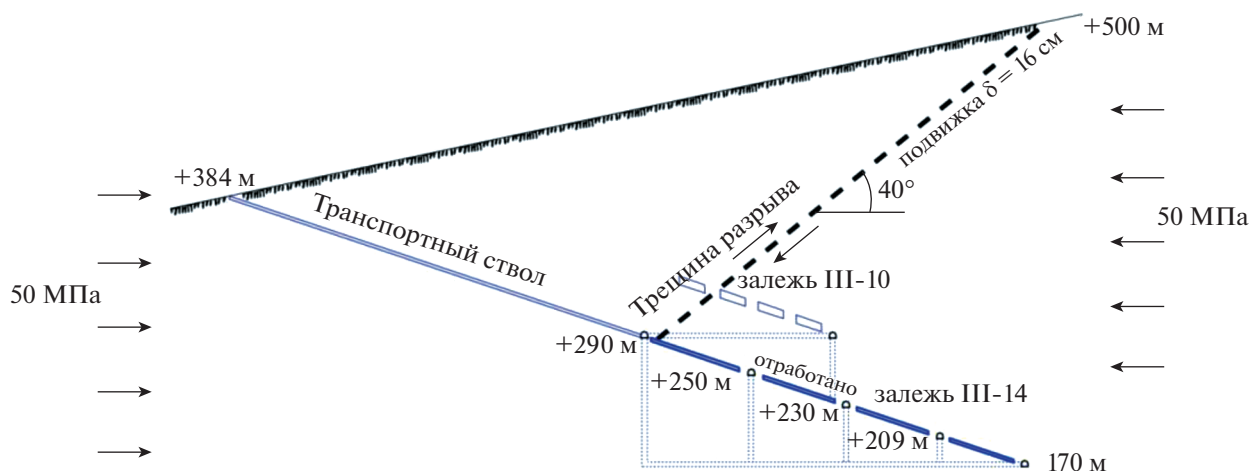


Рис. 2. Схема механизма горно-тектонического удара на руднике "Умбозеро".

ющих в массиве, которые были в 10 раз больше напряжений от веса налегающих толщ пород, и концентрации напряжений, действующих вокруг выработок на обеих сближенных залежах.

Подобные наблюдения и измерения Горного института КНЦ РАН в рудниках Кольского полуострова [14, 15] показали, что главной причиной горных ударов в рудниках являются не гравитационные напряжения, связанные с весом пород, налегающих над горными выработками, а естественные тектонические напряжения от горообразовательных процессов в литосфере, действующие в недрах массивов, которые по величине многократно превосходят напряжения, обусловленные силами веса толщ налегающих пород. Еще четверть века назад, в работе [16] было показано, что тектонические напряжения являются главной причиной наиболее мощных динамических явлений в рудниках России – горно-тектонических ударов. На основе существования в массивах рудных месторождений больших горизонтальных тектонических напряжений, как причины техногенной сейсмичности, предложены новая концепция возникновения этой сейсмичности и классификация геодинамических явлений в рудниках [15].

Некоторые предложения этой новой концепции с учетом процессов взаимодействия глубинных и приповерхностных структур и аномально высоких тектонических горизонтальных напряжений, превосходящих в 6–10 раз гравитационные напряжения от всех налегающих пород, представлены в работе [17]. Сейсмические (динамические) события в массивах рудников – это резкие подвижки геологической среды в новое положение геодинамического равновесия под влиянием действующих в этой среде напряжений. Все подвижки пород сопровождаются сей-

смическими импульсами с различной энергией, зависящей от геологической среды. Для оценки воздействия сейсмического импульса при землетрясениях в сейсмологии наряду с определением выделившейся в очаге энергии по параметрам образовавшейся сейсмической волны используется понятие сейсмического момента в очаге [18]:

$$M_0 = GS\delta$$

где M_0 – сейсмический момент в очаге землетрясения, Н – м;

G – модуль сдвига пород массива, МПа;

S – площадь разрыва при сейсмическом событии, м²;

δ – величина подвижки пород в очаге, м.

Модуль сдвига G рассчитан по известному соотношению:

$$G = E/2(1 + \nu)$$

где E – модуль упругости пород, МПа; ν – коэффициент Пуассона для пород.

Опыт наблюдений над сильнейшими сейсмическими событиями на рудниках Кольского полуострова подтвердил возможность расчета их энергии по формуле сейсмического момента в очаге [1, 19].

Для расчетов приняты показатели свойств пород Ловозёрского редкометального месторождения (породы – нефелиновые сиениты: луавриты, уртиты, фойянты) – величина модуля упругости $E = 6 \times 10^4$, коэффициент Пуассона $\nu = 0.25$ и величина модуля сдвига $G = 2.4 \times 10^6$ т/м². В формуле для расчета сейсмического момента в очаге землетрясения основными показателями для определения энергии динамического события яв-

ляются площадь подвижки, которая в результате горно-тектонического события составила $S = 3 \times 10^5 \text{ м}^2$, и величина произошедшей при этом подвижки $\delta = 0.16 \text{ м}$. В результате расчетов было получено, что величина сейсмического момента в очаге данного сейсмического события составила $M_0 = 11.5 \times 10^{12} \text{ т м}$, величина энергетического класса $K = 11.8$ и соответственно выделившаяся в очаге энергии $\sim 10^{12} \text{ Дж}$. Таким образом, расчеты показали, что оценка энергии горно-тектонических ударов в рудниках по формуле сейсмического момента практически совпадает с расчетами энергии в источнике данного сейсмического события по параметрам образовавшейся сейсмической волны. Такой результат свидетельствует о том, что оценка энергии горно-тектонических ударов в рудниках по формуле сейсмического момента в очаге вполне допустима.

Работа выполнена с использованием данных, полученных на уникальной научной установке — «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено в соответствии с темой НИР № 1021052706257-4-1.5.4 и за счет гранта Российского научного фонда № 21-17-00161.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ловчиков А.В.* Сильнейшие горно-тектонические удары и техногенные землетрясения на рудниках России // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2013. № 4. С. 68–73.
2. *Lovchikov A.V., Asming V.E.* Changes in the Geodynamic Regime of the Lovozero Rock Massif (Kola Peninsula) under the Influence of Mining / Proc. 8th Int. Symp. Mining in the Arctic. 2016. P. 48–55.
3. *Глазнев В.Н., Жирова А.М., Раевский А.Б.* Новые данные о глубинном строении Хибинского и Ловозерского массивов, Кольский полуостров // ДАН. 2008. Т. 422. № 3. С. 391–393.
4. *Гоев А.Г., Санина И.А., Орешин С.И., Резниченко Р.А., Тарасов С.А., Федоров А.В.* Скоростное строение литосферы Хибинского и Ловозерского массивов (северо-восточная часть Балтийского щита) методом функции приемника // Физика Земли. 2021. № 5. С. 30–40. <https://doi.org/10.31857/S0002333721050069>
5. *Ловчиков А.В., Гуменников В.П., Ивахно В.Я.* Анализ явлений, предшествовавших горно-тектоническим ударам в Ловозерском массиве // ФТПРПИ. 1993. № 1. С. 13–22.
6. *Козырев А.А., Ловчиков А.В., Кузьмин И.А.* Сильнейшее техногенное землетрясение на российских рудниках, 17 августа 1999 г., рудник “Умбозеро” (Кольский полуостров) // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2000. № 6. С. 169–173.
7. *Козырев А.А., Ловчиков А.В., Пернацкий С.И., Шершеневич В.А.* Сильнейшее техногенное землетрясение на руднике “Умбозеро”: горнотехнические аспекты // Горный журнал. 2002. № 1. С. 43–49.
8. *Адушкин В.В.* Тектонические землетрясения техногенного происхождения // Физика Земли. 2016. № 2. С. 22–44.
9. Землетрясения Северной Евразии в 1999 году / Обнинск:ФОП. 2005. 368 с.
10. *Uski M., Pelkonen E.* Earthquake in Northern Europe in 1999 // Helsinki University Press, Report R-154. 2000. P. 99.
11. *Bath M.* Introduction to Seismology. Basel and Stuttgart: BirkhauserVerlag. 1979. 275 p.
12. *Рихтер Ч.Ф.* Элементарная сейсмология. М.: ИФЗ АН СССР. 1974. Ч. 2. 217 с.
13. Рекомендации по вопросам определения магнитуды и энергетической классификации землетрясений. Магнитуда и энергетическая классификация землетрясений. М.: ИЛ. 1963. 670 с.
14. *Марков Г.А.* Тектонические напряжения и горное давление в рудниках Хибинского массива. Л.: Наука, 1977. 212 с.
15. *Турчанинов И.А., Марков Г.А., Иванов В.И., Козырев А.А.* Тектонические напряжения в земной коре и устойчивость горных выработок. Л.: Наука, 1978. 256 с.
16. *Ловчиков А.В.* Горно-тектонические удары на российских рудниках: статистика и некоторые закономерности // ФТПРПИ. 1997. № 2. С. 22–32.
17. *Ловчиков А.В.* Инновационные решения по управлению горным давлением при отработке Ловозерского редкоземельного месторождения // Вестник Кольского научного центра РАН. 2019. № 1 (11). С. 50–56.
18. Методы оценки сейсмических воздействий (пособие). Вопросы инженерной сейсмологии. М.: Наука, 1993. Вып. 34. С. 5–94.
19. *Сырников Н.М., Тряпичин В.М.* О механизме техногенного землетрясения в Хибинах. Доклады АН СССР. 1990. Т. 314. № 4. С. 830–833.

ON THE OCCURRENCE OF A CATASTROPHIC ROCKBURST AT THE “UMBOZERO” MINE IN THE LOVOZERO MASSIF IN THE CENTRAL PART OF THE KOLA PENINSULA

Academician of the RAS V. V. Adushkin^a, A. V. Lovchikov^b, and A. G. Goev^{a, #}

^a*Sadovskiy Institute of Geosphere Dynamics Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

^b*Mining Institute of the Kola Science Center, Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation*

[#]*E-mail: andr.goev@gmail.com*

The parameters and features of the catastrophic rockburst that occurred at the “Umbozero” rare-metal mine located in the center of the Kola Peninsula in the Lovozero massif at a distance of about 50 km from the Khibiny massif are presented. The magnitude of this seismic event according to the GS RAS seismic network is $M_L = 5.1$, the data from seismic stations in Norway is $m_b = 5.9$. The energy released in the focus is $E = 1.02 \times 10^{12}$. The dimensions of the hearth with such a reserve of elastic energy amounted to tens of kilometers and, at a hearth depth of 4–7 km, reached the development of the mine. As a result, intensive destruction of mine workings occurred, ore mining was stopped, and the mine was closed. The paper also calculated the released energy not only by the parameters of seismic waves of various types, but also by the magnitude of the seismic moment, using experimental data on the size of the slip in the source of 0.16 m and the area of the slip along the fault of the order of 3×10^5 m². As a result, the value of the seismic moment $M_0 = 11.5 \times 10^{12}$ t m, the value of the energy class $K = 11.8$ and the released energy in the source $E = 10^{12}$ were obtained, which corresponds to the results of calculation by the parameters of seismic waves.

Keywords: rockburst, tectonics, seismicity, destruction, mine