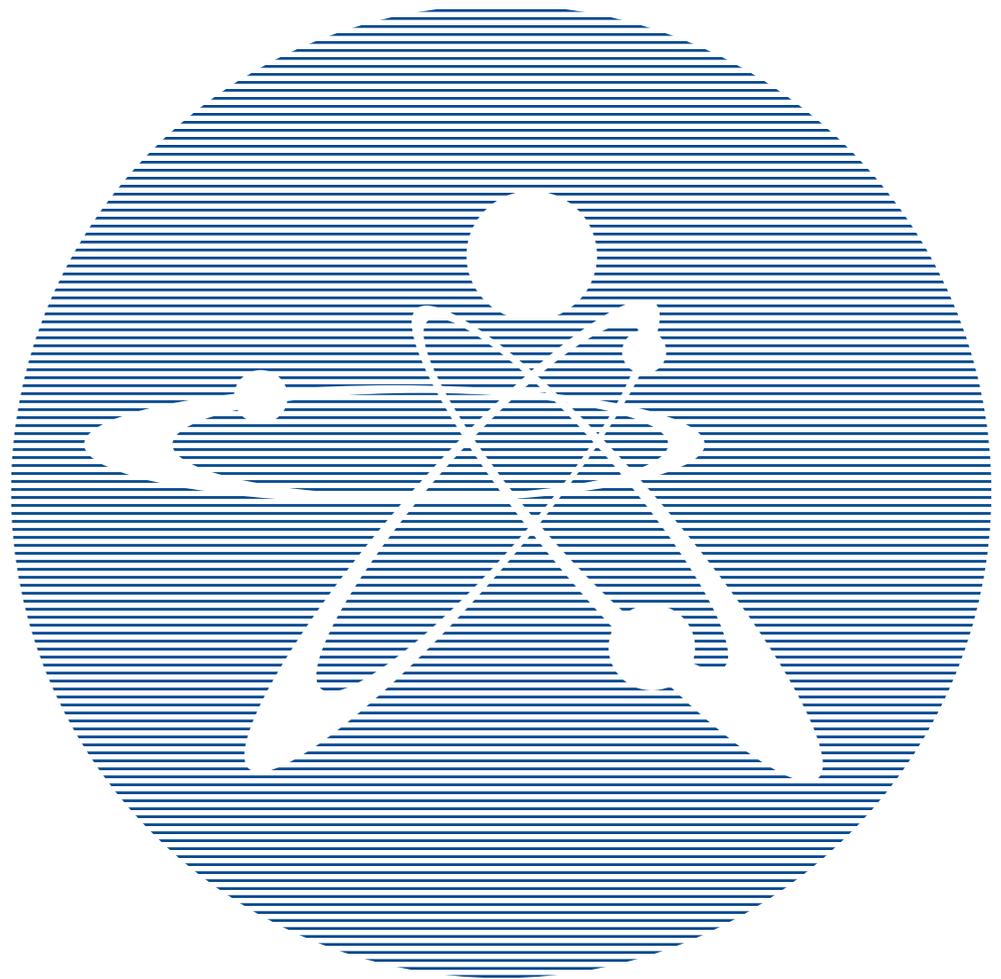


2022
ВЫПУСК 2

ISSN 1729-7516

ЖУРНАЛ
Вестник

ПЕРИОДИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
НАЦИОНАЛЬНОГО ЯДЕРНОГО ЦЕНТРА
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН



Вестник НЯЦ РК

ПЕРИОДИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
НАЦИОНАЛЬНОГО ЯДЕРНОГО ЦЕНТРА РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

ВЫПУСК 2(90), ИЮНЬ 2022

Издается с января 2000 г.

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР – д.ф.-м.н., профессор БАТЫРБЕКОВ Э.Г.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ: д.ф.-м.н. СКАКОВ М.К. – заместитель главного редактора,
к.б.н. АЙДАРХАНОВ А.О., д.ф.-м.н. БУРТЕБАЕВ Н.Т., д.т.н. ВИЕЛЕБА В. (Польша), к.ф.-м.н. ВИТЮК В.А.,
к.ф.-м.н. ВУРИМ А.Д., д.т.н. ГРАДОБОЕВ А.В. (Россия), д.ф.-м.н. КОПНИЧЕВ Ю.Ф. (Россия),
д.ф.-м.н. МИХАЙЛОВА Н.Н., д.ф.-м.н. СОКОЛОВА И.Н., д.ф.-м.н. СОЛОДУХИН В.П.,
д.ф.-м.н. ТАЖИБАЕВА И.Л., Prof. Dr. Yoichi FUJII-E (Япония), PhD Takahiro HAYASHI (Япония)

ҚР ҰЯО Жаршысы

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҰЛТТЫҚ ЯДРОЛЫҚ ОРТАЛЫҒЫНЫҢ
МЕРЗІМДІК ҒЫЛЫМИ-ТЕХНИКАЛЫҚ ЖУРНАЛЫ

2(90) ШЫҒАРЫМ, МАУСЫМ, 2022 ЖЫЛ

NNC RK Bulletin

RESEARCH AND TECHNOLOGY REVIEW
NATIONAL NUCLEAR CENTER OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

ISSUE 2(90), JUNE 2022

СОДЕРЖАНИЕ

СЕЙСМИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ НАЦИОНАЛЬНОГО ЯДЕРНОГО ЦЕНТРА РК И ИХ ВКЛАД В РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ОЦЕНКИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ ВОСТОЧНОГО КАЗАХСТАНА Н.Н. Михайлова , А.С. Мукамбаев.....	3
КАРТИРОВАНИЕ ПОЛЯ ПОГЛОЩЕНИЯ S-ВОЛН В РАЙОНАХ ВОСТОЧНОГО КАЗАХСТАНА И ЗАПАДНОГО АЛТАЯ ПО ДАННЫМ СЕЙСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ МАКАНЧИ Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова	17
МАГНИТУДНАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ГРУППЫ КАРАТАУ В МОНИТОРИНГЕ СЕЙСМИЧНОСТИ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ Н.А. Сейнасинов, Н.Н. Михайлова	23
DEVELOPMENT OF A TEST DEVICE FOR TESTING MINIATURE SAMPLES BY THE SPT METHOD Ye.D. Dauletkhanov, Ye. Ye. Sapatayev, N.A. Orazgaliyev, Ye.B. Aryngazy	32
ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА С ЛИТИЕВЫМИ КЕРАМИКАМИ РАЗНЫХ СОРТОВ С.К. Аскербекоев, А.У. Толенова, Е.А. Нестеров	40
ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЯДЕРНОЙ МЕДИЦИНЫ В РЕСПУБЛИКЕ КАЗАХСТАН: РЕАКТОРНЫЕ ИЗОТОПЫ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ТЕРАПИИ А.Н. Гурин, Е.Т. Чакрова, З.В. Медведева, С.Г. Солонинкина	46
РАНUTE MESA TRAVEL TIMES AT KURIL–KAMCHATKA SEISMIC STATIONS K.S. Nepeina, V.A. An	53
РЕГИСТРАЦИЯ ПОДЗЕМНЫХ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ НЕВАДСКОГО ПОЛИГОНА СЕЙСМИЧЕСКИМИ СТАНЦИЯМИ СОВЕТСКОГО СОЮЗА К.С. Непеина, В.А. Ан.....	62
СПИСОК АВТОРОВ.....	70

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2022-2-3-16>

УДК 550.34.01+551.591

СЕЙСМИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ НАЦИОНАЛЬНОГО ЯДЕРНОГО ЦЕНТРА РК И ИХ ВКЛАД В РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ОЦЕНКИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ ВОСТОЧНОГО КАЗАХСТАНА

Н.Н. Михайлова, А.С. Мукамбаев

Филиал «Институт геофизических исследований» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

E-mail для контактов: mukambayev@kndc.kz

В 2021–2023 гг. перед сейсмологами поставлена задача проведения работ по сейсмическому зонированию территории Восточного Казахстана. Сеть сейсмических станций этого региона представлена двумя сейсмическими группами и двумя трехкомпонентными станциями ИГИ НЯЦ РК и двумя трехкомпонентными станциями СОМЭ МОН РК. В работе даны характеристики станций ИГИ НЯЦ РК, оценены их возможности в регистрации событий разных магнитуд на разных расстояниях. Представлена информация о регистрации взрывов и землетрясений этими станциями. Всего станциями ИГИ НЯЦ РК зарегистрировано почти 34000 событий за 2002–2020 гг. После распознавания взрывов и удаления их из каталога сейсмических событий построена карта эпицентров землетрясений территории Восточного Казахстана, включающая в себя 28000 землетрясений. Этот материал является одной из основных информационных составляющих для проведения оценок сейсмической опасности в этом регионе.

Ключевые слова: станция, сейсмическая группа, землетрясение, взрыв, сейсмограмма, каталог, магнитуда, эпицентр.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из базовых составляющих для расчета параметров сейсмической опасности и построения карт сейсмического районирования территорий, наряду с картой активных разломов, является каталог землетрясений. Качество каталога, его полнота, точность и достоверность включенных в него параметров, в первую очередь, определяются существующей сетью сейсмических наблюдений. В настоящее время для Восточного Казахстана стоит актуальная задача создания новых карт сейсмического зонирования территории. Но следует признать, что для этой территории Казахстана долгие годы не существовало удовлетворительной сети сейсмических станций. Даже сильное разрушительное Зайсанское землетрясение 1990 года не смогло кардинально поменять ситуацию. После него была открыта лишь одна стационарная станция Сейсмологической опытно-методической экспедиции – Зайсан. Положение дел с сейсмическими наблюдениями значительно улучшилось после открытия в составе Национального ядерного центра РК Института геофизических исследований в 1993 году, после чего начали устанавливаться новые цифровые сейсмические станции и сейсмические группы. В этой статье анализируются характеристики станций, их магнитудная чувствительность и изучается их вклад в создание каталогов землетрясений и, тем самым, в проблему оценки сейсмической опасности.

СТАЦИОНАРНЫЕ СЕЙСМИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ В ВОСТОЧНОМ КАЗАХСТАНЕ

На территории Восточного Казахстана первая сейсмическая станция была установлена в 1934 г., в городе Семипалатинск [1, 2]. Сейсмическая станция Семипалатинск (SEM) расположена непосредствен-

но на территории города с достаточно высоким уровнем антропогенных шумов. На таких станциях невозможно достичь высокого усиления сигнала. Долгие годы на станции регистрация велась с помощью сейсмометра СК с небольшим увеличением. Позже в период 1997–2005 гг. на станции дополнительно был установлен сейсмометр СКМ [3], а начиная с 2005 года на станции начала функционировать цифровая трехкомпонентная сейсмическая станция DAS6102 с сейсмометром EP105. Станция Семипалатинск в советское время входила в состав Единой сети сейсмических наблюдений СССР, затем была передана СОМЭ МОН РК. Расположение станции (SEM) приведено на рисунке 1. Отметим, что в советское время данные станции Семипалатинск не поступали в обработку в Центр обработки Института сейсмологии и СОМЭ, не использовались для составления каталогов землетрясений.

С начала 1960-х годов на территории Западного Алтая в Российской Федерации были развернуты станции Алтае-Саянской экспедиции (рисунок 2). Они регистрировали землетрясения с очагами на большей части территории Восточного Казахстана. В связи с этим, для исследования сейсмичности Восточного Казахстана за период 1962–1991 гг. можно привлекать ежегодные сборники «Землетрясения в СССР» [4], в которых публиковались каталоги Алтае-Саянской экспедиции [4, 5].

После разрушительного Зайсанского землетрясения 14 июня 1990 г., СОМЭ МОН РК открыла новую стационарную сейсмическую станцию Зайсан [6] (рисунок 1), с сейсмометром СКМ-3 [3], которая в 2003 году была модернизирована, на ней было установлено оборудование DAS6102 и сейсмометр SP400RN.

**СЕЙСМИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ НАЦИОНАЛЬНОГО ЯДЕРНОГО ЦЕНТРА РК И ИХ ВКЛАД
В РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ОЦЕНКИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ ВОСТОЧНОГО КАЗАХСТАНА**

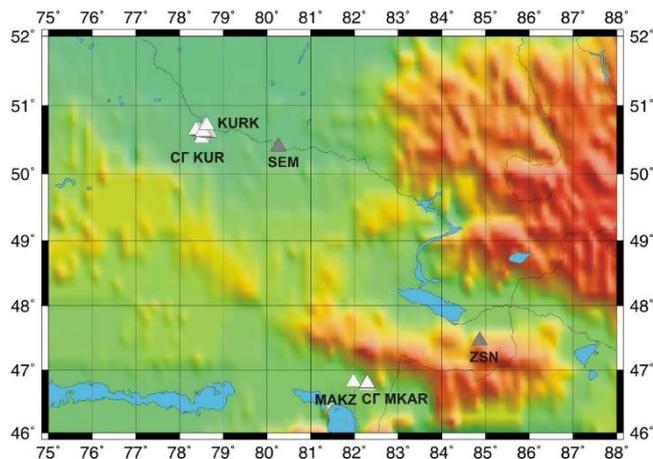


Рисунок 1. Карта расположения современных цифровых сейсмических станций на территории Восточного Казахстана (Δ – станции ИГИ НЯЦ РК, \blacktriangle – СОМЭ МОН РК)

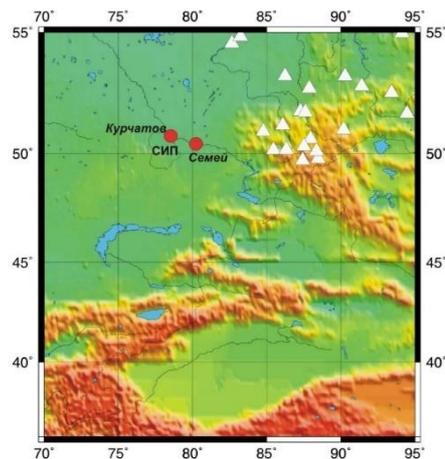


Рисунок 2. Расположение сейсмических станций (Δ) Алтае-Саянской экспедиции

На территории Восточного Казахстана в советское время работали сейсмические станции Службы Спецконтроля (ССК МО СССР), которые проводили мониторинг ядерных испытаний с полигонов мира [6–9]. Созданная в 1957 г. в г. Курчатова сейсмическая лаборатория 13.02.1960 г. впервые в практике этой лаборатории зарегистрировала наземный ядерный взрыв мощностью 2–150 кт ТНТ, произведенный Францией на полигоне Регган (пустыня Сахара) в Алжире [9, 10]. Для регистрации ядерных испытаний на полигоне Лобнор в КНР (первое испытание проведено 16.10.1964 г.) в составе Семипалатинской лаборатории были созданы 3 пункта с сейсмической и акустической аппаратурой, приближенные к границе с КНР: Бахты, Токты и Зайсан [9]. В 1970 г. в 60 км от границы с КНР была установлена сейсмическая станция Маканчи (МАКЗ) (рисунок 1). В последующие годы лабораторией были зарегистрированы 43 ядерных испытания, проведенных в КНР. К концу 1969 г. на территории Семипалатинского полигона была установлена первая экспериментальная сейсмическая группа «Крест» (KURK) (рисунок 1), что позволило регистрировать подземные ядерные взрывы малой мощности, произведенные на полигоне Невада в США, и увеличить число контролируемых ядерных полигонов до 9. В 1993 году все станции ССК на территории Казахстана были переданы ИГИ НЯЦ РК, после чего проведена их полная модернизация. Отметим, что данные станций службы спецконтроля не были доступны для составления каталогов и изучения сейсмичности.

С середины 1994 года в Казахстане заработали первые станции новой цифровой сейсмической сети станций Института геофизических исследований НЯЦ РК [11].

Основной задачей сети мониторинга ИГИ НЯЦ РК является мониторинг ядерных испытаний в рамках Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний [11] и землетрясений на всем земном

шаре. В настоящее время в сеть входят 7 трехкомпонентных станций, 5 сейсмических групп. Данные этой системы передаются в Международные центры для составления мировых сейсмологических бюллетеней (REB, ISC, EMSC, ГС РАН) и проведения научных исследований в разных странах, а также используются для задач обеспечения сейсмической безопасности на территории Казахстана.

Сейсмические станции сети ИГИ НЯЦ РК характеризуются отличными условиями для регистрации сейсмических сигналов, низким уровнем сейсмических шумов в районе расположения [11]. Благодаря тщательному выбору площадок под строительство станций с точки зрения геологии и характеристик сейсмического шума, погружению аппаратуры в скважины, удачной конфигурации групп, комплексированию широкополосной и короткопериодной аппаратуры, все станции системы являются высокочувствительными как к региональным, так и телесеизмическим событиям. Этот факт позволяет успешно использовать систему в рамках национального и международного мониторинга. Для создания сейсмического бюллетеня Центральной Азии Центр данных получает в режиме реального времени данные всех сейсмических групп и трехкомпонентных станций ИГИ НЯЦ РК, данные зарубежных сейсмических групп ZAL и АВКТ, данные трехкомпонентных станций Кыргызстана ААК. Для создания совместного с СОМЭ МОН РК бюллетеня используются измеренные времена вступления и амплитуды сейсмических фаз по данным трехкомпонентных станций сети СОМЭ МОН РК.

На территории Восточного Казахстана в сети ИГИ НЯЦ РК в настоящее время работают 2 трехкомпонентные станции глобальной сети IRIS – Курчатова (KURK) и Маканчи (МАКЗ), а также 2 сейсмические группы – Курчатова-Крест (KUR) и Маканчи (МКАР). Рассмотрим характеристики станций ИГИ НЯЦ РК более детально.

СЕЙСМИЧЕСКАЯ ГРУППА КУРЧАТОВ-КРЕСТ

Созданная еще в советское время сейсмическая группа «Крест» расположена вблизи г. Курчатов, в северо-восточной части Казахстана (рисунок 1) [9]. Ориентация «Креста» была выбрана таким образом, чтобы максимально усиливать сейсмические сигналы от слабых подземных ядерных взрывов, проводимых на полигоне Невада (США).

Сейсмическая группа «Крест» представляет собой два линейных ортогональных профиля (широтный и меридиональный) приборных скважин, длиной по 22,5 км каждый. На каждом профиле имеется по 10 приборных скважин (пунктов) с общим центральным пунктом в месте пересечения профилей. Среднее расстояние между пунктами приблизительно равно 2,25 км. Меридиональный профиль (пункты 1–10) имеет азимут простирания СВ 10°, широтный профиль (пункты 11–20) имеет азимут простирания СЗ 280° (рисунок 3). Центр группы (пункт № 21) находится в 13 км от г. Курчатов.

Система группирования была реконструирована в 1986–1992 гг. В 1994 г. группа *Курчатов-Крест* начала работу в составе ИГИ НЯЦ РК. В каждой скважине на глубинах 26,5–52 м были установлены короткопериодные скважинные сейсмоприемники К-213-С с периодом собственных колебаний 2 с.

В октябре 1994 г. в центральном пункте сбора данных на 2-ой технической площадке геофизической обсерватории «Курчатов» был установлен 16-битовый аналогово-цифровой преобразователь на базе персонального компьютера. Аналоговые сигналы оцифровывались со скоростью 20 отсчетов в секунду и записывались непрерывно на компьютерный диск емкостью 4 Гб. С января 1995 г. скорость отсчетов увеличена до 40 отсчетов в секунду.

По Договору о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний, подписанном Казахстаном в 1996 г., сейсмическая группа *Курчатов-Крест* включена в

сеть сейсмического мониторинга Международной системы мониторинга как вспомогательная станция (AS-058). В соответствии с требованиями к станциям Международной системы мониторинга в 2006 г. станция была модернизирована. 18 декабря 2006 года станция была сертифицирована международной комиссией в качестве станции международного мониторинга. Новое оборудование установлено в тех же приборных сооружениях, что и в старой системе. На пунктах 1–20 установлены однокомпонентные сейсмометры CMG-3V, на пункте 21 – трехкомпонентный сейсмометр CMG-3ТВ, дигитайзер – Euro-T фирмы Nanometrics. Частота оцифровки 40 отсчетов в секунду.

Сбор информации в центр системы (CRF) и пункт обработки данных (TS2) осуществляется посредством радиомодемов VIP 110-24. Полученные на станции данные по спутниковому каналу от CRF передаются в Международный центр данных в Вену. Из МЦД (Вена) данные в реальное время поступают в Центр данных (KNDC) в г. Алматы.

Сейсмическая группа *Курчатов-Крест* расположена в степной слабохолмистой местности в левобережье реки Иртыш. Превышения рельефа составляют от 160 м до 210 м над уровнем моря. Ко всем пунктам группы подходят полевые грунтовые дороги. В районе расположения группы проходит железная дорога, соединяющая города Семипалатинск – Курчатов – Аксу и Курчатов – угольный карьер «Каражыра», расположенный вблизи бывшей площадки СИП «Балапан». Также в районе расположения группы проходят автомобильные дороги, соединяющие г. Курчатов и г. Семипалатинск, а также дорога, соединяющая г. Курчатов с бывшими испытательными площадками СИП «Балапан» и «Дегелен». Эти факторы создают сейсмические шумы на записях сейсмической группы.

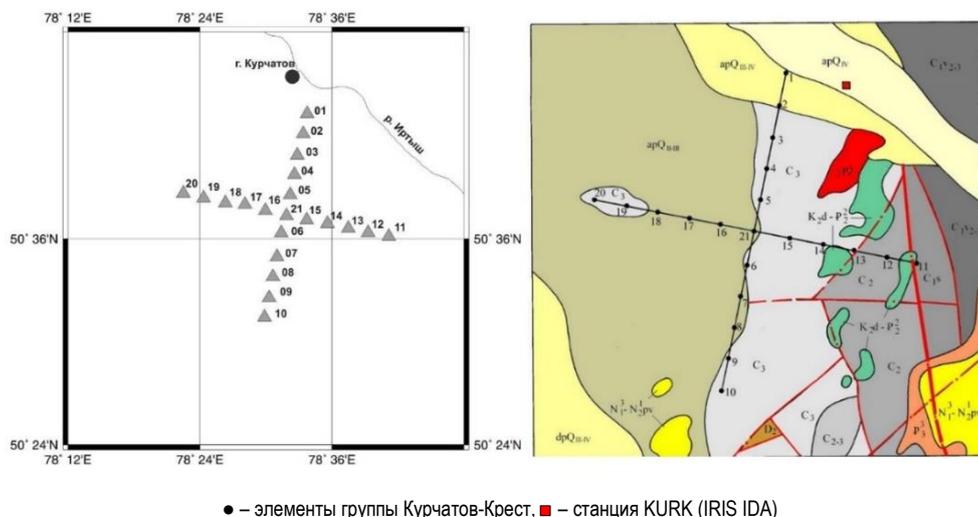


Рисунок 3. Расположение пунктов сейсмической группы Курчатов-Крест (слева) и геологическая карта (справа) района его расположения

На рисунке 4 представлены рассчитанные кривые спектральной плотности сейсмического шума по одному из элементов сейсмической группы Курчатов-Крест (KUR01), там же показаны ниже- и верхнеуровневые мировые модели шума Петерсона [12, 13].

Из рисунка 4 следует, что для станции KUR в диапазоне периодов более 1 с характерны шумы, близкие к нижеуровневой модели шума, что обеспечивает ее высокую эффективность в работах как по региональному, так и глобальному сейсмическому мониторингу. В высокочастотной области на станции наблюдаются шумы, связанные с антропогенными шумами.

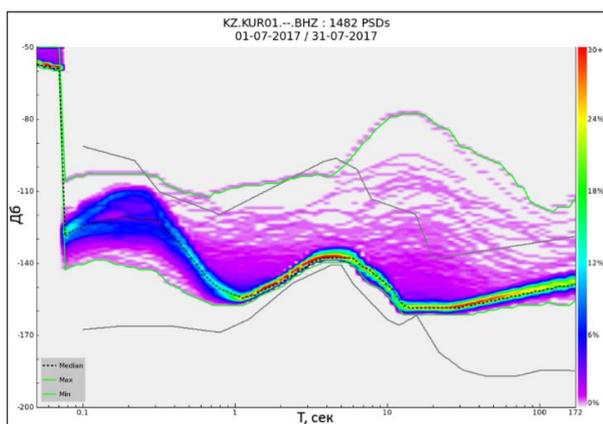


Рисунок 4. Спектральная плотность сейсмического шума по станции Курчатов-Крест, элемент KUR01

ТРЕХКОМПОНЕНТНАЯ СЕЙСМИЧЕСКАЯ СТАНЦИЯ КУРЧАТОВ (KURK)

Трехкомпонентная сейсмическая станция Курчатов была установлена как станция службы спец контроля в 1957 г. На этом же месте в середине 1994 г. в рамках проекта МНТЦ К063 совместно с Ламонт-Дохертской лабораторией Колумбийского университета США была установлена широкополосная трехкомпонентная сейсмическая станция KUR(KURK), дигитайзер Reftek97-18 с сейсмометром STS2. В разные периоды времени на станции использовалась частота оцифровки 40 Гц и 100 Гц.

В этом же месте чуть позже была установлена сейсмическая станция KURK глобальной сети станций IRIS/IDA, расположенная вблизи элемента СГ Курчатов-Крест KUR01. Станция была открыта 26 марта 1995 г. Сейсмические датчики станции – STS1, STS2 и акселерометр FBA23 установлены в шахте глубиной 25 м. Регистрирующая аппаратура: 26-битный (для сейсмометров) и 24-битный для акселерометра АЦП Quanterra Q330HR установлены рядом с датчиками. Частота оцифровки: 20 Гц для каналов STS1, 40 опросов/сек/канал – STS2. В сентябре

2019 г. произведена модернизация станции, аппаратура вместо шахты перемещена в скважину глубиной 41,1 м. Были установлены широкополосные сейсмометры STS6, STS5A, в качестве акселерометра установлен Kinematics Episensor ES-T. В качестве дигитайзера используются Quanterra Q330HR, частота оцифровки 40 Гц для сейсмометров и 100 Гц для акселерометра сильных движений.

СЕЙСМИЧЕСКАЯ ГРУППА МЕЖДУНАРОДНОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА (МСМ) МАКАНЧИ – (МКАР, PS23)

Первичная сейсмическая группа международной системы мониторинга (МСМ) – (МКАР, PS23) находится в Урджарском районе Восточно-Казахстанской области в 25 км к востоку от поселка Маканчи. Сейсмическая группа Маканчи является малоапертурной и состоит из 10 точек наблюдения, расположенных по двум окружностям с одной центральной точкой. Радиус внутреннего кольца ~500 м, наружного ~2000 м (рисунок 5). На 9 пунктах в скважинах установлены однокомпонентные вертикальные сейсмометры GS21 (Geotech Instruments). Кроме того, имеется одна широкополосная трехкомпонентная станция с сейсмометром CMG-3TB (Guralp) (до 2011 года был сейсмометр KS54000 СТВТО). Регистрирующая аппаратура – 24-битные АЦП AIM24S (Science Horizons). Частота оцифровки 40 Гц. Привязка временной шкалы – система GPS. В январе 2002 г. станция была сертифицирована специальной комиссией МСМ в качестве первичной станции МСМ [14].

Группа расположена в пределах гранитоидного массива (рисунок 5), дифференцированного по составу. Центральная часть массива сложена розовыми среднезернистыми биотитовыми, лейкократовыми и аляскитовыми субщелочными гранитами основной интрузивной фации (γ Pz₃III). Экзогенная трещиноватость в гранитоидах развита до глубины 14–16 м, в некоторых местах может достигать глубины 20–25 м.

В северной части участка, вдоль северо-восточной границы гранитоидного массива, проходит разлом северо-восточного направления с падением плоскости сместителя на северо-запад под углом 80 градусов. Местами шов разлома становится вертикальным. В центральной части участка прослежен разлом северо-восточного направления, к которому приурочена прямолинейная долина (рисунок 5).

На рисунке 6 представлены спектральные кривые сейсмического шума, рассчитанные по одному из элементов группы Маканчи (МК01). Видно, что кривые шума близки к нижеуровневой модели сейсмического шума Петерсона на большом интервале периодов, что делает станцию эффективной при глобальном и региональном мониторинге [12, 15].

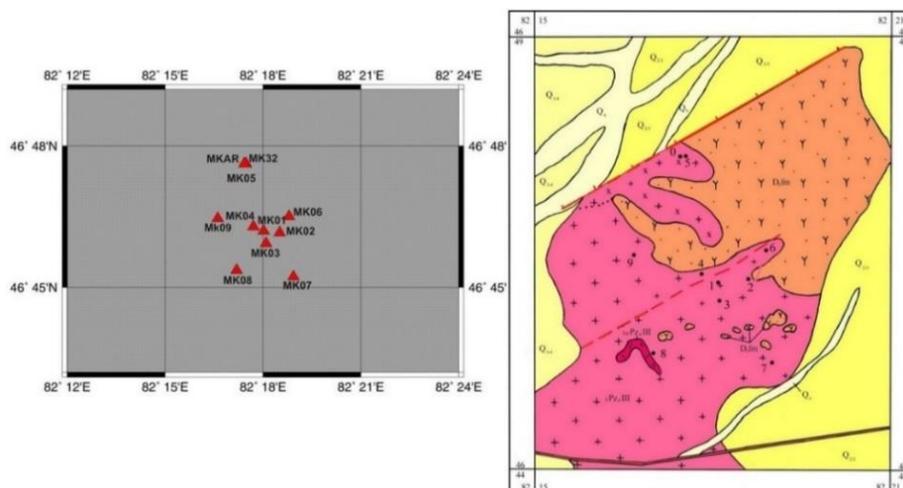


Рисунок 5. Конфигурация элементов (слева) и геологическая карта (справа) участка расположения приборных скважин сейсмической группы Маканчи

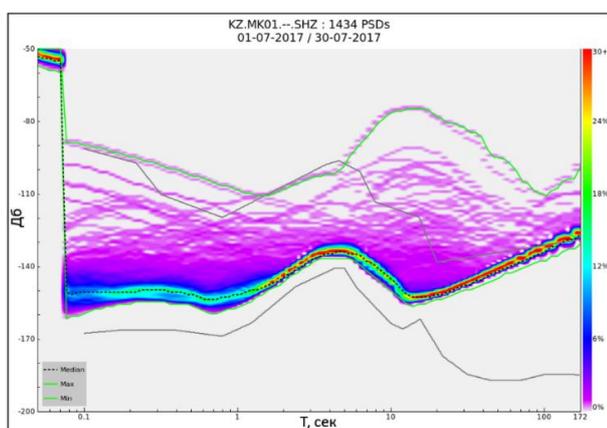


Рисунок 6. Спектральная плотность сейсмического шума по станции Маканчи, элемент МК01

ТРЕХКОМПОНЕНТНАЯ СЕЙСМИЧЕСКАЯ СТАНЦИЯ МАКЗ ГЛОБАЛЬНОЙ СЕТИ СТАНЦИЙ IRIS/GSN

Станция находится в Урджарском районе Восточно-Казахстанской области в 3 км к северо-западу от поселка Маканчи. Станция имеет давнюю историю, она начала работу с 1970-х годов как станция службы спецконтроля. На этом же месте в рамках проекта МНТЦ К063 совместно с Ламонт-Дохертской лабораторией Колумбийского университета США в середине 1994 г. была установлена широкополосная трехкомпонентная сейсмическая станция МАК(МАКЗ). В качестве дигитайзера использовался Quanterra680, сейсмометр STS2. В разные периоды времени на станции использовалась частота оцифровки 20, 40 Гц и 100 Гц.

Сейсмические датчики станции – STS2 и акселерометр EpiSensor установлены в штольне. Регистрирующая аппаратура: 26-битный (для сейсмометра) и 24-битный (для акселерометра АЦП Quanterra Q330HR) установлена в соседнем с датчиками отсеке. Частота оцифровки: 40 Гц (STS2) и 100 Гц для ак-

селерометра (ждуший режим). Привязка временной шкалы: система GPS.

Таким образом, сеть станций Восточного Казахстана, входящих в сеть ИГИ НЯЦ РК, представлена в настоящее время двумя сейсмическими группами – Курчатов-Крест (KUR) и Маканчи (MKAR), а также двумя трехкомпонентными станциями KURK и MAKZ. С учетом отдельных станций (элементов) группы всего функционирует 33 пункта, где установлены сейсмические приборы. Все станции интегрированы в международные системы мониторинга. Маканчи и Курчатов-Крест – станции Международной системы мониторинга ДВЗЯИ, трехкомпонентные станции Маканчи и Курчатов – станции системы IRIS.

ОЦЕНКА МАГНИТУДНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И ПРОБЛЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МИНИМАЛЬНЫХ И ПРЕДСТАВИТЕЛЬНЫХ МАГНИТУД

Использование сейсмических групп в мониторинге событий значительно эффективнее, чем отдельных трехкомпонентных станций. Это связано с тем, что специфика обработки данных по сейсмической группе позволяет локализовать источник даже по одной группе. По отдельным трехкомпонентным станциям необходимо минимум три станции при их благоприятном расположении относительно источника. Кроме того, использование группы позволяет существенно усиливать полезный сигнал за счет возможности корреляции сигналов на записях отдельных элементов группы. Тем самым повышается вероятность детектирования слабых сигналов и их параметризации.

Обработка зарегистрированных сигналов с помощью группы может проводиться двумя способами. Если событие близкое, его эпицентр находится в пределах периметра группы или на расстоянии до примерно 5 апертур группы, то можно использовать сейсмическую группу как сеть отдельных станций. В других случаях для обработки используется частотно-волново-численный анализ (f-k анализ) [16].

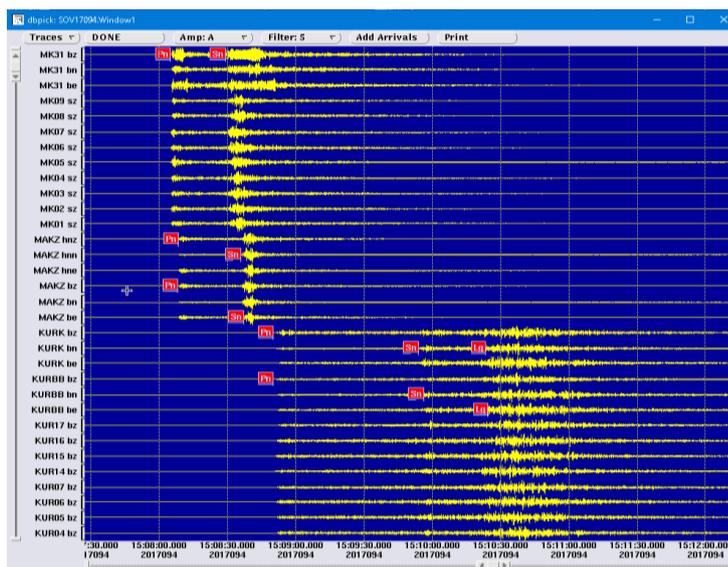


Рисунок 7. Сейсмограммы землетрясения в районе оз. Зайсан 4 апреля 2017 г. 15:07:28.29, $K=13.3$, $mpv=5,6$

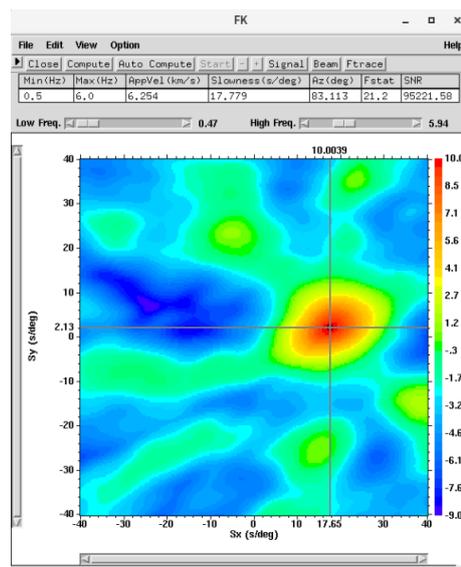
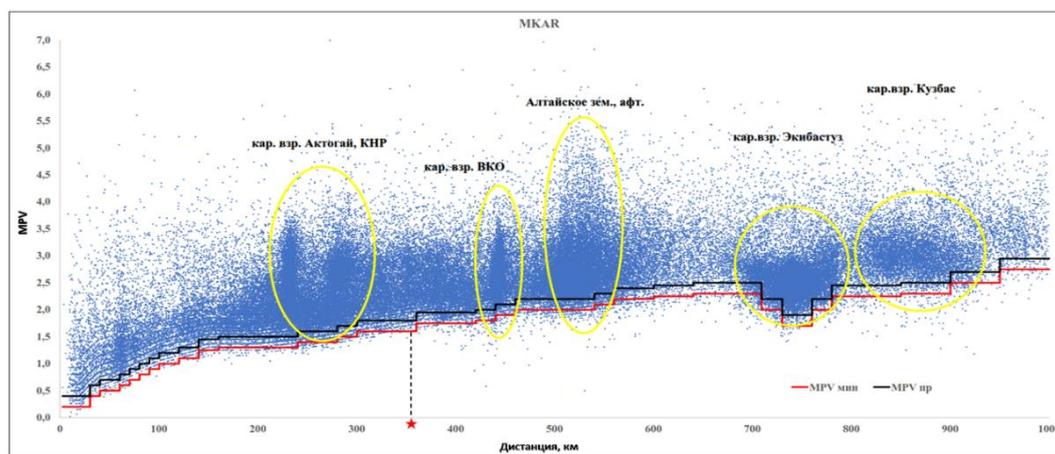


Рисунок 8. Результат f-k анализа по данным сейсмической группы Маканчи



— график минимальных магнитуд регистрируемых событий; — график магнитуд уверенной регистрации событий

Рисунок 9. График дальности регистрации сейсмических событий с разными значениями магнитуд (mpv) по станциям Маканчи (MKAR)

Пример обработки данных сейсмических групп показан на рисунках 7 и 8. На рисунке 7 показаны записи сильного землетрясения в районе оз. Зайсан, полученные на двух сейсмических группах – Маканчи и Курчатов-Крест, а также на двух трехкомпонентных станциях MAKZ и KURK. Землетрясение произошло 4 апреля 2017 года в 15.07.28,29 и имело магнитуду $mpv=5,6$. На рисунке 8 показаны результаты применения f-k анализа для определения баказимута и медленности.

Чтобы убедиться в реальной эффективности станций в регистрации событий Восточного Казахстана на разных расстояниях и в разных азимутах от сейсмических станций, по данным сейсмических бюллетеней KNDC были изучены графики дальности регистрации событий с разными магнитудами.

Анализ данных сейсмической группы Маканчи за 20 лет ее работы показал, что станция является очень чувствительной. На рисунке 9 приведен график дальности регистрации сейсмической группой Маканчи событий разной магнитуды в диапазоне расстояний до 1000 км. Каждая точка на графике – это одно событие, землетрясение или взрыв. Вблизи станции регистрируются события даже с магнитудой, равной 0–0,5. Обращает на себя внимание присутствие четких кластеров сейсмических событий на определенных расстояниях. Чаще всего ими являются взрывы, произведенные в различных карьерах, а также афтершоки произошедших сильных землетрясений. Так на расстоянии 500–550 км от станции Маканчи хорошо выделяется зона Алтайского (Чуйского) землетрясения (2003 г.) с многочисленными афтершоками.

По таким графикам можно говорить о минимальной магнитуде регистрируемых событий для каждого диапазона расстояний, а также о представительной магнитуде. Чем меньше эти значения, тем чувствительнее станция.

На рисунке 10 приведен график дальности регистрации 3-х компонентной станцией Курчатов (IRIS) в диапазоне расстояний до 1000 км за 2007–2020 гг. На этом графике также четко выделяются отдельные кластеры событий. В основном, вблизи станции вплоть до расстояний 400 км регистрируются карьерные взрывы. Также на расстоянии 500–550 км хорошо выделяется Алтайское землетрясение (2003 г.) с афтершоками. Для карьерных взрывов магнитуды регистрируемых событий определяются мощностью проводимых взрывов, поэтому по ним затруднительно делать вывод о представительных магнитудах. Однако видно, как закономерно происходит постепенный рост минимальной магнитуды с расстоянием. Станция Курчатов уступает в чувствительности сейсмической группе Маканчи. Но на самых близких расстояниях она регистрирует единичные события на бывшем Семипалатинском полигоне, что очень важ-

но для задач оценки сейсмической опасности территории СИП и учета ее для сейсмобезопасности особо ответственных объектов.

Графики дальности регистрации по разным станциям имеют общие характерные черты. На малых расстояниях вплоть до 150 км рост предельных и представительных магнитуд с расстоянием происходит довольно круто, приращение магнитуд достигает более 1. Далее увеличение магнитуд с расстоянием замедляется, приращение магнитуд на 600 км составляет 1 единицу. С расстояния примерно 700 км магнитуды практически становятся постоянными с ростом расстояния. Это связано с приходящими в первых вступлениях сейсмическими волнами и наблюдаемой сменой фаз в первых вступлениях. Прямые сейсмические волны P_g на расстояниях 150 и более километров сменяются волнами P_n, связанными с границей Мохоровичича, которые прослеживаются в первых вступлениях до конца диапазона исследуемых расстояний. P_g распространяются в земной коре и подвержены более сильному затуханию, чем волны P_n, что и отражается на графиках.

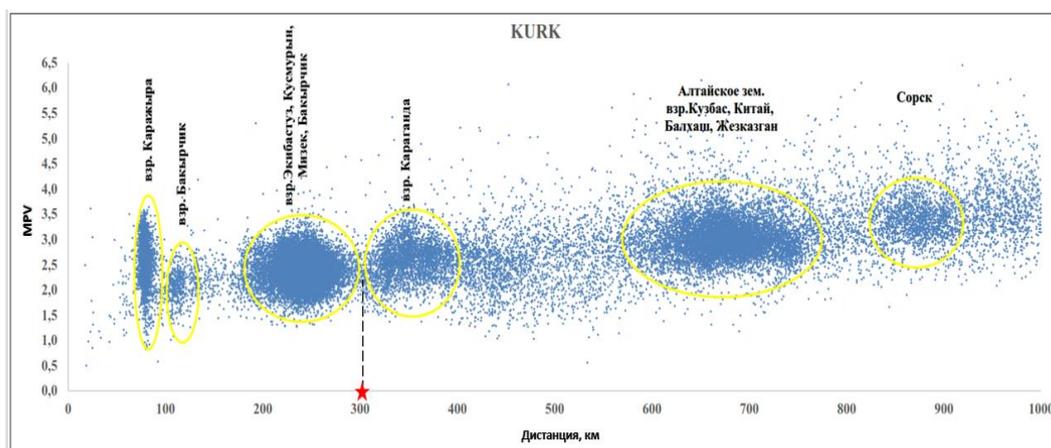


Рисунок 10. График дальности регистрации сейсмических событий с разными значениями магнитуд (m_{rv}) по станции Курчатов (KURK)

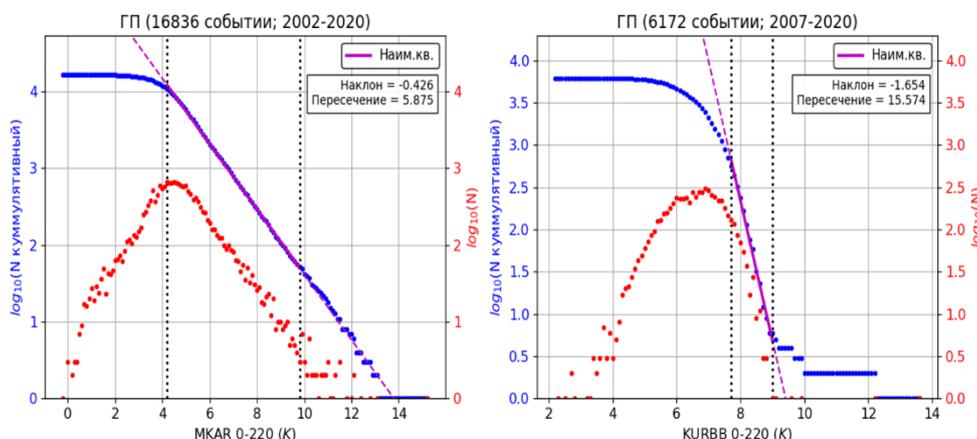


Рисунок 11. Графики повторяемости по энергетическому классу по данным ст. Маканчи (слева) и Курчатов (справа) для территорий с радиусом вокруг станций 220 км

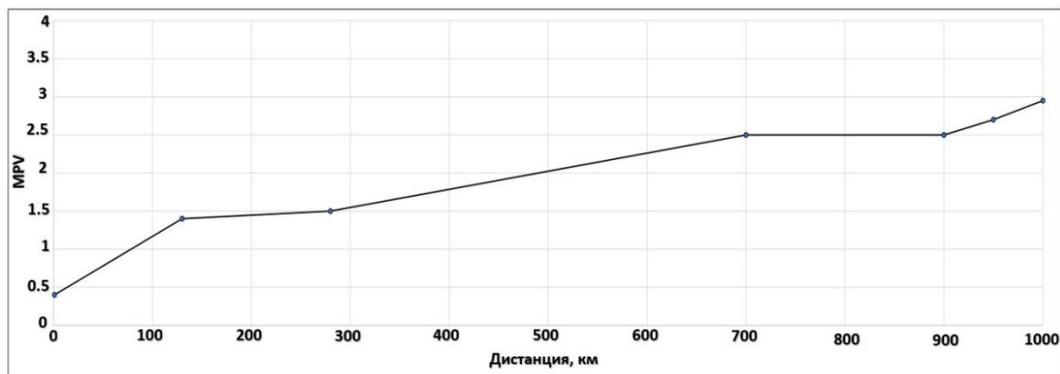


Рисунок 12. График предствительно регистрируемых событий по магнитуде m_{pv} станцией Маканчи (MKAR)

Минимальные магнитуды регистрируемых событий на разных расстояниях определяются просто: их значения ограничивают облако событий «снизу». Чтобы строго подойти к определению представительных магнитуд для каждого диапазона расстояний, можно воспользоваться таким инструментом, как построение графиков повторяемости. Однако при таком подходе существуют определенные проблемы. Посмотрим на рисунок 13. На малых расстояниях от станции Курчатов практически не регистрируются землетрясения. Вся выборка состоит из карьерных взрывов. Предельные значения магнитуд регистрируемых событий полностью определяются мощностью производимых взрывов, поэтому оценить значения магнитуд, как предельных, так и представительных по графикам повторяемости не представляется возможным.

На рисунке 11 представлены графики повторяемости по двум станциям. По станции Маканчи угол наклона графика повторяемости соответствует традиционным значениям для районов природной сейсмичности и равен $\gamma = -0,43$. Представительный класс равен 5. Минимальный класс 0,1.

По станции Курчатов по графику повторяемости видно, что угол наклона графика повторяемости не соответствует природной сейсмичности: $\gamma = -1,65$. Минимальный регистрируемый класс 2,2. «Представительный» класс, скорее всего соответствует наиболее часто производимым взрывам с классом 7,5.

Вывод: прежде, чем делать заключения о параметрах регистрируемых событий для оценки чувствительности сейсмических станций, необходимо убедиться в том, что события являются именно землетрясениями, а не взрывами.

На рисунке 12 приведен график предствительно регистрируемых событий по магнитуде m_{pv} станцией Маканчи (MKAR). Для всей территории Восточного Казахстана станцией не пропускаются события с магнитудой 3,0 и более. На меньших окружающих станцию территориях предствительно регистрируются гораздо более слабые толчки. Исходя из рисунка 12 можно утверждать, что на всей изучаемой территории Восточного Казахстана станция Курчатов не пропустит события с магнитудой 3,0–3,5 и более.

Следует заметить, что в магнитудной чувствительности станций существует азимутальная неоднородность. Впервые это было показано в работе Михайловой Н.Н., Синевой З.И. в 2004 г. [17]. Такой эффект связан с неоднородностью глубинного строения среды в разных направлениях от станции.

ЗАПИСИ КАРЬЕРНЫХ ВЗРЫВОВ В ДАННЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ ВОСТОЧНОГО КАЗАХСТАНА

Мы показали, что даже для такого частного вопроса, как выяснение возможностей в регистрации землетрясений разной магнитуды, важно иметь информацию о карьерах и карьерных взрывах. Высокий приоритет в проблеме оценки сейсмической опасности имеет маркировка взрывов в каталогах землетрясений. Только после корректировки каталога и удаления из расчетов взрывов разной природы можно получить надежные обоснованные данные по параметрам опасности. Поэтому для станций Восточного Казахстана надо иметь основу для отбраковки из общего каталога взрывов.

За предыдущие годы исследований для усовершенствования методов обнаружения и распознавания карьерных взрывов были проведены полевые работы по детальному изучению промышленных взрывов на большей части территории Казахстана, включающей и территорию Восточно-Казахстанской (ВКО) области [18]. В 2012 году проведены полевые исследования промышленных взрывов по территории ВКО. В первой половине года был проведен предварительный анализ материалов, включающий анализ изданной карты полезных ископаемых Казахстана, материалы космических съемок и данные по регистрации сейсмических событий по исследуемой территории за 2009–2011 гг., а также литературные источники и сведения из Интернета о горнопромышленной деятельности, по которым составлены предварительные таблица и схема возможно действующих карьеров по территории ВКО. Затем были проведены полевые исследования с выездом в места расположения предприятий, осуществляющих промышленные взрывы по территории Восточно-Казахстанской области. По результатам полевых исследований составлена окончательная таблица и схема действу-

ющих карьеров и других объектов (шахт в том числе) по территории ВКО, на которых проводились промышленные взрывы в 2011–2012 гг., где указаны их расположение, где приводится их активность по количеству взрывов в год и максимальная мощность взрывов на фоне средней мощности.

Результаты полевых исследований позволили установить на территории ВКО 49 объектов промышленных взрывов (в том числе действующих – 42, временно законсервированных – 5, законченных в 2012 г. – 2 объекта). Основными источниками промышленных взрывов на территории ВКО являются взрывы в карьерах, производящих добычу руд – преимущественно золота, реже меди и других цветных (Ni) и чёрных (Mn, Mo) металлов, а также каменного угля. Лидером в производстве карьерных взрывов по количеству и мощности взрывчатого вещества остаётся угольный разрез Каражыра, производящий свыше 150 взрывов в год с максимальной мощностью ВВ до 45500 кг на фоне средней 10000 кг. Также сейсмическими станциями регистрируются промышленные взрывы в шахтах по добыче, меди, цинка, где осуществляется отбойка руды камерным способом с массой взрывчатого вещества, превышающей 3–10 и более тонн за один взрыв. Это объекты крупных горнорудных компаний ТОО «Казцинк» (5 шахт), ТОО «Корпорация Казахмыс» (4 шахты) на Рудном Алтае. На рисунке 13 приведена карта расположения карьеров и шахт на территории Восточного Казахстана и эпицентры установленных взрывов. На рисунке 14 представлена карта эпицентров сейсмических событий за время работы сейсмических станций ИГИ НЯЦ РК. В нее вошли данные по 34000 взрывам и землетрясениям.

Определение природы источников очень важно для дальнейших работ по оценке сейсмической опасности. Требуется, чтобы в конечном счете каталог землетрясений был очищен от взрывов и состоял толь-

ко из природных событий. Часто для их распознавания имеется возможность использовать только сейсмические методы, поскольку получить информацию о проведенных взрывах от горнодобывающих предприятий не удастся.

Для распознавания сейсмических событий по записям сейсмических станций обычно проводится изучение следующего комплекса параметров: 1 – координаты эпицентра события и их близость к известным карьерам; 2 – глубина события; 3 – особенности волновой картины записей; 4 – время события относительно суток; 5 – диапазон энергетических классов; 6 – спектральное отношение амплитуд в различных волновых группах; 7 – характеристики спектров разных волновых групп; 8 – распределение знаков первых вступлений и механизмы очага.

Каждый из перечисленных параметров в отдельности не может являться надежным признаком для верного разделения сейсмических событий на взрывы и землетрясения. Анализ нескольких признаков в комплексе, например, близость местоположения эпицентра события к известному карьере, малая глубина события, характерная запись этого события инфразвуковой станцией, а также время события, относящееся к рабочему времени суток, повышают шанс отнести зарегистрированное сейсмическое событие к классу карьерных взрывов. Наибольшую эффективность при распознавании имеют спектральные отношения поперечных и продольных волн и особенности волновой картины записи события. В качестве дополнительных критериев рассматриваются характерные для каждого карьера диапазоны энергетических классов. Отметим, что конкретные количественные критерии распознавания могут различаться в различных регионах Казахстана, а также для разных станций регистрации и разных карьеров, что обуславливает необходимость специального изучения и поиска критериев распознавания.

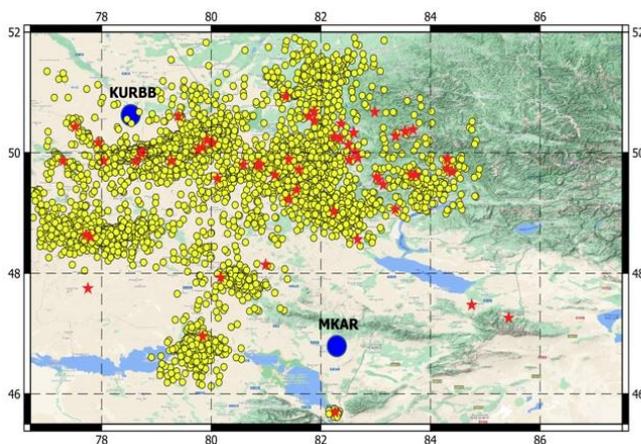


Рисунок 13. Карта расположения карьеров и шахт (★) на территории ВКО и эпицентров зарегистрированных взрывов (●). Всего около 6000 взрывов за 2002–2020 гг.

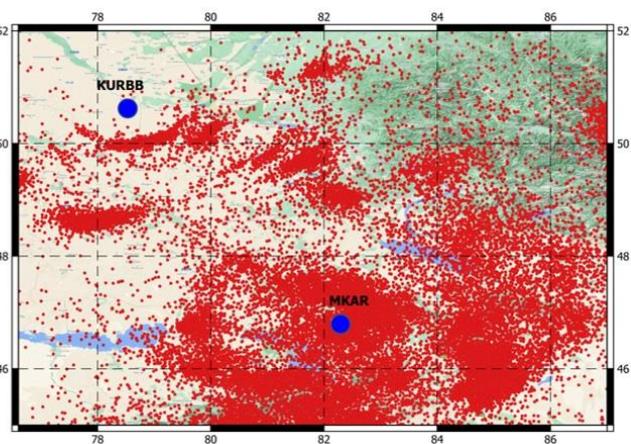


Рисунок 14. Карта эпицентров зарегистрированных сейсмических событий по данным станций ИГИ НЯЦ РК (взрывы и землетрясения) за период 2002–2020 гг. Всего 34000 событий.

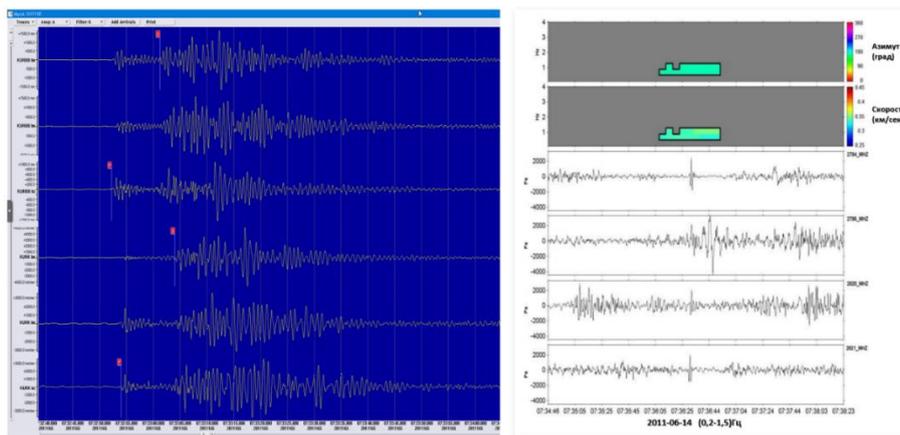


Рисунок 15. Результаты регистрации взрыва на угольном карьере Каражыра (СИП) 14 июня 2011 г. сейсмическими (слева) станциями KUR и KURK и инфразвуковой группой KURIS (справа)

Сейчас в составе сети мониторинга ИГИ МЭ РК работают три инфразвуковые станции. Это станция Актюбинск (IS31) международной системы мониторинга Организации Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (МСМ ОДВЗЯИ) [19]. Станция открыта в 2001 году. Станция IS31 является инфразвуковой группой и состоит из 9 элементов. В 2010 г. в Курчатове построена современная инфразвуковая группа KURIS с апертурой 1 км, состоящая из четырех элементов (три – в вершинах равностороннего треугольника, четвертый – в его центре) [20]. Инсталляция KURIS существенно повлияла на процесс распознавания карьерных взрывов. В 2016 году построена инфразвуковая группа Маканчи (MKIAR) в 25 км к востоку от поселка Маканчи, элементы группы расположены внутри превышающей её по апертуре сейсмической группы Маканчи [21].

Известно, что инфразвуковые станции регистрируют сигналы от карьерных взрывов. В качестве примера на рисунке 15 представлены результаты регистрации одного и того же взрыва на угольном карьере Каражыра 14 июня 2011 г. по сейсмическим станциям Курчатова (KURBB, KURK) и инфразвуковой станции (KURIS).

В 2020 году разработана методика распознавания карьерных взрывов и землетрясений по комплексу сейсмических и инфразвуковых записей [22]. Распознавание основано на поиске функции взаимной корреляции эталонных и текущих записей сейсмических станций с дальнейшей ассоциацией событий-кандидатов с инфразвуковыми фазами. Опробование методики проводилось на данных сейсмической станции Курчатова (KURK) и двух инфразвуковых станций: в Курчатове (KURIS) и Маканчи (MKIAR), методика показала высокую надежность при распознавании природы источников.

Важно заметить, что к вопросу исключения взрывов из общего каталога надо подходить с большой осторожностью. В последние годы работами сотрудников ИГИ НЯЦ РК показано, что в местах интенсивной добычи твердых полезных ископаемых после продолжительных воздействий на среду взрывами,

могут происходить техногенно-индуцированные землетрясения [23, 24]. Ранее такие события были отмечены в Центральном Казахстане (Жезказган, Караганда). В последние годы техногенные землетрясения выявлены и в Восточном Казахстане. Станциями ИГИ НЯЦ РК зарегистрированы техногенно-индуцированные явления на двух карьерах. Один из них – угольный карьер Каражыра, Карьер расположен на участке Балапан на бывшем Семипалатинском испытательном полигоне. Достаточно часто магнитуда карьерных взрывов m_{pv} превышает 3, а энергетический класс K_p больше 8. Регулярное интенсивное техногенное воздействие может вызвать подъем флюидов в земной коре и спровоцировать или ускорить процесс подготовки тектонических землетрясений. Одно из землетрясений в районе карьера произошло 25 октября 2019 года, $t_0=01:09:07.8$, $\varphi=49,9979^\circ$ с.ш., $\lambda=78,8628^\circ$ в.д., $h=10$, $m_{pv}=3,2$, $K=8$. Записи этого землетрясения показаны на рисунке 16.

Недалеко от СИП с запада расположен другой угольный карьер – Экибастуз. 23 августа 2019 года в 20 часов 27 минут по местному времени вблизи карьера Экибастуз произошло землетрясение. Его зарегистрировали все сейсмические станции ИГИ НЯЦ РК, станции СОМЭ МОН РК, многие станции России и мира. Этот район считается асейсмичным, здесь практически не происходят природные тектонические землетрясения. Поэтому, чтобы точно сделать вывод о природе зарегистрированного события, необходимо было провести дополнительный анализ. Были детально изучены сейсмические записи по станциям ИГИ, данные других центров, а также записи инфразвуковых станций Казахстана.

Изучаемое событие произошло поздно вечером в 20 часов 27 минут. Это время не характерно для времени производства взрывов на этом карьере. Энергетический класс данного события значительно выше классов карьерных взрывов. У обычных взрывов по энергетическому классу значения никогда не превышают 8–8,5. В данном случае энергетический класс составил $K=10,7$, что намного выше.

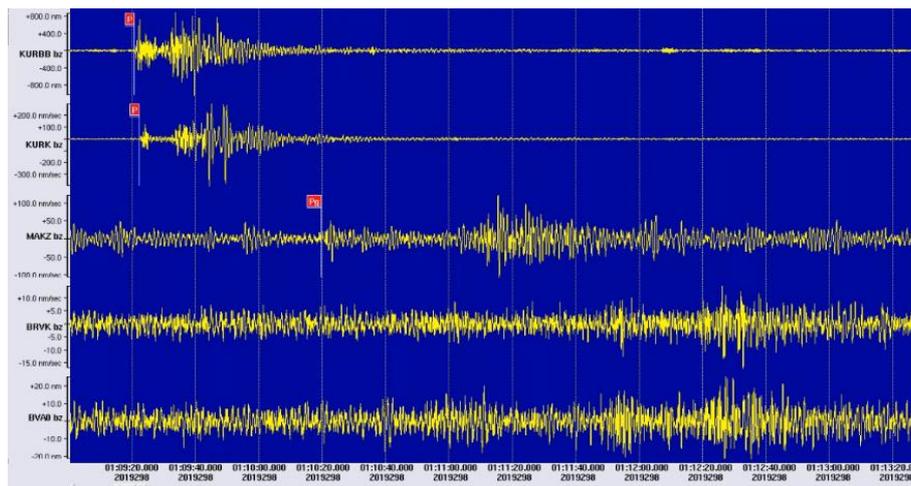


Рисунок 16. Сейсмограммы землетрясения в районе карьера Каражыра 10/25/2019, $t_0=01:09:07.8$, $\varphi=49,9979$ с.ш., $\lambda=78,8628$ в.д., $h=10$, $mpv=3,2$, $K=8$, полученные на станциях ИГИ НЯЦ РК

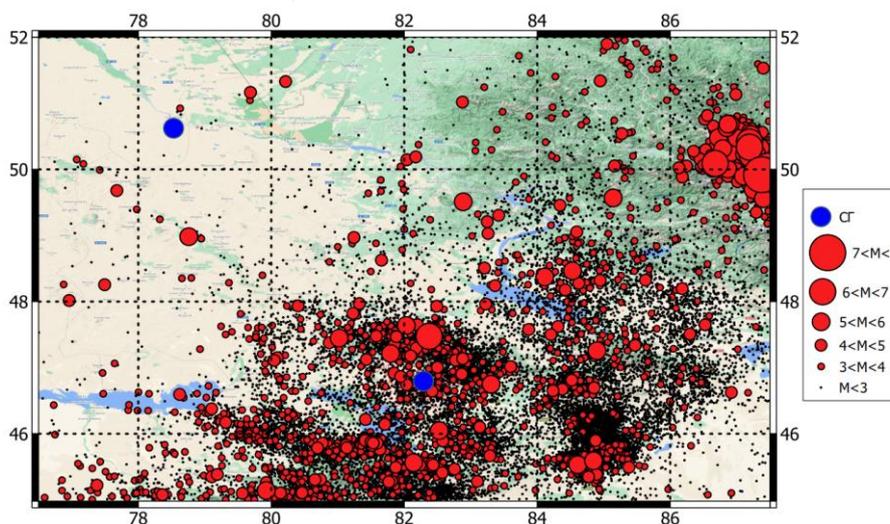


Рисунок 17. Карта эпицентров землетрясений территории ВКО и сопредельных зон за 2002–2020 гг.

Инфразвуковые станции не зарегистрировали это событие, записей не обнаружено даже при тщательном анализе. Но в случае карьерных взрывов на Экибастузе мы четко видим приход инфразвуковой волны. Это свидетельствует о том, что очаг находится не на поверхности Земли. Анализ сейсмических записей показал, что произошло «двойное» землетрясение, то есть за первым толчком через 52 секунды произошел второй толчок немного меньшей энергии, но с источником практически в том же месте. Отметим, что примерно через два часа, произошло еще одно более слабое землетрясение с энергетическим классом 8,2, то есть афтершок первого землетрясения.

Таблица. Параметры землетрясений в районе Экибастуза

Дата	Время	с.ш.	в.д.	Глубина	mpv	K
23.08.2019	14:27:10.2	51,6391	75,4829	5	4,2	10,7
23.08.2019	14:28:06	51,6391	75,4829	5	4,0	10,3
23.08.2019	16:24:44.1	51,5649	75,3869	5	3,3	8,2

В таблице приведены параметры серии землетрясений в районе Экибастуза в 2019 году.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

После весьма трудоемкой работы с записями станций, определения параметров очагов, составления сейсмических бюллетеней, последующего проведения распознавания природы источников составлен каталог землетрясений Восточного Казахстана. Станции ИГИ НЯЦ РК с 2002 года зарегистрировали около 28000 землетрясений. На рисунке 17 представлена карта эпицентров землетрясений Восточного Казахстана за 2002–2020 гг.

Станции ИГИ НЯЦ РК позволили детально провести картирование эпицентров землетрясений разной магнитуды, их вклад в изучение сейсмичности региона достаточно весом. Эти данные будут использованы для создания карт сейсмического зонирования Восточного Казахстана и расчета сейсмической опасности для отдельных площадок.

Данные исследования финансировались Министерством энергетики Республики Казахстан в рамках научно-технической программы «Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан» (ИРН – BR09158470).

ЛИТЕРАТУРА

1. Кондорская Н. В., Федорова И. В. Сейсмические станции единой системы сейсмических наблюдений СССР (ЕССН) на 01.01.1990 г. – Москва: ОИФЗ РАН, 1996. – 35 с.
2. Mikhailova N.N., Kurskeev A.K. Present Status of the Network for Seismic Observation in Kazakhstan. // Journal of earthquake prediction research. – Vol. 4. – No. 4. – 1995. – P. 497–506.
3. Аранович З.И., Кирнос Д.П., Токмаков В.А. и др. Основные типы сейсмометрических приборов. // Аппаратура и методика сейсмометрических наблюдений в СССР. – М.: Наука, 1974. – С. 43–117.
4. Землетрясения в СССР. М.: Наука. Ежегодные сборники за 1962–1991 гг.
5. Землетрясения Северной Евразии. Обнинск: ГС РАН. Ежегодные сборники за 1992–2014 гг.
6. Михайлова Н.Н., Неверова Н.П. Землетрясения Северного Тянь-Шаня. // Землетрясения в СССР в 1990 году. – М.: ГС РАН, 1996. – С. 43–45.
7. А.П. Васильев, В.А. Лаушкин // Сборник «Рожденная атомным веком». – 2002. – С. 96–114.
8. Васильев, А.П. Историография начального 50-летия создания в СССР системы дальнего обнаружения ядерных взрывов // Вестник НЯЦ РК. – 2006. – Вып. 2. – С. 5–10.
9. Васильев, А.П. История Семипалатинской лаборатории / А.П. Васильев, А. А. Востриков, В.В. Ерастов, Б.М. Данилов, Ю.К. Малышев // Вестник НЯЦ РК. – 2008. – Вып. 1. – С. 78–92.
10. Бекбулатова Д.Б., Михайлова Н.Н., Соколова И.Н. Исторические записи ядерных взрывов в архиве Института геофизических исследований // Вестник НЯЦ РК. – 2020. – Вып. 3. – С. 65.
11. Mikhailova I.N., Sokolova I.N. Monitoring System of the Institute of Geophysical Research of the Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan. // Summary of the Bulletin of the International Seismological Centre. 2016. January–June. – Volume 53. – Issue 1. – 2019. – P. 27–38.
12. Peterson J., Observation and Modeling of Seismic Background Noise / J. Peterson [et al] // Open-File Report 93 322, Albuquerque, New Mexico, 1993. – P. 42.
13. Синева З.И., Михайлова Н.Н., Комаров И.И. Изучение динамических характеристик сейсмического шума по данным цифровых станций казахстанской сети // Геофизика и проблемы нераспространения: Вестник НЯЦ РК. – 2000. – Вып. 2. – С. 24–30.
14. В. Джунек, Д.А. Клаутер, Ф. Венанзи, Дж. Роман-Нивс, С.А. Байер, Р.К. Кемерайт, Н.Н. Беляшова, Н.Н. Михайлова, З.И. Синева Выбор площадок и установка сейсмических групп в Казахстане для мониторинга соблюдения договоров о запрещении ядерных испытаний // Вестник НЯЦ РК. – 2009. – Вып. 3. – С. 22–28.
15. Комаров И.И., Синева З.И., Михайлова Н.Н., Абдрахманова Г.С. Модель сейсмического шума по наблюдениям геофизической обсерватории Маканчи //

Геофизика и проблемы нераспространения: Вестник НЯЦ РК. – 2000. – Вып. 2. – С. 17–23.

16. Saron, J. (1969a). High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis. Proc. IEEE, 57. P. 1408–1418.
17. Михайлова Н.Н., Синёва З.И. Оценка эффективности сейсмической группы PS23-Маканчи при регистрации региональных и телесеизмических событий // Геофизика и проблемы нераспространения: Вестник НЯЦ РК. – 2004. – Вып. 2(18). – С. 13–19.
18. Великанов А.Е., Михайлова Н.Н., Соколова И.Н., Аристова И.Л., Мукамбаев А.С. Изучение источников промышленных взрывов на территории Казахстана. // Вестник НЯЦ РК. – 2013. – Вып. 2. – С. 77–85.
19. Демин В.Н., Кунаков В.Г., Смирнов А.А. Новая инфразвуковая станция Международной системы мониторинга в Казахстане IS31 // Геофизика и проблемы нераспространения: Вестник НЯЦ РК. – 2002. – Вып. 2(10). – С. 14–18.
20. Беляшов А.В., Донцов В.И., Дубровин В.И., Кунаков В.Г., Смирнов А.А. Новая инфразвуковая группа «Курчатов». // Вестник НЯЦ РК. – 2013. – Вып. 2. – С. 24–30.
21. Дубровин В.И., Смирнов А.А. Новая инфразвуковая группа Маканчи и ее возможности в регистрации сигналов от различных источников. // Вестник НЯЦ РК. – 2018. – Вып. 3. – С. 63.
22. Смирнов А.А., Мукамбаев А.С., Михайлова Н.Н. Методика распознавания сейсмических событий по комплексу инфразвуковых и сейсмических данных // Вестник НЯЦ РК. – 2020. – Вып. 2. – С. 105–112.
23. Михайлова Н.Н., Полешко Н.Н., Великанов А.Е., Узбеков А.Н. О землетрясении близ Караганды 21 июня 2014 года // Вестник НЯЦ РК. – 2015. – Вып. 3. – С. 94–100.
24. Мукамбаев А.С., Михайлова Н.Н. Сейсмичность взрывных работ на территории Республики Казахстан. // Вестник НЯЦ РК. – 2017. – Вып. 4. – С. 124.

REFERENCES

1. Kondorskaya N. V., Fedorova I. V. Seismicheskie stantsii edinoi sistemy seismicheskikh nablyudeniyy SSSR (ESSN) na 01.01.1990 g. – Moscow: OIFZ RAN, 1996. – 35 p.
2. Mikhailova N.N., Kurskeev A.K. Present Status of the Network for Seismic Observation in Kazakhstan. // Journal of earthquake prediction research. – Vol. 4, – No. 4. – 1995. – P. 497–506.
3. Aranovich Z.I., Kirnos D.P., Tokmakov V.A. i dr. Osnovnye tipy seismometricheskikh priborov. // Apparatura i metodika seismometricheskikh nablyudeniyy v SSSR. – Moscow: Nauka, 1974. – P. 43–117.
4. Zemletryaseniya v SSSR. Moscow: Nauka. Ezhegodnye sborniki za 1962–1991 gg.
5. Zemletryaseniya Severnoy Evrazii. Obninsk: GS RAN. Ezhegodnye sborniki za 1992–2014 gg.
6. Mikhailova N.N., Neverova N.P. Zemletryaseniya Severnogo Tyan'-Shanya. // Zemletryaseniya v SSSR v 1990 godu. – Moscow: GS RAN, 1996. – P. 43–45.
7. A.P. Vasil'ev, V.A. Laushkin // Sbornik “Rozhdennaya atomnym vekom”. – 2002. – P. 96–114.
8. Vasil'ev, A.P. Istoriografiya nachal'nogo 50-letiya sozdaniya v SSSR sistemy dal'nego obnaruzheniya yadernykh vzryvov // Vestnik NYaTs RK. – 2006. – No. 2. – P. 5–10.

9. Vasil'ev, A.P. Istoriya Semipalatinskoy laboratorii / A.P. Vasil'ev, A. A. Vostrikov, V.V. Erastov, B.M. Danilov, Yu.K. Malyshev // Vestnik NYaTs RK. – 2008. – No. 1. – P. 78–92.
10. Bekbulatova D.B., Mikhaylova N.N., Sokolova I.N. Istoricheskie zapisi yadernykh vzryvov v arkhive Instituta geofizicheskikh issledovaniy // Vestnik NYaTs RK. – 2020. – No. 3. – P. 65.
11. Mikhailova I.N., Sokolova I.N. Monitoring System of the Institute of Geophysical Research of the Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan. // Summary of the Bulletin of the International Seismological Centre. 2016. January–June. – Volume 53. – Issue 1. – 2019. – P. 27–38.
12. Peterson J., Observation and Modeling of Seismic Background Noise / J Peterson. [et al] // Open-File Report 93 322, Albuquerque, New Mexico, 1993. – P. 42.
13. Sineva Z.I., Mikhaylova N.N., Komarov I.I. Izuchenie dinamicheskikh kharakteristik seysmicheskogo shuma po dannym tsifrovyykh stantsiy kazakhstanskoy seti // Geofizika i problemy nerastrovaniya: Vestnik NYaTs RK. – 2000. – No. 2. – P. 24–30.
14. V. Dzhunek, D.A. Klauter, F. Venanzi, Dzh. Roman-Nivs, S.A. Bayer, R.K. Kemerayt, N.N. Belyashova, N.N. Mikhaylova, Z.I. Sineva Vybor ploshchadok i ustanovka seysmicheskikh grupp v Kazakhstane dlya monitoringa soblyudeniya dogovorov o zapreshchenii yadernykh ispytaniy // Vestnik NYaTs RK. – 2009. – No. 3. – P. 22–28.
15. Komarov I.I., Sineva Z.I., Mikhaylova N.N., Abdrakhmanova G.S. Model' seysmicheskogo shuma po nablyudeniyam geofizicheskoy observatorii Makanchi // Geofizika i problemy nerastrovaniya: Vestnik NYaTs RK. – 2000. – No. 2. – P. 17–23.
16. Capon, J. (1969a). High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis. Proc. IEEE, 57, – P. 1408–1418.
17. Mikhaylova N.N. Sineva Z.I. Otsenka effektivnosti seysmicheskoy gruppy PS23-Makanchi pri registratsii regional'nykh i teleseysmicheskikh sobyitiy // Geofizika i problemy nerastrovaniya: Vestnik NYaTs RK. – 2004. – No. 2(18). – P. 13–19.
18. Velikanov A.E., Mikhaylova N.N., Sokolova I.N., Aristova I.L., Mukambaev A.S. Izuchenie istochnikov promyshlennykh vzryvov na territorii Kazakhstana. // Vestnik NYaTs RK. – 2013. – No. 2. – P. 77–85.
19. Demin V.N., Kunakov V.G., Smirnov A.A. Novaya infrazvukovaya stantsiya Mezhdunarodnoy sistemy monitoringa v Kazakhstane IS31 // Geofizika i problemy nerastrovaniya: Vestnik NYaTs RK, 2002. No. 2(10). – P. 14–18.
20. Belyashov A.V., Dontsov V.I., Dubrovin V.I., Kunakov V.G., Smirnov A.A. Novaya infrazvukovaya gruppy «Kurchatov». // Vestnik NYaTs RK. – 2013. – No. 2. – P. 24–30.
21. Dubrovin V.I., Smirnov A.A. Novaya infrazvukovaya gruppy Makanchi i ee vozmozhnosti v registratsii signalov ot razlichnykh istochnikov. // Vestnik NYaTs RK. – 2018. – No. 3. – P. 63.
22. Smirnov A.A., Mukambaev A.S., Mikhaylova N.N. Metodika raspoznavaniya seysmicheskikh sobyitiy po kompleksu infrazvukovykh i seysmicheskikh dannykh // Vestnik NYaTs RK. – 2020. – No. 2. – P. 105–112.
23. Mikhaylova N.N., Poleshko N.N., Velikanov A.E., Uzbekov A.N. O zemletryasenii bliz Karagandy 21 iyunya 2014 goda // Vestnik NYaTs RK. – 2015. – No. 3. – P. 94–100.
24. Mukambaev A.S., Mikhaylova N.N. Seysmichnost' vzryvnykh rabot na territorii Respubliki Kazakhstan. // Vestnik NYaTs RK. – 2017. – No. 4. – P. 124.

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҰЛТТЫҚ ЯДРОЛЫҚ ОРТАЛЫҒЫНЫҢ СЕЙСМИКАЛЫҚ СТАНЦИЯЛАРЫ ЖӘНЕ ОЛАРДЫҢ ШЫҒЫС ҚАЗАҚСТАННЫҢ СЕЙСМИКАЛЫҚ ҚАУІПІН БАҒАЛАУДАҒЫ МІНДЕТТЕРГЕ ҚОСҚАН ҮЛЕСІ

Н.Н. Михайлова, А.С. Мукамбаев

ҚР ҰЯО РМК «Геофизикалық зерттеулер институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

2021–2023 жылдары сейсмологтардың алдына Шығыс Қазақстан аумағын сейсмикалық барлау бойынша жұмыстар жүргізу міндеті қойылды. Бұл өңірдің сейсмикалық станцияларының желісі екі сейсмикалық топтармен және ҚР ҰЯО ГЗИ екі үшкомпонентті станцияларымен және ҚР БҒМ СТЭЭ екі үшкомпонентті станцияларымен ұсынылған. Жұмыста ҚР ҰЯО ГЗИ станцияларының сипаттамалары берілді, олардың әртүрлі қашықтықтардағы түрлі магнитудалардағы оқиғаларды тіркеудегі мүмкіндіктері бағаланды. Осы станциялардың жарылыстары мен жерсілкінулерін тіркеуі туралы ақпарат ұсынылған. 2002–2020 жж. барлығы ҚР ҰЯО ГЗИ станцияларымен 34000-ға жуық оқиғалар тіркелді. Жарылыстарды танығаннан және оларды сейсмикалық оқиғалар каталогынан шығарғаннан кейін 28000 жерсілкінулерін қамтитын Шығыс Қазақстан аумағындағы жерсілкінулерінің эпицентрлерінің картасы жасалды. Бұл материал осы аймақтағы сейсмикалық қауіпті бағалау үшін ақпараттық негіз болып табылады.

Түйін сөздер: станция, сейсмикалық топ, жер сілкінісі, жарылыс, сейсмограмма, каталог, магнитуда, эпицентр.

**SEISMIC STATIONS OF THE NATIONAL NUCLEAR CENTER OF RK AND ITS CONTRIBUTION
INTO SOLVING OF TASKS ON SEISMIC HAZARD ASSESSMENT OF THE EAST KAZAKHSTAN**

N.N. Mikhailova, A.S. Mukambayev

NNC RK branch “Institute of Geophysical Research”, Kurchatov, Kazakhstan

In 2021–2023 a task set before the seismologists was to conduct work on seismic zoning of the east Kazakhstan territory. The seismic stations network of that region is represented by two seismic arrays and two three-component stations of the IGR NNC RK and two three-component stations of the SEME MES RK. The work describes the parameters of the IGR NNC RK stations, estimates its capabilities in recording the events of different magnitudes at various distances. In 2002–2020 the IGR NNC RK stations recorded almost 34000 events. After discrimination of explosions and its removal from the catalogue of seismic events the map of earthquakes epicenters at the east Kazakhstan territory that includes 28000 earthquakes was constructed. This material is one of the main informational components for seismic hazard assessment in this region.

Keywords: *station, seismic group, earthquake, explosion, seismogram, catalogue, magnitude, epicenter.*

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2022-2-17-22>
УДК 550.344

КАРТИРОВАНИЕ ПОЛЯ ПОГЛОЩЕНИЯ S-ВОЛН В РАЙОНАХ ВОСТОЧНОГО КАЗАХСТАНА И ЗАПАДНОГО АЛТАЯ ПО ДАННЫМ СЕЙСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ МАКАНЧИ

Ю.Ф. Копничев¹⁾, И.Н. Соколова²⁾

¹⁾ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

²⁾ Филиал «Институт геофизических исследований» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

E-mail для контактов: sokolova@kndc.kz

Анализируются записи местных землетрясений из районов восточного Казахстана и Западного Алтая, полученные станциями MAKZ и MKAR. Рассматривается корреляционная зависимость отношения максимальных амплитуд волн Sn и Pn (параметра Sn/Pn) от расстояния. На основе данной зависимости проводится картирование поля поглощения S-волн в литосфере рассматриваемого района. Особое внимание уделяется зонам высокого поглощения в литосфере, проводится их сопоставление с сейсмичностью. Установлено, что наиболее высокое поглощение соответствует очаговой зоне сильнейшего Чуйского землетрясения 27.09.2003 г. ($M_w=7,3$). Кроме того, выделена аномалия высокого поглощения в районе Семипалатинского испытательного полигона (СИП) и к югу от него. Обсуждаются причины высокого поглощения поперечных волн в очаговых зонах сильных землетрясений, а также на некоторых участках СИП.

Ключевые слова: литосфера; поглощение; S-волны; восточный Казахстан; Западный Алтай; глубинные флюиды.

ВВЕДЕНИЕ

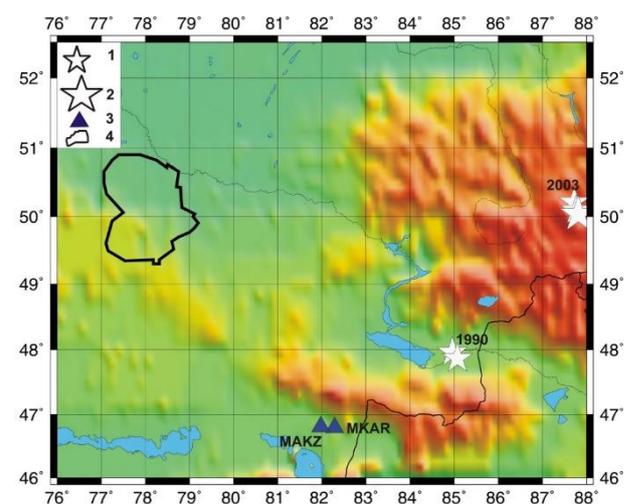
В последние 20 лет разными авторами получено большое количество данных, свидетельствующих о важной роли глубинных флюидов в процессах подготовки сильных коровых землетрясений. Перед такими событиями формируются зоны высокого содержания флюидов в нижней коре и верхах мантии [1–7]. При этом в случае, если флюиды образуют связную сеть, заполняющую поры и трещины, на кровле двухфазного слоя имеет место концентрация напряжений [8], что при достаточной мощности такого слоя может служить триггером, обеспечивающим реализацию сильного землетрясения. В связи с этим выделение зон повышенного содержания флюидов может быть полезным для прогноза областей подготовки сильных сейсмических событий [9]. В свою очередь, было показано, что перспективные методы выделения таких областей связаны с картированием поля поглощения короткопериодных S-волн в литосфере [3–9]. В настоящей статье описываются результаты изучения характеристик поля поглощения поперечных волн в районе восточного Казахстана и Западного Алтая.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

В работе анализировались записи землетрясений на региональных расстояниях, полученные сейсмическими станциями сети мониторинга Института геофизических исследований (ИГИ) НЯЦ РК MKAR и MAKZ [10] (рисунок 1). Широкополосная трехкомпонентная станция MAKZ глобальной сети станций IRIS GSN находится в Урджарском районе Восточно-Казахстанской области в 3 км к северо-западу от поселка Маканчи (начало работы в 1996 г.). Первичная сейсмическая группа международной системы мониторинга MKAR установлена в 1999 г. в Урджарском

районе Восточно-Казахстанской области в 25 км к востоку от поселка Маканчи. Сейсмическая группа Маканчи состоит из 10 точек наблюдения, на одной из них (МК31) установлен широкополосный трехкомпонентный сейсмометр, данные которого использовались для обработки [10]. На рисунке 1 показаны эпицентры сильных землетрясений (Зайсанского, 14.06.1990 г. $M=6,6$ и Чуйского, 27.09.2003 г.), а также их сильнейших афтершоков.

В общей сложности обработаны записи около 120 землетрясений с магнитудами 4,0–5,5, полученные в 1997–2021 гг. в диапазоне эпицентральных расстояний 210–625 км.



Эпицентры сильных землетрясений: 1 – $M=6,0-6,9$; 2 – $M_w=7,3$;
3 – станции MAKZ и MKAR;
4 – Семипалатинский испытательный полигон (СИП)

Рисунок 1. Карта района исследований

МЕТОДИКА

При анализе сейсмограмм, полученных станциями MKAR и MAKZ, мы использовали отношения максимальных амплитуд волн Sn и Pn (параметр $\lg A_{Sn}/A_{Pn}$, который мы для краткости будем обозначать как Sn/Pn) [3–7]. Эти волновые группы распространяются в верхней мантии; при использовании записей одной станции параметр Sn/Pn служит мерой поглощения короткопериодных поперечных волн в литосфере в районах эпицентров рассматриваемых событий (рисунок 2). Параметр Sn/Pn используется для нормировки, поскольку волны Sn и Pn распространяются близкими трассами. При этом длина отрезков трасс, проходимых волнами Sn в нижней коре, составляет несколько десятков км и почти не зависит от Δ , поэтому изменение параметра Sn/Pn с расстоянием происходит в основном вследствие вариаций поглощения в верхах мантии.

При обработке сейсмограмм применялась узкополосная частотная фильтрация, которая позволяет исключить из анализа эффекты, связанные с различием спектров очагового излучения для разных событий, зависимостью эффективной добротности от частоты

и т.д. Использовался фильтр с центральной частотой 1,25 Гц и шириной 2/3 октавы, аналогичный соответствующему ЧИСС-каналу [11].

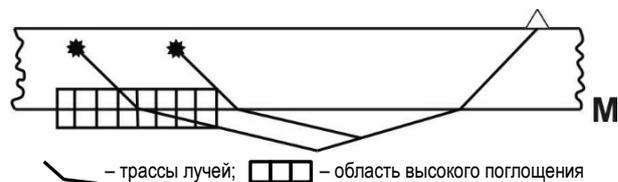
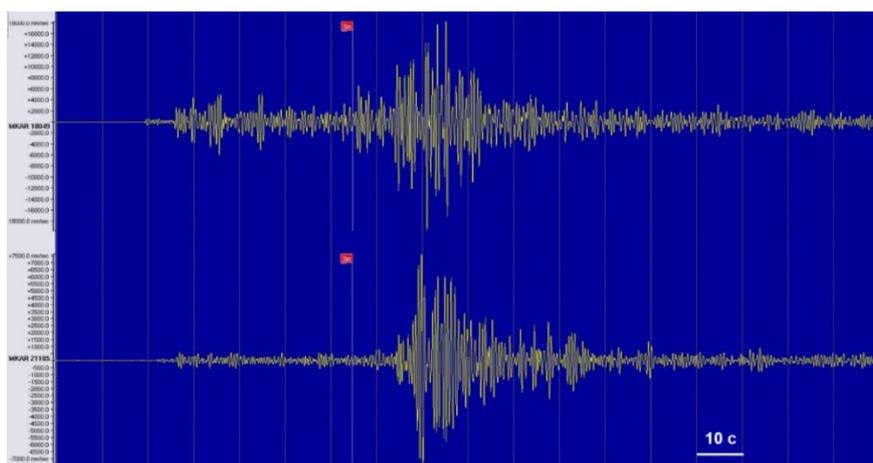


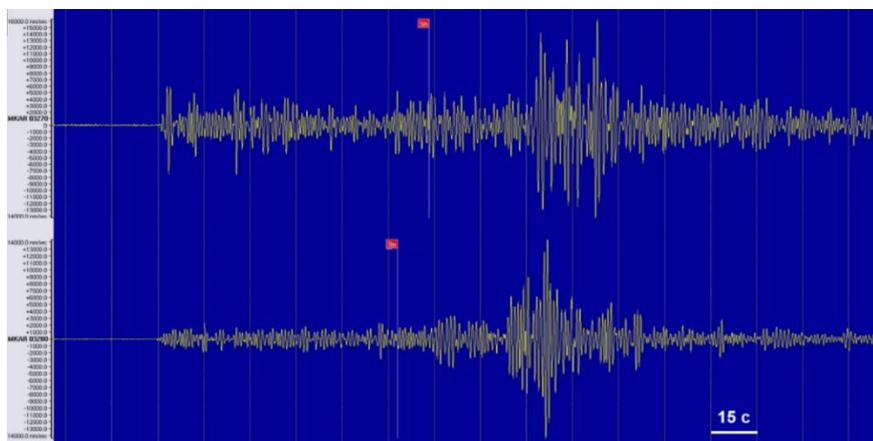
Рисунок 2. Схема распространения волн Sn

АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

На рисунке 3 представлены примеры сейсмограмм землетрясений из рассматриваемого района. Из рисунка 3а следует, что величина Sn/Pn гораздо ниже для события вблизи от площадки Балапан, чем для землетрясения с эпицентром к юго-западу от данной площадки. Рисунок 3б показывает, что относительный уровень волны Sn гораздо ниже для афтершока сильнейшего Чуйского землетрясения 2003 г. по сравнению с событием к западу от очага сильного землетрясения.



а) 18.02.2018 г., 48,25°, 77,49°, h=10 км, Δ =395 км (верхняя сейсмограмма).
15.04.2021 г., 49,66°, 78,49°, h=10 км, Δ =425 км. Показаны моменты вступления волн Sn.



б) 27.09.2003 г., 50,43°, 87,69°, h=10 км, Δ =568 км (верхняя сейсмограмма),
07.10.2003 г., 50,14°, 86,91°, h=10 км, Δ =505 км

Рисунок 3. Примеры сейсмограмм из районов восточного Казахстана и Западного Алтая. Станция MKAR.

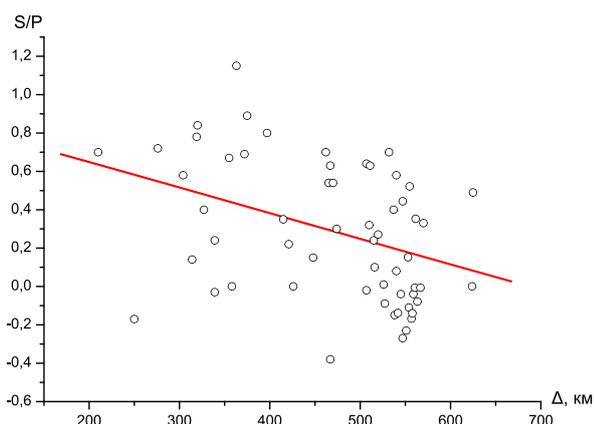


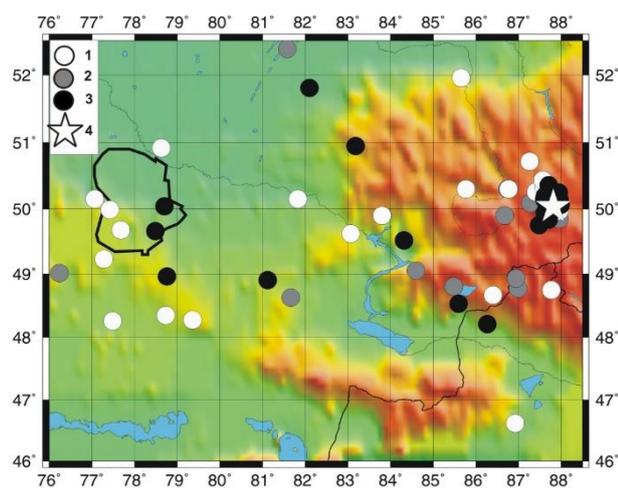
Рисунок 4. Зависимость $S_n/P_n(\Delta)$ для рассматриваемого района

Рисунок 4 иллюстрирует зависимость параметра S_n/P_n от расстояния для рассматриваемого района. Подавляющее большинство точек на графике соответствует средним значениям, полученным для близких землетрясений в небольших областях размером до нескольких десятков километров. На фоне большого разброса данных величина S_n/P_n довольно быстро падает с расстоянием, корреляционная зависимость описывается выражением:

$$S_n/P_n \sim 0,92 - 0,00135 \Delta,$$

коэффициент корреляции $r = 0,38$.

Картирование поля поглощения проводилось по отклонениям параметра S_n/P_n от корреляционной зависимости. Отклонениям $\Delta S_n/P_n > 0,15$ соответствует пониженное, $0,15 \geq \Delta S_n/P_n \geq -0,15$ – промежуточное и $\Delta S_n/P_n < -0,15$ – повышенное поглощение.



Поглощение: 1 – пониженное, 2 – промежуточное, 3 – повышенное.
4 – эпицентр Чуйского землетрясения 2003 г.
Черным контуром показаны границы СИП

Рисунок 5. Неоднородности поля поглощения S-волн в литосфере восточного Казахстана и Западного Алтая

На рисунке 5 показаны неоднородности поля поглощения в рассматриваемом районе. Прослежи-

вается аномалия высокого поглощения в очаговой зоне сильного Чуйского землетрясения 2003 г. ($M=7,3$). Выделяется также полоса повышенного и промежуточного поглощения, протягивающаяся в северо-западном направлении вдоль границы юго-западного Алтая. Кроме того, на фоне в целом сравнительно слабого поглощения в районе Казахской платформы выделяется небольшая область низких величин S_n/P_n на юго-востоке СИП и к югу от него.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Из рисунка 5 следует, что наиболее яркая аномалия высокого поглощения в рассматриваемом районе связана с очаговой зоной сильнейшего Чуйского землетрясения 2003 г. ($M_w=7,3$). Это согласуется с полученными ранее данными о концентрации флюидов в литосфере перед сильными коровыми землетрясениями [1–7, 9]. Дальнейшее накопление данных, возможно, позволит выделить в рассматриваемом районе другие области высокого поглощения, которые могут быть связаны с подготовкой сильных сейсмических событий.

В районе Казахской платформы, к северу от оз. Балхаш, наблюдается в основном пониженное поглощение, что не противоречит имеющимся данным о характеристиках литосферы слабосейсмичных структур [12]. В то же время в области площадки Балапан и к югу от нее (на расстояниях до 100 км) выделяется субмеридиональная полоса высокого поглощения. Это согласуется с приведенными в работе [13] данными об аномалиях поглощения S-волн в области этой площадки, полученными по записям калибровочных взрывов.

Отметим, что до начала ядерных испытаний район СИП ничем не выделялся среди других сходных по тектоническим условиям Казахской платформы (в частности, отсутствует какая-либо информация о местных землетрясениях в районе полигона до 1976 г.). Учитывая этот факт, а также существование яркой тепловой аномалии в данном районе [14], естественно предположить, что изменения структуры поля поглощения есть результат длительного интенсивного воздействия мощных взрывов на геологическую среду.

По нашему мнению, единственная возможная интерпретация обнаруженных эффектов связана с подъемом флюидов из нижней части земной коры и верхов мантии. Ранее было показано, что в районе Северного Тянь-Шаня активная миграция флюидов по зоне Заилийского разлома наблюдалась после сравнительно слабых химических взрывов (мощностью до нескольких килотонн [15]). Тем более этого можно ожидать для района СИП, где в течение 40 лет проводилось в среднем за год более 10 ядерных взрывов, мощность многих из которых превышала 100 кт [16].

Характерно, что подъем флюидов наиболее ярко проявился в области площадки Балапан, где проходят два крупных разлома, проникающих в верхнюю

мантию [13]. Как известно, зоны глубинных разломов, содержащих заметную долю флюидов, являются, по терминологии Пригожина [17], диссипативными структурами, которым, свойственна, в частности, высокая чувствительность к внешним воздействиям. Под действием сейсмических колебаний при мощных взрывах происходит раскрытие пор и трещин различного масштаба, что облегчает подъем флюидов из нижней коры и верхней мантии по разломным зонам. (Известно, что при импульсном акустическом воздействии на фильтрующую среду ее проницаемость может возрасти на несколько порядков [18]). Полученные в работе [13] данные о тонкой структуре поля поглощения в районе СИП свидетельствуют о том, что миграция флюидов может происходить с глубин порядка 100 км.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обработаны записи местных землетрясений из районов восточного Казахстана и Западного Алтая, полученные станциями МАКЗ и МКАР. Построена корреляционная зависимость параметра S_n/P_n от расстояния. На основе данной зависимости проведено картирование поля поглощения S-волн в литосфере рассматриваемого района. Установлено, что наиболее высокое поглощение соответствует очаговой зоне сильнейшего Чуйского землетрясения 2003 г. Кроме того, выделена аномалия высокого поглощения в районе СИП и к югу от полигона. Полученные данные свидетельствуют о миграции глубинных флюидов перед сильными землетрясениями, а также в результате длительного интенсивного техногенного воздействия на земную кору при крупной серии мощных ядерных взрывов.

Данные исследования финансировались Министерством энергетики Республики Казахстан в рамках научно-технической программы «Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан» (ИРН – BR09158470).

ЛИТЕРАТУРА

- Husen, S. Postseismic fluid flow after the large subduction earthquake of Antofagasta, Chile / S. Husen, E. Kissling // *Geology*. – 2001. – V. 29. – No. 9. – P. 847–850.
- Ogawa, R. Slow postseismic recovery of geoid depression formed by the 2004 Sumatra-Andaman earthquake by mantle water diffusion / R. Ogawa, K. Heki // *Geophys. Res. Lett.* – 2007. – V. 34. L06313. <https://doi.org/10.1029/2007GL029340>
- Копничев, Ю.Ф. Пространственно-временные вариации поля поглощения S-волн в очаговых зонах сильных землетрясений Тянь-Шаня / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // *Физика Земли*. – 2003. – № 7. – С. 35–47.
- Копничев, Ю.Ф. Неоднородности поля поглощения короткопериодных поперечных волн в литосфере Центральной Азии и их связь с сейсмичностью / Ю.Ф. Копничев, И.Н.Соколова // *Докл. РАН*. – 2011. – Т. 437. – № 1. – С. 97–101.
- Копничев, Ю.Ф. Неоднородности поля поглощения короткопериодных поперечных волн в литосфере Восточного Тянь-Шаня и их связь с сейсмичностью / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // *Докл. РАН*. – 2012. – Т. 442. – № 6. – С. 821–824.
- Копничев, Ю.Ф. Аномалии высокого поглощения S-волн и кольцевые структуры сейсмичности в литосфере Алтая: возможная подготовка сильных землетрясений / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // *Геофизические процессы и биосфера*. – 2016. – Т. 15. – № 1. – С. 57–72.
- Копничев, Ю.Ф. Пространственно-временные вариации поля поглощения поперечных волн в верхней мантии сейсмически активных и слабосейсмичных районов / Ю.Ф. Копничев, Д.Д. Гордиенко, И.Н. Соколова // *Вулканология и сейсмология*. – 2009. – № 1. С. 49–64.
- Каракин, А.В. Гидродинамика и структура двухфазной астеносферы / А.В. Каракин, Л.И. Лобковский // *ДАН СССР*. – 1982. – Т. 268. – № 2. – С. 324–329.
- Копничев, Ю.Ф., Анализ кольцевых структур сейсмичности в литосфере Восточного Тянь-Шаня: возможная подготовка сильных землетрясений / Ю.Ф. Копничев, И.Н.Соколова // *Вестник АО «КазНИИАС»*. – 2017. – № 1. – С. 16–31.
- Mikhailova, N.N. Monitoring system of the Institute of Geophysical Research of the Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan / N.N. Mikhailova, I.N. Sokolova // *Summary of the Bulletin of the International Seismological Centre 2016 January-June*. – 2019. – Vol. 53. – Issue 1. – P. 27–38.
- Копничев, Ю.Ф. Короткопериодные сейсмические волновые поля /Ю.Ф. Копничев //М.: Наука. 1985. 176 с.
- Ваньян, Л.Л., О природе электропроводности консолидированной коры / Л.Л. Ваньян, Р.Д. Хайндман // *Физика Земли*. – 1996. – № 4. – С. 5–11.
- Копничев, Ю.Ф. Пространственно-временные вариации структуры поля поглощения поперечных волн в районе Семипалатинского полигона / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // *Физика Земли*. – 2001. – № 11. – С. 73–86.
- Sultangazin, U.M. Monitoring of temperature anomalies in the former Semipalatinsk test site / U.M. Sultangazin, E.A. Zakarin, L.F. Spivak et al. // *Ser. Method. Instrum. Acad. Sci. Paris*. – 1998. – V. 326. – P. 135–140.
- Копничев, Ю.Ф. О воздействии мощных взрывов на структуру поля поглощения поперечных волн в земной коре и верхах мантии / Ю.Ф. Копничев // *Докл. РАН*. – 1998. – Т. 363. – № 1. – С. 819–822.
- Михайлов, В.Н. (ред.). Испытания ядерного оружия и ядерные взрывы в мирных целях СССР, 1949–1990 гг. / В.Н. Михайлов // *РФЯЦ-ВНИИЭФ*. – Саров. – 1996. – 66 с.
- Николис, Г. Самоорганизация в неравновесных системах. От диссипативных структур – к упорядоченности через флуктуации. / Г. Николис, И. Пригожин // *М.: Мир*. – 1979. – 512 с.
- Барабанов, В.Л. О некоторых эффектах вибрационного сейсмического воздействия на водонасыщенную среду. Сопоставление их с эффектами удаленных сильных землетрясений / В.Л. Барабанов, А.О. Гриневский, И.Г. Киссин, А.В. Николаев // *Докл. АН СССР*. – 1987. – Т. 297. – № 1. – С. 53–56.

REFERENCES

1. Husen, S. Postseismic fluid flow after the large subduction earthquake of Antofagasta, Chile /S. Husen, E. Kissling // *Geology*. – 2001. – V. 29. – No. 9. – P. 847–850.
2. Ogawa, R. Slow postseismic recovery of geoid depression formed by the 2004 Sumatra-Andaman earthquake by mantle water diffusion / R. Ogawa, K. Heki // *Geophys. Res. Lett.* – 2007. – V. 34. L06313. <https://doi.org/10.1029/2007GL029340>
3. Kopnichev, Yu.F. Prostranstvenno-vremennye variatsii polya pogloshcheniya S-voln v ochagovykh zonakh sil'nykh zemletryaseniy Tyan'-Shanya / Yu.F. Kopnichev, I.N. Sokolova // *Fizika Zemli*. – 2003. – No. 7. – P. 35–47.
4. Kopnichev, Yu.F. Neodnorodnosti polya pogloshcheniya korotkoperiodnykh poperechnykh voln v litosfere Tsentral'noy Azii i ikh svyaz' s seysmichnost'yu / Yu.F. Kopnichev, I.N. Sokolova // *Dokl. RAN*. – 2011. – T. 437. – No. 1. – P. 97–101.
5. Kopnichev, Yu.F. Neodnorodnosti polya pogloshcheniya korotkoperiodnykh poperechnykh voln v litosfere Vostochnogo Tyan'-Shanya i ikh svyaz' s seysmichnost'yu / Yu.F. Kopnichev, I.N. Sokolova // *Dokl. RAN*. – 2012. – T. 442. – No. 6. – P. 821–824.
6. Kopnichev, Yu.F. Anomalii vysokogo pogloshcheniya S-voln i kol'tsevye struktury seysmichnosti v litosfere Altaya: vozmozhnaya podgotovka sil'nykh zemletryaseniy / Yu.F. Kopnichev, I.N. Sokolova // *Geofizicheskie protsessy i biosfera*. – 2016. – T. 15. – No. 1. – P. 57–72.
7. Kopnichev, Yu.F. Prostranstvenno-vremennye variatsii polya pogloshcheniya poperechnykh voln v verkhney mantii seysmicheskii aktivnykh i slaboseysmichnykh rayonov / Yu.F. Kopnichev, D.D. Gordienko, I.N. Sokolova // *Vulkanologiya i seysmologiya*. – 2009. – No. 1. P. 49–64.
8. Karakin, A.V. Gidrodinamika i struktura dvukhfaznoy astenosfery / A.V. Karakin, L.I. Lobkovskiy // *DAN SSSR*. – 1982. – T. 268. – No. 2. – P. 324–329.
9. Kopnichev, Yu.F., Analiz kol'tsevykh struktur seysmichnosti v litosfere Vostochnogo Tyan'-Shanya: vozmozhnaya podgotovka sil'nykh zemletryaseniy / Yu.F. Kopnichev, I.N. Sokolova // *Vestnik AO «KazNIISA»*. – 2017. – No. 1. – P. 16–31.
10. Mikhailova, N.N. Monitoring system of the Institute of Geophysical Research of the Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan /N.N. Mikhailova, I.N. Sokolova // *Summary of the Bulletin of the International Seismological Centre 2016 January-June*. – 2019. – Vol. 53. – Issue 1. – P. 27–38.
11. Kopnichev, Yu.F. Korotkoperiodnye seysmicheskie volnovye polya /Yu.F. Kopnichev // *Moscow: Nauka*. – 1985. – 176 p.
12. Van'yan, L.L., O prirode elektroprovodnosti konsolidirovannoy kory / L.L. Van'yan, R.D. Khayndman // *Fizika Zemli*. – 1996. – No. 4. – P. 5–11.
13. Kopnichev, Yu.F. Prostranstvenno-vremennye variatsii struktury polya pogloshcheniya poperechnykh voln v rayone Semipalatinskogo poligona / Yu.F. Kopnichev, I.N. Sokolova // *Fizika Zemli*. – 2001. – No. 11. – P. 73–86.
14. Sultangazin, U.M. Monitoring of temperature anomalies in the former Semipalatinsk test site / U.M. Sultangazin, E.A. Zakarin, L.F. Spivak et al. // *Ser. Method. Instrum. Acad. Sci. Paris*. – 1998. – V. 326. – P. 135–140.
15. Kopnichev, Yu.F. O vozdeystvii moshchnykh vzryvov na strukturu polya pogloshcheniya poperechnykh voln v zemnoy kore i verkhakh mantii / Yu.F. Kopnichev // *Dokl. RAN*. – 1998. – T. 363. – No. 1. – P. 819–822.
16. Mikhaylov, V.N. (red.). Ispytaniya yadernogo oruzhiya i yadernye vzryvy v mirnykh tselyakh SSSR, 1949–1990 gg. / V.N. Mikhaylov // *RFYaTs-VNIEF*. – Sarov. – 1996. – 66 p.
17. Nikolis, G. Samoorganizatsiya v neravnovesnykh sistemakh. Ot dissipativnykh struktur – k uporyadochennosti cherez fluktuatsii. / G. Nikolis, I. Prigozhin // *Moscow: Mir*. – 1979. – 512 p.
18. Barabanov, V.L. O nekotorykh effektakh vibratsionnogo seysmicheskogo vozdeystviya na vodonasyschennuyu sredu. Sopostavlenie ikh s effektami udalennykh sil'nykh zemletryaseniy / V.L. Barabanov, A.O. Grinevskiy, I.G. Kissin, A.V. Nikolaev // *Dokl. AN SSSR*. – 1987. – T. 297. – No. 1. – P. 53–56.

МКАР СЕЙСМИКАЛЫҚ СТАНЦИЯСЫНЫҢ ДЕРЕКТЕРІ БОЙЫНША
ШЫҒЫС ҚАЗАҚСТАН ЖӘНЕ БАТЫС АЛТАЙ АУДАНДАРЫНДАҒЫ
S-ТОЛҚЫНДАРДЫ СІЦІРУ ӨРІСІН КАРТАҒА ТҮСІРУ

Ю.Ф. Копничев¹⁾, И.Н. Соколова²⁾

¹⁾ *Ресей Ғылым Академиясының Жер физикасы институты, Мәскеу, Ресей*

²⁾ *ҚР ҰЯО РМК «Геофизикалық зерттеулер институты» филиалы, Қурчатов, Қазақстан*

МАКЗ және МКАР станциялары алған Шығыс Қазақстан және Батыс Алтай аудандарындағы жергілікті жерсілкінулерінің жазбалары талданады. Sn және Pn (Sn/Pn параметрі) толқындарының максималды амплитудасы қатынасының қашықтыққа корреляциялық тәуелділігі қарастырылады. Осы тәуелділіктің негізінде қарастырылып отырған ауданның литосферасындағы S-толқындарының сіңіру өрісі картаға түсіріледі. Литосферадағы жоғары сіңіру аймақтарына ерекше назар аударылады, олар сейсмикалықпен салыстырылады. Ең жоғары сіңіру 2003 жылғы ең күшті Шу жерсілкінулерінің ошақтық аймағына сәйкес келетіні анықталды (Mw=7,3). Бұдан басқа, Семей сынақ полигоны (ССП) ауданында және одан оңтүстікке қарай жоғары сіңіру аномалиясы айқындалды. Қатты жерсілкінулерінің ошақтық аймақтарында, сондай-ақ ССП кейбір учаскелерінде көлденең толқындардың жоғары сіңу себептері талқыланады.

Түйінді сөздер: литосфера, S-толқындарының сіңіру, Шығыс Қазақстан, Батыс Алтай.

**MAPPING OF S-WAVES ATTENUATION FIELD AT EAST KAZAKHSTAN
AND WEST ALTAY REGIONS BY DATA OF MKAR SEISMIC STATION**

¹⁾ Yu.F. Kopnichev, ²⁾ I.N. Sokolova

¹⁾ *Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²⁾ *Branch "Institute of Geophysical Research" RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan*

We are analyzing recordings of local earthquakes in the regions of Eastern Kazakhstan and Western Altay, obtained by stations MAKZ and MKAR. We consider correlation dependence of maximum amplitudes ratio for Sn and Pn waves (Sn/Pn parameter) on distance. On the base of this dependence mapping of S wave attenuation field in the lithosphere of this region is carried out. A special attention is paid to high attenuation zones, comparison with seismicity is carried out. It is established, that the highest attenuation corresponds to the rupture zone of large Chu earthquake of 2003 (Mw=7.3). Besides, an anomaly of high attenuation is found in the area of Semipalatinsk test site (STS) and to the south of it. We discuss reasons of high shear wave attenuation in rupture zones of large earthquakes, and also within some sections of the STS.

Keywords: *lithosphere; attenuation; S waves; eastern Kazakhstan, Western Altay; deep-seated fluids.*

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2022-2-23-31>
УДК 550.348.435

МАГНИТУДНАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ГРУППЫ КАРАТАУ В МОНИТОРИНГЕ СЕЙСМИЧНОСТИ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ

Н.А. Сейнасинов^{1,2)}, Н.Н. Михайлова¹⁾

¹⁾ Филиал «Институт геофизических исследований» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

²⁾ Казахский Национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан

E-mail для контактов: anurbek1122@gmail.com

На представительном статистическом материале, полученном по результатам работы сейсмической группы Каратау за более, чем 10-летний период, изучена ее возможность регистрации событий разной магнитуды на разных эпицентральных расстояниях (магнитудная чувствительность станции). Изучена зависимость магнитудной чувствительности от азимута прихода сейсмических волн. Показано, что в разных направлениях станция обладает разными возможностями в регистрации слабых землетрясений на одном и том же расстоянии. Представлены примеры регистрации слабых событий станцией Каратау на двух сериях взрывов снарядов на военных складах в Южном Казахстане в 2019 и 2021 гг.

Ключевые слова: сейсмическая группа, землетрясение, взрыв, сейсмограмма, бюллетень, магнитуда, эпицентр, азимутальная зависимость.

ВВЕДЕНИЕ

В 1994 году на территории Казахстана начала сейсмическую регистрацию новая цифровая сеть сейсмических станций филиала ИГИ НЯЦ РК (далее ИГИ), основными задачами которой являются мониторинг ядерных испытаний и землетрясений в рамках Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний [1]. В ее состав входят 7 трехкомпонентных станций, 5 сейсмических групп (рисунок 1). Данные

этой системы используются для задач глобального и регионального сейсмического мониторинга. Они передаются в Международные центры для составления мировых сейсмологических бюллетеней (REB, ISC, EMSC, ГС РАН) и проведения научных исследований учеными в разных странах (IRIS/DMC), а также используются в задачах, стоящих перед Республиканской системой сейсмических наблюдений [1].

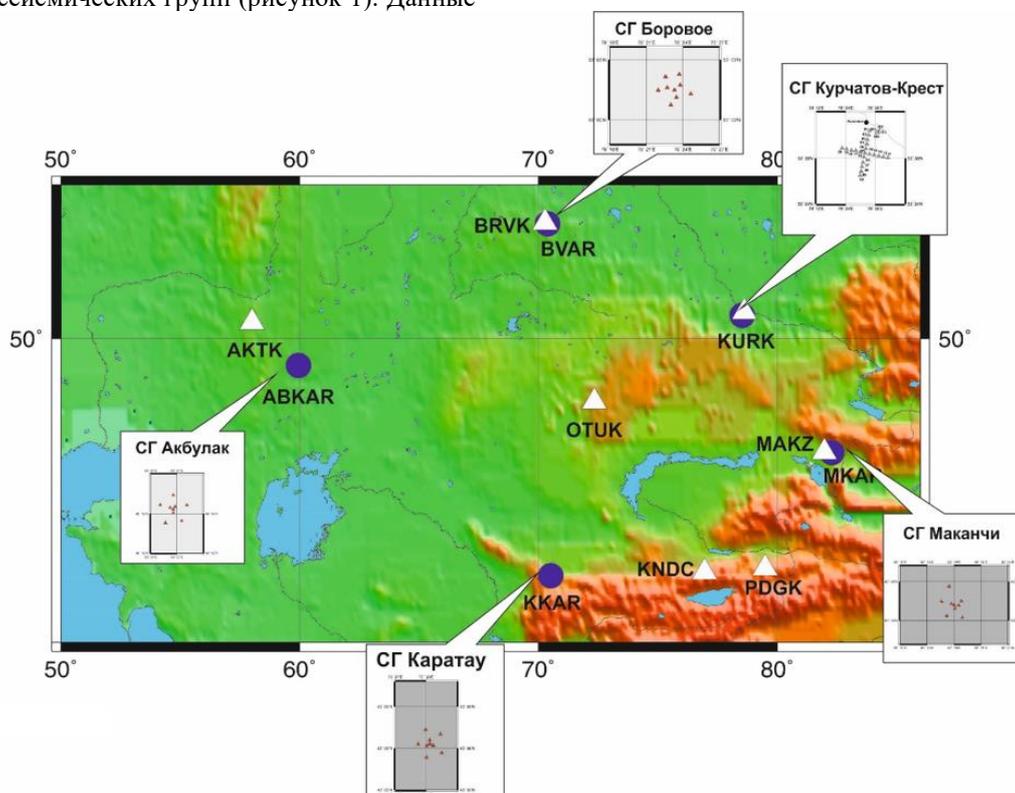


Рисунок 1. Сеть сейсмических станций, работающая под управлением филиала «Институт геофизических исследований» РГП НЯЦ РК на территории Казахстана

Одной из наиболее эффективных в мониторинге является сейсмическая группа (СГ) Каратау, которая работает уже почти 20 лет. Анализу ее возможностей посвящена настоящая работа.

Сейсмические станции ИГИ НЯЦ РК (рисунок 1) характеризуются отличными условиями для регистрации сейсмических сигналов, низким уровнем сейсмических шумов в районе расположения [2–4]. Благодаря тщательному выбору площадок под строительство станций с точки зрения геологии и характеристик сейсмического шума, удачной конфигурации групп, комплексированию широкополосной и короткопериодной аппаратуры, все станции системы являются высокочувствительными как к региональным, так и к телесеismicким событиям [1]. Это позволяет успешно использовать систему как в рамках национального, так и глобального мониторинга. Для создания сейсмического бюллетеня Центр данных производит в режиме реального времени данные сейсмических групп и трехкомпонентных станций ИГИ, а также дополнительно данные зарубежных сейсмических групп ZAL (Россия) и АВКТ (Туркменистан), данные зарубежных трехкомпонентных станций ААК IRIS IDA. Для создания совместного с СОМЭ МОН РК бюллетеня используются представляемые этой сетью оперативно замеренные времена вступления и амплитуды сейсмических фаз.

Одной из самых эффективных станций сети является сейсмическая группа (СГ) Каратау, расположенная в Жамбылской области Казахстана (таблица 1, [5]). СГ расположена в высокосейсмичном районе Центральной Азии [6], по вкладу в сейсмический бюллетень Центра данных она занимает второе место после сейсмической группы Мақанчи. Кроме того, Каратау играет важную роль в сейсмическом мониторинге ядерных испытаний, так как является чувствительной станцией и расположена на региональных расстояниях от испытательных ядерных полигонов Азии (Похаран, Чагай, Лобнор). СГ Каратау зарегистрировала, участвовала в обработке ядерных испытаний в Северной Корее [7].

В связи с этим, исследование эффективности и чувствительности СГ Каратау является актуальной задачей.

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СГ КАРАТАУ

В соответствии с «Соглашением между Республикой Казахстан и Соединенными Штатами Америки об установке и эксплуатации в Казахстане станций сейсмического мониторинга ядерных испытаний» от 18.11.1997 г, а также в рамках контракта ИГИ с компанией «Honeywell», Air Force Technical Applications Center (АФТАС) в Южном Казахстане построена сейсмическая группа «Каратау». Открытие этой станции, являющейся важным звеном в системе мониторинга ИГИ, состоялось в 2002 г. [5].

Сейсмическая группа «Каратау» состоит из 10 точек наблюдения, расположенных по двум окружностям с одной центральной точкой (рисунок 2). Апертура группы 4 км.

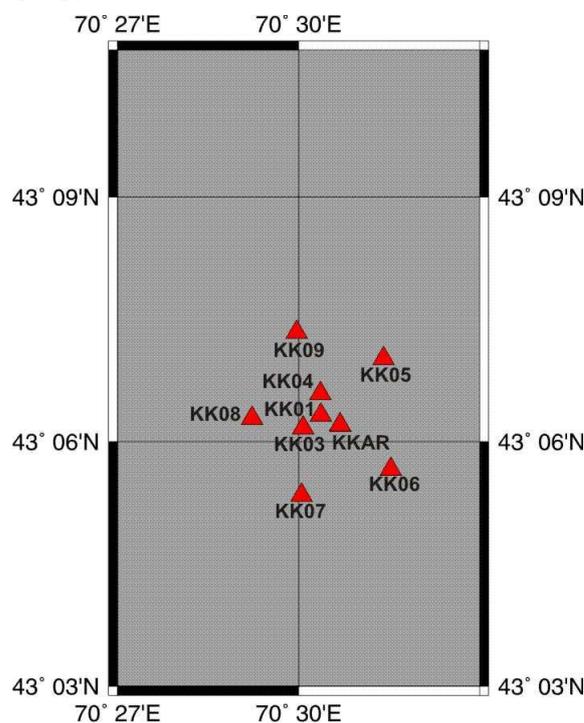


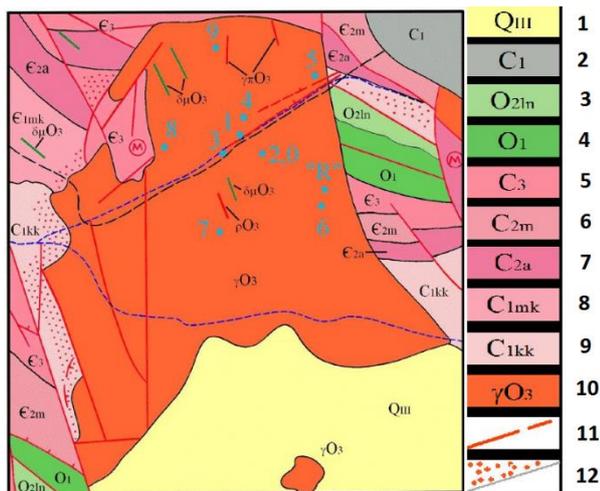
Рисунок 2. Схема расположения элементов малоапертурной группы Каратау

На 9 пунктах в пробуренных скважинах установлено 9 однокомпонентных сейсмометров GS21. Кроме того, имеется одна широкополосная трехкомпонентная станция с сейсмометром KS54000 (пункт КК31).

Сейсмическая группа «Каратау» располагается в 90 км к западу от г. Тараз и в 8–10 км от г. Каратау, являющегося районным центром Таласского района Жамбылской области Казахстана. Участок находится в долине Арбатас, которая с севера ограничена горами Актау и Булттытун, с востока горами Жетимшоқы, с запада и юго-запада – горами Каратау. На юго-востоке долина Арбатас выходит к озеру Бийликколь. Долину пересекает автомобильная дорога с асфальтовым покрытием сообщения г. Тараз – г. Каратау – г. Жанатас. Площадка сейсмостанции находится на восточном склоне долины. Рельеф долины слабо холмистый, средняя высотная отметка 530 м над уровнем моря.

В геологическом плане долина Арбатас представляет собой гранитный массив, сложенный лейкократовыми гранитами верхнеордовикского возраста (γO_3). Сейсмическая группа размещена в северо-восточной части гранитного массива (рисунок 3).

**МАГНИТУДНАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ГРУППЫ КАРАТАУ
В МОНИТОРИНГЕ СЕЙСМИЧНОСТИ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ**



- 1 – аллювиальные и пролювиальные верхнечетвертичные отложения;
- 2 – песчаники, известняки, мергели нижнего отдела каменноугольной свиты;
- 3 – доломиты, известняки среднего отдела ордовикской системы;
- 4 – доломиты, известняки, кремнистые сланцы нижнего отдела ордовикской системы;
- 5 – доломиты верхнего отдела кембрийской системы;
- 6, 7 – доломиты, известняки среднего отдела кембрийской системы;
- 8, 9 – песчаники, глинистые сланцы нижнего отдела кембрийской системы;
- 10 – лейкократовые граниты;
- 11 – разрывные нарушения;
- 12 – ороговичивание.

Рисунок 3. Геологическая карта участка расположения сейсмической группы Каратау

Вмещающими породами для гранитного массива являются полимиктовые песчаники, алевролиты, глинистые сланцы, конгломераты, песчаники, туфы, кремни, доломиты нижнего кембрия (C1), доломиты и известняки среднего и верхнего кембрия (C2-3), а также доломиты, известняки, алевролиты и кремнистые сланцы нижнего – среднего ордовика (O1-2). На контакте с гранитами доломиты и известняки превращены в мраморы, другие породы ороговичиваны. Юго-западная часть гранитного массива имеет тектонические контакты с вмещающими породами кембрия и приурочена к Каратаусскому региональному разлому. Южная часть гранитного массива перекрыта верхнечетвертичными аллювиальными и пролювиальными отложениями.

Станция расположена вдали от источников техногенных помех, в связи с чем разница уровня спектральной плотности шума в ночное и дневное время незначительна [2]. Для станции ККАР характерны шумы, близкие к нижеуровневой мировой модели шума, что обеспечивает ее высокую эффективность в работах как по региональному, так и глобальному сейсмическому мониторингу [2].

**МАГНИТУДНАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ
СГ КАРАТАУ**

В рутинной обработке КНЦД для составления регионального сейсмического бюллетеня используются магнитуда *m_{rv}* с использованием калибровочной кривой Михайловой Н.Н., Неверовой Н.П. [9], энергетический класс *K* [10], а также магнитуда *m_b* с использованием калибровочной кривой Veith K.F., Clawson G.E. [11].

Энергетический класс Раутиан Т.Г. – количественная мера величины землетрясений, это десятичный логарифм высвободившейся сейсмической энергии, измеренной в джоулях ($K = \lg E$).

При определении энергетического класса события использовалась максимальная амплитуда в Р- и S-фазах сейсмических волн на короткопериодных каналах типа СКМ. Далее расчет *K* производился по формуле

$$K = 1,8 \lg(A_p + A_s) + \sigma_K(\Delta), \quad (1)$$

где A_p и A_s – максимальная амплитуда Р- и S-волн в микронах; $\sigma_1(\Delta)$ -калибровочная функция для $A_p + A_s$ в диапазоне расстояний от 10 до 3000 км.

Для определения *m_{rv}* измерялась амплитуда и период Р-фазы для момента времени, когда колебательная скорость максимальна. Измерения проводились на короткопериодном канале типа СКМ. Значение *m_{rv}* рассчитывалось по формуле

$$m_{rv} = \lg(A/T) + \sigma_{reg}(\Delta), \quad (2)$$

где A и T – амплитуда и период Р-волны, $\sigma_{reg}(\Delta)$ – калибровочная кривая в диапазоне расстояний от 10 до 1200 км.

Для настоящей работы по изучению магнитудной чувствительности из совместного бюллетеня КНЦД за период 2010-2020 гг. были выбраны те события, в обработке которых участвовала СГ Каратау. Количество таких событий составило ~45000. На рисунке 4 представлена карта эпицентров всех событий, зарегистрированных группой Каратау. Видно, что наибольшее количество эпицентров землетрясений расположено к югу, юго-востоку и востоку от Каратау. К северу и северо-востоку сейсмических событий с участием Каратау гораздо меньше, это связано с тем, что большая часть Казахстана является стабильной платформой, такие районы, как правило, слабосейсмичны.

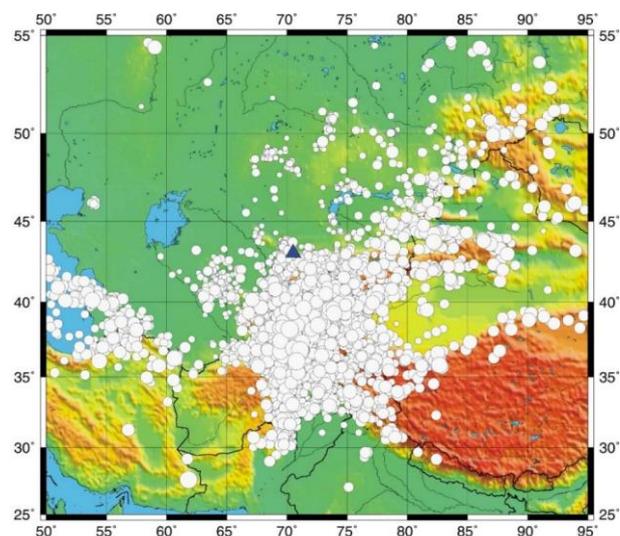


Рисунок 4. Карта эпицентров сейсмических событий из бюллетеня КНЦД, в обработке которых участвовала СГ ККАР (▲) за 2010–2020 гг.

**МАГНИТУДНАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ГРУППЫ КАРАТАУ
В МОНИТОРИНГЕ СЕЙСМИЧНОСТИ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ**

На рисунке 5 приведены зависимости K и m_{rv} от расстояния для станции ККАР. В таблице приведены значения K_{\min} , $K_{\text{предст}}$, $m_{rv\min}$ и $m_{rv\text{предст}}$ для станции ККАР по всем событиям из выборки.

Таблица. Дальность регистрации станции ККАР по энергетическому классу K и m_{rv}

Расстояние, км	K_{\min}	$K_{\text{предст}}$	Расстояние, км	$m_{rv\min}$	$m_{rv\text{предст}}$
50	2,44	2,94	20	0,15	0,65
100	3,15	3,65	50	0,53	1,03
150	3,34	3,84	100	0,99	1,49
200	3,56	4,06	150	1,21	1,71
250	3,76	4,26	200	1,07	1,57
300	3,91	4,41	250	1,34	1,84
400	4,31	4,81	400	1,4	1,9
450	4,53	5,03	500	1,65	2,15
500	4,73	5,23	600	1,81	2,31
600	5,04	5,54	1000	2,34	2,84
700	5,31	5,81	1300	2,64	3,14
834	6,08	6,58	1600	3,24	3,74
1000	6,24	6,74	2200	3,5	4
1600	7,79	8,29			
2000	8,7	9,2			
2500	10,01	10,51			

Анализируя таблицу, отметим, что СГ Каратау является очень эффективной и чувствительной станцией во всем диапазоне расстояний.

Аналитиками КНИЦД был замечен тот факт, что часто в сторону востока от станции не регистрируются события, аналогичные по энергии уверенно регистрируемым событиям с юга от станции. Для исследования азимутальной магнитудной чувствительности СГ Каратау были рассмотрены выборки по истинному азимуту на Памир-Гиндукуш (150–210 градусов, количество событий 32202), а также по истинному азимуту 60–120 градусов по направлению на г. Алматы Северный Тянь-Шань (количество 1893).

Ниже приведены результаты сопоставления графиков K и m_{rv} от расстояний для событий из 2-х районов (рисунки 6, 7). На рисунке 8 приведены заключительные кривые зависимости от расстояний предельных значений K для событий из створа на Памир-Гиндукуш и Северный Тянь-Шань. Из сопоставления видно, что для района Тянь-Шаня, начиная с 300–400 км кривая по K значительно выше, чем для района Памира-Гиндукуша. Максимальная разница может достигать двух единиц энергетического класса. Это говорит о том, что сейсмическая группа Каратау гораздо более чувствительна в отношении южных событий, чем восточных.

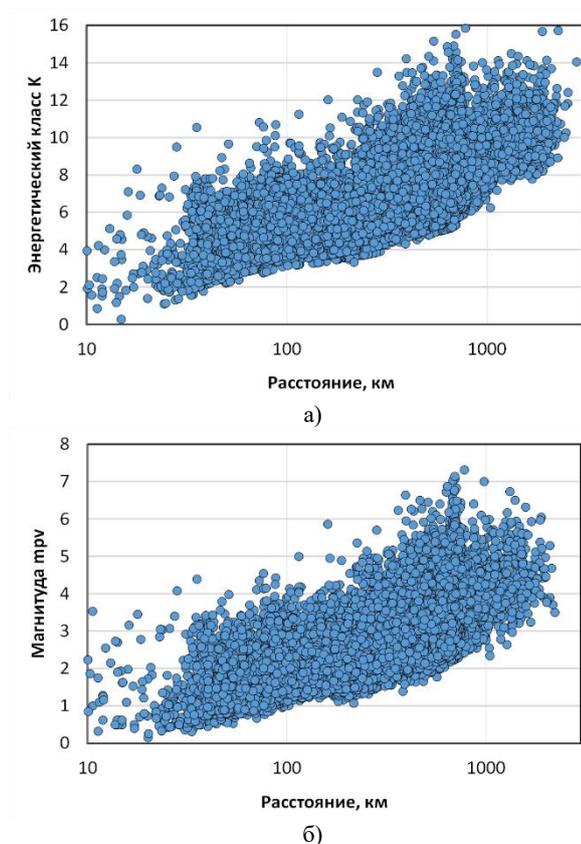


Рисунок 5. Графики дальности регистрации землетрясений по данным СГ Каратау для K (а) и m_{rv} (б)

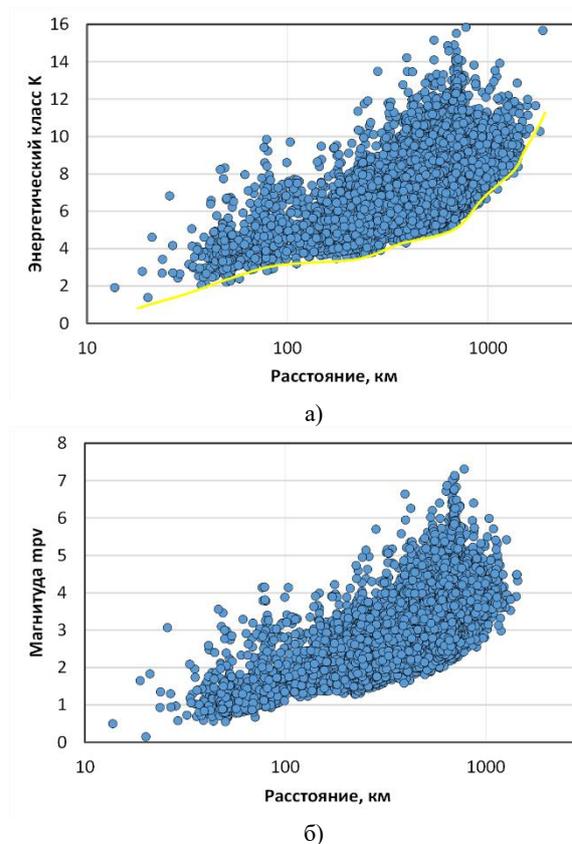
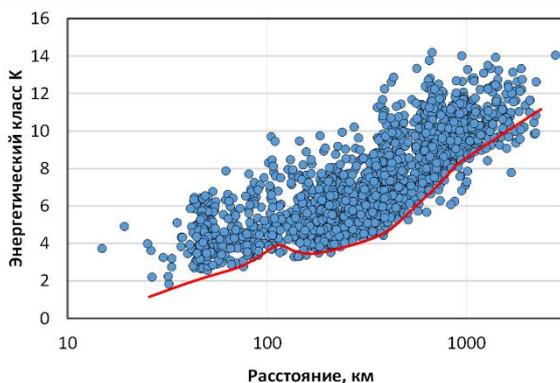
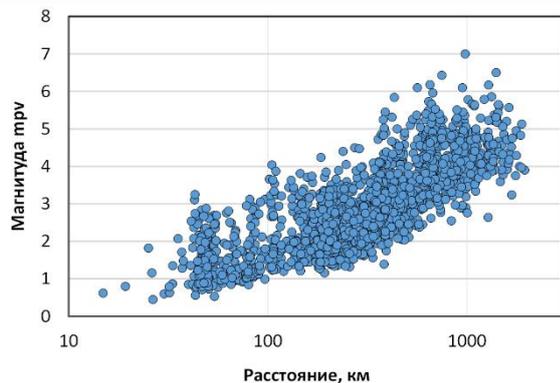


Рисунок 6. График дальности регистрации землетрясений по данным СГ Каратау по истинному азимуту 150–210 градусов на Памир-Гиндукуш по K (а) и m_{rv} (б)

**МАГНИТУДНАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ГРУППЫ КАРАТАУ
В МОНИТОРИНГЕ СЕЙСМИЧНОСТИ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ**



а)



б)

Рисунок 7. График дальности регистрации землетрясений по данным СГ Каратау по истинному азимуту 60–120 градусов по направлению на г. Алматы Северный Тянь-Шань по K (а) и m_b (б)

Ранее аналогичный эффект был отмечен в работе [7] в отношении сейсмической группы Маканчи. На рисунке 8 ось абсцисс – расстояние от события до станции PS23 Маканчи в градусах, ось ординат – магнитуда события m_b , сплошная линия – уровень представительной магнитуды, определенный в соответствии с графиками повторяемости. Изучены азимутальные различия в чувствительности станции PS23-Маканчи. Для этого все события, зарегистрированные станцией в 2003 г., разделены на две группы. В одну группу вошли события, произошедшие в северо-восточном направлении от станции PS23-Маканчи – события с азимутом подхода от 0 до 60 градусов. Таких событий в 2003 г. зарегистрировано 1385. Во вторую группу вошли события, произошедшие в юго-западном направлении от станции PS23-Маканчи – события с азимутом подхода от 180 до 240 градусов. В эту группу вошло 1875 событий. Для каждой из групп построены графики зависимости магнитуды зарегистрированных событий от расстояния до станции PS23-Маканчи и проведены огибающие по минимальным и представительным значениям магнитуд. Из рисунка 9 можно видеть, что с удалением от станции, разница в чувствительности станции к событиям, произошедшим в разных направлениях, растет.

Так, например, на расстоянии 10 градусов разница в уровне минимальных магнитуд достигает 0,9 единиц магнитуды (магнитуда 3,5 для событий из северо-восточного направления по сравнению с магнитудой 2,6 для событий из юго-западного направления). Было высказано предположение о возможных причинах такого явления. После изучения данных по Каратау можем утверждать, что, скорее всего, такие расхождения связаны с геологическим строением на пути распространения сейсмических волн, причем на больших глубинах, соответствующих глубокой коре и верхней мантии.

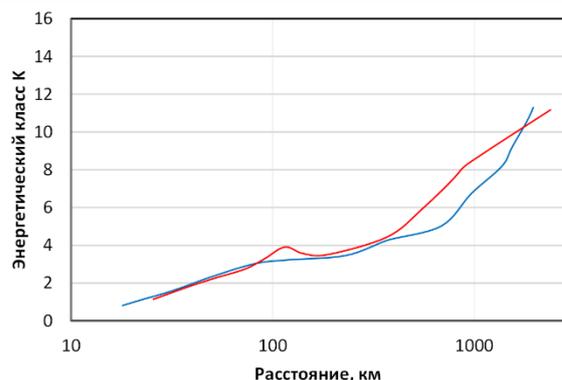


Рисунок 8. Сопоставление зависимости минимальных K для событий из створа на Памир-Гиндукуш (синяя линия) и Тянь-Шань (красная линия)

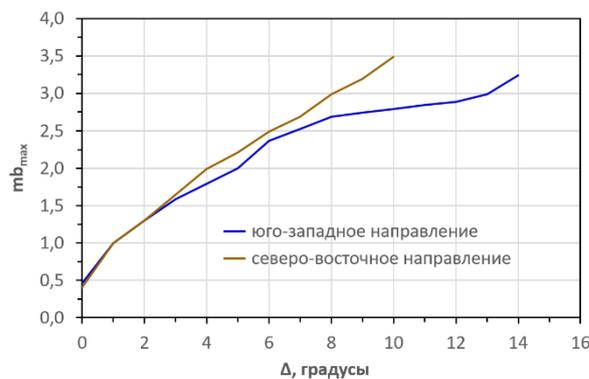


Рисунок 9. График азимутальных различий в чувствительности станции PS23-Маканчи

Различие в уровнях графиков начинается, как и в случае с Каратау, на 300–400 км. По абсолютным значениям разница достигает 0,7–0,9 единиц магнитуды m_b . Это примерно то же, что мы наблюдаем и по Каратау, только по Маканчи график построен в магнитудах, а по Каратау в классах.

Этот факт подтверждается и картой минимальных энергетических классов по сейсмическим группам (рисунок 10). Видна асимметрия в значениях энергетических классов сейсмических событий вокруг Каратау. На юг от станции слабые события регистрируются на больших расстояниях, чем на восток.

**МАГНИТУДНАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ГРУППЫ КАРАТАУ
В МОНИТОРИНГЕ СЕЙСМИЧНОСТИ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ**

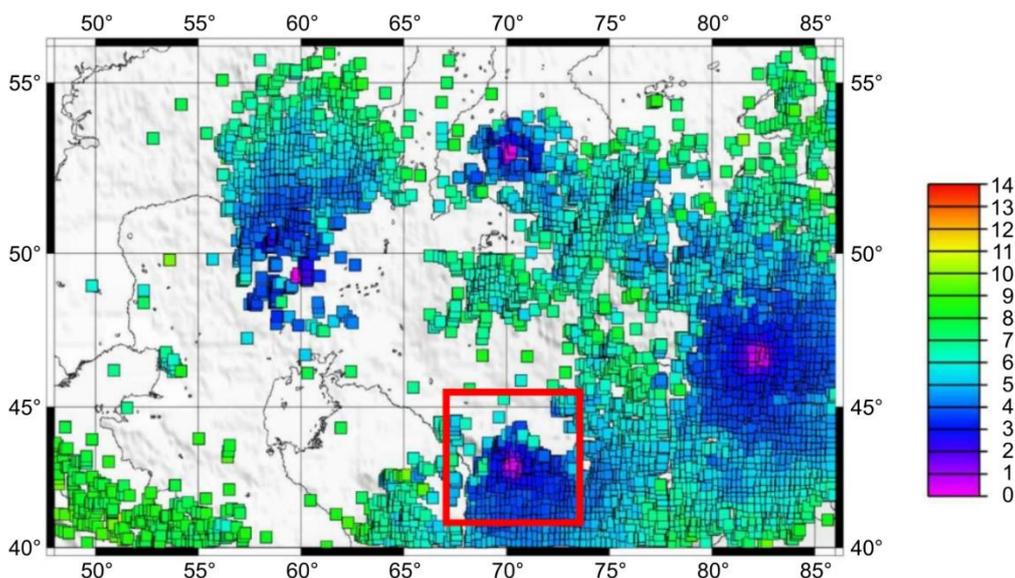


Рисунок 10. Карта минимальных энергетических классов K по сети ИГИ НЯЦ РК. Красный квадрат отмечает область вокруг станции Каратау

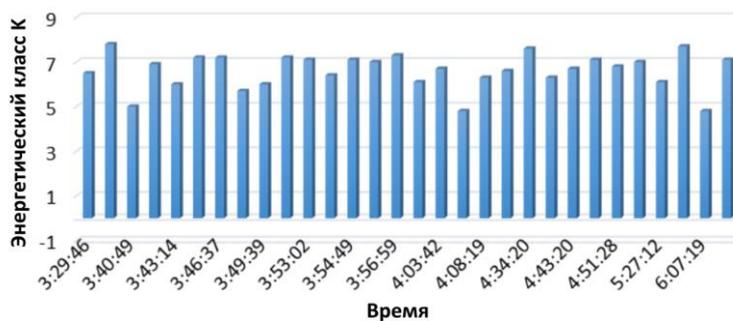


Рисунок 11. Энергетические классы взрывов за первые три часа

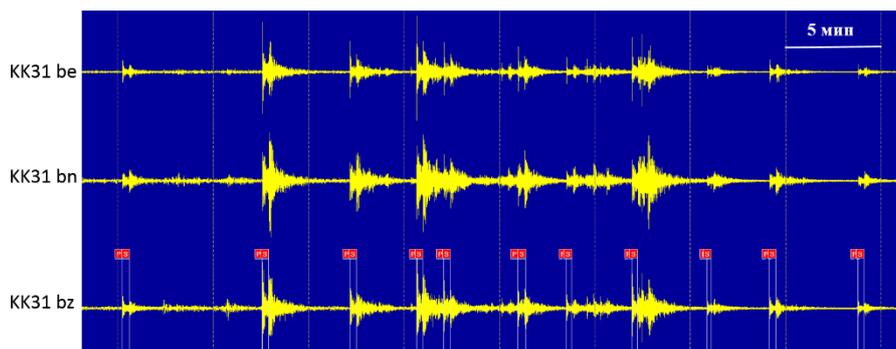


Рисунок 12. Записи взрывов по станции Каратау (KK31) 24 июня 2019 г. Показана запись примерно 45 минут

СГ КАРАТАУ В РЕГИСТРАЦИИ СЛАБЫХ ВЗРЫВОВ

В 2019 и 2021 гг. сейсмическая группа Каратау стала основной станцией в регистрации двух серий взрывов на военных складах в Южном Казахстане. В работе (Сейнасинов, Михайлова, 2020) были подробно описаны результаты регистрации и обработки взрывов в районе Арьса. Ближе всех к району взрывов находилась станция Каратау. Эпицентральное расстояние составило 165 км. На рисунке 11 показана временная развертка всех зарегистрированных стан-

цией Каратау взрывов за первые три часа, а на рисунке 12 – вид записей за первый час.

Анализ энергетических характеристик взрывов показал, что среди них было обработано несколько взрывов с $K=4,8$. Но по нашим результатам, можно было ожидать регистрации и еще более слабых событий с классом от 4,1. Вероятно, при наложении записей взрывов друг на друга аналитики могли пропустить столь слабые записи.

**МАГНИТУДНАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ГРУППЫ КАРАТАУ
В МОНИТОРИНГЕ СЕЙСМИЧНОСТИ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ**

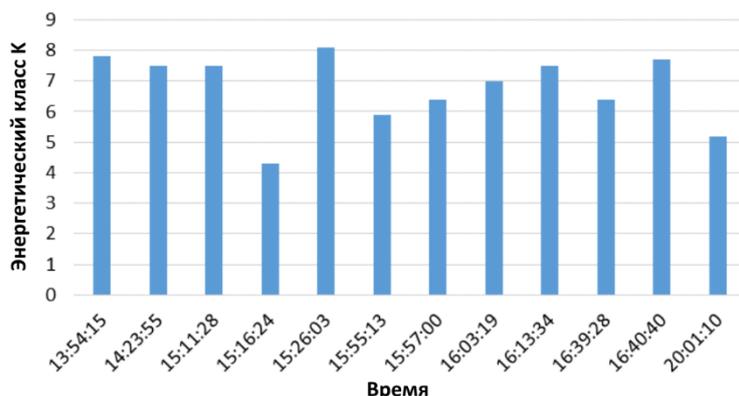


Рисунок 13. Энергетические классы взрывов за первые два часа за 26.08.2021 г.

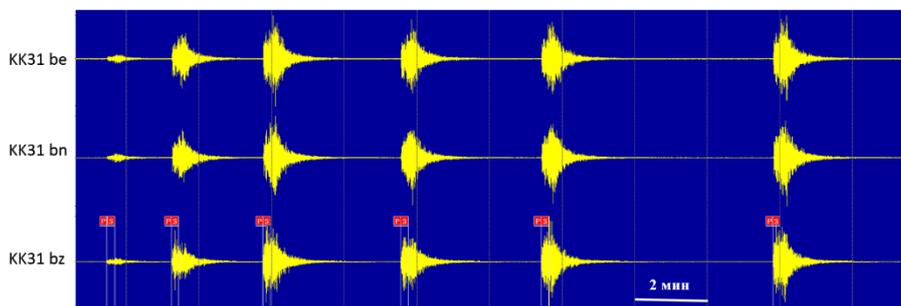


Рисунок 14. Записи взрывов по станции Каратау за 26.08. 2021г. Показана запись примерно за 20 мин.

Произошедшая серия взрывов 26 августа 2021 года показала, что ближайшей станцией вновь была станция Каратау, расположенная на расстоянии 89 км. Ею зарегистрировано 12 взрывов, самые слабые из зарегистрированных имели $K=4.3$. (рисунки 13, 14). Исходя из сделанных оценок магнитудной чувствительности, можно было рассчитывать на регистрацию и обработку и более слабых взрывов, начиная с 3,7. Но таких взрывов по станции Каратау мы не увидели. Можно предположить, что кроме субъективных факторов пропуска при обработке столь слабых событий, существуют и объективные закономерности, связанные с другими зависимостями предельных регистрируемых магнитуд и классов от расстояний для взрывов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На большом статистическом материале зарегистрированных землетрясений и взрывов станцией Каратау сделана оценка предельных и представительных значений магнитуд и энергетических классов на разных расстояниях по станции Каратау. Сделан вывод о том, что станция Каратау является одной из самых эффективных в сейсмическом мониторинге Центральной Азии.

2. Отмечена четкая азимутальная зависимость в магнитудной чувствительности регистрируемых землетрясений на юг и восток от станции.

3. На примере двух серий взрывов 2019 и 2021 гг. на военных складах в Южном Казахстане показаны возможности станции в регистрации слабых событий.

4. Исследования по этому направлению будут продолжены для установления причин резкого различия магнитудной чувствительности на разных азимутах. Предполагается изучение влияния разного поглощения сейсмических волн от источников на разных глубинах (коровых и глубокофокусных). Отдельно будет изучен вопрос дальности регистрации для землетрясений и взрывов.

Данные исследования финансировались Министерством энергетики Республики Казахстан в рамках научно-технической программы «Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан» (ИРН – BR09158470).

ЛИТЕРАТУРА

1. Mikhailova N.N., Sokolova I.N. Monitoring system of the Institute of Geophysical Research of the Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan // Summary of the Bulletin of the International Seismological Centre 2016 January-June. – 2019. – V. 53. – Issue 1. – P. 27–38.
2. Михайлова Н.Н. Комаров И.И. Спектральные характеристики сейсмического шума по данным казахстанских станций мониторинга // Вестник НЯЦ РК. – 2006. – Вып. 2(26). – С. 19–26.
3. Гордиенко Д.Д. Временные вариации параметров сейсмического шума по данным станций НЯЦ РК // Вестник НЯЦ РК. – 2010. – Вып. 1(41). – С. 5–10.
4. Сейнасинов Н.А. Система контроля качества данных в Центре сбора и обработки специальной сейсмической информации / Н.А. Сейнасинов, Д.Д. Гордиенко // Вестник НЯЦ РК. – 2009. – Вып. 2(38). – С. 113–118.

5. Марченко В.Г., Неделков А.И., Комаров И.И. Новая сейсмическая группа "Каратау" в Казахстане // Геофизика и проблемы нераспространения: Вестник НЯЦ РК. – 2002. – Вып. 2(10). – С. 9–13.
6. Михайлова Н.Н., Вольф Н.А., Синёва З.И. Сейсмичность районов, окружающих новые сейсмические группы Маканчи и Каратау // Геофизика и проблемы нераспространения. Радиоэкология. Охрана окружающей среды: Вестник НЯЦ РК. – 2003. – Вып. 2(14). – С. 94–99.
7. Михайлова Н.Н. Анализ магнитудной чувствительности сейсмической группы Каратау на региональных и телесеизмических расстояниях / Н.Н. Михайлова, З.И. Синёва // Вестник НЯЦ РК. – 2008. – Вып. 1(33). – С. 54–62.
8. Узбеков Р.Б., Сейнасинов Н.А. Ядерное испытание в Северной Корее в 2016 году. // Вестник НЯЦ РК. – 2016. – Вып. 4(68). – С. 85–91.
9. Михайлова Н.Н., Неверова Н.П. Калибровочная функция для определения магнитуды MPVA землетрясений Северного Тянь-Шаня // Комплексные исследования на Алма-Атинском прогностическом полигоне. – Алма-Ата : Наука, 1986 г. – С. 41–47.
10. Раутиан Т.Г. Об определении энергии землетрясений на расстояниях 3000 км. // Труды ИФЗ АН СССР. – 1964. – № 32 (199). – С. 72–98.
11. Veith K.F., Clawson G.E. Magnitude from shortperiod P-wave data // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1972. – Vol. 62. – No. 2. – P. 435–452.
12. Михайлова Н.Н., Синёва З.И. Оценка эффективности сейсмической группы PS23-Маканчи при регистрации региональных и телесеизмических событий // Вестник НЯЦ РК. – 2004. – Вып. 2(18). – С.13–21.
13. Сейнасинов Н.А., Михайлова Н.Н. Взрывы боеприпасов близ г. Арыс по данным казахстанской сети мониторинга // Вестник НЯЦ РК. – 2020. – Вып. 3(83). – С. 33–37.
14. tiki seysmicheskogo shuma po dannym kazakhstanskikh stantsiy monitoringa // Vestnik NYaTs RK. – 2006. – Issue 2(26). – P. 19–26.
15. Gordienko D.D. Vremennye variatsii parametrov seysmicheskogo shuma po dannym stantsiy NYaTs RK // Vestnik NYaTs RK. – 2010. – Issue 1(41). – P. 5–10.
16. Seynasinov N.A. Sistema kontrolya kachestva dannykh v Tsentre sbora i obrabotki spetsial'noy seysmicheskoy informatsii / N.A. Seynasinov, D.D. Gordienko // Vestnik NYaTs RK. – 2009. – Issue 2(38). – P. 113–118.
17. Marchenko V.G., Nedelkov A.I., Komarov I.I. Novaya seysmicheskaya gruppy "Karatau" v Kazakhstane // Geofizika i problemy neraspostraniya: Vestnik NYaTs RK. – 2002. – Issue 2(10). – P. 9–13.
18. Mikhaylova N.N., Vol'f N.A., Sineva Z.I. Seysmichnost' rayonov, okruzhayushchikh novye seysmicheskije gruppy Makanchi i Karatau // Geofizika i problemy neraspostraniya. Radioekologiya. Okhrana okruzhayushchey sredy: Vestnik NYaTs RK. – 2003. – Issue 2(14). – P. 94–99.
19. Mikhaylova N.N. Analiz magnitudnoy chuvstvitel'nosti seysmicheskoy gruppy Karatau na regional'nykh i teleseysmicheskikh rasstoyaniyakh / N.N. Mikhaylova, Z.I. Sineva // Vestnik NYaTs RK. – 2008. – Issue 1(33). – P. 54–62.
20. Uzbekov R.B., Seynasinov N.A. Yadernoe ispytanie v Severnoy Koree v 2016 godu. // Vestnik NYaTs RK. – 2016. – Issue 4(68). – P. 85–91.
21. Mikhaylova N.N., Neverova N.P. Kalibrovchnaya funktsiya dlya opredeleniya magnitudy MPVA zemletryaseni Severnogo Tyan'-Shanya // Kompleksnye issledovaniya na Alma-Atinskom prognosticheskom poligone. – Alma-Ata : Nauka, 1986 g. – P. 41–47.
22. Rautian T.G. Ob opredelenii energii zemletryaseni na rasstoyaniyakh 3000 km. // Trudy IFZ AN SSSR. – 1964. – No. 32 (199). – P. 72–98.
23. Veith K.F., Clawson G.E. Magnitude from shortperiod P-wave data // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1972. – Vol. 62. – No. 2. – P. 435–452.
24. Mikhaylova N.N., Sineva Z.I. Otsenka effektivnosti seysmicheskoy gruppy PS23-Makanchi pri registratsii regional'nykh i teleseysmicheskikh sobytiy // Vestnik NYaTs RK. – 2004. – Issue 2(18). – P.13–21.
25. Seynasinov N.A., Mikhaylova N.N. Vzryvy boeprisopov bliz g. Arys po dannym kazakhstanskoy seti monitoringa // Vestnik NYaTs RK. – 2020. – Issue 3(83). – P. 33–37.

REFERENCES

ОРТАЛЫҚ АЗИЯНЫҢ СЕЙСМИКАЛЫҚ БАҚЫЛАУДАҒЫ ҚАРАТАУ ТОБЫНЫҢ МАГНЕТУДАЛЫҚ СЕЗІМДІЛІГІ

Н.А. Сейнасинов^{1,2)}, Н.Н. Михайлова¹⁾

¹⁾ ҚР ҰЯО РМК «Геофизикалық зерттеулер институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан
²⁾ Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ Ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы, Қазақстан

Қаратау сейсмикалық тобының 10 жылдан астам жұмысының нәтижелерінен алынған өкілетті статистикалық материал негізінде оның әртүрлі эпицентрлік қашықтықтардағы (станцияның магнитудалық сезімталдығы) әртүрлі магнитудалық оқиғаларды тіркеу мүмкіндігі зерттелді. Сейсмикалық толқындардың келу азимутына магнитудалық сезімталдықтың тәуелділігі зерттелді. Әр түрлі бағытта станцияның бір қашықтықтағы әлсіз жер сілкінісін тіркеуде әртүрлі мүмкіндіктері бар екені көрсетілген. 2019 және 2021 жылдары Оңтүстік Қазақстандағы әскери қоймалардағы снарядтардың жарылыстары бойынша Қаратау станциясының әлсіз оқиғаларын тіркеу үлгілері келтірілген.

Түйін сөздер: сейсмикалық топ, жер сілкінісі, жарылыс, сейсмограмма, бюллетень, магнитуда, эпицентр, азимуттық тәуелділік.

**MAGNITUDE SENSITIVITY OF KARATAYU SEISMIC ARRAY
IN MONITORING OF SEISMICITY IN CENTRAL ASIA**

N.A. Seinassinov^{1,2)}, N.N. Mikhailova¹⁾

¹⁾ Branch "Institute of Geophysical Research" RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

²⁾ Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satbayev, Almaty, Kazakhstan

The capability to record events of different magnitude at various epicentral distances (magnitude sensitivity of the station) was studied basing on representative statistical material obtained by the results of Karatayu seismic array operation for more than 10 years period. The dependence of magnitude sensitivity on azimuth of seismic waves arrival was studied. It is shown that depending on the direction, the station has different capabilities in recording of small earthquakes at the same distance. The examples of small events recorded by Karatayu station are shown by a series of two explosions of shells at military warehouses in the south Kazakhstan in 2019 and 2021.

Keywords: seismic array, earthquake, explosion, seismogram, bulletin, magnitude, epicenter, azimuthal dependence.

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2022-2-32-39>
УДК 620.172.2

DEVELOPMENT OF A TEST DEVICE FOR TESTING MINIATURE SAMPLES BY THE SPT METHOD

Ye.D. Dauletkhanov, Ye.Ye. Sapatayev, N.A. Orazgaliyev, Ye.B. Aryngazy

Branch "Institute of Atomic Energy" RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

E-mail for contacts: dauletkhanov@nnc.kz

The paper presents the results of the development and manufacture, as well as assembly and installation of a test device for testing miniature samples by the SPT method. The results of mechanical tests by tensile and SPT methods of 35X steel material after heat treatment (quenching + tempering) at different tempering temperatures. The evaluation of changes in the strength characteristics of steel grade 35X, depending on the heat treatment mode. The correlation equations between the $t/10$ method and the yield strength of each 35X steel sample obtained during tensile tests were determined and obtained.

Keywords: *SPT tests, development, tensile tests, yield, strength.*

INTRODUCTION

The bending test of miniature disks, introduced in the 1980s by Manahan, was intended as an alternative characterization method for obtaining the mechanical properties of irradiated steels from nuclear reactor vessels [1, 2]. The novelty of this method was its miniaturized geometry, allowing the use of small disks for microstructural analysis in transmission electron microscopy. The main advantage of miniature disks was the short duration of sample irradiation and the possibility of obtaining a larger number of samples from a small volume of test material.

Data on the mechanical properties of materials of structural elements are important for design, integrity assessment and remaining service life. In this regard, small sample test methods (hereinafter referred to as SSTM) are preferable to typical tests in two cases:

- 1) when a volume of material is limited;
- 2) when it is difficult to work with a huge volume of material, for example, if the material is radioactive.

The SSTM are more promising for assessing the integrity and residual life of components during their operation, as they are easy to perform and are non-destructive in nature. Of the available SSTMs, the Small Punch Test (hereinafter referred to as SPT) method is mainly used to determine the mechanical properties of thin samples. The sample size required for characterization is similar to that required for transmission electron microscopy (TEM), i.e. ~3 mm in diameter [2]. This method was primarily developed to study post-radiation effects at nuclear power plants [2–7]. Nowadays, this method has been extended to studies of other mechanical properties: Young's modulus [8, 9], ultimate strength [10, 11], and ultimate tensile strength [12], transition temperature from plastic to brittle state [13], fracture properties [14] and creep behavior [15]. In 2006, *The CEN Code of Practice* was introduced and revised in 2007 to standardize the SPT method [16].

The main advantages of this methods are:

- use as a non-destructive testing method, since the production of samples from metal of the operated equipment does not reduce its performance due to its diminutive size (thickness less than 1 mm);
- the ability to study such objects as elements of welded joints, parts of small sizes or complex shapes, parts made of materials that are unreasonable for tensile testing due to their high brittleness, destroyed parts from which full-size macrosamples cannot be cut in accordance with GOSTs, etc.

Compared to non-destructive testing methods such as ultrasonic, magnetic and X-ray flaw detection, SPT is a direct measurement method, which allows obtaining information about the mechanical properties of the material directly, while other methods are based on evaluation of indirect indicators.

Thus, to date, development and implementation of a new method for testing miniature samples for indentation will allow evaluating the strength and plastic characteristics of highly radioactive materials and other materials without requiring the manufacture of massive standard samples.

DESIGN AND MANUFACTURE OF A TEST DEVICE. ASSEMBLY AND INSTALLATION OF THE TEST DEVICE

The test device consists of a frame consisting of top and bottom plates, three spacer rods (Figure 1). The top plate houses the loading jig and the bottom plate is rigidly connected to an Instron 5966 testing machine equipped with a 0.5 kN load sensor using a 1/2 inch pin and lock nut.

The loading jig for testing miniature samples by the SPT method was designed in accordance with the recommendations [16–17], and consists of an upper and lower die, a rod and a ball (Figure 2). The dies are made of 30X13 hardened chromium steel with a hardness of 50 HRC. The ball ($\varnothing 2.5$ mm) and the rod ($\varnothing 2.5$ mm) are made of materials with high hardness and modulus of elasticity – zirconia ZrO_2 and tungsten carbide WC,

respectively. Combination of the rod and ball forms a punch that passes through the sample, held by the upper and lower dies.

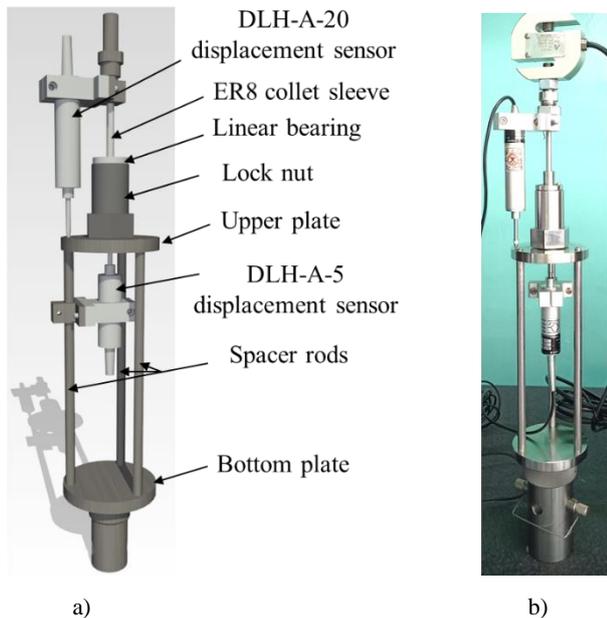


Figure 1. 3D model (a) and outer view of the test device, mounted on a test machine (b)

Some authors use a solid punch with a hemispherical tip instead of a separate ball and rod (punch), arguing that it is relatively easy to simulate deformation processes. However, in our opinion, manufacture of a solid tip from hard materials is costly and it is impossible to provide the required sphericity on it.

The punch rod is connected with a precision ER8 collet sleeve to a larger diameter rod ($\varnothing 6$ mm). To ensure coaxial translational motion of the rod with the punch, the closed LMF6UU linear rolling bearing is installed on the lock nut. Thus, the lock nut not only fixates the test sample between the upper and lower dies, but also guides the translational motion of the punch.

One of the features of the testing device is a semi-rigid connection of the punch to the lock nut with one degree of freedom, rather than a rigid connection to the traverse of the testing machine. This combination does not require the alignment of the punch motion relative to the sample after disassembly/assembly of the loading jig.

The test device additionally contains two LVDT transformer sensors (DLH-A-20 and DLH-A-5, Dacell), operating on a bridge connection, one of which is used to continuously record the movement of the punch relative to the top plate, and the second registers the axial extrusion of the sample from the side of the lower die (Figure 3).

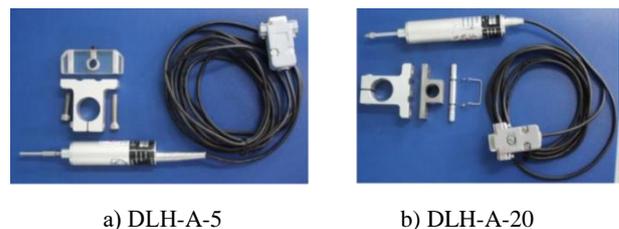


Figure 3. Outer view of linear displacement sensors

DESIGN AND ASSEMBLY OF INFORMATION AND MEASURING SYSTEM

To ensure continuous data collection during testing, an external measuring system was designed and assembled on the testing machine, which allows recording data simultaneously from four different primary transducers (Figure 4).

The measuring system consists of primary converters, analog-to-digital converters (ADC), and a personal computer with software. Analog-to-digital converters and power supplies are placed in a measuring unit with a metal case. The primary transducers are connected to the unit via DE-9 connectors. Data output from the measuring unit is performed using the RS232-USB converter to a portable computer (laptop). The received data is displayed in a software window created in the Trace Mode 6 environment and written to a tabular XLS file.

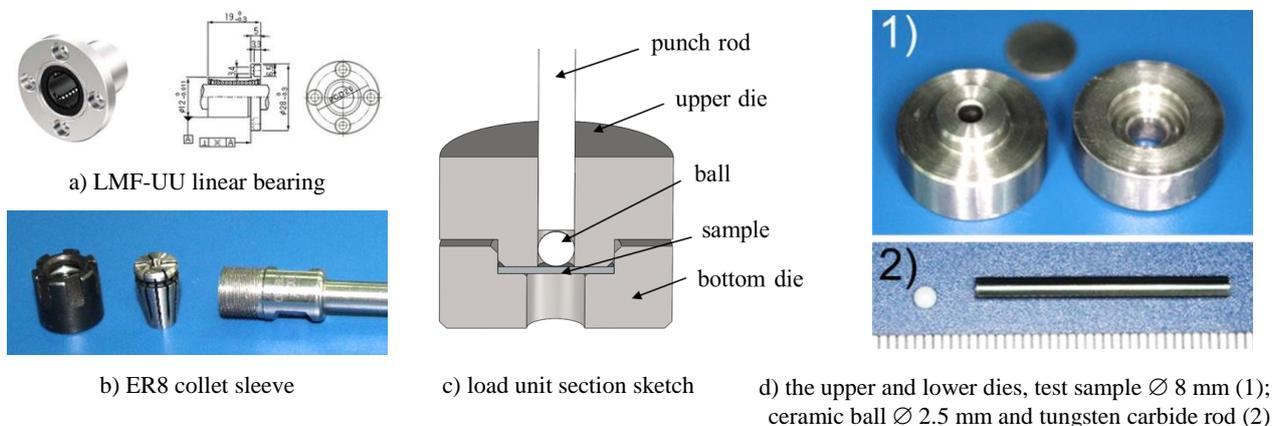


Figure 2. Sketches and pictures of the components of the loading jig

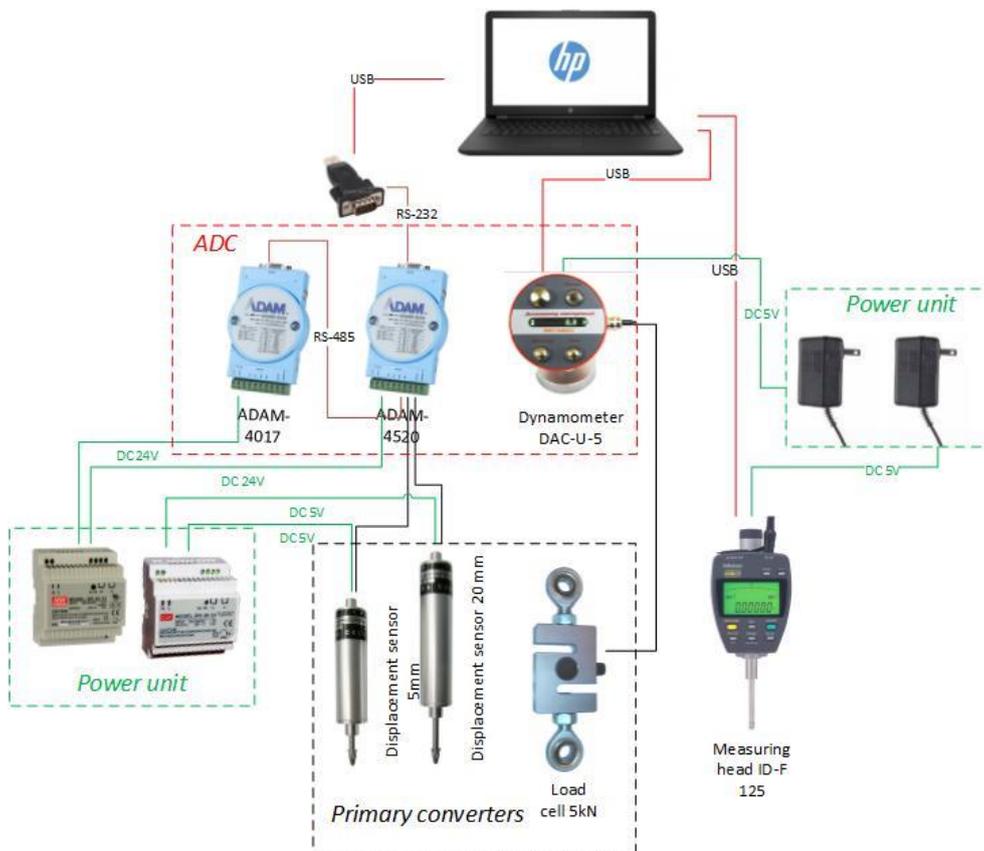
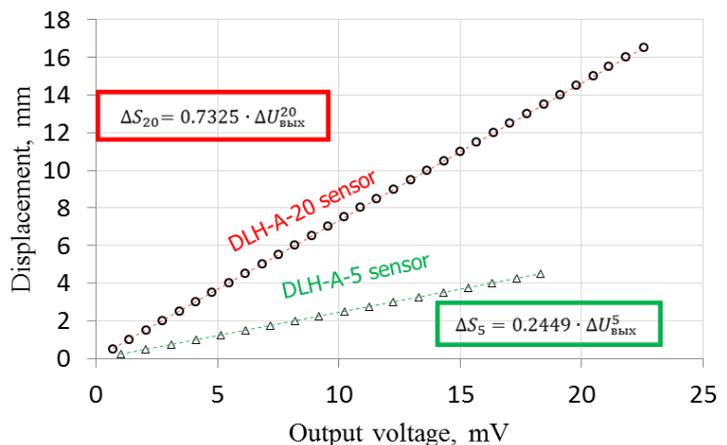


Figure 4. Schematic diagram of information and measuring system connection



a) device for calibration of linear displacement sensors



b) dependencies of output voltage on linear displacement of the rod of DLH-A-20 and DLH-A-5 sensors

Figure 5. Calibration of linear displacement sensors

CALIBRATION OF LINEAR DISPLACEMENT SENSORS

To calibrate linear displacement sensors, a high-precision digital indicator Mitutoyo ID-F 25 with a measurement resolution of 0.001 mm in the range of 0–25 mm was used. To calibrate the linear displacement sensors, each sensor with a digital indicator was rigidly fixed horizontally to the surface of a two-axis microscope

object table, which had a coaxial feed with a micro-screw (Figure 5, a). Then, with a resolution of 0.5 mm and 0.25 mm, the output voltage readings were taken from the DLH-A-20 and DLH-A-5 sensors, respectively. Figure 5, b shows the dependence of linear displacement on the value of the output voltage for sensors with different measurement limits.

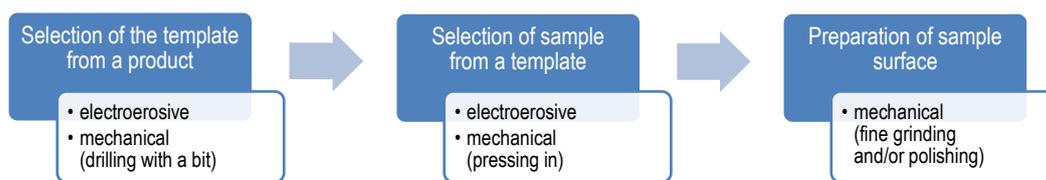


Figure 6. Stages of selection and preparation of miniature samples

Based on calibration measurements, the linear dependences of the displacement (ΔS_L) of the rod for each sensor on their output voltage were determined. The equation of linear dependencies for each sensor is as follows:

$$\Delta S_5 = 0.2449 \cdot \Delta U_{OUT}^5 \quad \text{– for DLH-A-5 sensor,} \quad (1)$$

$$\Delta S_{20} = 0.2449 \cdot \Delta U_{OUT}^{20} \quad \text{– for DLH-A-20 sensor,} \quad (2)$$

where, ΔS_L – linear movement of the sensor rod, mm (L – sensor measurement limit); ΔU_{OUT}^L – output voltage, mV (L – sensor measurement limit).

RESEARCH METHOD

Method of Miniature Sample Manufacture

The procedure for selecting and preparing miniature test samples consists of three main stages (Figure 6).

To select the template and the sample, a wire-cutting method is used on an ARTA 123 PRO CNC electroerosive machine. Surface is prepared by mechanical fine grinding with a final abrasive grit P1200.

Method for Identifying Correlation Dependence by the $t/10$ Method

To identify the correlation dependence, the method of correlation between the yield strength σ_y and the yield load P_y was applied with the following empirical equation [10]:

$$\sigma_y = \alpha_1 \cdot \frac{P_y}{t^2} + \alpha_2, \quad (3)$$

where, t – sample thickness, α_1 and α_2 – correlation factors that are obtained from regression analysis of test results of different materials that should be correlated.

Currently, there are several different methods for obtaining a value of the yield strength P_y from the SPT curve [10, 16, 18], one of the most accurate is the $t/10$ method [19].

According to the $t/10$ method, the yield load P_y is obtained in a similar way to the method for determining the yield strength σ_y (displacement: 0.2%) in standard tensile tests. A parallel line tangent to the elastic zone of the SPT curve is drawn with a shift equal to $t/10$ along the shift axis. The intersection of this line with the SPT curve is defined as the yield load P_y (Figure 7).

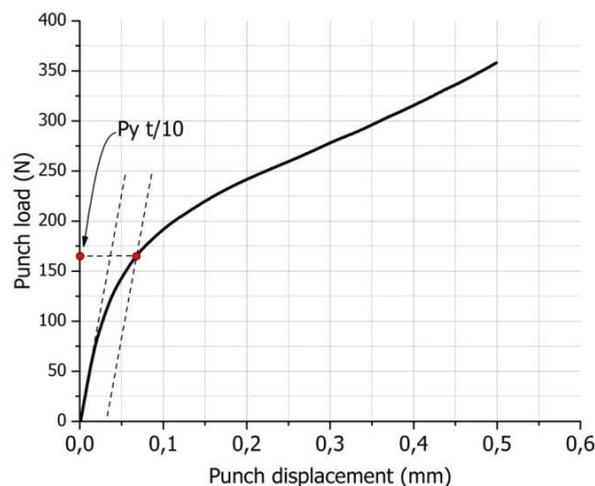


Figure 7. Calculating P_y with the $t/10$ Method from the SPT Curve

RESULTS AND DISCUSSION

Results of Tensile Test by Conventional Method

The sample material was 35X low-alloy steel with various heat treatment to obtain a wide range of strength and plastic characteristics. Heat treatment of the samples was performed by quenching (at a temperature of 860 °C) and subsequent tempering at various temperatures of 200 °C, 300 °C, 400 °C, 500 °C.

For testing, standard cylindrical samples of type III, No. 8 according to GOST 1497-84 were prepared from heat-treated blanks (Figure 8). Determination of the actual mechanical properties of heat-treated samples were performed according to the conventional tensile test method at a constant strain rate of 0.0025 s⁻¹ according to GOST 1497 (Figure 9).

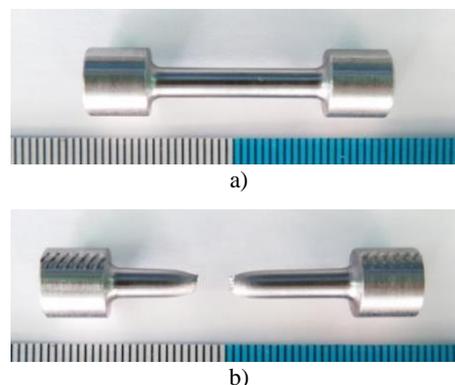


Figure 8. Outer view of standard 35X steel samples before (a) and after (b) tensile testing

The results of determining the strength and plastic characteristics are presented in the Table.

Table. The results of tensile tests of 35X steel samples

Sample #	Tempering temperature, °C	Temporary resistance σ_y , MPa	Conventional yield strength $\sigma_{0.2}$, MPa	Relative elongation after rupture δ_5 , %	Relative contraction after rupture ψ , %
35X-1.1	without HT	764	444	14	60
35X-1.2		771	447	17	56
Mean value		768	446	15	58
35X-2-1	200	1393	1251	10	44
35X-2-2		1419	1282	11	48
Mean value		1406	1267	10	46
35X-4-1	300	1186	1090	13	53
35X-4-2		1162	1067	13	50
Mean value		1174	1079	13	51
35X-6-1	400	1056	946	14	56
35X-6-2		1091	980	15	56
Mean value		1074	963	14	56
35X-7-1	500	758	606	23	69

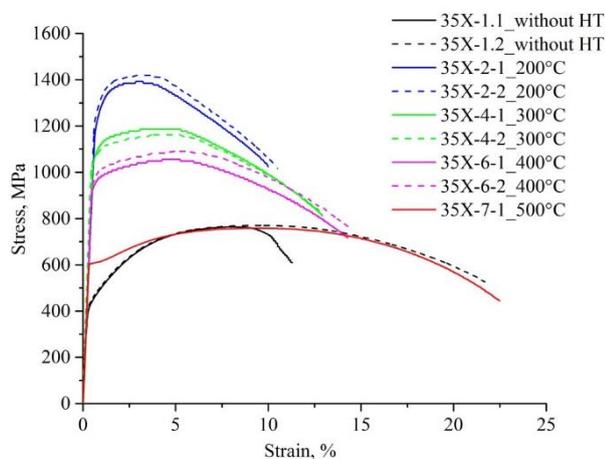


Figure 9. Tensile diagram of 35X steel before and after heat treatment (quenching + tempering) at different tempering temperatures

Results of testing miniature samples by the SPT method

For testing according to the SPT method, disk-shaped miniature samples with dimensions of $\varnothing 8 \times 0.5$ mm were made from a head of the destroyed samples (Figure 10). Using the Instron 5966 test machine with designed test device, miniature samples were tested by the SPT method (Figure 11). Miniature samples were tested by the SPT method with a punch loading speed of 0.2 mm/min and constant recording of the load-displacement curve data.



Figure 10. Outer view of miniature 35X steel samples before and after testing by the SPT method

As the SPT load-displacement curves show, the designed test device shows good repeatability of results.

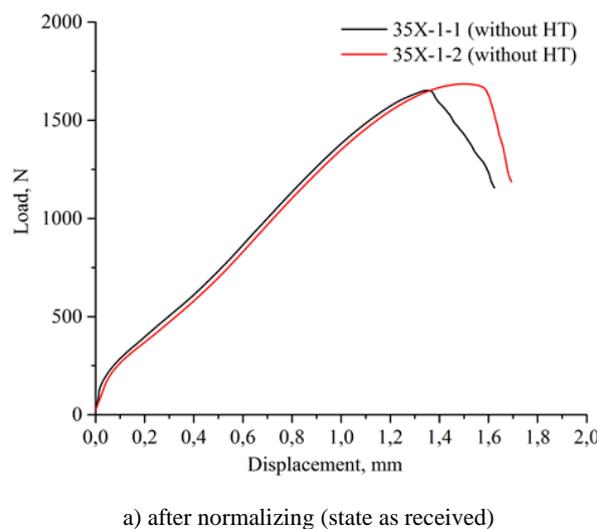


Figure 11. Load-displacement curves of SPT testing of 35X steel after heat treatment

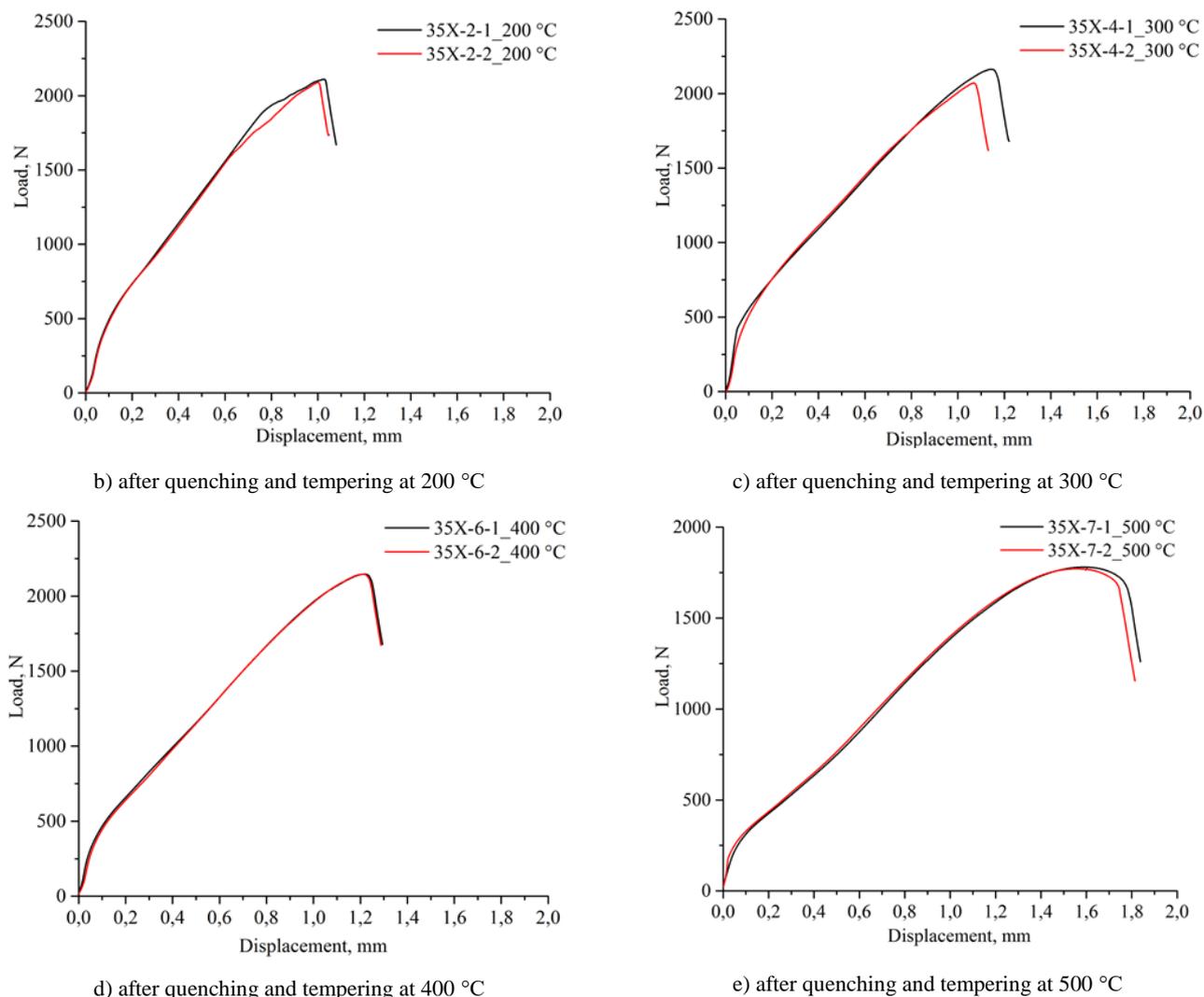


Figure 11 (continued). Load-displacement curves of SPT testing of 35X steel after heat treatment

ANALYSIS AND GENERALIZATION OF RESEARCH RESULTS

Based on the results of testing miniature samples made of heat-treated 35X steel, typical zones of elastic, elastic-plastic and plastic deformation were determined. After analyzing the load-displacement curves, the P_y/t^2 values were determined by the $t/10$ method, which is similar to the method for determining the yield strength $\sigma_{0.2}$ (0.2% displacement) in standard tensile tests. Between the actual values of the yield strength $\sigma_{0.2}$ (tensile test) of the 35X steel material and the value of P_y/t^2 (SPT method), the following dependency was established (equation 1) with a high level of correlation ($R^2 = 0.99$) (Figure 12).

$$\sigma_y = 0.5482 \cdot \frac{P_y}{t^2} - 158.79. \quad (4)$$

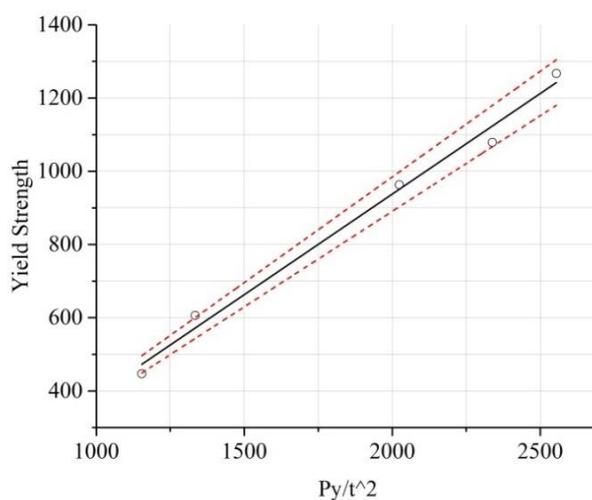


Figure 12. Correlation between the yield strength and the value of P_y/t^2 according to the SPT method for the 35X steel material

CONCLUSION

As part of this work, the following activities have been conducted:

– The test device for testing miniature samples using the SPT (Small Punch Test) method has been designed and manufactured.

– The procedure for manufacturing miniature samples according to the requirements of the methodology has been tested. A series of methodical tests by the SPT method of samples made of heat-treated 35X steel with strength characteristics in a wide range has been performed.

– The obtained results of methodical tests were analyzed and a linear relationship was established between the actual values of the yield strength $\sigma_{0.2}$ (tensile test) of the 35X steel material and the value of P_y/t^2 (SPT method).

This research was funded by the Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan (BR09158470).

REFERENCES

1. M.P. Manahan, A.S. Argon, O.K. Harling, Mechanical behavior evaluation using the miniaturized disk bend test, Quaterly Progress Report on Damage Analysis and Fundamental Studies (1981) 82–103. DOE/ER-0046/8.
2. M.P. Manahan, A.S. Argon, O.K. Harling, The development of a miniaturized disk bend test for the determination of postirradiation mechanical properties, J. Nucl. Mater. (1981) 1545e1550, 103 & 104.
3. Y. Peng, L. Cai, H. Chen, C. Bao, A new method based on energy principle to predict uniaxial stress–strain relations of ductile materials by small punch testing. Int. J. Mech. Sci. 138–139, 244–249 (2018).
4. D. Andrés, T. García, S. Cicero, R. Lacalle, J.A. Álvarez, A. Martín-Meizoso, J. Aldazabal, A. Bannister, A. Klimpel, Characterization of heat affected zones produced by thermal cutting processes by means of Small Punch tests. Mater. Charact. 119, 55–64 (2016).
5. X. Yang, X. Wang, X. Ling, D. Wang, Enhanced mechanical behaviors of gradient nano-grained austenite stainless steel by means of ultrasonic impact treatment. Results Phys. 7, 1412–1421 (2017).
6. S.-H. Chi, J.-H. Hong, I.-S. Kim, Evaluation of irradiation effects of 16 MeV proton-irradiated 12Cr–1MoV steel by small punch (SP) tests. Scr. Metall. Mater. 30(12), 1521–1525 (2000).
7. C. Rodríguez, E. Cárdenas, F.J. Belzunce, C. Betegón, Fracture characterization of steels by means of the small punch test. Exp. Mech. 53(3), 385–392 (2013).
8. Fleury E, Ha JS. Small punch tests to estimate the mechanical properties of steels for steam power plant: I. Mechanical strength. Int J Press Vessels Pip 1998;75:699–706. [https://doi.org/10.1016/S0308-0161\(98\)00074-X](https://doi.org/10.1016/S0308-0161(98)00074-X).
9. Calaf-Chica J, Bravo PM, Preciado M. Improved correlation for the elastic modulus prediction of metallic materials in the Small Punch Test. Int J Mech Sci 2017;134:112–22. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.10.006>.
10. Mao X, Takahashi H. Development of a further-miniaturized specimen of 3mm diameter for TEM disk (\varnothing 3 mm) small punch tests. J Nucl Mater 1987;150:42–52. [https://doi.org/10.1016/0022-3115\(87\)90092-4](https://doi.org/10.1016/0022-3115(87)90092-4).
11. Okada A, Hamilton ML, Garner FA. Microbulge testing to neutron irradiated materials. J Nucl Mater 1991;179–181:445–8. [https://doi.org/10.1016/0022-3115\(91\)90120-V](https://doi.org/10.1016/0022-3115(91)90120-V).
12. Ruan Y, Spatig P, Victoria M. Assessment of mechanical properties of the martensitic steel EUROFER97 by means of punch tests. J Nucl Mater 2002;307–311:236–9. [https://doi.org/10.1016/S0022-3115\(02\)01194-7](https://doi.org/10.1016/S0022-3115(02)01194-7).
13. Baik J-M, Kameda J, Buck O. Small punch test evaluation of intergranular embrittlement of an alloy steel. Scr Metall 1983;17:1443–7. [https://doi.org/10.1016/0036-9748\(83\)90373-3](https://doi.org/10.1016/0036-9748(83)90373-3).
14. Kameda J, Ranjan R. Characterization of deformation and fracture behavior in amorphous and/or ceramic coatings and aluminum alloy substrates by small punch testing and acoustic emission techniques. Mater Sci Eng A 1994;183: 121–30. [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(94\)90896-6](https://doi.org/10.1016/0921-5093(94)90896-6).
15. Ule B, et al. Small punch test method assessment for the determination of the residual creep life of Service exposed components: outcomes from an interlaboratory exercise. Nucl. Eng. Des. 1999;192:1–11. [https://doi.org/10.1016/S0029-5493\(99\)00039-4](https://doi.org/10.1016/S0029-5493(99)00039-4).
16. CEN Workshop Agreement CWA 15627, European Code of Practise: Small Punch Test Method for Metallic Materials. (2007).
17. ASTM E3205-20, Standard Test Method for Small Punch Testing of Metallic Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020.
18. M.F. Moreno, G. Bertolino, A. Yawny, The significance of specimen displacement definition on the mechanical properties derived from Small Punch Test, Materials and Design 95 (2016) 623–631. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.01.148>.
19. C. Rodríguez, J. García, E. Cárdenas, C. Betegón, Mechanical properties characterization of heat-affected zone using the small punch test, Welding Research 88 (2009) 188–192.

**SPT ӘДІСІ БОЙЫНША ШАҒЫН ҮЛГІЛЕРДІ СЫНАУҒА
АРНАЛҒАН СЫНАҚ ҚҰРЫЛҒЫСЫН ӘЗІРЛЕУ**

Е.Д. Даулетханов, Е.Е. Сапатаев, Н.А. Оразғалиев, Е.Б. Арынғазы

ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

Жұмыста шағын үлгілерді SPT әдісімен сынау үшін сынақ құрылғысын әзірлеу және дайындау, сондай-ақ құрастыру нәтижелері келтірілген. Әр түрлі температурада термиялық өңдеуден кейін (шындау+жұмсарту) 35X болат материалын созу және SPT әдістерімен механикалық сынау нәтижелері көрсетілген. Термиялық өңдеу режиміне байланысты 35X маркалы болаттың беріктік сипаттамаларының өзгеруін бағалау жүргізілді. $t/10$ әдісі мен созылу сынақтары кезінде алынған әрбір 35X болат үлгісінің аққыштық шегі арасындағы корреляциялық теңдеулер анықталды және алынды.

Түйін сөздер: SPT әдісі, әзірлеу, созу сынағы, аққыштық, беріктілік.

**РАЗРАБОТКА ИСПЫТАТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЯ
МИНИАТЮРНЫХ ОБРАЗЦОВ МЕТОДОМ SPT**

Е.Д. Даулетханов, Е.Е. Сапатаев, Н.А. Оразғалиев, Е.Б. Арынғазы

Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

В работе приведены результаты разработки и изготовления, а также сборки и монтажа испытательного устройства для проведения испытания миниатюрных образцов методом SPT. Приведены результаты механических испытаний методами на растяжение и SPT материала стали 35X после термообработки (закалка+отпуск) при различных температурах отпуска. Выполнена оценка изменений прочностных характеристик стали марки 35X в зависимости от режима термообработки. Определены и получены корреляционные уравнения между методом $t/10$ и пределами текучести каждого образца стали 35X, полученными при испытаниях на растяжение.

Ключевые слова: метод SPT, разработка, испытания на растяжение, текучесть, прочность.

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2022-2-40-45>

УДК: 621.039.63

ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА С ЛИТИЕВЫМИ КЕРАМИКАМИ РАЗНЫХ СОРТОВ

С.К. Аскербеков¹⁾, А.У. Толенова¹⁾, Е.А. Нестеров²⁾

¹⁾ *Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан*

²⁾ *Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия*

E-mail для контактов: askerbekov@physics.kz

В данной работе описаны результаты экспериментов по исследованию взаимодействия изотопов водорода с литиевыми керамиками разных сортов. Исследования проводились в два этапа: цикл работ по насыщению образцов в среде дейтерия – на установке для исследования взаимодействия газов с материалами (CorrSiC'a) на базе промышленной высоковакуумной трубчатой печи GSL-1600, при температурах 300 °С, 500 °С, 700 °С; эксперименты по термодесорбции (ТДС) – на установке с нагревом образца бесконтактным способом (индукционным нагревом) со скоростью 2 К/с и 10 К/с, при давлении остаточных газов в камере установки $\sim 10^{-4}$ Па. Получены значения энергии активации десорбции дейтерия из литиевой керамики разных сортов.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Республики Казахстан в рамках проекта AP09259535.

Ключевые слова: литиевая керамика, дейтерий, тритий, бланкет, ТЯР, воспроизводство трития.

ВВЕДЕНИЕ

Использование керамических материалов для воспроизводства трития в бланкете термоядерной установки (ТЯР) [1] открывает широкие возможности для развития термоядерной энергетики благодаря их теплофизическим и термомеханическим характеристикам, высокой скорости образования и выделения трития. Сегодня предлагаются разные литийсодержащие керамики для бланкетов (Li_2TiO_3 , Li_4SiO_4 , Li_2O , Li_2ZrO_3 и Li_2AlO_2) [2, 3], которые хорошо зарекомендовали себя в многочисленных экспериментах с нейтронным облучением, продемонстрировав высокую термическую стабильность и необходимые параметры выхода трития.

Целью проводимых экспериментов было определение энергий активации основных процессов десорбции дейтерия из некоторых видов литиевой керамики при индукционном нагреве. Второй важной задачей было определение оптимальной массы литиевой керамики, которая обеспечит: во-первых, надежную регистрацию процесса выделения дейтерия квадрупольным масс-анализатором; во-вторых, количество литиевой керамики должно обеспечить хо-

рошо различимые десорбционные пики при ТДС исследованиях, позволяющие рассчитать энергию активации процесса выхода дейтерия.

ИССЛЕДУЕМЫЙ МАТЕРИАЛ

Для сравнения исследовались два типа керамики: образцы литиевой керамики в виде шариков (пэбблов) и крупнозернистого порошка различного состава и размеров (см. таблицу 1).

Образцы литиевой керамики Li_2TiO_3 (шарики диаметром 2 мм) с $\sim 96\%$ обогащением по литию-6 предоставлены JAEA, Япония [4]. Образцы изготавливались «влажным» процессом, состоящим в изготовлении гелевых сфер, их кальцинировании и спекании.

Образцы метацирконата лития были изготовлены методом твердотельного синтеза с использованием солей $\text{Li}_{0.2}\text{Zr}_{0.8}\text{O}_3$, ZrO_2 и $\text{LiClO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (99,99% Sigma Aldrich). Смесь растиралась в агатовой ступке и затем перемалывалась в планетарной мельнице в течение часа со скоростью 400 об/мин. Далее смесь отжигалась в кислородной атмосфере при 900 °С в течение 6 часов.

Таблица 1. Параметры исследуемых образцов

	Li_2TiO_3 (метатитанат лития)	Li_2ZrO_3 (метацирконат лития)
Диаметр частиц, мм	2	0,052 (средний размер фракции)
Обогащение по литию-6 (^6Li)	96%	7,5%
Масса образцов, грамм	2,001	2,053
Внешний вид		

**МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ
И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ**

Эксперименты проводились по следующей схеме (см. рисунок 1). Насыщение образцов проводилось в среде дейтерия с чистотой 99,99% при атмосферном давлении при температурах 300 °С, 500 °С, 700 °С в течение 2 часов. Далее с насыщенными дейтерием образцами проводились ТДС эксперименты.

УСТАНОВКА CORRSiC’A

Эксперименты по насыщению образцов дейтерием проводились на ранее созданной установке CorrSiC’a для исследования взаимодействия газов с материалами на базе промышленной высоковакуумной трубчатой печи GSL-1600 [5]. Установка предназначена для проведения коррозионных испытаний образцов в парах воды, но может также использоваться для высокотемпературного (до 1500–1600 °С) насыщения образцов водородом и/или дейтерием при абсолютном давлении до 2 атм. Нагреваемая камера печи (рисунок 2) выполнена из трубы высококачественного оксида алюминия (Al_2O_3 99,8%) длиной 1000 мм, внешним диаметром 50 мм и внутренним диаметром 40 мм (толщина стенки 5 мм) и снабжена вакуумными шлюзами с термостойким силиконовым уплотнением, обеспечивающими уровень натекания не более 0,1 Па·л/мин. Длина нагреваемой зоны –

300 мм, зона однородного нагрева – 150 мм, точность поддержания температуры ± 1 °С. Образцы загружаются в центр нагреваемой зоны в загрузочном тигле из высококачественного оксида алюминия. Для предотвращения нагрева излучением из горячей области тигля стальных вакуумных фланцев и силиконовых уплотнительных колец в них, в печь устанавливаются тепловые экраны из пористого оксида алюминия (искусственного корунда). Корундовые экраны имеют 3 мм зазор со стенками трубы печи и, при установке их на краю зоны теплоизоляции, эффективно предотвращают нагрев фланцев выше 150 °С даже при температуре печи 1500 °С, не нарушая при этом движение медленных газовых потоков. Печь питается от сети однофазного переменного тока 220 В, 30 А, мощность 4 кВт.

Дополнительно установка снабжена передвижным постом высоковакуумной безмасляной откачки TPS-Compact на базе турбомолекулярного насоса TV-301 и сухого спирального насоса IDP-3 (Agilent Technologies), что позволяет исключить возможность попадания высокомолекулярных органических соединений в вакуумную систему установки и в область насыщения. Структурная схема установки приведена на рисунке 3.

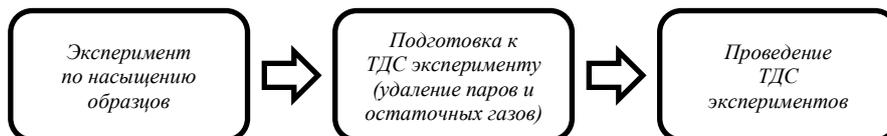


Рисунок 1. Схема проведения термодесорбционных экспериментов



Рисунок 2. Схема расположения элементов рабочей камеры установки CorrSiC’a при насыщении дейтерием образцов литиевой керамики

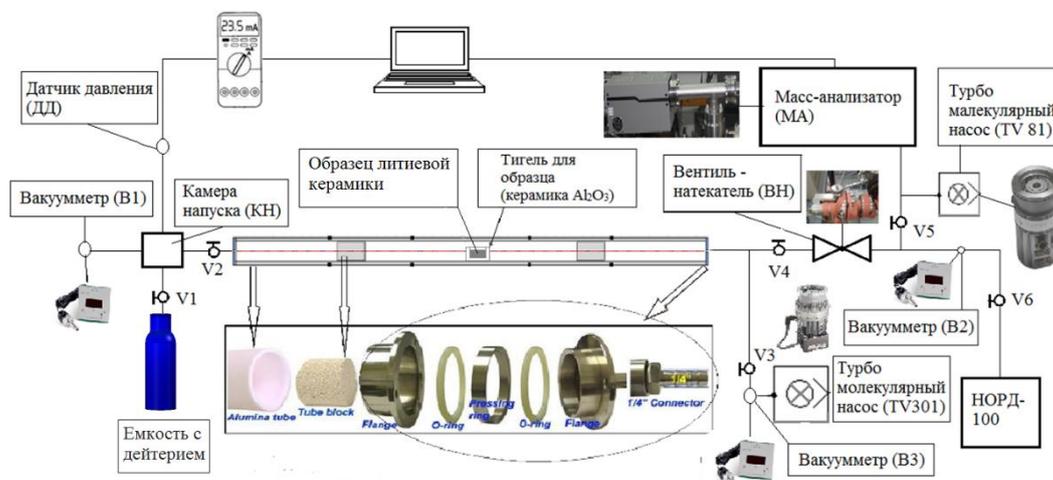
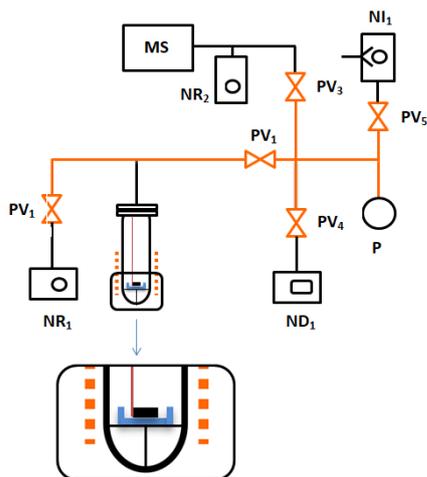


Рисунок 3. Структурная схема установки CorrSiC’a при насыщении литиевой керамики дейтерием

ТДС УСТАНОВКА

Принципиальная схема ТДС установки приведена на рисунке 4 [6]. Оранжевым цветом на рисунке 4 обозначены прогреваемые вакуумные соединения. Образец литиевой керамики, после насыщения дейтерием, загружается вертикально в герметичный тигель из высококачественного и плотного оксида алюминия на стальную чашку-нагреватель. Установка герметизируется и откачивается. Нагрев образца осуществляется бесконтактным способом, индукционным нагревом. При таком способе стальной тигель-держатель служит основным источником тепла, и эффективно нагревает исследуемую керамику, а труба из оксида алюминия нагревается гораздо меньше, чем при традиционном контактном омическом нагреве, что предохраняет вакуумные уплотнения на соединительных фланцах от перегрева. В ходе линейного нагрева предварительно насыщенного образца выделяемый из него дейтерий регистрируется с помощью масс-анализатора. Установка позволяет проводить загрузку образцов и последующий предварительный отжиг камеры, без ее разгерметизации.



PV1-PV5 – вакуумные клапаны; NR1 – турбомолекулярный насос на базе вакуумного поста (TurboV 301); NR2 – турбомолекулярный насос масс-спектрометра RGA-100 (TurboV 81M); MS – масс-спектрометр RGA-100; ND1 – механический насос; NI1 – магнитно-разрядный насос (НОРД-100); P – датчик давления (FRG700)

Рисунок 4. Схема ТДС установки

Регистрация выхода дейтерия в ходе ТДС экспериментов заключалась в измерении временных изменений концентраций дейтерий-содержащих газовых компонент (D_2 , HD, HDO и D_2O) в вакуумной области установки и определения суммарного выхода дейтерия путем численного расчета с учетом коэффициентов чувствительности масс-спектрометра для каждой из указанных компонент. Сразу заметим, что содержание тяжелой воды (HDO и D_2O) составило менее 1% от общего выхода дейтерия, что обусловлено вакуумными условиями эксперимента.

Оптимальные количества каждой керамики, позволяющие получить уверенную регистрацию ТДС

кривых, равно 1 грамму, и определялись экспериментально, методом проб.

Эксперименты по ТДС проводились со скоростью 2 К/с; 10 К/с, при частоте регистрации развернутого масс-спектра (от M2 до M44) 22 секунды/скан; при давлении остаточных газов в камере установки $\sim 10^{-4}$ Па.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ.

АНАЛИЗ ДАННЫХ

На рисунках 5 и 6 приведены характерные ТДС зависимости газовой выделенности дейтерия из соответствующих исследуемых образцов керамики. Насыщение дейтерием производилось для обеих керамик одновременно. Здесь стоит также отметить, что исследуемые керамики удалось насытить дейтерием до квазиравновесных значений только при температуре насыщения 700 °С. При более низких температурах образцы метатитаната лития не достигали полного и равномерного насыщения (видимо из-за большого диаметра шарика). Критерием достижения равномерного насыщения шариков считалось достижение температуры насыщения, после которого пик основного выделения дейтерия при ТДС не сдвигался в сторону увеличения температуры и не увеличивался по амплитуде.

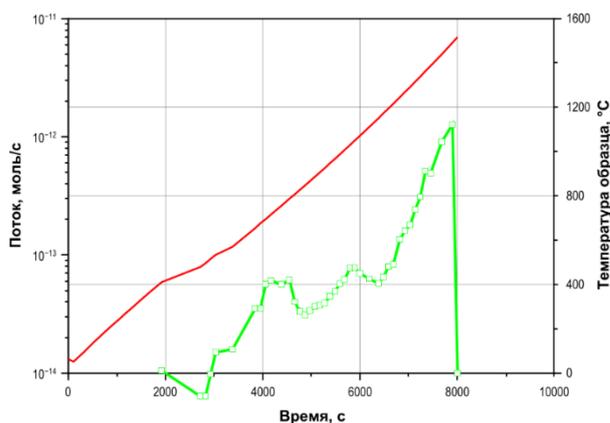


Рисунок 5. Кинетика выделения дейтерия из образца Li_2TiO_3 (после насыщения при 700 °С)

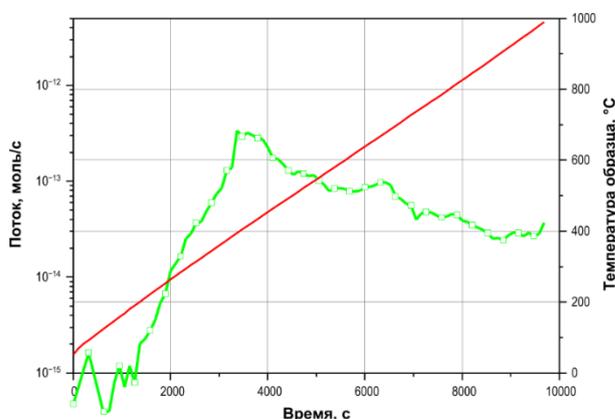


Рисунок 6. Кинетика выделения дейтерия из образца Li_2ZrO_3 (после насыщения при 700 °С)

Как видно из графиков, выделение дейтерия имеет качественно разный характер, что может быть вызвано рядом факторов, таких как объемная и/или поверхностная пористость исходных образцов, которая могла быть различной. Также анализируя набор ТДС-спектров, можно на основании хорошо выраженных пиков выделения определить энергии активации процессов газовой выделения дейтерия из литиевых керамик.

Оценка энергии активации газовой выделения дейтерия проводилась согласно следующим известным представлениям [7–10], а именно:

1) Выделение дейтерия из образцов в основном обусловлено выделением атомов дейтерия по комбинированному десорбционно-диффузионному механизму из неких центров накопления, и может быть лимитировано диффузией дейтерия в образце (однако высокая пористость образцов приводит к минимальному диффузионному пути для дейтерия, находящегося в объеме), поскольку при анализе ТДС выделения дейтерия из керамических порошков образцов не было отмечено существенных сдвигов пиков выделения дейтерия в сторону низких температур (которые непременно должны наблюдаться при уменьшении размеров частиц, если выделение обусловлено диффузионным механизмом). При десорбционной картине выражение для потока дейтерия из образца можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} \Omega(t, T) &= \sum_i g_i(T) \cdot N_i(T) = \\ &= \sum_i g_i(T) \cdot N_i(0) \cdot \exp(-g_i(T) \cdot t), \end{aligned} \quad (1)$$

где i – сорт центра накопления; $N_i(0)$ – первоначальная концентрация дейтерия на i -ом центре; $g(T)$ – газокинетический коэффициент [11], характеризующий центр накопления.

2) Зависимость кинетического коэффициента $g(T)$ от температуры представима в следующем активационном виде:

$$g(T) = g_0 \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right), \quad (2)$$

3) Из выражений (1), (2) можно получить для максимума газовой выделения из одного центра накопления, с учетом того, что температура образца изменяется по линейному закону $T = T_0 + \beta \cdot t$, следующее выражение для энергии активации газовой выделения:

$$\frac{E_{a,i}}{R \cdot T_{\max,i}^2} = \frac{A_i}{\beta} \exp\left(\frac{-E_{a,i}}{R \cdot T_{\max,i}}\right), \quad (3)$$

Нами были выбраны графики выделения дейтерия с достаточно различимыми пиками выделения, приведенные на рисунках 5 и 6. В упрощающем предположении, что существует лишь один центр накопления (нет синергетического коллективного воздействия множества центров), были оценены значения

энергии активации газовой выделения дейтерия, которые приведены в таблице 2.

Также нами были проведены оценки энергии газовой выделения по методу Редхеда [12]. Получаемый пик газовой выделения в данном случае описывается термодесорбцией первого порядка – или т.н. псевдо-термодесорбцией первого порядка. Газовыделение из таких центров накопления связано с образованием путей выхода дейтерия из образца в результате нагрева.

В методе Редхеда для произвольного пика десорбции (рисунок 7) с полной шириной на половине высоты максимума ω и полуширинами со стороны высоких и низких температур δ и τ используется следующее приближение, где высокотемпературная половина пика аппроксимируется треугольником той же высоты и полуширины:

$$n_{\max} = \int_T^{\infty} c \left(\frac{dt}{dT} \right) P dt \approx c \frac{dt}{dT} P_{\max} \delta, \quad (4)$$

где n_{\max} – плотность молекул в центре накопления (или в образце) при T_{\max} , c – постоянная, P – парциальное давление дейтерия в системе в момент времени t .

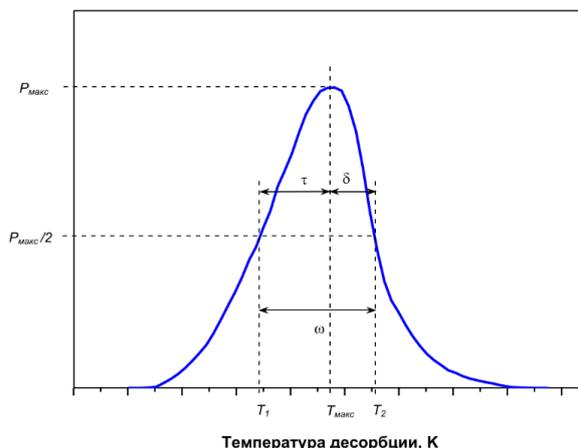


Рисунок 7. Произвольный пик десорбции с полной шириной на половине максимальной высоты ω и полуширинами для низко- и высокотемпературных частей пика τ и δ

Величина P_{\max} связана с максимальной скоростью десорбции, так что можно написать

$$-\left(\frac{dn}{dT} \right)_{\max} = c P_{\max} = \left(\frac{dT}{dt} \right) E_d \frac{n_{\max}}{\chi R T_{\max}^2}, \quad (5)$$

где χ – порядок десорбции (1 или 2). Отсюда выражение для энергии активации:

$$E_d = \frac{\chi R T_{\max}^2}{\delta}. \quad (6)$$

Для слаборазрешенных пиков газовой выделения, которым соответствуют энергии активации газовой выделения, однородно распределенные между E_{d1} и E_{d2} ,

можно считать, что выделение дейтерия в этом интервале описывается наложением пиков с дискретными энергиями. Для кинетики первого порядка тогда будем иметь:

$$-\frac{dn}{dt} = -\sum_i \frac{dn}{dt} = \int_{E_{d_2}}^{E_{d_1}} v_i \exp\left(-\frac{E_{d_i}}{RT}\right) n_i dE_{d_i}, \quad (7)$$

где n_i – количество частиц, адсорбированных в местах, для которых $E_d = E_{d_i}$ в момент времени t . Оно определяется выражением

$$n_i = \frac{n_0}{E_{d_2} - E_{d_1}} \exp\left[-v \int_0^t \exp\left(-\frac{E_{d_i}}{RT}\right) dt\right]. \quad (8)$$

Здесь величина T_{\max} приблизительно линейна по E_d , и в результате получается довольно постоянная скорость газовой выделенной и, следовательно, широкий плоскоусеченный пик между $T_{\max 1}$ и $T_{\max 2}$

Полученные результаты по энергиям газовой выделенной (для пиков с максимальными весами по содержанию дейтерия в центре накопления) неплохо совпали со значениями газовой выделенной, полученными в предыдущем расчете.

Таблица 2. Рассчитанные значения энергий активаций выхода дейтерия для разных керамик

	Li_2TiO_3	Li_2ZrO_3
E_a , кДж/моль	120 ± 10	95 ± 5

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работ по исследованию процессов взаимодействия образцов двух типов литиевой керамики (Li_2TiO_3 и Li_2ZrO_3) с дейтерием в лабораторных условиях, были получены кривые термодесорбции дейтерия и определены энергии активации десорбции для каждого типа керамики.

Установлено, что масса образцов должна быть не менее одного грамма для уверенной регистрации выделения дейтерия имеющимися средствами анализа, а насыщение образцов дейтерием при давлении 2 атм должно проводиться при температуре не ниже 700–750 °С для достижения равномерного насыщения.

Энергии активации термодесорбции (основного пика) составили: для Li_2TiO_3 – 120 ± 10 кДж/моль; для Li_2ZrO_3 – 95 ± 5 кДж/моль.

ЛИТЕРАТУРА

1. T. Tanabe, Tritium: Fuel of Fusion Reactors, Springer, 2017. – P. 273–294;
2. R. Lässer, A. Antipenkov, N. Bekris et al. "Tritium in fusion: R&D in the EU" // Fusion Science and Technology 54(1):39–44 July 2008. <https://doi.org/10.13182/FST08-A1761>
3. L.M. Giancarli et al. Overview of the ITER TBM Program. Fusion Engineering and Design, 87 (2012) 395–402.
4. K. Tsuchiya, H. Kawamura, K. Fuchinoue, H. Sawada, K. Watarumi, Fabrication development and preliminary cha-

- acterization of Li_2TiO_3 pebbles by wet process // J. Nucl. Mater. 258–263 (1998) 1895–1990.
5. Chikhay Y., Kulsartov T., Shestakov V., Kenzhina I., Askerbekov S., Sumita J., Ueta S., Shibata T., Sakaba N., Abdullin Kh., Nemkayeva R. Corrosion test of HTGR graphite with SiC coating // International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology (HTR 2016): ANS Proceedings, Las Vegas, NV, November 6–10, 2016. – Vol. 1. – P. 572–577.
6. Габдуллин М.Т. и др. Способ проведения термодесорбционных исследований газовой выделенной водорода из металлических образцов малой массы / Габдуллин М.Т., Кульсартов Т.В., Заурбекова Ж.А., Чихрай Е.В. // Патент РК на полезную модель №5335, опубл. 28.08.2020.
7. Бекман И.Н. Экспериментальные методы изучения диффузии радиоактивных газов в твердых телах, 7 Сорбционный метод // Радиохимия, 1983. № 2. – С. 252–261.
8. Redhead P. Thermal desorption of gases // Vacuum, 1962. – Vol. 12, № 8. – P. 203–211.
9. Беграмбеков Л.Б., Курнаев В.А., Писарев А.А. Метод определения энергии активации для процесса диффузии газа, внедренного в металл // Атомная энергия, 1971. – Том 31, вып. 6. – С. 625–626.
10. Писарев А.А., Бандурко В.В., Цыплаков В.Н. Определение энергии активации газовой выделенной ионно-внедренного дейтерия из нержавеющей стали // Атомная энергия, 1987. – Том 63, – P. 28–30.
11. Габис И.Е., Компаниец Т.И., Курдюмов А.А. Поверхностные процессы и водородопроницаемость металлов // Взаимодействие водорода с металлами / под ред. А.П. Захарова. – М.: Наука, 1987. – С. 177–208.
12. Вудраф Д., Делчар Т. // Современные методы исследования поверхности. М.: Мир, 1989. – 568 с.

REFERENCES

1. T. Tanabe, Tritium: Fuel of Fusion Reactors, Springer, 2017. – P. 273–294;
2. R. Lässer, A. Antipenkov, N. Bekris et al. "Tritium in fusion: R&D in the EU" // Fusion Science and Technology 54(1):39–44 July 2008. <https://doi.org/10.13182/FST08-A1761>
3. L.M. Giancarli et al. Overview of the ITER TBM Program. Fusion Engineering and Design, 87 (2012) 395–402.
4. K. Tsuchiya, H. Kawamura, K. Fuchinoue, H. Sawada, K. Watarumi, Fabrication development and preliminary characterization of Li_2TiO_3 pebbles by wet process // J. Nucl. Mater. 258–263 (1998) 1895–1990.
5. Chikhay Y., Kulsartov T., Shestakov V., Kenzhina I., Askerbekov S., Sumita J., Ueta S., Shibata T., Sakaba N., Abdullin Kh., Nemkayeva R. Corrosion test of HTGR graphite with SiC coating // International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology (HTR 2016): ANS Proceedings, Las Vegas, NV, November 6–10, 2016. – Vol. 1. – P. 572–577.
6. Gabdullin M.T. i dr. Sposob provedeniya termodesorbtsionnykh issledovaniy gazovydeleniya vodoroda iz metallicheskih obraztsov maloy massy / Gabdullin M.T., Kul'sartov T.V., Zaurbekova Zh.A., Chikhay E.V. // Patent RK na poleznuyu model' No. 5335, opubl. 28.08.2020.

7. Bekman I.N. Eksperimental'nye metody izucheniya diffuzii radioaktivnykh gazov v tverdykh telakh, 7 Sorbtsionnyy metod // Radiokhimiya, 1983. No. 2. – P. 252–261.
8. Redhead P. Thermal desorption of gases // Vacuum, 1962. – Vol. 12, No. 8. – P. 203–211.
9. Begrambekov L.B., Kurnaev V.A., Pisarev A.A. Metod opredeleniya energii aktivatsii dlya protsessov diffuzii gaza, vnedrennogo v metall // Atomnaya energiya, 1971. – Tom 31, issue 6. – P. 625–626.
10. Pisarev A.A., Bandurko V.V., Tsyplakov V.N. Opredelenie energii aktivizatsii gazovydeniya ionno-vnedrennogo deuteriya iz nerzhavayushchey stali // Atomnaya energiya, 1987. – Tom 63, – P. 28–30.
11. Gabis I.E., Kompaniets T.I., Kurdyumov A.A. Poverkhnostnye protsessy i vodorodopronitsaemost' metallov // Vzaimodeystvie vodoroda s metallami / pod red. A.P. Zakharova. – Moscow: Nauka, 1987. – P. 177–208.
12. Vudraf D., Delchar T. // Sovremennyye metody issledovaniya poverkhnosti. Moscow: Mir, 1989. 568 p.

СУТЕГІ ИЗОТОПТАРЫНЫҢ ӘРТҮРЛІ СОРТТЫ ЛИТИЙ КЕРАМИКАЛАРЫМЕН ӘРЕКЕТТЕСУІН ЗЕРТТЕУ ЭКСПЕРИМЕНТТЕРІ

С.К. Аскербеков¹, А.У. Толенова¹, Е.А. Нестеров²

¹ *ал-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан*

² *Томск политехникалық ұлттық зерттеу университеті, Томск, Ресей*

Бұл жұмыста сутегі изотоптарының әртүрлі сортты литий керамикаларымен өзара әрекеттесуін зерттеу эксперименттерінің нәтижелері сипатталған. Зерттеулер екі кезеңде жүргізілді: дейтерий ортасында үлгілерді қанықтыру жөніндегі жұмыстар циклі 300 °С, 500 °С, 700 °С температураларда GSL-1600 өнеркәсіптік жоғары вакуумдық құбырлы пеш базасында газдардың материалдармен (CorrSiC'a) өзара әрекеттесуін зерттеуге арналған қондырғыда жүргізілді; үлгіні қыздыру байланыссыз тәсілмен, индукциялық қыздырумен, 2 К/с және 10 К/с жылдамдықпен, қондырғы камерасындағы қалдық газдардың қысымы $\sim 10^{-4}$ Па болғанда қондырғысындағы кейінгі термодесорбциялық (ТДС) эксперименттермен жүзеге асырылады. Әр түрлі сортты литий керамикасынан дейтерий газын шығарудың активтендіру энергиясының мәні алынды.

Жұмыс AP09259535 жобасы аясында Қазақстан Республикасы Білім және ғылым министрлігінің қолдауымен орындалды.

Түйін сөздер: литий керамикасы, дейтерий, тритий, бланкет, ТЯР, тритийдің көбеюі.

EXPERIMENTS ON THE INTERACTION OF HYDROGEN ISOTOPES WITH LITHIUM CERAMICS OF DIFFERENT GRADES

S.K. Askerbekov¹, A.U. Tolonova¹, E.A. Nesterov²

¹ *al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan*

² *National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia*

This paper describes the results of experiments on the interaction of hydrogen isotopes with lithium ceramics of different grades. The studies were carried out in two stages: a cycle of work on saturation of samples in a deuterium medium was conducted at a facility for studying the interaction of gases with materials (CorrSiC'a) based on an industrial high-vacuum tube furnace GSL-1600, at temperatures of 300 °C, 500 °C, 700 °C; thermal desorption (TDS) experiments at a facility, where the sample is heated by a non-contact method (induction heating) at a rate of 2 K/s and 10 K/s, at a pressure of residual gases in the installation chamber $\sim 10^{-4}$ Pa. The values of the activation energy of deuterium gas release from lithium ceramics of different grades are obtained.

The work was carried out with the support of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan within the framework of the AP09259535 project.

Keywords: lithium ceramics, deuterium, tritium, blanket, TNR, tritium breeding.

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2022-2-46-52>

УДК 546.65; 615.849.5; 542.06; 661.12

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЯДЕРНОЙ МЕДИЦИНЫ В РЕСПУБЛИКЕ КАЗАХСТАН: РЕАКТОРНЫЕ ИЗОТОПЫ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ТЕРАПИИ

А.Н. Гурин, Е.Т. Чакрова, З.В. Медведева, С.Г. Солониккина

Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан

E-mail для контактов: gurin.andrey@inp.kz

Радиоактивные изотопы редкоземельных элементов обладают эффективными ядерно-физическими свойствами и являются перспективными для разработки новых радиофармпрепаратов (РФП) терапевтического назначения. К редкоземельным элементам (РЗЭ) относятся 17 элементов побочной подгруппы III группы периодической таблицы химических элементов Д.И. Менделеева с атомными номерами 21, 39, 57, 58–71: скандий, иттрий, лантан и 14 лантаноидов. Некоторые радиоактивные изотопы данных элементов уже используются в медицине в качестве радиоактивной составляющей разрешенных к применению лекарственных средств, например, изотопы самария – ^{153}Sm [1] и ^{177}Lu [2], а для некоторых возможность их использования в медицине только изучается. Так, изотоп скандия – ^{47}Sc изучается как потенциальный радиоизотоп для тераностики онкологических заболеваний [3,4], гольмий – ^{166}Ho как изотоп для радиосиновектомии и брахитерапии [5], празеодим – ^{142}Pr перспективен для брахитерапии [6]. Способность редкоземельных элементов образовывать химические связи с органическими молекулами, в том числе пептидами природного и синтетического происхождения, является основой разработки новых препаратов для адресной терапии рака молочной и предстательных желез, нейроэндокринных опухолей, диссеминированного рака лёгких и других видов заболеваний.

Для определения перечня наиболее перспективных для облучения на реакторе ВВР-К РЗЭ с целью наработки радиоактивных изотопов была проведена оценка способов наработки радиоактивных изотопов и анализ их ядерно-физических характеристик по литературным данным. Такие изотопы как: ^{166}Ho , ^{165}Dy , ^{90}Y , ^{175}Yb , ^{153}Sm , ^{177}Lu , ^{147}Nd , ^{170}Tm , ^{159}Gd и ^{141}Ce могут быть использованы в терапии онкологических заболеваний.

Данная исследовательская работа позволяет оценить возможность получения радиоизотопов РЗЭ по реакции (n, γ) на реакторе ВВР-К, а также отражает перспективы применения данных изотопов при разработке радиофармпрепаратов нового поколения для терапии онкозаболеваний.

Ключевые слова: редкоземельные элементы, нейтроны, радиофармпрепараты (РФП), ядерно-физические свойства, радионуклиды, реактор ВВР-К.

ВВЕДЕНИЕ

Ядерная медицина – это быстро развивающаяся междисциплинарная область, основанная на использовании радиоактивных нуклидов в диагностических и терапевтических целях [7]. Около 3800 радиоактивных изотопов могут быть получены искусственно путем активации химических элементов нейтронами на ядерном реакторе или заряженными частицами на циклотроне или ускорителе; около 200 радиоизотопов были исследованы на предмет потенциального медицинского применения, и менее 50 из них регулярно используются в клинической практике. Большая часть радиоизотопов, около 90%, используется в диагностических целях. Подавляющее большинство медицинских процедур как диагностического, так и терапевтического назначения проводится в развитых странах. В частности, в США проводится более 20 миллионов процедур у 311 миллионов человек в год, в Европе проводится около 10 миллионов процедур у 500 миллионов человек. В использовании методов ядерной медицины в терапевтических целях лидирует Австралия [8].

Радионуклидная терапия на протяжении многих лет является одним из актуальных направлений в

борьбе с онкологическими заболеваниями во всём мире, а для Республики Казахстан является особенно важной, так как использование данного метода только входит в клиническую практику лечения онкозаболеваний. Особенностью радионуклидной терапии является высокая специфичность и эффективность, совмещенная с минимальным количеством побочных эффектов. В некоторых случаях радионуклидная терапия не имеет альтернативы [9].

В настоящее время в Республике Казахстан функционируют 7 центров и отделений ядерной медицины, и только в одном из них используют радионуклидную терапию при лечении рака щитовидной железы. В г. Алматы функционируют: Казахский научно-исследовательский институт онкологии и радиологии, Научно-исследовательский институт кардиологии и внутренних болезней, ТОО «Орхун медицина», АО «Сункар», ТОО «МедИнвестГрупп Казахстан», в г. Нур-Султан: Республиканский диагностический центр, Больница Медицинского центра Управления Делами Президента и в г. Семей Центр ядерной медицины и онкологии.

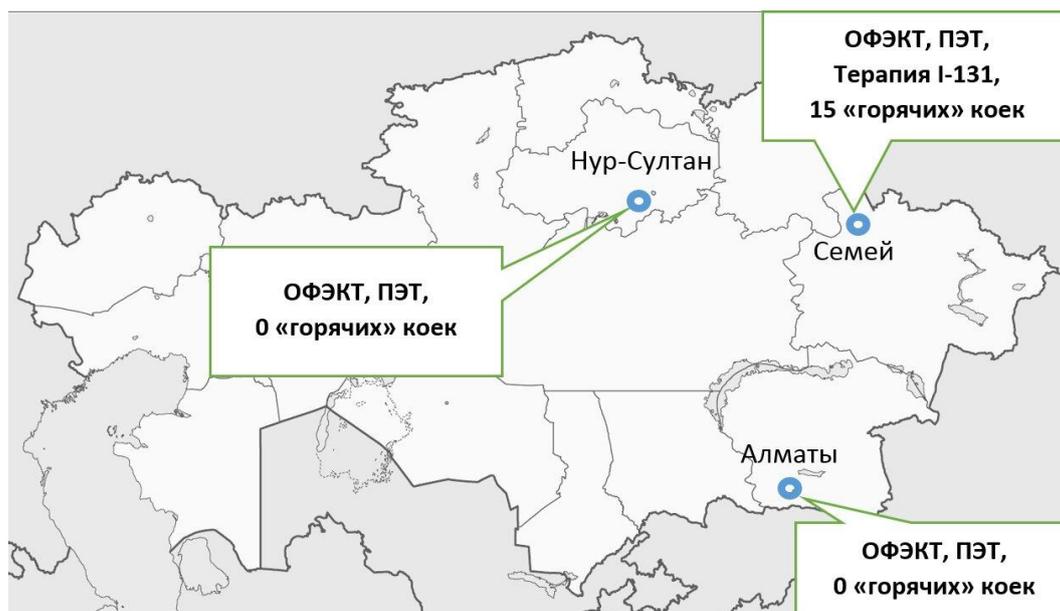


Рисунок. Расположение действующих центров ядерной медицины в Республике Казахстан

В 2021 году РГП на ПХВ «Институт ядерной физики» начал регулярное производство радиофармпрепарата «Натрия йодид ^{131}I , раствор для приёма внутрь». В этом же году препарат был внесён в казахстанский национальный формуляр и с этого года граждане Республики Казахстан могут получить лечение радиоактивным йодом в рамках медицинского страхования и даже использовать часть пенсионных накоплений на лечение.

Еженедельная поставка радиоактивного йода в г. Семей, где функционирует 15 «горячих» коек, позволяет провести лечение 780 пациентов в год при условии, что поставки будут осуществляться бесперебойно и оборудование будет работать без остановок на обслуживание и ремонт. Наличие только одного центра в стране, способного проводить лечение радиофармпрепаратами недостаточно и конечно не может обеспечить всех нуждающихся в данном лечении пациентов. В начале 2022 года в совместной работе Министерства здравоохранения, РГП на ПХВ «Институт ядерной физики», представителей ведущих медицинских организаций, а также при участии Министерства энергетики Республики Казахстан по вопросу развития ядерной медицины была разработана дорожная карта сроком на 3 года для развития данного направления. Одним из ключевых направлений и является развитие радионуклидной терапии.

РГП на ПХВ «Институт ядерной физики» сегодня является единственной площадкой в Республике Казахстан, которая осуществляет полный цикл работ по производству радиофармпрепаратов от разработки технологий их получения и методов контроля до реализации всех стадий производства, включая наработку радиоактивных изотопов.

Для получения радиоактивных изотопов в нашем институте функционируют две высокотехнологич-

ные установки, такие как исследовательский реактор ВВР-К и циклотрон С-30.

Данная работа позволяет оценить возможность наработки радиоактивных изотопов РЗЭ по реакции (n, γ) на тепловых нейтронах реактора ВВР-К и перспективы использования данных изотопов при разработке радиофармпрепаратов нового поколения для лечения онкологических и других заболеваний.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Основная цель радиотерапии заключается в обеспечении специфичности доставки РФП к злокачественной клетке при низкой дозе облучения здоровых тканей [10]. Поэтому при разработке новых радиофармпрепаратов особое внимание следует уделять как ядерно-физическим свойствам радиоактивных изотопов, входящих в состав, так и химической и (или) биологической составляющей, меченной тем или иным радиоактивным изотопом. Пригодность РФП с той или иной химической или биологической составляющей оценивается по возможности максимально полно отражать функцию клетки или всего организма.

Критериями при выборе радионуклида для проведения радионуклидной терапии являются: *тип распада* – для проведения терапевтических процедур используются радионуклиды, испускающие корпускулярное излучение: α и β^- -излучатели, а также излучатели Оже-электронов и рентгеновских лучей. Причем испускаемое излучение должно иметь подходящий линейный коэффициент передачи энергии и «пробег» (поглощение) в тканях организма: от долей до нескольких миллиметров, а дочерние продукты распада должны быть короткоживущими или стабильными. Наличие дополнительного γ -излучения в диапазоне от 70 до 250 кэВ является положительным фактором, позволяющим определять точное место-

положение радиофармпрепарата после его введения и контролировать процесс лечения.

β^- -частицы имеют переменную энергию (0,1–2,2 МэВ) и относительно низкую проникающую способность, которая обычно находится в пределах 0,2 кэВ/мкм. Хотя β^- -излучатели являются наиболее развитым классом радиотерапевтических средств, известно, что их низкая разрешающая способность приводит к высокому диапазону затухания (0,5–10 мм; 50–1000 диаметров клеток), который часто выходит за пределы диаметра опухоли-мишеней. Это может привести к гибели здоровых клеток и является основным сдерживающим фактором β^- -терапии. В настоящее время низкоэнергетические β^- -излучатели (например, ^{177}Lu) активно исследуются из-за их более низкой энергии излучения по сравнению с высокоэнергетическими β^- -излучателями (например, ^{90}Y); *энергия излучения* – для проведения радиотерапии используются изотопы с низкой, средней и высокой максимальной энергией частиц в зависимости от объёма ткани или органа, нуждающихся в лечении; *период полураспада* – предпочтение отдается радионуклидам с периодом полураспада от 6 часов до 7 дней [11].

Выбор изотопа с подходящим периодом полураспада осуществляют с учётом особенностей фармакокинетики транспортной молекулы, которая призвана доставить радионуклид в зону интереса [12]. Радиофармпрепараты, обладающие терапевтическим эффектом, должны находиться в очаге онкообразования достаточное время для того, чтобы излучение успело разрушить онкологические клетки [13]. Определенно, в случае использования изотопа со слишком коротким периодом полураспада, активность изотопа уменьшится до того, как транспортная молекула проникнет в онкологическое новообразование и обоснуется в ней. Хуже всего, что терапевтический эффект не будет достигнут, а доза облучения здоровых и чувствительных к радиации тканей будет иметь место. С другой стороны, большой период полураспада обесценивает терапевтический эффект онкологических заболеваний, так как долгоживущие нуклиды довольно толерантны к костному мозгу. Более того, не всегда очень большой период полураспада несёт в себе положительный эффект, так как чрезмерно большой период полураспада увеличивает количество радиофармпрепарата, которое нужно переместить в онкологическое новообразование для получения терапевтического эффекта с учётом распада и выведения [12].

В качестве основных критериев при выборе периода полураспада изотопа опираются на данные по молекулярному весу, размеру и топологическим характеристикам транспортной молекулы, а также на размеры опухолевых образований [7]. В случае если РФП нацелен на рассеянные клетки, то период полураспада предпочтительно выбрать в диапазоне от нескольких часов до нескольких дней. Значительно большие периоды полураспада изотопа (более неде-

ли) необходимы для достижения терапевтического эффекта на опухоли больших размеров [14].

Также немаловажным фактором качества и безопасности препаратов является отсутствие токсических примесей или радиоактивных веществ, в результате радиоактивного распада которых образуют долгоживущие радионуклидные примеси [15].

Для определения перечня наиболее перспективных РЗЭ для облучения на ректоре ВВР-К был проведен анализ их ядерно-физических характеристик по литературным данным [16, 17].

В таблице представлены данные о природном составе РЗЭ и ядерно-физических свойствах радиоактивных изотопов, образующихся при облучении тепловыми нейтронами, а также критерии выбора изотопов.

В рассмотрение принимались радиоактивные изотопы, период полураспада которых лежит в диапазоне от 1 часа до 700 дней, что связано с возможностью их дальнейшего применения для проведения радионуклидной терапии или брахитерапии. В таблице не представлены данные по элементу прометий, так как данный элемент встречается на Земле только в следовых количествах как продукт спонтанного деления урана – ^{235}U и ^{238}U и не имеет стабильных изотопов.

Анализ ядерно-физических свойств радиоактивных изотопов РЗЭ, представленных в таблице, показал, что не все изотопы, полученные по реакции (n, γ) могут быть использованы в терапевтических целях. К примеру изотоп ^{46}Sc испускает жесткое γ -излучение, с энергией выше 550 кэВ и высоким выходом равным 100%, что приводит к дополнительной радиационной нагрузке на здоровые ткани, а с учётом того, что терапевтическая доза β^- -излучателей, применяемая в ядерной медицине, высока и вносит основной вклад в радиационную дозу, полученную пациентом, применение изотопа ^{46}Sc нецелесообразно в терапевтических целях. Наряду со ^{46}Sc , такие изотопы, как: $^{152\text{m}}\text{Eu}$, ^{160}Tb , ^{142}Pr также не могут быть использованы в радионуклидной терапии в связи с наличием жесткого γ -излучения и выходом более 1%. Изотоп ^{169}Er , имеющий низкую энергию β^- -излучения (менее 450 кэВ), не может быть использован в качестве терапевтического изотопа, так как пробег в тканях опухоли будет недостаточным для получения терапевтического эффекта. В то время, как изотоп ^{90}Y , имеющий жесткое γ -излучение с энергией 1750 кэВ, в сочетании с низким выходом 0,02% (менее 1%) может быть использован для терапии.

Такие изотопы как: ^{166}Ho , ^{165}Dy , ^{90}Y , ^{175}Yb , ^{153}Sm , ^{177}Lu , ^{147}Nd , ^{170}Tm , ^{159}Gd и ^{141}Ce могут быть использованы в терапии онкологических заболеваний, в виду того, что данные изотопы отвечают критериям отбора, а именно: являются β^- -излучателями с энергией не менее 450 кэВ; имеют достаточный период полураспада, а также дополнительное γ -излучение в пределах 50–550 кэВ или наличие γ -излучения с энергией выше 550 кэВ, но с выходом менее 1%.

**ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЯДЕРНОЙ МЕДИЦИНЫ В РЕСПУБЛИКЕ КАЗАХСТАН:
РЕАКТОРНЫЕ ИЗОТОПЫ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ТЕРАПИИ**

Таблица. Ядерно-физические свойства радиоактивных изотопов РЗЭ

Элемент, природный изотопный состав	Получение	Период полу- распада	Распад	Энергия E _β -(max), кэВ (выход, %)	Энергия E _γ , кэВ (выход, %)	Критерии выбора*		
						E _β -(max), кэВ (не менее 450)	γ-излучение в пределах (50-550 кэВ)	Выход жесткого γ-излучения (выше 550 кэВ, интенсивностью менее 1 %) или отсутствие излучения
Скандий, 45Sc – 100%	45Sc(n,γ) 46Sc	83,9 дня	β ⁻	2366,7 (100%)	889 (100%), 1120 (100%)	+	-	-
Иттрий, 89Y – 100%	89Y(n,γ)90Y	64,0 ч	β ⁻	2270 (100%)	1750 (0,02%)	+	-	+
Тербий, 159Tb – 100%	159Tb(n,γ)160Tb	72,1 дня	β ⁻	1835 (100%)	87 (12%), 197 (6%), 299 (30%), 879 (31%), 966 (31%), 1178 (15%), 1270 (7%)	+	-	-
Церий, 136Ce – 0,185% 138Ce – 0,25% 140Ce – 88,48% 142Ce – 11,11%	140Ce(n,γ) 141Ce	32,5 дня	β ⁻	580,7 (100%)	145 (48%)	+	+	+
Празеодим, 141Pr, 100%	141Pr (n,γ) 142Pr	19,5 ч	β ⁻	2162,2 (99,98%)	1570 (3,7%)	+	-	-
Неодим, 142Nd – 27,07% 143Nd – 12,17% 145Nd – 8,3% 146Nd – 17,22% 148Nd – 5,78% 144Nd – 23,78% 150Nd – 5,67%	146Nd (n,γ) 147Nd	11,1 дня	β ⁻	896 (100%)	91 (27,5%), 531 (12,4%)	+	+	+
Самарий, 144Sm – 3,09% 147Sm – 5,07% 148Sm – 1,27% 149Sm – 3,82% 150Sm – 7,47% 152Sm – 6,63% 154Sm – 2,53%	152Sm (n, γ) 153Sm	45,6 ч	β ⁻	808,2 (100%)	103 (29,3%)	+	+	+
Европий, 151Eu-7.82% 153Eu-2.18%	151Eu (n,γ) 152mEu	9.3 ч	β ⁻	1818 (70%)	122 (8%), 344 (2.5%), 842 (13%), 962 (12%) 1315 (1.2%), 1390 (1.1%)	+	-	-
Гадолиний, 152Gd-0.2% 154Gd-2.18% 156Gd-14.8% 157Gd-0.47% 158Gd-5.65% 159Gd-4.84% 160Gd-1.86%	158 Gd (n,γ) 159Gd	18 ч	β ⁻	971 (100%)	58 (3%), 363 (9%)	+	-	+
Диспрозий, 156Dy – 0,06% 158Dy – 0,1% 160Dy – 2,34% 161Dy – 18,91% 162Dy – 25,51% 163Dy – 24,9% 164Dy – 28,18%	164Dy(n, γ)165Dy	2,36 ч	β ⁻	1286 (100%)	95 (4%)	+	+	+
Гольмий, 165Ho – 100%	165Ho(n, γ)166Ho	27 ч	β ⁻	1854 (100%)	81 (5,4%)	+	+	+
Эрбий, 162Er-0.14% 164Er-1.61% 166Er-33.6% 167Er-22.95% 168Er-26.8% 170Er-14.9	168Er(n, γ) 169Er	9.4 дня	β ⁻	351 (100%)		-	отсутствует	+

**ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЯДЕРНОЙ МЕДИЦИНЫ В РЕСПУБЛИКЕ КАЗАХСТАН:
РЕАКТОРНЫЕ ИЗОТОПЫ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ТЕРАПИИ**

Элемент, природный изотопный состав	Получение	Период полураспада	Распад	Энергия E_{β^-} (max), кэВ (выход, %)	Энергия E_{γ} , кэВ (выход, %)	Критерии выбора*		
						E_{β^-} (max), кэВ (не менее 450)	γ -излучение в пределах (50–550 кэВ)	Выход жесткого γ -излучения (выше 550 кэВ, интенсивностью менее 1 %) или отсутствие излучения
Тулий , ^{169}Tm -100%	$^{169}\text{Tm}(n, \gamma)$ ^{170}Tm	134 дня	β^-	968 (99,9%)	84 (3,3%), 67 (0,1%)	+	+	+
Иттербий , ^{168}Yb – 0,13% ^{170}Yb – 3,04% ^{171}Yb – 14,28 ^{172}Yb – 21,83% ^{173}Yb – 16,13% ^{174}Yb – 31,83% ^{176}Yb – 12,76%	$^{174}\text{Yb}(n, \gamma)$ ^{175}Yb	4,2 дня	β^-	470 (100%)	283 (3,7%), 396 (6%)	+	+	+
Лютеций , ^{175}Lu – 97,4% ^{176}Lu – 2,6%	$^{176}\text{Lu}(n, \gamma)$ ^{177}Lu ^{176}Yb (n, γ) $^{177}\text{Yb} \rightarrow ^{177}\text{Lu}$	6,6 дня	β^-	497,8 (100%)	208 (11%)	+	+	+

Примечание: * «+» – соответствует, «-» – не соответствует.

ВЫВОДЫ

Разработка радиофармацевтических препаратов, полученных с включением радиоактивного изотопа в транспортную молекулу, является длительным и сложным процессом.

В данной статье представлена первая часть работы по выбору перспективных для радионуклидной терапии радиоизотопов РЗЭ. В результате анализа природного изотопного состава РЗЭ и их ядерно-физических свойств, для дальнейших исследований были выбраны такие элементы как гольмий, диспрозий, иттрий, иттербий, самарий, лютеций, неодим, тулий, гадолиний и церий, в то время как изотопы европия, празеодима, прометия, гадолиния, тербия не представляют интерес из-за наличия в их спектре жесткого гамма излучения или отсутствия β -излучения подходящей энергии.

Во второй части работы будут определены оптимальные условия облучения отобранных элементов тепловыми нейтронами реактора ВВР-К, а также изучен радионуклидный состав облученных образцов методом гамма-спектрометрии.

Успешная реализация данной работы позволит расширить линейку радиотерапевтических препаратов, что позволит продлить жизнь большому числу людей. Также полученные в результате выполнения проекта экспериментальные данные будут интересны для научно-исследовательских центров, университетов, занимающихся проблемами ядерной медицины. Для зарубежных стран будут представлять интерес экспериментальные данные.

Отечественное производство широкого спектра РФП позволит улучшить качество оказываемой медицинской помощи, снизить показатель смертности и повысить показатель общей выживаемости и выживаемости без прогрессирования у больных с различными формами рака и улучшить качество жизни пациентов.

Данная работа была профинансирована Министерством образования и науки Республики Казахстан (BR10965174).

ЛИТЕРАТУРА

1. United States Pharmacopoeia. (RMI05) Radiopharmaceuticals and Medical Imaging Agents 05. USP29 – NF24. – P. 1945.
2. European Pharmacopoeia Organisation. European Pharmacopoeia, Lutetium (^{177}Lu) Solution for Radiolabelling. – 2016. – P. 1218–1219.
3. Mikolajczak R., Huclier-Markai S., Alliot C., et al. Production of scandium radionuclides for theranostic applications: towards standardization of quality requirements // EJNMMI radiopharm. chem. – 2021. – Vol. 19(6). – P. 1-40. <https://doi.org/10.1186/s41181-021-00131-2>
4. Deilami-nezhad L., Moghaddam-Banaem L., Sadeghi M., et al. Production and purification of Scandium-47: A potential radioisotope for cancer theranostics // Applied Radiation and Isotopes. – 2016. – Vol. 118. – P. 124–130. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2016.09.004>
5. Klaassen N.J.M., Arntz M.J., Gil Arranja A. et al. The various therapeutic applications of the medical isotope holmium-166: a narrative review // EJNMMI radiopharm. chem. – 2019. – Vol. 19(4). – P. 1–26. <https://doi.org/10.1186/s41181-019-0066-3>
6. Bakht M. K., Sadeghi M. Internal radiotherapy techniques using radiolanthanide praseodymium-142: a review of production routes, brachytherapy, unsealed source therapy // Annals of Nuclear Medicine. – 2011. – Vol. 25(8). – P. 529–535. <https://doi.org/10.1007/s12149-011-0505-z>
7. Kostelnik, T. I., & Orvig, C. Radioactive Main Group and Rare Earth Metals for Imaging and Therapy // Chemical Reviews. – 2018. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00294>
8. Nitipir C., Niculae D., Orlov C., et al. Update on radionuclide therapy in oncology // Oncol Lett. – 2017. – Vol. 14(6). – P. 7011–7015. <https://doi.org/10.3892/ol.2017.7141>
9. Sgouros G., Bodei L., McDevitt M.R. et al. Radiopharmaceutical therapy in cancer: clinical advances and challenges

- ges // *Nat. Rev. Drug Discov.* – 2020. – Vol. 19. – P. 589–608. <https://doi.org/10.1038/s41573-020-0073-9>
10. Moding E.J., Kastan M.B., Kirsch D.G. Strategies for optimizing the response of cancer and normal tissues to radiation // *Nat. Rev. Drug Discov.* – 2013. – Vol. 12(7). – P. 526–542. <https://doi.org/10.1038/nrd4003>
11. Qaim S. M. Therapeutic radionuclides and nuclear data // *Radiochimica Acta.* – 2001. – Vol. 89(4-5). – P. 297–302. <https://doi.org/10.1524/ract.2001.89.4-5.297>
12. Yeong C.H., Cheng M.H., Ng K.H. Therapeutic radionuclides in nuclear medicine: current and future prospects // *J Zhejiang Univ Sci B.* – 2014. – Vol. 15(10). – P. 845–863. <https://doi.org/10.1631/jzus.B1400131>
13. Nikolova E, Tonev D, Zhelev N, Neychev V. Prospects for Radiopharmaceuticals as Effective and Safe Therapeutics in Oncology and Challenges of Tumor Resistance to Radiotherapy // *Dose Response.* – 2021. – Vol. 19(1) – P. 19(1). <https://doi.org/10.1177/1559325821993665>
14. Gudkov S.V., Shilyagina N.Y., Vodeneev V.A., Zvyagin A.V. Targeted Radionuclide Therapy of Human Tumors // *Int. J. Mol. Sci.* – 2015. – Vol. 17(1). – P. 33. <https://doi.org/10.3390/ijms17010033>
15. Абишев М.Е., Нуршаева Ф.С. Исследование короткоживущих радионуклидов для диагностики онкологических заболеваний на основе практики в КазНИИ онкологии и радиологии // *Вестник. Серия Физическая (ВКФ).* – 2017. – № 3(62). – С. 68–72. <https://atom.kaeri.re.kr/nuchart>
17. <https://periodictable.com/Isotopes/064.158/index.full.prod.html>
5. Klaassen N.J.M., Arntz M.J., Gil Arranja A. et al. The various therapeutic applications of the medical isotope holmium-166: a narrative review // *EJNMMI radiopharm. chem.* – 2019. – Vol. 19(4). – P. 1–26. <https://doi.org/10.1186/s41181-019-0066-3>
6. Bakht M. K., Sadeghi M. Internal radiotherapy techniques using radiolanthanide praseodymium-142: a review of production routes, brachytherapy, unsealed source therapy // *Annals of Nuclear Medicine.* – 2011. – Vol. 25(8). – P. 529–535. <https://doi.org/10.1007/s12149-011-0505-z>
7. Kostelnik, T. I., & Orvig, C. Radioactive Main Group and Rare Earth Metals for Imaging and Therapy // *Chemical Reviews.* – 2018. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00294>
8. Nitipir C., Niculae D., Orlov C., et al. Update on radionuclide therapy in oncology // *Oncol Lett.* – 2017. – Vol. 14(6). – P. 7011–7015. <https://doi.org/10.3892/ol.2017.7141>
9. Sgouros G., Bodei L., McDevitt M.R. et al. Radiopharmaceutical therapy in cancer: clinical advances and challenges // *Nat. Rev. Drug Discov.* – 2020. – Vol. 19. – P. 589–608. <https://doi.org/10.1038/s41573-020-0073-9>
10. Moding E.J., Kastan M.B., Kirsch D.G. Strategies for optimizing the response of cancer and normal tissues to radiation // *Nat. Rev. Drug Discov.* – 2013. – Vol. 12(7). – P. 526–542. <https://doi.org/10.1038/nrd4003>
11. Qaim S. M. Therapeutic radionuclides and nuclear data // *Radiochimica Acta.* – 2001. – Vol. 89(4-5). – P. 297–302. <https://doi.org/10.1524/ract.2001.89.4-5.297>
12. Yeong C.H., Cheng M.H., Ng K.H. Therapeutic radionuclides in nuclear medicine: current and future prospects // *J Zhejiang Univ Sci B.* – 2014. – Vol. 15(10). – P. 845–863. <https://doi.org/10.1631/jzus.B1400131>
13. Nikolova E, Tonev D, Zhelev N, Neychev V. Prospects for Radiopharmaceuticals as Effective and Safe Therapeutics in Oncology and Challenges of Tumor Resistance to Radiotherapy // *Dose Response.* – 2021. – Vol. 19(1) – P. 19(1). <https://doi.org/10.1177/1559325821993665>
14. Gudkov S.V., Shilyagina N.Y., Vodeneev V.A., Zvyagin A.V. Targeted Radionuclide Therapy of Human Tumors // *Int. J. Mol. Sci.* – 2015. – Vol. 17(1). – P. 33. <https://doi.org/10.3390/ijms17010033>
15. Abishev M.E., Nurshaeva F.S. The investigation of short-lived radionuclides for diagnosis of oncological diseases on the basis of practice in KazNRI of oncology and radiology // *Recent Contributions to Physics (Rec. Contr. Phys.).* – 2017. – Vol. 3(62). – P. 68–72. (In Russ.) <https://atom.kaeri.re.kr/nuchart>
17. <https://periodictable.com/Isotopes/064.158/index.full.prod.html>

REFERENCES

**ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНДА ЯДРОЛЫҚ МЕДИЦИНАНЫ ДАМУ ПЕРСПЕКТИВАЛАРЫ:
ТЕРАПИЯҒА АРНАЛҒАН СИРЕК КЕЗДЕСЕТІН ЭЛЕМЕНТТЕРДІҢ РЕАКТОРЛЫҚ ИЗОТОПТАРЫ**

А.Н. Гурин, Е.Т. Чакрова, З.В. Медведева, С.Г. Солонинкина

Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан

Сирек жер элементтерінің радиоактивті изотоптары тиімді ядролық-физикалық қасиеттерге ие және терапевтік мақсаттағы жаңа радиофармпрепараттарды әзірлеу үшін перспективалы болып табылады. Сирек жер элементтеріне (СЖЭ) 21, 39, 57, 58–71 атомдық сандары бар Д.И. Менделеевтің химиялық элементтерінің периодтық кестесінің III тобының жанама тобының 17 элементі кіреді: скандий, иттрий, лантан және 14 лантанидтер. Бұл элементтердің кейбір радиоактивті изотоптары медицинада қолдануға рұқсат етілген дәрілердің радиоактивті құрамдас бөлігі ретінде қолданылады, мысалы, самария изотоптары- ^{153}Sm және ^{177}Lu , ал кейбіреулер үшін оларды медицинада қолдану мүмкіндігі зерттелуде. Сондықтан скандий- ^{47}Sc изотопы қатерлі ісік терапистикасы үшін потенциалды радионуклид ретінде зерттеледі, холмий – ^{166}Ho радиосиноэктоми және брахитерапия үшін изотоп ретінде, празеодим – ^{142}Pr брахитерапия үшін перспективалы. Сирек жер элементтерінің органикалық молекулалармен, соның ішінде табиғи және синтетикалық пептидтермен химиялық байланыс жасау қабілеті сүт және простата обырының, нейроэндокринді ісіктердің, өкпенің таралған обырының және басқа да аурулардың аддресік терапиясына арналған жаңа препараттардың дамуына негіз болып табылады. Радиоактивтік изотоптарды өңдеу мақсатында РЗЭ ВВР-К реакторында сәулелендіру үшін неғұрлым перспективалы тізбені айқындау үшін радиоактивтік изотоптарды өңдеу тәсілдерін бағалау және әдеби деректер бойынша олардың ядролық-физикалық сипаттамаларын талдау жүргізілді. Қатерлі ісік терапиясында ^{166}Ho , ^{165}Dy , ^{90}Y , ^{175}Yb , ^{153}Sm , ^{177}Lu , ^{147}Nd , ^{170}Tm , ^{159}Gd және ^{141}Ce сияқты изотоптар қолданылуы мүмкін.

Осы зерттеу жұмысы ВВР-К реакторында реакция бойынша (n, γ) РЗЭ радионуклидтерін алу мүмкіндігін бағалауға мүмкіндік береді, сондай-ақ онкологиялық ауруларды емдеу үшін жаңа буын радиофармпрепараттарын әзірлеу кезінде осы изотоптарды қолдану перспективаларын көрсетеді.

Түйін сөздер: сирек жер элементтері, нейтрондар, радиофармпрепараттар, ядролық-физикалық қасиеттер, радионуклидтер, ССР-К реакторы.

**PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF NUCLEAR MEDICINE IN THE REPUBLIC
OF KAZAKHSTAN: REACTOR ISOTOPES OF RARE EARTH ELEMENTS FOR THERAPY**

A.N. Gurin, Ye.T. Chakrova, Z.V. Medvedeva, S.G. Soloninkina

Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan

Radioactive isotopes of rare earth elements have effective nuclear-physical properties and are promising for the development of new therapeutic radiopharmaceuticals. Rare earth elements (REE) include 17 elements of the secondary subgroup of group III of the periodic table of chemical elements of D.I. Mendeleev with atomic numbers 21, 39, 57, 58–71: scandium, yttrium, lanthanum and 14 lanthanides. Some radioactive isotopes of these elements are already used in medicine, as a radioactive component of approved medicines, for example, the isotopes of ^{153}Sm and ^{177}Lu , and for some the possibility of their use in medicine is only being studied. Thus, the isotope scandium – ^{47}Sc is being studied as a potential radioisotope for cancer diagnosis, holmium – ^{166}Ho as an isotope for radiosynovectomy and brachytherapy, praseodymium – ^{142}Pr is promising for brachytherapy. The ability of rare earth elements to form chemical bonds with organic molecules, including peptides of natural and synthetic origin, is the basis for the development of new drugs for targeted therapy of breast and prostate cancer, neuroendocrine tumors, disseminated lung cancer and other types of diseases.

To determine the list of the most promising for irradiation at the reactor of the WWR-K REE in order to develop radioactive isotopes, an assessment of the ways of developing radioactive isotopes and an analysis of their nuclear physical characteristics according to literature data was carried out. Isotopes such as: ^{166}Ho , ^{165}Dy , ^{90}Y , ^{175}Yb , ^{153}Sm , ^{177}Lu , ^{147}Nd , ^{170}Tm , ^{159}Gd and ^{141}Ce can be used in the treatment of oncological diseases.

This research work makes it possible to evaluate the possibility of obtaining REE radioisotopes by reaction (n, γ) at the WWR-K reactor, and reflects the prospects for using these isotopes in the development of new-generation radiopharmaceuticals for the treatment of oncological diseases.

Keywords: rare earth elements, neutrons, radiopharmaceuticals, nuclear-physical properties, radionuclides, WWR-K reactor.

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2022-2-53-61>
УДК 550.834

PAHUTE MESA TRAVEL TIMES AT KURIL–KAMCHATKA SEISMIC STATIONS

K.S. Nepeina¹⁾, V.A. An²⁾

¹⁾ *Research Station RAS in Bishkek, Bishkek, Kyrgyzstan*

²⁾ *Sadovsky Institute of Dynamics of Geospheres of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

E-mail for contacts: nepeina.k@mail.ru

This research fulfills additional information about the lithosphere below Southeastern Asia and the northern Pacific. The area is interesting for researchers because of the Kuril–Kamchatka subducted lithosphere. The availability to study an underground structure is complicated, because of Pacific Ocean. The significance of this research concerns epicentral distances $\sim 54^\circ$ – 70° or ~ 6000 – 7000 km. During the Cold War of the 20th century and the classification of information between the largest nuclear states the Soviet Union (USSR) and the United States of America (USA), data on the registration of nuclear explosions were not published, however, underground nuclear explosions (UNE) were recorded. Thanks to an employee of the laboratory 5-s of the Institute of Physics of the Earth named after O.Yu. Schmidt of the USSR Academy of Sciences Kh.D. Rubinstein is kept at the Institute for the Dynamics of Geospheres of the Russian Academy of Sciences named after Academician M.A. Sadovsky (IDG RAS). Only after 1985 reports from some seismic stations of the former USSR began to be published in the operational reports of the United Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences (GS RAS). As it has not been yet published anywhere, we collect them and obtain the travel times were by revising seismograms from the archives IDG RAS and GS RAS for five Kuril–Kamchatka seismic stations (Bering, Esso, Severo-Kurilsk, Kurilsk). The 48 United States UNE at Pahute Mesa (at Nevada Test Site) from 1968 to 1990 are used for travel time curve building. We measure P waves travel times (t_p) on historical seismograms for the ray travel path between Pahute Mesa tests and Kuril–Kamchatka stations. The body-waves magnitudes (m_b) vary from 5.3 to 6.5. We obtain arrivals for: 1 UNE at Bering station, 7 UNE at Esso station, 45 UNE at Petropavlovsk, 18 UNE at Severo-Kurilsk and 12 at Kurilsk. We build a travel time function using linear regression algorithm as $t_p = k \cdot \Delta^\circ + b$, where Δ° is the epicentral distance, k and b are arbitrary constants. We show that travel time deviations, associated with nonlinearity of the Earth. We estimate the effective velocities of P waves for the Pahute Mesa – Kuril–Kamchatka travel path as coefficient k in the linear equation. Effective velocity is equal to 7.5 km/s.

Keywords: *P wave, velocity, travel-time, teleseismic distance, NTS, Kuril–Kamchatka.*

INTRODUCTION

The study of the structure of the Earth based on the results of the travel times of body seismic waves is relevant at the present time, since the observational data are still being refined (for example, the coordinates of the sources, the parameters of the charge, the magnitudes). Of particular interest is the study of such data for teleseismic ray paths with source-receiver distances of ~ 6000 – 7000 km (epicentral distances $\Delta \sim 54^\circ$ – 70° , where $1^\circ \sim 111$ km) or further distances, e.g. 90° [1]. The archives of the Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of the Russian Academy of Sciences (IDG RAS) and United Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences (GS RAS) contain seismograms of historical underground nuclear explosions (UNE) recordings.

Most of the recordings were not analyzed, and the parameters of the related events still are not determined. In this case, the historical seismograms have been reviewed. For this reason, we need to develop an approach for travel time curves. Also, this information could be helpful for velocity models improvement. As P waves velocity values in the AK135 earth model [2] for better locating earthquakes in complex velocity models [3].

Velocity heterogeneity and anisotropy below Southeastern Asia and the northern Pacific are practically unknown. Especially the side, where is the Pacific Ocean. The research for Kuril Islands with earthquake travel times from stations in Western Europe (between 73° and 95° of epicentral distance) was studied before by Freybourger, Krüger and Achauer [4]. Concerning the east side of Eurasia, the most eastern stations of the former Soviet Union (USSR) were located in the Kuril–Kamchatka zone. They recorded some United States (US) nuclear tests. At the same time, the sources (US UNE) and receivers (Kuril seismic stations) are separated by the Pacific Ocean, where practically there were no seismic stations. The ocean borehole broadband observation beneath the deep seafloor in the Japan Sea started only after 1989 [5, 6]. The area is interesting for researchers because of the Kuril–Kamchatka subducted lithosphere. Since the Aleutian Arc is also a part of the Pacific “Ring of Fire”. However, there are some seismic tomography studies for these subduction zones below the Kuril–Kamchatka and the Aleutian arcs by Koulakov, Dobretsov, Bushenkova, and Yakovlev [7], which prove density heterogeneity. Thereby this research is a continuation and resumption of our previous works for teleseismic distances, e.g. for Aleutian arc [8].

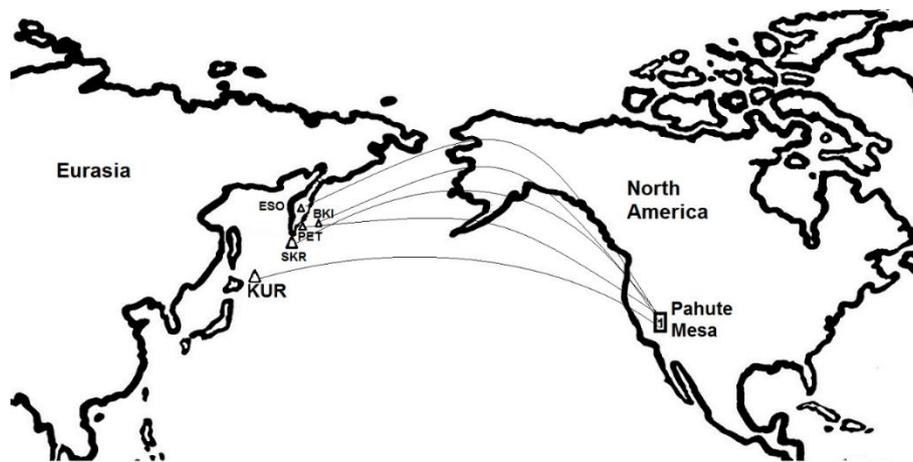


Figure 1. The relative position for travel path between seismic stations at the Kuril–Kamchatka zone and tests at Pahute Mesa (Nevada Test Site)

We choose five seismic stations, which recorded during the Soviet era with three-component seismometers [9, 10]: Severo-Kurilsk (SKR, $\varphi=50.67^\circ\text{N}$, $\lambda=156.117^\circ\text{E}$) and Kurilsk (KUR, $\varphi=45.231^\circ\text{N}$, $\lambda=147.873^\circ\text{E}$), Bering (BKI $\varphi=55.194^\circ\text{N}$, $\lambda=165.984^\circ\text{E}$), Esso (ESO, $\varphi=55.9316^\circ\text{N}$, $\lambda=158.6950^\circ\text{E}$), Petropavlovsk (PET, $\varphi=53.0233^\circ\text{N}$, $\lambda=158.653^\circ\text{E}$). The stations were opened: Severo-Kurilsk 01.03.1958 on the northern part of the Paramushir Island; Kurilsk 01.01.1950 on the Iturup Island; Bering 20.11.1962 on the Bering Island; Esso 24.11.1965 in Central part of the Kamchatka Peninsula; Petropavlovsk 18.03.1951 on shore of the Kamchatka Peninsula (Petropavlovsk-Kamchatsky city). All of these stations recorded US UNE. For the research purposes, as a teleseismic signal source, we chose Pahute Mesa tests. Pahute Flat (37.268547°N , 116.809234°W) is a plain area situated in the northeastern part of the NTS polygon. There were 827 documented atmospheric and underground nuclear tests conducted, accounting for nearly 80% of all US nuclear tests from 1951 to 1992, upon [11, 12]. The relative position of sources and receivers are presented in Figure 1.

Many researchers are still studying the legacy of nuclear explosions on the territory of the largest test sites – Semipalatinsk (STS) in Kazakhstan and Nevada (NTS) in the United States [13]. Locations of NTS and STS test areas are shown in An, Ovtchinnikov, Kaazik et al. [14]. Various researchers for NTS have constructed travel time curves for the propagation of body and shear waves and made estimates of attenuation [15, 16]. A detailed description of the geological and tectonic features is presented in publications [17, 18]. The results of the assessment of GIS surface effects of underground nuclear explosions carried out in Pahute Mesa are given in [12]. The results of processing the experimental data for ray traces below Southeastern Asia are presented in this work. The study shows the characteristics of the travel path– Pahute Mesa (NTS) – Kuril–Kamchatka. The non-linearity of geologic

media gives a lot of deviations in seismic wave velocities for NTS UNE and, consequently, azimuths [19, 20].

METHODS AND DATA

In this study, we select 48 tests at Pahute Mesa (NTS), which occurred from 1968 to 1990. The test names and its' parameters (e.g. origin time) are known from [21, 22]. We search the first break peaks for P waves on historical seismograms and estimate deviations of travel time of seismic signals. We precisely measured arrival times (t_{arr}) of teleseismic P phases seismic stations based on the Kuril–Kamchatka arc. For the example of registration of underground nuclear explosions at the Pahute site of the Nevada Test Site (NTS), local travel time curves and linear trends in the P wave travel time in the range of epicentral distances $\sim 54^\circ\text{--}70^\circ$ are investigated. The epicentral distances between Pahute polygon and Kuril seismic stations are: Bering $\Delta=54.1120^\circ$ (BKI-Pah); Esso $\Delta=57.8442^\circ$ (ESO-Pah); Petropavlovsk $\Delta=58.8831^\circ$ (PET-Pah); Severo-Kurilsk $\Delta=61.2714^\circ$ (SRK-Pah); Kurilsk $\Delta=68.6790^\circ$ (KUR-Pah). The selected UNE have magnitudes $m_b = 5.3\text{--}6.5$.

After processing and analyzing all seismograms, we summarize all main UNE parameters in Tables 1 and 2. It shows the dates and origin time of the UNE tests, the yield, body wave magnitudes, depth of burial, surface elevation, and the calculated values of the teleseismic distances (Δ°) with the P wave arrival times (t_p). The total amount of underground nuclear explosions is 48 (Table 1). We especially note that the registration of US explosions by the Soviet stations is unique, because the distance is quite large. This fact indicates the high sensitivity of these selected stations. Although, some tests were missed. Hence, we obtain arrivals for: 1 UNE at Bering station, 7 UNE at Esso station, 45 UNE at Petropavlovsk, 18 UNE at Severo-Kurilsk and 12 at Kurilsk. An invisible small signal amplitude could explain the reason of the small amount of found arrivals for the analyst or any other error (e.g. time correction shift).

PAHUTE MESA TRAVEL TIMES AT KURIL-KAMCHATKA SEISMIC STATIONS

Table 1. The main parameters of Pahute Mesa tests at seismic stations (PET, SKR, KUR)

#	Date* DD.MM.YYYY	Origin Time* T ₀ HH:MM:SS	Test Name*	Test Latitude*	Test Longitude*	Time t _{arr} PET Δ=58.8831°	Time t _{arr} SKR Δ=61.2714°	Time t _{arr} KUR Δ=68.6790°	Yield* kt	m _b *	Depth of Burial*, m	Surface Elevation*, m
1.	20.12.1966	15:30:00.08	Greeley	37.302	-116.409	15:39:58.0	-	-	870	6.3	1215	1945
2.	23.05.1967	14:00:00.04	Scotch	37.275	-116.371	14:09:57.0	-	-	155	5.7	977	2034
3.	26.04.1968	15:00:00.07	Boxcar	37.295	-116.457	15:09:57.0	15:10:13.5	-	1300	6.3	1158	1914
4.	15.06.1968	13:59:59.97	Rickey	37.265	-116.316	14:09:59.0	-	-	20-200	5.9	683	2116
5.	28.06.1968	12:22:00.08	Chaleaugay	37.245	-116.484	12:31:57.0	-	-	20-200	6.3	607	1876
6.	19.12.1968	16:30:00.04	Benham	37.231	-116.474	16:39:56.6	16:40:13.1	-	1150	6.3	1402	1887
7.	07.05.1969	13:45:00.04	Purse	37.283	-116.502	13:54:58.5	-	-	20-200	5.8	599	1828
8.	16.09.1969	14:30:00.04	Jorum	37.314	-116.462	14:39:52.3	14:40:14.3	14:41:02.2	<1000	6.2	1159	1898
9.	08.10.1969	14:30:00.14	Pipkin	37.257	-116.442	14:39:59.5	-	-	200-1000	5.5	624	1965
10.	26.03.1970	19:00:00.20	Handley	37.300	-116.535	19:09:57.4	19:10:14.8	19:11:00.4	>1000	6.5	1209	1772
11.	06.06.1973	13:00:00.08	Almendro	37.245	-116.347	13:09:58.0	13:10:14.5	-	200-1000	6.1	1064	2069
12.	14.05.1975	14:00:00.16	Tybo	37.221	-116.475	14:09:59.0	14:10:11.5	-	200-1000	6.0	765	1880
13.	03.06.1975	14:20:00.17	Stilton	37.340	-116.524	14:29:58.0	14:30:13.0	14:31:01.8	20-200	5.9	732	1667
14.	19.06.1975	13:00:00.09	Mast	37.350	-116.321	13:09:58.0	13:10:14.0	-	200-1000	6.1	911	2068
15.	26.06.1975	12:30:00.16	Camembert	37.279	-116.369	12:39:58.5	12:40:13.8	-	200-1000	6.2	1311	2033
16.	28.10.1975	14:30:00.16	Kasseri	37.290	-116.412	14:39:58.5	14:40:13.5	14:41:02.2	200-1000	6.4	1265	1957
17.	20.11.1975	15:00:00.09	Inlet	37.225	-116.368	15:09:58.5	-	-	200-1000	6.0	818	2025
18.	03.01.1976	19:15:00.16	Muenster	37.297	-116.334	19:24:59.0	19:25:14.0	-	200-1000	6.2	1452	2082
19.	12.02.1976	14:45:00.16	Fontina	37.271	-116.489	14:54:58.0	14:55:13.5	14:56:01.9	200-1000	6.3	1219	1837
20.	14.02.1976	11:30:00.16	Cheshire	37.243	-116.421	11:39:58.5	-	11:41:02.3	200-500	6.0	1167	1947
21.	09.03.1976	14:00:00.09	Estuary	37.310	-116.365	14:09:58.0	14:10:14.0	14:11:02.4	200-500	6.0	857	2025
22.	14.03.1976	12:30:00.16	Colby	37.306	-116.472	12:39:59.0	12:40:13.6	12:41:01.5	500-1000	6.3	1273	1904
23.	17.03.1976	14:15:00.09	Pool	37.256	-116.329	14:24:59.0	14:25:14.5	14:26:02.5	200-500	6.1	879	2076
24.	11.04.1978	15:30:00.16	Fondutta	37.300	-116.328	15:39:59.0	-	-	20-150	5.3	633	2072
25.	11.04.1978	17:45:00.07	Backbeach	37.233	-116.369	17:54:59.0	-	-	20-200	5.5	672	2040
26.	31.08.1978	14:00:00.16	Panir	37.276	-116.358	14:09:58.5	-	-	20-150	5.6	681	2013
27.	16.12.1978	15:30:00.16	Farm	37.273	-116.411	15:39:58.7	-	-	20-150	5.5	689	1979
28.	11.06.1979	14:00:00.17	Pepato	37.290	-116.456	14:09:59.0	-	-	20-150	5.5	681	1913
29.	26.04.1980	17:00:00.08	Colwick	37.248	-116.423	17:09:58.5	-	-	20-150	5.4	633	1946
30.	12.06.1980	17:15:00.09	Kash	37.282	-116.455	17:24:59.0	-	-	20-150	5.6	645	1911
31.	25.07.1980	19:05:00.08	Tafi	37.256	-116.478	19:14:58.4	-	-	20-150	5.5	680	1859
32.	06.06.1981	18:00:00.08	Harzer	37.303	-116.326	18:09:58.7	-	-	20-150	5.6	637	2073
33.	12.02.1982	14:55:00.08	Molbo	37.224	-116.464	-	-	15:06:02.6	20-150	5.4	638	1873
34.	12.02.1982	15:25:00.09	Hosta	37.348	-116.317	-	-	15:36:02.7	20-150	5.4	640	2076
35.	25.04.1982	18:05:00.01	Gibne	37.256	-116.423	18:14:58.4	-	-	20-150	5.4	570	1937
36.	24.06.1982	14:15:00.09	Nebbiolo	37.236	-116.371	14:24:59.0	-	-	20-150	5.6	640	2038
37.	01.09.1983	14:00:00.08	Chancellor	37.273	-116.356	14:09:58.0	14:10:14.2	-	143	5.5	624	2013
38.	25.07.1984	15:30:00.08	Kappeli	37.268	-116.412	15:39:59.0	-	-	20-150	5.4	640	1982
39.	09.12.1984	19:40:00.09	Egmont	37.270	-116.498	19:49:45.0	-	-	20-150	5.5	546	1839
40.	02.05.1985	15:20:00.08	Towanda	37.253	-116.326	15:29:59.5	-	-	20-150	5.7	660	2085
41.	12.06.1985	15:15:00.06	Salut	37.248	-116.490	15:24:58.0	-	-	20-150	5.5	608	1873
42.	17.07.1986	21:00:00.06	Cybar	37.279	-116.356	21:09:59.0	21:10:12.4	-	119	5.7	627	2017
43.	18.04.1987	13:40:00.00	Delamar	37.248	-116.510	13:49:59.0	-	-	20-150	5.5	544	1875
44.	30.04.1987	13:30:00.09	Hardin	37.233	-116.424	13:39:59.0	-	-	20-150	5.5	625	1943
45.	07.07.1988	15:05:30.07	Alamo	37.252	-116.378	15:15:29.0	-	-	<150	5.6	622	1964
46.	31.10.1989	15:30:00.09	Homitos	37.263	-116.492	15:39:59.0	-	-	20-150	5.7	564	1846
47.	13.06.1990	16:00:00.09	Bullion	37.262	-116.421	-	16:10:13.3	16:11:02.7	20-150	5.7	674	1950
48.	12.10.1990	17:30:00.08	Tenabo	37.248	-116.495	17:39:59.0	-	-	20-150	5.6	600	1871

Note: * – Information from [21]

PAHUTE MESA TRAVEL TIMES AT KURIL-KAMCHATKA SEISMIC STATIONS

Table 2. The main parameters of Pahute Mesa tests (from Table 1) at seismic stations (BKI, ESO)

#	Date* DD.MM.YYYY	Origin Time* T_0 HH:MM:SS	Test Name*	Time t_{arr} BKI $\Delta=54.1120^\circ$	Time t_{arr} ESO $\Delta=57.8442^\circ$	m_b^*
1.	07.05.1969	13:45:00.04	Purse	–	13:54:51.0	5.8
2.	08.10.1969	14:30:00.14	Pipkin	–	14:40:00.0	5.5
3.	26.03.1970	19:00:00.20	Handley	19:09:28.7	19:09:51.2	6.5
4.	06.06.1973	13:00:00.08	Almendro	–	13:09:48.0	6.1
5.	14.05.1975	14:00:00.16	Tybo	–	14:09:51.3	6.0
6.	03.06.1975	14:20:00.17	Stilton	–	14:29:50.7	5.9
7.	19.06.1975	13:00:00.09	Mast	–	13:09:51.1	6.1

Note: * – Information from [21]

Then we calculate the travel times (t_p) of the body P wave, as residual between arrival time (t_{arr}) and the origin time T_0 , i.e. $t_p = t_{arr} - T_0$. When constructing the local travel time curve, we use the parameters of the P wave travel time (t_p) and plot the linear function, using regression algorithm $t_p = k \cdot \Delta^\circ + b$, where Δ° is the epicentral distance, k and b are arbitrary constants. Afterwards, we calculate differential travel time (δt) as residual between travel time (t_p) and predicted regression value. We observe differential travel time residuals (δt) for five seismic stations and get results (Table 3). For time travel curve estimation for ray path on Pahute Mesa – Kuril–Kamchatka we apply the methodology and results of our previous studies [8, 13, 22].

Table 3. Result table for P wave travel times and differential travel time residuals

Date DD.MM.YYYY	Epicentral distance Δ°	Travel time t_p , s	Station name	Differential time δt , s
26.03.1970	54.1120	568.50	BKI	6.72
07.05.1969	57.8442	590.96	ESO	1.01
08.10.1969	57.8442	599.86	ESO	9.91
26.03.1970	57.8442	591.00	ESO	1.05
06.06.1973	57.8442	587.92	ESO	-2.03
14.05.1975	57.8442	591.14	ESO	1.19
03.06.1975	57.8442	590.53	ESO	0.58
19.06.1975	57.8442	591.01	ESO	1.06
20.12.1966	58.8831	597.92	PET	0.13
23.05.1967	58.8831	596.96	PET	-0.83
26.04.1968	58.8831	596.93	PET	-0.86
15.06.1968	58.8831	599.03	PET	1.24
28.06.1968	58.8831	596.92	PET	-0.87
19.12.1968	58.8831	596.56	PET	-1.23
07.05.1969	58.8831	598.46	PET	0.67
16.09.1969	58.8831	592.26	PET	-5.53
08.10.1969	58.8831	599.36	PET	1.57
26.03.1970	58.8831	597.2	PET	-0.59
06.06.1973	58.8831	597.92	PET	0.13
14.05.1975	58.8831	598.84	PET	1.05
03.06.1975	58.8831	597.83	PET	0.04
19.06.1975	58.8831	597.91	PET	0.12
26.06.1975	58.8831	598.34	PET	0.55
28.10.1975	58.8831	598.34	PET	0.55

Date DD.MM.YYYY	Epicentral distance Δ°	Travel time t_p , s	Station name	Differential time δt , s
20.11.1975	58.8831	598.41	PET	0.62
03.01.1976	58.8831	598.84	PET	1.05
12.02.1976	58.8831	597.84	PET	0.05
14.02.1976	58.8831	598.34	PET	0.55
09.03.1976	58.8831	597.91	PET	0.12
14.03.1976	58.8831	598.84	PET	1.05
17.03.1976	58.8831	598.91	PET	1.12
11.04.1978	58.8831	598.84	PET	1.05
11.04.1978	58.8831	598.93	PET	1.14
31.08.1978	58.8831	598.34	PET	0.55
16.12.1978	58.8831	598.54	PET	0.75
11.06.1979	58.8831	598.83	PET	1.04
26.04.1980	58.8831	598.42	PET	0.63
12.06.1980	58.8831	598.91	PET	1.12
25.07.1980	58.8831	598.32	PET	0.53
06.06.1981	58.8831	598.62	PET	0.83
25.04.1982	58.8831	598.39	PET	0.60
24.06.1982	58.8831	598.91	PET	1.12
01.09.1983	58.8831	597.92	PET	0.13
25.07.1984	58.8831	598.92	PET	1.13
09.12.1984	58.8831	584.91	PET	-12.88
02.05.1985	58.8831	599.42	PET	1.63
12.06.1985	58.8831	597.94	PET	0.15
17.07.1986	58.8831	598.94	PET	1.15
18.04.1987	58.8831	599.00	PET	1.21
30.04.1987	58.8831	598.91	PET	1.12
07.07.1988	58.8831	598.93	PET	1.14
31.10.1989	58.8831	598.91	PET	1.12
12.10.1990	58.8831	598.92	PET	1.13
26.04.1968	61.2714	613.43	SKR	-2.39
19.12.1968	61.2714	613.06	SKR	-2.76
16.09.1969	61.2714	614.26	SKR	-1.56
26.03.1970	61.2714	614.6	SKR	-1.22
06.06.1973	61.2714	614.42	SKR	-1.40
14.05.1975	61.2714	611.34	SKR	-4.48
03.06.1975	61.2714	612.83	SKR	-2.99
19.06.1975	61.2714	613.91	SKR	-1.91
26.06.1975	61.2714	613.64	SKR	-2.18
28.10.1975	61.2714	613.34	SKR	-2.48
03.01.1976	61.2714	613.84	SKR	-1.98
12.02.1976	61.2714	613.34	SKR	-2.48
09.03.1976	61.2714	613.91	SKR	-1.91
14.03.1976	61.2714	613.44	SKR	-2.38
17.03.1976	61.2714	614.41	SKR	-1.41
01.09.1983	61.2714	614.12	SKR	-1.70
17.07.1986	61.2714	612.34	SKR	-3.48
13.06.1990	61.2714	613.21	SKR	-2.61
16.09.1969	68.6790	673.16	KUR	1.44
26.03.1970	68.6790	670.84	KUR	-0.88
03.06.1975	68.6790	672.63	KUR	0.91
28.10.1975	68.6790	673.04	KUR	1.32
12.02.1976	68.6790	672.74	KUR	1.02
14.02.1976	68.6790	673.14	KUR	1.42
09.03.1976	68.6790	673.31	KUR	1.59
14.03.1976	68.6790	672.34	KUR	0.62
17.03.1976	68.6790	673.41	KUR	1.69
12.02.1982	68.6790	673.52	KUR	1.80
12.02.1982	68.6790	673.61	KUR	1.89
13.06.1990	68.6790	673.61	KUR	1.89

RESULTS

We plot travel times versus epicentral distance from Table 3 in Figure 2. Following, we apply regression and get a linear function for the local travel time curve for epicentral distance ($54 < \Delta^\circ < 70^\circ$). The interpretation of travel time observations, however, helps investigate the wave velocity propagation and derive varying velocity structures below selected traces.

The deviations of travel times of seismic signals are called differential travel time residuals (δt). The δt values (seconds) from Table 3 slightly vary in average segment:

for Esso $-2.03 < \delta t < 1.19$; for Petropavlovsk $-1.23 < \delta t < 1.63$; for Severo-Kurilsk $-4.48 < \delta t < -1.22$; for Kurilsk $-0.88 < \delta t < 1.89$. Nevertheless, some travel times are anomalous: at ESO station too long for Pipkin UNE (08.10.1969) with $\delta t = 9.91$ s; at PET station too fast – Egmont UNE (09.12.1984) with $\delta t = -12.88$ s and Jorum UNE (16.09.1969) with $\delta t = -5.53$ s. For Bering station, we could not provide this analysis, as we have only one registration. In Figure 3, we give a graphical estimation for the travel time trend in calendar time.

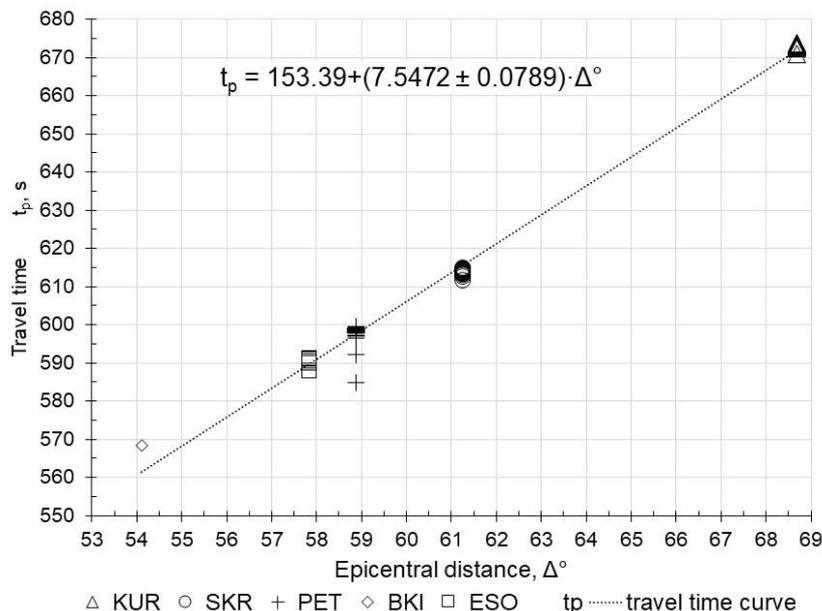


Figure 1. Travel times (t_p) versus epicentral distance ($54 < \Delta^\circ < 70^\circ$) of seismic stations (KUR, SKR, PET, BKI, ESO) and local approximation for travel time curve

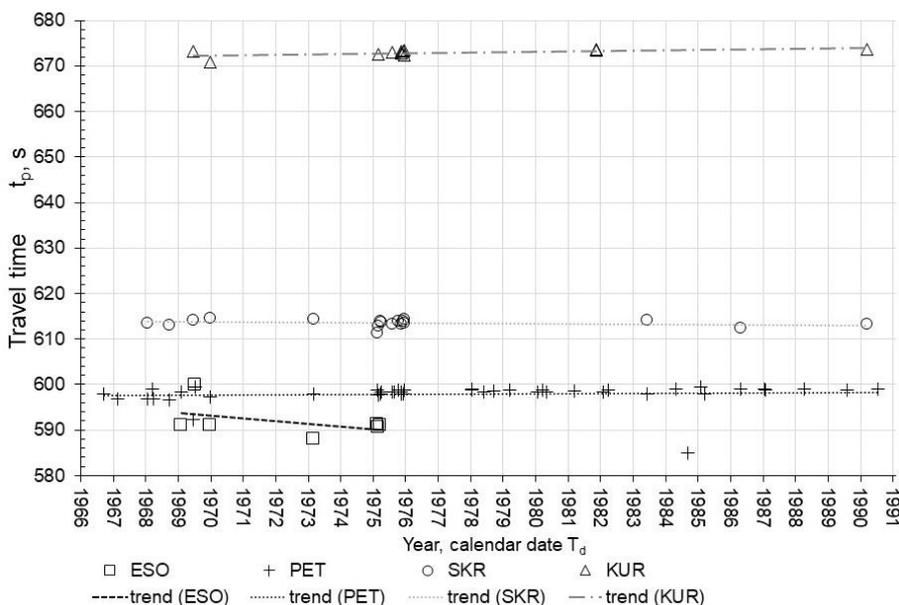


Figure 2. Travel time (t_p) plot versus calendar date (T_d , years) with trends for four Kuril–Kamchatka seismic stations (ESO, PET, SKR, KUR)

CONCLUSIONS

We analyzed historical seismograms of five Soviet era seismic stations:

- Severo-Kurilsk (SKR, $\varphi=50.67^\circ\text{N}$, $\lambda=156.117^\circ\text{E}$);
- Kurilsk (KUR, $\varphi=45.231^\circ\text{N}$, $\lambda=147.873^\circ\text{E}$);
- Bering (BKI, $\varphi=55.194^\circ\text{N}$, $\lambda=165.984^\circ\text{E}$);
- Esso (ESO, $\varphi=55.9316^\circ\text{N}$, $\lambda=158.6950^\circ\text{E}$);
- Petropavlovsk (PET, $\varphi=53.0233^\circ\text{N}$, $\lambda=158.653^\circ\text{E}$).

We prepared the P wave travel times table for 48 artificial seismic events (Pahute Mesa texts). We construct functional dependencies, which satisfies the equation for the travel time curve (in seconds):

$$t_p = 153.39 + (7.5472 \pm 0.0789) \cdot \Delta^\circ,$$

where Δ is the epicentral distance in degrees between 54° and 70° .

We estimate the effective velocities of P waves equal to 7.5 km/s for the Pahute Mesa – Kuril–Kamchatka travel path as coefficient k in the linear regression equation. However, assessing the trend t_p along the calendar date (T_d) in years instead of the epicentral distance (Δ°) show the absence of tendency. Luckily, it notes the reasonable and stable choice of seismic station locations.

Our results prove velocity anomalies existence beneath selected paths. Thus these conclusions fully match with density jump observations from [23–25]. This effect is also noted by Zheng and Lay [26]. We also take into account the opinion about “... unusually low Vp/Vs ratios in the range 1.6–1.7 for the uppermost mantle under the Sea of Okhotsk and comparably low average Vp/Vs ratios for the crust in several regions. The presence of fluids and extensive silica enrichment, possibly involving low-temperature veining, are viable explanations for the anomalous Vp/Vs ratios” [26].

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are grateful to Taisiya Chelyubeeva from IDG RAS for her assistance in carrying out this study and United Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences (GS RAS) staff for cooperation. All requests were initiated to GS RAS by Vadim An (IDG RAS) personally.

The work was carried out within the framework of the state assignment of the Research Station of the Russian Academy of Sciences in Bishkek 1021052806454-2-1.5.1.

REFERENCES

1. An V. A., Lyuke E. I., Pasechnik I. P. Variatsii parametrov seysmicheskikh voln pri prosvechivanii Zemli na rasstoyanii 90° // Dokl. AN SSSR. – 1985. – T. 285(4). – P. 836–840.
2. Zhang F.-X., Wu Q.-J., Pan J.-T., Zhang G.-C., Feng Q.-Q. The computation of a finite-frequency travel time sensitive kernel for P waves in the AK135 earth model // Appl. Geophys. – 2011. – Vol. 8 (2). – pp. 158–163. <https://doi.org/10.1007/s11770-011-0280-6>.
3. Zhao A., Ding Z. An intersection method for locating earthquakes in complex velocity models // Appl. Geophys. – 2007. – Vol. 4 (4). – pp. 294 – 300. <https://doi.org/10.1007/s11770-007-0036-5>.
4. Freybourger M., Krüger F., Achauer U. A 22° long seismic profile for the study of the top of D' // Geophys. Res. Lett. – 1999. – Vol. 26 (22). – pp. 3409 – 3412. <https://doi.org/10.1029/1999GL010827>.
5. Suyehiro K., Araki E., Shinohara M., Kanazawa T. Deep sea borehole observatories ready and capturing seismic waves in the western Pacific // Eos, Trans. Am. Geophys. Union. – 2002. – Vol. 83 (53). – pp. 621–625. <https://doi.org/10.1029/2002EO000420>.
6. Webb S. C. Broadband seismology and noise under the ocean // Rev. Geophys. – 1998. – Vol. 36 (1). – pp. 105–142. <https://doi.org/10.1029/97RG02287>.
7. Kulakov I. Yu., Dobretsov N. L., Bushenkova N. A., Yakovlev A. V. Forma slebov v zonakh subdukcii pod Kurilo-Kamchatskoy i Aleutskoy dugami po dannym regional'noy tomografii // Geologiya i geofizika. – 2011. – T. 52 (6). – P. 830–851.
8. Nepeina K. S., An V. A. Godografy seysmicheskikh voln ot podzemnykh vzryvov na ostrove Amchitka // Akusticheskiy zhurnal. – 2021. – T. 67. – No. 6. – P. 650–658. <http://dx.doi.org/10.31857/s0320791921060125>.
9. Nepeina K. S., An V. A. Historical seismic stations in USSR and registration underground nuclear explosions // NNC RK Bulletin. – 2021. – Issue. 2. – P. 47–52. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2021-2-47-52>. (in Russ.)
10. Tsifrovaya baza seysmicheskikh stantsiy na territorii Rossii i SSSR // FGBUN FITs Edinaya Geofizicheskaya sluzhba RAN. <http://eqr.gsr.ru/stations/index.php?inc=stalist> [Data obrashcheniya 02.02.2022].
11. Patton H. J. Characterization of spall from observed strong ground motions on Pahute Mesa // Bull. Seismol. Soc. Am. – 1990. – Vol. 80 (5). – pp. 1326–1345. <https://doi.org/10.1785/BSSA0800051326>.
12. Grasso D. N. GIS surface effects archive of underground nuclear detonations conducted at Yucca Flat and Pahute Mesa, Nevada Test Site, Nevada // U.S. Geol. Surv. Open-File Rept. – 2001. – 2001-272.
13. Nepeina K. S., An V. A. Travel time curves and isochron maps from the Borovoye digital archive for the Nevada and Semipalatinsk Nuclear Test Sites // Results Geophys. Sci. – 2021. – Vol. 6. – 100014. <https://doi.org/10.1016/j.ringps.2021.100014>.
14. An V. A., Ovtchinnikov V. M., Kaazik P. B., Adushkin V. V., Sokolova I. N., Aleschenko I. B., Mikhailova N. N., Kim W.-Y., Richards P. G., Patton H. J., Phillips W. S., Randall G., Baker D. A digital seismogram archive of nuclear explosion signals, recorded at the Borovoye Geophysical Observatory, Kazakhstan, from 1966 to 1996 // GeoResJ. – 2015. – Vol. 6. – pp. 141–163. <https://doi.org/10.1016/j.grj.2015.02.014>.
15. Gupta I. N., Blandford R. R. A study of P waves from Nevada Test Site explosions: Near-source information from teleseismic observations? // Bull. Seismol. Soc. Am. – 1987. – Vol. 77 (3). – pp. 1041 – 1056. <https://doi.org/10.1785/BSSA0770031041>.
16. Kopnichev Yu. F., Sokolova I. N., Sokolov K. N. Prostranstvenno-vremennye variatsii struktury polya pogloshcheniya S voln v rayone Nevadskogo yadernogo poligona // Fizika Zemli. – 2013. – No. 6. – P. 39–48. <https://doi.org/10.7868/S0002333713060082>.

17. Liverman J. L. Nevada Test Site. Nye County, Nevada // Final Environmental Impact Statement. 1977. https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/09/362/9362842.pdf.
18. Sinnock S. Geology of the Nevada test site and nearby areas, southern Nevada // Sandia Report. SAND82-2207. 1982.
19. Lynnes C. S., Lay T. Effects of lateral velocity heterogeneity under the Nevada Test Site on short-period P wave amplitudes and travel times // Pure Appl. Geophys. PAGEOPH. – 1990. – Vol. 132 (1-2). – pp. 245–267. <https://doi.org/10.1007/BF00874365>.
20. Kopnichen Yu.F., Pavlova O.V. Azimutal'nye magnitudnye otkloneniya dlya yadernykh vzryvov na poligonakh Semipalatinsk i Nevada // Fizika Zemli. – 1997. – No. 4. – P. 34–45.
21. Springer D. I., Pawloski G. A., Ricca J. L., Rohrer R. F., Smith D. K. Seismic source summary for all U. S. below-surface nuclear explosions // Bull. Seism. Soc. Am. – 2002. – Vol. 92 (5). – pp. 1808–1840. <https://doi.org/10.1785/0120010194>.
22. An V. A., Godunova L. D., Kaazik P. B., Mikhailova N. N., Ovtchinnikov V. M. Travel time change of seismic body wave in calendar time // Bulletin NNC RK. – 2005. – Issue 2. – pp. 41–45. (in Russ.)
23. Ovtchinnikov V.M., Kaazik P.B., Krasnoshchekov D.N. Slabaya anomalija skorosti vo vneshnem yadre iz seysmicheskikh dannyx // Fizika Zemli. – 2012. – № 3. – S. 34–45.
24. Liu X., Zhao D., Li S. Seismic heterogeneity and anisotropy of the southern Kuril arc: insight into megathrust earthquakes // Geophys. J. Int. – 2013. – Vol. 194 (2). – pp. 1069–1090. <https://doi.org/10.1093/gji/ggt150>.
25. Krasnoshchekov D., Kaazik P., Kozlovskaya E., Ovtchinnikov V. Seismic Structures in the Earth's Inner Core Below Southeastern Asia // Pure and Applied Geophysics. – 2016. – Vol. 173 (5). – pp. 1575–1591. <https://doi.org/10.1007/s00024-015-1207-6>.
26. Zheng Y., Lay T. Low Vp / Vs ratios in the crust and upper mantle beneath the Sea of Okhotsk inferred from teleseismic pMP , sMP , and sMS underside reflections from the Moho // J. Geophys. Res. – 2006. – Vol. 111. – B01305. <https://doi.org/10.1029/2005JB003724>.
5. Suyehiro K., Araki E., Shinohara M., Kanazawa T. Deep sea borehole observatories ready and capturing seismic waves in the western Pacific // Eos, Trans. Am. Geophys. Union. – 2002. – Vol. 83 (53). – pp. 621–625. <https://doi.org/10.1029/2002EO000420>.
6. Webb S. C. Broadband seismology and noise under the ocean // Rev. Geophys. – 1998. – Vol. 36 (1). – pp. 105–142. <https://doi.org/10.1029/97RG02287>.
7. Кулаков И. Ю., Добрецов Н. Л., Бушенкова Н. А., Яковлев А. В. Форма слэбов в зонах субдукции под Курило-Камчатской и Алеутской дугами по данным региональной томографии // Геология и геофизика. – 2011. – Т. 52 (6). – С. 830–851.
8. Непейна К. С., Ан В. А. Годографы сейсмических волн от подземных взрывов на острове Амчитка // Акустический журнал. – 2021. – Т. 67. – № 6. – С. 650–658. <http://dx.doi.org/10.31857/s0320791921060125>.
9. Непейна К. С., Ан В. А. Сейсмические станции Советского Союза и регистрация подземных ядерных взрывов // Вестник НЯЦ РК. – 2021. – Вып. 2. – С. 47–52. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2021-2-47-52>.
10. Цифровая база сейсмических станций на территории России и СССР // ФГБУН ФИЦ Единая Геофизическая служба РАН. <http://eqr.gsr.ru/stations/index.php?inc=stalist> [Дата обращения 02.02.2022].
11. Patton H. J. Characterization of spall from observed strong ground motions on Pahute Mesa // Bull. Seismol. Soc. Am. – 1990. – Vol. 80 (5). – pp. 1326–1345. <https://doi.org/10.1785/BSSA0800051326>.
12. Grasso D. N. GIS surface effects archive of underground nuclear detonations conducted at Yucca Flat and Pahute Mesa, Nevada Test Site, Nevada // U.S. Geol. Surv. Open-File Rept. – 2001. – 2001-272.
13. Nepeina K. S., An V. A. Travel time curves and isochron maps from the Borovoye digital archive for the Nevada and Semipalatinsk Nuclear Test Sites // Results Geophys. Sci. – 2021. – Vol. 6. – 100014. <https://doi.org/10.1016/j.ringps.2021.100014>.
14. An V. A., Ovtchinnikov V. M., Kaazik P. B., Adushkin V. V., Sokolova I. N., Aleschenko I. B., Mikhailova N. N., Kim W.-Y., Richards P. G., Patton H. J., Phillips W. S., Randall G., Baker D. A digital seismogram archive of nuclear explosion signals, recorded at the Borovoye Geophysical Observatory, Kazakhstan, from 1966 to 1996 // GeoResJ. – 2015. – Vol. 6. – pp. 141–163. <https://doi.org/10.1016/j.grj.2015.02.014>.
15. Gupta I. N., Blandford R. R. A study of P waves from Nevada Test Site explosions: Near-source information from teleseismic observations? // Bull. Seismol. Soc. Am. – 1987. – Vol. 77 (3). – pp. 1041–1056. <https://doi.org/10.1785/BSSA0770031041>.
16. Копничев Ю. Ф., Соколова И. Н., Соколов К. Н. Пространственно-временные вариации структуры поля поглощения S волн в районе Невадского ядерного полигона // Физика Земли. – 2013. – № 6. – С. 39–48. <https://doi.org/10.7868/S0002333713060082>.
17. Liverman J. L. Nevada Test Site. Nye County, Nevada // Final Environmental Impact Statement. 1977. https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/09/362/9362842.pdf.
18. Sinnock S. Geology of the Nevada test site and nearby areas, southern Nevada // Sandia Report. SAND82-2207. 1982.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ан В. А., Люкэ Е. И., Пасечник И. П. Вариации параметров сейсмических волн при просвечивании Земли на расстоянии 90° // Докл. АН СССР. – 1985. – Т. 285(4). – С. 836–840.
2. Zhang F.-X., Wu Q.-J., Pan J.-T., Zhang G.-C., Feng Q.-Q. The computation of a finite-frequency travel time sensitive kernel for P waves in the AK135 earth model // Appl. Geophys. – 2011. – Vol. 8 (2). – pp. 158–163. <https://doi.org/10.1007/s11770-011-0280-6>.
3. Zhao A., Ding Z. An intersection method for locating earthquakes in complex velocity models // Appl. Geophys. – 2007. – Vol. 4 (4). – pp. 294–300. <http://dx.doi.org/10.1007/s11770-007-0036-5>.
4. Freybourger M., Krüger F., Achauer U. A 22° long seismic profile for the study of the top of D' // Geophys. Res. Lett. – 1999. – Vol. 26 (22). – pp. 3409–3412. <https://doi.org/10.1029/1999GL010827>.

19. Lynnes C. S., Lay T. Effects of lateral velocity heterogeneity under the Nevada Test Site on short-period P wave amplitudes and travel times // *Pure Appl. Geophys.* PAGEOPH. – 1990. – Vol. 132 (1-2). – pp. 245–267. <https://doi.org/10.1007/BF00874365>.
20. Копничев Ю.Ф., Павлова О.В. Азимутальные магнитудные отклонения для ядерных взрывов на полигонах Семипалатинск и Невада // *Физика Земли*. – 1997. – № 4. – С. 34–45.
21. Springer D. I., Pawloski G. A., Ricca J. L., Rohrer R. F., Smith D. K. Seismic source summary for all U. S. below-surface nuclear explosions // *Bull. Seism. Soc. Am.* – 2002. – Vol. 92 (5). – pp. 1808–1840. <https://doi.org/10.1785/0120010194>.
22. Ан В. А., Годунова Л. Д., Каазик П. Б., Михайлова Н. Н., Овчинников В. М. Изменения времени пробега продольной сейсмической волны в календарном времени // *Вестник НЯЦ РК*. – 2005. – Вып. 2. – С. 41–45.
23. Овчинников В.М., Каазик П.Б., Краснощекоев Д.Н. Слабая аномалия скорости во внешнем ядре из сейсмических данных // *Физика Земли*. – 2012. – № 3. – С. 34–45.
24. Liu X., Zhao D., Li S. Seismic heterogeneity and anisotropy of the southern Kuril arc: insight into megathrust earthquakes // *Geophys. J. Int.* – 2013. – Vol. 194 (2). – pp. 1069–1090. <https://doi.org/10.1093/gji/ggt150>.
25. Krasnoshchekov D., Kaazik P., Kozlovskaya E., Ovtchinnikov V. Seismic Structures in the Earth's Inner Core Below Southeastern Asia // *Pure and Applied Geophysics*. – 2016. – Vol. 173 (5). – pp. 1575–1591. <https://doi.org/10.1007/s00024-015-1207-6>.
26. Zheng Y., Lay T. Low V_p / V_s ratios in the crust and upper mantle beneath the Sea of Okhotsk inferred from teleseismic pMP , sMP , and sMS underside reflections from the Moho // *J. Geophys. Res.* – 2006. – Vol. 111. – B01305. <https://doi.org/10.1029/2005JB003724>.

КУРИЛЬ-КАМЧАТКА СЕЙСМИКАЛЫҚ СТАНЦИЯЛАРЫНДАҒЫ РАНОТЕ MESA САЯХАТ УАҚЫТЫ

К.С. Непенна¹⁾, В.А. Ан²⁾

¹⁾ *Бішкек қаласындағы РҒА ғылыми станциясы, Бішкек, Қырғызстан*

²⁾ *Садовский РҒА Геосфералар динамикасы институты, Мәскеу, Ресей*

Бұл зерттеу Оңтүстік-Шығыс Азия мен Тынық мұхитының солтүстігінен төмен литосфера туралы қосымша ақпаратты орындайды. Бұл аймақ зерттеушілер үшін Курил-Камчатка суасты литосферасына байланысты қызықты. Тынық мұхитына байланысты жер асты құрылымын зерттеудің қолжетімділігі қиын. Бұл зерттеудің маңыздылығы эпицентрлік қашықтыққа $\sim 54^\circ\text{--}70^\circ$ немесе $\sim 6000\text{--}7000$ км қатысты. 20 ғасырдағы қырғи-қабақ соғыс кезінде және ең ірі ядролық мемлекеттер Кеңес Одағы (КСРО) мен Америка Құрама Штаттары (АҚШ) арасындағы ақпараттың жіктелуі кезінде ядролық жарылыстарды тіркеу туралы мәліметтер жарияланбады, алайда жерасты ядролық жарылыстары (UNE) жазылды. О.Ю. атындағы Жер физикасы институтының 5-с зертханасының қызметкеріне рахмет. Шмидт КСРО Ғылым академиясының Х.Д. Рубинштейн Академик М.А. Садовский атындағы Ресей ғылым академиясының Геосфера динамикасы институтында (РҒА ИДГ) сақталады. 1985 жылдан кейін ғана бұрынғы КСРО-ның кейбір сейсмикалық станцияларының есептері Ресей Ғылым академиясының Біріккен геофизикалық қызметінің (ГС РҒА) жедел есеп берулерінде жариялана бастады. Ол әлі еш жерде жарияланбағандықтан, біз оларды жинаймыз және жол жүру уақытын бес Курил-Камчатка сейсмикалық станциясы (Беринг, Эссо, Северо-Курильск, Курильск) үшін IDG RAS және GS RAS мұрағаттарынан сейсмограммаларды қайта қарау арқылы аламыз. 1968 жылдан 1990 жылға дейін Пахуте Месадағы (Невада сынақ алаңында) 48 Америка Құрама Штаттарының UNE ұйымы саяхат уақытының қисығын құру үшін пайдаланылады. Пахуте-Меса сынақтары мен Курил-Камчатка станциялары арасындағы сәуленің жүру жолы үшін тарихи сейсмограммаларда Р толқындарының жүру уақытын (t_p) өлшейміз. Дене толқындарының магнитудасы (m_b) 5.3-тен 6.5-ке дейін өзгереді. Біз келушілерді аламыз: Беринг станциясында 1 UNE, Эссо станциясында 7 UNE, Петропавлда 45 UNE, Северо-Курильскте 18 UNE және Курильскте 12. $t_p = k \cdot \Delta^\circ + b$ ретінде сызықтық регрессия алгоритмін пайдаланып саяхат уақыты функциясын құрастырамыз, мұндағы Δ° – эпицентрлік қашықтық, k және b – ерікті тұрақтылар. Біз Жердің сызықты еместігімен байланысты саяхат уақытының ауытқуын көрсетеміз. Пахуте-Меса – Курил – Камчатка жүру жолы үшін Р толқындарының тиімді жылдамдықтарын сызықтық теңдеуде k коэффициенті ретінде бағалаймыз. Тиімді жылдамдық $7,5$ км/с тең.

Түйін сөздер: *Р толқыны, жылдамдық, жүру уақыты, телесеисмикалық қашықтық, НТС, Курил-Камчатка.*

ГОДОГРАФЫ ОТ ВЗРЫВОВ ПЛОЩАДКИ ПАХЬЮТ ПО ДАННЫМ
КУРИЛО-КАМЧАТСКИХ СЕЙСМИЧЕСКИХ СТАНЦИЙК.С. Непенна¹⁾, В.А. Ан²⁾¹⁾ Научная станция РАН в г. Бишкеке, Бишкек, Кыргызстан²⁾ Институт динамики геосфер РАН им. академика М.А. Садовского, Москва, Россия

Исследование дает дополнительную информацию о литосфере под Юго-Восточной Азией и северной частью Тихого океана. Район интересен для изучения зоны субдукции литосферы в районе Курило-Камчатской дуги. Доступность для изучения подземной структуры затруднена наличием Тихого океана. Значение этого исследования касается эпицентральных расстояний $\sim 54^\circ\text{--}70^\circ$ или $\sim 6000\text{--}7000$ км. В годы холодной войны 20 века и засекречивания информации между крупнейшими ядерными государствами Советским Союзом (СССР) и Соединенными Штатами Америки (США) данные о регистрации ядерных взрывов не публиковались, однако подземные ядерные взрывы (ПЯВ) были записаны сейсмическими станциями. Благодаря сотруднику лаборатории 5-й Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта АН СССР Х.Д. Рубинштейна хранится в Институте динамики геосфер Российской академии наук имени академика М.А. Садовского (ИДГ РАН). Лишь после 1985 г. отчеты с некоторых сейсмических станций бывшего СССР стали публиковаться в оперативных сводках Объединенной геофизической службы Российской академии наук (ГС РАН). Так как она еще нигде не публиковалась, мы собираем их и получаем времена пробега путем ревизии сейсмограмм из архивов ИДГ РАН и ГС РАН для пяти Курило-Камчатских сейсмостанций (Беринг, Эссо, Северо-Курильск, Курильск и Петропавловск). 48 ПЯВ Соединенных Штатов в Пахьют Меса (на испытательном полигоне в Неваде) с 1968 по 1990 год используются для построения годографа продольных волн. Мы измеряем времена пробега Р-волн (t_p) на исторических сейсмограммах для трассы между испытаниями на Пахьют Меса и станциями Курило-Камчатского региона. Магнитуда объемных волн (m_b) варьируется от 5.3 до 6.5. Получено: 1 ПЯВ на ст. Беринг, 7 ПЯВ на ст. Эссо, 45 ПЯВ на ст. Петропавловск, 18 ПЯВ на ст. Северо-Курильск и 12 ПЯВ на ст. Курильск. Мы строим функцию времени пробега, используя алгоритм линейной регрессии как $t_p = k \cdot \Delta^\circ + b$, где Δ° – эпицентральное расстояние, k и b – произвольные константы. Показано, что отклонения времени пробега связаны с нелинейностью Земли. Оценены эффективные скорости продольных волн для трассы Пахьют Меса – Курилы – Камчатка как коэффициент k в линейном уравнении. Эффективная скорость равна 7,5 км/с.

Ключевые слова: Р волна, скорость, время пробега, телесеismicкое расстояние, Невадский испытательный полигон, Курило-Камчатка.

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2022-2-62-69>

УДК 550.34.621.039.9

РЕГИСТРАЦИЯ ПОДЗЕМНЫХ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ НЕВАДСКОГО ПОЛИГОНА СЕЙСМИЧЕСКИМИ СТАНЦИЯМИ СОВЕТСКОГО СОЮЗА

К.С. Непенина¹⁾, В.А. Ан²⁾

¹⁾ Научная станция РАН в г. Бишкеке, Бишкек, Кыргызстан

²⁾ Институт динамики геосфер РАН им. академика М.А. Садовского, Москва, Россия

E-mail для контактов: nepena.k@mail.ru

В работе приведены сведения из оцифрованного журнала регистрации подземных ядерных взрывов (ПЯВ) Невадского полигона с 1960 по 1975 гг. станциями Единой службы сейсмических наблюдений ЕССН СССР, сохранившегося в архивах Института динамики геосфер РАН им. М.А. Садовского (ИДГ РАН). Особое внимание уделено записям тех взрывов, которые были зарегистрированы одной, двумя или максимум тремя станциями. Такие сводки были проверены на наличие записи ПЯВ на сейсмограммах в архивах ИДГ РАН и Единой Геофизической службы РАН (ФИЦ ЕГС РАН). Для этих взрывов на найденных станциях было получено время пробега продольной волны (t_p). Составлены таблицы времен регистрации и времен пробега для различных фаз продольных волн. Этот материал является публикацией части сводного каталога зарегистрированных ПЯВ Невадского полигона для пополнения базы данных о временах пробега сейсмических волн, собранных за последние два десятилетия.

Ключевые слова: ядерный взрыв, советские сейсмологические станции, продольная волна, время пробега, Невада.

ВВЕДЕНИЕ

С 1960 по 1975 гг. после введения в эксплуатацию сейсмических станций на территории Союза Советских Социалистических Республик (СССР) стала возможной устойчивая регистрация удаленных ядерных испытаний. В силу определенных причин отметки времен регистрации подземных ядерных взрывов (ПЯВ) исключались из сводок срочных донесений Геофизической службы АН СССР (ГС РАН, ныне Единой Геофизической службы РАН – ФИЦ ЕГС РАН, г. Обнинск, Россия). Такой отдельный список готовился сотрудницей лаборатории 5-с Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта АН СССР (зав. лабораторией д.ф.м.н. И.П. Пасечник) Хасей Давидович Рубинштейн. И только примерно в 1985 г. сообщения некоторых советских сейсмических станций начали публиковаться в оперативных сводках ГС РАН (ГС в прошлом называлась Центральная сейсмологическая обсерватория (ЦСО)) [1]. На данный момент эти списки хранятся в Институте динамики геосфер РАН имени академика М.А. Садовского (бывший Спецсектор ИФЗ АН СССР, ныне ИДГ РАН). Спустя годы было принято решение оцифровать эти записи и проанализировать их. Для уточнения наличия записей на самих сейсмограммах было оформлено запросы в ФИЦ ЕГС РАН.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В работе приведены параметры сейсмических станций Единой службы сейсмических наблюдений ЕССН СССР, записи которых содержат регистрацию ПЯВ США на Невадском полигоне (NTS). Информация о 255 подземных ядерных взрывах NTS, произведенных с 1967 по 1990 г., опубликована авторами в [2–4], а также есть в работах [5, 6]. В прилагаемых в работе [3] таблицах указаны приборы измерения (ти-

пы сейсмических станций), координаты, даты и времена взрывов. Большинство испытаний NTS были сгруппированы на трёх площадках полигона – Pahute Mesa, Yucca Flat и Rainier Mesa [2]. Для сведения в единый реестр всех советских станций, зарегистрировавших хотя бы один ядерный взрыв, были проанализированы записи Х.Д. Рубинштейн, а также публикации [7–12]. Результаты сведены в единый реестр. Было получено около 507 станций, подававших срочные донесения хотя бы однажды. Для ПЯВ США 1949–1960 гг. нет данных на советских станциях. В таблице 1 указаны названия сейсмических станций, которые сообщали о взрыве в службу срочных донесений хотя бы единожды за время работы, и географические координаты. Годы работы (даты открытия и закрытия), а также высоты станций можно посмотреть на сайте [12]. Частично данные о взрывах опубликованы в работе [13]. Однако авторы указывают только природу событий и утверждают, что «к сожалению, большинство этих материалов к настоящему времени утрачены» [14].

В таблицах 2 и 3 приведены взрывы, которые зарегистрированы только одной станцией: в таблице 2 – Боровое, в таблице 3 – станциями Иультин, Мирный, Михнево, Фрунзе (ныне Бишкек). В таблице 4 – взрывы, зарегистрированные одновременно двумя или тремя советскими станциями. Заголовки в таблицах обозначены следующим образом: № – порядковый номер, Ст – названия сейсмической станции, Δ° – эпицентральный расстояние, Az° – азимут в градусах на эпицентр, Тип – тип сейсмометра, ϕ – фаза/тип сейсмической (продольной волны), $T_{\text{рег}}$ – время регистрации чч:мм:сс.0, t_p – время пробега в секундах (с), T – период колебаний в секундах, A_z – амплитуда колебаний на вертикальном канале в микро-

**РЕГИСТРАЦИЯ ПОДЗЕМНЫХ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ НЕВАДСКОГО ПОЛИГОНА
СЕЙСМИЧЕСКИМИ СТАНЦИЯМИ СОВЕТСКОГО СОЮЗА**

метрах (мкм). В примечаниях: T0 (UTC) – это время испытания (Гринвич), h – высота над уровнем моря, φ° и λ° – географические координаты (широта и долгота), m_b – магнитуда по объемным волнам. Фазы обозначены индексами, принятыми в СССР. Отражение от границы внутреннего ядра Земли: i – «чёткое вступление», e – «слабое вступление», ee – «очень слабое вступление», «+» – положительное вступление, «-» – отрицательное вступление. Если индекс отсутствует, оператор сейсмостанции не смог определить характер вступления. Обозначения телесейсмических фаз: P – продольная волна, РКР2 – устаревшее обозначение фазы продольной волны, проходящей через внутреннее ядро, нынешнее название РКРab P-волна касается верхней границы внешнего

ядра; ab указывает на ретроградную ветвь каустики. Тип сейсмометра: УСФ – универсальный сейсмометр Федосеенко, СК – сейсмограф Кириноса, СКМ – сейсмограф Кириноса модифицированный.

Как известно, станция «Боровое» являлась самой чувствительной к регистрации подземных ядерных взрывов, что получило название «феномена повышенной магнитудной чувствительности сейсмической станции «Боровое» к сигналам отдаленного Невадского испытательного полигона» [14]. Поэтому на её долю приходится 45 зарегистрированных ПЯВ, записи для которых не найдены на других советских станциях. Годографы и поправки времени рассмотрены и проанализированы в предыдущих работах [15, 16].

Таблица 1. Координаты некоторых сейсмических станций ЕССН СССР, подававшие срочные донесения (даже одиножды)

№*	Код станции**	Название станции	Широта φ°	Долгота λ°	№№ литературы
505	BAT	Байрамали Туркменистан	37,61 N	62,16 E	—
506	BLAG	ВоБлагода (Благовещенск)	50,257 N	127,521 E	—
59	BOD \\\	Бодайбо с 04.11.1960	57,8500 N	114,1833 E	10
65	BRVK \\\ BRV	Боровое*	53,0581 N	70,2828 E	9
130	DUS \\\	Душети	42,0833 N	44,7000 E	9
122	DZT	Джиргаталь	39,2200 N	71,2200 E	9
435	FRU \\\	Фрунзе (Бишкек)*	42,8333 N	74,6167 E	9
157	ILT \\\	Иультин с 24.11.1964	67,8700 N	-178,7300 W	10
212	KUL \\\	Куляб	37,9000 N	69,7800 E	9
263	MHV \\\ M11	Михнево Mihnevo	54,9595 N	37,7664 E	9
262	MIR \\\	Мирный с 23.06.1956	-66,551 S	93,017 E	10
265	MOY \\\	Монды с 01.10.1960	51,6833 N	100,9833 E	10
352	SEM \\\	Семипалатинск *	50,4083 N	80,2500 E	9
397	TIXI \\\ TIK	Тикси с 1956	71,6333 N	128,8667 E	10
507	UKM	Усть-Каменогорск	49,9674 N	82,6117 E	11
500	YAK \\\	Якутск с 05.10.1957	62,0167 N	129,7170 E	10
498	YSS \\\	Южно-Сахалинск с 01.03.1957	46,9583 N	142,7610 E	10

Примечания: * – в поле № указан номер из сводного перечня всех советских станций, составленный по сводкам Х.Д. Рубинштейн;

** – в поле «Код станции» после \\\ приведены порядковый номер в списке сейсмических станций и старые коды станций.

Таблица 2. Параметры подземных ядерных взрывов, зарегистрированных только на станции «Боровое»

№	Δ°	Az $^\circ$	Тип	φ	T _{рег}	T	Az	Примечание
1.	89,9657	356,09	УСФ	P	23:18:01,6	0,7		03.12.1961. T0 (UTC): 23:04:59.63. Площадка Yucca . Испытание Fisher , h=364 м, $\varphi^\circ=37.046$, $\lambda^\circ=-116.029$, $m_b=4.4$
2.	90,0986	356,19		P	16:43:03	0,7	0,7	09.01.1962. T0 (UTC): 16:30:00.14. Площадка Yucca . Испытание Stoat , h=302 м, $\varphi^\circ=37.045$, $\lambda^\circ=-116.036$, $m_b=4.2$
3.	90,0967	356,19		iP	18:13:03,2	0,8	0,4	18.01.1962. T0 (UTC): 18:00:00.13. Площадка Yucca . Испытание Agouti , h=261 м, $\varphi^\circ=37.047$, $\lambda^\circ=-116.035$, $m_b=4.2$
4.	90,095	356,19		eP	16:43:03,6			19.02.1962. T0 (UTC): 16:30:00.13. Площадка Yucca . Испытание Chinchilla I , h=150 м, $\varphi^\circ=37.049$, $\lambda^\circ=-116.030$, $m_b=4.1$
5.	90,0143	356,18		iP	18:13:02,6	0,7	0,45	23.02.1962. T0 (UTC): 18:00:00.16. Площадка Yucca . Испытание Cimarron , h=305 м, $\varphi^\circ=37.129$, $\lambda^\circ=-116.049$, $m_b=4.3$
6.	90,1029	356,19		iP	19:23:02,8	0,9	0,7	01.03.1962. T0 (UTC): 19:10:00.09. Площадка Yucca . Испытание Pampas , h=363 м, $\varphi^\circ=37.041$, $\lambda^\circ=-116.030$, $m_b=4.6$
7.	90,0212	356,18	СКМ	P	18:13:03	0,7	0,35	08.03.1962. T0 (UTC): 18:00:00.21. Площадка Yucca . Испытание Brazos , h=256 м, $\varphi^\circ=37.122$, $\lambda^\circ=-116.050$, $m_b=4.2$
8.	90,0999	356,19		P	16:43:02,5	0,8	0,5	15.03.1962. T0 (UTC): 16:30:00.13. Площадка Yucca . Испытание Hognose , h=240 м, $\varphi^\circ=37.044$, $\lambda^\circ=-116.032$, $m_b=4.8$
9.	90,0255	356,19		iP	18:13:02,8	0,7	0,7	06.04.1962. T0 (UTC): 18:00:00.16. Площадка Yucca . Испытание Passaic , h=233 м, $\varphi^\circ=37.118$, $\lambda^\circ=-116.045$, $m_b=4.6$

**РЕГИСТРАЦИЯ ПОДЗЕМНЫХ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ НЕВАДСКОГО ПОЛИГОНА
СЕЙСМИЧЕСКИМИ СТАНЦИЯМИ СОВЕТСКОГО СОЮЗА**

№	Δ°	Az°	Тип	φ	$T_{рег}$	T	Az	Примечание
10.	89,9158	356,12		eeP	18:13:01,8	0,8	0,3	14.04.1962. T0 (UTC): 18:00:00.13. Площадка Rainier . Испытание Platte , h=191 м, $\varphi^\circ=37.222$, $\lambda^\circ=-116.158$, $m_b=3.9$
11.	90,0258	356,19		P	18:13:02,8	0,7	0,35	27.04.1962. T0 (UTC): 18:00:00.16. Площадка Yucca . Испытание Black , h=218 м, $\varphi^\circ=37.118$, $\lambda^\circ=-116.039$, $m_b=4.6$
12.	90,0181	356,18		eP	15:13:03	0,8	0,25	25.05.1962. T0 (UTC): 15:00:00.15. Площадка Yucca . Испытание White , h=193 м, $\varphi^\circ=37.125$, $\lambda^\circ=-116.053$, $m_b=4.6$
13.	90,1009	356,19		iP	17:13:03,4	0,9	0,8	21.06.1962. T0 (UTC): 17:00:00.13. Площадка Yucca . Испытание Daman I , h=260 м, $\varphi^\circ=37.043$, $\lambda^\circ=-116.031$, $m_b=4.8$
14.	90,0263	356,18		eeP	21:43:03,1			30.06.1962. T0 (UTC): 21:30:00.16. Площадка Yucca . Испытание Sacramento , h=149 м, $\varphi^\circ=37.117$, $\lambda^\circ=-116.048$, $m_b=4.1$
15.	89,9657	356,09	СКМ	eP	18:28:01,0	0,9		05.03.1966. T0 (UTC): 18:15:00.10. Площадка Rainier . Испытание Red Hot , h=405 м, $\varphi^\circ=37.174$, $\lambda^\circ=-116.209$, $m_b=4.4$
16.	90,1069	356,19	СКМ	-iP	18:54:02,0			07.03.1966. T0 (UTC): 18:41:00.07. Площадка Yucca . Испытание Finfoot , Cinnamon, h=196 м, $\varphi^\circ=37.037$, $\lambda^\circ=-116.030$, $m_b=4.6$
17.	90,1359	356,21	СКМ	iP	19:13:03			18.03.1966. T0 (UTC): 19:00:00.04. Площадка Yucca . Испытание Purple , h=333 м, $\varphi^\circ=37.009$, $\lambda^\circ=-116.010$, $m_b=5.3$
18.	90,0417	356,2	СКМ	eeP	18:53:01,0			01.04.1966. T0 (UTC): 18:40:00.00. Площадка Yucca . Испытание Lime , h=561 м, $\varphi^\circ=37.103$, $\lambda^\circ=-116.021$, $m_b=4.2$
19.	90,0016	356,13	СКМ	eP	13:45:19,0			04.05.1966. T0 (UTC): 13:32:17.09. Площадка Yucca . Испытание Traveler , h=197 м, $\varphi^\circ=37.137$, $\lambda^\circ=-116.138$, $m_b=4.6$
20.	90,0081	356,17	СКМ	eP	19:50:28,0			12.05.1966. T0 (UTC): 19:37:26.20. Площадка Yucca . Испытание Tapestry , h=247 м, $\varphi^\circ=37.134$, $\lambda^\circ=-116.072$, $m_b=4.3$.
21.	89,9724	356,18	СКМ	eP	18:15:47,0			15.06.1966b. T0 (UTC): 18:02:47.13. Площадка Yucca . Испытание Kankakee , h=455 м, $\varphi^\circ=37.171$, $\lambda^\circ=-116.050$, $m_b=5.4$
22.	90,0408	356,19	СКМ	iP	18:13:19,1			23.09.1966. T0 (UTC): 18:00:00.04. Площадка Yucca . Испытание Daiquiri , h=561 м, $\varphi^\circ=37.103$, $\lambda^\circ=-116.037$, $m_b=4.6$
23.	89,9746	356,18	СКМ	eeP	14:58:30,0			29.09.1966. T0 (UTC): 14:45:30.09. Площадка Yucca . Испытание Newark , h=229 м, $\varphi^\circ=37.169$, $\lambda^\circ=-116.047$, $m_b=4.1$
24.	90,0092	356,18	СКМ	eP	12:13:03,0			11.11.1966. T0 (UTC): 12:00:00.14. Площадка Yucca . Испытание Ajax , h=238 м, $\varphi^\circ=37.134$, $\lambda^\circ=-116.051$, $m_b=4.4$
25.	90,102	356,21	СКМ	eP	15:15:00,0			18.11.1966. T0 (UTC): 15:02:00.04. Площадка Yucca . Испытание Cerise , h=211 м, $\varphi^\circ=37.043$, $\lambda^\circ=-116.011$, $m_b=4.8$
26.	89,9657	356,09	СКМ	P	16:31:21,8	0,8	0,008	12.02.1969. T0 (UTC): 16:18:20.88. Площадка Rainier . Испытание Cypress , h=411m, $\varphi^\circ=37.169$, $\lambda^\circ=-116.212$, $m_b=5.1$
27.	90,1348	356,19	СКМ	-iP	14:13:03,1	0,8	0,018	12.06.1969. T0 (UTC): 14:00:00.04. Площадка Yucca . Испытание Tapper , h=303 м, $\varphi^\circ=37.009$, $\lambda^\circ=-116.031$, $m_b=4.4$
28.	90,0239	356,18	СКМ	+iP	18:15:32,5	1	0,016	16.07.1969a. T0 (UTC): 13:02:30.04. Площадка Yucca . Испытание Ildrim , h=410m, $\varphi^\circ=37.119$, $\lambda^\circ=-116.056$, $m_b=4.7$
29.	90,1525	356,22	СКМ	P	13:58:01,3	0,9	0,015	27.08.1969. T0 (UTC): 13:45:00.04. Площадка Yucca . Испытание Horehound , Pliers, h=332m, $\varphi^\circ=36.993$, $\lambda^\circ=-115.996$, $m_b=4.7$
30.	90,2716	356,26	СКМ	P	18:15:23,6			12.09.1969. T0 (UTC): 18:02:20.42. Площадка Frenchman . Испытание Minute Steak , h=265m, $\varphi^\circ=36.877$, $\lambda^\circ=-115.929$, $m_b=4.5$
31.	90,018	356,14	СКМ	P	19:43:23	0,8	0,001	29.10.1969a. T0 (UTC): 19:30:00.04. Площадка Yucca . Испытание Cruet , h=264m, $\varphi^\circ=37.121$, $\lambda^\circ=-116.129$, $m_b=5.1$
32.	90,0036	356,13	СКМ	P	20:13:02,1	0,8	0,008	29.10.1969b. T0 (UTC): 20:00:00.04. Площадка Yucca . Испытание Pod D , Pod A,B,C, h=312m, $\varphi^\circ=37.135$, $\lambda^\circ=-116.137$, $m_b=5.0$
33.	90,0069	356,19	СКМ	+iP	16:43:02,0	0,6	0,003	23.01.1970. T0 (UTC): 16:30:00.21. Площадка Yucca . Испытание Fob Red (Green, Blue), h=266 м, $\varphi^\circ=37.137$, $\lambda^\circ=-116.038$, $m_b=4.6$
34.	90,0021	356,19	СКМ	eP	15:13:02,2			06.03.1970b. T0 (UTC): 23:05:00.04. Площадка Yucca Испытание Arabis Green , (Red, Blue), h=259 м, $\varphi^\circ=37.142$, $\lambda^\circ=-116.035$, $m_b=4.3$
35.	90,1295	356,2	СКМ	eP	15:13:02,3	0,8	0,004	19.11.1970. T0 (UTC): 15:00:00.04. Площадка Yucca . Испытание Penasco , h=271 м, $\varphi^\circ=37.015$, $\lambda^\circ=-116.017$, $m_b=4.1$
36.	90,1117	356,2	СКМ	+iP	15:03:02,3	0,8	0,005	16.06.1971. T0 (UTC): 14:50:00.04. Площадка Yucca . Испытание Embudo , h=303 м, $\varphi^\circ=37.033$, $\lambda^\circ=-116.015$, $m_b=4.9$
37.	90,0193	356,16	СКМ	-iP	16:45:02,8			19.04.1972. T0 (UTC): 16:32:00.16. Площадка Yucca . Испытание Longchamps , h=326 м, $\varphi^\circ=37.122$, $\lambda^\circ=-116.085$, $m_b=4.6$
38.	89,9269	356,09	СКМ	+iP	19:28:01,5	0,8	0,012	02.05.1972. T0 (UTC): 19:15:00.16. Площадка Rainier . Испытание Misty North , h=376 м, $\varphi^\circ=37.208$, $\lambda^\circ=-116.210$, $m_b=5.0$
39.	90,0201	356,16	СКМ	eP	14:23:02,6	0,8	0,012	17.05.1972. T0 (UTC): 14:10:00.04. Площадка Yucca . Испытание Zinnia , h=323 м, $\varphi^\circ=37.121$, $\lambda^\circ=-116.089$, $m_b=4.4$

**РЕГИСТРАЦИЯ ПОДЗЕМНЫХ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ НЕВАДСКОГО ПОЛИГОНА
СЕЙСМИЧЕСКИМИ СТАНЦИЯМИ СОВЕТСКОГО СОЮЗА**

№	Δ°	Az°	Тип	φ	$T_{рег}$	T	A_z	Примечание
40.	90,0202	356,16	СКМ	eP	14:43:02,56	0,8	0,009	26.09.1972, T0 (UTC): 14:30:00.16. Площадка Yucca . Испытание Dolphinium , h=296 м, $\varphi=37.121$, $\lambda=-116.087$, $m_b=4.4$
41.	89,981	356,18	СКМ	+iP	13:43:01,6			24.05.1973, T0 (UTC): 13:30:00.16. Площадка Yucca . Испытание Kashan , Cabresto, h=265 м, $\varphi=37.162$, $\lambda=-116.057$, $m_b=4.1$
42.	90,1401	356,2	СКМ	-iP	14:53:05,1	1	0,012	06.06.1974, T0 (UTC): 14:40:00.08. Площадка Yucca . Испытание Jara , h=378 м, $\varphi=37.004$, $\lambda=-116.024$, $m_b=4.7$.
43.	90,1318	356,19	СКМ	eP	14:13:02,0	0,9	0,011	25.09.1974, T0 (UTC): 14:00:00.08. Площадка Yucca . Испытание Pratt , h=314 м, $\varphi=37.012$, $\lambda=-116.031$, $m_b=4.3$
44.	89,9146	356,1	СКМ	+iP	17:24:27,3			24.10.1975, T0 (UTC): 17:11:26.09. Площадка Rainier . Испытание Husky Pup , h=328 м, $\varphi=37.222$, $\lambda=-116.181$, $m_b=4.7$
45.	90,1243	356,2	СКМ	eeP	15:43:02,0			18.11.1975, T0 (UTC): 15:30:00.11. Площадка Yucca . Испытание Deck , h=326 м, $\varphi=37.020$, $\lambda=-116.022$, $m_b=4.3$

Примечание: времена пробега t_p приведены в работах [3, 15, 16].

Таблица 3. Параметры подземных ядерных взрывов, зарегистрированных на станциях ECCH СССР, участвовавших в подаче срочных донесений (даже одиножды)

№	Δ°	Az°	Тип*	φ	$T_{рег}$	t_p	Ст	Примечание
1.	146.1503	200.55	was	ePKP2	17:19:41	1181,86	MIR	16.10.1963. T0 (UTC): 17:00:00.14. Площадка Rainier . Испытание Clearwater , h=545 м, $\varphi=37.198$, $\lambda=-116.230$, $m_b=5.7$
2.	99.8385	352.07	СК	eP	15:50:13	750,9	FRU	13.01.1966. T0 (UTC): 15:37:43.10. Площадка Yucca . Испытание Maxwell , h=183 м, $\varphi=37.116$, $\lambda=-116.028$, $m_b=?$
3.	85.5743	14.77	СКМ	eP	13:51:10.8	762,64	MHV	23.05.1974, T0 (UTC): 13:38:30.16. Площадка Yucca . Испытание Fallon , h=466 м, $\varphi=37.124$, $\lambda=-116.080$, $m_b=4.8$
4.	46.055	332.12	СКМ	eP	14:08:27.0	507,84	ILT	14.08.1974, T0 (UTC): 14:00:00.16. Площадка Yucca . Испытание Puye , h=430 м, $\varphi=37.023$, $\lambda=-116.037$, $m_b=4.6$

Примечание: * – Тип сейсмометра: w – телесеismicкая станция, a – аналоговое оборудование, трехкомпонентная станция по [12].
Для станции Михнево (MHV) T=1 с. $A_z=0.012$ мкм.

Таблица 4. Параметры подземных ядерных взрывов, зарегистрированных двумя или тремя станциями ECCH СССР.

№	Ст	Δ°	Az°	Тип	φ	$T_{рег}$	t_p	T	A_z	Примечание
1.	BRVK	89,9171	356,18		P	18:13:05.5	785,4			Дата: 15.02.1962. T0 (UTC): 18:00:00.10. Площадка Yucca . Испытание Hard Hat , Climax Stock, N of Yucca subsurface collapse, h=287 м, $\varphi=37.226$, $\lambda=-116.060$, $m_b=4.7$
2.	BAT				P	18:13:07.2	787,1			
3.	UKM				P	18:13:11.2	791,1			
4.	BLAG				eP	17:12:24.9	744,79	1,1	0,40	Дата: 28.06.1962. T0 (UTC): 17:00:00.11. Площадка Shoshone .
5.	BRVK	90,1255	356,09		iP	17:13:03.4	783,29	0,8	0,85	Испытание Marshmallow , h=311 м, $\varphi=37.009$, $\lambda=-116.202$, $m_b=4.2$
6.	ILT	45,6865	332,04	СКМ	iP	16:03:31	596,96	1	-0,023	Дата: 24.02.1966. T0 (UTC): 15:55:07.04. Площадка Pahute . Испытание Rex , h=671 м, $\varphi=37.272$, $\lambda=-116.435$, $m_b=5.0$
7.	YAK	67,6910	332,21	СКМ	eP	16:06:07	752,96			
8.	BOD	76,1757	334,81	СКМ	iP	16:06:57	802,96	1,0	0,005	
9.	ILT	45,9134	332,08	СКМ	iP	14:05:42	587,9	0,8	-0,02	Дата: 06.04.1966. T0 (UTC): 13:57:17.10. Площадка Yucca . Испытание Stutz , h=225 м, $\varphi=37.139$, $\lambda=-116.142$, $m_b=4.4$
10.	TIK	62,4100	341,08	СКМ	iP	14:07:41	706,9	1,0	-0,006	
11.	MOY	85,7685	337,87	СКМ	e	14:10:39	884,9			
12.	YAK	68,0806	332,39	СКМ	iP	22:38:34	733,96	0,7	-0,035	Дата: 07.04.1966. T0 (UTC): 22:27:30.04. Площадка Yucca . Испытание Tomato , h=226 м, $\varphi=37.017$, $\lambda=-115.993$, $m_b=4.6$
13.	BRVK	90,1288	356,22	СКМ	eP	22:40:32	851,96			
14.	ILT	46,2106	332,18	СКМ	iP	18:46:27.7	507,56	1,0	0,015	
15.	BRVK	90,2610	356,25	СКМ	eP	18:51:03.0	882,86			Дата: 25.04.1966. T0 (UTC): 18:38:00.14. Площадка Frenchman . Испытание Pin Stripe , h=296 м, $\varphi=36.887$, $\lambda=-115.942$, $m_b=4.5$
16.	DZT	103,9788	354,27	УСФ	e	18:48:22.1	721,96	0,9		
17.	ILT	46,0296	332,11	СКМ	iP	14:08:22	601,96	1	0,007	
18.	TIK	62,5198	341,12	СКМ	iP	14:10:30	729,96			Дата: 05.05.1966. T0 (UTC): 14:00:00.04. Площадка Yucca . Испытание Cyclamen , h=305 м, $\varphi=37.051$, $\lambda=-116.039$, $m_b=4.4$
19.	BRVK	90,0925	356,19	СКМ	eP	14:13:02.0	881,96			
20.	ILT	46,0221	332,11	СКМ	eP	14:38:25.5	505,46	1	-0,022	
21.	TIK	62,5120	341,12	СКМ	iP	14:40:24	723,96	1,0	-0,011	Дата: 10.06.1966. T0 (UTC): 14:30:00.04. Площадка Yucca . Испытание Puce , h=486 м, $\varphi=37.059$, $\lambda=-116.040$, $m_b=?$
22.	ILT	45,9251	332,07	СКМ	eP	17:24:01	760,93			
23.	BRVK	89,9871	356,17	СКМ	iP	17:26:02.0	881,93			
24.	ILT	46,2117	332,18	СКМ	e	21:08:27	606,92			Дата: 25.06.1966. T0 (UTC): 17:13:00.07. Площадка Yucca . Испытание Vulcan , h=322 м, $\varphi=37.155$, $\lambda=-116.073$, $m_b=5.1$
25.	BRVK	90,2611	356,25	СКМ	eeP	21:13:02	881,92			

**РЕГИСТРАЦИЯ ПОДЗЕМНЫХ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ НЕВАДСКОГО ПОЛИГОНА
СЕЙСМИЧЕСКИМИ СТАНЦИЯМИ СОВЕТСКОГО СОЮЗА**

№	Ст	Δ°	Az°	Тип	φ	$T_{рег}$	t_p	T	A_z	Примечание
26.	TIK	62,5493	341,13	СКМ	eP	18:22:25	724,96			Дата: 20.03.1969. Время испытания (Гринвич): 18:12:00.04. Площадка Yucca . Испытание Barsac , h=304м, $\varphi^\circ=37.022$, $\lambda^\circ=-116.031$, $m_b=4.6$
27.	BRVK	90,1218	356,19	СКМ	P	18:25:02.8	782,76	0,8	0,014	
28.	SEM	91,7659	349,66	СКМ	eP	18:26:08.4	848,36			
29.	ILT	45,9389	332,08	СМЗ	iP	14:38:25	604,59			Дата: 21.03.1969. Время испытания (Гринвич): 14:30:00.41. Площадка Yucca . Испытание Coffer , h=465м, $\varphi^\circ=37.133$, $\lambda^\circ=-116.088$, $m_b=4.9$
30.	TIK	62,4297	341,10	СКМ	eP	14:40:24	723,59			
31.	BRVK	90,0082	356,16	СКМ	iP	14:43:01.8	781,39	0,8	+0,01	Дата: 30.01.1970, T0 (UTC): 17:00:00.04. Площадка Yucca . Испытание Ajo , h=304 м, $\varphi^\circ=37.031$, $\lambda^\circ=-116.036$, $m_b=4.6$
32.	YSS	70,7069	314,61	СКМ	+iP	17:11:32.6	692,56			
33.	BRVK	90,1126	356,19	СКМ	+iP	17:13:02.5	782,46	0,8	+0,004	
34.	ILT	45,8348	332,06	СКМ	iP	19:23:25.5	505,46	1,3	-0,038	Дата: 11.02.1970, T0 (UTC): 19:15:00.04. Площадка Rainier . Испытание Diana Mist , h=402 м, $\varphi^\circ=37.201$, $\lambda^\circ=-116.206$, $m_b=4.7$
35.	MHV	85,5255	14,71	СКМ	P	19:27:42	861,96			
36.	BRVK	89,9321	356,09	СКМ	+iP	19:28:01.3	781,26	0,8	+0,09	Дата: 06.03.1970а, T0 (UTC): 14:24:00.94. Площадка Yucca . Испытание Syathus , h=294 м, $\varphi^\circ=37.173$, $\lambda^\circ=-116.093$, $m_b=4.3$
37.	ILT	45,9017	332,06	СКМ	iP	14:32:25.5	604,56			
38.	BRVK	89,9681	356,16	СКМ	+iP	14:37:01.6	880,66	0,9	0,012	
39.	ILT	46,0262	332,11	СКМ	eP	14:21:26	605,96			Дата: 01.05.1970а, T0 (UTC): 14:13:00.04. Площадка Yucca . Испытание Veebalm , h=390 м, $\varphi^\circ=37.059$, $\lambda^\circ=-116.029$, $m_b=4.2$
40.	BRVK	90,0851	356,20	СКМ	eP	14:26:02.4	782,36			
41.	KUL	105,2192	355,24	СК	e	14:26:37.3	817,26			Дата: 01.05.1970b, T0 (UTC): 14:40:00.08. Площадка Yucca . Испытание Hod B , (A-Green, C-Blue), h=265 м, $\varphi^\circ=37.136$, $\lambda^\circ=-116.035$, $m_b=4.3$
42.	ILT	45,9561	332,07	СКМ	eP	14:48:26	605,92	1,1	-0,11	
43.	BRVK	90,0081	356,19	СКМ	-iP	14:53:02.3	782,22	1,1	0,013	
44.	ILT	45,8476	332,06	СКМ	iP	14:24:25	604,83	1,2	+0,025	Дата: 26.05.1970а, T0 (UTC): 14:16:00.17. Площадка Rainier . Испытание Hudson Moon , h=422 м, $\varphi^\circ=37.183$, $\lambda^\circ=-116.214$, $m_b=5.0$
45.	BRVK	89,9516	356,08	СКМ	+P	14:29:02.8	782,63	1,0	0,003	
46.	ILT	45,9560	332,09	СКМ	eP	13:08:25.5	505,46			Дата: 26.06.1970, T0 (UTC): 13:00:00.04. Площадка Yucca . Испытание Arnica Yellow , (Violet), h=309 м, $\varphi^\circ=37.114$, $\lambda^\circ=-116.087$, $m_b=4.3$
47.	BRVK	90,0272	356,16	СКМ	eP	13:13:01.9	781,86			
48.	BRVK	90,1340	356,21	СКМ	eP	14:13:01.9	781,86	0,9		Дата: 29.09.1971, T0 (UTC): 14:00:00.04. Площадка Yucca . Испытание Pederal , h=379 м, $\varphi^\circ=37.011$, $\lambda^\circ=-116.008$, $m_b=4.4$
49.	DUS	99,3332	14,43	СК	e	14:14:17.0	956,96			
50.	ILT	45,9744	332,08	СМ	eP	14:38:26	605,85	0,7	-0,015	
51.	BRVK	90,0298	356,19	СКМ	-iP	14:43:02.2	782,05	0,7	-0,015	Дата: 08.10.1971, T0 (UTC): 14:30:00.15. Площадка Yucca . Испытание Cathay , h=378 м, $\varphi^\circ=37.114$, $\lambda^\circ=-116.038$, $m_b=4.7$
52.	ILT	45,9461	332,08	СКМ	eP	21:18:26.3	548,14			
53.	TIK	62,4377	341,10	СКМ	eP	21:20:25	666,84			Дата: 14.12.1971, T0 (UTC): 21:09:59.16. Площадка Yucca . Испытание Chaenactis , (Yerba, Hospah), h=331 м, $\varphi^\circ=37.124$, $\lambda^\circ=-116.090$, $m_b=4.7$
54.	BRVK	90,0171	356,16	СКМ	eP	21:23:01.1	822,94			
55.	ILT	46,0739	332,13	СКМ	+eP	22:33:26	605,96			
56.	BRVK	90,1388	356,20	СКМ	+iP	22:38:02.2	782,16			Дата: 25.04.1973, T0 (UTC): 22:25:00.04. Площадка Yucca . Испытание Angus , Velarde, h=453 м, $\varphi^\circ=37.005$, $\lambda^\circ=-116.029$, $m_b=4.7$
57.	MHV	88,5945	14,80	СКМ	P	14:57:39	858,92			
58.	BRVK	90,0523	356,20	СКМ	+iP	14:58:01.7	781,62	1,0	0,050	Дата: 21.06.1973, T0 (UTC): 14:45:00.08. Площадка Yucca . Испытание Potrillo , h=567 м, $\varphi^\circ=37.092$, $\lambda^\circ=-116.028$, $m_b=5.1$
59.	ILT	46,0877	332,14	СКМ	iP	19:08:27	606,92			
60.	BRVK	90,1530	356,20	СКМ	eP	19:13:03	882,92			
61.	ILT	45,9593	332,08	СКМ	+iP	14:23:26.0	605,83			Дата: 12.12.1973, T0 (UTC): 19:00:00.08. Площадка Yucca . Испытание Pajara , h=278 м, $\varphi^\circ=36.991$, $\lambda^\circ=-116.025$, $m_b=4.5$
62.	TIK	62,4498	341,10	СКМ	eP	14:25:25.0	724,83			
63.	BRVK	90,0268	356,17	СКМ	iP	14:28:02.3	782,13			Дата: 22.05.1974, T0 (UTC): 14:15:00.17. Площадка Yucca . Испытание Grove , h=314 м, $\varphi^\circ=37.115$, $\lambda^\circ=-116.076$, $m_b=4.4$
64.	ILT	46,0727	332,13	СКМ	eP	17:38:26.5	506,41			
65.	BRVK	90,1335	356,20	СКМ	eP	17:43:02.0	881,91			
66.	MHV	85,6604	14,80	СКМ	P	17:12:40.0	859,89			Дата: 16.12.1974, T0 (UTC): 17:30:00.09. Площадка Yucca . Испытание Keel , h=305 м, $\varphi^\circ=37.011$, $\lambda^\circ=-116.018$, $m_b=4.2$
67.	BRVK	90,1199	356,20	СКМ	+iP	17:13:02.3	782,19	0,8	0,016	
68.	ILT	45,9785	332,08	СКМ	eP	15:38:25.0	604,84			Дата: 06.09.1975, T0 (UTC): 17:00:00.11. Площадка Yucca . Испытание Marsh , h=427 м, $\varphi^\circ=37.024$, $\lambda^\circ=-116.029$, $m_b=4.6$
69.	BRVK	90,0278	356,20	СКМ	-iP	15:43:02.7	782,54		0,013	
										Дата: 26.11.1975, T0 (UTC): 15:30:00.16. Площадка Yucca . Испытание Leyden , h=326 м, $\varphi^\circ=37.117$, $\lambda^\circ=-116.020$, $m_b=5.0$

Выводы

В результате оцифровки журнала и подробной сверки с записями на самих сейсмограммах получены времена пробега продольных волн (t_p). Наилучшим образом регистрация Невадских взрывов производилась станцией «Боровое». Как минимум двумя станциями СССР зарегистрировано 18 ПЯВ США,

тремя – 11. Минимальное значение времени пробега (для одиночной регистрации) получено на станции Иультин (ILT) 506.41 с, максимальное – на станции Мирный в Антарктиде (MIR) 1280.86 с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, результаты обработки и выборки из сводного журнала регистрации ПЯВ на советских станциях доказывают тот факт, что станции СССР были чувствительны даже к далеким сейсмическим событиям и позволяли регистрировать подземные ядерные взрывы на удалениях ~17 000 километров (для станции MIR). В результате рассмотрения регистрации Единой службой сейсмических наблюдений (ЕССН), как минимум одна из списка 504 советских станций обнаруживала, по крайней мере, один ПЯВ США, что позволяло следить за реализацией атомного проекта США.

БЛАГОДАРНОСТИ

Данная подборка станций СССР сделана в память о Хасе Давидовне Рубинштейн, сотруднице лаборатории 5-с Института физики Земли АН СССР (ныне ИФЗ РАН), которая тщательно вела эти записи. В.А. Ан был удостоен чести быть знакомым с Х.Д. Рубинштейн в течение Экспедиции № 4, в то время, когда она была начальником сейсмической станции «Боровое».

Авторы выражают благодарность сотрудникам Геофизической службы РАН Е. Б. Тереховой и Л. С. Петуховой за помощь, оказанную при выборке необходимых сейсмограмм в архиве ФИЦ ГС РАН.

Работа подготовлена в рамках деятельности молодежного отделения Российского Пагуошского комитета при Президиуме РАН и молодежной группы ОДВЗЯИ. Исследование выполнено для реализации государственного задания Научной станции РАН в г. Бишкеке 1021052806454-2-1.5.1.

ЛИТЕРАТУРА

1. Непейна К.С. Сейсмические станции Советского Союза и регистрация подземных ядерных взрывов / К.С. Непейна, В.А. Ан // Вестник НЯЦ РК. – 2021. – Вып. 2. – 47-52. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2021-2-47-52>.
2. An V.A. A digital seismogram archive of nuclear explosion signals, recorded at the Borovoye Geophysical Observatory, Kazakhstan, from 1966 to 1996 / V.A. An, V.M. Ovtchinnikov, P.B. Kaazik, V.V. Adushkin, I.N. Sokolova, I.B. Aleschenko, N.N. Mikhailova, W-Y. Kim, P.G. Richards, H.J. Patton, W.S. Phillips, G. Randall, D. Baker // GeoResJ. – 2015. – Vol. 6. – pp. 141–163. <https://doi.org/10.1016/j.grj.2015.02.014>.
3. Nepeina K.S. Travel time curves and isochron maps from the Borovoye digital archive for the Nevada and Semipalatinsk Nuclear Test Sites / K.S. Nepeina, V.A. An // Results in Geophysical Sciences. – 2021. – Vol. 6. – 100014. - <https://doi.org/10.1016/j.ringsps.2021.100014>.
4. Ан В. А. Циклические изменения параметров сейсмической волны Р на трассе Невада - Боровое / В.А. Ан, Е.И. Люкэ // Физика Земли. – 1992. – № 4. – С. 20 – 31.
5. Springer D.L. Seismic Source Summary for All U.S. Below-Surface Nuclear Explosions / D.L. Springer / Bull. Seismol. Soc. Am. – 2002. – Vol. 92. – pp. 1806–1840. <https://doi.org/10.1785/0120010194>.

6. Yang X. Worldwide nuclear explosions, in International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology / X. Yang, R. North, C. Romney, P. Richards / eds. Lee W.H. Kanamori H. Jennings P. Kisslinger C. // New York: Academic, 2003. – Vol. 81B. https://www.ldeo.columbia.edu/~richards/my_papers/WW_nuclear_tests_IASPEI_NB.pdf [Дата обращения 27.05.2022].
7. Координаты сейсмических станций Единой системы сейсмических наблюдений. – Москва: Академия Наук СССР, ордена Ленина Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта, 1984. – 12 с.
8. Кондорская Н.В. Сейсмические станции ЕССН СССР на 01.01.1990 г. / Н.В. Кондорская, И.В. Фёдорова. – Москва: Российская Академия Наук, Объединённый институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта, 1996. – 36 с.
9. Seismological Observatories. I-1998-VI. 588 – 729 pp.
10. Старовойт О.Е. Сейсмические станции Российской Академии Наук / О.Е. Старовойт, В.Н. Мишаткин. – Москва-Обнинск: Российская Академия Наук, Геофизическая служба, 2001. – 88 с.
11. Соколова И.Н. Исторические данные и архивные сейсмограммы как подтверждение сейсмичности территории Семипалатинского испытательного полигона / И.Н. Соколова, Н.Н. Михайлова // Вестник НЯЦ РК. – 2020. – Вып. 3. – С. 73-80.
12. Цифровая база сейсмических станций на территории России и СССР // ФГБУН ФИЦ Единая Геофизическая служба РАН. – <http://eqru.gsras.ru/stations/index.php?inc=stalist> [Дата обращения 27.05.2022].
13. Годзиковская А. А. Сейсмические события Европейской части бывш. СССР, Урала и Западной Сибири / А. А. Годзиковская, Н. Е. Прибылова // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2014. – Т. 41. – № 2. – С. 5–22.
14. Адушкин В.В. Геофизическая обсерватория «Боровое» – из прошлого в будущее (к 40-летию создания) / В.В. Адушкин, Р. Richards, В.А. Ан, А.В. Ситников // Вестник НЯЦ РК. – 2001. – Вып. 2. – С. 15–20.
15. Ан В.А. Изменения параметров внутренних геосфер Земли на интервале 1961-1992 гг. / В.А. Ан, Л.Д. Годунова, П.Б. Каазик // Вестник НЯЦ РК. – 2007. – Вып. 2. – С. 27–32.
16. Ан В.А. Годографы геофизической обсерватории «Боровое» по подземным ядерным испытаниям / В.А. Ан, П.Б. Каазик, Т.В. Челюбева // Вестник НЯЦ РК. – 2016. – Вып. 2. – С. 90–95.

REFERENCES

1. Nepeina K.S. Historical seismic stations in USSR and registration underground nuclear explosions / K.S. Nepeina, V.A. An // NNC RK Bulletin. – 2021. – Vol. 2. – pp. 47-52. (In Russ.) <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2021-2-47-52>.
2. An V.A. A digital seismogram archive of nuclear explosion signals, recorded at the Borovoye Geophysical Observatory, Kazakhstan, from 1966 to 1996 / V.A. An, V.M. Ovtchinnikov, P.B. Kaazik, V.V. Adushkin, I.N. Sokolova, I.B. Aleschenko, N.N. Mikhailova, W-Y. Kim, P.G. Richards, H.J. Patton, W.S. Phillips, G. Randall, D. Baker // GeoResJ. – 2015. – Vol. 6. – pp. 141–163. <https://doi.org/10.1016/j.grj.2015.02.014>.

3. Nepeina K.S. Travel time curves and isochron maps from the Borovoye digital archive for the Nevada and Semipalatinsk Nuclear Test Sites / K.S. Nepeina, V.A. An // Results in Geophysical Sciences. – 2021. – Vol. 6. – 100014. <https://doi.org/10.1016/j.ringsps.2021.100014>.
4. An V.A. Cyclic changes of parameters of seismic P waves in Nevada - Borovoye trace / V.A. An, E.I. Luyke // Izvestiya. Physics of the Solid Earth, 1992. – Is. 4. – pp. 20–31. (In Russ.)
5. Springer D.L. Seismic Source Summary for All U.S. Below-Surface Nuclear Explosions / D.L. Springer // Bull. Seismol. Soc. Am. – 2002. Vol. 92. – pp. 1806–1840. <https://doi.org/10.1785/0120010194>.
6. Yang X. Worldwide nuclear explosions, in International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology / X. Yang, R. North, C. Romney, P. Richards / eds. Lee W.H. Kanamori H. Jennings P. Kisslinger C. // New York: Academic, 2003. – Vol. 81B. https://www.ldeo.columbia.edu/~richards/my_papers/WW_nuclear_tests_IASPEI_HB.pdf [Data of access 27.05.2022].
7. Koordinaty seismicheskikh stantsiy Yedinoy sistemy seismicheskikh nablyudeniy. – Moscow: Akademiya Nauk SSSR, ordena Lenina Institut fiziki Zemli im. O.Yu. Shmidta, 1984. – 12 p.
8. Kondorskaya N.V., Fodorova I.V. Seismicheskiye stantsii YESSN SSSR na 01.01.1990 g. / N.V. Kondorskaya, I.V. Fodorova. – Moscow: Rossiyskaya Akademiya Nauk, Ob'yedinonnyy institut fiziki Zemli im. O.Yu. Shmidta, 1996. – 36 p.
9. Seismological Observatories. I-1998-VI. 588 – 729 pp.
10. Starovoyt O.Ye., Mishatkin V.N. Seismicheskiye stantsii Rossiyskoy Akademii Nauk / O.Ye. Starovoyt, V.N. Mishatkin. – Moscow-Obninsk: Rossiyskaya Akademiya Nauk, Geofizicheskaya sluzhba, 2001. – 88 p.
11. Sokolova I.N. Historical data and archive seismograms as confirmation of Semipalatinsk Test Site seismicity / I.N. Sokolova, N.N. Mikhailova // NNC RK Bulletin. – 2020. – No. 3. – pp. 73–80. (In Russ.)
12. Tsifrovaya baza seismicheskikh stantsiy na territorii Rossii i SSSR // FGBUN FITS Yedinaya Geofizicheskaya sluzhba RAN. – <http://eqr.gsras.ru/stations/index.php?inc=stalist> [Data of access 27.05.2022].
13. Godzikovskaya A.A. Seismic Events of the european part of the Former URSS, Ural and Western Siberia / A.A. Godzikovskaya, N.E. Pribylova // Voprosy inzhenernoi seismologii – 2014. – Vol. 41. – No. 2. – pp. 5–22. (In Russ.)
14. Adushkin V.V. Borovoe Geophysical Observatory – from past to future / V.V. Adushkin, P. Richards, V.A. An, A.V. Sitnikov // NNC RK Bulletin. – 2001. – Vol. 2. – pp. 15–20. (In Russ.)
15. An V.A. Earth interior geospheres parameters change within 1961-1992 / V.A. An, L.D. Godunova, P.B. Kaazik // NNC RK Bulletin. – 2007. – Vol. 2. – pp. 27–32. (In Russ.)
16. An V.A. The travel-time curves of “Borovoye” Geophysical Observatory constructed using underground nuclear tests / V.A. An, P.B. Kaazik, T. V. Chelyubeyeva // NNC RK Bulletin. – 2016. – Vol. 2. – pp. 90–95.

КЕҢЕС ОДАҒЫНЫҢ СЕЙСМИКАЛЫҚ СТАНЦИЯЛАРЫ ЖӘНЕ ЖЕР АСТЫ ЯДРОЛЫҚ ЖАРЫЛЫСТАРДЫ ТІРКЕУ

К.С. Непенина¹⁾, В.А. Ан²⁾

¹⁾ *Бішкек қаласындағы РҒА ғылыми станциясы, Бішкек, Қырғызстан*

²⁾ *Садовский РҒА Геосфералар динамикасы институты, Мәскеу, Ресей*

Бұл мақалада Невада полигонының 1960 жылдан 1975 жылға дейінгі жерасты ядролық жарылыстарының цифрланған тізілімінен алынған ақпарат ұсынылған. Ресей ғылым академиясының Геосфера динамикасы институтының мұрағатында сақталған КСРО ESSN Бірыңғай сейсмикалық бақылау қызметінің станциялары. М.А. Садовский (РҒА ИДГ). Бір, екі немесе ең көп дегенде үш станцияда тіркелген жарылыстардың жазбаларына ерекше назар аударылады. Мұндай есептер IDG RAS мұрағаттарында және Ресей ғылым академиясының Бірыңғай геофизикалық қызметінің (РҒА EGS FRC) мұрағаттарында сейсмограммалар бойынша UNE жазбаларының болуы үшін тексерілді. Табылған станциялардағы бұл жарылыстар үшін бойлық толқынның жүру уақыты (t_p) алынды. Бойлық толқындардың әртүрлі фазалары үшін тіркеу уақыттары мен жүру уақыттарының кестелері құрастырылған. Бұл материал соңғы екі онжылдықта жиналған сейсмикалық толқындардың жүру уақыты туралы деректерді толықтыру үшін Невада полигонының тіркелген UNEs жиынтық каталогының бір бөлігін жариялау болып табылады.

Түйін сөздер: ядролық жарылыс, кеңестік сейсмологиялық станциялар, тіркеу, бойлық толқын, саяхат уақыты, Невада.

**REGISTRATION OF UNDERGROUND NUCLEAR EXPLOSIONS OF THE NEVADA POLYGON
BY SEISMIC STATIONS OF THE SOVIET UNION**

К.С. Непейна¹⁾, В.А. Ан²⁾

¹⁾ Research Station RAS in Bishkek, Bishkek, Kyrgyzstan

²⁾ Sadovsky Institute of Dynamics of Geospheres of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

The paper presents information from the digitized register of underground nuclear explosions (UNE) of the Nevada test site from 1960 to 1975 stations of the United Geophysical Survey USSR (EGGN USSR), preserved in the archives of the Institute of Geosphere Dynamics of the Russian Academy of Sciences named after M.A. Sadovsky (IDG RAS). Particular attention is paid to the records of those explosions that were registered by one, two or at most three stations. Such reports were checked for the presence of UNE records on seismograms in the archives of the IDG RAS and the Geophysical Survey RAS (FRC GS RAS). For these explosions at the found stations, the travel time of the primary body wave (t_p) was obtained. Tables of registration times and travel times for various phases of body waves are compiled. This material is intended to be the publication of a part of the consolidated catalog of registered UNEs of the Nevada test site to replenish the database on the travel times of seismic waves collected over the past two decades.

Keywords: *nuclear explosion, Soviet seismological stations, primary wave, travel time, Nevada.*

СПИСОК АВТОРОВ

Ап V.A., 61
Aryngazy Ye.B., 36
Dauletkhanov Ye.D., 36
Nereina K.S., 61
Orazgaliyev N.A., 36
Sapatayev Ye.Ye., 36
Ап В.А., 71

Аскербеков С.К., 46
Гурин А.Н., 54
Копничев Ю.Ф., 17
Медведева З.В., 54
Михайлова Н.Н., 3, 24
Мукамбаев А.С., 3
Непеина К.С., 71

Нестеров Е.А., 46
Сейнасинов Н.А., 24
Соколова И.Н., 17
Солонинкина С.Г., 54
Толенова А.У., 46
Чакрова Е.Т., 54

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Статьи для публикации в журнале отправляются авторами после регистрации на веб-сайте журнала в электронном виде в формате MS WORD (.docx), а после принятия решения о публикации статьи редакцией (по окончании процесса проверки и рецензирования) – и в виде печатной копии окончательной редакции статьи с согласием авторов на публикацию и их подписями (по почте, курьером и пр. в адрес редакции).

Текст печатается на листах формата А4 (210×297 мм) с полями: сверху 30 мм; снизу 30 мм; слева 20 мм; справа 20 мм, на принтере с высоким разрешением (600–2400 dpi). Горизонтальное расположение листов не допускается.

Используйте шрифт Times New Roman высотой 10 пунктов. Пожалуйста, используйте встроенные стили заголовков (Заголовок 1, 2...) только для названия статьи и заголовков подразделов, и не используйте их для обычного текста, таблиц и подрисованных подписей.

В левом верхнем углу первой страницы должен быть указан индекс УДК. Название статьи печатается ниже заглавными буквами, в одном абзаце. После этого печатается текст краткой аннотации на языке статьи (100–3000 символов), и отдельной строкой (после фразы Ключевые слова:) – ключевые слова (5–10). Далее, со следующего абзаца – основной текст, содержащий разделы: Введение, Основную часть и Результаты (возможно, с подразделами), Заключение. После текста статьи приводится список литературы (на языках оригиналов) и блоки «название статьи, аннотация, ключевые слова» на двух оставшихся языках.

Обратите внимание, что ФИО авторов и представляемые организации в статье указывать не нужно, т.к. статьи проходят двойное «слепое» рецензирование. Эту информацию необходимо будет заполнить на трех языках (русском, казахском, английском) в форме на веб-сайте при подаче статьи. Рекомендуем заранее подготовить ее в виде отдельного документа с таблицами по образцу (см. ОБРАЗЕЦ на следующей странице) и приложить к статье.

Для текста статьи используйте одинарный межстрочный интервал, между абзацами не нужно вставлять пустые абзацы и строки.

Не используйте таблицы для расположения иллюстраций и подрисованных подписей, а также средства рисования MS Word поверх иллюстраций.

Максимально допустимый объем статьи – 10 страниц.

При написании статей необходимо придерживаться следующих требований:

- Окончательная редакция статьи, прошедшая рецензирование и допущенная к публикации, должна содержать блоки на трех языках – казахском, английском и русском, с указанием названия статьи, фамилий, имен, отчеств авторов, полного названия организаций, городов и стран местонахождения, которые они представляют, аннотации (объемом 100–3000 символов, включая знаки препинания и пробелы), и ключевых слов (5–10).
- Ссылки на литературные источники даются в тексте статьи цифрами в квадратных [...] скобках по мере упоминания. Список литературы приводится по ГОСТ 7.1-2003.
- Пожалуйста, не используйте механизм автоматической нумерации (поля) MS Word для нумерации ссылок на литературу, списков, рисунков и таблиц – используйте обычный текст;
- Иллюстрации (графики, схемы, диаграммы) должны быть выполнены на компьютере (ширина рисунка 8 или 14 см). Особое внимание обратите на надписи на рисунке – они должны быть различимы при уменьшении до указанных выше размеров. Файлы рисунков должны быть представлены отдельно в одном из растровых – .tif, .png (для схем и рисунков с надписями), .jpg (для фото) с разрешением 300 dpi (~1000 px для рисунков шириной 8 см и ~1800 px для рисунков шириной 14 см) или векторных – .svg, .wmf, .emf форматах. Названия файлов должны соответствовать положению в статье (напр. Рисунок 1-a.tif). Для надписей на рисунках предпочтительно использовать шрифт Arial Narrow или аналогичный (узкий шрифт без засечек).
- Математические формулы в тексте должны быть набраны как уравнения MS Word или формулы MathType. Следует нумеровать лишь те формулы, на которые имеются ссылки в тексте.
- Текст должен быть тщательным образом выверен и отредактирован. Бумажная версия статьи должна быть в конце подписана авторами.

К статье прилагаются следующие документы:

- 1) *Сопроводительное письмо от авторов*, в котором должны содержаться сведения о том, что статья может быть опубликована в открытой печати, ранее не была опубликована, не находится на рассмотрении на предмет публикации в других изданиях, статья не содержит информации, способной привести к конфликту интересов.
- 2) *Файлы рисунков*.

Название статьи, аннотация, ключевые слова, а также сведения обо всех авторах статьи заполняются на 3-х языках (русском, казахском, английском) в форме на сайте при подаче статьи (эту информацию также желательно приложить к статье в виде отдельного файла – см. ОБРАЗЕЦ на следующей странице).

Дополнительную актуальную информацию по оформлению, подготовке статей, авторским правам, регистрации можно получить на веб-сайте журнала в разделе **Правила для авторов** (<https://journals.nnc.kz/jour/about/submissions>).

Статьи, оформление которых не соответствует указанным требованиям, к публикации не допускаются.

ОБРАЗЕЦ

Название статьи (на русском языке)

Таблица 1. Авторы (на русском языке)

Порядковый номер автора статьи	Фамилия	Имя полностью	Отчество полностью (если имеется)	Должность	Ученая степень	Телефон (без скобок, пробелов и дефисов)	Электронная почта	Номера организаций, которые представляет автор (из таблицы 2)
1	Иванов	Иван	Иванович	доцент	PhD	+57771114455	my_mail@mail.ru	1, 2
2	Петров	Петр	Петрович	зав. лаб.	к.ф.-м.н.	+69992223366	my_mail@google.com	1

Таблица 2. Организации (на русском языке)

Порядковый номер организации	Наименование	Полный почтовый адрес (индекс, страна, город, улица, дом)	Официальный веб-сайт (если имеется)
1	Евразийский национальный университет им. Л. Н. Гумилева	010008, Республика Казахстан, г. Нур-Султан, ул. Сатпаева, 2	www.enu.kz
2	Астанинский филиал Института ядерной физики МЭ РК	010008, Республика Казахстан, г. Нур-Султан, пр. Абылай хана, 2/1	www.inp.kz

Название статьи (на казахском языке)

Таблица 1. Авторы (на казахском языке)

Мақала авторының реттік нөмірі	Тегі	Толық аты	Әкесінің толық аты (болса)	Лауазымы	Ғылыми дәрежесі	Телефоны (жақшасыз, бос орынсыз және дефиссіз)	Электрондық поштасы	Автор ұйымдарының нөмірлері (2-кестеден)
1	Иванов	Иван	Иванович	доцент	PhD	+57771114455	my_mail@mail.ru	1, 2
2	Петров	Петр	Петрович	зертхана менгерушісі	ф.-м.ғ.к.	+69992223366	my_mail@google.com	1

Таблица 2. Организации (на казахском языке)

Ұйымның реттік нөмірі	Атауы	Толық пошталық мекенжайы (индекс, ел, қала, көше, үй)	Ресми веб-сайт (болса)
1	Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті	010008, Қазақстан Республикасы, Нұр-Сұлтан қ., Сәтпаев көшесі, 2	www.enu.kz
2	ҚР ЭМ Ядролық физика институтының Астана филиалы	010008, Қазақстан Республикасы, Нұр-Сұлтан қ., Абылай хан даңғылы, 2/1	www.inp.kz

Название статьи (на английском языке)

Таблица 1. Авторы (на английском языке)

Order number of author's article	Surname	Full Name	Full Middle Name (if any)	Position	Academic degree	Telephone (free of brackets, gaps and hyphens)	E-mail	Numbers of organizations representing by author (from Table 2)
1	Ivanov	Ivan	Ivanovich	Associate professor	PhD	+57771114455	my_mail@mail.ru	1, 2
2	Petrov	Peter	Petrovich	Chief of laboratory	Cand. of Phys. and Math. Sc.	+69992223366	my_mail@google.com	1

Таблица 2. Организации (на английском языке)

Order number of organization	Title	Full post address (zip code, country, city, street, house)	Official web-site (if any)
1	L.N. Eurasian National University	010008, Republic of Kazakhstan, Nur-Sultan, Satpayev st. 2	www.enu.kz
2	Astana Branch of the Institute of Nuclear Physics ME RK	010008, Republic of Kazakhstan, Nur-Sultan, ave. Abylai Khan, 2/1	www.inp.kz

Примечание: если информация отсутствует – оставляйте соответствующие ячейки таблицы пустыми.

Ответственный секретарь к.ф.-м.н. В.А. Витюк
тел. +7 (722-51) 3-33-35, E-mail: VITYUK@NNC.KZ

Технический редактор И.Г. Перепелкин
тел. +7 (722-51) 3-33-33, E-mail: IGOR@NNC.KZ

Адрес редакции: 071100, Казахстан, г. Курчатов, ул. Бейбіт атом, 2Б
<https://journals.nnc.kz/jour>

© Редакция журнала «Вестник НЯЦ РК», 2022

Свидетельство о постановке на учет №17039-Ж от 13.04.2018 г.
Выдано Комитетом информации Министерства информации и коммуникаций Республики Казахстан

Тираж 300 экз.

Выпуск набран и отпечатан в типографии
Национального ядерного центра Республики Казахстан
071100, Казахстан, г. Курчатов, ул. Бейбіт атом, 2Б

