

УДК 550.348

О НАВЕДЕННОЙ МИКРОСЕЙСМИЧНОСТИ В УСЛОВИЯХ ЭЛЬБРУССКОГО ЦЕНТРА ФЛЮИДНО-МАГМАТИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ

© 2014 г. Л.Л. Худзинский

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

Перечислены известные случаи наведенной сейсмичности, вызванной эндогенными и техногенными воздействиями большой мощности. На примере Эльбрусского центра флюидно-магматической активности рассмотрены различные варианты изменения уровня микросейсмического фона, связанные с техногенным воздействием существенно меньшей энергии.

Наблюдения проводились в штольне Баксанской нейтринной обсерватории Института ядерных исследований РАН на расстоянии 1500 м от ее устья, где уровень внешних помех крайне низок. Велась непрерывная трехкомпонентная односточная регистрация микросейсмических колебаний в диапазоне частот 10–120 Гц с осреднением амплитуд в интервалах 5 с. В качестве источника техногенного воздействия рассматривались движущиеся по штольне вагонетки. Проанализированы различные варианты их влияния (по терминологии А.В. Николаева, “инициирование” и “возбуждение”) на интенсивность излучения крупных и мелких флюидно-магматических очагов в зависимости от их ориентации по отношению к штольне.

Ключевые слова: флюидно-магматические очаги, микросейсмичность, техногенное воздействие.

Введение

Под наведенной¹ сейсмичностью понимается изменение сейсмического режима некоторого объема среды, вызванное внешними энергетическими воздействиями, которые могут быть как эндогенными, так и техногенными. В качестве эндогенных рассматриваются землетрясения, инициирующие новые сейсмические события [Николаев, Верещагина, 1991], гравитационные приливы (см., например, [Николаев, 1994б]). К известным техногенным воздействиям относятся ядерные взрывы [Николаев, 1993; Адушкин и др., 1994], запуск крупных ракетных комплексов (см., например, [Рыбников, 1994]), эксплуатация месторождений [Барабанов, 1994; Сухарев, 1976], заполнение крупных водоемов (см., например, [Гупта, Растроги, 1979; Мирзоев и др., 1987]), которые характеризуются исключительно большой энергией. Например, ядерный взрыв, эквивалентный 1100 кт тротила, способен вызвать землетрясение с $M > 6$; масса топлива крупных ракет может превосходить 2000 т; приливные деформации громадных объемов земной коры могут достигать 10^{-8} . Однако в некоторых геоморфологических условиях локальные изменения микросейсмичности наблюдаются и при техногенных воздействиях значительно меньшей энергии. Рассмотрим это на примере Эльбрусского центра флюидно-магматической активности (см., например, [Пронин и др., 2008]), одного из крупнейших аналогичных центров Европы.

¹ Термин “наведенная” включает два понятия – инициированная и возбужденная [Николаев, 1994а]).

Сейсмогеологические условия и краткие сведения об аппаратуре

Эльбрус является центральной частью сложного геологического объекта – автономной тектоно-флюидно-магматической системы. Его магматический очаг и, вероятно, окружающие территории содержат огромные запасы тепловой энергии. Над фоновым уровнем в 100 °С Эльбрусская аномалия образует изотермическую зону диаметром около 40 км с максимумом в 190 °С, расположенным к западу от вершины Эльбруса. Центр максимума приходится на западное окончание Эльбруса в районе ледника Кюкюртлю. К интрузии гранитов Тырнауза тяготеет вторая известная аномалия с максимумом 290 °С, положение и конфигурация которого определяются неуверенно. Приведенные данные получены с помощью натриево-литиевых термометров, отражающих не только наиболее высокотемпературные стадии эволюции гидротермальной системы, но и условия ее существования на максимальных глубинах. Наличие горячих источников вокруг Эльбруса свидетельствует о том, что вулкан нельзя считать потухшим. Деятельность очага в настоящее время определяет формирование углекислых минеральных вод. Самые первые гидрогеологические исследования на Центральном Кавказе обнаружили вокруг Эльбруса огромное количество выходов углекислых вод, как бы наложенных на область проявления новейшего тектономагматизма. Из этого факта напрашивается вывод о связи источников углекислоты с магматизмом.

Несмотря на то, что Эльбрус – один из самых крупных центров оледенения, где имеется более 20 ледников общей площадью около 139 км², а суммарный объем льда оценивается в 6 км³, на дневной поверхности вокруг него отмечаются повышенные температурные аномалии. Замеры температуры в fumarолах показывают, что внутри гротов воздух нагрет неравномерно из-за рассредоточения коренных струй и разбавления их наружным воздухом. Тем не менее, внутри многих проталин отмечалась температура +16...+18 °С при отрицательной температуре наружного воздуха до –5...–7 °С. Важно отметить, что после 2002 г. интенсивность и частота проявления fumarольной активности увеличились. Наблюдения подтверждают усиление флюидной активности практически на всей территории Эльбрусского центра флюидно-магматической активности [Масуренков и др., 2010, с. 8, 10, 12, 202].

Одним из наиболее перспективных мест для изучения слабых техногенных воздействий является Баксанская нейтринная обсерватория Института ядерных исследований РАН (ИЯИ РАН), расположенная в Баксанском ущелье (пос. Нейтрино) в 30 км к юго-востоку от г. Тырнауз. Координаты обсерватории 43°16.338' с.ш. и 42°40.878' в.д.; высота – 1740 м; расстояние до вершины Эльбруса – 21.9 км. Обсерватория включает две стационарные лаборатории, в которых сотрудниками ИФЗ РАН, ИГЕМ РАН и КБГУ проводятся многопрофильные геофизические наблюдения. Лаборатории находятся в специальных выработках внутри монолитного горного массива в непосредственной близости от вулкана Эльбрус. Две параллельные штольни (главная и вспомогательная) пройдены в массиве горы Андырчи со стороны Баксанского ущелья на глубину более 4300 м; азимут штолен – 150°37' [Собисевич и др., 2008, с.275]. Также имеется несколько ответвлений и боковых наблюдательных камер, вырубленных в основных породах.

Точка стационарных микросейсмических наблюдений была выбрана в камере, расположенной на расстоянии 1500 м от устья штольни (ПК 1500), где с 2005 г. функционирует лаборатория № 1 (научный руководитель Л.Е. Собисевич). Такой выбор определялся исключительно низким уровнем сейсмического фона в диапазоне частот 10–120 Гц (ветровых, дождевых и техногенных шумов, возникающих на поверхности горы Андырчи, находящейся на 700–800 м выше ПК 1500). От проведения наблюдений в лаборатории № 2, расположенной в боковой вырубке длиной 70 м на расстоянии

4100 м от устья основной штольни, пришлось отказаться из-за температуры в конце выработки, достигающей 40–44 °С, и практически полного отсутствия вентиляции. Кроме того, в боковой вырубке можно визуальнo наблюдать, как из стен штольни вырываются мощные меняющиеся во времени флюидные потоки в виде горячих водяных струй и газопаровых образований, из-за чего возникают шумовые помехи, которые могут вообще исключить возможность микросейсмических исследований.

Приводимые в статье сведения основаны на результатах обработки записей трех компонент волнового поля, регистрация которых проводилась ИФЗ РАН в течение 2011 г.¹ практически непрерывно.

Для регистрации микросейсмических колебаний применяется специально разработанный аппаратно-программный комплекс. Прием колебаний осуществляется жестко установленной на полу камеры трехкомпонентной установкой XYZ из сейсмо-разведочных приемников СГ1-10 и СВ1-10; используются малошумящие операционные усилители. Максимальный коэффициент усиления каждого из трех идентичных каналов составляет 1200. Аналого-цифровое преобразование выполняется платой L-154 с частотой дискретизации 500 Гц.

Для выполнения длительной непрерывной компьютерной регистрации волнового поля была разработана программа *mon3c5s.exe*. С её использованием модули дискретных отсчетов, выдаваемых платой L-154, осреднялись в интервале 5 с, после чего средние значения X-, Y-, Z-компонент записывались в очередной суточный файл [Худзинский, 2011]. Поскольку далее все данные приведены в единицах аналого-цифрового преобразования (ед. АЦП), укажем, что одна ед. АЦП соответствует продольной составляющей скорости смещения корпуса сейсмоприемника, равной $5.2 \cdot 10^{-8}$ м/с.

Приводимые ниже выводы следует рассматривать как предварительные, поскольку исходные данные получены с детектированием дискретных значений и осреднением на интервале 5 с по трем компонентам X, Y, Z. Выводы были бы более достоверными и информативными, если бы использовались исходные данные с частотой дискретизации 500 Гц. Для достижения этой цели разработана программа *mon3-por.exe*, позволяющая кроме регистрации осредненных данных автоматически (по интенсивности колебаний, превосходящей плавающий во времени порог) выбирать наиболее интересные участки процесса и записывать их без осреднения с названной частотой дискретизации.

Экспериментальные данные

Обзорные записи X-, Y-, Z-компонент за 2011 г. приведены на рис. 1. Исходные суточные данные, полученные на интервалах осреднения 5 с, дополнительно осреднены на интервалах 6 ч при ограничении амплитуд “местных событий” и колебаний, вызванных движением вагонеток в штольне. Если в приведенном примере не рассматривать сравнительно кратковременные вариации уровня микросейсмичности (доли и единицы суток), то в 2011 г. могут быть выделены четыре периода сейсмической активности – два спокойных и два “шумных”.

Можно полагать, что в спокойные периоды в окрестности штольни отсутствовали крупные долгоживущие флюидно-магматические центры. Средний уровень микросейсм порядка 25–50 ед. АЦП вполне может быть объяснен постоянным потоком воды от забоя к устью штольни и движением вентиляционного воздуха.

¹ Трехкомпонентная регистрация микросейсмических колебаний в исследуемом районе проводится ИФЗ РАН с апреля 2008 г.

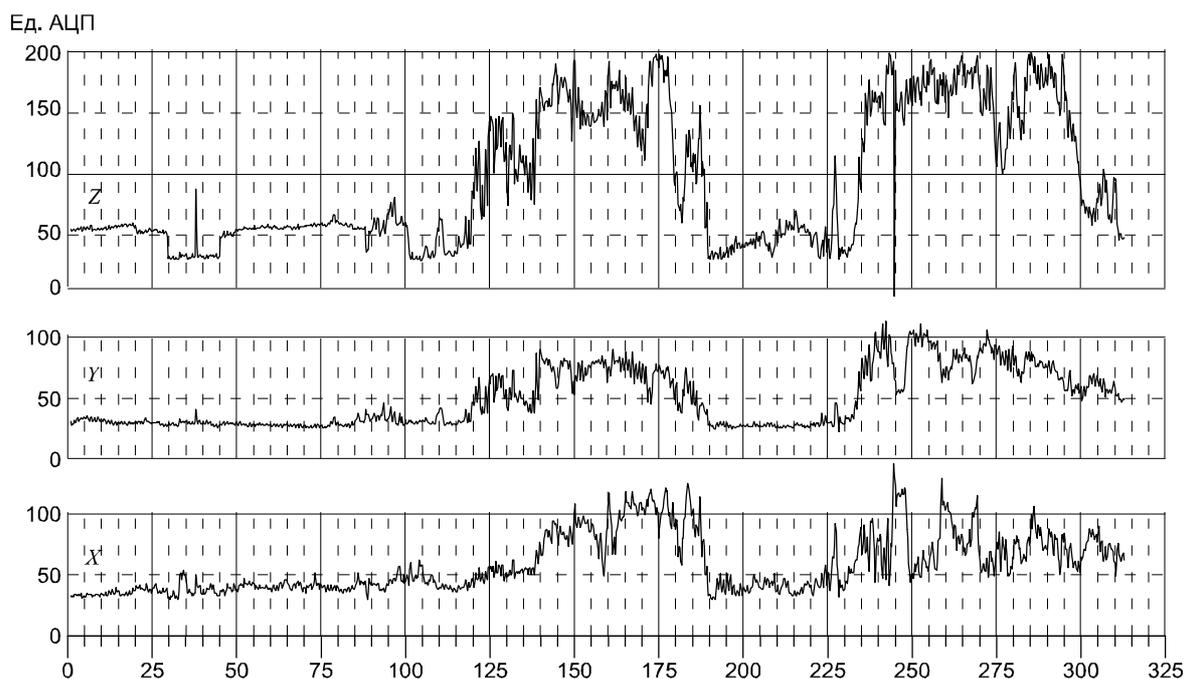


Рис. 1. Обзорные записи микросейсмического фона за 2011 г. с интервалом осреднения 6 ч. Сверху вниз – компоненты Z, Y, X; на горизонтальных осях – порядковые номера дней от начала года (отсчет от 01.01.2011 г.)

В “шумные” периоды повышенный уровень фона (100–200 ед. АЦП на разных компонентах) можно увязать с наличием одного или двух крупных очагов, расположенных на расстоянии ~1.5 км от штольни [Пронин и др., 2008].

Основные характеристики четырех выделенных периодов приведены в табл. 1. В первом столбце таблицы содержатся календарные даты 2011 г., соответствующие началу и окончанию периода; во втором – границы периода в днях, отсчитываемых от 01.01.2011 г. (в скобках – длительность периода, сут).

Таблица 1. Основные характеристики выделенных периодов

Период	Дни (длительность периода, сут)	Средние арифметические значения компонент скорости смещения Среднеквадратичные отклонения в ед. АЦП (отношение СКО к средним значениям, %)		
		$\frac{X_m}{\text{СКО}}$	$\frac{Y_m}{\text{СКО}}$	$\frac{Z_m}{\text{СКО}}$
01.01–25.04.2011 г.	1–115 (115)	$\frac{50.8}{10.9 (21\%)}$	$\frac{30.2}{3.0 (10\%)}$	$\frac{39.7}{5.3 (13\%)}$
17.05–06.07.2011 г.	137–187 (51)	$\frac{149.4}{31.0 (16\%)}$	$\frac{68.8}{12.9 (19\%)}$	$\frac{90.7}{16.7 (18\%)}$
07.07–20.08.2011 г.	188–232 (45)	$\frac{46.7}{14.2 (30\%)}$	$\frac{29.3}{3.9 (13\%)}$	$\frac{42.8}{9.7 (23\%)}$
23.08–22.10.2011 г.	235–295 (61)	$\frac{165.6}{23.5 (14\%)}$	$\frac{82.3}{12.8 (16\%)}$	$\frac{76.2}{19.4 (25\%)}$

Возможно, наблюдаемые вариации осредненного уровня фона, при которых среднеквадратичное отклонение на разных компонентах составляет от 10 до 30%, связаны с изменением во времени характеристик крупных флюидно-магматических центров, а также появлением и угасанием более мелких очагов вблизи ПК 1500, расположенного

в штольне. Колебания, связанные с движением вагонетки по штольне, во многих случаях вызывают ощутимые изменения интенсивности микросейсмического фона. Однако, поскольку масса вагонетки с двумя прицепами составляет ~40 т, а максимальная скорость ее движения ~30–40 км/ч, энергия вызываемых движением вагонетки колебаний на несколько порядков меньше энергии, выделяемой упомянутыми выше источниками. Естественно, что движущиеся вагонетки не могут оказывать влияния на “динамику жизни” двух крупных флюидно-магматических очагов, расположенных на расстоянии ~1.5 км от ствола штольни [Пронин и др., 2008; Шулаков, Турсин, 2008], но их влияние на мелкие очаги вблизи штольни, не исключается.

Сами по себе многочисленные мелкие магматические включения в скальных породах не могут быть источниками ощутимых колебаний в диапазоне частот 10–100 Гц с достаточно быстро меняющейся интенсивностью. Однако в результате их взаимодействия с непостоянными во времени интенсивными флюидными потоками картина должна существенно измениться. Во-первых, эти очаги должны стать ощутимыми источниками колебаний переменной интенсивности в указанном диапазоне частот; во-вторых, в связи с их относительно малыми размерами они должны подвергаться слабым внешним экзогенным воздействиям. При наблюдениях 2008–2011 гг. число суток, в которые на записях фиксировались такие влияния, составляло в разные годы от 15 до 35%.

Как свидетельствуют записи, приводимые на рис. 2, и данные табл. 2, отклонения от среднего суточного уровня фона под влиянием одного проезда вагонетки составляют от –30 до +44 ед. АЦП. Так как максимальные значения фона в периоды наибольшей активизации двух крупных очагов достигают на *X*-компоненте 200 ед. АЦП, а на *Y*- и *Z*-компонентах – ~100 ед. АЦП при минимальных значениях 25–30 ед. АЦП, то влияние вагонеток на уровень фона может считаться достоверными. Таких случаев (дней) наблюдается от 65% до 85% за год. Изменения фона на ±2 ед. АЦП, наблюдаемые до и после проезда вагонетки, можно считать случайными. По-видимому, в рассматриваемые отрезки времени вблизи штольни в районе ПК 1500 отсутствуют мелкие активные флюидно-магматические очаги.

На рис. 2, *a* можно наблюдать уменьшение фона на всех компонентах, которое можно было бы трактовать, как “инициирование”. Действительно, вибровоздействие вагонетки на мелкий очаг способствовало быстрому снятию энергии при её движении вблизи очага и заметному уменьшению эмиссии после проезда. На рис. 2, *б, в* приведены примеры противоположного (положительного) техногенного воздействия (“возбуждение”), когда уровень эмиссии возрастает. При этом в первом примере увеличение фона на *X*-компоненте более чем в два раза превосходит увеличение на *Z*; во втором, наоборот, возрастание в 1.6 раза больше на *Z*-компоненте. Скорее всего, такую разницу в приращениях можно объяснить различной по отношению к стволу штольни ориентировкой мелких очагов, на которые воздействуют движущиеся вагонетки.

На рис. 2, *г* амплитуда фона на *X*-компоненте падает на 15 ед. АЦП; одновременно на *Z* она увеличивается на 10 ед. Обратная картина наблюдается на рис. 2, *д* – амплитуда возрастает на 15 ед. АЦП на *X*-компоненте и уменьшается на 8 ед. АЦП на *Z*. Можно полагать, что в рассматриваемый период времени вблизи штольни существовали, по крайней мере, два активных очага. Очаги находились на разных стадиях развития и были по-разному ориентированы в пространстве по отношению к точке регистрации, и поэтому внешнее воздействие на один из них было инициирующим, а на другой – возбуждающим.

Общей интересной особенностью является независимость изменения уровня фона от количества рейсов за сутки – его изменяет только первый рейс в начале рабочего дня. Крайне редко значимые изменения наблюдаются и при обратном (спустя ~20 мин)

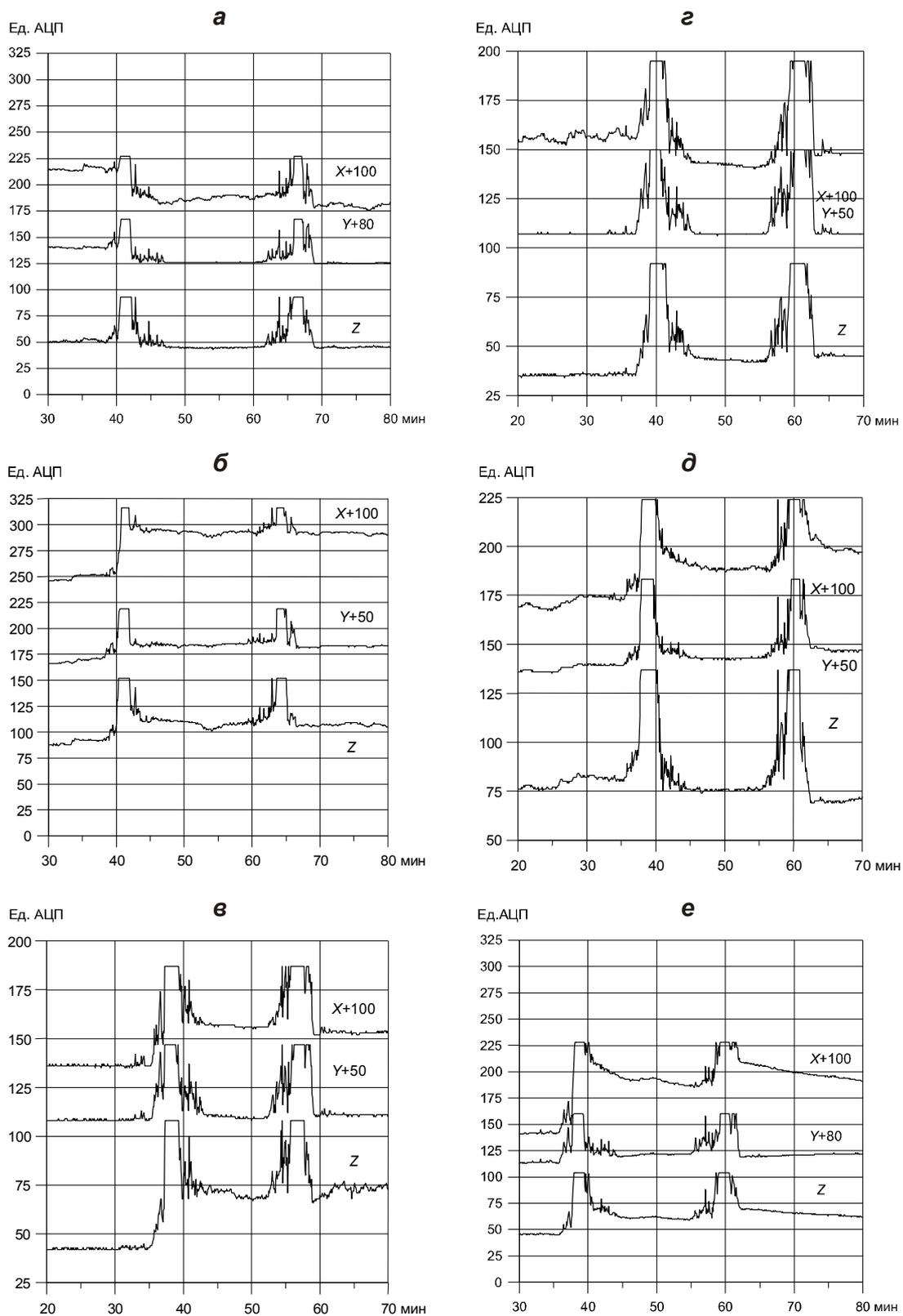


Рис. 2. Разные варианты влияния движения вагонеток на интенсивность эмиссии возникающих вблизи штольни мелких флюидно-магматических очагов (описание см. в тексте)

а – 02.05.2011 г., *б* – 31.05.2011 г., *в* – 13.08.2011 г., *г* – 29.07.2011 г., *д* – 22.08.2011 г., *е* – 08.07.2011 г. На горизонтальных осях – время в мин, отсчитываемое от 3 ч каждого из дней

Таблица 2. Средние значения фона в разные дни наблюдений 2011 г. и его изменения под влиянием проезда вагонетки

	20.09. (263)	02.05. (122; 2, <i>a</i>)	31.05. (151; 2, <i>б</i>)	13.08. (225; 2, <i>в</i>)	29.07. (210; 2, <i>г</i>)	22.08. (234; 2, <i>д</i>)	08.07. (189; 2, <i>е</i>)
1	2	3	4	5	6	7	8
<i>X</i>	169; +3	116; -35	150; +44	36; +19	57; -15	74; +15	42; +55; +20
<i>Y</i>	118; -2	61; -15	70; +13	58; +3	57; +0	89; +6	32; +9; -2
<i>Z</i>	76; +1	52; -7	92; +19	42; +31	35; +10	82; -8	46; +21; +9

Примечание. В столбцах 2–8 **первое число** – среднее значение фона в ед. АЦП; второе – его изменение после первого проезда вагонетки; в столбце 8 третья цифра – изменение после второго проезда. В скобках – день, отсчитываемый от 01.01.2011 г.; номер соответствующего дате рисунка.

движении вагонетки (рис. 2, *е*). На этом же рисунке на записи *Z*-компоненты можно отметить быстрый спад амплитуды после прямого и обратного рейсов.

По-видимому, среда во второй половине дня, вечером и ночью “отдыхает” (восстанавливается).

Представляется целесообразным объективно подтвердить высказанное выше мнение о том, что приведенные примеры изменения уровня микросейсмического фона связаны с движением вагонеток, а не с эндогенными факторами, характерными для сейсмически активного региона.

На рис. 3, *а* приведен тот же участок записи, что и на рис. 2, *г*, но без ограничения амплитуды колебаний, вызванных самой вагонеткой. На рис. 3, *б* представлена запись одного из сильных местных землетрясений. Записи на рис. 3 заметно отличаются по форме, в то время как все записи колебаний от движения вагонеток в разные дни (см. рис. 2) практически повторяются (за исключением малых различий, связанных с изменением уровня фона). При этом времена первого проезда вагонетки в текущих сутках от устья к забою штольни почти не меняются точно так же, как и времена возвращения (это же наблюдается и в остальные дни), что можно объяснить расписанием рабочего дня.

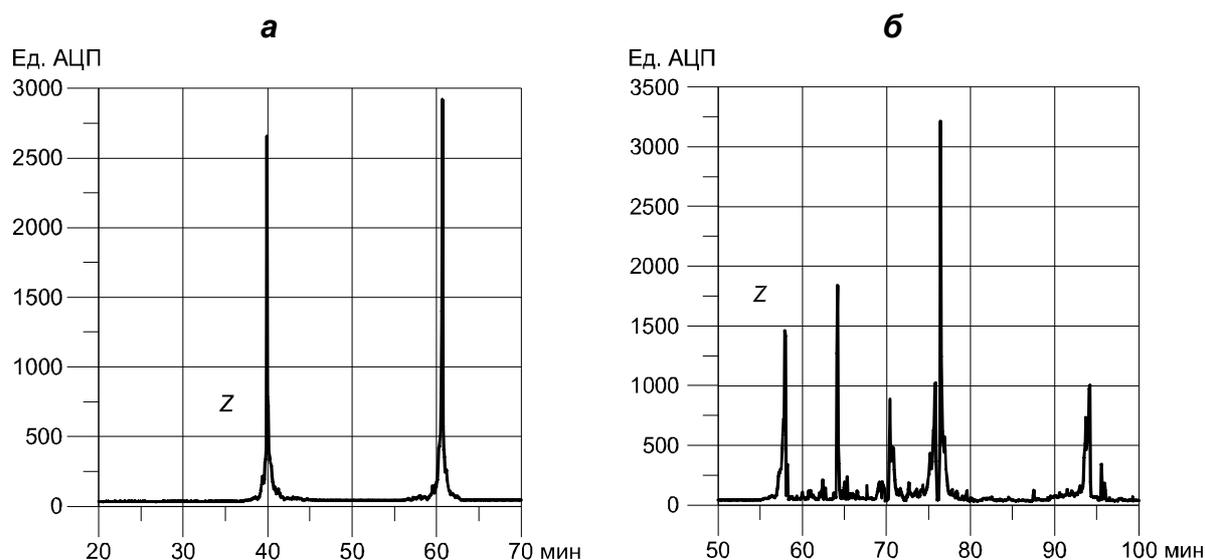


Рис. 3. Пример записи движения вагонетки к забою и обратно (только *Z*-компонента, без ограничения амплитуды) (*а*) и запись местного сейсмического события (*б*)

Количество проездов туда и обратно в течение суток меняется в разные дни от двух до десяти. В табл. 3 приведены данные о количестве записей ($N_{\text{зап}}$), осуществленных в течение 303 суток наблюдения (для остальных дней 2011 г. записи отсутствуют из-за перерывов в электроснабжении). Подавляющее число записей четное, что соответствует проезду вагонетки “туда и обратно”. Нечетные числа связаны с имевшими место местными землетрясениями, а также с запланированными остановками в районе ПК 1500, когда один проезд ошибочно интерпретируется программой как два. Таким образом, можно однозначно утверждать, что рассмотренные случаи изменения микросейсмического фона связаны именно с техногенными воздействиями.

Таблица 3. Статистические данные о количестве записей ($N_{\text{зап}}$), осуществленных за период наблюдений 2011 г., составляющий 303 сут

$N_{\text{зап}}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Количество суток	0	1	99	1	30	6	108	7	33	6	12

Выводы

Рассмотрение приведенных примеров позволяет сделать следующие выводы.

1. Если крупные флюидно-магматические очаги являются относительно стационарными (в течение месяцев), то микросейсмическая активность мелких очагов значительно быстрее меняется во времени.

2. Мелкие очаги, расположенные под разными углами и азимутами по отношению к точке регистрации, возможно, находятся на разных стадиях развития, так как они по-разному реагируют на техногенные воздействия.

Литература

- Адушкин В.В., Спивак А.А., Дубиня М.Г.* Сейсмические явления, наведенные подземным ядерным взрывом // *Наведенная сейсмичность*. М.: Наука, 1994. С.199–206.
- Барабанов В.Л.* Техногенные геофизические явления на месторождениях подземных вод, нефти, газа и твердых полезных ископаемых // *Наведенная сейсмичность*. М.: Наука, 1994. С.157–165.
- Гупта Х., Растоги Б.* Плотины и землетрясения. М.: Мир, 1979. 251 с.
- Масуренков Ю.П., Собисевич А.Л., Комкова Л.А., Лаверова Н.И.* Флюидно-магматические системы северного Кавказа. М.: ИФЗ РАН, 2010. 280 с.
- Мирзоев К.М., Негматуллаев С.Х., Симпсон Д., Соболева О.В.* Возбужденная сейсмичность в районе водохранилища Нурекской ГЭС. Душанбе; М.: Дониш, 1987. 402 с.
- Николаев А.В.* Инициирование землетрясений подземными ядерными взрывами // *Вестн. РАН*. 1993. Т. 36, № 2. С.113–116.
- Николаев А.В.* Проблемы наведенной сейсмичности // *Наведенная сейсмичность*. М.: Наука, 1994а. С.5–15.
- Николаев А.В.* Пространственно-временные особенности связи сильных землетрясений с приливными фазами // *Наведенная сейсмичность*. М.: Наука, 1994б. С.103–114.
- Николаев А.В., Верещagina Г.М.* Об инициировании землетрясений землетрясениями // *Докл. АН СССР*. 1991. Т. 318, № 2. С.320–324.
- Пронин А.П., Собисевич А.Л., Лаверова Н.И., Собисевич Л.Е., Карамурзова И.Р.* Эльбрусский флюидно-магматический центр // *Природные процессы, геодинамика, сейсмо тектоника и современный вулканизм Северного Кавказа*. Нальчик, 2008. С.231–232.

- Рыбников С.И.* Влияние запусков крупнейших ракетных комплексов на образование сильных землетрясений // *Наведенная сейсмичность*. М.: Наука, 1994. С.92–102.
- Собисевич А.Л., Гриднев Д.Г., Собисевич Л.Е., Канониди К.Х., Шевченко А.В.* О развитии работ по созданию Северо-Кавказской геофизической обсерватории // *Природные процессы, геодинамика, сейсмотектоника и современный вулканизм Северного Кавказа*. Нальчик, 2008. С.274–315.
- Сухарев Г.М.* Землетрясения, вызванные техногенными процессами // *Изв. вузов. Нефть и газ*. 1976. № 5. С.3–8.
- Худзинский Л.Л.* Некоторые результаты микросейсмического мониторинга в Приэльбрусье // *Физика Земли*. 2011. № 8. С.29–36.
- Шулаков Д.Ю., Туснин А.Н.* Результаты микросейсмических наблюдений в штольне Баксанской нейтринной обсерватории // *Природные процессы, геодинамика, сейсмотектоника и современный вулканизм Северного Кавказа*. Нальчик, 2008. С.359–362.

Сведения об авторе

ХУДЗИНСКИЙ Лев Львович – доктор технических наук, главный научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: (499) 254-62-76. E-mail: leh@ifz.ru

ABOUT INDUCED MICROSEISMICITY IN CONDITIONS OF THE ELBRUS FLUID-MAGMATIC CENTRE

L.L. Khudzinsky

Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. The known cases of induced seismicity caused by industrial and endogenous effects of high power are enumerated. On example of the Elbrus centre of fluid-magmatic activity various versions of changes in microseismic background level due to anthropogenic influence of essentially smaller energy are considered.

Observations were carried out in the tunnel of the Baksan neutrino observatory of the Institute for Nuclear Research, RAS, at a distance of about 1500 m from its entrance, where the level of external noise is very low. Microseismic oscillations (three components) were recorded continuously in the frequency range of 10–120 Hz; amplitudes were averaged in 5 s intervals. Trolleys moving in the tunnel were regarded as the source of technogenic influence. Their different effects (“initiation” and “excitation”, according to A.V. Nikolaev) on intensity of radiation of large and small fluid-magmatic sources are analyzed depending on their orientation with respect to the tunnel.

Keywords: fluid-magmatic centers, microseismic noise, technogenic influence.