



Афтершоки объявленных подземных взрывов,
проведенных на полигоне КНДР и обнаруженных
методом кросс корреляции волновых форм в период
между 2013 и 2022 гг.

Иван Китов, ИДГ РАН и ВТС ОДВЗЯИ
Ирина Санина , ИДГ РАН



- Объявленные ядерные испытания КНДР 2006–2017 гг.
- Кросс корреляция волновых форм как метод обнаружения повторяющихся сигналов. Взрывы как мастер события. Относительная локация взрывов.
- Афтершоки, найденные с помощью взрывов как мастер событий
- Афтершоки как мастер события
- Кросс корреляция волновых формы: метод ассоциации фаз с несколькими мастер событиями.
- Ретроактивная обработка данных региональных станций MCM USRK (Россия) и KSRS (Ю.Корея) 2009-2022 гг.
- Афтершоки испытаний КНДР: 2013-2022 гг.
- Важные события: 29 мая 2013 г., 19 февраля 2016 г., 11 сентября 2016 г., 3 сентября 2017 г., 11 февраля 2022 г.
- Кластеризация афтершоков КНДР-5 и КНДР-6
- Интерактивный анализ: несколько важных примеров
- Выводы



Решения МЦД ОДВЗЯИ

Взрыв	Дата	Время	Lat, deg	Lon, deg	Ndef	mb	Ms	ML	S _{maj} , km	S _{min} , km	Az, deg	S, km ²
КНДР-1	09.10.2006	01:35:28	41.312	129.019	22	4.08	-	3.89	20.6	13.6	67.2	880.15
КНДР-2	25.05.2009	00:54:43	41.311	129.046	72	4.51	3.56	4.27	9.6	8.8	104.4	265.40
КНДР-3	12.02.2013	02:57:51	41.301	129.065	110	4.92	3.95	4.52	8.1	7.1	106.6	180.67
КНДР-4	06.01.2016	01:30:00	41.304	129.048	102	4.82	3.92	4.61	8.4	7.3	104.3	192.64
КНДР-5	09.09.2016	00:30:01	41.299	129.049	120	5.09	4.17	4.29	7.6	6.4	91.6	152.81
КНДР-6	03.09.2017	03:30:01	41.320	129.035	189	6.07	4.91	5.17	6.7	5.2	88.1	109.45

Красным выделены испытания, после которых найдены афтершоки. Магнитуды от 4.82 до 6.07

Поиск похожих (повторяющихся) сигналов в непрерывных многоканальных сигналах

Точность оценки времени вступления повторяющихся сигналов меньше шага дискретизации (до 0.005 с) !

Пример обнаружения сигнала с помощью кросс корреляции: КНДР 2006 г. и КНДР 2009 г. КНДР 2006 в качестве шаблона. Станция AKASG, фильтр ВР между 0.8 Гц и 2.0 Гц



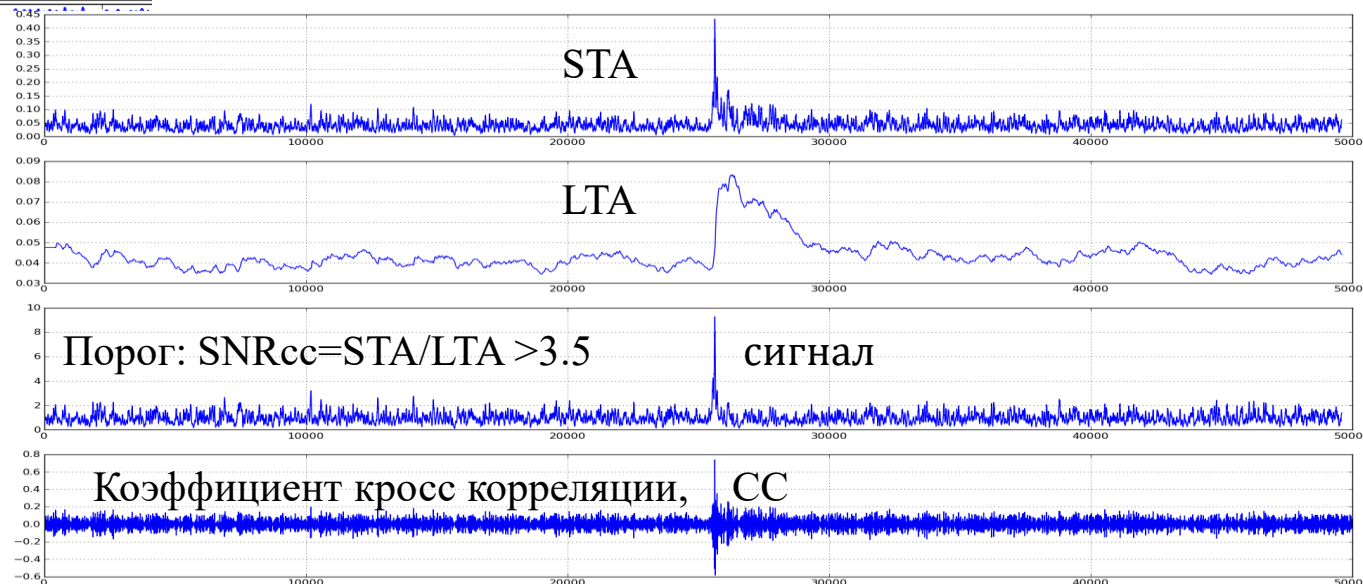
В этом исследовании:

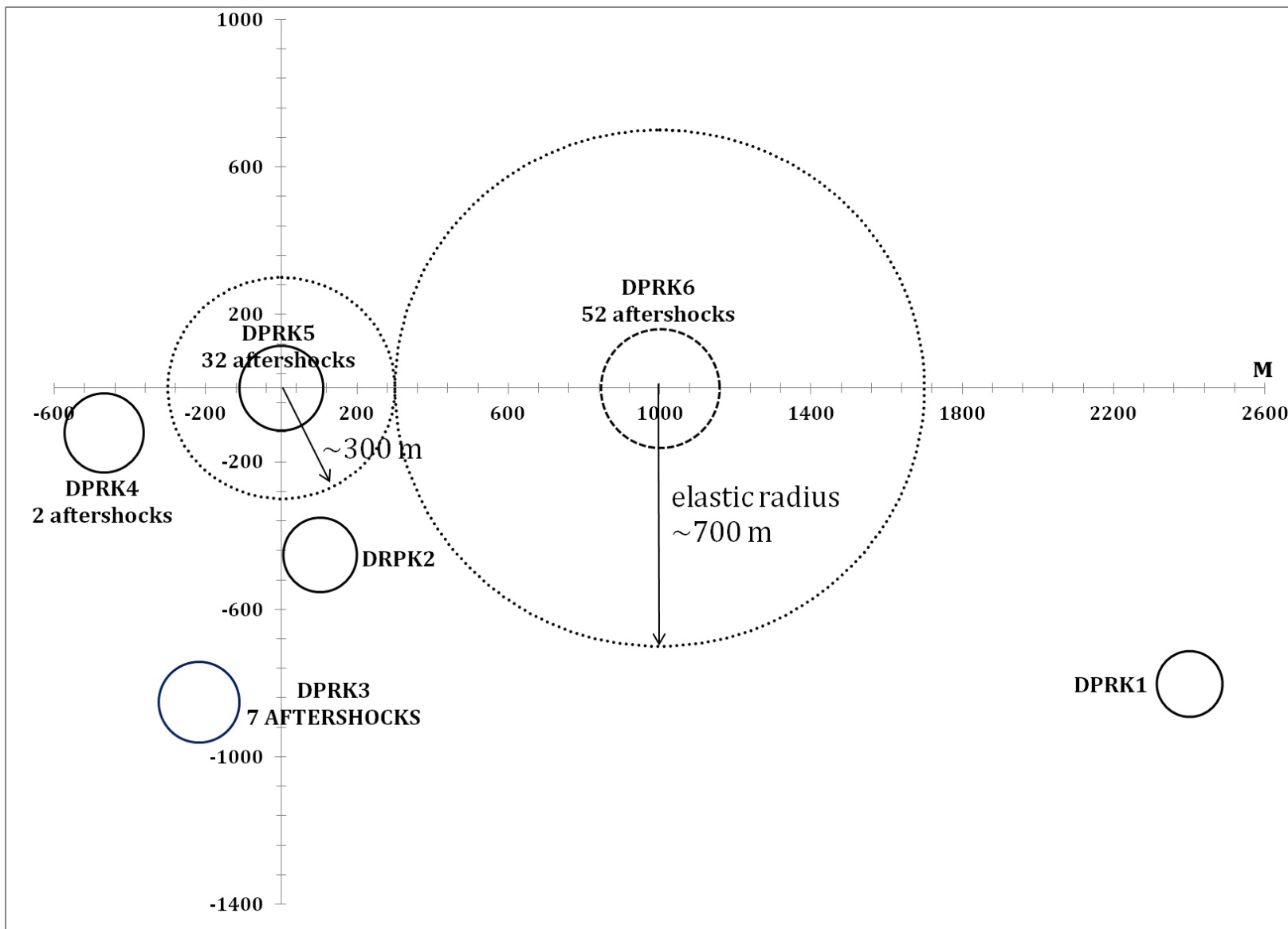
Пять фильтров: 1-2 Гц, 1.5-3.0 Гц, 2-4 Гц, 3-6 Гц, 4-8 Гц;

Несколько длин шаблонов: 20 с, 40 с, ..., 120 с;
 STA = 0.5 с (режим высокого разрешения) and 0.8 ч (рутинная обработка);

LTA = 60 ч;

Порог обнаружения: $SNR_{cc} > 3.8$ (0.5 с) and 3.5 (0.8 с)

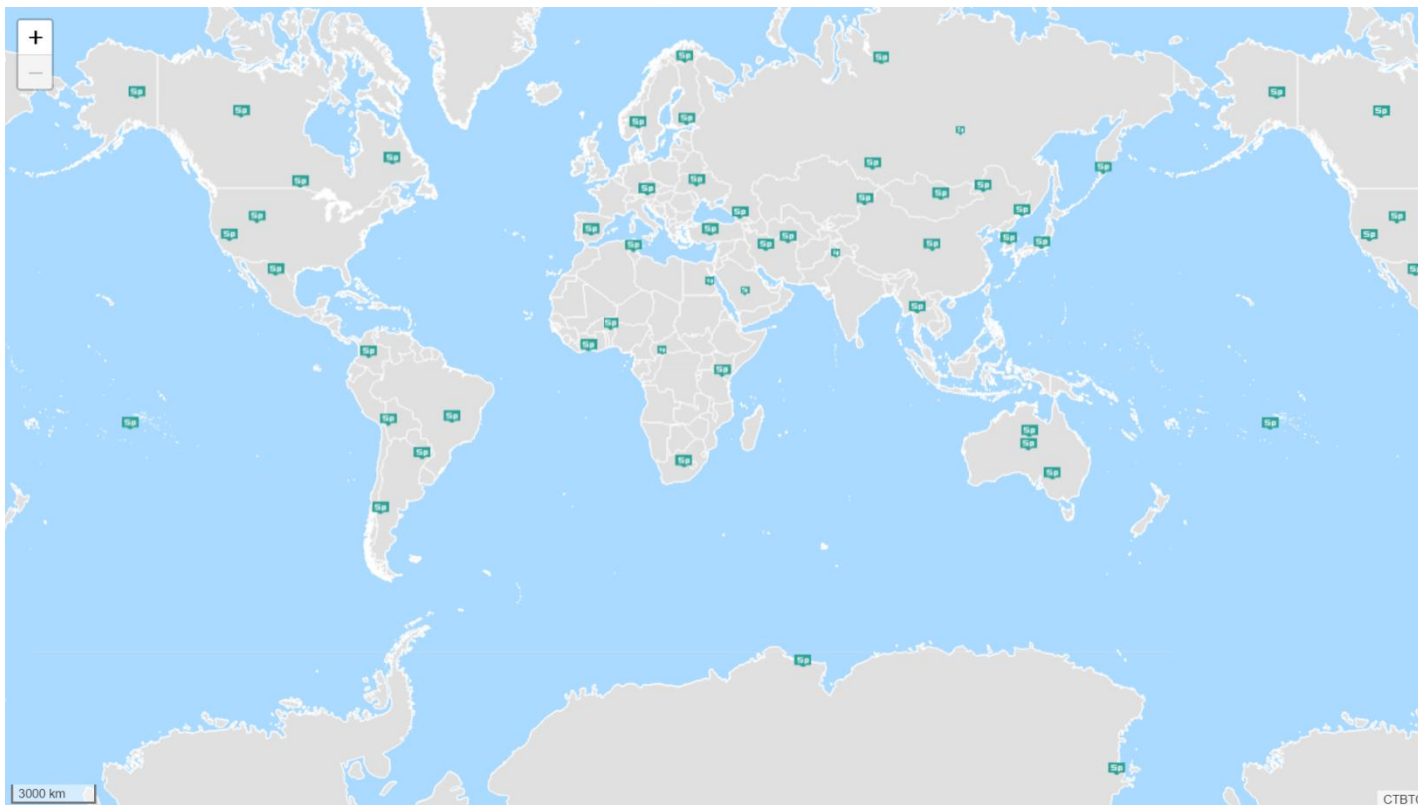




- Кросс корреляция позволяет определить относительное местоположение взрывов с точностью 20-50 м (кроме КНДР-6)
- Расстояние между КНДР-5 и КНДР-6 от 1000 м до 1500 м
- Упругий радиус КНДР-5 около 300 м, а КНДР-6 порядка 700 м.
- Глубины заложения по оценкам с помощью моделирования тензора сейсмического момента порядка 1000-1500 м
- Столбы обрушения полостей КНДР-5 и КНДР-6 находятся в пределах нескольких сот метров при собственных размерах, сравнимых с их упругими радиусами

Международная система мониторинга

Афтершоки, найденные тремя и более станциями МСМ



	Date	Time	OT stdev, s	Ndef	RM	RM stdev
1	2014145	06:01:31	1.56	5	3.58	1.01
2	2014145	06:43:05	0.89	4	3.58	0.88
3	2017246	03:38:32	0.75	11	4.36	0.39
4	2017266	08:29:17	0.34	5	3.68	0.38
5	2017285	16:41:10	0.37	4	3.31	0.57
6	2017335	22:45:57	1.54	5	3.39	0.81
7	2017343	06:13:42	0.84	6	3.81	0.59
8	2018038	21:46:04	2.40	7	3.92	0.81
9	2019011	23:15:49	0.39	4	3.45	1.14
10	2019158	05:18:41	1.76	5	3.58	0.83
11	2020029	00:33:47	1.70	5	3.84	0.84
12	2020220	12:27:44	0.84	5	3.47	0.84
13	2020319	14:45:38	2.12	7	3.87	0.83
14	2020321	18:10:30	0.99	6	3.73	0.63
15	2021109	06:48:51	0.91	9	4.10	0.73
16	2021164	14:57:32	0.64	5	3.68	0.62
17	2022242	01:35:25	0.99	12	3.92	0.45



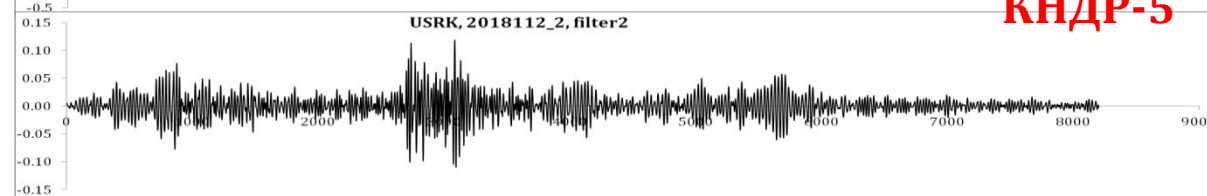
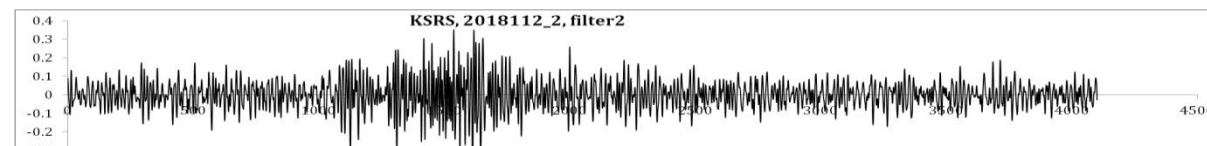
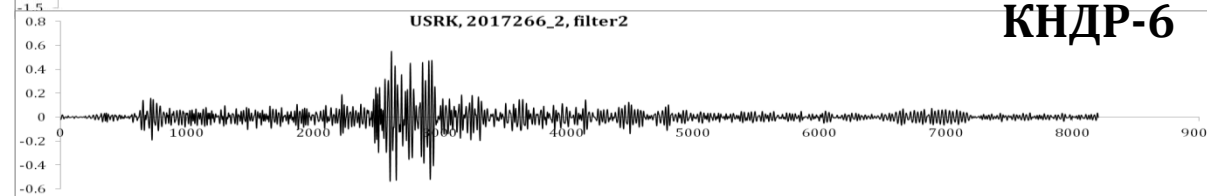
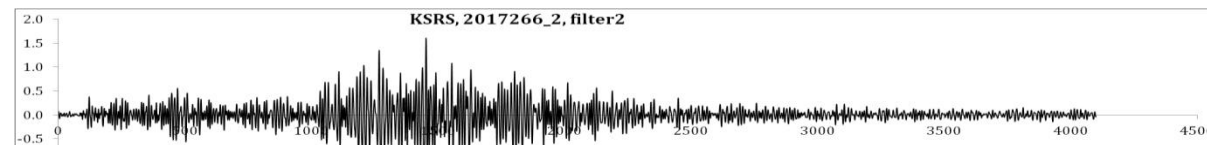
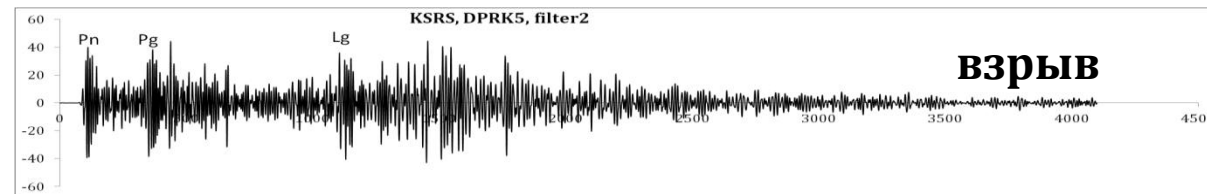
Афтершоки как мастер события

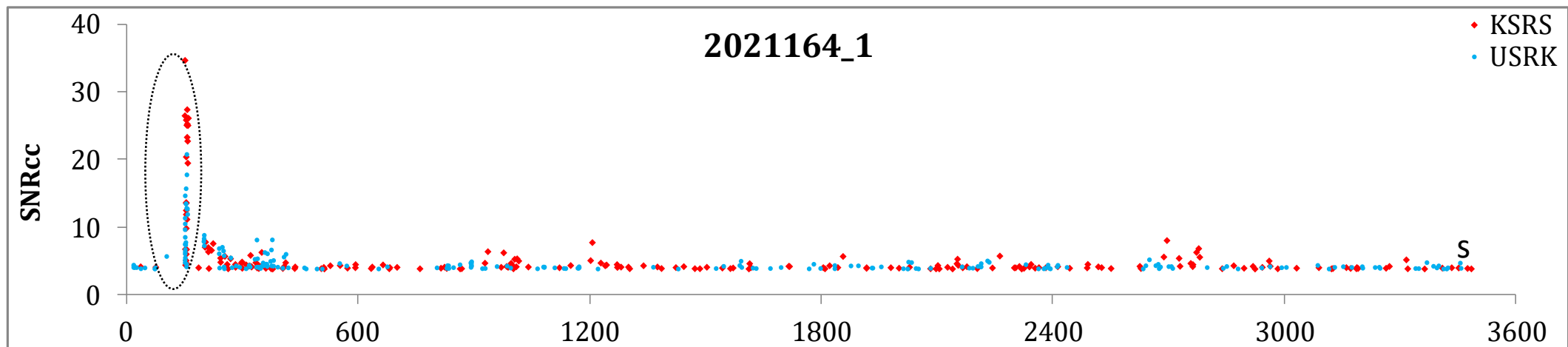
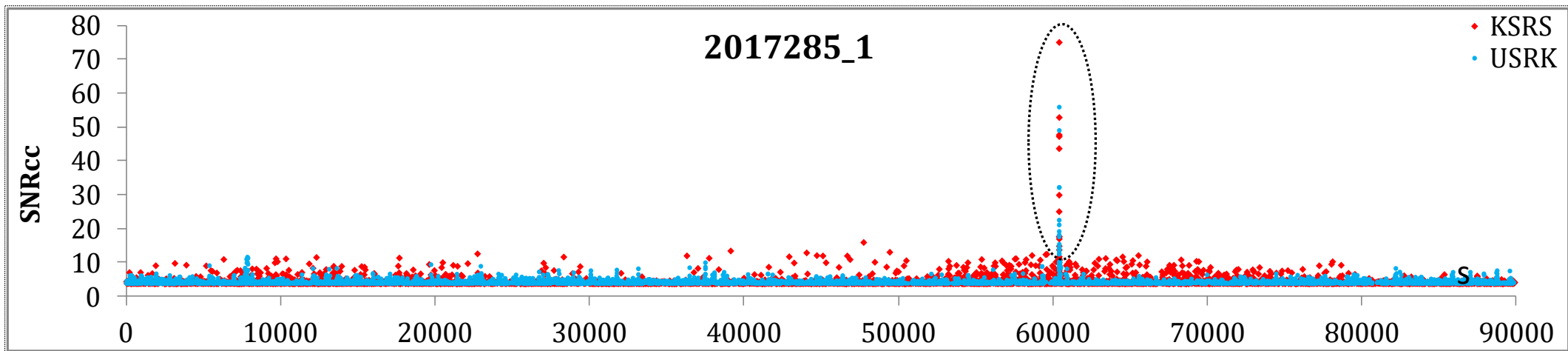


Афтершоки КНДР-6 черные; КНДР-5 красные

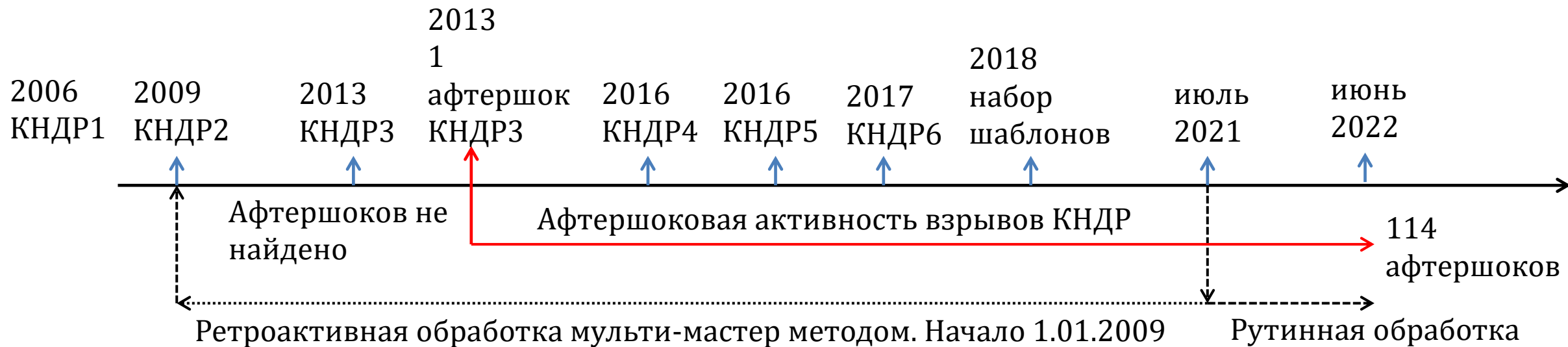
Jdate	Time	#	NassR	NassF	KSRS	USRK	RM
2017246	03:38:30	1	36	37	17	20	3.81
2017266	4:42:58	1	42	42	21	21	3.01
2017266	8:29:14	2	48	49	25	24	3.61
2017285	16:41:07	1	43	43	18	22	3.25
2017304	10:20:12	1	18	20	5	15	2.46
2017335	22:45:54	1	32	35	18	17	2.90
2017339	14:40:50	1	42	40	19	21	3.14
2017340	16:20:04	1	23	31	14	17	2.61
2017343	06:08:39	1	22	30	11	19	2.78
2017343	6:13:32	2	41	35	17	18	3.42
2017343	06:39:59	3	39	37	18	19	3.11
2016255	1:50:48	1	36	37	19	18	2.87
2017246	09:31:28	2	31	41	19	22	2.67
2018036	10:32:30	1	36	36	12	24	2.66
2018036	20:07:29	2	28	37	14	23	2.76
2018036	21:57:35	3	23	27	8	19	2.75
2018037	04:49:36	1	22	24	5	19	2.64
2018037	10:12:30	2	17	25	5	20	2.59
2018037	10:53:52	3	49	47	23	24	3.02
2018038	21:46:23	1	47	33	17	16	3.38
2018039	17:39:17	1	41	42	19	23	2.74
2018112	19:25:09	1	36	47	22	25	2.71
2018112	19:31:18	2	50	45	25	20	2.99

ШАБЛОНЫ ВОЛНОВЫХ ФОРМ





Распределение SNR_{cc} на станциях KSRS и USRK в зависимости от времени возникновения для дней 2017285 и 2021164. Афтершоки видны как синхронное увеличение значений SNR_{cc}



1. Набор из 57 шаблонов сигналов для мульти-мастер метода был создан в мае 2018 года.
2. Полная ретроактивная обработка данных с высоким разрешением и чувствительностью началась в июле 2021 года в связи с усилением афтершоковой активности в КНДР.
3. Первый афтершок КНДР был зафиксирован 29 мая 2013 г.
4. С 29 мая 2013 г. по 12 июня 2022 г. было обнаружено 114 афтершоков.
5. Самый сильный афтершок был зафиксирован 3 сентября 2017 г., через 8,5 мин после КНДР6. Вероятно, это было обрушение полости КНДР6.
6. Второй по величине афтершок был обнаружен 11 февраля 2022 г. и интерпретируется как окончательное обрушение дымовой трубы КНДР6.
7. С 1 января 2009 г. по 29 мая 2013 г. сейсмических событий, подобных КНДР, после толчков не обнаружено.
8. Продолжается рутинная обработка с высоким разрешением



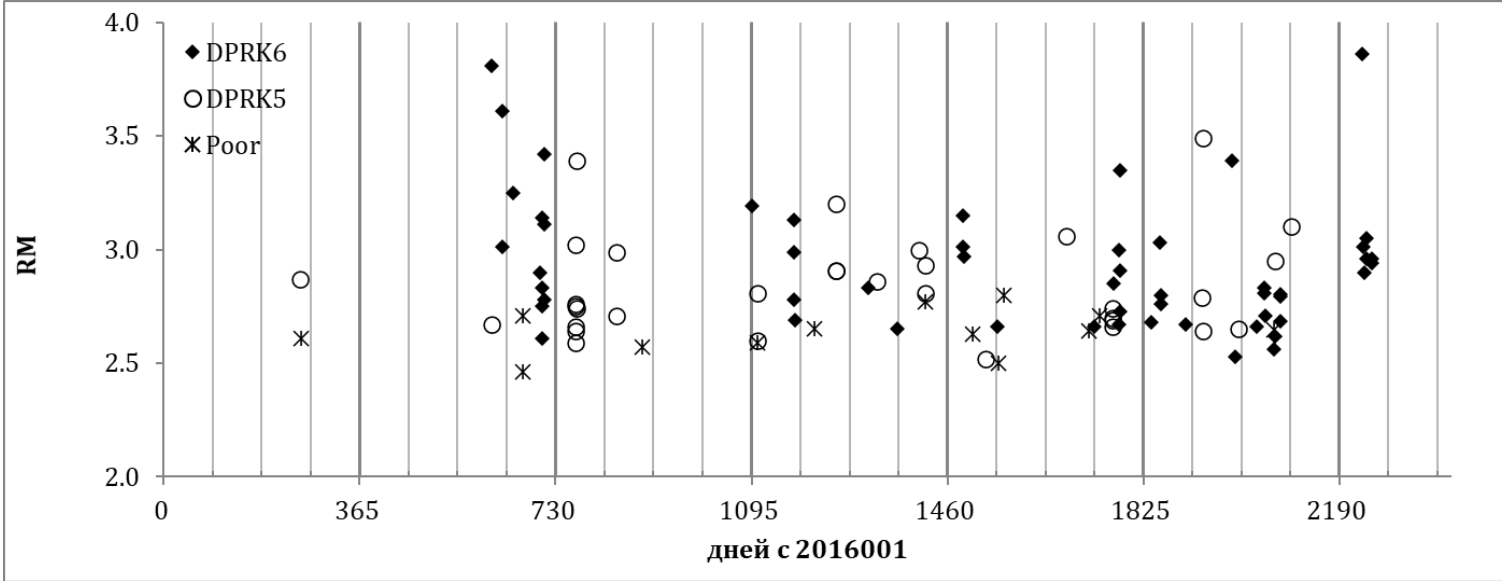
Список афтершоков (на апрель 2022)



	Date	#	Time	KSRS	USRK	RM	Nass		Date	#	Time	KSRS	USRK	RM	Nass		Date	#	Time	KSRS	USRK	RM	Nass		Date	#	Time	KSRS	USRK	RM	Nass		
1	2013149	1	13:53:08	16	24	2.65	40	31	2018037	3	10:53:52	23	24	3.02	47	61	2020092	1	15:14:59	12	14	2.66	26	91	2021242	1	20:33:25	11	22	2.56	33		
2	2013200	1	13:23:50	10	18	2.63	28	32	2018038	1	21:46:23	17	16	3.38	33	62	2020220	1	12:27:41	23	25	3.06	48	92	2021242	2	20:51:11	5	17	2.65	22		
3	2013203	1	15:50:16	6	16	2.40	22	33	2018039	1	17:39:17	19	23	2.74	42	63	2020263	1	11:22:26	12	8	2.64	20	93	2021244	1	09:39:49	23	27	2.95	50		
4	2014145	1	04:56:56	8	18	2.69	26	34	2018112	1	19:25:09	22	25	2.71	47	64	2020273	1	20:23:29	14	16	2.66	30	94	2021244	2	17:05:32	13	18	2.62	30		
5	2014145	2	06:1:27	18	25	2.82	43	35	2018112	2	19:31:18	25	20	2.99	45	65	2020282	1	21:49:37	7	21	2.71	28	95	2021253	1	18:16:41	14	19	2.69	33		
6	2014145	3	06:43:03	23	25	2.91	48	36	2018161	1	15:53:04	11	12	2.57	25	66	2020308	1	10:12:17	11	16	2.70	27	96	2021253	2	18:47:25	16	17	2.80	33		
7	2016050	1	00:28:07	6	24	2.80	30	37	2019001	1	22:20:27	16	19	3.19	35	67	2020308	2	10:13:52	8	20	2.66	28	97	2021254	1	04:17:02	18	9	2.79	27		
8	2016184	1	19:52:27	19	19	2.61	38	38	2019011	2	21:34:28	8	22	2.60	30	68	2020308	3	10:30:32	20	21	2.74	41	98	2021284	1	12:58:59	12	10	3.00	22		
9	2016255	1	01:50:48	19	18	2.87	37	39	2019011	3	23:15:46	19	25	2.81	44	69	2020308	4	11:28:06	9	18	2.69	27	99	2021284	2	13:00:49	20	13	3.10	33		
10	2016257	1	03:57:42	7	18	2.61	25	40	2019011	4	23:19:21	5	15	2.59	20	70	2020309	1	10:18:42	22	17	2.85	39	100	2021364	1	01:45:36	9	18	2.85	27		
11	2017246	1	03:38:30	17	20	3.81	37	41	2019078	1	08:32:36	11	16	2.78	27	71	2020319	1	14:45:35	18	20	3.00	38	101	2021364	2	05:21:30	11	19	2.87	30		
12	2017246	2	09:31:28	19	22	2.67	41	42	2019079	1	19:41:03	17	17	3.13	34	72	2020319	2	15:40:26	16	7	2.67	23	102	2021364	3	08:54:51	15	15	2.86	30		
13	2017266	1	04:42:58	21	21	3.01	42	43	2019080	1	01:55:35	17	18	2.99	35	73	2020321	1	9:11:28	13	10	2.91	23	103	2022042	1	01:35:23	21	18	3.86	39		
14	2017266	2	08:29:14	25	24	3.61	49	44	2019080	2	10:45:39	10	13	2.69	23	74	2020321	2	13:38:34	10	11	2.73	21	104	2022045	1	05:33:21	15	15	3.01	30		
15	2017285	1	16:41:07	18	22	3.25	43	45	2019117	1	22:37:16	10	10	2.65	20	75	2020321	3	18:10:28	14	10	3.35	24	105	2022045	2	10:47:24	14	17	2.91	31		
16	2017303	1	23:37:48	10	17	2.71	27	46	2019158	1	03:49:30	16	22	2.91	38	76	2021013	1	19:29:30	9	16	2.68	25	106	2022045	3	21:52:24	15	11	2.81	26		
17	2017304	1	10:20:12	5	15	2.46	20	47	2019158	2	05:18:39	25	22	3.20	47	77	2021030	1	15:07:45	17	8	3.03	25	107	2022049	1	02:44:57	17	19	3.05	36		
18	2017335	1	22:45:54	18	17	2.90	35	48	2019158	3	07:45:43	17	22	2.91	39	78	2021031	1	5:10:31	11	10	2.80	21	108	2022049	2	03:38:18	16	15	2.96	31		
19	2017339	1	14:40:50	19	21	3.14	40	49	2019218	4	04:05:31	12	14	2.83	26	79	2021031	2	06:18:12	11	9	2.76	20	109	2022053	1	21:07:04	7	18	2.76	25		
20	2017339	2	19:55:53	16	24	2.75	40	50	2019233	1	03:36:52	16	17	2.86	34	80	2021078	1	12:48:50	9	12	2.67	21	110	2022059	1	12:22:48	15	16	2.69	31		
21	2017339	3	23:30:10	10	15	2.83	25	51	2019270	1	19:01:31	22	22	2.65	44	81	2021108	1	23:20:03	12	21	2.79	33	111	2022059	2	12:32:00	16	9	2.94	25		
22	2017340	1	16:20:04	14	17	2.61	31	52	2019310	1	23:51:34	19	21	3.00	40	82	2021109	1	06:48:48	24	22	3.49	46	112	2022062	1	17:15:33	16	9	2.98	25		
23	2017343	1	06:08:39	11	19	2.78	30	53	2019323	1	21:59:46	17	25	2.81	42	83	2021110	1	17:12:31	21	16	2.64	37										
24	2017343	2	6:13:32	17	18	3.42	35	54	2019323	2	22:02:29	23	23	2.93	46	84	2021164	1	14:57:30	20	22	3.39	42										
25	2017343	3	06:39:59	18	19	3.11	37	55	2019323	3	22:49:36	8	20	2.77	28	85	2021169	1	19:45:57	9	13	2.53	22										
26	2018036	1	10:32:30	12	24	2.66	36	56	2020029	1	00:33:46	24	22	3.15	46	86	2021175	1	17:09:32	22	13	2.65	43										
27	2018036	2	20:07:29	14	23	2.76	37	57	2020029	2	02:48:28	11	19	3.01	30	87	2021209	1	13:20:45	13	18	2.66	31										
28	2018036	3	21:57:35	8	19	2.75	27	58	2020030	1	00:50:00	13	22	2.97	35	88	2021224	1	07:42:59	8	12	2.83	20										
29	2018037	1	04:49:36	5	19	2.64	24	59	2020046	1	17:05:05	12	13	2.63	25	89	2021225	1	04:35:30	9	17	2.81	26										
30	2018037	2	10:12:30	5	20	2.59	25	60	2020071	1	17:09:01	12	8	2.52	20	90	2021227	1	03:46:45	10	18	2.71	26										

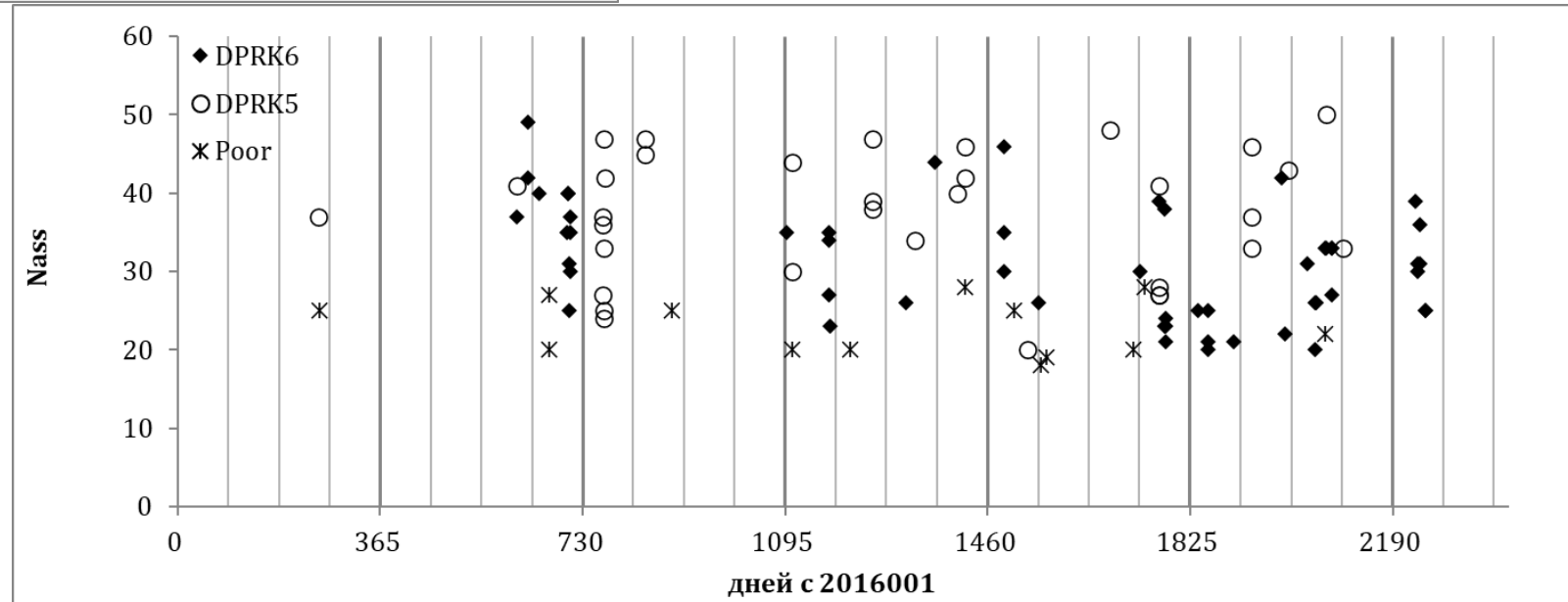
Первый афтершок, найденный кросс корреляцией:
КНДР-5, 2016255, 01:40:48
Первый афтершок: КНДР-3, 2013149, 13:53:08

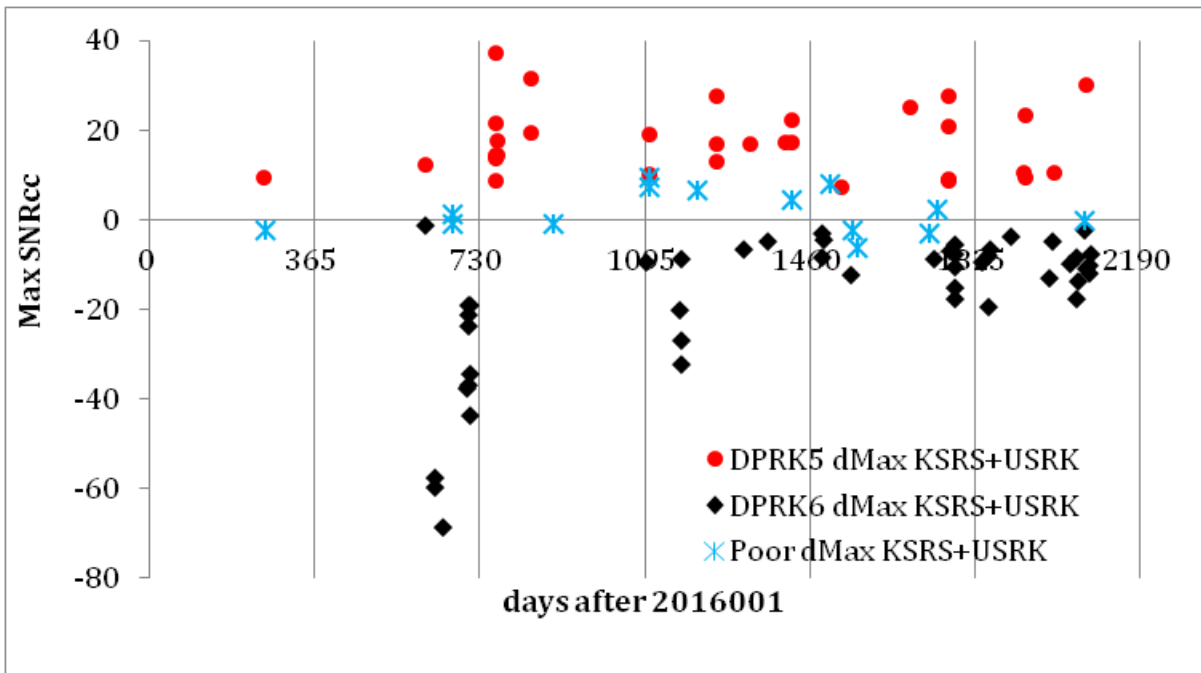
Первый афтершок: КНДР-4: 2016050, 00:28:07
Первый афтершок: КНДР-6: 2017246, 03:38:30
Остановка столба обрушения КНДР-6?: 2022042, 01:35:23



Эволюция афтершоковых последовательностей КНДР-5 и КНДР56: Левая панель: относительная магнитуда афтершоков между 01.01.2016 и 30.05.2022. Нижняя панель: количество связанных шаблонов как показатель надежности гипотезы события за тот же период.

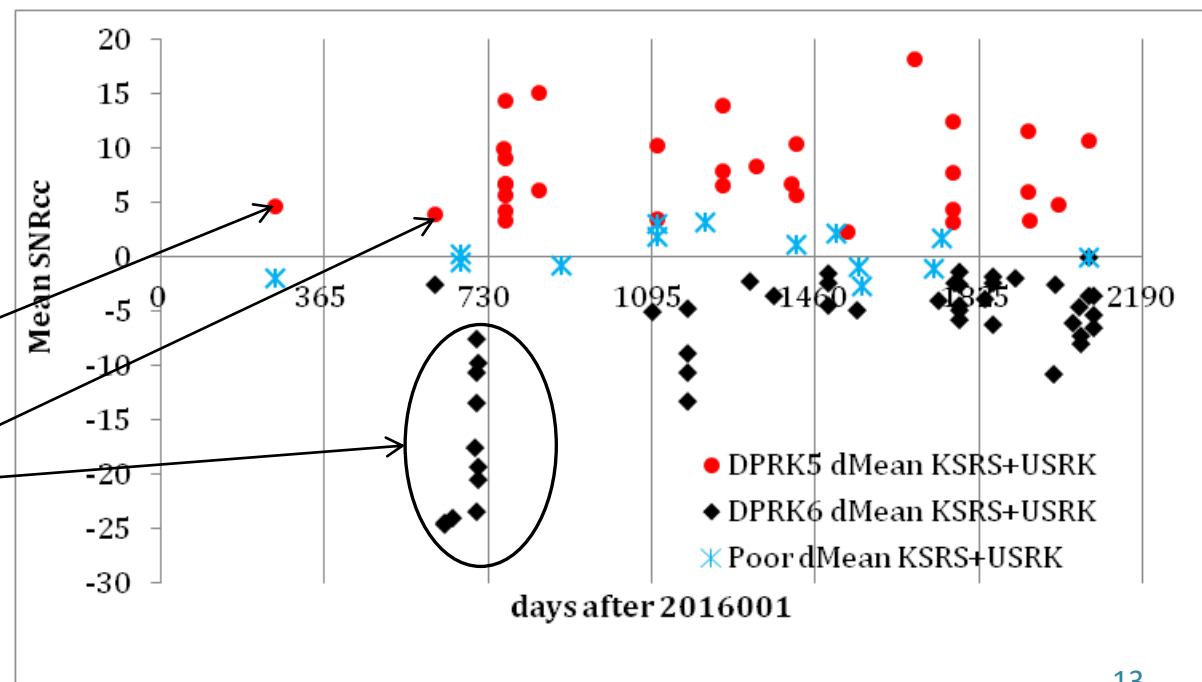
Афтершоки КНДР-5 и КНДР-6, как правило, происходят короткими всплесками и в чередующемся порядке. Этот эффект может отражать взаимодействие столбов обрушения. Относительная магнитуда и надежность гипотез афтершоков КНДР-5 не затухают со временем. Афтершоки КНДР-6 демонстрируют небольшое затухание надежности и магнитуды.





Для каждого события представлены две меры:

1. Разница суммы максимальных значений SNR_{cc} на KRSR и USRK, полученные с использованием шаблонов КНДР-5 и КНДР-6 (слева)
2. Разность суммы усредненных значений SNR_{cc} на KRSR и USRK, полученные с использованием шаблонов КНДР-5 и КНДР-6 (внизу)

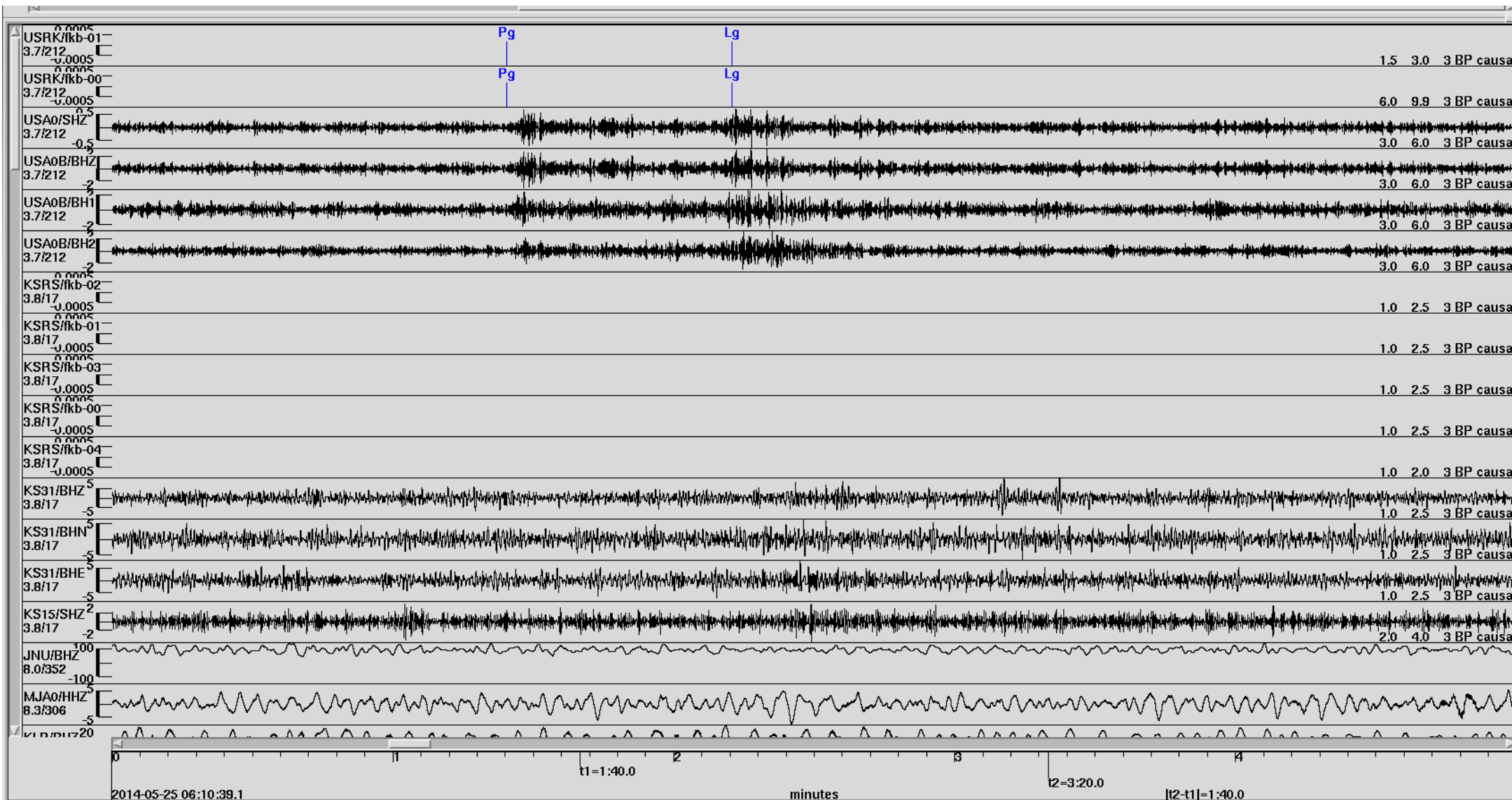


Афтершоки КНДР-5 (выделены красным) находятся над осью X, которая служит линией принятия решений. Афтершоки КНДР-6 (черные) находятся ниже этой линии. Есть слабые события (синие), которые нельзя отнести ни к одной из двух популяций из-за низких значений SNR_{cc} . Первый афтершок **КНДР-5** и события, следующие за **КНДР-6**, служат основными элементами своих кластеров. Второй афтершок 3 сентября 2017 г., видимо, относится к кластеру **DPRK5!**



25 мая 2014(1) (интерактивное решение)

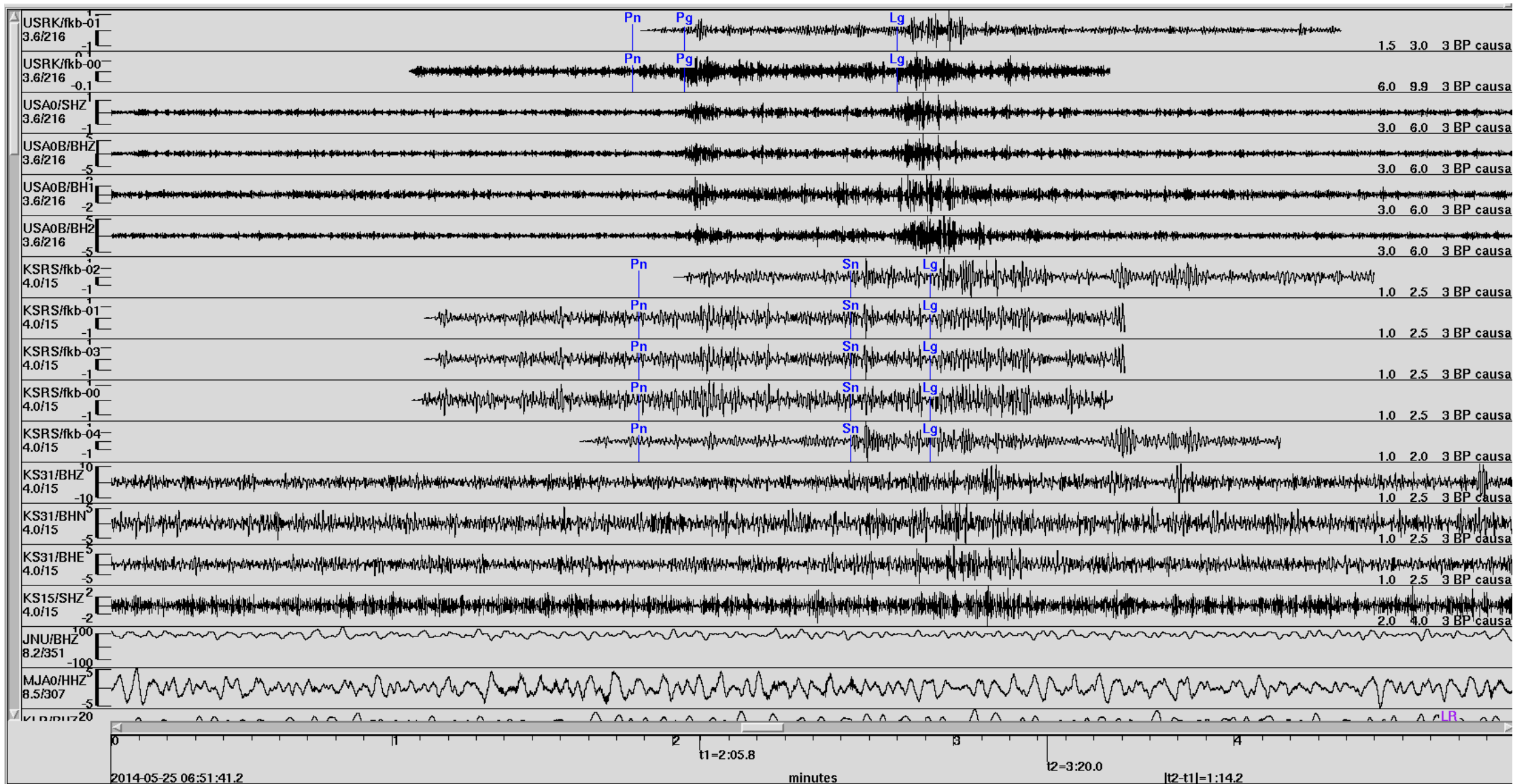
Предвестник
коллапса
полости
КНДР-3?





25 мая 2014(2) (интерактивное решение)

Коллапс
полости
КНДР-3?

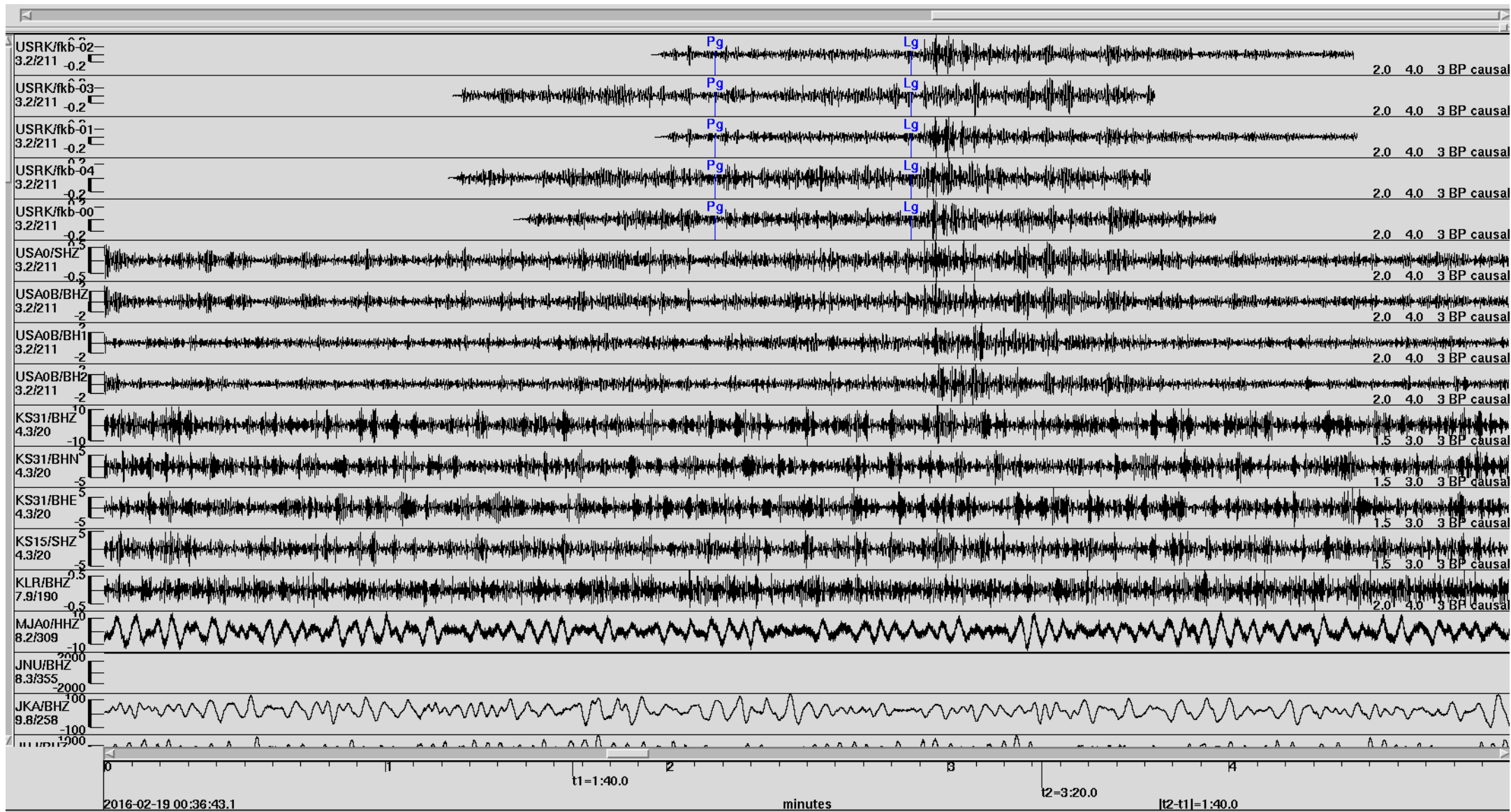




19 февраля 2016 г. (интерактивное решение)



Семь
недель
после
КНДР-4





1. Полная ретроактивная обработка данных с высоким разрешением и чувствительностью началась в июле 2021 года в связи с усилением афтершоковой активности в КНДР. Итеративно были оценены оптимальные параметры обработки и параметры оценки надежности гипотез событий.
2. Подтвержден первый найденный кросс-корреляцией афтершок КНДР-5 11 сентября 2016.
3. В результате обработки первый во времени афтершок КНДР был найден 29 мая 2013 г. Он связан с третьим взрывом и ранее не был опубликован. Самый большой афтершок КНДР-3 был найден 25 мая 2014 и имел магнитуду 2.9
4. С 29 мая 2013 г. по 20 июня 2022 г. было найдено 114 надежных гипотез событий афтершоков.
5. Самый сильный афтершок был зафиксирован 3 сентября 2017 г., через 8,5 мин после КНДР6. Вероятно, это было обрушение полости КНДР6.
6. Второй по величине афтершок был обнаружен 11 февраля 2022 года и, вероятно, стал последним обрушением дымовой трубы в КНДР6.
7. С 1 января 2009 г. по 29 мая 2013 г. сейсмических событий, подобных афтершокам в КНДР, не зарегистрировано.
8. Продолжается рутинная обработка с высоким разрешением, а также интерактивная проверка автоматических результатов. Последнее событие 12 июня 2022.