

УДК 622.831.232

**СОВРЕМЕННАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ НА ТЕРРИТОРИИ МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ
И ЕЕ ПРОЯВЛЕНИЕ В ГОРНОПРОМЫШЛЕННЫХ ЗОНАХ**

**Ю. А. Виноградов¹, В. Э. Асминг¹,
Е. О. Кременецкая¹, Д. В. Жиров²**

¹Геофизическая служба РАН, E-mail: vin@krsc.ru
ул. Ферсмана, 14, 184209, г. Апатиты, Россия

²Геологический институт КНЦ РАН, E-mail: zhirov@geoksc.apatity.ru,
ул. Ферсмана, 14, 184209, г. Апатиты, Россия

Территория Мурманской области, расположенная в пределах северо-восточной части Балтийского щита, долгие годы считалась асейсмичной. Начатые в середине прошлого века регулярные инструментальные сейсмологические наблюдения позволили получить новые данные о сейсмичности, показывающие существенное увеличение ее уровня, наглядно отраженное на картах общего сейсмического районирования территории РФ (ОСР-97). Мощный горнопромышленный комплекс Мурманской области также генерирует большое количество техногенных сейсмических событий. Выполнен анализ естественной и техногенной сейсмичности, рассмотрено их взаимное влияние.

Техногенная сейсмичность, сейсмическое событие, землетрясение, взрыв, горный удар

Территория Мурманской области относится к областям слабой сейсмичности: на ней регулярно регистрируется большое количество слабых землетрясений (магнитуда менее 3.0) и относительно редко проявляются события, вызывающие на поверхности эффекты, ощутимые или наблюдаемые человеком. По данным палеосейсмических исследований, 10–8 тыс. лет назад в регионе наблюдались землетрясения с возможной магнитудой до 7.5 по шкале Рихтера, вызвавшие образование разрывов и оползней на земной поверхности. Особую опасность для инженерных сооружений имеют мелкофокусные землетрясения, очаги которых расположены на глубине 10–12 км — в этом случае даже при энерговыделении, эквивалентном магнитуде 4–4.5, могут проявиться катастрофические разрушения на поверхности, соответствующие уровню 7–9 баллов по шкале МСК-64.

В Мурманской области сформировался крупнейший в Европе горнопромышленный комплекс. Вместе с ростом масштабности и сложности промышленных проектов возрастает и цена рисков, связанных с возможными нарушениями природного равновесия и воздействием на техносферу естественных вариаций геофизических полей и геодинамического режима лито-

Работа выполнена в рамках гранта по приоритетному направлению деятельности РФ «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований отдельными научными группами» (проект № 14-17-00751).

сферы. Показательно, что именно на Кольском полуострове зафиксировано самое крупное в истории горной промышленности России техногенное землетрясение магнитудой 4.0, приведшее к разрушению подземных выработок на площади 600 тыс. м² [1, 2].

Таким образом, кроме тектонических землетрясений в регионе происходят техногенные сейсмические события разной природы. Этот регион можно рассматривать как естественную лабораторию по изучению макросейсмических проявлений сейсмических событий разной природы. В данной работе сделана попытка проанализировать связь между природной и техногенной сейсмичностью.

КРАТКАЯ ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ НА ТЕРРИТОРИИ МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ

Еще в 1930-е гг., когда началась бурная индустриализация Мурманской области, недостаточность имеющейся на тот момент системы сейсмического мониторинга для обеспечения промышленной безопасности строящихся каскадов гидроэлектростанций, рудников и металлургических заводов стала очевидной. В 1936 г. Академия наук СССР приняла решение об организации в Хибинском рудном районе сейсмостанции при Кольской базе имени С. М. Кирова АН СССР [3]. К сожалению, реализацию этого замысла на двадцать лет отсрочила Вторая мировая война. И лишь в период подготовки и проведения Международного геофизического года в 1956 г. была построена и запущена в эксплуатацию сейсмическая станция “Апатиты”, ставшая опорным центром для региональной сети сейсмомониторинга. Станция была оборудована коротко-, средне- и длиннопериодной аналоговой аппаратурой на базе сейсмометров СКМ, СКД и сейсмографов конструкции Киринос соответственно. Регистрация на всех комплексах велась при помощи гальванометров ГК-VI и ГК-VII на регистрах РС-II. Совместное использование приборов трех типов давало возможность регистрировать примерно с одинаковой полнотой и надежностью удаленные землетрясения большой силы и слабые местные сейсмические события [4].

В 1970-е гг. в дополнение к базовой станции “АРА” в северо-восточной части Балтийского кристаллического щита открыты аналоговые сеймопункты “Полярные Зори” (PLZ) вблизи площадки строящейся Кольской АЭС, “Полярный Круг” (PLQ) и “Кемь” (КЕМ) в районе каскадов гидроэлектростанций в Северной Карелии. Они образовали своего рода каркас региональной сети сейсмомониторинга.

В 1990-е гг. востребованность информации о геодинамическом режиме Евро-Арктического региона многократно возросла. Одновременно с этим началась и коренная реконструкция сети сейсмического наблюдения. Аналоговые сейсмостанции постепенно заменялись на цифровые, с возможностью записи на магнитную ленту, оптический диск, а впоследствии и на компакт-диск. В 1992 г. введена в эксплуатацию первая в РФ малоапертурная сейсмическая группа “Апатитский эррэй” (small-aperture array “Apatity”), позволившая существенно повысить чувствительность сети мониторинга, особенно в центральной части Мурманской области. В 1994 г. группа дополнена 3 инфразвуковыми датчиками для регистрации сигналов, распространяющихся в атмосфере. В период 1996–2010 гг. в различных местах на территории Мурманской области установлено свыше 10 цифровых сейсмических станций для построения и уточнения скоростной модели среды и определения оптимальных точек для расположения стационарных станций. Время наблюдения на станциях составляло от 6 мес до 3 лет. В настоящее время в состав региональной сети входят три стационарные широкополосные станции и один сейсмоинфразвуковой комплекс. Две широкополосные станции “Ковда” и “Рыбачий” планируется открыть в 2015–2016 гг. Месторасположение всех станций, находившихся в эксплуатации и входящих в состав действующей сети наблюдения, приведены на рис. 1. Существующая система регистрации позволяет гарантированно регистрировать все сейсмические события на территории Мурманской области с $M > 2$, а в центральной части — с $M > 0$.

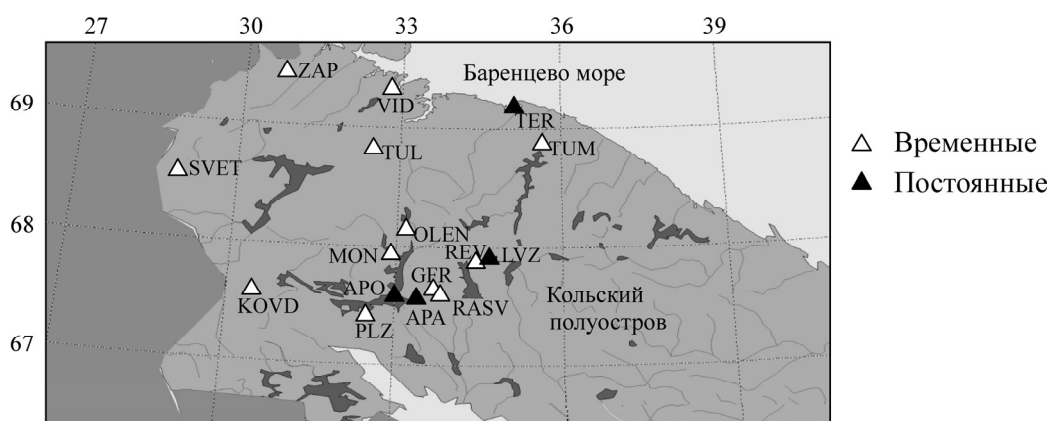


Рис. 1. Сейсмостанции, входившие в сеть сейсмического наблюдения КФ ГС РАН с 1956 по 2014 г.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ТЕРРИТОРИИ МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ

Период аналоговой регистрации. С момента открытия сейсмической станции “Апатиты” (1956 г.) и вплоть до 1992 г. регистрация сейсмических событий велась аналоговыми станциями. Точность локации зависела от квалификации персонала как при настройке гальванометров и качестве проявки фотобумаги с записями сейсмограмм, так и в процессе обработки и выделения фаз сейсмических сигналов. Данные, попадавшие в итоговые сводки, многократно проверялись и перепроверялись.

На рис. 2 показана схема распределения эпицентров землетрясений на севере Балтийского щита и в прилегающей прибрежной зоне Баренцовоморского шельфа по данным сейсмомониторинга за период 1956–1990 гг. Отчетливо проявляется линейно-узловая структура сейсмичности, особенно ярко выражено сгущение плотности событий в субширотных зонах — Мурманской (зона 1) и Кандалакшской (зона 2). Мурманская зона совпадает с зоной глубинных разломов “линии Карпинского”, разграничивающей Балтийский щит и Баренцовоморскую шельфовую плиту. По геологическим данным, в пределах зоны уверенно выделяются древние линеаменты, заложенные на рубеже 2.9 млрд лет и неоднократно оживлявшиеся в последующие эпохи тектонической активизации, а также густая разломная сеть, маркирующая постледниковые и современные тектонические подвижки блоков кристаллического фундамента.

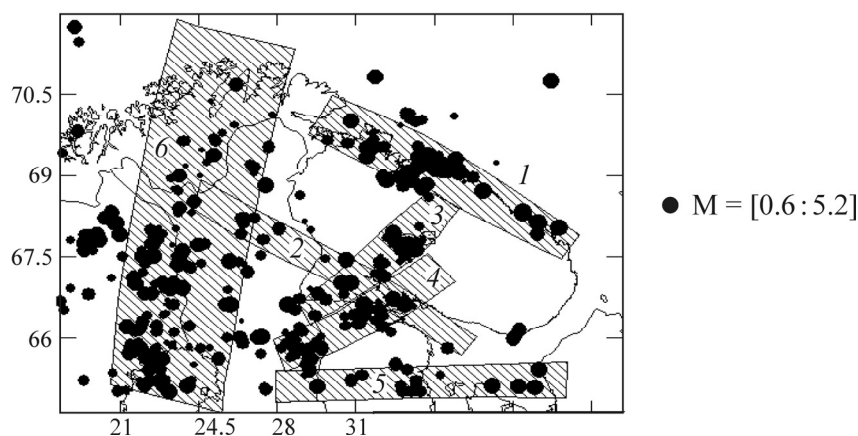


Рис. 2. Сейсмогенные зоны (заштрихованы) и распределение эпицентров землетрясений, зарегистрированных региональной сетью сейсмомониторинга в 1956–1995 гг. в северо-восточной части Балтийского щита. Номера зон: 1 — Мурманская; 2 — Кандалакшская; 3 — Хибино-Ловозерская; 4 — Куусамо-Порьегубская; 5 — Беломорская; 6 — Ботний-Финмаркская

К зоне приурочен ряд исторических событий в районе Кольского фьорда (семибалльные землетрясения 1772, 1873 и 1967 гг.) и небольшие рои эпицентров слабых землетрясений, локализованных в “доцифровой” период сейсмомониторинга с относительно малой точностью вдоль всего Мурманского берега Кольского полуострова. Кандалакшская зона простирается от водораздела горной гряды Манселькя через Ковдозерскую низину, Кандалакшский залив до устья Сев. Двины. К Кандалакшской зоне приурочено самое сильное землетрясение, зафиксированное в регионе 14 мая 1626 г. во всех населенных пунктах северного побережья Белого моря; экспертные оценки его магнитуды колеблются от 5.1 до 6.5, колебания поверхности до 7.5 баллов [5]. В период инструментальных наблюдений здесь также зафиксирована серия событий с $M > 4$, вызывавших в эпицентре колебания поверхности с интенсивностью выше 5 баллов (землетрясение 2 февраля 1960 г.). Именно в этой зоне отмечен самый сейсмоопасный линеамент Кольского полуострова с $M_{\max} = 6.5$ на карте ОСР-97. Выделенный условно Карельский узел (зона 5) вместил в себя более 15 событий, образующих пояс от Куусамо в Финляндии до Двинской губы Белого моря. По сейсмической активности хорошо выделяются субмеридиональная Ботний-Финмаркская зона (зона 6) и северо-восточные сейсмогенные зоны — Куусамо-Порьегубская (зона 4) и Хибино-Ловозерская (зона 3). До 1966 г. оснований для выделения линейного пояса сейсмичности на этом участке не было и надежно оконтуривался лишь Хибинский узел. Данные за 1970–1990-е гг. позволяют наметить узкий пояс повышенной сейсмичности от Ловозерских тундр до Пяозера (Кумского водохранилища) в Северной Карелии [6].

Период цифровой регистрации. С переходом на цифровую регистрацию повысилась точность локации событий и существенно улучшилась дискриминация естественных и техногенных сейсмических явлений. В Кольском филиале Геофизической службы РАН ведется постоянная работа по нахождению устойчивых критериев различения взрывов и землетрясений. Применяется 7 основных критериев [7–9]:

отношение амплитуд S -волны/ P -волне: значение данного параметра выше 3 свидетельствует о том, что сейсмическое событие является землетрясением; низкое значение не может быть серьезным аргументом в пользу предположения, что изучаемое событие — взрыв;

глубина события: параметр, требующий специального анализа в каждом случае; может быть использован в качестве критерия дискриминации только при обработке данных по сейсмической группе, когда высокое значение кажущихся скоростей прихода волн на группу может рассматриваться как свидетельство в пользу естественного происхождения события;

разность магнитуд по объемным и поверхностным волнам: критерий хорошо работает для достаточно сильных событий на региональных расстояниях (хотя и здесь существует область перекрытия); для применения критерия необходимо наличие широкополосных записей;

изменение спектров во времени: высокие значения параметра a , основанного на расчете корреляции между спектральными амплитудами, вычисленными для одной и той же записи, но для разных положений временного окна (выше 0.5) [8], с высокой степенью достоверности свидетельствуют об искусственном происхождении сейсмического события;

сравнение обобщенных трасс событий: является достаточно надежным критерием дискриминации событий при условии наличия детальной базы данных о событиях известной природы, полученной в предыдущие годы;

наличие акустических сигналов: достоверный критерий техногенного происхождения сейсмического события;

характерная форма сейсмограммы события: наличие на сейсмограммах отчетливо выраженных цугов низкочастотных поверхностных волн при слабой выраженности или отсутствии сигналов от объемных волн может указывать на принадлежность события к типу оползней или обрушений пород; в тех случаях, когда азимуты этих событий направлены на действующие рудники, события однозначно трактуются как обрушения пород.

Такой консервативный подход к дискриминации естественных и техногенных событий привел к значительному снижению числа выделенных землетрясений, поэтому плотность покрытия территории региона точками, фиксирующими эпицентры надежно установленных природных событий, сильно уменьшилась (рис. 3). За период с 1993 по 2013 г. на территории Мурманской области сетью сейсмического наблюдения Кольского филиала Геофизической службы РАН зарегистрировано 429 тектонических и техногенных землетрясений с магнитудами больше 1 (рис. 3). Суммарное выделение сейсмической энергии за указанный период составило 3.47×10^{11} Дж. Наряду с уменьшением частоты проявления землетрясений обозначились определенные изменения в конфигурации сейсмогенных зон. При сравнении рис. 2 и рис. 3 заметно резкое снижение зарегистрированных землетрясений в Мурманской зоне. Сохранили свои контуры и плотность насыщения событиями Кандалакшская (зона 2) и Хибино-Ловозерская (зона 3) зоны, “выродилась” Куусамо-Порьегубская зона. По небольшому числу событий наметилась Кандалакшко-Варангерская зона (зона 4 на рис. 3), пересекающая по диагонали пребывавший до этого в полном покое Лапландско-Тулумский геологический блок (белое поле, оконтуренное зонами 1, 2, 3 и 6 на рис. 2).

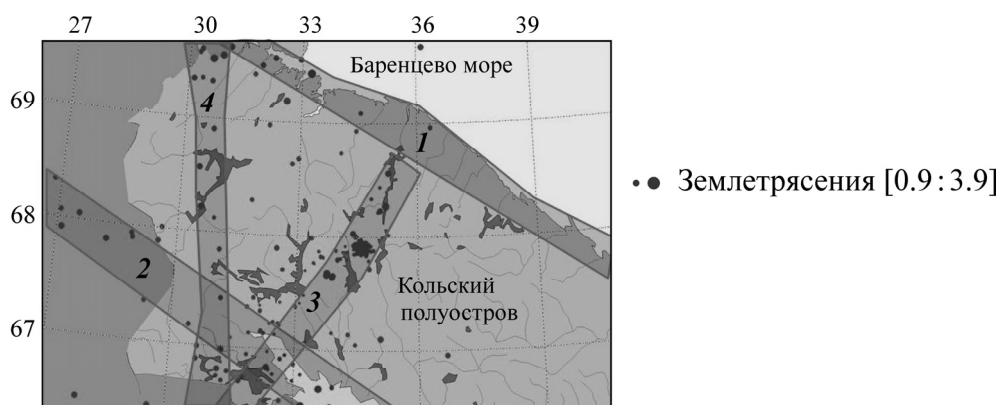


Рис. 3. Схема главных сейсмогенных зон северной части Балтийского щита (по данным цифрового мониторинга 1993–2013 гг.): 1 — Мурманская; 2 — Кандалакшская; 3 — Хибино-Ловозерская; 4 — Кандалакшко-Варангерская

Причины изменения конфигурации и плотности насыщения природными событиями сейсмогенных зон не имеют однозначного толкования. Видимый эффект “успокоения” зон 1, 5 и 6 в определенной степени можно связать с более полной и тщательной очисткой каталогов сейсмических событий от техногенных явлений, прежде всего военных и дорожных взрывов в пределах Мурманской сейсмогенной зоны, после перехода на цифровую регистрацию, однако целиком списывать на этот фактор наблюдаемые вариации сейсмоактивности неправомерно. Периодические проявления относительно сильных толчков в районе Кольского фьорда в доиндустриальную эпоху (землетрясения 1772 и 1873 гг.), как и активизация в последние десятилетия Кандалакшко-Варангерской сейсмогенной зоны, подтверждают наличие естественных факторов, контролирующей пространственную структуру слабой сейсмичности. На это же указывают геологические данные по реконструкции палеосейсмодислокаций на Кольском полуострове, ко-

торые свидетельствуют о проявлении в последние 10 тыс. лет сильных землетрясений (до 7–8 баллов) в Мурманской сейсмогенной зоне в пределах двух узлов — между Кольским фьордом и Териберкой, а также в устье р. Харловки [10], т. е. на тех же участках, где видны сгущения плотности эпицентров в зоне 1 на рис. 3. Выявленные зоны повышенной сейсмической активности совпадают с энергонасыщенными зонами Кольского полуострова, выделяемыми по повышенным значениям сжимающих напряжений [11].

Распределение тектонических землетрясений по годам и количество выделенной сейсмической энергии за период цифровых наблюдений с 1993 по 2013 г. приведены на рис. 4. Сопоставляя временные ряды сейсмичности, можно отметить следующее: графики частоты сейсмособытий и суммарного энерговыделения обнаруживают две периодичности — 2–3-летнюю (минимумы 1994, 1996, 1998, 2001, 2003 и т. д.) и 8–9-летнюю (минимумы 1994, 2003, 2011), накладывающиеся одна на другую. Это означает, что в 2015–2016 гг. можно ожидать незначительное повышение природной сейсмичности.

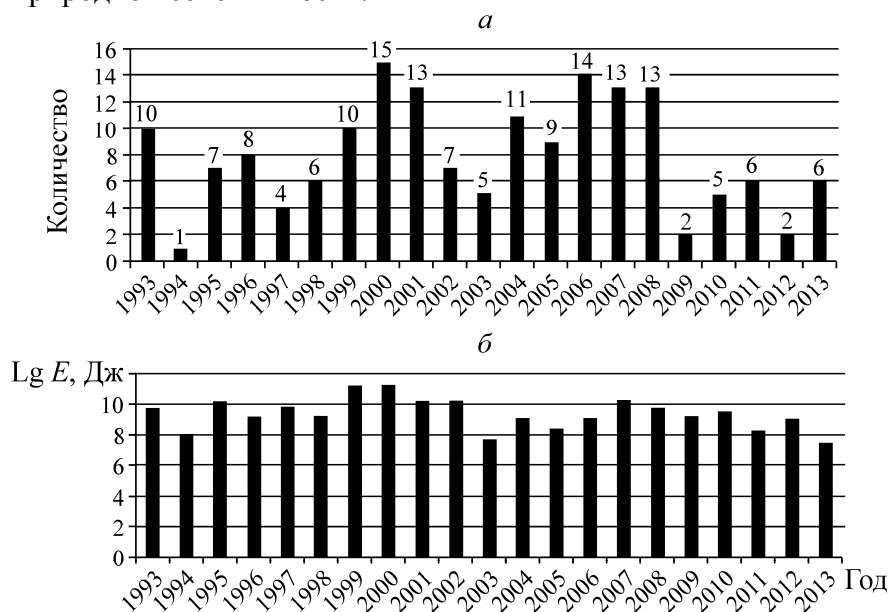


Рис. 4. Распределение сейсмических событий (а) и сейсмической энергии (б) на территории Мурманской области по годам

На основании данных наблюдений построен график повторяемости сейсмических событий, позволяющий оценить вероятность возникновения землетрясений определенной магнитуды в тот или иной период времени (рис. 5). Установлено, что с периодичностью 8–9 лет проявляются события с магнитудой, равной 3.2–3.4.

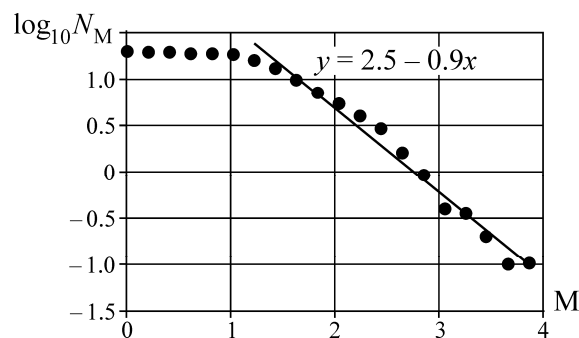


Рис. 5. Зависимость логарифма количества землетрясений от магнитуды для территории Мурманской области

ТЕХНОГЕННАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ

Мониторинг сейсмичности промышленно-технических систем (ПТС) в зонах действия крупнейших горнодобывающих комбинатов Мурманской области ведется совместно КФ ГС РАН, Геологическим и Горным институтами КНЦ РАН при взаимодействии с геофизическими службами ОАО “Апатит”, ОАО “Ковдорский ГОК”, ОАО “Севредмет” (Ловозерский ГОК). Начиная с 1992 г. в этом процессе используется цифровая аппаратура, что позволяет обеспечить нижний порог гарантированной регистрации событий в ПТС Ковдора на уровне $ML = 1.5$, в Ловозерской ПТС от 1, в Хибинской — от $ML = 0.5$.

Рассмотрим данные Ловозерской ПТС, в которой в 1999 г. зафиксировано самое крупное в истории горной промышленности России техногенное землетрясение. Район Ловозерского массива в сейсмическом отношении представлял “мертвую зону”, поскольку с начала сейсмологических наблюдений на Кольском полуострове (рис. 2) там не регистрировалось ни одного сейсмического события. Однако с начала 90-х годов прошлого века сейсмичность Ловозерского массива резко изменилась. Здесь стали происходить землетрясения с магнитудами $M > 1$ ежегодно и по несколько в год, а в конце 90-х – начале 2000-х гг. число землетрясений стало составлять более десятка ежегодно.

На рис. 6 показано распределение сейсмических событий в Ловозерском массиве по годам за период с 1993 по 2013 г. Эпицентры этих событий, как правило наиболее мощных, располагались непосредственно в горных выработках рудников “Умбозеро” и “Карнасурт”. Максимальное количество сейсмических событий с $M > 1$ отмечалось в 1993, 1997, 1999, 2002, 2003 и 2009 гг. Попытки обнаружить устойчивую периодичность в проявлении техногенной сейсмичности Ловозерского массива не привели к успеху. Также не было обнаружено какой-либо взаимосвязи между проявлением природной и техногенной сейсмичности. Причина резкого повышения техногенной сейсмичности описана в работе [1]. В ней установлена взаимосвязь появления и нарастания техногенной сейсмической активности Ловозерского массива с вводом в эксплуатацию и нарастанием объемов добычи руд на руднике “Умбозеро”.

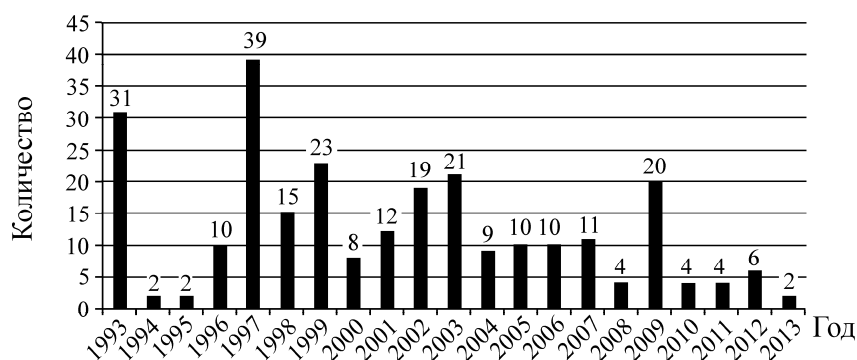


Рис. 6. Количество техногенных событий в Ловозерской ПТС в 1993 – 2013 гг.

Как известно, Ловозерское месторождение разрабатывается с 1951 г. рудником “Карнасурт”, который располагается на северо-западных склонах Ловозерского массива в 8 – 10 км от рудника “Умбозеро”. До 1991 г. за 40 лет эксплуатации рудника “Карнасурт”, до тех пор, пока не вступил в эксплуатацию и не вышел на проектную производительность рудник “Умбозеро”, каких-либо значимых сейсмических событий в Ловозерском массиве не проявлялось. Рудник “Умбозеро” был введен в эксплуатацию в 1984 г. Производительность рудника с начала эксплуатации нарастала и достигла максимума в 1991 г. Для выемки рудных тел на руднике при-

менялась камерно-целиковая система, без обрушения и закладки выработанного пространства, что привело к постепенному нарастанию объема пустот. “К 1991 г. вследствие изменений напряженного состояния массива, его геодинамическое равновесие было нарушено серией горно-тектонических ударов с магнитудой $M = 2.2 - 2.6$, очаги которых были приурочены к южному флангу рудника. Дальнейшее развитие горных работ, накопление потенциальной энергии в массиве привели к ее разрядке в виде разрушительного техногенного землетрясения 17.08.1999 г. ($M = 4.0$)” [1]. После него сейсмическая активность в массиве несколько понизилась, однако все равно оставалась на уровне около 10 событий с магнитудой $M \geq 1$ в год, что свидетельствует о неустановившемся геодинамическом состоянии массива. “Характерно, что техногенная сейсмичность, вызванная эксплуатацией рудника “Умбозеро”, настолько “раскачала” геологическую блочную структуру северо-западной части Ловозерского массива, что в последние годы произошло несколько землетрясений, очаги которых расположены в западной части шахтного поля рудника “Карнасурт”, чего раньше не наблюдалось” [1]. Следует также отметить, что в августе 2009 г. эксплуатация рудника “Умбозеро” была полностью остановлена, что привело к его затоплению, вызвав кратковременное резкое увеличение слабых сейсмических событий. В последующие годы их число существенно снизилось.

Таким образом, выявлено, что уровень природной сейсмичности на территории Мурманской области достаточно низкий и не влияет на параметры техногенной сейсмичности, вызываемой в основном технологией отработки месторождений полезных ископаемых и объемами извлечения руды.

Однако уровень контроля сейсмичности действующей сетью КФ ГС РАН нельзя назвать достаточным. Сгущение сети сейсмических станций в районах действующих ПТС может позволить существенно повысить как точность локации сейсмических событий, так и порог гарантированной регистрации. В качестве примера приведем результаты совместной обработки данных сети КФ ГС РАН и 27 сейсмостанций АО “Апатит”, расположенных в Хибинском массиве. За период 01.10.2010–01.01.2014 объединенной системой зарегистрировано более 2500 событий, 362 из которых идентифицированы как динамические проявления горного давления с магнитудами 0.6 до 3.2, большинство из них произошло в районах действующих рудников. Распределение по магнитудам выглядит следующим образом: 156 событий с магнитудой от 0.6 до 1; 199 событий с магнитудой от 1 до 2; 7 событий с магнитудой больше 2 [12].

Такая детальность обработки позволяет установить дополнительные критерии для дискриминации взрывов и техногенных или тектонических сейсмических событий.

ВЫВОДЫ

В целом сейсмический режим на территории Мурманской области оценивается как стабильно невысокий. Результаты инструментальных наблюдений за сейсмичностью позволяют выделить 4 зоны сейсмичности, наиболее активной из которых является Кандалакшская, где происходили и наиболее сильные из известных исторических землетрясений. Сопоставляя временные ряды тектонической сейсмичности, можно выделить две периодичности — 2–3-летнюю и 8–9-летнюю, накладывающиеся одна на другую. На основании данных наблюдений построен график повторяемости сейсмических событий, из которого следует, что с периодичностью 8–9 лет проявляются события с магнитудами 3.2–3.4. Исходя из выявленной периодичности, следует ожидать незначительное повышение природной сейсмичности в 2015–2016 гг. Малый период инструментальных наблюдений и небольшое количество сильных сейсмических событий с $M \geq 4$ не позволяют использовать график повторяемости на период более чем 50–70 лет для прогнозной оценки возникновения сильных землетрясений.

Уровень природной сейсмичности на территории Мурманской области достаточно низкий и не влияет на параметры техногенной сейсмичности, вызываемой в основном технологией отработки месторождений полезных ископаемых и объемами извлечения руды и породы. В то же время уровень контроля сейсмичности действующей сетью КФ ГС РАН нельзя назвать достаточным. Сгущение сети сейсмических станций в районах действующих ПТС позволит существенно повысить как точность локации сейсмических событий, так и порог гарантированной регистрации.

В последнее время в КФ ГС РАН, как и в сейсмологической науке в целом, интенсивно развиваются новые методы более качественного детектирования и локации сейсмических событий по данным цифровых сейсмических записей, в том числе с применением более современных трехмерных скоростных моделей среды. Переобработка имеющихся массивов сейсмических данных уже в ближайшие 2–3 года может дать новый материал для анализа, существенно расширив уровень детализации карт эпицентров слабых сейсмических событий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ловчиков А. В. Горно-тектонические удары на Ловозерском редкометальном месторождении // Вестн. МГТУ. — 2008. — Т. 11. — № 3.
2. Ловчиков А. В. Сильнейшие горно-тектонические удары и техногенные землетрясения на рудниках России // ФТПРПИ. — 2013. — № 4.
3. Виноградов А. Н., Виноградов Ю. А., Кременецкая Е. О., Петров С. И. Формирование системы сейсмологического и инфразвукового мониторинга в западной Арктике в XX веке и перспективы ее дальнейшего развития // Вестн. КНЦ РАН. — 2012. — № 4.
4. Панасенко Г. Д. Сейсмические особенности северо-востока Балтийского щита. — Л.: Наука, 1969.
5. Степанов В. В. Геодинамическая опасность промышленных объектов. — М., 2001.
6. Баранов С. В., Асминг В. Э., Виноградов А. Н., Виноградов Ю. А. Результаты инструментальных сейсмологических исследований на Кольском полуострове // Землетрясения и микросейсмичность в задачах современной геодинамики Восточно-Европейской платформы / под ред. Н. В. Шарова, А. А. Маловичко, Ю. К. Щукина. Кн.1. Землетрясения. — Петрозаводск: КНЦ, 2007.
7. Kremenetskaya E., Asming V., Jevtjugina Z., and Ringdal F. Study of regional surface waves and frequency-dependent $M_s : m_b$. Discrimination in the European Arctic. Pure appl. geophys., 2002, Vol. 159.
8. Виноградов Ю. А., Виноградов А. Н., Евтюгина З. А. Применение совместного сейсмического и инфразвукового методов регистрации для выделения сигналов, вызванных наземными взрывами // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: материалы II Междунар. сейсмол. шк., Пермь, 13-17 августа 2007 г. — Обнинск: ГС РАН, 2007.
9. Годзиковская А. А., Асминг В. Э., Виноградов Ю. А. Ретроспективный анализ первичных материалов по сейсмичности Кольского полуострова и прилегающих территорий в XX веке. — М.: ГС РАН, 2010.
10. Николаева С. Б. Палеосейсмодеформации северо-восточной части Балтийского щита: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — СПб., 2001.
11. Сейсмичность при горных работах / под ред. акад. Н. Н. Мельникова. — Апатиты: КНЦ РАН, 2002.
12. Корчак П. А., Жукова С. А., Меньшиков П. Ю. Становление и развитие системы мониторинга сейсмических процессов в зоне производственной деятельности АО «Апатит» // Горн. журн. — 2014. — № 10 (2207).

Поступила в редакцию 11/III 2015