

УДК 550.344

ВЛИЯНИЕ ТИПА АППАРАТУРЫ НА СЕЙСМИЧЕСКИЕ ШУМЫ (НА ПРИМЕРЕ СЕЙСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ «ПОДГОРНОЕ»)

Соколов А.Н., Мусрепов А.В.

Институт геофизических исследований, Курчатов, Казахстан

Статья посвящена детальному анализу характеристик сейсмического шума станции «Подгорное», с целью анализа влияния параметров сейсмической аппаратуры на эффективность работы станций.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в мире производится большое количество разнообразной сейсмической аппаратуры. Зачастую непросто подобрать подходящий комплект сейсмометра и дигитайзера, который бы обеспечивал эффективный мониторинг сейсмических событий, был недорог и качествен. На цифровой сейсмической станции «Подгорное», расположенной в районе Северного Тянь-Шаня, за 11 лет работы (1997–2018 гг.) было установлено 6 различных комплектов, причем условия установки были одинаковы. Кроме того, за это время практически не изменилось расположение потенциальных источников сейсмического шума. В связи с этим, анализируя динамические параметры сейсмического шума, зарегистрированного различной аппаратурой, можно оценить влияние аппаратурного шума для каждого периода установки. Такая задача имеет практическую ценность при подборе оборудования для будущих станций региона в зависимости от задач мониторинга станций сейсмической сети.

ГЕОЛОГО-ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ПОЛОЖЕНИЕ СТАНЦИИ «ПОДГОРНОЕ»

Вблизи современной станции «Подгорное» в советское время, начиная с 21 августа 1987 г. работала трехкомпонентная аналоговая сейсмическая станция, входящая в состав сети Сейсмологической опытно-методической экспедиции.

Цифровая сейсмическая станция «Подгорное» PDG (PDGK) введена в эксплуатацию в октябре 1997 года в рамках проекта «Геодинамика внутриконтинентального горообразования в Тянь-Шане, Центральная Азия», финансируемого Национальным научным фондом США [1]. Сейсмическая сеть состояла из 29 станций, расположенных на территории Кыргызстана, Казахстана и Китая и называлась CHENGIZ. Станция входила в состав сети КСЭ ИФЗ РАН и была закрыта в марте 2000 года в связи с окончанием проекта.

В марте 2001 г. станция была восстановлена и вошла в состав сети ИГИ НЯЦ РК, до 2010 года она работала в автономном режиме, обслуживалась 1 раз в месяц. В феврале 2010 г. при технической поддержке Германского центра изучения Земли GFZ (Постдам), а также согласно Плану сотрудничества по международному проекту CAREMON (Central Asian Real-Time Earthquake Monitoring Network) в существую-

щем помещении станции установлено новое оборудование [2]. Станция в данной конфигурации продолжала работу до ноября 2018 г. Кроме казахстанских станций, проект CAREMON (2010–2014 гг.) включал станции на территории Кыргызстана, Туркмении, Таджикистана и Узбекистана. Все станции проекта были оснащены широкополосным трехкомпонентным сейсмометром, акселерометром сильных движений и осуществляли передачу данных в режиме реального времени. После окончания проекта CAREMON станция продолжила свою работу.

Сейсмическая станция «Подгорное» PDGK расположена в Уйгурском районе Алматинской области, в поселке Кыргызсай (Подгорное), на его юго-восточной окраине, в правом борту речки Кыргызсай вблизи впадения в нее речки Подгорная. Сейсмическая станция находится на высоте 1290 м над уровнем моря, у северного подножья западного окончания хребта Кетмень. Координаты станции: 43,3276° северной широты и 79,4849° восточной долготы. На расстоянии 300 м от станции проходит проселочная дорога, движение по дороге редкое. Другая сельская дорога проходит на расстоянии порядка 1000 м от сейсмостанции. В 10–12 км от станции проходит крупное шоссе. В поселке Кыргызсай промышленность слабо развита, до 2010 года эпизодически работала электрическая мельница, небольшой кирпичный завод на расстоянии 2 километра, а также в непосредственной близости от станции (500 м) работала лесопилка, преимущественно в летнее время. Кроме техногенных факторов на сейсмический шум могут оказывать влияние природные факторы – это естественная сейсмичность вблизи станции «Подгорное», небольшая речка вблизи станции – порядка 100 м., крупная полноводная река Чарын – 10 км, и озеро Иссык-Куль ~ 110 км.

Приборное сооружение, в котором установлены сейсмические датчики и регистрирующая аппаратура, размещено на коренных выходах пород в краевой части малой субвулканической интрузии трахилипаритового–трахидацитового состава (рисунок 1).

Станция PDGK расположена в Северном Тянь-Шане, который характеризуется высокой сейсмической активностью. Сам хребет Кетмень имеет среднее значение уровня активности по сравнению с другими хребтами Тянь-Шаня: $A_{10}=0,06$, $\gamma=0,48$ [3]. Самое сильное землетрясение в радиусе 100 км за период

работы станции произошло 01 декабря 2003 года, $M_s=6,0$ на эпицентральной расстоянии 96 км.

Исходные волновые формы сейсмической станции PDGK хранятся в IRIS/DMC [4] в формате SEED с 1998 г., данные обработки сейсмических фаз высылаются в Международный сейсмологический Центр ISC [4] на регулярной основе с 2010 г.

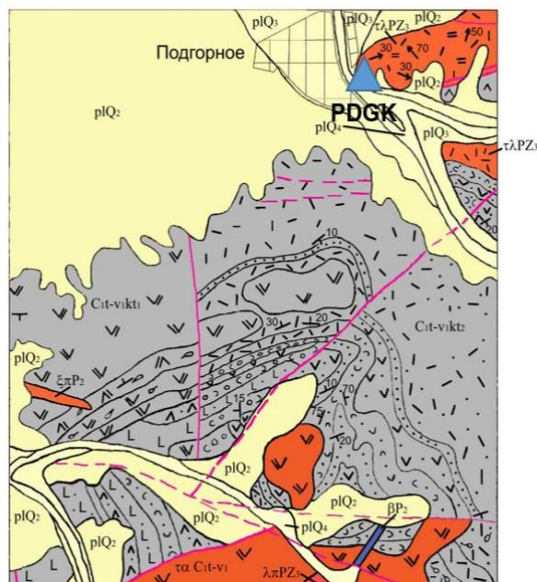


Рисунок 1. Геологическая карта участка расположения станции «Подгорное». Масштаб 1:50000

ХАРАКТЕРИСТИКА СЕЙСМИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

В таблице 1 представлены параметры аппаратуры, работавшей на станции, на рисунке 2 представлены амплитудно-частотные характеристики приборов. До февраля 2010 г. в качестве регистратора использовался REFTEK72A [6]. Самый ранний период работы с октября 1997 по сентябрь 1998 г. в качестве сейсмометра использовался CMG40T (GURALP) (таблица 1, рисунок 2) [7, 8]. Следующий период с сентября 1998 по март 2000 года сейсмометр CMG40T был заменен на CMG3ESP (таблица 1, рисунок 2) [7, 8]. После окончания проекта CHENGIZ аппаратура была демонтирована, и станция восстановила свою регист-

рацию только лишь с марта 2001 года. Усилиями сотрудников ИГИ были приспособлены для временной регистрации 2 сейсмометра: полевой узкополосный сейсмометр L4C [7] и советский сейсмометр C5C [9], в качестве регистратора использовался дигитайзер REFTEK72A (таблица 1, рисунок 2). За период май 2003 – ноябрь 2009 года в качестве сейсмометра использовался CMG3ESP, после выхода из строя в ноябре 2009 г. он опять был заменен на L4C и проработал в такой конфигурации до января 2010 г.

В феврале 2010 г. в соответствии со стандартами проекта CAREMON [2] на глубине 3 м установлен широкополосный трехкомпонентный сейсмометр CMG-3ESPC и акселерометр CMG-5T (Guralp, Англия) [8], которые совместно с аппаратурой оцифровки, обработки и накопления Guralp CMG-DM246S и Guralp CMG-EAMPC позволяют получать и передавать качественную информацию (рисунок 3). По спутниковому каналу данные, регистрируемые станцией, начали поступать в Центр сбора и обработки специальной сейсмической информации (г. Алматы) и участвовать в создании регионального бюллетеня.

15 ноября 2018 г. на станции произведена замена геофизического оборудования фирмы Guralp (Великобритания) на приборы фирмы Nanometrics (Канада) – рисунок 4, таблица 1 [10]. Были установлены: 6-канальный регистратор Centaur, широкополосный (до 120 сек) сейсмометр Trillium Compact и акселерометр (до 4g) Titan. Спутниковое оборудование, система питания остались прежними.

Проведено сравнение технических параметров прежней и новой аппаратуры: диапазон частот, чувствительность сейсмических датчиков фирм Guralp и Nanometrics совпадают и, таким образом, соответствуют требованиям техспецификации по данному проекту. У сейсмометра Trillium Compact диапазон частот (от 1/120 до 108 Гц) значительно превышает этот параметр сейсмометра CMG-3ESPC (таблица 1). Кроме того, в конструкции сейсмометра Trillium Compact применена ортогональная ориентация маятников, что означает, что все 3 компонента находятся в равных физических условиях, и это приводит к более надежной работе измерительной системы.

Таблица 1. Характеристика сейсмической аппаратуры

Сроки работы	Тип сейсмометра	Дигитайзер	Частота оцифровки	Частотный диапазон
октябрь 1997 – сентябрь 1998	CMG40T	REFTEK 72 A	40 Гц	0,03–50,0 Гц
сентябрь 1998 – март 2000	CMG3ESP	REFTEK 72 A	40 Гц	0,1–50,0 Гц
март 2001 – май 2003	L4C	REFTEK 72 A	40 Гц	пассивный сенсор, центральная частота 1 Гц
	C5C	REFTEK 72 A	40 Гц	0,2–20 Гц
май 2003 – ноябрь 2009	CMG3ESP	REFTEK 72 A	40 Гц	0,1–50,0 Гц
ноябрь 2009 – январь 2010	L4C	REFTEK 72 A	40 Гц	пассивный сенсор, центральная частота 1 Гц
февраль 2010 – май 2014	CMG3ESP	DM24	100 Гц	0,1–50,0 Гц
май 2014 – ноябрь 2018	CMG3ESP	DM24	40 Гц	0,1–50,0 Гц
ноябрь 2018 – по настоящее время	Trillium 120	Centaur CTR3-6S	40 Гц	0,008–108 Гц

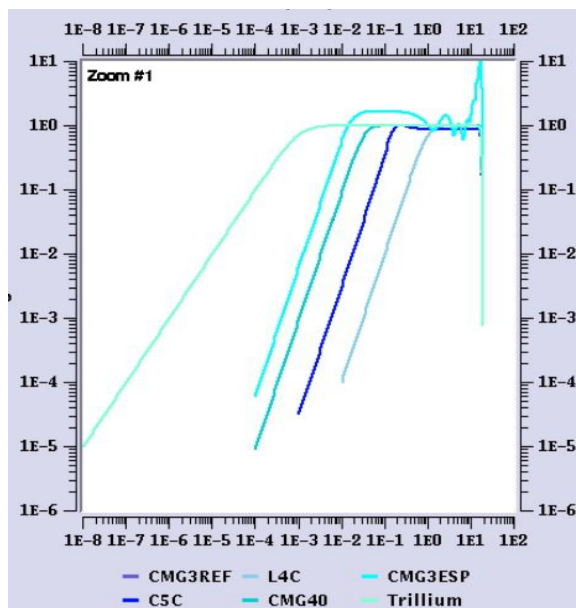


Рисунок 2. Амплитудно-частотная характеристика различных сейсмометров, установленных на станции PDGK



а) сейсмометры (акселерометр CMG-5T – слева, CMG-3ESPC – справа)



б) сейсмометры: акселерометр CMG-5T, CMG-3ESPC; регистрирующая аппаратура и система питания (по состоянию до ноября 2018 г.)

Рисунок 3. Трехкомпонентная сейсмическая станция «Подгорное» (PDGK)



а) сейсмометр Trillium Compact и акселерометр Titan, 4g

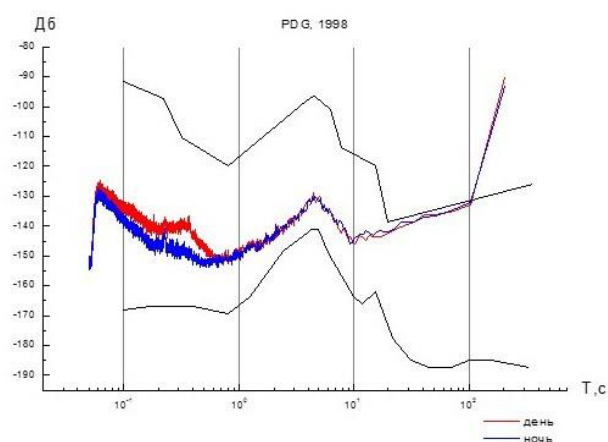


б) регистратор Centaur CTR3-6S

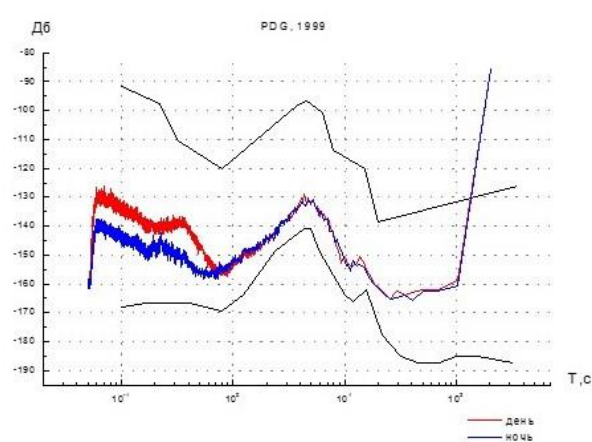
Рисунок 4. Сейсмическая станция «Подгорное». Установка нового оборудования

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

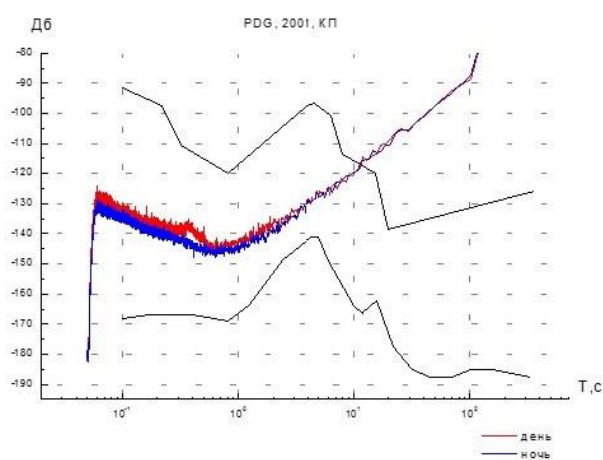
Структура микросейсмических помех изучалась путем построения спектров плотности сейсмического шума для всех трех компонент. Методика такого анализа подробно описана в работах [11–14]. Выбирались 10-минутные отрезки без сейсмических событий и коды сильных землетрясений. Для анализа использовались каталоги по глобальным мировым сетям NEIC (USGS) и REB (СТВТО), а также региональный интерактивный сейсмический бюллетень Центра сбора и обработки специальной сейсмической информации (ЦСОССИ). Выбирались фрагменты записей за ночное (17–18 ч. GMT) и дневное время (7–8 ч. GMT). Для анализа создавались выборки, состоящие из 15 фрагментов сейсмических записей, по которым строились медианные спектры. Расчеты проводились для каждого канала С–Ю, В–З и Z. Для исследования влияния аппаратуры использовались записи с одинаковыми комплектами, всего проведен анализ для 6 периодов времени: до сентября 1998 г., 1999 г., 2001 год расчеты проводились для 2-х типов сейсмометров, 2016 г. и с ноября 2018 г. Все периоды выбраны таким образом, чтобы частота оцифровки совпадала. На рисунке 5 представлены кривые спектральной плотности сейсмического шума для дня и ночи с разными комплектами оборудования.



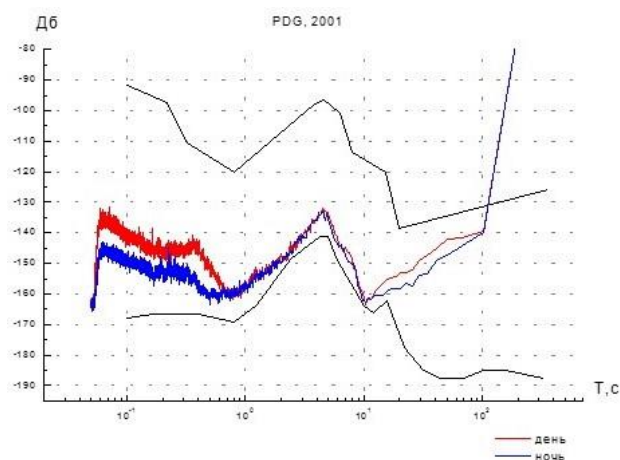
а) CMG40T+REFTEK



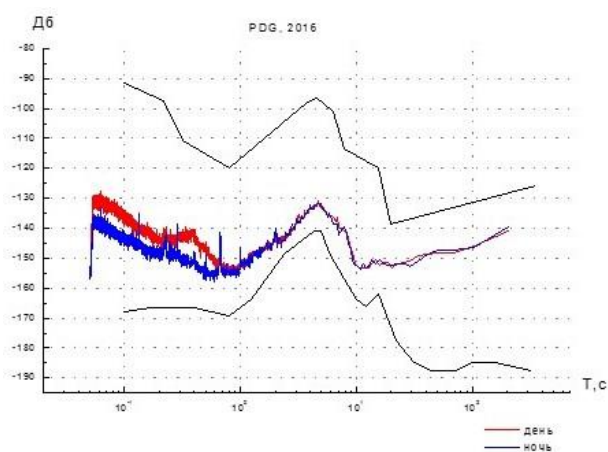
б) CMG3ESP+REFTEK



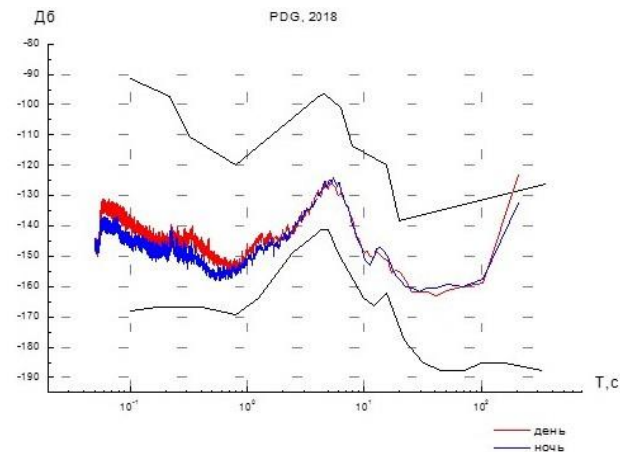
в) L4C+REFTEK



г) C5C+REFTEK



д) CMG3ESP+DM24



е) Trillium+Centaur

Рисунок 5. Спектральные кривые сейсмического шума для дня и ночи Z-компонента

Для всех комплектов кроме L4C+REFTEK уровень шума тяготеет к нижеуровневой модели сейсмического шума Петерсона [15], однако обращает на себя внимание различие в спектрах для дневного и ночного времени в высокочастотной области. Так в диапазоне периодов от 0,05 до 0,4 секунды разница составляет 7 дБ. Это связано с тем, что станция рас-

положена на окраине поселка, недалеко от станции работает лесопилка, которая создает помехи в широкой полосе частот. Однако в рабочем диапазоне от 0,7 до 2 секунд разницы между дневными и ночными уровнями шумов нет, что объясняет высокую чувствительность станции при регистрации сейсмических событий как на региональных, так и на телесеи-

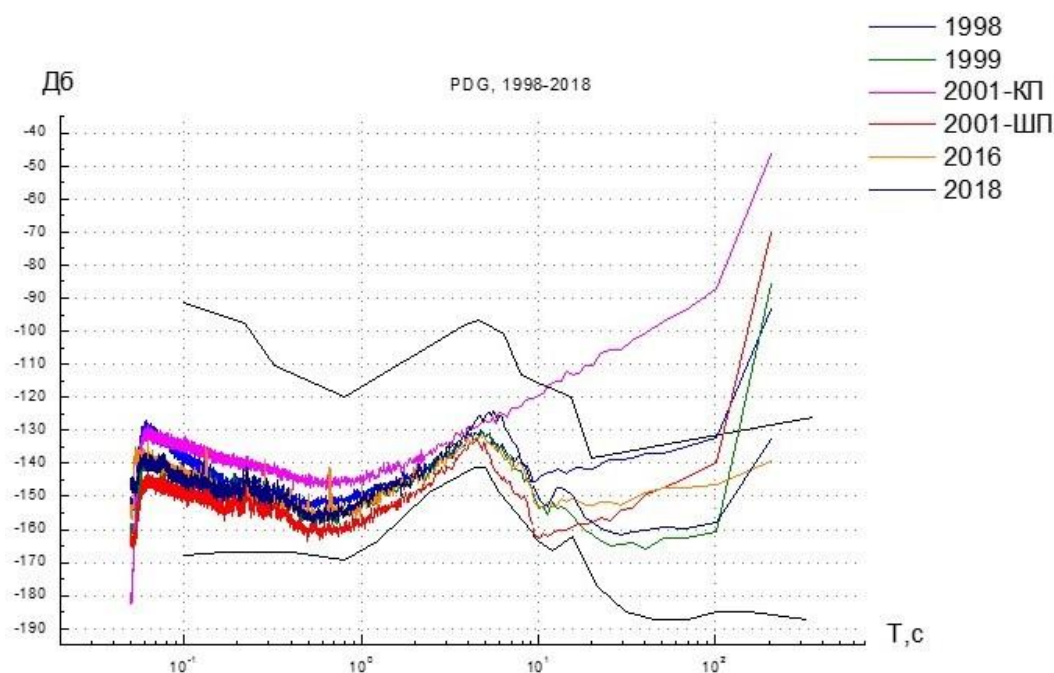


Рисунок 6. Спектральные кривые плотности сейсмического шума. Z-компонента, ночное время

ческих расстояниях. Для комплекта Trillium+Centaur разницы между дневным и ночным уровнем шума нет, так как в 2018 г. в поселке практически не было техногенной деятельности, производство не работало. Не наблюдается разницы между дневным и ночным уровнем шума для комплекта L4C+REFTEK, так как собственный уровень шума сейсмометра превышает уровень техногенных шумов. Для комплекта CMG3ESP+DM24 характерны спайки для ночного периода времени, спаяк не было при использовании дигитайзера REFTEK и Centaur. На рисунке 6 приведены спектральные плотности сейсмического шума для всех 4х комплектов оборудования Z-компонента, ночное время. Самый низкий уровень сейсмического шума наблюдается для установки C5C+REFTEK, очень близок к нему Trillium+Centaur, самый высокий уровень сейсмического шума у комплекта L4C+REFTEK, так как сейсмометр L4C является полемым с высоким уровнем внутреннего шума сейсмометра.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ СТАНЦИИ В ЦСОССИ

Станция «Подгорное» расположена в сейсмически активном районе Северного Тянь-Шаня, использование ее данных улучшает качество локализации сейсмических событий, а также важно для задач сейсмического районирования и оценки сейсмической опасности.

Начиная с 2010 года, после того как данные станции начали поступать в Казахстанский Национальный Центр данных ИГИ в режиме реального времени, они стали активно использоваться в рутинной обработке, составлении сейсмического бюллетеня. За

период с февраля 2010 года до апреля 2019 года станция участвовала в обработке 16150 сейсмических событий на эпицентральных расстояниях 12–3050 км, диапазон магнитуд событий составил $m_{pv}=1,03\div 7,14$, энергетических классов $K=3,11\div 15,72$. Важной характеристикой эффективности сейсмической станции является дальность регистрации. На рисунке 7 приведены зависимости m_{pv} и K от расстояния для станции PDGK. Для анализа выбирались данные из интерактивного бюллетеня ЦСОССИ за 2010–2013 гг. В таблице 2 приведены значения K_{min} , $K_{пред}$, m_{pvmin} и $m_{pvпред}$ для станции PDGK.

Таблица 2. Дальность регистрации по станции PDGK

Расстояние, км	K_{min}	$K_{пред}$	m_{pvmin}	$m_{pvпред}$
100	4,5	5,0	1,6	2,1
200	4,6	5,1	1,7	2,2
500	6,4	6,9	2,1	2,6
1000	8,7	9,2	3,1	4,1

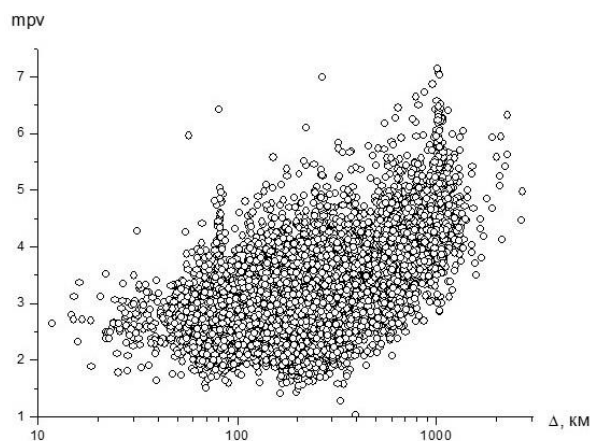
Так как на станции PDGK установлен акселерометр сильных движений, и в районе станции достаточно часто происходят ощутимые землетрясения, по ее данным обрабатываются записи сильных движений. 28 января 2013 г. в 22 часа 38 минут местного времени (16:38 UTC) жители г. Алматы ощутили интенсивные колебания. Землетрясение произошло в 225 км на юго-восток от города на территории Раимбекского района Алматинской области на расстоянии 40 км от поселка Сарыджаз. Координаты землетрясения $\varphi=42,52^\circ$, $\lambda=79,67^\circ$, магнитуда $m_b=6,1$, $M_s=6,2$,

$M_w=6,1$, $mpv=6,5$, $K=14,7$ [16]. Интенсивность сотрясения грунта в населенных пунктах Тасаш, Сарыджаз и Нарынкол вблизи эпицентральной зоны составила 6 баллов по шкале MSK-64. В таблице 3 представлены параметры сильных движений Сарыджазского землетрясения. Максимальная амплитуда ускорения была зафиксирована станцией «Подгорное» на канале В-З $A_{max}=5,8$ cm/s^2 . На рисунке 8 представлены спектры реакции Сарыджазского землетрясения 28.01.2013 г. в 16-38-53.8 по станции PDGK. В поселке Подгорное (81 км) интенсивность сотрясений составила 4–5 баллов, а в г. Алматы (229 км) – 4 балла.

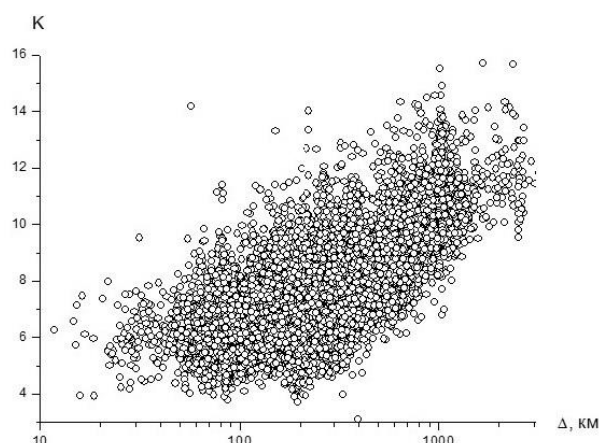
Кроме того, расположение станции PDGK удобно для мониторинга подземных ядерных взрывов на ядерных полигонах Азии (Лобнор, Похаран, Чагай и Пунгери). Сейсмическая станция «Подгорное» активно используется для обнаружения и распознавания подземных ядерных испытаний совместно с другими станциями сети Института геофизических исследований. На рисунке 9 представлена сейсмограмма Северокорейского ядерного испытания, произведенного 3 сентября 2017 года $t_0=03:30:01.8$, $\varphi=41,332^\circ$, $\lambda=129,030^\circ$, $mb=6,3$, $M_s=5,1$, эпицентральное расстояние составило 4047 км.

Таблица 3. Параметры сейсмических воздействий Сарыджазского землетрясения

Станция	Δ , км	I	Амплитуды ускорений, cm/s^2			Амплитуды скоростей, cm/s			T, ускор., с	T, скор., с
			E-W	N-S	Z	E-W	N-S	Z		
PDGK	81	4-5	5,8	4,1	4,0	0,66	0,43	0,31	0,9	0,9



а) mpv



б) K

Рисунок 7. Графики дальности регистрации землетрясений по данным сейсмической станции «Подгорное» PDGK

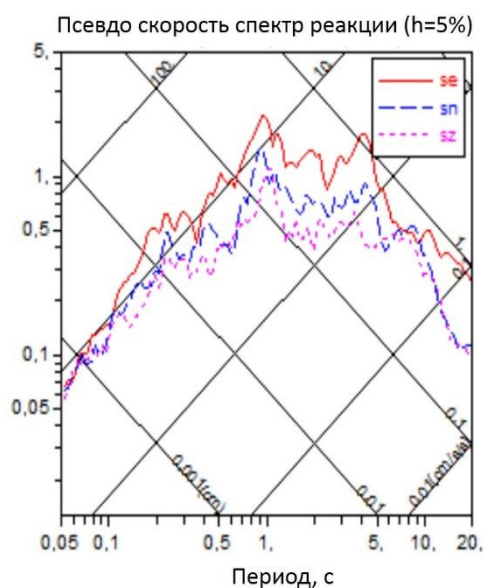
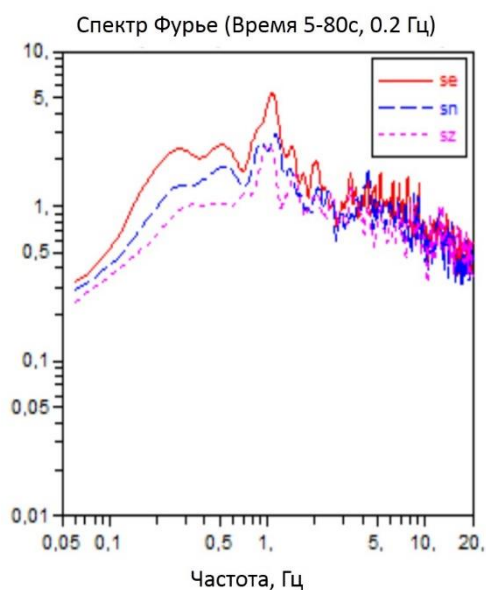


Рисунок 8. Спектры реакции Сарыджазского землетрясения 28.01.2013 г. Станция PDGK

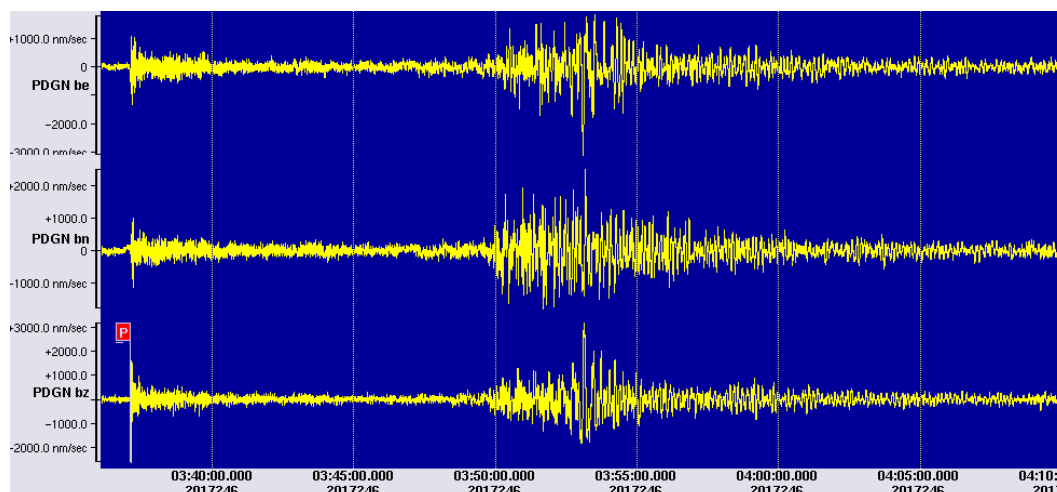


Рисунок 9. Сейсмограмма Северокорейского ядерного испытания, 3 сентября 2017 г.
 $t_0=03:30:01.8$, $\varphi=41,332^\circ$, $\lambda=129,030^\circ$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Оценка параметров сейсмического шума по станции «Подгорное» свидетельствует о хороших возможностях этой станции для мониторинга сейсмических событий различной природы. Медиана спектральной плотности сейсмического шума близка к нижнеуровневой мировой модели сейсмического шума. Диапазон вариаций для дневного и ночного времени на высоких частотах достаточно велик, что связано с местоположением станции в поселке, однако в рабочем диапазоне частот около 1 Гц уровень шума в ночное и дневное время совпадает.

2. Сравнение спектральной плотности сейсмического шума для разных комплектов оборудования, установленных на станции, свидетельствует от том,

что: CMG3ESP+REFTEK и CMG3ESP+DM24 близки по характеристикам, однако дигитайзер REFTEK показал большую надежность, чем DM24, он проработал без сбоев длительный период времени. Комплект Trillium+Centaur имеет чувствительность, внутренний уровень шума, сходный с CMG3ESP+REFTEK и CMG3ESP+DM24, однако уровень спектральной плотности сейсмического шума немного ниже, кроме того, у сейсмометра Trillium Compact диапазон частот значительно превышает этот параметр сейсмометра CMG3ESP.

3. Данные сейсмической станции «Подгорное» используются для формирования сейсмического бюллетеня, для задач оценки сейсмической опасности, обнаружения и распознавания ядерных взрывов.

ЛИТЕРАТУРА

- Бакиров, А.Б. ред. Земная кора и верхняя мантия Тянь-Шаня в связи с геодинамикой и сейсмичностью / А.Б. Бакиров ред. // Бишкек: Илим, 2006. –116 с.
- Михайлова, Н.Н. Новые казахстанские станции, установленные в рамках проекта CAREMON / Н.Н. Михайлова, А. Стрелло, В.Г. Кунаков, А.Е. Великанов, З.И. Синёва // Вестник НЯЦ РК. – 2012. – Вып. 1. – С. 27–32.
- Нерсесов, И.Л. Сейсмический режим Северного Тянь-Шаня в связи с Жаланащ-Тюпским землетрясением 25.3.1978 г. / И.Л. Нерсесов, А. Сыдыков, А. Нурмагамбетов, Н.Н. Михайлова // Физика земли N 5, 1981.
- Электронный ресурс: <https://www.iris.edu>.
- Электронный ресурс: www.isc.ac.uk.
- Электронный ресурс: <https://www.reftek.com>
- Havskov, J. Instrumentation in Earthquake Seismology / J. Havskov, G. Alguacil // Springer. 2004, p. 360. DOI 10.1007/978-1-4020-2969-1.
- Электронный ресурс: <http://www.guralp.com/products/instruments>
- Аранович, З.И. Основные типы сейсмометрических приборов / З.И. Аранович [и др.] // Аппаратура и методика сейсмометрических наблюдений в СССР. – М.: Наука, 1974. – С. 117.
- Электронный ресурс: <https://www.nanometrics.ca/products/seismometers/trillium-compact>
- Михайлова, Н.Н. Спектральные характеристики сейсмического шума по данным казахстанских станций мониторинга / Н.Н. Михайлова, И.И. Комаров // Вестник НЯЦ РК. – 2006. – Вып. 2. – С. 19–26.
- Соколова, И.Н. Модель сейсмического шума по наблюдениям сейсмической станции «Подгорное» / И.Н. Соколова, А.С. Мукамбаев // Вестник НЯЦ РК. – 2007. – Вып. 1. – С. 57–63.
- Соколова, И.Н. О характеристиках сейсмического шума на периодах, близких к 1.7 с, по данным станций Северного Тянь-Шаня / И.Н. Соколова, Н.Н. Михайлова // Вестник НЯЦ РК. – 2008. Вып. 1. – С. 48–53.
- Гордиенко, Д.Д. Временные вариации параметров сейсмического шума по данным станций НЯЦ РК / Д.Д. Гордиенко // Вестник НЯЦ РК. – 2010. – Вып.1. – С. 5 - 10.
- Peterson, J. Observation and Modeling of Seismic Background Noise / J.Peterson // Open-File Report 93-322, Albuquerque, New Mexico, 1993. –42 pp.

16. Рябенко, О.В. Записи станций сильных движений землетрясений с очагами на территории Алмаатинской области / О.В.Рябенко, А.Н. Соколов // Материалы докладов 6-ой международной конференции молодых ученых и студентов, 26–27 марта 2014 г. – Бишкек. 2014. – С. 25-30.

**СЕЙСМИКАЛЫҚ ШУЛАРҒА АППАРАТУРА ТҮРІНІҢ ЫҚПАЛЫ
(«ПОДГОРНОЕ» СЕЙСМИКАЛЫҚ СТАНЦИЯСЫ ҮЛГІСІНДЕ)**

А.Н. Соколов, А.В. Мүсрепов

Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатов, Қазақстан

Мақала, станция жұмысының тиімділігіне сейсмикалық аппаратурасы параметрлерінің ықпалын талдау мақсатында, «Подгорное» станциясы сейсмикалық шуларының сипаттамасын түбегейлі талдауына арналған.

**IMPACT OF AN INSTRUMENTATION TYPE ON SEISMIC NOISE
(AT THE EXAMPLE OF “PODGORNOYE” SEISMIC STATION)**

A.N. Sokolov, A.V. Musrepov

Institute of Geophysical Research, Kurchatov, Kazakhstan

The paper deals with detailed analysis of seismic noise characteristics at “Podgornoye” station for the purposes of analyzing the impact of seismic instrumentation parameters on the efficiency of the stations’ work.