

УДК 500.34.06

Использование критериев идентификации взрывов и землетрясений для уточнения оценки сейсмической опасности региона

В.Э. Асминг¹, Е.О. Кременецкая¹, Ю.А. Виноградов¹, З.А. Евтюгина^{1,2}

¹ Кольский филиал геофизической службы РАН, Апатиты

² Апатитский филиал МГТУ, кафедра геоэкологии

Аннотация. Приводится описание системы сейсмомониторинга Кольского полуострова и прилегающих территорий. Рассмотрены критерии дискриминации взрывов и землетрясений. Показано, что применяемое для распознавания природы сейсмических событий отношение амплитуд объемных Р и S-волн не всегда является достоверным критерием. Отмечено, что для многих техногенных сейсмических событий характерно постоянство спектрального состава в течение длительного времени. Выработана количественная оценка постоянства спектра, которая может служить критерием для распознавания техногенных событий. В качестве информативного признака взрывной природы сейсмического события рассмотрены инфразвуковые сигналы, регистрируемые как микробарографами, так и сейсмометрами. С учетом выработанных критериев пересмотрена база данных землетрясений КФ ГС РАН. В результате ретроспективного (с 1992 г.) анализа событий дана уточненная характеристика сейсмичности Кольского полуострова и близлежащих территорий.

Abstract. The system of seismic monitoring of the Kola Peninsula and adjacent areas has been described. Criteria of discrimination of explosions and earthquakes have been considered. It is shown that P/S body waves amplitudes ratio that is commonly used for explosion and earthquakes discrimination is not reliable in some cases. It is noticed that spectra of many man-caused seismic events vary slowly in time. A quantitative estimation of a spectrum variance in time has been developed. It can be used as a criterion of man-made events discrimination. Infrasonic signals registered by microbarographs and seismometers after seismic events confirm their explosive origin. Taking into account the criteria we have revised our data base of earthquakes. As a result of retrospective (since 1992) analysis of seismic events of the base an improved picture of seismic activity on the Kola Peninsula and adjacent areas has been developed.

Ключевые слова: сонограммы, критерий идентификации взрывов и землетрясений, отношение амплитуд объемных Р и S-волн, сейсмичность

Key words: sonograms, explosions and earthquakes identification criteria, P/S body waves amplitudes ratio, seismicity

1. Введение

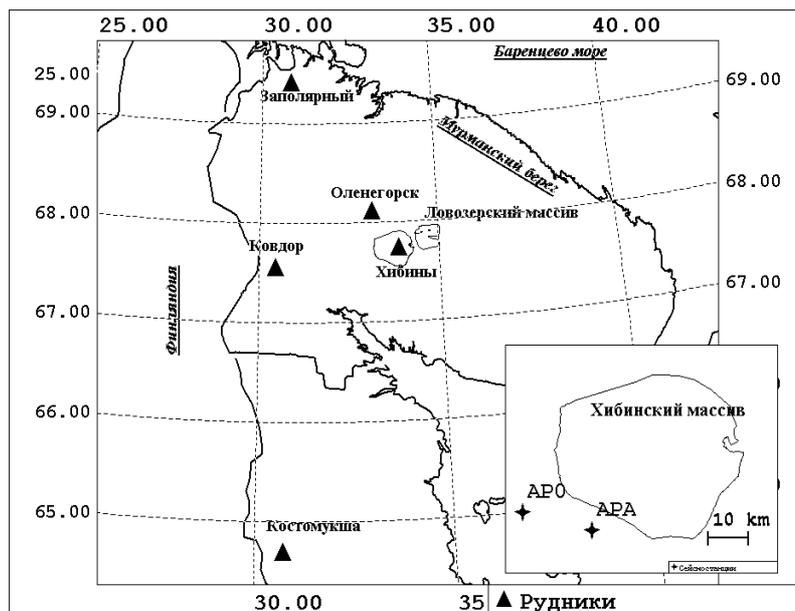
При проектировании опасных промышленных сооружений необходима информация о сейсмичности территории, на которой будут строиться и эксплуатироваться подобные объекты. Планами социально-экономического развития Мурманской области предусматривается строительство крупных инженерных сооружений. В связи с этим возникает необходимость уточнения сейсмической обстановки региона.

Сейсмологические исследования на Кольском полуострове начались в 1956 г. с открытием сейсмостанции "Апатиты". В 1991 г. была введена в эксплуатацию цифровая длиннопериодная трехкомпонентная сейсмостанция в г. Апатиты (далее – АРА). В следующем (1992) году начала работать цифровая сейсмическая группа "Апатитский ARRAY" (далее – АР0), установленная в 18 км от Апатитов – рис. 1. Группа состоит из 9 вертикальных короткопериодных сейсмометров (апертура около 1 км), расположенных по двум концентрическим окружностям и трехкомпонентной станции в их центре (Асминг и др., 1996).

За период работы цифровых сейсмостанций было зарегистрировано огромное количество сейсмических событий, причем обнаруживались весьма слабые сейсмические события, которые раньше операторы не замечали. Несовершенство методов локации зачастую приводило к существенным ошибкам в определении координат даже взрывов на рудниках и, следовательно, к ложной их интерпретации. Необходимо было провести дополнительные исследования, чтобы получить более адекватную картину сейсмичности Кольского полуострова и прилегающих территорий.

По мере эксплуатации цифровых сейсмостанций совершенствовалась техника обработки и хранения поступающей информации. Так, в 1996-2000 гг. в Кольском региональном сейсмологическом

Рис. 1. Местоположение цифровой длиннопериодной трехкомпонентной сейсмостанции (г. Апатиты – АРА) и цифровой сейсмической группы "Апатитский ARRAY" (АРО)



центре – КРСЦ (с 2004 г. Кольский филиал Геофизической службы (КФ ГС) РАН) была разработана система автоматического детектирования и локации сейсмических событий (Асминг, 1997). Применение разных подходов для анализа фактического материала позволило выработать региональные критерии различия взрывов и землетрясений. Обработка записей сигналов всех сейсмических событий, зарегистрированных с начала работы цифровой сейсмической группы с учетом вспомогательных критериев идентификации, а также аккуратная повторная локация событий позволили уточнить сейсмическую обстановку региона.

В результате этой работы была составлена база данных, включающая в себя бюллетени и волновые формы (цифровые записи) сейсмических событий с начала цифровой регистрации (ноябрь 1992 г.).

2. Критерии идентификации

Вопросы локации и дискриминации (различения) событий – взаимосвязаны. Во многих случаях точность локации события является решающим фактором его дискриминации. Так, например, если событие произошло в районе действующего рудника, то велика вероятность того, что это взрыв. События, произошедшие вне рудников, требуют более тщательного анализа, поскольку во многих случаях, на основании только сейсмических записей, невозможно определить, является ли данное событие взрывом или землетрясением.

Для распознавания типов сейсмических событий изучались отношения амплитуд объемных волн Р и S, исследовались спектральные свойства записей событий, проверялось наличие акустических сигналов, выявлялись характерные формы сейсмических сигналов и оценивались глубины сейсмических событий.

Использование отношения S/P. Отношение амплитуд объемных волн Р и S является распространенным критерием различения взрывов и землетрясений.

Предполагается, что взрывы, из-за сферической формы источника, практически не порождают S-волны, а если и порождают, то происходит это из-за некоторой несимметричности источника или превращения первичных Р-волн в S-волны на "свободных" поверхностях (зоны разломов, собственно дневная поверхность). С этой точки зрения, отношение амплитуд S/P для взрывов должно быть очень мало.

Землетрясения же представляют собой тектонические подвижки по разломам, то есть отличаются несимметричностью источника, поэтому могут порождать сильные S-волны и, следовательно, отношения S/P должны весьма отличаться от отношения амплитуд объемных волн, порожденных взрывами. Для всех событий, имеющих в базе данных КФ ГС РАН, для которых оказалось возможным определить моменты вступления Р и S-волн, были рассчитаны отношения S/P. На рис. 2 и в табл. 1 представлены средние значения и среднеквадратичные отклонения отношений S/P для событий, которые мы считаем землетрясениями и взрывами различных типов.

Видим (рис. 2 и табл. 1), что землетрясения, за исключением событий в Ловозерском массиве и Баренцевом море (имеются определенные сомнения в их естественном происхождении), по критерию S/P существенно отличаются от взрывов. Однако критерий S/P не является абсолютно достоверным. Это показывает рис. 3, где существует область совпадения столбцов гистограмм распределения S/P для землетрясений и взрывов. Тем не менее, для большинства событий, определенных как землетрясения на

Кольском полуострове и севере Норвегии, отношение S/P в среднем превышает это же отношение для взрывов. Эмпирически выявлено, что отношение $S/P > 3$ свидетельствует в пользу того, что событие является землетрясением.

Таблица 1. Средние значения S/P для разных взрывов и землетрясений

Тип события	Среднее значение S/P	Среднеквадратичное отклонение S/P
1. Землетрясения, за исключением событий в Баренцевом море и Ловозерском массиве	3.1	1.66
2. Землетрясения в Ловозерском массиве	2.17	0.8
3. Землетрясения вблизи Ловозерского массива	4.37	1.47
4. Землетрясения в Баренцевом море	1.54	0.9
5. Все взрывы	1.94	1.11
6. Мурманский берег	1.54	0.63
7. Заполярный	1.74	0.4
8. Хибинь	2.29	1.29
9. Оленегорск	1.35	0.5
10. Мончегорск	2.02	0.96
11. Костомукша	0.92	0.19
12. Ковдор	1.35	0.46

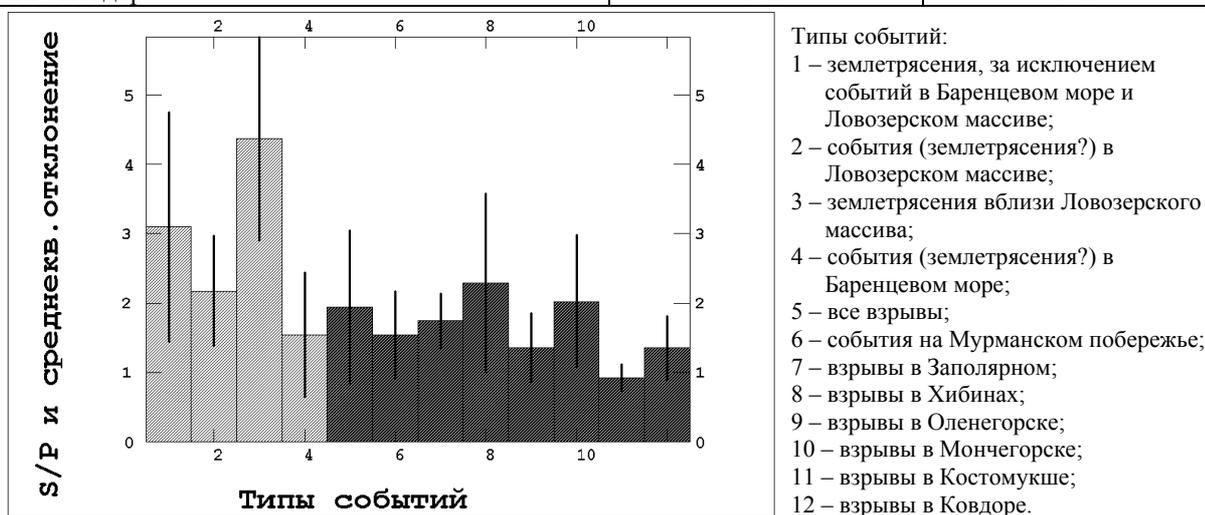
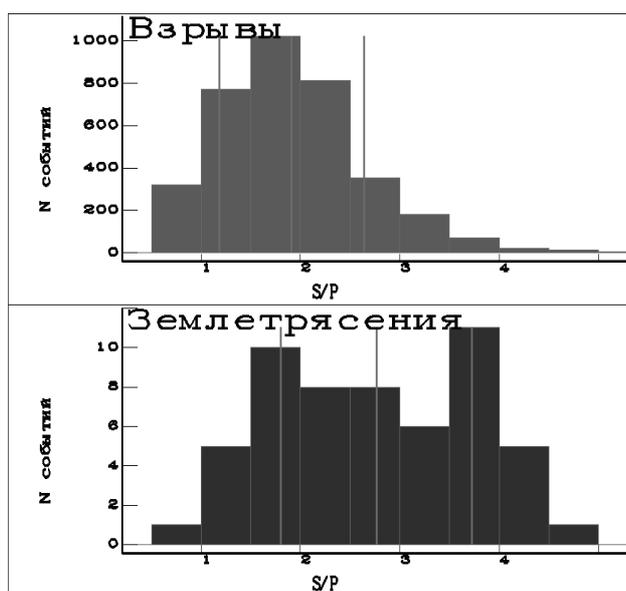


Рис. 2. Средние значения S/P для разных взрывов и землетрясений (местоположение объектов – на рис. 1)

Рис. 3. Гистограммы распределения отношения S/P для взрывов и землетрясений (за исключением событий в Ловозерском массиве и Баренцевом море)



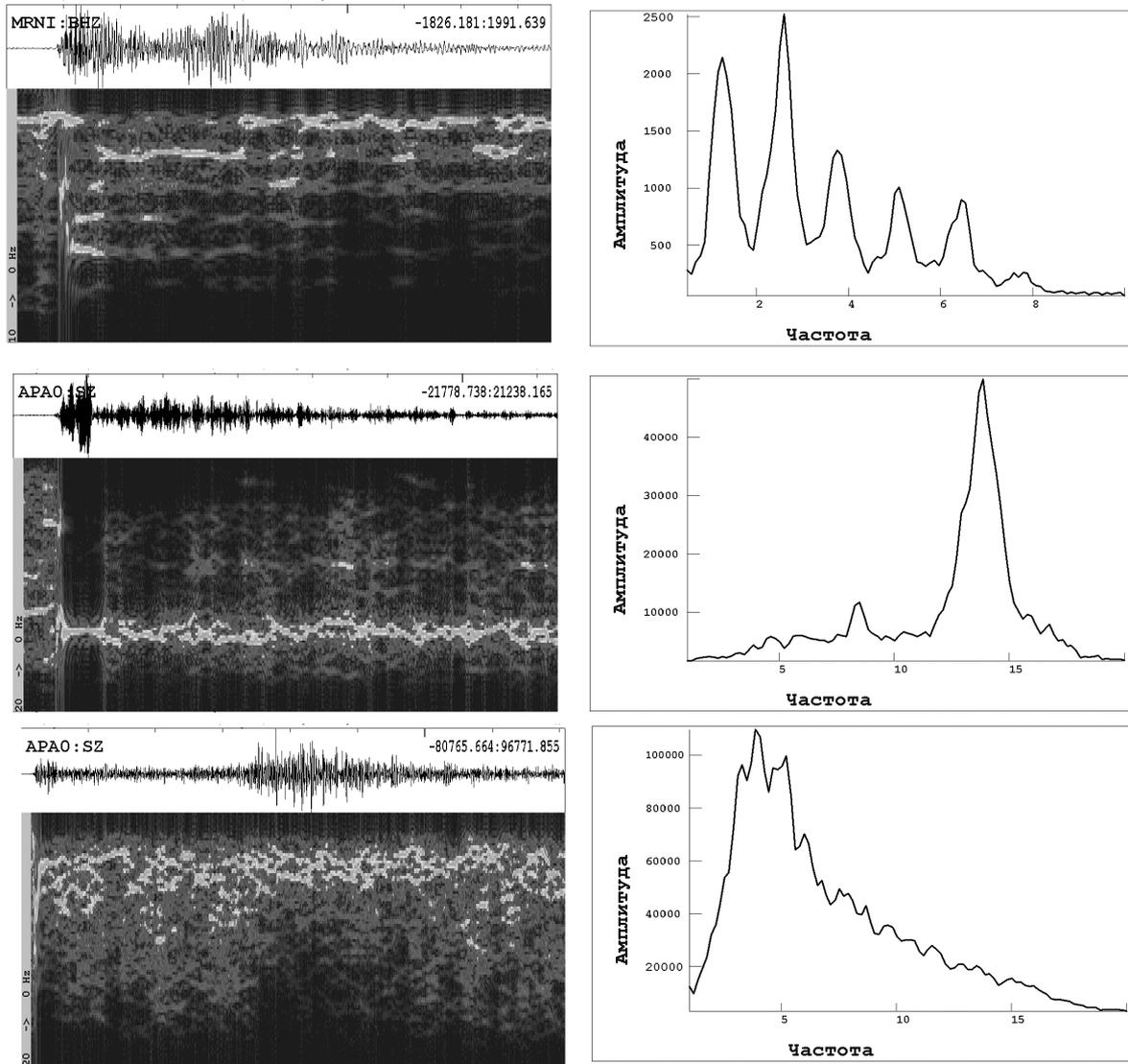


Рис. 4. Примеры спектров (справа) и сонограмм (слева) сейсмических событий: вверху – запись калибровочного взрыва в Мертвом море, выполненная Геологической службой Израиля (приводится как характерный пример записи подводного взрыва); в центре – запись взрыва в карьере г. Ковдор Апатитской сейсмической группой; внизу – запись землетрясения в северной Финляндии.

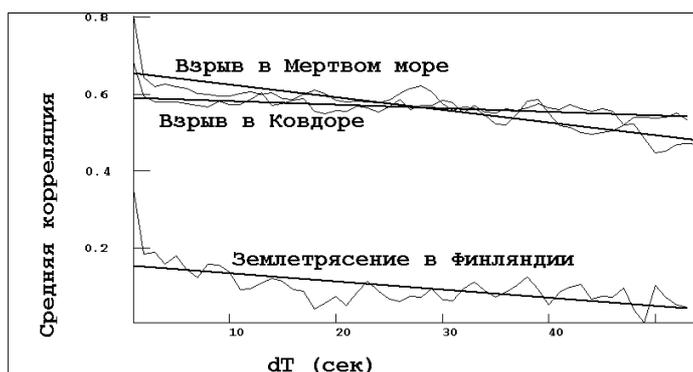
На сонограммах частота увеличивается сверху вниз.

Исследование спектральных свойств событий. Спектральные признаки различия взрывов и землетрясений. Частотный состав записей сейсмических событий, особенно естественного происхождения, весьма изменчив во времени. Поэтому спектры событий сами по себе не очень информативны в отношении дискриминации взрывов и землетрясений. Значительно более информативны спектральные диаграммы (сонограммы), иллюстрирующие изменение спектра событий во времени.

На рис. 4 приведены характерные спектры и сонограммы сейсмических событий.

Многие взрывы, и это давно замечено, можно легко распознать по "полосам" на сонограммах. Так, на сонограммах подводных взрывов наблюдается несколько "полос", вызванных реверберацией сигнала (рис. 4, вверху). На сонограммах некоторых открытых (карьерных) взрывов наблюдается одна полоса, то есть сигнал на одной характерной частоте длится долгое время (рис. 4, в середине). Наличие этих "полос", в частности, означает, что для данных взрывов в сигнале в течение достаточно долгого времени (десятки секунд) преобладают одни и те же частоты. Такая картина никогда не наблюдается для землетрясений. Хотя спектры событий, приведенных на рис. 4, очень различны, наличие "полос" позволяет легко идентифицировать первые два события как взрывы.

Рис. 5. Поведение функции $A(\tau)$ для записей событий: калибровочного взрыва в Мертвом море и взрыва в г. Ковдор; землетрясения в северной Финляндии. Наряду с кривыми $A(\tau)$ показаны рассчитанные по ним линии регрессии



Для такого свойства спектра, как частотная изменчивость во времени, мы попытались выработать количественную меру.

Введем функцию корреляции между спектральными амплитудами одной и той же записи, но для разных положений временного окна. Пусть $S(\omega, t)$ – спектральная амплитуда, вычисленная для участка записи во временном окне $[t-\Delta t, t+\Delta t]$. Обозначим $C(t_1, t_2) = \text{Corr}(S(\omega, t_1), S(\omega, t_2))$. Очевидно, что $C(t, t)=1$ и $C(t_1, t_2) \leq 1$. Теперь вычислим среднее значение этой корреляции $A(\tau) = \langle C(t, t+\tau) \rangle$ по всем t внутри записи события. Очевидно, $A(0)=1$ и $A(\tau > 0) < 1$. На рис. 5 показано поведение функции $A(\tau)$ (средней корреляции спектров для положений временного окна, сдвинутых на τ), рассчитанной для некоторых сейсмических событий.

Для взрывов средняя корреляция $A(\tau)$ достаточно высока, в то время как для землетрясения она резко падает и остается на некотором низком уровне.

В целом, для сравнения событий по $A(\tau)$ достаточно сравнивать не сами кривые, а рассчитанные по ним линейные регрессии вида $A(\tau) = a + b\tau$, причем, наиболее информативным здесь представляется параметр a . Так, например, мы проанализировали записи некоторых событий, полученные норвежской сейсмической группой ARCES (www.norsar.no). Выбор ARCES диктовался тем, что эта группа состоит из более двадцати вертикальных датчиков и четырех трехкомпонентных станций. После обработки записей, полученных вертикальным центральным датчиком группы для 15 массовых подземных взрывов, 12 массовых открытых и 20 торцевых (компактных подземных взрывов небольшого "тоннажа"), были рассчитаны функции $A(\tau)$ и параметры линейной регрессии. По величине параметра a (табл. 2) взрывы трех групп существенно различаются между собой.

Факт, что значение корреляции для торцевых взрывов оказалось даже меньше, чем для массовых подземных, хотя по виду спектров и сонограмм они очень похожи, объясняется тем, что торцевые взрывы гораздо слабее, то есть, отношение сигнал/шум ниже и шум начинает вносить заметный вклад в корреляцию, снижая ее.

Таблица 2

Тип взрыва	$\langle a \rangle$	Среднеквадратичное отклонение параметра a
Подземные	0.41	0.05
Открытые	0.57	0.1
Торцевые	0.28	0.1

Наличие акустических сигналов. Многие карьерные взрывы порождают настолько сильный акустический инфразвуковой сигнал, что он может быть зарегистрирован на сейсмических датчиках.

По сдвигам приходов сигнала на датчики сейсмической группы рассчитываются азимут и скорость подхода волны. Если азимут совпадает с азимутом взрыва, а скорость составляет 0.33 км/сек, можно с уверенностью утверждать, что данный сигнал порожден взрывом (рис. 6).

При этом оценки скорости пробега акустического сигнала, определенные по времени события и расстоянию, оказываются несколько ниже, чем 0.33 км/сек (до 0.29 км/сек).

В 1999 г. в КФ ГС РАН была установлена акустическая группа, состоящая из трех микробарографов, сопряженных с сейсмическими датчиками Апатитской группы ARRAY (Виноградов, 2004). При помощи разработанной в КФ ГС РАН программы детектирования акустических сигналов были обнаружены акустические сигналы от открытых взрывов в Оленегорске, Заполярном, от событий в районе полуострова Рыбачий, в Костомукше и на севере Кольского полуострова (рис. 7).

Характерные формы сейсмических сигналов. С точки зрения опытного интерпретатора многие сейсмические события одного типа, особенно взрывы, похожи друг на друга. Данный критерий, конечно,

Рис. 6. Пример регистрации сейсмических (АРА0:SZ) и акустических (ВАR:1) сигналов сейсмоинфразвуковой группой АRRAУ. Запись двух взрывов, осуществленных в Печенгском районе (г. Заполярный – рис. 7)

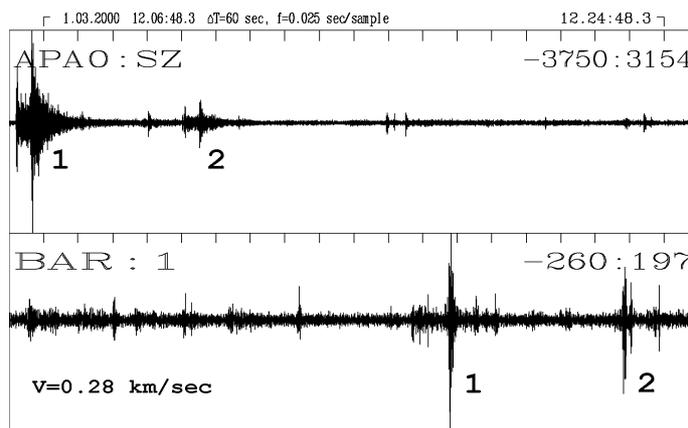


Рис. 7. Районы взрывных работ, откуда были зарегистрированы акустические сигналы



субъективен и трудно поддается формализации, тем не менее, в одном случае, а именно, в случае регистрации сигналов при обрушении пород на рудниках в Хибинах (рис. 8) удалось выработать более формальные признаки:

- слабые, или почти отсутствующие Р и S-волны;
- сильные поверхностные волны Релея (приходят на станцию в Апатитах раньше, чем на Апатитскую сейсмическую группу);
- азимут на событие, полученный по Апатитской группе по поверхностным волнам, направлен в район Хибинских рудников;
- кажущаяся скорость поверхностных волн по датчикам Апатитской группы находится в диапазоне 2.5-3.5 км/сек.

С помощью этих признаков удалось идентифицировать обрушения пород, и более 3500 сейсмических событий были удалены из списка землетрясений.

Подобные записи (преобладание поверхностной волны на частоте около 1 Гц) наблюдаются также от оползней, что неудивительно, поскольку оползни и обрушения породы аналогичны по генерации сейсмических сигналов.

Подходы к оценке глубин сейсмических событий. Глубина сейсмического события представляет собой параметр, который очень сложно оценить. Незначительные ошибки в определении времен вступления волн и в скоростной модели могут приводить к ошибкам вычисления глубины в десятки километров. Тем не менее, для некоторых событий оказалось возможным сделать достаточно грубую оценку с помощью сейсмической группы "Апатитский АRRAУ". При расчете азимута на событие по сейсмической группе вычисляется так называемая кажущаяся скорость подхода волны, то есть, $V_{\text{кажущаяся}} = V_{\text{в верхнем слое}} / \cos \alpha$, где α – угол подхода волны к дневной поверхности.

Параметр $V_{\text{кажущаяся}}$ довольно неустойчив. Для взрывов на расстояниях до 150 км от сейсмической группы кажущаяся скорость для Р-волны составляет 5.5-7 км/сек. Для взрывов на больших расстояниях (до 300-400 км) – 7-10 км/сек.

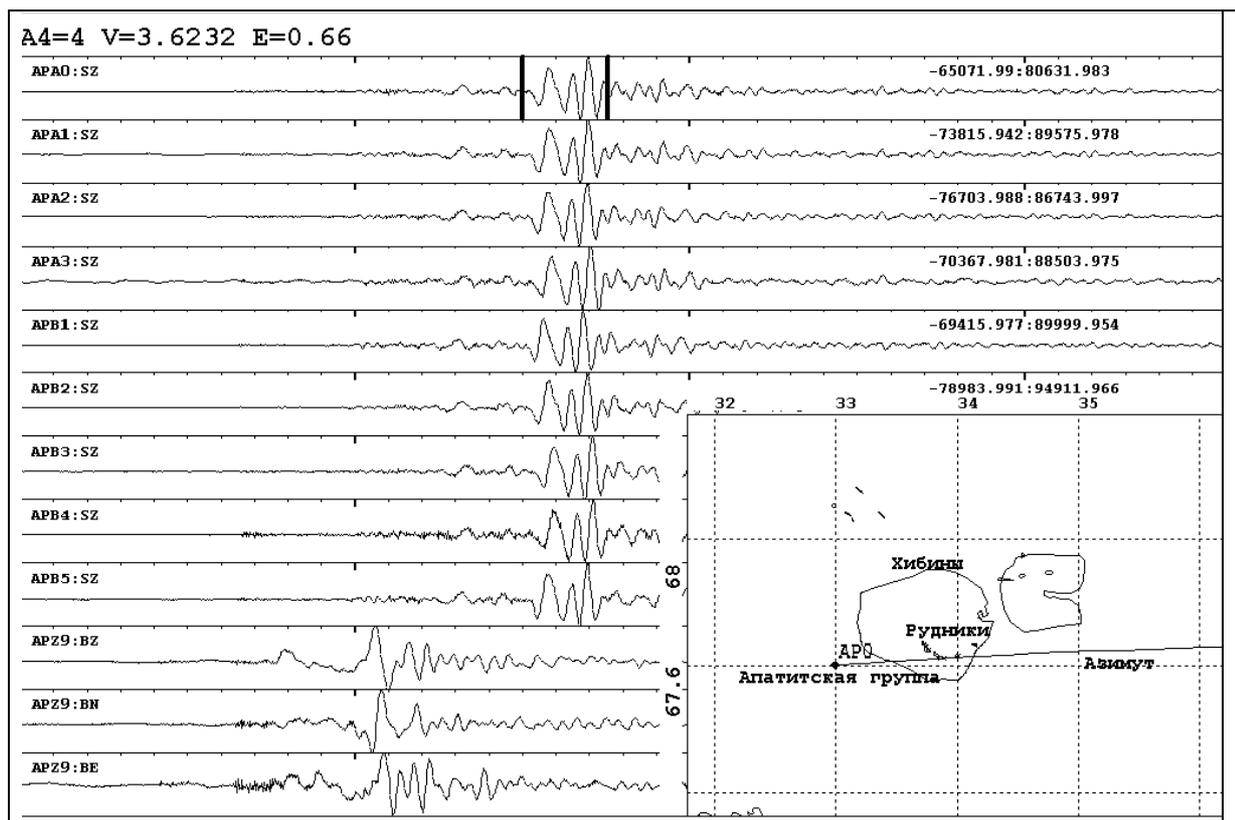


Рис. 8. Типичный пример записи обрушения породы на руднике в Хибинах станциями "Апатитский ARRAY" (AP0, сверху) и "Апатиты" (AP29, снизу). На записи преобладают низкочастотные поверхностные волны. По помеченному участку по сдвигам записей на датчиках "Апатитского ARRAY" рассчитана кажущаяся скорость (3.3 км/сек) и азимут на Юкспорский рудник в Хибинах

Тем не менее, находятся сейсмические события, для которых $V_{\text{кажущаяся}}$ в несколько раз превышает эту же скорость для взрывов на аналогичных расстояниях. Так, например, для события 26.06.1996 в районе оз. Имандра $V_{\text{кажущаяся}}$ для Р-волны оказалась около 50 км/сек, для S-волны – около 30 км/сек. Аналогично для нескольких слабых сейсмических событий в Хибинах. Такие события были нами однозначно определены как землетрясения.

Магнитуды событий. Понятно, что промышленные взрывы не могут быть сколь угодно сильными. На каждом руднике существует своя технология взрывания и максимально возможная магнитуда взрыва. Технологии взрывания и, соответственно, максимальные магнитуды могут меняться со временем. Так, например, в начале 1990-х на рудниках в г. Заполярный и г. Ковдор производились мощные взрывы, магнитуды которых доходили до 3.3. С 1997 года и по настоящее время магнитуды всех взрывов на Кольском полуострове и в северной Карелии не превышали 3.

Таким образом, не существует критериев, абсолютно достоверно разделяющих землетрясения и техногенные события. Если после сейсмического события мы наблюдаем акустический сигнал, это однозначно говорит нам о том, что событие – взрыв. Обратное неверно, событие без акустического сигнала может быть как взрывом, так и землетрясением. Аналогично, если событие произошло на существенной глубине – это землетрясение. Обратное неверно. Если в спектральной диаграмме события наличествуют полосы, это однозначно взрыв. Но сонограммы многих взрывов не имеют таких полос. Если для события отношение S/P велико (>3), с большой вероятностью событие является землетрясением. Обратное неверно, наблюдалось много реальных землетрясений с амплитудой S даже меньшей, чем амплитуда P.

Полный алгоритм распознавания сейсмических событий, который был использован при анализе данных, накопленных в КФ ГС РАН, включает в себя несколько принципиальных позиций.

1. Если событие не удалось слочировать, но присутствуют все признаки обрушения горных пород на руднике, событие идентифицируется как обрушение горной породы. Если событие низкочастотное, с высокой кажущейся скоростью волн – это телесеизмическое событие.

Поскольку станция "Апатиты" расположена в более шумном месте, сигналы от региональных сейсмических событий регистрируются ею значительно хуже, чем сейсмической группой "Апатитский ARRAY". Большое количество событий, особенно на расстояниях свыше 100 км от станций, было сфоцировано только по данным станции "Апатитский ARRAY". При этом использовались моменты вступлений Р и S-волн и азимуты, вычисляемые по сдвигам моментов приходов волн на различные датчики сейсмической группы. При наличии четких вступлений Р и S-волн на станциях "Апатиты" и "Апатитский ARRAY" (с погрешностью менее 0.2 сек) ошибки локации составили до 1-2 км в районе Хибинского массива и 10-20 км для региона в целом. Если имеется регистрация только станцией "Апатитский ARRAY", ошибка может оказаться существенно больше, ввиду того, что азимут прихода волны по сейсмической группе не может быть рассчитан с погрешностью менее 3-5 градусов. В этом случае ошибка для региона может составить 30-40 км и, здесь, к факторам, влияющим на ошибку локации, необходимо добавить ошибку расчета азимута.

4. Уточнение сейсмической обстановки региона

На основе ретроспективного анализа с учетом региональных критериев идентификации взрывов и землетрясений удалось скорректировать оценку сейсмической опасности Мурманской области и прилегающих территорий. Пришлось пересмотреть завышенную оценку техногенной сейсмичности в Хибинском массиве, ввиду того, что подавляющее большинство сейсмических событий здесь, ранее считавшихся землетрясениями, были идентифицированы как взрывы или обрушения породы на рудниках. Техногенная сейсмичность в Хибинах, хотя и существует (в районах действующих рудников с 1992 по 2009 год не отмечено землетрясений с магнитудами свыше 2.8), но незначительна. Магнитуды сейсмических событий в Хибинах вне рудников не превышают 1.4 (рис. 10).

Наибольшая естественная сейсмическая активность в данном регионе наблюдается в районах Кандалакшской сейсмической зоны (максимальная магнитуда 3.4), на Мурманском побережье (максимальная магнитуда 3.4), в северной Норвегии (до 3.9), в средней части Финляндии (до 4), в Баренцевом море в районе архипелага Шпицберген (до 6) (рис. 11).

Районом сильной сейсмической активности являлся Ловозерский массив (рис. 10). В августе 1999 года здесь произошло техногенное землетрясение магнитудой 4. Сейсмические события здесь концентрировались в районе действующих рудников. С прекращением работы рудника Умбозеро сейсмические события в его районе прекратились. В зоне действующего рудника Карнасурт продолжается слабая сейсмическая активность (максимальная магнитуда в 2009 году – 2). Это свидетельствует о том, что сейсмичность Ловозерского массива является техногенной.

Евро-Арктический регион в целом отличается низкой естественной сейсмической активностью.

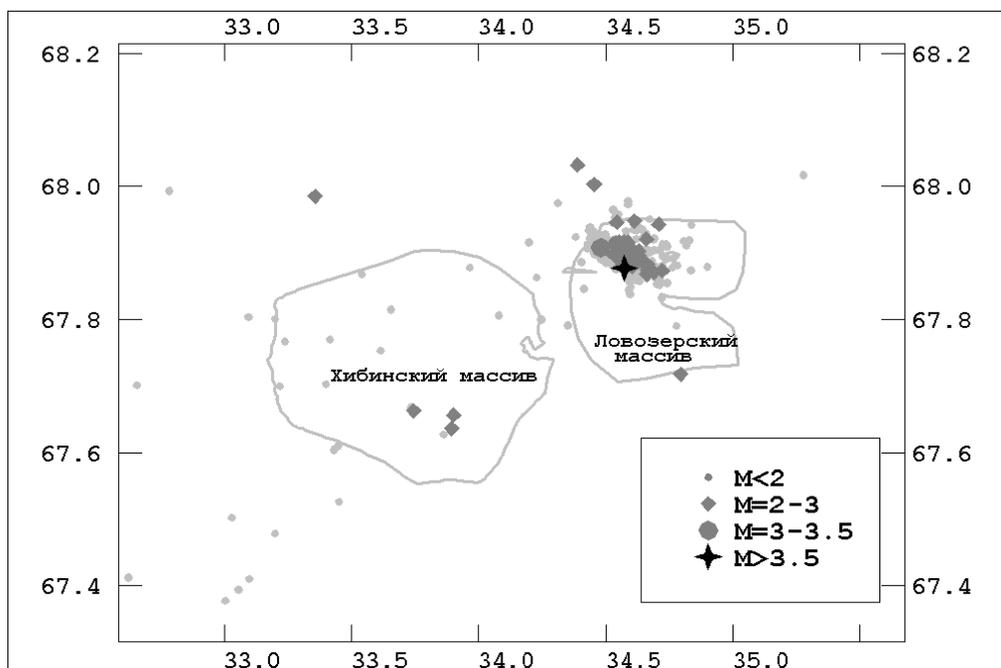


Рис. 10. Землетрясения районов Хибинского и Ловозерского горных массивов за период с декабря 1992 по октябрь 2009 гг.

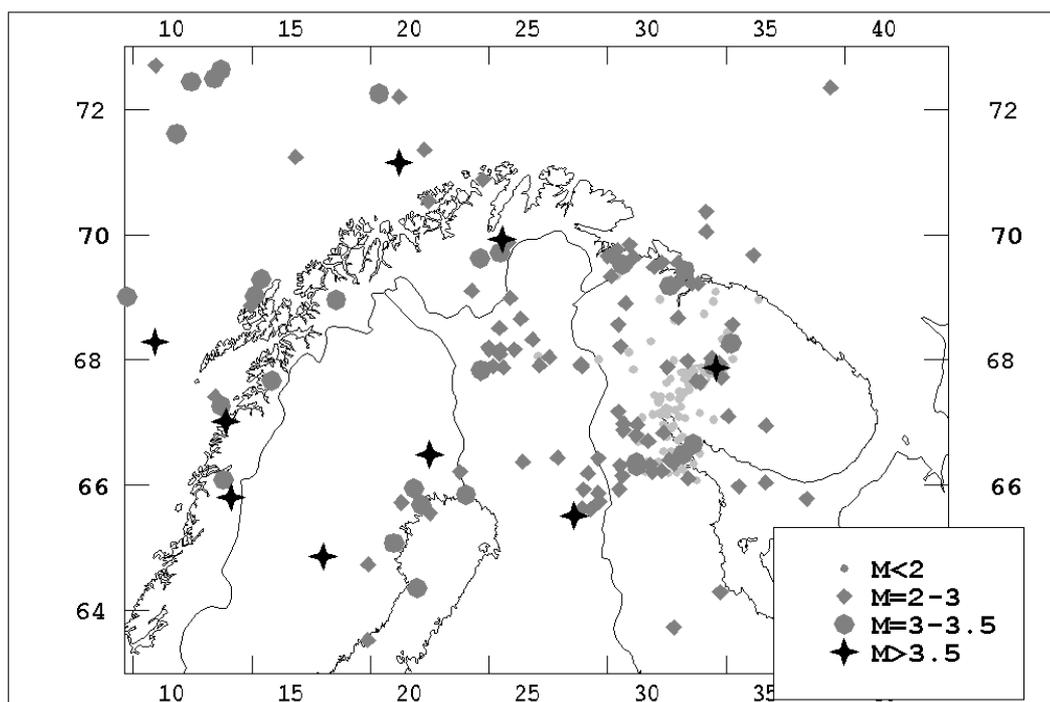


Рис. 11. Землетрясения Кольского полуострова и прилегающих территорий за период с декабря 1992 по октябрь 2009 гг.

5. Заключение

Применение разных подходов для анализа данных, накопленных в КФ ГС РАН, позволило выработать региональные критерии различения взрывов и землетрясений, происходивших на Кольском полуострове и прилегающих территориях. Полный алгоритм распознавания сейсмических событий при анализе фактического материала включал несколько принципиальных позиций идентификации взрывов и землетрясений на действующих рудниках. Это позволило, в частности, удалить из списка землетрясений более 3500 сейсмических событий, идентифицированных как обрушение пород.

Обработка записей сигналов всех сейсмических событий, зарегистрированных с начала работы цифровой сейсмической группы с учетом вспомогательных критериев идентификации, а также аккуратная повторная локация событий позволили уточнить сейсмическую обстановку региона.

Литература

- Асминг В.Э., Гурьева С.Н., Кузьмин И.А., Кременецкая Е., Коломиец А.С., Тряпицын В.М., Федоренко Ю.В. Сейсмологические исследования на территории Европейского Севера России и прилегающих районов Арктики. Основные результаты научно-исследовательских работ за период 1992-1996 гг. *Апатиты, КНЦ РАН*, 44 с., 1996.
- Асминг В.Э. Программный комплекс для автоматизированной обработки сейсмических записей "ЕЛ". Приборы и методика геофизического эксперимента. *Мурманск*, с.125-132, 1997.
- Виноградов Ю.А. Сейсмоинфразвуковой комплекс "Апатиты" – новый инструмент дистанционного геомониторинга в Евро-Арктическом регионе. *Север 2003: проблемы и решения. Под ред. акад. В.Т. Калининкова. Апатиты, КНЦ РАН*, с.105-110, 2004.