

II. МАКРОСЕЙСМИЧЕСКИЕ ОБСЛЕДОВАНИЯ

СОЛИКАМСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 5 января 1995 года ($M_s=4.2$)

А.А. Маловичко, Д.А. Маловичко, А.К. Кустов

5 января 1995 г. в 12^h46^m многими сейсмическими станциями земного шара [1,2], в том числе станциями ГС РАН "Арти", "Свердловск", "Обнинск", "Кисловодск", "Амдерма" было зафиксировано землетрясение с магнитудой $M_s=4.2$ [2]. Его макросейсмический эпицентр располагался на территории Западного Урала в непосредственной близости от г. Соликамска [3] и приурочен в тектоническом плане к зоне сочленения двух крупных геоструктур – Восточно-Европейской платформы и Уральской складчатой области. Инструментальные определения параметров землетрясения приведены в табл. 1.

Таблица 1. Кинематические и динамические параметры Соликамского землетрясения по данным разных агентств

Агентство	Дата, д м	t_0 , ч мин с	δt_0 , с	Эпицентр				h, км	δh , км	Магнитуды		Ист.
				φ°, N	$\delta\varphi^\circ$	λ°, E	$\delta\lambda^\circ$			Ms/n	MPSP/n	
ОМЭ ОИФЗ РАН	05.01	12 46 00.3	0.26	59.54	0.04	56.54	0.07	10		4.2/1	5.0/8	[1]
ISC		12 45 59.5		59.61		56.62		0			4.7/36	[2]
NEIC		12 46 01.0		59.598		56.645		10			4.8/35	[2]
EIDC		12 46 01.2		59.52		56.31		0			4.4	[2]
NORSAR		12 46 09.0		59.00		56.00					4.6	[2]
PDE		12 46 01.0		59.65		56.44					4.7	[4]
ГИ УрО РАН			59.59 _M	56.80 _M			[3]					

В последней строке табл. 1 приведен макросейсмический эпицентр Соликамского землетрясения по данным Геологического института Уральского отделения РАН (ГИ УрО РАН) [3]. Поскольку это землетрясение представляет собой типичное техногенное событие и сопровождалось массовыми обрушениями в горных выработках калийного рудника, то местоположение зоны обрушений позволяет достаточно точно оценить его координаты.

На рис. 1 приведены координаты эпицентра землетрясения по данным разных агентств из табл. 1. Видно, что все инструментальные определения дают систематическое смещение эпицентра в западном направлении относительно его истинного положения. Ошибка в локации эпицентра составляет от 10 до 25 км. Ее величина в 10 км, по-видимому, минимальна для случаев определения эпицентров техногенных землетрясений по региональным и телесейсмическим наблюдениям. Заметим, что для очень близкого по своей природе и характеристикам техногенного землетрясения на калийном руднике в Германии, происшедшего 13.03.1989 г. с $m_b=5.4$, погрешность определения эпицентра по данным центра EIDC составила примерно эту же величину – 13 км [5].

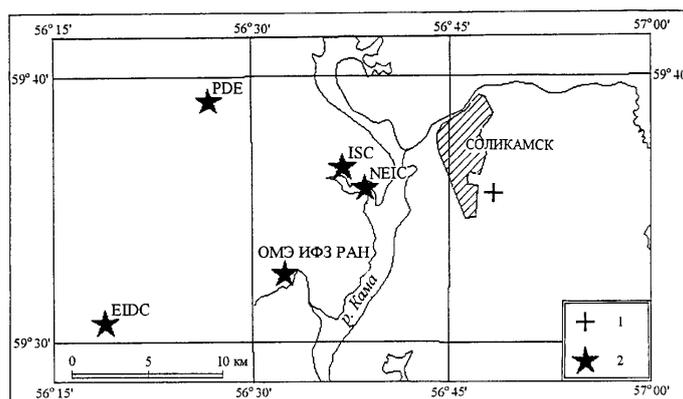


Рис. 1. Положение эпицентра Соликамского землетрясения по данным разных агентств.

1 – макросейсмический эпицентр; 2 – инструментальный эпицентр по разным данным.

Макросейсмические проявления. Сбор макросейсмических данных был проведен в различных населенных пунктах на обширной территории Верхнекамского района. Результаты 140 опросов обобщены по 29 пунктам [3]. Макросейсмические данные (табл. 2, рис. 2) свидетельствуют о том, что землетрясение ощущалось на территории, начиная от деревни Тохтуево (в 10 км к северу от г. Соликамск) и кончая г. Березники на юге. На западе зона ощутимых сотрясений ограничивается р. Камой, а на востоке – пос. Половодово. Таким образом, зона, оконтуриваемая 3-балльной изосейстой, вытянута примерно на 40 км в меридиональном направлении и 25 км в широтном и занимает площадь около 790 км². В эпицентральной области (микрорайон "Совхоз" г. Соликамск и район садоводческого кооператива "Ключики") интенсивность сотрясений оценивается в 5-6 баллов. В одноэтажных домах в этой зоне зафиксированы падения нескольких гардин, одной люстры, многочисленные движения мебели и т.д.

Таблица 2. Макросейсмические данные о Соликамском землетрясении 5 января в 12^h46^m с Ms=4.2

№	Пункт	Δ, км	№	Пункт	Δ, км
<u>5-6 баллов</u>			<u>3 балла</u>		
1	Садоводческий кооператив "Ключики"	0.5	17	Березники (восточная часть)	21.0
2	Микрорайон Совхоз	2.0	18	Чашкино	8.0
<u>4-5 баллов</u>			19	Боровск	13.5
3	Дер. Попово	2.0	20	Половодово	15.0
4	Микрорайон Красное	5.5	<u>Толчки не ощущались</u>		
5	Микрорайон пос. Калинец	6.0	21	Березники (западная часть)	22.0
6	3-ий микрорайон	4.0	22	Усолье	21.0
<u>4 балла</u>			23	Пыскор	18.0
7	Микрорайон Давыдово	3.0	24	Лысьва	9.5
8	Нефтебаза (Боровск)	9.5	25	Пос. Верх. Мошево	29.0
9	Микрорайон Клестовка	8.5	26	Дер. Левино и Затон	27.0
10	Городище	8.5	27	Пос. Ниж. Мошево	24.5
11	Пос. Черная	12.5	28	Дер. Хорюшино	11.5
12	Управление рудника СКРУ-3	8.0	29	Пос. Дурино	13.0
13	Аэропорт	4.0			
14	Пос. Родники	5.5			
<u>3-4 балла</u>					
15	Совхоз «Усовский»	7.5			
16	Дер. Тохтуево	14.5			

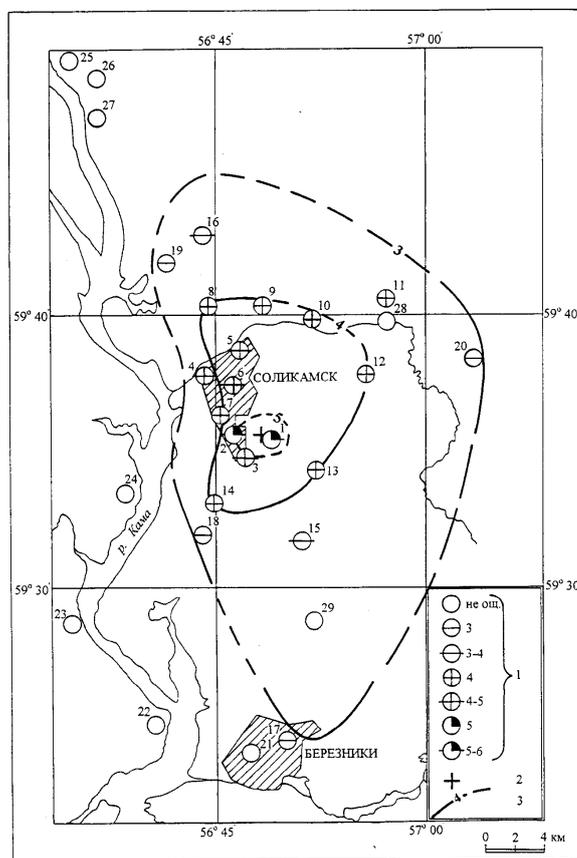


Рис. 2. Карта изосейст Соликамского землетрясения 5 января в 12^h46^m (Ms=4.2 [2], MPSP=5.0 [1])

1 – интенсивность сотрясений I в баллах по шкале MSK-64 [6]; 2 – макросейсмический эпицентр; 3 – изосейста, уверенная и неуверенная, соответственно.

Эпицентральная зона в плане совпадает с северо-восточным краем шахтного поля рудника Второго Соликамского рудоуправления Верхнекамского месторождения калийных солей (рис. 3). С землетрясением связаны массовые обрушения кровли рабочих пластов на глубинах 300-320 м на большом участке (600х600 м) отработанного шахтного поля (в пределах 1 и 2 северо-восточных панелей) [7]. В годы, предшествовавшие землетрясению, на участке обрушения были отработаны два и частично третий продуктивные пласты. Суммарная вынута мощность при двухпластовой выемке составила 10 м, при трехпластовой – 16 м. Одновременно с землетрясением произошло оседание земной поверхности на 4.5 м и образование мульды размером 650х850 м, в краевой части которой на поверхности образовались открытые трещины (рис. 3).

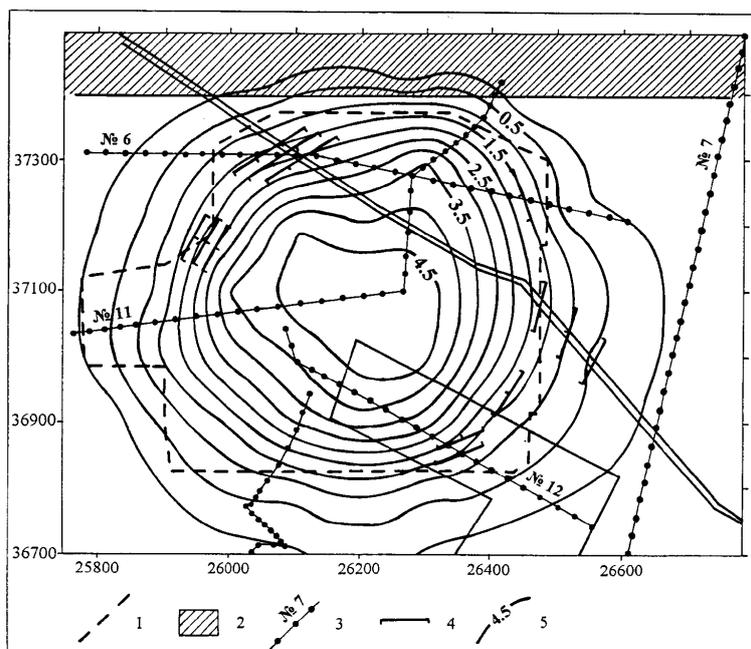


Рис. 3. Схематическая карта зоны массовых обрушений на руднике СКРУ-2

1 – граница зоны обрушения в руднике; 2 – межшахтный целик; 3 – линия и номер профиля; 4 – трещина на земной поверхности; 5 – изолиния глубины h оседания земной поверхности, м.

Сразу после землетрясения на руднике СКРУ-2 оказалась выведенной из строя внутренняя система телефонной связи. Вероятной причиной этого аварийного отключения явилось образование сильного электромагнитного импульса. Через 30-45 минут работоспособность всех линий связи, в том числе и с подземными пунктами, самопроизвольно восстановилась.

Динамические процессы под землей сопровождалась выделением большого объема ($\sim 9 \cdot 10^5 \text{ м}^3$) газов (метановодородной смеси и углекислого газа). Газовыделение сопровождалось взрывами и последующим горением вплоть до 10 января. Только через 12 дней после аварии, в результате проведения большого объема мероприятий по разгазированию выработок, ситуация была нормализована и превышений предельно допустимых концентраций по газу в районе зоны обрушения не обнаружилось.

Характеристика инструментальных данных. Соликамское землетрясение зарегистрировали свыше 80 сейсмических станций земного шара [2]. Ближайшая к эпицентру станция – "Арти" ($\Delta=374 \text{ км}$ / 3.36° , наиболее удаленная – "Южный полюс" ($\Delta=16600 \text{ км}$ / 149.4°). На рис. 4 приведена сводная сейсмограмма вертикальных компонент трех ближайших станций – "Арти", "Амдерма" и "Обнинск". На записях "Арти" резко доминирует по интенсивности цуг поверхностных волн, соответствующих фазе Эйри волны Рэлея. На записях в "Амдерме" и "Обнинске" интенсивности всех основных типов волн (объемных и поверхностных) примерно соизмеримы. Возможности детальной интерпретации волновой картины на сейсмограммах двух последних станций ограничиваются сравнительно высоким уровнем микросейсм.

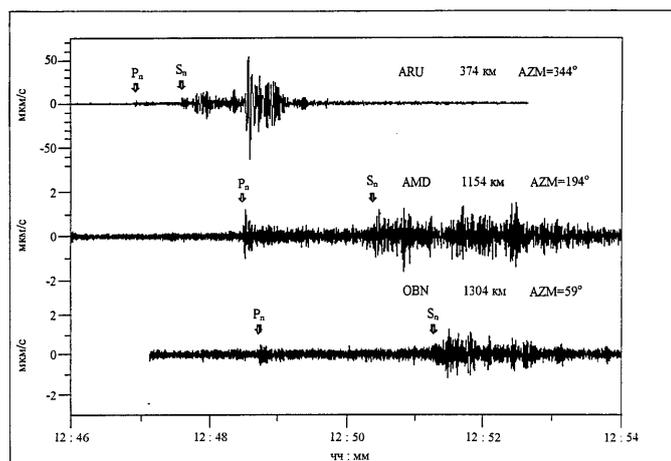


Рис. 4. Вертикальные компоненты записи Соликамского землетрясения цифровыми станциями: ARU – "Арти", AMD – "Амдерма", OBN – "Обнинск".

Наиболее высоким качеством характеризуются данные, полученные в "Арти". На рис. 5 показана копия записи всех трех компонент землетрясения. На ней четко выделяются все основные типы объемных и поверхностных волн, регистрируемых на региональных расстояниях в первые сотни километров. Первой зарегистрирована продольная волна P_n , которая распространяется вблизи верхней границы мантии внутри слоя с высокой скоростью. Через 8 с после волны P_n фиксируется интерференционный цуг продольных волн длительностью около 10 секунд.

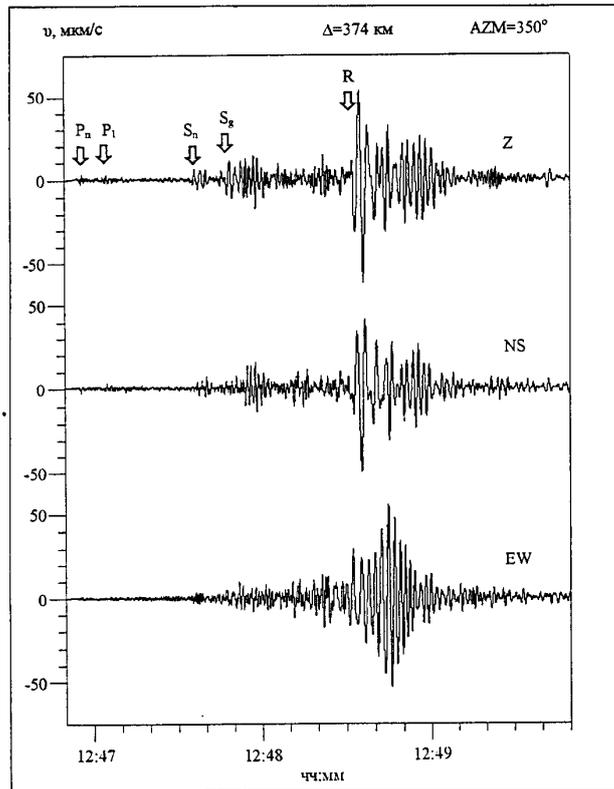


Рис. 5. Сейсмограмма Соликамского землетрясения на станции "Арти" (ARU)

Для определения его природы был выполнен расчет синтетических сейсмограмм. Вычисления производились с помощью комбинированного аналитически-разностного метода [8] для модели среды, построенной по данным ГСЗ для Западно-Уральской территории [9]. В качестве источника колебаний принят приповерхностный вертикальный силовой импульс. На рис. 6 приведены рассчитанные вертикальные компоненты скоростей смещений для различных удалений от источника и вертикальная компонента записи в "Арти" при $\Delta=374$ км, которая для лучшей сопоставимости предварительно была подвергнута низкочастотной фильтрации (выделена жирной линией).

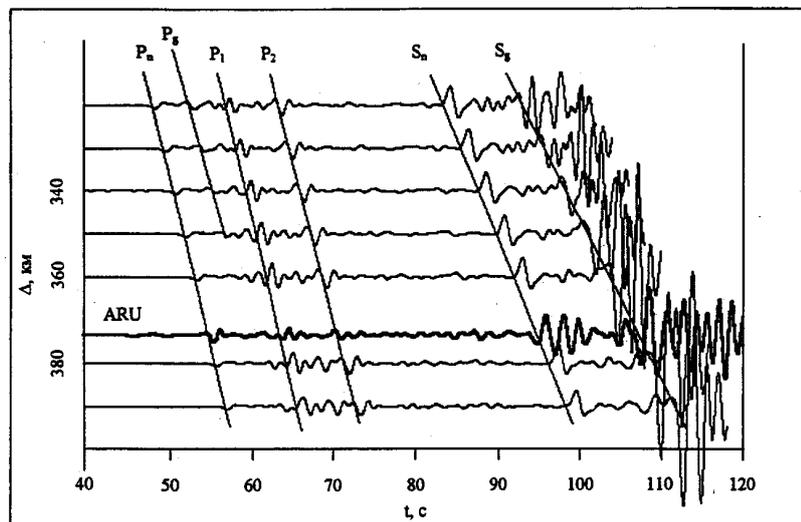


Рис. 6. Синтетические сейсмограммы вертикальных компонент объемных волн Соликамского землетрясения для различных удалений от источника и фрагмент реальной записи в "Арти"

Анализ синтетических трасс позволяет выделить три фазы продольных волн с разными кажущимися скоростями. Фазы P_1 и P_2 имеют соответственно кажущиеся скорости 8.0 и 7.4 км/с. При этом фаза P_1 имеет кажущуюся скорость, одинаковую со скоростью волны P_n . Учитывая это обстоятельство, фазу P_1 можно интерпретировать как обменную волну, которая вначале (в земной коре) распространяется в виде поперечной волны, а затем испытывает обмен на границе Мохо и далее распространяется в верхах мантии и в земной коре в виде продольной волны (подобно P_n). Аналитический расчет времени запаздывания фазы P_1 относительно волны P_n дает величину около 9.0 с, которая и фиксируется на синтетической сейсмограмме.

Примерно через 5.5 секунд после волны P_n на синтетических сейсмограммах выделяется региональная фаза P_g , соответствующая волне, отраженной от границы Мохо, и которая при своем распространении полностью остается в пределах земной коры. Амплитуда волны P_g на синтетических

сейсмограммах меньше, чем амплитуда фазы P_1 . Возможно этим и объясняется видимое отсутствие фазы P_g на записях в "Арти".

Через 40 секунд после фазы P_n вступает фаза S_n , представляющая собой поперечную волну, преломленную в мантии. Она имеет кажущуюся скорость 6.9 км/с. Еще через 12 секунд после фазы S_n вступает региональная фаза S_g , которая представляет собой поперечную волну, отраженную от границы Мохо. Ее кажущаяся скорость составляет 3.7 км/с и близка к средней скорости поперечных волн в верхней части земной коры.

Соликамское землетрясение привлекло внимание зарубежных ученых, занимающихся проблемой распознавания крупных подземных взрывов и землетрясений [10-12]. Хорошие записи Соликамского землетрясения были получены системами наблюдений, установленными в Казахстане одним из подразделений Ламонтской обсерватории Колумбийского университета для исследований по проблеме распознавания подземных ядерных взрывов. Анализ сейсмограмм локальной группы "Курчатов", развернутой вблизи г. Курчатов, и станций в Актюбинске и Боровом [13] позволил выявить ряд специфических черт этого события, которые отмечаются на региональных расстояниях ± 1700 км. Согласно результатам анализа продольные и длиннопериодные поверхностные волны Соликамского землетрясения выглядят как волны источника, очень близкого по своим характеристикам к источнику взрывного типа. В то же время другие характеристики, и, прежде всего, амплитуда короткопериодных поверхностных волн, существенно ближе по своим параметрам к характеристикам типичных заглубленных землетрясений.

Структура первых фаз продольных волн. Интересные данные получены при изучении структуры продольных волн на региональных и телесеизмических расстояниях [10,14,15].

Детальное сопоставление форм записи первых фаз Р-волн, зарегистрированных короткопериодной аппаратурой на различных региональных ("Арти"-374 км, "Курчатов"-1719 км) и телесеизмических расстояниях ("Gauribidanur"-5390 км, в Индии, "Yellowknife"-6470 км, в Канаде) свидетельствует об их простой и достаточно близкой форме (рис. 7а). Согласно [15] очень похожие по форме сигналы наблюдаются и для других техногенных землетрясений и горных ударов, происходящих на рудниках ЮАР, Германии, Польши и США. Вместе с тем короткопериодные записи очень часто оставляют открытым вопрос о полярности первого вступления продольной волны. Применение специальной фильтрации [15], базирующейся на использовании оператора Карпендера, позволяет получить широкополосную запись, на которой можно четко зафиксировать отрицательную фазу первого вступления (рис. 7б). Это обстоятельство свидетельствует в пользу механизма очага типа массового обрушения (collapse type). Именно такой характер записей первых вступлений продольных волн был получен многочисленными местными и региональными сейсмическими станциями при крупном техногенном землетрясении 13.03.1989 г. на калийном руднике в Германии [5].

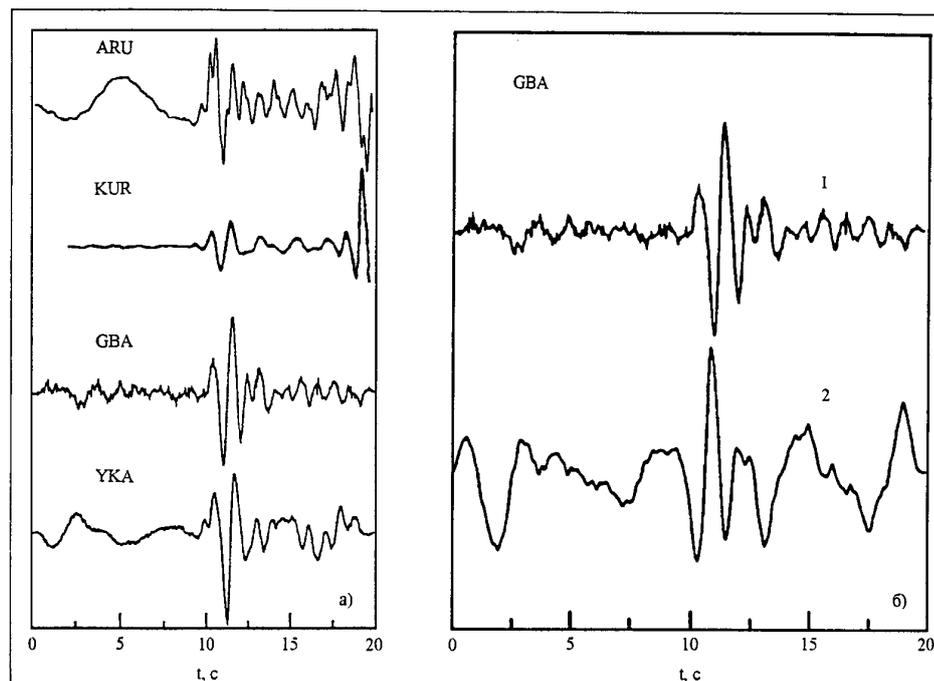


Рис. 7а. Сопоставление формы продольных волн, записанных короткопериодной аппаратурой четырех станций: ARU ("Арти"), KUR ("Курчатов"), GBA ("Gauribidanur"), YKA ("Yellowknife") на расстояниях от очага землетрясения 374 км, 1719 км, 5390 км, 6470 км соответственно.

Рис. 7б. Результат восстановления широкополосной записи на станции GBA ("Gauribidanur") [14] при $\Delta=5390$ км

1 – исходная сейсмограмма станции; 2 – восстановленная широкополосная запись.

При изучении тонкой структуры первых фаз продольных волн Соликамского землетрясения по сейсмограммам станций "Арти" и "Yellowknife" выделяются (рис. 8) низкочастотный ($f=0.45-0.9$ Гц) и высокочастотный ($f=1.5-2.5$ Гц) пакеты [14]. По результатам анализа траекторий смещения частиц среды пакеты имеют разные длительности – 4.0 и 2.1 секунды, соответственно. Наблюдается временной сдвиг в 0.6 секунд между вступлениями волновых пакетов. Вступление высокочастотного пакета практически совпадает с максимумом отрицательной фазы низкочастотного пакета. Интересно отметить, что временной сдвиг низкочастотного и высокочастотного пакетов для станций ARU и YKA сохраняется практически одинаковым. Это позволяет заключить, что наличие сдвига обусловлено структурой сейсмических процессов в очаге землетрясения.

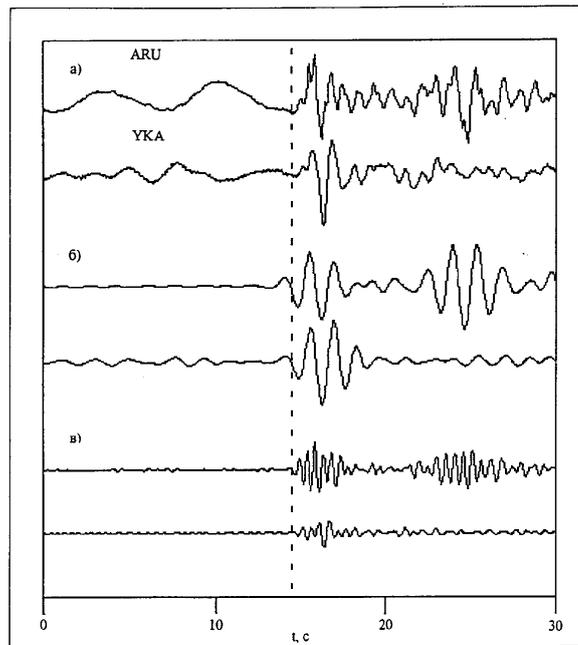


Рис. 8. Особенности тонкой структуры формы записи продольной волны для сейсмических станций ARU-"Арти" и YKA-"Yellowknife"

а) – исходные фрагменты сейсмограмм станций ARU, YKA; б) – выделение низкочастотной ($f=0.45-0.9$ Гц) составляющей записи; в) – выделение высокочастотной ($f=1.5-2.5$ Гц) составляющей записи.

Мониторинг эпицентральной зоны в 1995-2001 гг. Сразу после Соликамского землетрясения на руднике СКРУ-2 была развернута локальная сеть сейсмологического мониторинга для контроля за зоной обрушения в связи с реальной возможностью затопления рудника [16]. За 6 лет непрерывных мониторинговых наблюдений автоматизированной системой сейсмоконтроля зарегистрировано более 4500 микроземлетрясений с энергией в диапазоне $10-10^5$ Дж. На рис. 9 показано пространственное распределение эпицентров сейсмических событий. Можно видеть, что плотность событий в пределах шахтного поля рудника значительно меняется. Наиболее значительна она в пределах и в непосредственной близости от зоны обрушения, граница которой показана светлым контуром. Зона повышенной сейсмической активности может рассматриваться, как афтершоковая. Из рисунка видно, что она имеет приблизительно эллипсоидальную форму с размерами 2.0×1.0 км и площадью ~ 1.67 км². Согласно исследованиям [17] между магнитудой тектонического землетрясения и размером области афтершоков, существует корреляционная зависимость, выражаемая следующей формулой:

$$M = 4 + \lg S,$$

где S – площадь афтершоков в км².

Подставляя в формулу значение $S_{af} = 1.67$ км², получаем $M \approx 4.2$, что хорошо согласуется с инструментальным значением M_s в [2]. Следовательно, зона повышенной плотности эпицентров микроземлетрясений может рассматриваться как проекция сейсмоактивного блока, динамическая разгрузка напряжений в котором и привела к сильному землетрясению.

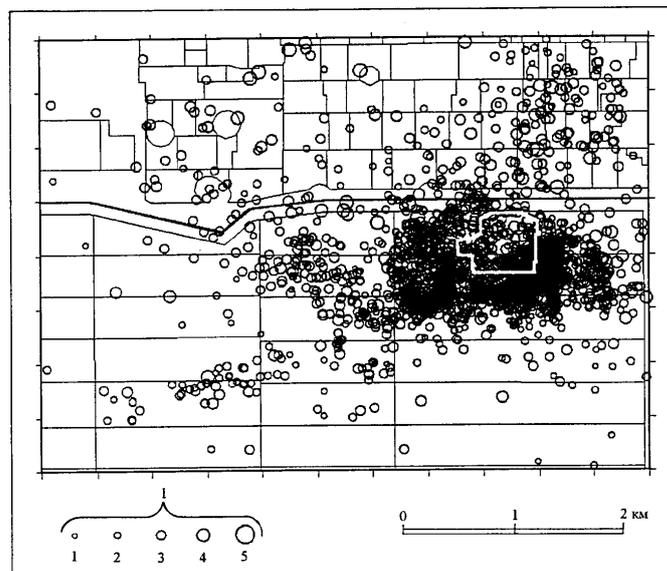


Рис. 9. Карта эпицентров микроземлетрясений в очаговой области Соликамского землетрясения за 6 лет (1995-2001 гг.) после него.

Таким образом, Соликамское землетрясение представляет собой с сейсмической точки зрения сложное природно-техногенное событие. Дальнейший детальный анализ всех имеющихся данных с применением различных современных методов изучения физики сейсмического очага позволит лучше понять его механизм и физическую природу.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 01-05-65509).

Л и т е р а т у р а

1. **Сейсмологический бюллетень (ежедекадный) за 1995 год. 1995-1996.** / Отв. ред. О.Е. Старовойт. Обнинск: Изд-во ОМЭ ИФЗ РАН.
2. **Bulletin of the International Seismological centre for 1995. 1997.** Newbury: Изд-во ISC.
3. **Маловичко А.А., Блинова Т.С., Лебедев А.Ю., Некрасова Л.В. 1997.** Соликамское землетрясение 5 мая 1995 г. // Проблемы безопасности при эксплуатации месторождений полезных ископаемых в зонах градопромышленных агломераций. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН. С. 307-315.
4. **Preliminary Determination of Epicenters (Monthly Listing). 1995.** USA. Denver: Изд-во USGS. NEIC.
5. **Ahorner L. 1991.** Entstehung und Ablauf des Gebirgsschlages bei Völkershausen am 13. März 1989 aus Seismologischer Sicht // Proceedings of Second International Potash Technology Conference Kali-91. Hamburg. 11 с.
6. **Медведев С.В. (Москва), Шпонхойер В. (Иена), Карник В. (Прага). 1965.** Шкала сейсмической интенсивности MSK-64. М.: Изд-во МГК АН СССР. Р. 9-11.
7. **Маловичко А.А., Сабиров Р.Х., Шулаков Д.Ю. 1998.** Сейсмический контроль за динамикой развития аварийной ситуации на калийном руднике // Горные науки на рубеже XXI века. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН. С. 171-176.
8. **Михайленко Б.Г. 1973.** Численное решение задачи Лэмба для неоднородного полупространства // Математические проблемы геофизики. Вып. 4. Новосибирск: Изд-во ВЦ СО АН СССР. С. 273-297.
9. **Маловичко Д.А. 1999.** Анализ сейсмограмм Соликамского землетрясения 5 января 1995 г. // Геология Западного Урала на пороге XXI века. Пермь: Изд-во Пермского Ун-та. С. 267-269.
10. **Kim Won-Young, Kazakov V.V., Vanchugov A.G., Simpson D.W. 1996.** Broadband array observations at low noise sites in Kazakhstan: opportunities for seismic monitoring of a comprehensive test ban treaty // Monitoring a Comprehensive Test Ban Treaty. NATO Advanced Science Institute Series: E 303. P. 467-482.
11. **Bennett T.J., McLaughlin K.L. 1997.** Seismic characteristics and mechanisms of rockbursts for use in seismic discrimination // Rockbursts and Seismicity in Mines. Rotterdam: Balkema. P. 61-66.
12. **Walter W.R. 1997.** A point source mechanism for seismic waves from mine collapses // Rockbursts and Seismicity in Mines. Poster Abstracts. Krakow: University of Mining and Metallurgy. 12 p.
13. **Беляшова Н.Н., Малахова М.Н. 2000.** Сейсмологическая сеть национального ядерного центра Республики Казахстан как составная часть международной системы мониторинга ядерных испытаний // Геофизики и проблемы нераспространения. Курчатов: Изд-во Национального ядерного центра Республики Казахстан. С. 13-16. (Вестник НЯЦ РК; Вып. 2).
14. **Маловичко А.А., Кустов А.К. 2000.** Сейсмологический мониторинг территории Верхнекамской градопромышленной агломерации // Геодинамика и техногенез. Ярославль: Изд-во ФГУП НПЦ "Недра". С. 99-102.
15. **Bowers D., Douglas A. 1997.** Characterisation of large mine tremors using P observed at teleseismic distances // Rockbursts and Seismicity in Mines. Rotterdam: Balkema. P. 55-60.
16. **Маловичко А.А., Дягилев Р.А. 1997.** Сейсмический мониторинг техногенных процессов в калийных рудниках // Проблемы геодинамической безопасности. II Международное совещание. Санкт-Петербург: Изд-во ВНИМИ. С. 55-65.
17. **Utsu T. 1961.** A statistical study of the occurrence of aftershocks // Geophys. Magazine. V.30. P. 521-605.