

ISSN 1729-7516

Вестник НЯЦ РК

ПЕРИОДИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
НАЦИОНАЛЬНОГО ЦЕНТРА РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

ВЫПУСК 2(34), ИЮНЬ 2008

Издается с января 2000 г.

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР – д.ф.-м.н. КАДЫРЖАНОВ К.К.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ: к.х.н. АРТЕМЬЕВ О.И., д.т.н. БАЙГУРИН Ж.Д.,
БЕЛЯШОВА Н.Н., к.ф.-м.н. ВОЛКОВА Т.В. к.т.н. ГИЛЬМАНОВ Д.Г.,
д.ф.-м.н. ЖОТАБАЕВ Ж.Р. – **заместитель главного редактора**,
д.г.-м.н. ЕРГАЛИЕВ Г.Х., к.б.н. КАДЫРОВА Н.Ж., к.ф.-м.н. КЕНЖИН Е.А.,
КОНОВАЛОВ В.Е., д.ф.-м.н. МИХАЙЛОВА Н.Н., д.т.н. МУКУШЕВА М.К., д.т.н. УМАНЕЦ В.Н.
д.б.н. ПАНИН М.С., к.г.-м.н. ПОДГОРНАЯ Л.Е., к.ф.-м.н. СОЛОДУХИН В.П. д.ф.-м.н. ТАКИБАЕВ Ж.С.

ҚР ҰЯО Жаршысы

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҰЛТТЫҚ ЯДРОЛЫҚ ОРТАЛЫҒЫНЫҢ
МЕРЗІМДІК ҒЫЛЫМИ-ТЕХНИКАЛЫҚ ЖУРНАЛЫ

2(34) ШЫҒАРЫМ, МАУСЫМ, 2008 ЖЫЛ

NNC RK Bulletin

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

ISSUE 2(34), JUNE 2008

Сообщаем Вам, что периодический научно-технический журнал "Вестник НЯЦ РК", решением Комитета по надзору и аттестации в сфере науки и образования включен в перечень изданий, рекомендованных для публикации материалов кандидатских и докторских диссертаций по физико-математическим наукам. В настоящее время редакция располагает возможностью быстрой публикации статей.

СОДЕРЖАНИЕ

ВМЕСТЕ С ОРГАНИЗАЦИЕЙ ПО ДОГОВОРУ О ВСЕОБЪЕМЛЮЩЕМ ЗАПРЕЩЕНИИ ЯДЕРНЫХ ИСПЫТАНИЙ В ПОДДЕРЖКУ БЕЗЪЯДЕРНОГО МИРА: 12 ЛЕТ СОТРУДНИЧЕСТВА.....	5
Беляшова Н.Н., Михайловыа Н.Н.	
КАЗАХСТАНСКО-АМЕРИКАНСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В ПОДДЕРЖКУ ЯДЕРНОГО НЕРАСПРОСТРАНЕНИЯ: ДЕСЯТИЛЕТНИЙ ОПЫТ	16
Беляшова Н.Н., Михайлова Н.Н.	
ANALYSIS OF DIGITAL SEISMOGRAMS FROM NUCLEAR EXPLOSIONS ACROSS FORTY YEARS.....	21
P.G. Richards, W.-Y. Kim	
РЕГИСТРАЦИЯ ПОДЗЕМНОГО ЯДЕРНОГО ВЗРЫВА В СЕВЕРНОЙ КОРЕЕ 9 ОКТЯБРЯ 2006 ГОДА ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ СЛУЖБОЙ РАН.....	27
Старовойт О.Е., Габсатарова И.П., Коломиец М.В.	
ИНФОРМАТИВНОСТЬ КАК МЕРА ОЦЕНИВАНИЯ МЕЖДУНАРОДНОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА И ЕЕ НАЦИОНАЛЬНЫХ СЕГМЕНТОВ	33
Эльтеков А.Ю., Хохлов Ю.П., Липатов А.В.	
SEISMIC AND INFRASONIC MONITORING OF THE EUROPEAN ARCTIC	41
F. Ringdal, T. Kværna, S.J. Gibbons, S. Mykkeltveit, J. Schweitzer	
РЕЗУЛЬТАТЫ ИНФРАЗВУКОВОГО МОНИТОРИНГА В г. ТОМСКЕ	47
Соловьев А.В., Колесник А.Г.	
К ВОПРОСУ РЕГИСТРАЦИИ ХИМИЧЕСКИХ ВЗРЫВОВ ИНФРАЗВУКОВЫМ МЕТОДОМ ОБНАРУЖЕНИЯ	54
Васильев А.П.	
ИНФРАЗВУКОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ПРИ ЗАПУСКАХ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА ЗДОРОВЬЕ НАСЕЛЕНИЯ.....	60
Краснов В.М., Дробжева Я.В., Пак Г.Д., Салихов Н.М., Козловский В.А., Мухамеджанов Э.К., Маханов Д.И., Лазуркина В.Б.	
АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ПРОЦЕДУРА ПОТОЧНОГО ОБНАРУЖЕНИЯ И ИДЕНТИФИКАЦИИ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ	70
Авровров С.А., Хайретдинов М.С.	
ВАРИАЦИИ ВРЕМЕНИ ПРОБЕГА ПРОДОЛЬНОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ В КАЛЕНДАРНОМ ВРЕМЕНИ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ НА ТЕРРИТОРИИ СЕВЕРНОЙ АМЕРИКИ	76
Ан В.А., Годунова Л.Д., Каазик П.Б.	
СЕЙСМИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ СТАНЦИЙ НЯЦ РК ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ СЕЙСМОБЕЗОПАСНОСТИ КАЗАХСТАНА.....	79
Михайлова Н.Н.	
МОНИТОРИНГ АФТЕРШОКОВЫХ ПРОЦЕССОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ ОДВЗЯИ НА ПРИМЕРЕ КУРИЛЬСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ 15.11.2006 и 13.01.2007.....	85
Старовойт О.Е., Коломиец М.В.	
МОНИТОРИНГ ДИЛАТАНСКИХ ЗОН ВИБРОСЕЙСМИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ	90
Алексеев А.С., Глинский Б.М., Ковалевский В.В., Хайретдинов М.С.	

АНАЛИЗ СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛНОВЫХ ПОЛЕЙ В ТРЕЩИНОВАТЫХ И ФЛЮИДОНАСЫЩЕННЫХ СРЕДАХ	99
Хайретдинов М.С., Воскобойникова Г.М., Седухина Г.Ф.	
ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ РАДИАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА ТЕРРИТОРИИ СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА	106
Поляков Л.Е., Кругликов Д.А.	
МИКРОСТРУКТУРА И МИКРОТВЕРДОСТЬ МНОГОСЛОЙНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТАЛИ 30ХГСА.....	110
Скаков М.К., Увалиев Б.К., Чинахов Д.А., Градобоев А.В.	
МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ И ЯДЕРНОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЖИДКОМ ТОПЛИВЕ ГОМОГЕННОГО РЕАКТОРА	115
Потребеников Г.К., Павлова Н.Н., Лотов А.Б.	
ПЭМ-ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ МИКРОСТРУКТУРЫ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ.....	121
Цай К.В., Турубарова Л.Г., Щербинина Н.В.	
СТРУКТУРНОЕ СОСТОЯНИЕ И РАДИАЦИОННОЕ УПРОЧНЕНИЕ СТАЛИ 08Х16Н11М3 - МАТЕРИАЛА ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕЙ СБОРКИ РЕАКТОРА БН-350	127
Цай К.В., Максимкин О.П., Турубарова Л.Г., Сильнягина Н.С., Щербинина Н.В.	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ АЛЬФА-ИЗЛУЧЕНИЯ УРАНА И ТОРИЯ В МАТЕРИАЛАХ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ	133
Грищенко В.Ф., Степанов В.М.	

УДК 550.34:621.039.9

**ВМЕСТЕ С ОРГАНИЗАЦИЕЙ ПО ДОГОВОРУ О ВСЕОБЪЕМЛЮЩЕМ ЗАПРЕЩЕНИИ
ЯДЕРНЫХ ИСПЫТАНИЙ В ПОДДЕРЖКУ БЕЗЪЯДЕРНОГО МИРА: 12 ЛЕТ СОТРУДНИЧЕСТВА****Беляшова Н.Н., Михайлова Н.Н.***Институт геофизических исследований НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан*

Дается обзор сотрудничества Казахстана с Организацией по Договору о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (ОДВЗЯИ) за двенадцатилетний период после подписания Договора.

ВВЕДЕНИЕ

6 декабря 2007 г. Генеральная Ассамблея ООН одобрила резолюцию "Сотрудничество между ООН и Подготовительной комиссией Организации по Договору о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний". Договор о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (ДВЗЯИ) был заключен и открыт для подписания в 1996 г. Несмотря на то, что Договор не вступил в силу, его Секретариат, Подготовительная комиссия разрабатывают механизмы контроля за ядерными испытаниями. Резолюция Генеральной Ассамблеи ООН продемонстрировала поддержку Подготовительной комиссии со стороны ООН и предложила сохранить вопрос об универсализации Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний в повестке дня Генеральной Ассамблеи ООН.

На сегодняшний день ДВЗЯИ подписали 178 государств и 144 государства ратифицировали его. Для вступления Договора в силу необходимо, чтобы его ратифицировали 44 страны, обладающие ядерным потенциалом (пока это сделали 34 страны). Из этого списка Договор до сих пор не ратифицировали Китай, США, Египет, Израиль, Индонезия, Индия, Иран, Колумбия, Пакистан и КНДР.

Казахстан принял решение отказаться от своего ядерного арсенала и получил поддержку и заверения о безопасности от пяти постоянных членов Совета Безопасности ООН. 30 сентября 1996 г. Премьер-Министр Республики Казахстан К. Токаев подписал Договор о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний. Законом Республики Казахстан *№ 270-III* от 14 декабря 2001 г. Договор ратифицирован и вступил в силу для Казахстана 14 мая 2002 г. Основываясь на ДВЗЯИ, 9 сентября 2004 г. подписано, а 12 апреля 2007 г. Законом Республики Казахстан ратифицировано также Соглашение между Правительством Республики Казахстан и Временным Техническим Секретариатом (ВТС) Подготовительной Комиссии (ПК) Организации «О проведении мероприятий, включая постсертификационные мероприятия, на объектах по международному мониторингу в поддержку Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний».

Таким образом, Казахстан в своей деятельности в поддержку статуса безъядерной державы опирается на основные ратифицированные документы, позволяющие регулировать отношения между Прави-

тельством Республики Казахстан и Подготовительной Комиссией Организации Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний

Деятельность Казахстана в течение 1996-2008 гг. в поддержку международной ядерной безопасности проводилась по 5 основным направлениям:

1. Организационные мероприятия
2. Создание и эксплуатация системы мониторинга в составе Международной системы мониторинга (МСМ) ВТС ОДВЗЯИ.
3. Создание казахстанского центра данных (КНДС) и сотрудничество с Международным центром данных (МЦД).
4. Проведение полевых экспериментов по Инспекции на месте (ИНМ).
5. Участие и проведение Международных конференций, семинаров по проблемам контроля за ядерными испытаниями.
6. Участие в совместных научных проектах.
7. Проведение обучающих курсов в Казахстане и обучение казахстанских специалистов на международных курсах по мониторингу ядерных испытаний.

1. ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ

В систематической практической работе участвовали официальные представители Республики Казахстан при Подготовительной комиссии ОДВЗЯИ – Послы РК в Австрийской Республике, Советники Посольства РК в Австрийской Республике, технический эксперт - директор Института геофизических исследований НЯЦ РК, получившие Сертификат полномочий от Министерства иностранных дел РК 03.07.1997 г. С участием сотрудников министерств и ведомств разработаны документы, обеспечившие ратификацию Казахстаном ДВЗЯИ и Соглашения с ПК ОДВЗЯИ.

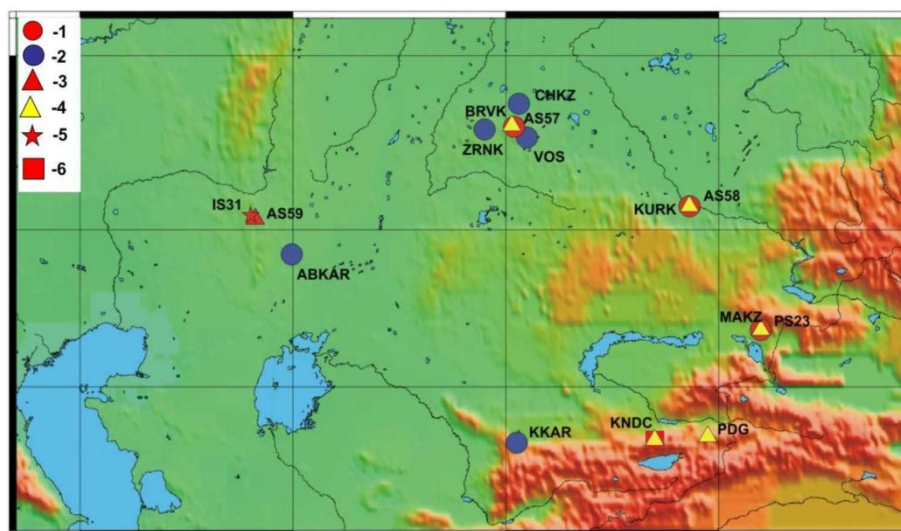
Уполномоченный представитель от Казахстана - эксперт рабочей группы Б Беляшова Н.Н. участвовала в сессиях Рабочей Группы Б, начиная со 2 по 27.

**2. СОЗДАНИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ СИСТЕМЫ
МОНИТОРИНГА В СОСТАВЕ МЕЖДУНАРОДНОЙ
СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ВТС ДВЗЯИ**

В приложении 1 к Протоколу подписанного ДВЗЯИ [1] предусмотрено создание в Казахстане пяти станций Системы международного мониторинга (МСМ) – таблица 1.

*Таблица 1. Фрагменты таблиц из Приложения 1 Протокола к Договору
о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний. 1996 г.*

№	Государство, ответственное за станцию	Местоположение	Широта	Долгота	Тип
Таблица 1А. Перечень сейсмологических станций, составляющих первичную сеть					
23	Казахстан	МАК - Маканчи	46.8 с.ш.	82.0 в.д.	сейсмогруппа
Таблица 1В. Перечень сейсмологических станций, составляющих вспомогательную сеть					
57	Казахстан	БРVK - Боровое	53.1 с.ш.	70.3 в.д.	3 –х компонентная
58	Казахстан	КУRK - Курчатов	50.7 с.ш.	78.6 в.д.	сейсмогруппа
59	Казахстан	АКТО - Актюбинск	50.4 с.ш.	58.0 в.д.	сейсмогруппа
Таблица 4. Перечень инфразвуковых станций					
31	Казахстан	Актюбинск	50.4 с.ш.	58.0 в.д.	группа



1 – сейсмическая группа MCM; 2 – другие сейсмические группы; 3- трехкомпонентная сейсмическая станция MCM;
4 – другие трехкомпонентные станции; 5 - инфразвуковая станция MCM; 6 - казахстанский центр данных (KNDC), интегрированный в MCM

Рисунок 1. Станции Международной системы мониторинга, созданные на территории Казахстана [2-4]

В полном соответствии с этим Протоколом в течение 1999 – 2007 гг. в Казахстане создано пять станций: 4 сейсмических (из 170 станций Международной Системы Мониторинга) и одна инфразвуковая (из 60 станций Международной Системы Мониторинга) – рисунок 1.

Сейсмическая группа PS23-Маканчи, предусмотренная в составе первичной сети MCM, была одной из наиболее «трудных», особенно потом, что строилась первой. Ее создание проходило при участии трех сторон: ВТС ПК ОДВЗЯИ, АФТАС и НЯЦ РК. 16 июня 1999 г. был заключен Контракт между ВТС ПК Организации ДВЗЯИ и НЯЦ РК. 28 июня 1999 г. полевые отряды прибыли на участок для проведения работ. В августе 1999 г. были построены подъездные пути и ЛЭП-10 и 0,4 кВ. В сентябре месяце заложен фундамент будущих зданий, пробурены и оборудованы приборные скважины, построены антенные мачты. После завершения основного объема полевых работ в октябре 1999 г., АФТАС начал монтаж сейсмологического оборудования параллельно с монтажом сборных зданий. Установка оборудования, приостановленная из-за погодных условий, бы-

ла возобновлена в мае 2000 г. В июне 2000 г. полная конфигурация станции была подготовлена к тестированию. Сейсмические сигналы начали поступать на центральный пункт регистрации PS23 - Маканчи и в Центр сбора и обработки данных в Алматы. Основная особенность строительства PS23 - Маканчи определялась тем, что Проект станции был разработан по американским стандартам. Казахская версия Проекта отсутствовала, что создало ряд трудностей при согласовании Проекта, при получении необходимых разрешений и проведении проверок контролирующими органами. В последующем этот опыт был учтен. Одновременно разрабатывались две версии Проекта, включая казахскую.

Конфигурация сейсмической группы PS23 – Маканчи включает 10 пунктов наблюдения, расположенных в виде двух концентрических окружностей («ожерелий») с апертурой 4 км [2], оснащенных двумя широкополосными трехкомпонентными сейсмометрами: KS 54000 (скважинный), GS13 (наземные), - и девятью скважинными однокомпонентными вертикальными короткопериодными сейсмометрами GS21(Teledin Geotech, США)- рисунок 2.



KS 54000



GS21



GS13

Рисунок 2. Станция PS23 – Маканчи. Установка и вид сейсмоприемников

Сеть коммуникаций, включающая спутниковые каналы связи, обеспечила возможность впервые в Казахстане вести автоматизированный сбор данных с пунктов наблюдения в режиме реального времени и передачу их сначала на пункт регистрации в Маканчи, а затем в Центр сбора и обработки данных в г. Алматы и Международный центр данных (рисунок 3).

Станция прошла тестирование и оценку. 30 января 2002 г. Аттестационная группа ВТС ПК официально подтвердила статус PS23 – Маканчи как сейсмической группы первичной сети MCM.

Сейсмическая группа AS057-Боровое (рисунок 4) состоит из 10 элементов. Пункты наблюдения оснащены короткопериодными однокомпонентными (вертикальными) сейсмометрами GS21 и широкополосным трехкомпонентным сейсмометром CMG-3TB (Guralp, Англия). Комплекс AS057-Боровое введен в эксплуатацию 15 июля 2002 г. Система прошла сертификацию в декабре 2002 г. С этого времени сейсмическая группа BVAR (AS057) включена в состав сети вспомогательных станций системы международного сейсмического мониторинга, но имеет статус запасной станции основной сети.

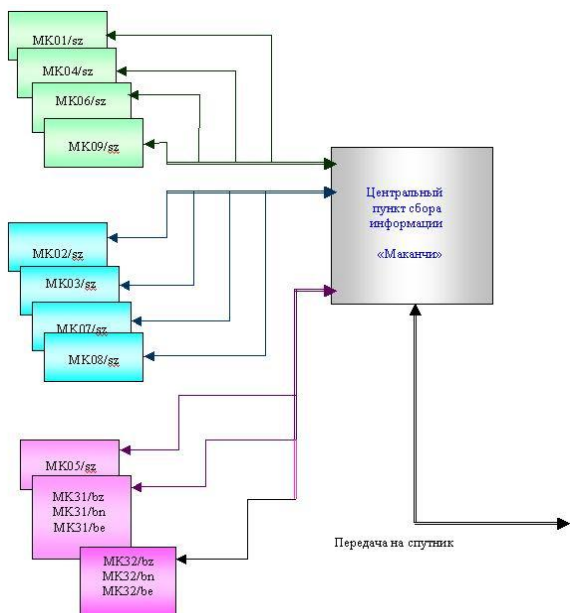


Рисунок 3. Станция PS23 – Маканчи. Структурная схема сбора и передачи данных мониторинга

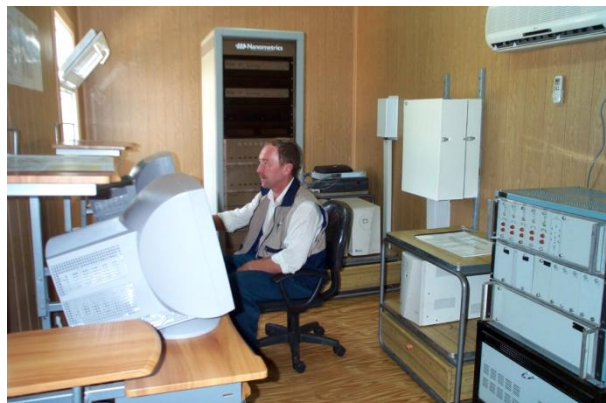


Рисунок 4. Станция AS057-Боровое: техническое здание и центральный пункт

Сейсмическая трехкомпонентная станция AS059-Актюбинск (рисунок 5) развернута в том же приборном сооружении, где в советское время была установлена станция АКТО. Однако датчик старой станции AKTO находился на поверхности, а у новой станции AS05-Актюбинск, широкополосный трехкомпонентный сейсмометр CMG-3TB установлен в скважине, что позволило значительно уменьшить уровень шума. Установлена также регистрирующая аппаратура Еуропа - Т (Nanometrics, Канада). С 2005 г. данные станции по спутниковым каналам поступают в Международный центр данных в Вену и национальный центр в г. Алматы. После завершения тестирования 10 ноября 2005 г. Аттестационная группа ВТС ПК сертифицировала AS059- Актюбинск как станцию вспомогательной сети Международной системы мониторинга.

Сейсмическая группа AS058 – Курчатова (рисунок 6) открыта на месте созданной в советское вре-

мя сейсмической группы "Крест". Группа представляет собой два линейных 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. Новое оборудование установлено в тех же приборных сооружениях, что и в старой системе. В пунктах 1 – 20 (рисунок 6б) установлены одноконтактные сейсмометры CMG - 3V, на пункте 21 - трехкомпонентный сейсмометр CMG -3TB. Станция регистрации - Еуропа - Т (Nanometrics, Канада). С 26 июля 2006 г. станция начала работать в тестовом режиме. 18 декабря 2006 г. Аттестационная группа ВТС ПК сертифицировала сейсмическую группу в качестве станции вспомогательной сети Международной системы мониторинга.



Рисунок 5. Станция AS059-Актюбинск: приборное сооружение (слева - оголовок скважины, в которой установлен сейсμοприемник, справа - электронная часть оборудования); монтаж антенны



Рисунок 6. Станция AS058- Курчатов: техническое здание конфигурация сейсмической группы

Инфразвуковая группа IS31-Актюбинск (рисунок 7) представляет собой треугольник со стороной около 2 км, образованный низкочастотными элементами L2 - L4, с центральной точкой L1, окруженной дополнительной высокочастотной группой (H1-H4), выполненной в виде квадрата со стороной около 200 м. Станция оснащена микробарометрами MB2000, подключенными к системам подавления ветровых помех (высокочастотным и низкочастотным). Строительство инфразвуковой группы и установка оборудования проводились совместно СТВТО и ИГИ НЯЦ РК и были закончены в 2001 г. В течение 2001 - 2002 гг. инфразвуковая группа Актюбинск работала в режиме тестирования. Информация, получаемая станцией, передается в режиме реального времени в МЦД, г. Вена, а оттуда, также в

режиме реального времени, - в Центр Данных ИГИ НЯЦ РК, г. Алматы. 24 ноября 2004 г. станция была сертифицирована комиссией Международной системы мониторинга ВТС ОДВЗЯИ.

Казахстанские специалисты ИГИ НЯЦ РК принимали участие не только в работах по созданию станций, но и в подготовительных работах по выбору площадок под станции, выполняя комплекс геологических, инженерно- геологических, сейсмических исследований [5, 6]. В целом в результате работ по программам для МСМ Казахстан стал обладателем одной из лучших национальных систем ядерного мониторинга среди стран СНГ, с современным оборудованием, системами связи и программным обеспечением, соответствующими техническим требованиям МСМ ОДВЗЯИ.



Рисунок 7. Станция IS31-Актюбинск: конфигурация элементов инфразвуковой группы, центральный пункт

3. СОЗДАНИЕ КАЗАХСТАНСКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО ЦЕНТРА ДАННЫХ (KNDC) И СОТРУДНИЧЕСТВО С МЕЖДУНАРОДНЫМ ЦЕНТРОМ ДАННЫХ (МЦД) [7]

В 1999 г. в г. Алматы создан Центр сбора и обработки специальной сейсмической информации, выполняющий функции казахстанского национального центра данных (KNDC) в системе мониторинга ОДВЗЯИ. Центр был оснащен современным оборудованием и программным обеспечением при поддержке ряда зарубежных и международных организаций, в том числе НОРСАР, МЦД, AFTAC, IRIS, LDEO, CEA/DASE. Сеть коммуникаций, включающая спутниковые каналы связи, обеспечила возможность впервые в Казахстане не только вести автоматизированный сбор данных со станций мониторинга в режиме реального времени, но и автоматизированную и интерактивную обработку поступающих данных, а также их обмен с международными и национальными центрами данных. KNDC работает в постоянном контакте с МСМ и МЦД. В казахстанском центре разработаны автоматизированные технологии контроля за поступающими данными, благодаря которым оперативно выявляются проблемы в процессе сбора и передачи данных, которые по возможности также оперативно устраняются. Составляются проблемные и ежемесячные отчеты по всем казахстанским станциям МСМ, предоставляемые в МСМ.

Созданы базы исходных сейсмических записей, начиная с 1994 г., а также ряд тематических баз данных (ядерных взрывов на СИП, калибровочных взрывов и др.). По разработанной в Центре данных технологии впервые для Средней Азии в систематизированном виде ведется подготовка сейсмологического бюллетеня региональных событий, ежегодно числом до 12 000 [8]. В МЦД данные казахстанских станций участвуют в создании сейсмологических продуктов после совместной обработки с данными других стан-

ций мира. В результате в МЦД формируются бюллетени различной степени оперативности, которые автоматически поступают в KNDC (SEL1, SEL3, REB), где анализируются для слежения за сейсмической ситуацией. Имеется возможность доступа к другим данным МЦД, а также к получению записей других станций МСМ. KNDC принимает участие в различных тестах, проводимых МСМ и МЦД. Специалисты центра данных регулярно участвуют в проводимых Международным центром воркшопах по оценке результатов работ с представлением своих презентаций [9,10] (рисунок 8).

Сотрудничество национального и международного центров является чрезвычайно важным, полезным и взаимовыгодным. Казахстан получил возможность работать с самым современным программным обеспечением, по новейшим технологиям обработки данных, возможность общения с ведущими специалистами (рисунок 9).

В составе глобальной системы наблюдений ведется обнаружение и локализация не только ядерных испытаний, но и многочисленных природных и техногенных землетрясений на всем земном шаре, данные о которых необходимы Казахстану. Налажен обмен данными не только с Международным центром данных (г. Вена), но и с Американским центром данных (Флорида); Центром данных IRIS (США); с Европейским Средиземноморским центром (Франция), с Центром данных Геофизической службы России (г. Обнинск), с Международным сейсмологическим центром (Англия). Достижением созданной системы стала успешная регистрация ядерного испытания, произведенного 9 октября 2006 г. в Северной Корее.

Хронологию создания казахстанского сегмента Международной системы мониторинга ядерных испытаний можно представить нижеследующей таблицей (таблица 2).



Рисунок 8. Участие в ежегодных NDC Evaluation Workshop, организуемых МЦД ОДВЗЯИ. Рим, 2005 г.



а – директором Международного центра данных ОДВЗЯИ доктором Зербо Лосина, 2006



б – специалистами Международного центра данных ОДВЗЯИ, 2007 г.

Рисунок. 9. Посещение центра данных (KNDC)

Таблица 2. Хронология создания казахстанского сектора Международной системы мониторинга

Годы	События
1996	Подписание Казахстаном Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (ДВЗЯИ), согласно которому на территории Казахстана запланировано создание 5 объектов Международной системы мониторинга (MCM).
1999	Открытие в г. Алматы Центра сбора и обработки специальной сейсмической информации.
1999 – 2000	Строительство и ввод в эксплуатацию сейсмической группы первичной сети MCM - PS23-Маканчи, MKAR (станция сертифицирована 30 января 2002 г.).
2001 – 2002	Строительство и ввод в эксплуатацию сейсмической группы, запасной к первичной сети MCM - AS057-Боровое, BVAR (станция сертифицирована в декабре 2002 г.).
2001	Строительство и ввод в эксплуатацию инфразвуковой станции – IS31-Актюбинск (станция сертифицирована в ноябре 2004 г.) [11].
2002 – 2004	Строительство и ввод в эксплуатацию 3-х компонентной сейсмической станции вспомогательной сети MCM AS059-Актюбинск, AKTO (станция сертифицирована в ноябре 2005 г.).
2006	Строительство и ввод в эксплуатацию сейсмической группы вспомогательной сети MCM - AS058-Курчатов, KURK (станция сертифицирована в ноябре 2006 г., но требуется завершение ее модернизации).

4. ПРОВЕДЕНИЕ ПОЛЕВЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ИНСПЕКЦИИ НА МЕСТЕ

Режим контроля, учрежденный ДВЗЯИ, кроме Международной системы мониторинга, содержит другую важную составную часть – Инспекцию на месте. Согласно статьи D.35 ДВЗЯИ, «...единственная цель Инспекции на месте состоит в прояснении того, действительно ли в нарушении статьи I был произведен испытательный взрыв, и, насколько это возможно, в сборе любых фактов, которые могли бы помочь в идентификации любого возможного нарушителя...». Инспектируемые и inspectирующие государства, в соответствии с ДВЗЯИ, обязаны сотрудничать с ОДВЗЯИ в совершенствовании и в изучении потенциальных возможностей основных и дополнительных технологий для повышения их ответственности и эффективности с точки зрения затрат времени и средств.

С целью развития технологий Инспекции на месте ОДВЗЯИ проводит полевые учения и обучение инспекторов. По приглашению Республики Казахстан полевые эксперименты по Инспекции на месте (ИНМ) уже трижды проводились на территории Семипалатинского испытательного полигона: в 1999, в 2002 г. и в 2005 г. Цель экспериментов - отработка направленных поисковых действий, разработанных ВТС. Казахстан обеспечивал не только организаци-

онную сторону экспериментов, но и геофизическое, радиологическое и другое сопровождение.

С 1 по 11 октября 1999 г. во время подготовки калибровочного эксперимента «Омега-1» в пределах горного массива Дегелен проведены первые полевые учения ИНМ. Инспекционная группа в составе 12 человек из 7 стран и ВТС ОДВЗЯИ определяла местоположение взрыва с применением визуального, радиоэкологического и сейсмического обследования. В реальных условиях Семипалатинского испытательного полигона были опробованы методики, предложенные ВТС ОДВЗЯИ и подтверждена возможность международного сотрудничества.

В период с 25 сентября по 10 октября 2002 г. состоялись первые в истории ОДВЗЯИ широкомасштабные полевые учения ПЭ02 на Семипалатинском испытательном полигоне, проходившие в течение месяца. Казахстан исполнил роль страны, производшей несанкционированный ядерный взрыв. Инспекционная группа в составе 42 человек из 24 стран и ВТС ОДВЗЯИ провела работы для обнаружения места 12,5-тонного химического взрыва, последствия которого были замаскированы принимающей стороной. По условиям эксперимента Казахстан должен был сделать все возможное, чтобы взрыв не был обнаружен. Несмотря на использование международными инспекторами широкого спектра методов инспекции

- геофизических, радионуклидных, визуальных, облетов и др. (рисунок 10), - место взрыва обнаружено не было. Это говорит о большой важности обучения инспекторов в реальных условиях.

С 12 по 28 июля 2005 г. на участке Балапан проведены направленные учения по Инспекции на месте - ОТ05. Инспекционная группа в составе 31 специалиста из 13 стран-подписантов ДВЗЯИ и 4 представителей ВТС ОДВЗЯИ отработали методики облетов и наземные радионуклидные методы.



Рисунок 10. Во время широкомасштабных полевых учений ПЭО2 на Семипалатинском испытательном полигоне. 2002 г.

Ведется подготовка к проведению в сентябре 2008 года в Казахстане интегрированного полевого эксперимента (ИПЭ), который явится самым значительным событием в истории ОДВЗЯИ. После Северокорейского взрыва в огромной степени возрос интерес международного сообщества к развитию методов Инспекции на Месте. Страны подписанты надеются, что успешное проведение эксперимента подтолкнет страны, не подписавшие пока ДВЗЯИ, к подписанию Договора. Во время эксперимента планируется опробовать на практике все аспекты ИНМ – процедуры в точке въезда, разворачивание инспекционного лагеря, проведение наблюдений различными методами, и т.д. В эксперименте примут участие 80 представителей из более чем 30 стран, которые будут включать в себя 40 инспекторов, команду оценщиков, команду, играющую роль инспектируемого государства, контрольную команду. Кроме того, на эксперимент прибудут 15 наблюдателей из разных стран. Со стороны Казахстана в ИПЭ также будет задействовано не менее 90 человек.

Исполнение Казахстаном роли инспектируемого государства, сотрудничество в развитии методов ИНМ во время учений, проведение специальных исследований по изучению феноменологии подземных ядерных взрывов для задач Инспекции на месте в рамках национальных программ позволило получить существенный опыт, который будет использован при проведении следующих полевых учений, планируемых в 2008 г.

Перечисленные полевые эксперименты были организованы Казахстаном. Однако представители Казахстана участвовали в экспериментах, проводимых другими странами: в Словакии в 2000 и 2001 гг., в Австрии в 2004 г. Несколько представителей Казахстана прошли обучение на начальных (Вена) и продвинутых (Россия) курсах по ИНМ, а также участвовали в 5-ти из десяти семинаров, проводимых в разных странах, с 8-ю докладами.



5. УЧАСТИЕ И ПРОВЕДЕНИЕ МЕЖДУНАРОДНЫХ КОНФЕРЕНЦИЙ, СЕМИНАРОВ ПО ПРОБЛЕМАМ КОНТРОЛЯ ЗА ЯДЕРНЫМИ ИСПЫТАНИЯМИ

Министерство энергетики и минеральных ресурсов РК, Национальный ядерный центр РК, Институт геофизических исследований НЯЦ РК организуют и проводят на базе Геофизической обсерватории «Боровое» международную конференцию по проблемам мониторинга ядерных испытаний и их последствий в поддержку ДВЗЯИ. Проведены 4 конференции (2000, 2002, 2004, 2006 гг.), одна из которых была приурочена к 40-летию создания в Казахстане обсерватории дальнего геофизического обнаружения ядерных взрывов - Боровое (2000 г.), другая - к 10-летию подписания Казахстаном ДВЗЯИ и 10-летию сотрудничества Казахстана с Подготовительной комиссией Организации ДВЗЯИ (2006 г.). В работе этой, IV Международной конференции, приняли участие ученые и специалисты 13 стран и ОДВЗЯИ, представляющие 46 организаций. Среди организаций-участниц, кроме ОДВЗЯИ, - Агентство прикладных технологий воздушных сил США, Комиссариат по атомной энергетике Франции, Норвежский центр НОРСАР, Институт динамики геосфер РАН, Институт физики земли РАН, Служба спецконтроля Российской Федерации, Геофизическая служба Российской Академии Наук, Институт геофизики Уральского отделения РАН, Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения РАН, Институт сейсмологии МОН РК, Институт ионосферы МОН РК, Институт сейсмологии АН Узбекистана, Научно-исследовательский институт сейсмологии Туркменистана, Сейсмологическая опытно-методиче-

ская экспедиция МОН РК, Опытно-методическая сейсмологическая экспедиция Национальной Академии наук Кыргызской Республики, Атомное агентство Пакистана, Казахский национальный технический университет и другие. 2008 г. – год проведения очередной V международной конференции.

6. УЧАСТИЕ В СОВМЕСТНЫХ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ПРОЕКТАХ

Казахстанские специалисты участвуют в научно-технических работах разных направлений по тематике, поддерживающей ОДВЗЯИ. Среди них есть работы, инициируемые МЦД или МСМ, но есть и те, которые инициированы сотрудниками Института геофизических исследований НЯЦ РК. Кроме совместных работ по исследованию сейсмических шумов и сигналов при выборе площадок под сейсмические станции, проводятся работы по исследованию моделей шума и их использованию для оперативного мониторинга технического состояния [12 и др.]. В рамках масштабных работ по калибровке локализации, проводимой МЦД, проведен анализ сейсмических данных регистрации серии химических взрывов на бывшем Семипалатинском испытательном полигоне (1997 – 2000 гг.) и создана региональная скоростная модель Центрального Казахстана. Результаты докладывались на нескольких семинарах, проводимых ОДВЗЯИ в Осло, Норвегия, в Москве, Россия и опубликованы [13,14]. Эти сильные химические взрывы были использованы также для калибровки существующей в то время Международной системы мониторинга.

Несколько специальных совместных работ сотрудников KNDC и МСМ посвящено усовершенствованию систем наблюдений на станциях МСМ Казахстана, которые представляют интерес и для других подобных станций в других районах мира. Так, например, в работах [15,16] предлагается новый способ динамической калибровки инфразвуковых станций. В [17] описана предложенная и уже внедренная на станции МСМ AS057 – Боровое защита

системы питания аппаратуры от ударов молнии, из-за которых происходит выход из строя дорогостоящего оборудования станций. Внедрение предложенной системы защиты убедительно показало ее эффективность, а приобретенный опыт на станции AS057 – Боровое использован на других станциях, в том числе, в России и Индонезии.

Интересным и перспективным видом научного сотрудничества можно считать проведенный в 2007 г. полевой эксперимент, организованный ИГИ НЯЦ РК и CEA/DASE (Франция) при поддержке ВТС ОДВЗЯИ. Целью эксперимента являлась проверка гипотезы, высказанной сотрудниками казахстанского центра данных, о природе мощного постоянно действующего источника инфразвуковых сигналов, регистрируемых станцией IS31 – Актюбинск. Осенью 2007 г. на площадке сейсмической группы Акбулак была установлена предоставленная французскими коллегами дополнительная полевая 4-элементная инфразвуковая группа. Благодаря совместной обработке данных двух инфразвуковых групп, получены интересные результаты, как с точки зрения подтверждения гипотезы, так и для решения других задач классификации и распознавания источников инфразвуковых сигналов. Потенциал сотрудничества в области совместных научных исследований далеко не исчерпан. Надеемся, что в будущем оно будет успешно развиваться.

7. ПРОВЕДЕНИЕ ОБУЧАЮЩИХ КУРСОВ В КАЗАХСТАНЕ И ОБУЧЕНИЕ КАЗАХСТАНСКИХ СПЕЦИАЛИСТОВ НА МЕЖДУНАРОДНЫХ КУРСАХ ПО МОНИТОРИНГУ ЯДЕРНЫХ ИСПЫТАНИЙ

В 1998 г. на базе Института геофизических исследований Национального ядерного центра РК под руководством ВТС проведены вводные курсы МСМ для специалистов 13 стран Центральной Азии и Ближнего Востока по обучению технологиям мониторинга ядерных взрывов (сейсмического, радионуклидного, гидроакустического, инфразвукового) – рисунок 11.



Рисунок 11. Участники вводных курсов МСМ в Курчатове. 1998 г.

В 1998 - 2008 гг. почти 30 казахстанских специалистов прошли стажировки и обучение на курсах МСМ, МЦД, ИНМ, организованных ВТС ПК в Австрии, Казахстане, Германии, Японии, Франции, России, Норвегии, США, Китае.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Казахстан получил бесценный опыт строительства и эксплуатации станций международного мониторинга – сейсмических и инфразвуковых, - имеет подготовленные кадры технических специалистов и исследователей для ведения мониторинга ядерных испытаний и проведения Инспекции на месте. Благодаря этому Казахстан успешно выполняет свои основные обязательства по ДВЗЯИ. Так, в 2006 г. казахстанские станции зарегистрировали ядерный взрыв в Северной Корее, еще ранее - ядерные взрывы в Индии и Пакистане и предоставили полученные данные в ОДВЗЯИ. Обеспечен систематический контроль за известными незакрытыми ядерными полигонами в Азии. Получаемые данные ежесуточно передаются в Международный и Национальные центры данных, а в Казахстане – еще и в сейсмологические организации МОН РК и МЧС РК.

Станции позволяют контролировать районы возможных техногенных землетрясений – район активной добычи углеводородов в Прикаспии, территорию бывшего Семипалатинского испытательного ядерного полигона и др. Данные новых станций убедительно показали необходимость пересмотра карты сейсмического районирования Казахстана, являющейся составной частью действующих строительных норм и правил.

ЛИТЕРАТУРА

1. Договор о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (ДВЗЯИ: текст об учреждении Подготовительной комиссии Организации Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний. – 1998. – Вена: Подготовительная комиссия ДВЗЯИ. – 165 с.
2. Беляшова, Н.Н. Сейсмологическая сеть Национального ядерного центра Республики Казахстан как составная часть Международной системы мониторинга ядерных испытаний / Н.Н. Беляшова, М.Н. Малахова // Геофизика и проблемы нераспространения: Вестник НЯЦ РК, 2000. – Вып. 2. – С. 13 - 16.
3. Belyashova, N. N., Political, legal and technical capabilities for development of international cooperation in Kazakhstan under CTBT / N. N. Belyashova, N. N. Mikhailova //Межрегиональный симпозиум по международному содействию ДВЗЯИ и национальным процедурам внедрения/ратификации. Стамбул, Турция. 21 - 24. 05.2001 г.
4. Беляшова, Н.Н. Система мониторинга ядерных испытаний НЯЦ РК: развитие и возможности / Н.Н. Беляшова, Н.Н. Михайлова // Вестник НЯЦ РК, 2007. – Вып. 2. – С.5 – 8.
5. Синева, З.И. Обоснование апертуры новой сейсмической группы «Боровое» на основе корреляционного анализа сейсмических данных / З.И. Синева, Ю.О. Старовойт, Н.Н. Михайлова //Геофизика и проблемы нераспространения: Вестник НЯЦ РК. - Курчатов: НЯЦ РК, 2001. - Вып.2. – С. 55 - 59.
6. Неделков, А.И. Исследования по выбору площадок для новых сейсмических групп на территории Казахстана / А.И. Неделков //Геофизика и проблемы нераспространения: Вестник НЯЦ РК. - Курчатов: НЯЦ РК, 2001. - Вып.2. - С. 48-54.
7. Михайлова, Н.Н. Казахстанский центр сбора и обработки специальной сейсмической информации: функции, задачи, система телекоммуникаций, базы данных / Н.Н. Михайлова, И.И. Комаров, З.И. Синева И.Н. Соколова // Вестник НЯЦ РК, 2001. – Вып. 2, - С. 21 – 26.
8. Михайлова, Н.Н. Обработка данных сейсмических станций НЯЦ РК / Н.Н. Михайлова, З.И. Синева // Вестник НЯЦ РК, 2002. – Вып. 2. - С. 64 – 68.
9. Sinyova, Z.I. Evaluation Related Activity of KazNDC / Z.I. Sinyova. Evaluation Workshop //Comprehensive Nuclear Test-Ban Treaty, 2002. - Norsar. Oslo, Norway.
10. Mikhailova, N. Analysis of convergence REB and local Kazakhstan Bulletin//Report of 2006 / N. Mikhailova, Z. Sinyova // NDC Evaluation Workshop. - Kiev, Ukraine, 2006. - p. 26 – 27.

Казахстан признателен руководителям ОДВЗЯИ и техническим специалистам за конструктивную помощь и содействие в развитии казахстанского сектора Международной системы мониторинга и обучении специалистов. В работах, проводимых в Казахстане, приняли непосредственное участие Исполнительный секретарь ПК Волфганг Хоффман - 2002 г.; Директор отдела Международной системы мониторинга Жерардо Суарез - 2000 г. (Алматы, центр данных, станция Маканчи), 2002 г. (станция Боровое); директор Международного центра данных Ласина Зербо - 2005 (Балапан, СИП), 2004 (станция Боровое); руководитель сейсмического сектора Международной системы мониторинга Серхио Барриентос, 2006 (станция Боровое); директор отдела Инспекции на месте Владимир Крученков - 1999 г. (Дегелен СИП), 2002 г. (Балапан, СИП); директор отдела Инспекции на месте (с 2004) Борис Квок - 2004 г. (Балапан СИП); руководитель методологического сектора ИНМ Патрик Девез - 2002, 2004 (Балапан СИП), а также технические специалисты ОДВЗЯИ, работавшие при создании и сертификации станций мониторинга, при проведении учений Инспекции на месте в Казахстане, - Юрий Старовойт, Павел Мартысевич и др.

Казахстан вышел с инициативой организовать на базе KNDC (г. Алматы) региональный сейсмический центр и международный центр подготовки сотрудников NDC (National Data Centre – Национальный Центр Данных В настоящее время прорабатываются возможные варианты создания такого центра. То же самое относится к созданию в Казахстане центра подготовки инспекторов ИНМ на базе Института геофизических исследований и СИП в г. Курчатове.

11. Дёмин, В.Н. Новая инфразвуковая станция международной системы мониторинга в Казахстане IS31-Актюбинск / Дёмин В.Н., Кунаков В.Г. Смирнов А.А. // Вестник НЯЦ РК. – Курчатов: НЯЦ РК, 2002. - Вып. 2. – С. 14 – 18.
12. Синева, З.И. Динамические характеристики сейсмического шума по цифровым записям станции Маканчи / З.И. Синева, Н.Н. Михайлова, И.И. Комаров //Вулканология и сейсмология, 2001.- № 4.- С. 48 – 59.
13. Михайлова, Н.Н. Годограф сейсмических волн по результатам регистрации сигналов от химических взрывов / Н.Н. Михайлова, И.Л. Аристова, Т.И. Германова // Вестник НЯЦ РК, 2002 - Вып. 2(10). - С. 46 - 54.
14. Михайлова, Н.Н. База данных эталонных событий для задач сейсмического мониторинга / Н.Н. Михайлова, И.Л. Аристова //Вестник НЯЦ РК, 2005. – Вып. 2 (22). - С. 62 - 72.
15. Кунаков, В.Г. Динамические калибровки каналов инфразвуковой системы сбора данных IS31 – Актюбинск / В.Г. Кунаков, П.И. Мартысевич //Вестник НЯЦ РК, 2004. - Вып. 2 (18). - С.53 - 58.
16. Старовойт Ю.О., Кунаков В.Г., Мартысевич П.Н. Термодинамические аспекты динамической калибровки микробарометров, применяемых в международной системе мониторинга / Ю.О. Старовойт, В.Г. Кунаков, П.Н. Мартысевич // Вестник НЯЦ РК, 2006. - Вып. 2. - С. 71 - 78.
17. Кунаков, В.Г. Защищенная система питания аппаратуры сейсмических и акустических групп / В.Г. Кунаков, Ю.О. Старовойт // Вестник НЯЦ РК, 2008. – настоящий выпуск.

ЯДРОЛЫҚСЫЗ ӘЛЕМДІ ҚОЛДАУЫНА ЯДРОЛЫҚ СЫНАУЛАРЫНА БӘРІН СЫЙДЫРАТЫН ТҮЙІМ САЛУ ТУРАЛЫ ШАРТЫНЫҢ ҰЙЫМЫМЕН БІРГЕ: 12 ЖЫЛ ЫНТЫМАҚТАСТЫҚ

Беляшова Н.Н., Михайлова Н.Н.

ҚР ҰЯО Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатов, Қазақстан

Шартқа қол қойылғаннан кейін он екі жылдық кезеңіне Қазақстанның Ядролық сынауларына бәрін сыйдыратын тыйым салу туралы шартының Ұйымымен ынтымақтастығының шолуы келтірілген.

KAZAKHSTANI AND THE COMPREHENSIVE NUCLEAR TEST-BAN-TREATY ORGANIZATION EFFORTS TO SUPPORT NON-NUCLEAR PEACE: 12 YEARS OF COOPERATION

N.N. Belyashova, N.N. Mikhailova

Institute of Geophysical Research NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

A review on cooperation between Kazakhstan and the Comprehensive Nuclear Test-Ban-Treaty Organization (CTBTO) for the past 12 years after the signing of the Treaty is given.

УДК 550.34:621.039.9

КАЗАХСТАНСКО-АМЕРИКАНСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В ПОДДЕРЖКУ ЯДЕРНОГО НЕРАСПРОСТРАНЕНИЯ: ДЕСЯТИЛЕТНИЙ ОПЫТ

Беяшова Н.Н., Михайлова Н.Н.

Институт геофизических исследований НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

Приводится обзор работ, выполненных в интересах мониторинга ядерных испытаний, в рамках зонтичного «Соглашения об уничтожении шахтных пусковых установок межконтинентальных баллистических ракет, ликвидации последствий аварийных ситуаций и предотвращении распространения ядерного оружия» между РК и США от 13.12.1999 г.

13 декабря 2007 г. в Вашингтоне Посол Республики Казахстан в Соединенных Штатах Америки Е. Идрисов и Министр обороны США Р. Гейтс подписали Поправку к Соглашению между Республикой Казахстан и США об уничтожении шахтных пусковых установок межконтинентальных баллистических ракет, ликвидации последствий аварийных ситуаций и предотвращения распространения ядерного оружия, продлевающую действие Соглашения на последующие 7 лет.

Казахстанско-американское взаимодействие в сфере нераспространения берет отсчет от программы по нераспространению оружия массового уничтожения «Совместное сокращение угрозы», инициированной сенаторами США Сэмом Нанном и Ричардом Лугаром. В рамках данной программы 13 декабря 1993 г. было подписано рамочное Соглашение об уничтожении шахтных пусковых установок межконтинентальных баллистических ракет, ликвидации последствий аварийных ситуаций и предотвращения распространения ядерного оружия». Соглашение ратифицировано Казахстаном в 2002 г. (Закон Республики Казахстан от 03.06.02 г. № 328-ІІ). Для осуществления деятельности, отвечающей статьям V – XIII рамочного «Соглашения об уничтожении шахтных пусковых установок...» 18 ноября 1997 г. подписано Исполнительное соглашение «Об установке и эксплуатации в Казахстане сейсмических станций наблюдения за ядерными испытаниями» между Департаментом обороны США и Министерством Науки-Академией наук Республики Казахстан (МНАН РК). Срок действия Исполнительного соглашения – 1997 – 2007 гг. с автоматической пролонгацией на последующие десятилетние периоды или в течение срока действия Соглашения между США и РК от 13 декабря 1993 г.

Основной целью деятельности по Соглашению является осуществление действенных мер контроля за нераспространением ядерного оружия и мониторинга ядерных испытаний в поддержку национальных и международных требований, включая Договор о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (ДВЗЯИ).

Статьями Соглашения определены следующие основные задачи сотрудничества:

- создание новых геофизических (сейсмических) наблюдательных станций, их модернизация, эксплуатация и техническое обслуживание (статья I);
- передача данных, полученных на станциях Казахстана в США (п.5, статья IV);
- передача в Казахстан данных, полученных на станциях Международной системы мониторинга, расположенных в США (п.6, статья IV);
- обучение казахстанских специалистов эксплуатации и техническому обслуживанию оборудования (п.8, статья IV).

В состав работ по сотрудничеству, оговоренных Соглашением, вошли совместные инженерные изыскания на согласованных площадках для выбора приемлемого расположения и конфигурации станций, проведение необходимой технической экспертизы для обеспечения соответствующих требований к станциям и средствам коммуникации, а позже – исследования для повышения эффективности ядерного мониторинга.

Согласно статье III Исполнительного соглашения, каждая из сторон назначила орган по сотрудничеству в осуществлении Соглашения. От Республики Казахстан ответственным исполнителем определен Национальный ядерный центр РК, от США – Центр прикладных технологий Военно-Воздушных сил Министерства обороны США (AFTRAC). На протяжении десятилетнего сотрудничества по данному Исполнительному соглашению в нем участвовали, кроме ответственных исполнителей:

- с американской стороны- ATSC - Allied-Signal Technical Services Corporation (1997 – 1999), HTSI - Honeywell Technology Solutions Inc. (1999 – 2003), SAIC - Science Applications International Corporation (2003 - 2005), CONC/LGCCB (2005- 2008);

- с казахстанской стороны - ДГП «Институт геофизических исследований» (ИГИ) НЯЦ РК и ряд субподрядных организаций - ТОО «Казэлектромаш» (строительство воздушных и кабельных линий электропередач, монтаж трансформаторных подстанций, монтаж электрооборудования зданий и сооружений), ТОО «Сейсмострой» (строительно-монтажные работы, строительство подъездных путей, приборных сооружений, ограждений, систем водоснабже-

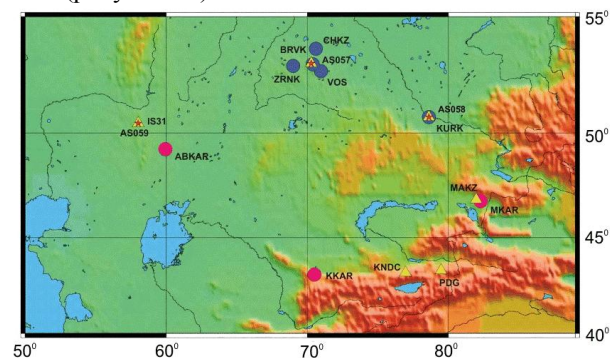
ния и канализации, монтаж модульных зданий, строительство антенных мачт), ЧПТ «Чендыбаев и Ко» (производство и монтаж сборных зданий на площадке сейсмических станций 100% -ной заводской комплектации), ТОО «Реиз и Ко» (изготовление модульных зданий дизельных электростанций с автоматическим пуском; монтаж и наладка оборудования дизельных электростанций).

СОЗДАНИЕ НОВЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

В течение 1999 - 2003 гг. с участием АFTAC в Казахстане построены и полностью оборудованы три новые сейсмические группы [2 - 4]. В 1999 - 2000 гг. технически оснащена первая из них - сейсмическая группа в Восточном Казахстане PS23- Маканчи, входящая в состав первичной сети Международной системы мониторинга [3]. В 2000 - 2002 гг. построена и оборудована сейсмическая группа в Южном Казахстане - Каратау [2]. В 2002 - 2003 г. построена и оборудована сейсмическая группа в Западном Казахстане - Акбулак [4]. Расположение этих станций на территории Казахстана показано на рисунке 1.

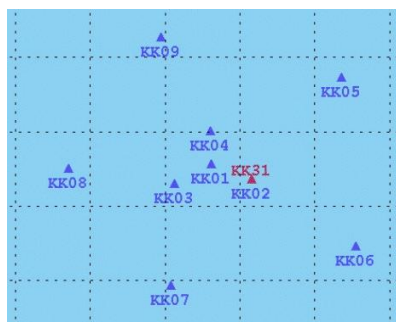
Строительству каждой станции предшествовали совместные масштабные работы по выбору площадки в соответствии с требованиями, предъявляемыми к геологическим условиям, уровню сейсмических шумов, инфраструктуре [1 - 4]. Конфигурация всех

созданных сейсмических групп аналогичная (рисунок 2а): элементы групп расположены по двум концентрическим окружностям. Апертура сейсмических групп - 4 км. В группах установлено по 9 однокомпонентных и по одному (или два, как в PS23-Маканчи) трехкомпонентных сейсмометров. Сейсмометры однотипные, современные - однокомпонентные GS21 и трехкомпонентные KS 54000 (Teledyn Geotech, США). Все сейсмометры установлены в оборудованных скважинах глубиной от 30 до 80 м (рисунок 2б).



Красные кружки – станции, созданные с участием АFTAC

Рисунок 1. Размещение сейсмических групп на территории Республики Казахстан, созданных с участием АFTAC



а– типовая конфигурация сейсмической группы



б– оборудованная приборная скважина



в–антенна

Рисунок 2. К строительству станций

Кроме сейсмического оборудования на станциях установлено оборудование для сбора и передачи данных мониторинга в режиме реального времени. Внутри сейсмических групп обеспечен сбор данных со всех пунктов наблюдений в Центральный пункт по радиотелеметрическим каналам. По спутниковым каналам (рисунок 2 в) данные передаются сначала в Центр данных в г. Алматы, а затем в Национальный центр данных США (USNDC) во Флориду (США).

Сейсмические группы официально открыты для эксплуатации: PS23- Маканчи в июне 2000 г., Каратау – в июне 2002 г., Акбулак – в августе 2004 г. Со времени открытия АFTAC в рамках заключаемых контрактов оказывает финансовую поддержку станциям Каратау и Акбулак.

В течение всего времени работы станций большое внимание уделяется бесперебойности и своевременно-

сти получения и передачи данных. В двух центрах – Казахском и Американском (KNDC и USNDC) постоянно ведется контроль за процессом сбора и передачи данных, рассчитываются объемы получаемых данных по каждому каналу каждой станции. При обнаружении каких-либо отклонений оперативно принимаются меры по наладке системы. Еженедельно из Центра данных в Алматы проводятся дистанционные калибровки аппаратуры, установленной на станциях, для проверки ее параметров. Результаты калибровок оперативно анализируются в двух Центрах данных, при необходимости, в случае неудовлетворительных результатов, калибровки повторяются.

В 2005 – 2006 гг. специалистами АFTAC проведена модернизация сети станций. Цель этой модернизации – переход на новый формат передачи данных CD 1.1,

позволяющий более надежно и без потерь передавать данные в режиме реального времени (рисунок 3).

В разное время проведены также модернизация системы питания, тестирование систем заземления и грозозащиты и др. необходимые мероприятия.

Для решения вопросов организационного характера, технических и научных планов сотрудничества АФТАС и ИГИ НЯЦ РК, связанных с эксплуатацией

станций, в 1997 г. организована и систематически работает Казахстанско-американская рабочая группа. С 1997 г. по 2008 г. проведено 24 заседания, поочередно в Казахстане и США с обсуждением проектов строительства и модернизации станций, текущего технического состояния, проблем в работе и планов на будущее (рисунок 4).

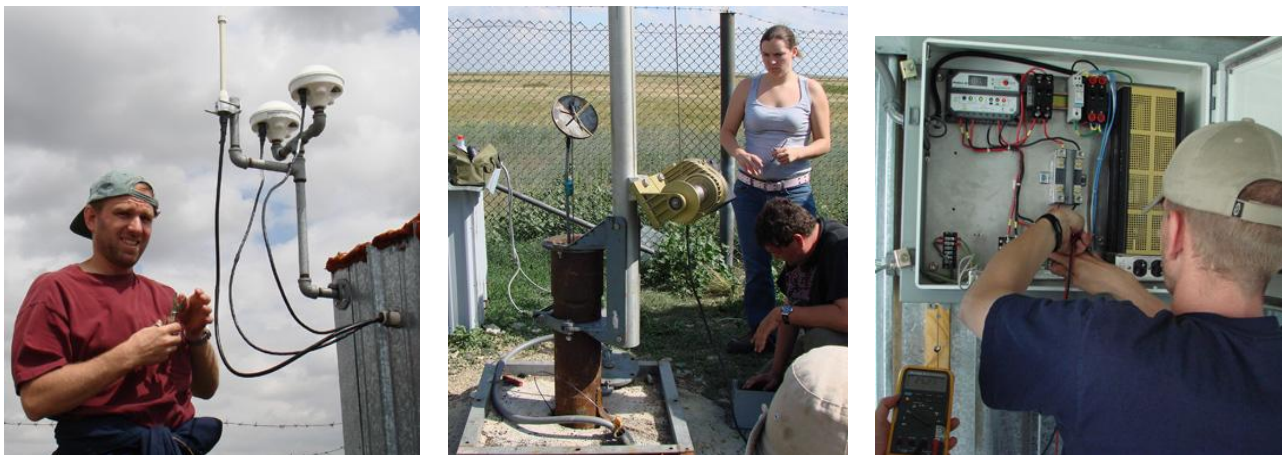


Рисунок 3. Работы по модернизации на станции Акбулак



Рисунок 4. К подписанию документов сопредседателями Казахстанско-Американской рабочей группы господином Б. Варнумом (США) и Н. Беляшовой (Казахстан)

ОБУЧЕНИЕ СОТРУДНИКОВ И НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для эффективной работы созданных сейсмических групп проведена подготовка штата казахстанских специалистов как непосредственно на станциях, так и в Центре данных. Такая подготовка осуществлена специалистами АФТАС в США и в Казахстане. В период с 2000 по 2007 гг. обучение прошли 29 специалистов.

Благодаря успешному сотрудничеству американских и казахстанских специалистов, три современные высокотехнологичные сейсмические группы Акбулак, Каратау, PS23- Маканчи стали одними из лучших станций Казахстана. Их вклад в общий объем получаемой информации трудно переоценить. Высокая эффективность станций проявляется в регистрации большого количества сейсмических со-

бытий на территории Казахстана, соседних стран Центральной Азии, всего мира. Только за 2003 – 2007 гг. тремя станциями зарегистрировано 67 000 событий. В пределах Центральной Азии в год регистрируется более 12 000 землетрясений (рисунок 5). В целом, на эти группы приходится 90 - 95% всех обрабатываемых и включаемых в сейсмологический бюллетень событий.

В октябре 2006 г. станции Акбулак и PS23- Маканчи зарегистрировали ядерное испытание, проведенное в Северной Корее. Несмотря на то, что взрыв имел малую мощность (порядка 1 кт) и был произведен на значительном удалении от станций (Акбулак - 5280 км, Маканчи - 3750 км) [5], ядерное испытание было зарегистрировано благодаря высокой чувствительности сейсмических групп.

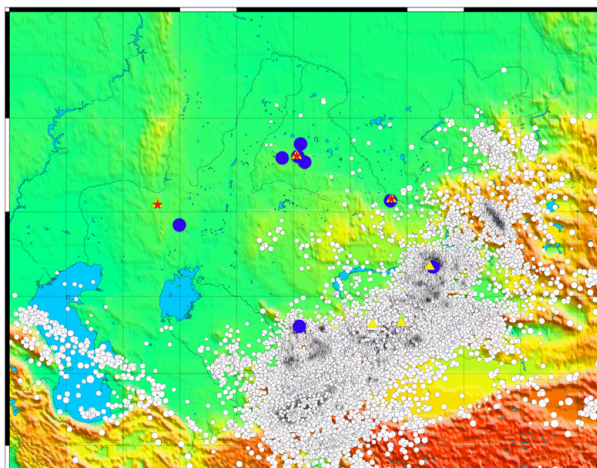


Рисунок 5. Карта эпицентров землетрясений, зарегистрированных тремя станциями за 2003 – 2007гг.

Информация, получаемая станциями, созданными в сотрудничестве с АФТАС, очень важна для Казахстана в связи с высокой степенью природной и техногенной сейсмической опасности значительной части территории Республики. Станции позволяют следить и за другими техногенными событиями. Так, две сейсмические группы Акбулак и Каратау зарегистрировали аварийное падение ракеты-носителя «Днепр» в 2006 г. [6].

Большой объем информации, полученной за годы эксплуатации станций, рост квалификации сотрудников ИГИ НЯЦ РК позволили инициировать научно-исследовательское сотрудничество с АФТАС. В 2006 г. был заключен первый контракт, направленный на улучшение обнаружения сигналов и идентификации фаз по записям станции Акбулак на региональных и телесеизмических дистанциях, изучению параметров поля поглощения по станции Акбулак, созданию базы данных эталонных событий по карьерным взрывам. Отчет по контракту включал подробные результаты по всем поставленным задачам. В 2007 г. заключен новый контракт на научные работы по уточнению скоростной модели геологической среды в районе станции Акбулак для улучше-

ния обработки ее данных, на пополнение базы данных эталонных событий в Западном Казахстане.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Опыт 10-летнего сотрудничества НЯЦ РК и АФТАС (США) в рамках исполнительного соглашения «Об установке и эксплуатации в Казахстане сейсмических станций наблюдения за ядерными испытаниями» оказался весьма успешным. Благодаря этому сотрудничеству Казахстан в короткий срок получил три мощные сейсмические группы, равных которым в Республике не было. Ввод их в эксплуатацию с помощью и при участии американских специалистов способствовал получению большого объема новых сейсмологических данных, используемых для сейсмомониторинга землетрясений и ядерных взрывов в масштабах всего земного шара. Казахстанская сторона признательна руководителям АФТАС и его техническим специалистам за полученный опыт работ и результаты и надеется на будущую плодотворную совместную работу, результатом которой является более эффективное выполнение обязательств по контролю за ядерными испытаниями и расширение возможностей при решении гражданских задач.

ЛИТЕРАТУРА

1. Неделков, А.И. Исследования по выбору площадок для новых сейсмических групп на территории Казахстана / А.И. Неделков // Вестник НЯЦ РК, 2001. – Вып. 2. – С. 48 - 54.
2. Марченко, В.Г. Новая сейсмическая группа Каратау в Казахстане / В.Г. Марченко В.Г., А.И. Неделков, И.И. Комаров // Вестник НЯЦ РК, 2002. – Вып. 2. – С. 9 - 13.
3. Варнум, Б.Р. Совместная программа мониторинга ядерных испытаний АФТАС – НЯЦ РК / Б.Р. Варнум // Вестник НЯЦ РК, 2003. – Вып. 2. – С. 43 - 46.
4. Тейнор, Л. Новая сейсмическая группа Акбулак: выбор места размещения, аппаратура, система коммуникаций / Л. Тейнор [и др.] // Вестник НЯЦ РК, 2004. – Вып. 2. – С. 5 - 12.
5. Михайлова, Н.Н. Северокорейское ядерное испытание 9 октября 2006 г. по данным казахстанской и глобальной сетей / Н.Н. Михайлова, И.Н. Соколова // Вестник НЯЦ РК, 2008. – Вып. 1. – С. 17 - 26.
6. Михайлова, Н.Н. Использование сейсмоакустических данных при поиске места падения ракеты-носителя «Днепр» / Н.Н. Михайлова // Вестник НЯЦ РК, 2007. – Вып. 2. – С. 44 - 48.

**ЯДРОЛЫҚ ТАРАТПАУЫН ҚОЛДАУЫНА
ҚАЗАҚСТАН-АМЕРИКАЛЫҚ ӘРЕКЕТТЕСТІГІ: ОН ЖЫЛДЫҚ ТӘЖІРИБЕ**

Беяшова Н.Н., Михайлова Н.Н.

ҚР ҰЯО Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатов, Қазақстан

1999 жылғы 13 желтоқсандағы Қазақстан Республикасы мен Америка Құрама Штаттарының арасындағы «Континентаралық баллистикалық ракеталардың шахталық ұшыру қондырғыларын, апатты жағдайлардың салдарын жоюға және ядролық қарудың таралуына жол бермеуге қатысты келісімі» шегінді ядролық сынаулар мониторингі мүддесінде орындалған жұмыстардың шолуы келтірілген.

**KAZAKHSTANI-AMERICAN COOPERATION TO SUPPORT
NUCLEAR NON-PROLIFERATION: 10 ANNIVERSARY YEAR OF EXPERIENCE**

N. Belyashova, N. Mikhailova

Institute of Geophysical Research NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

Review of the activities done in the framework of umbrella “Agreement on destruction of silo launchers of intercontinental ballistic missiles, emergency response and the prevention of proliferation of nuclear weapons” between Kazakhstan and USA dated 13.12.1999 is presented.

УДК 550.34:621.039.9

ANALYSIS OF DIGITAL SEISMOGRAMS FROM NUCLEAR EXPLOSIONS ACROSS FORTY YEARS

P.G. Richards, W.-Y. Kim

Lamont-Doherty Earth Observatory of Columbia University, New York, USA

It is remarkable that the most recent nuclear test explosion, by North Korea (2006 October 9), although quite small, was well-detected teleseismically. We describe how this event was promptly identified as an explosion and not an earthquake, on the basis of regionally recorded signals, in a region that apparently would have permitted such identification even if the test had been much smaller. The work of identifying underground nuclear explosions in a particular region on the basis of their seismic signals is greatly assisted by the availability of high-quality signals from both explosion (chemical or nuclear) examples, and earthquake examples, previously recorded in that same region. The Borovoye Geophysical Observatory is very important for its digital seismogram archive of nuclear explosions going back to 1966, recorded from underground nuclear tests at teleseismic and regional distances, from test sites operated by the recognized nuclear weapons states. We briefly describe a current effort to improve the quality and usability of this archive.

INTRODUCTION

Our title for this paper is chosen to include two subjects. First, we describe seismic signals from the underground nuclear test explosion of 2006 October 9, conducted by North Korea, as recorded by a high-quality station at a distance of about 370 km, and the way in which it was possible promptly to identify these signals as coming from an explosion and not an earthquake. Second, we briefly describe the archive of seismic signals from nuclear test explosions recorded digitally at Borovoye beginning in 1966, and the way in which this archive is still being improved today, by removing glitches and adding information on instrument responses, to help build confidence in global efforts to monitor compliance with the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty (CTBT).

NORTH KOREA NUCLEAR TEST: SEISMIC DISCRIMINATION AT LOW YIELD

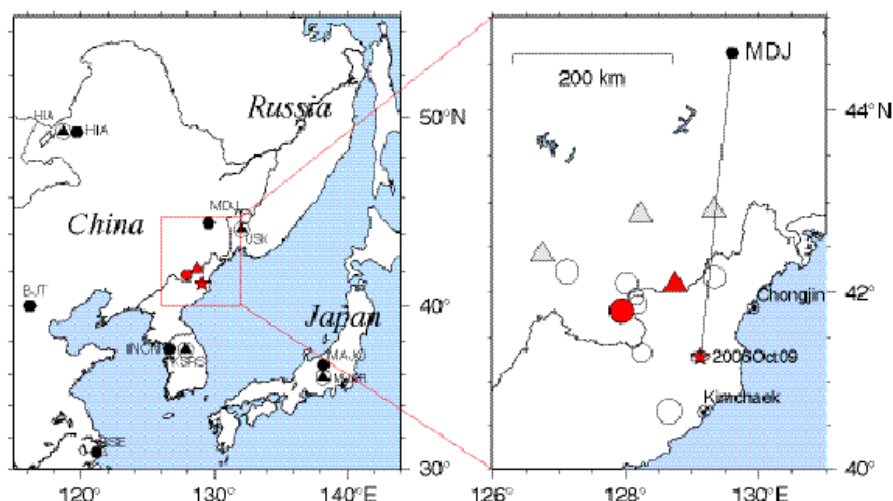
Numerous stations at teleseismic distances detected signals from the North Korean nuclear test of 2006. Within a few hours of its occurrence, the U.S. Geological Survey (USGS) reported on the web a location estimate based on data from 20 stations, and a magnitude. The USGS location estimate was revised slightly after a few days. Its so-called PDE location (a "preliminary determination of epicenter" based on seismic signals reported from 31 stations around the world) and its seismic magnitude (from ten stations) are given as 41.294 deg N, 129.093 deg E, and $mb(P) = 4.3$. Further information on the USGS effort is given by Koper *et al* [3].

The source region consists of Precambrian gneiss and schist with Cretaceous granitic intrusions, and for such hard rock the reported magnitude corresponds to a yield on the order of one kiloton. Although small com-

pared to most nuclear tests, an explosion of this size could still have enormous effects and consequences if actually used as a weapon. This test was announced by North Korea, and there was intense interest internationally in the event. Many newspapers and TV stations wanted basic information on the test itself, including examples of the seismic signals, and an interpretation of what the expert community was learning from them. Conflicting reports were being given, of the likely yield of this test. In this circumstance, seismologists at Lamont-Doherty Earth Observatory, located not far from the headquarters of major news-media headquarters in New York City, gave many interviews, and provided relevant seismograms and interpretations of their main features that were promptly published (for example, by the *New York Times* on October 10, 2006).

We analyzed seismic records from this nuclear test and compared them with similar records from eight earthquakes in the vicinity as well as from four known chemical explosions in the region. In particular we studied 3-component P/S spectral ratios, and concluded that the event was explosive based upon a comparison of its seismic records from two GSN (Global Seismographic Network) stations – MDJ and INCN — with seismic records at the same stations from known explosions and earthquakes in the region. Our results show that identification of explosions in this region can be done even down to a very small fraction of a kiloton, provided seismic data of the type available in October 2006 continue to be available.

Figure 1 (on the left) shows the location of the 2006 October 9 North Korean test together with locations of eight small earthquakes and four small chemical single-fired explosions.



Symbols: red star – location of the North Korea nuclear test; red circle – a nearby earthquake; red triangle – a nearby chemical explosion; hexagons – seismographic stations whose data are openly available (most notably station MDJ); encircled black triangle – IMS stations

Figure 1. The locations of North Korea nuclear test, nearby stations, earthquakes and explosions in the North Korea-China region: on the left – general map; on the right – detailed map

Figure 1 (on the right) shows further detail on the location of eight small earthquakes and four small chemical explosions in the vicinity of the North Korea nuclear test. An error ellipse around the estimated location of the nuclear test indicates the 90% confidence region for the location uncertainty. In the Table below is the list of events which are shown in figure 1 and for which seismic records are included in this article below.

Figure 2 shows three-component seismograms at station MDJ, in northeast China — from the three events shown in red in Figure 1. These three are: the nuclear explosion; one of the eight small earthquakes;

and one of the small chemical explosions. Figure 3 shows seismograms from four of the earthquakes noted in Figure 1 and from all four of the small chemical explosions, as recorded at station MDJ. Traces are referred to the origin time for each event. The event date, origin time and local magnitude are indicated. Seismograms are ordered in increasing distance for each type of seismic source. These signals were recorded on an instrument with a response proportional to ground velocity over a broad frequency band, and are shown here after being passed in the band from 1 to 15 Hz.

Table. Events for which seismograms are shown in this paper

Date (yr/mo/dy)	Origin time (hh:mm:ss)	Lat. (°N)	Long. (°E)	H (km)	Mag. (M _L)	Region	Dist. (km)	Baz (°)
Nuclear Test								
2006/10/09	01:35:28.0	41.294	129.094	0	4.3	NORTH KOREA	371.3	187
Earthquakes								
1994/01/25	08:51:38.2	42.23	127.12	04	4.0	NE CHINA	332.0	218
1997/10/08	18:54:09.1	42.17	129.33	05	3.6	NORTH KOREA	272.9	185
2002/12/24	15:57:56.6	41.95	128.15	14	2.5	NORTH KOREA	318.6	202
2004/09/08	14:24:21.1	42.10	128.02	23	3.6	NE CHINA	307.3	205
2004/12/16	18:59:14.5	41.79	127.94	10	4.0	NORTH KOREA	341.6	204
Chemical Explosions								
1998/08/12	15:00:08.1	42.87	128.22	0	1.0	NE CHINA	223.6	210
1998/08/18	14:00:06.7	42.91	129.32	0	2.0	NE CHINA	190.6	187
1998/08/19	15:00:07.8	42.09	128.74	0	1.9	NE CHINA	289.2	194
1998/08/25	15:00:07.5	42.43	126.75	0	1.0	NE CHINA	334.4	224

h = focal depth in kilometers; Mag. = Local magnitude for chemical explosions and earthquakes and $m_b(P)$ for the nuclear test;

Dist. = distance in kilometers from the station MDJ to the event; Baz = Azimuth of event from the station MDJ in degrees measured from North.

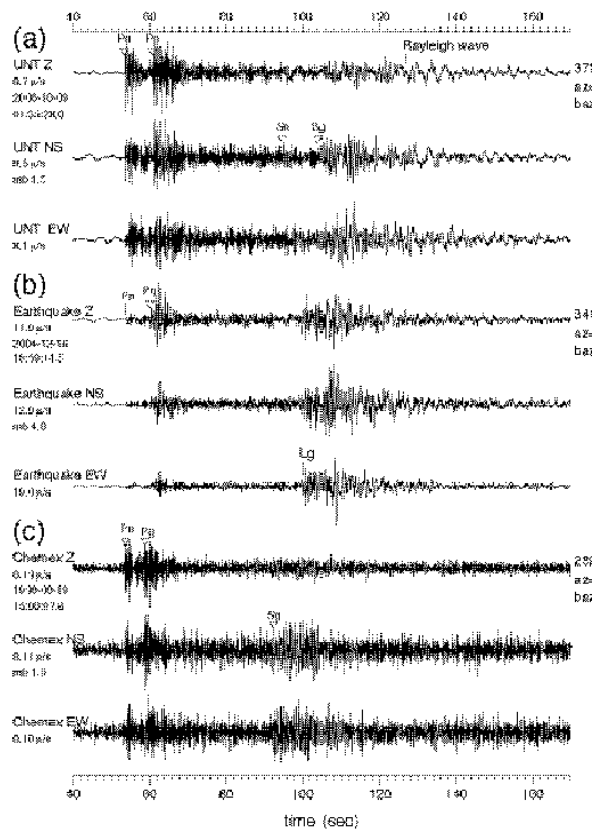


Figure 2. Three-component seismic records (Z, vertical; NS, north-south; EW, east-west) at station MDJ: a - the nuclear test of 2006 October 9, with strong P-waves, a short-period Rayleigh wave (Rg, indicating a shallow source), and weak shear waves (Lg). b - a small earthquake (located at the red circle shown in Figure 1) on 2004 December 16. It lacks Rg and has relatively strong shear waves, c - a single-fired chemical explosion (located at the red triangle in Figure 1) on 1998 August 19. Traces are aligned on P-arrivals

And Figure 4 shows a comparison of spectral ratios for the Pg and the Lg phases for all eight earthquakes, for four chemical explosions, and for the event of main interest — the North Korean nuclear test. A mean value at each discrete frequency is plotted for earthquakes (solid circles) and explosions (solid triangles), with a colored bar used to indicate the scatter ($\pm$ one standard deviation). The earthquake results are offset slightly to the left of each frequency grid point, and the chemical explosion results are offset to the right, to avoid superposition that would obscure the results. The chemical explosions clearly have higher P/S spectral ratios than the earthquakes at almost all frequencies. Separation of the two populations is better at high frequencies. The event of 2006 October 9 clearly falls in with the explosion population. Since the chemical explosions had very low yields (one or two tons), we may conclude that discrimination of explosions can be done in this region even at the level of a few per

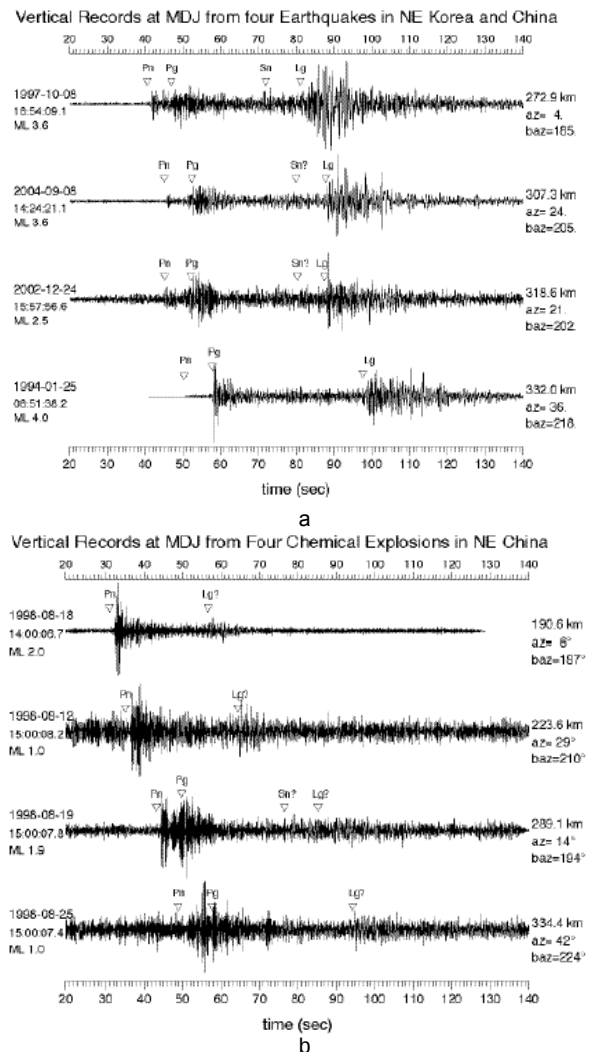


Figure 3. Vertical-component seismic signals at station MDJ. Seismograms: a - from four earthquakes that occurred in North Korea and Northeastern China within 200 km of each other; b - Seismograms from four chemical explosions carried out in August 1998 in Northeastern China

cent of one kiloton, provided data of the quality of the MDJ station are available.

It is very clear from Figure 4 that the nuclear explosion falls into the explosion category and is not a natural earthquake. We note that successful discrimination for this event using seismological methods has been reported by several authors, including Che *et al.* [1], Kverna *et al.* [4] and Koper *et al.* [3]. The last of these papers presents a discussion of the way in which estimates of the yield are dependent upon depth of burial.

In practice it is not possible to distinguish seismically between a small underground nuclear explosion and a large single-fired chemical explosion. The fact that radionuclides were reported from this test by several different groups, is important as an indication of how greatly the capability for radionuclide monitoring has improved since this technology began to be used by the International Monitoring System.

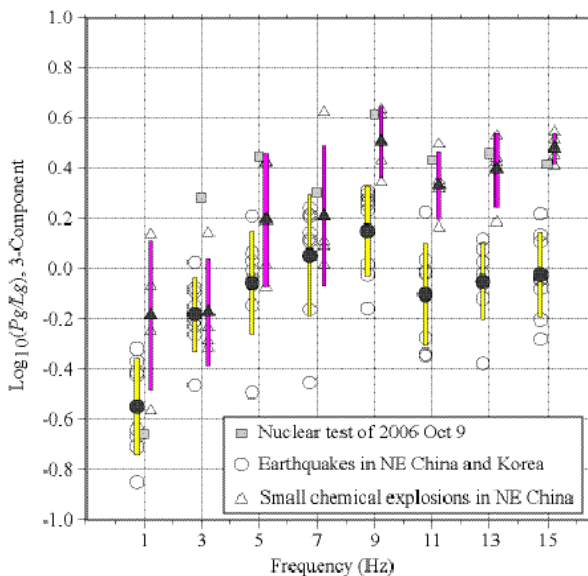


Figure 4. Three-component Pg/Lg spectral ratios at eight discrete frequencies are plotted for earthquakes, chemical explosions, and the nuclear test

THE BOROVYE SEISMOGRAM ARCHIVE

There have been very few nuclear test explosions since the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty was opened for signature in 1996. This is fortunate from the point of view of establishing an international norm of behavior, but for purposes of building experience today, in seismic discrimination between earthquakes and explosions, it is then necessary to search archives acquired many years ago during the period when nuclear tests were being conducted much more frequently, in order to find examples of the type of explosion signals that modern monitoring networks must be designed to detect and identify. The archive of the Borovoye Geophysical Observatory (BRV) plays a very important role here, because of its extensive archive of digital seismic recordings, beginning in 1966, from 711 underground nuclear tests conducted by the USSR (339 events recorded by BRV), China (11 events), France (68), the United Kingdom (15), and the United States (278).

During the years from 1997 to 2000, with funding from the International Science and Technology Centre, scientists at Lamont-Doherty Earth Observatory, the National Nuclear Centre of the Republic of Kazakhstan, and the Russian Academy of Sciences' Institute of Dynamics of the Geosphere, worked to transfer this archive from thousands of Soviet-era magnetic tapes to a modern database that is easily transferable today between different types of modern recording media. The BRV digital archive of nuclear explosion waveforms from 711 underground nuclear explosions worldwide became generally available in April 2001 (for example, via http://www.ldeo.columbia.edu/res/pi/Monitoring/Arch/BRV_arch_exp.html). The archive of nuclear explosion signals was issued as a series of modern databases, described by Kim and others in a report available today as a

41-page PDF file via http://www.ldeo.columbia.edu/Monitoring/Data/Brv_arch_ex/brv_text_table.pdf. Of particular interest here, because they were recorded at regional distances, are the digital seismic signals obtained at BRV from 228 underground nuclear tests recorded at approximately 700 km from Soviet nuclear testing at the Semipalatinsk Test Site; and from 11 underground nuclear tests recorded at approximately 1800 km from nuclear testing by China at the Lop Nor Test Site.

When the BRV archive was made generally available in 2001, the decision was made that it be essentially in its original unprocessed form (though with basic header information), but converted to a modern and widely use format for digital seismic data (CSS3.0). The original Soviet-era recordings had some severe problems, most notoriously that the digitizer typically did not write a count value on seismic waveform channels at the time when the time channel was writing the marker for an integer second. Also, the original recording system addressed the practical problem of input signal with wide dynamic range by having several different channels set at different gain levels, each recording with a limited number of bits (often, only 11 bits), so that although each underground nuclear explosion was usually recorded on several channels, in practice these channels were often either clipped or had inadequate resolution. In either case, it has proven difficult to obtain good spectral measurements from the Borovoye archive without addressing the difficulties described above. But despite these difficulties, ways to extract the underlying information have been found. For example, empirical travel-time information, needed to generate Source Specific Station Corrections for the modern BRVK station (which today is part of the International Monitoring System), can be obtained by picking first and secondary arrivals from a high-gain channel. The spectrum of the strongest ground motion is often best obtained from one of the lower-gain channels. Fortunately, even for a channel that is clipped on the largest amplitudes, coda studies can be conducted using the later part of the recorded signal.

Here, we may note that three different sets of Soviet-style instruments and recording systems were deployed at BRV from 1966 to 1996. We know them as the KOD, STsR-SS, and STsR-TSG systems (sometimes abbreviated to KO or KOD, SS, and TS or TSG). The first BRV digital seismic system, KOD, began recording in 1966 and operated continuously from 1967 to 1973. It is based on three-component short-period seismometers, and is important as one of the few digital seismic systems anywhere in the world in the late 1960s and early 1970s. The other two Soviet-era BRV digital systems began operation in February 1973. STsR-SS is intended mainly for low-gain recording. STsR-TSG includes six long-period and seven short-period Kirnos seismometers, in most cases recorded at two gain levels, for a total (SS + TS) of 20 data channels. The highest sensitivity is 100,000 counts/micron based on a short-period

Kirnos with a special magnet and a low-noise amplifier. This instrument was important at BRV for teleseismic monitoring of numerous French and U.S. underground nuclear explosions (with capability for detection down to one kiloton at the Nevada Test Site of the United States). But for purposes of developing good discriminants from regional signals the high gain channel is not so important today as the lower-gain channels, on which regional signals have been recorded from underground nuclear explosions in and near Central Asia. Kim and Ekström [2] have published details of the STsR-TSG instrument responses (many channels, extending across almost three decades in frequency). All of these main systems are approximately flat to ground displacement over a range of frequencies. With the different instruments and gain levels, the BRV station as a whole had a dynamic range around 135 dB during the Soviet era.

In view of the importance of the Borovoye digital seismogram archive of underground nuclear explosions, we have been working on a project to remove the glitches in the archived recordings, and to combine the corrected recordings with detailed instrument responses in order to reproduce, as far as may be possible, modern broadband recordings of numerous events from underground nuclear explosions conducted several decades ago. This work is enabled, in part, by the fact that as different instrumental systems were introduced at Borovoye, they overlapped with previous systems. Thus in July 1994, when Won-Young Kim deployed a modern broadband seismometer (STS-2 with $T_0 = 120$ sec) and a 24-bit A/D datalogger on the same seismic pier with the Borovoye archive seismic systems under the auspices of the IRIS Joint Seismic Program (JSP), he arranged with operators at the Borovoye Geophysical Observatory to continue running the then-existing STsR-SS and STsR-TSG systems for the purpose of calibrating waveform data from those systems at a later date. Hence, there are waveform data from both the TSG system and modern BRVK broadband systems during 1994–1996, which, together with information obtained from log books, have assisted in providing complete calibration of the TSG system. In particular, the four underground nuclear explosions from French test sites at Mururoa and Fangataufa conducted in 1995–1996, and two from the Lop Nor Chinese test site, 1994 October 7, and 1995 May 15, were recorded by the TSG system and by a modern STS-2 system.

In this paper we give two examples of what can be done with the Borovoye waveforms. Figure 5 shows the successful removal of numerous glitches, and Figure 6 shows how it is even possible to synthesize a broadband signal from combining the deglitched waveforms from separate channels. The records from the 14 September 1988 UNE, conducted as part of the Joint Verification Experiment, at the Balapan region of the Semipalatinsk test site (recorded by the TSG system at BRV) are used as an example in figure 6.

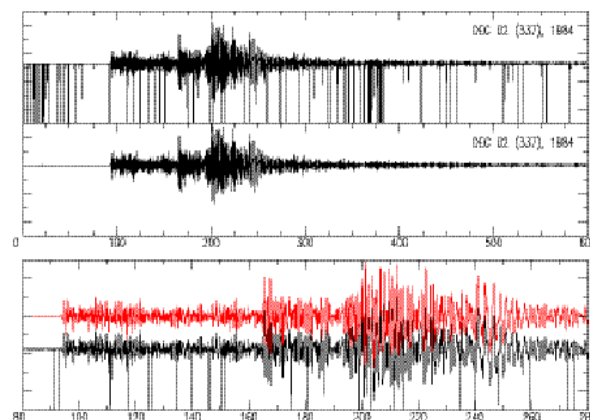


Figure 5. An example of data deglitching: the first top plot shows the raw time series; the second top plot - time series after deglitching, for 10 minutes of data, including a long segment of coda waves; the lower plot (black) is an enlargement of 200 s of data, centered on the main signal. The deglitched waveform is plotted in red

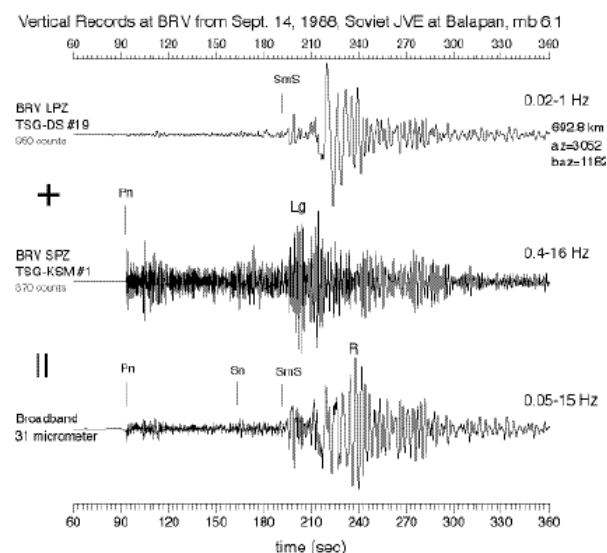


Figure 6. An example of a broadband seismic record (bottom seismogram) synthesized using long- and short-period seismograms (top two seismograms) recorded by the TSG system at BRV

Our goal in the effort to improve the quality of the Borovoye archive of explosion recordings, by removing glitches and correcting for instrument responses for signals at regional distances, is to provide an openly-available dataset that can enable a variety of research efforts to evaluate practical discriminants and thus to improve the capability to monitor compliance with the CTBT. If we are successful, then our efforts will add to the work of many scientists in Russia and Kazakhstan who originally established the quality of the Borovoye Observatory and who carefully acquired data at Borovoye over three decades.

REFERENCES

1. Che, I.-Y. A compound linear discriminant method for small-magnitude seismic events and its application to the North Korea seismic event of October 9, 2006 / I.-Y. Che, M.-S. Jun, and J.-S. Jeon // Earth Planets Space – 59. – 2007. – P. 41–44.
2. Kim, W.-Y. Instrument responses of digital seismographs at Borovoye, Kazakhstan, by inversion of transient calibration pulses / W.-Y. Kim, G. Ekström // Bull. Seism. Soc. Am. 86. – 1996. – P. 191–203.
3. Koper, K.D. Overview of Open Seismic Data from the North Korean Event of 9 October 2006 / K.D. Koper, R.B. Herrmann, H.M. Benz // Seismological Research Letters. – 79. – 2007. – P. 163–177.
4. Kværna, T. North Korea's Nuclear Test: the Capability for Seismic Monitoring of the North Korea Test Site / T. Kværna, F. Ringdal, U. Baadshaug // Seismological Research Letters, 2007. – 78. – P.487 – 497.

**СОҢҒЫ 40 ЖЫЛДАҒЫ ЯДРОЛЫҚ ЖАРЫЛЫСТАРДЫҢ
ЦИФРЛЫҚ СЕЙСМОГРАММАЛАРЫН ТАЛДАУ****Ричардс П., Ким В.-Я.***Колумбия Университетінің Ламонт – Доерти Жер бетіндегі Обсерваториясы, Нью-Йорк, АҚШ*

Жақындағы ядролық жарылыстар, мысалы Солтүстік Кореядағы (2006 ж. қазанның 9), олардың аз қуаттығына қарамай, сейсмикалық көзқарасы жағынан жақсы табылған және дереу, жерсілкіну емес, жарылыс деп танылған. Белгіленген бір аумақта ядролық жарылыстарды тануы жарылыстардың (химиялық және ядролық) сондай-ақ жерсілкінулердің бұрын тіркелген сапалы сейсмикалық жазбаларына байланысты. Осыған қатысты «Бурабай» сейсмикалық обсерваториясы, ядролық қаруы бар мемлекеттер жүргізген ядролық жарылыстар бойынша белгілі ядролық полигондардан телесеисмикалық және аумақтық қашықтарындағы, 1966 ж. басталған мұрағаттық цифрлық сейсмограммалары арқасында маңызды болып табылады. Ядролық сынауларына бәрін сыыйдыратын тыйым салу туралы шартын (ЯСБТШ) қолдау үшін осы мұрағаттың сапасы мен пайдалылығын жақсарту бойынша күш салуы сипатталады.

АНАЛИЗ ЦИФРОВЫХ СЕЙСМОГРАММ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ ЗА ПОСЛЕДНИЕ 40 ЛЕТ**Ричардс П., Ким В.-Я.***Ламонт – Дохертская Земная обсерватория Колумбийского университета, Нью-Йорк, США*

Недавние ядерные испытания, в частности, в Северной Корее (9 октября 2006 г.), несмотря на их маломощность, хорошо обнаружены с сейсмической точки зрения и незамедлительно распознаны как взрыв, а не как землетрясение. Распознавание подземных ядерных испытаний в определенном регионе в значительной степени зависит от ранее зарегистрированных здесь качественных сейсмических записей как взрывов (химических или ядерных), так и землетрясений. Геофизическая обсерватория «Боровое» очень важна в этом отношении благодаря архивным цифровым сейсмограммам по ядерным взрывам, зарегистрированным, начиная еще с 1966 г., на телесеизмических и региональных расстояниях от известных полигонов, использованных державами, обладавшими ядерным оружием. Характеризуются усилия по улучшению качества и полезности данного архива для поддержки Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (ОДВЗЯИ).

УДК 504.064.3:621.039.9

РЕГИСТРАЦИЯ ПОДЗЕМНОГО ЯДЕРНОГО ВЗРЫВА В СЕВЕРНОЙ КОРЕЕ 9 ОКТЯБРЯ 2006 ГОДА ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ СЛУЖБОЙ РАН

Старовойт О.Е., Габсатарова И.П., Коломнец М.В.

Геофизическая служба РАН, Обнинск, Россия

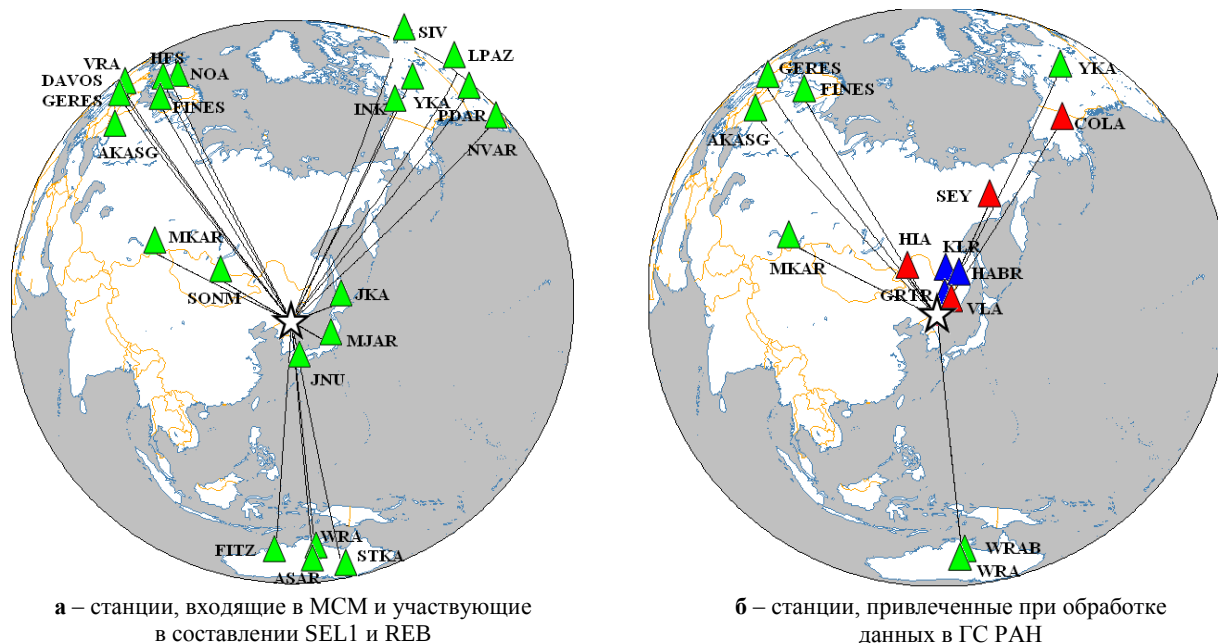
Представлены результаты определения параметров и магнитуды ядерного взрыва в Северной Корее, полученные в оперативном режиме в информационно-обрабатывающем центре (ИОЦ) Геофизической службы (ГС) РАН. Полученные результаты сравниваются с данными других сейсмологических Центров.

9 октября 2006 г. в Северной Корее произведен подземный ядерный взрыв, который был зарегистрирован также станциями Геофизической службы РАН. Взрыв зарегистрирован в 05 час 35 мин московского времени (01 час 35 мин по Гринвичу), его магнитуда 4.0. Известно [1], что данное событие должным образом зарегистрировано станциями Международной системы мониторинга (МСМ) во всем мире (рисунок 1а). Сигналы, вызванные явлением, были зафиксированы более чем десятью первичными сейсмическими станциями мониторинга. Меньше чем через два часа государства, подписавшие Договор о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (ДВЗЯИ), получили первый автоматизированный продукт – Стандартный перечень явлений 1 (SEL1), содержащий предварительную информацию о времени, местоположении и магнитуде явления. Международный центр данных (МЦД) в Вене, ускорив анализ данных се Произошедшее событие, в известном смысле, ста-

ло проверкой работы сейсмических станций, входящих в МСМ, а также технологии получения параметров событий в МЦД.

Представляло интерес через сравнение с данными МЦД оценить возможность сейсмической сети ГС РАН и «виртуальной» сети, созданной в ИОЦ (Обнинск) для оперативного определения параметров сейсмических событий в этом регионе.

Для повышения информативности службы срочных донесений (ССД) в Геофизической службе РАН широко используется обмен данными с международными сейсмологическими центрами. Обмен происходит на этапе обработки станционных данных, а также на этапе получения параметров очагов землетрясений. Поступающая информация особенно важна для уточнения параметров источника и выпуска информационных сообщений, которые помещаются на сайте ГС РАН.



Треугольник (рисунок 1б): красный – станция, волновые формы записей которых обработаны в ИОЦ в Службе срочных донесений, зеленый – станции, данные которых поступили из МЦД в ССД в виде результатов автоматической обработки; синий – станции, данные которых использованы при написании данной статьи

Рисунок 1. Сейсмические станции, зарегистрировавшие ядерный взрыв в Северной Корее 9 октября 2006 г.

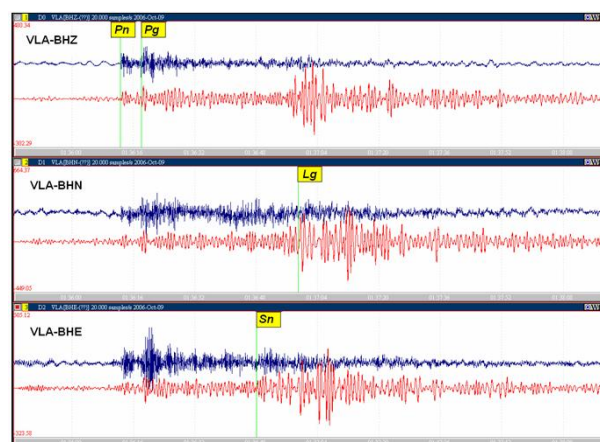
Получение параметров землетрясений в ССД организовано таким образом, что основу информации составляют волновые формы, поступающие с цифровых станций, оснащенных аппаратурой Корпорации научно-исследовательских институтов США (IRIS). За основу программного обеспечения сбора записей взят комплекс NRTS (Near Real Time System), куда поступают волновые формы с 11 станций, расположенных на территории России: ARU, KIV, LVZ, OBN, TLY (IRIS-IDA), BILL, MA2, TIXI, PET, YAK, YSS (IRIS-USGS). Записи непрерывно подвергаются автоматической и интерактивной обработке в Обнинске. Наиболее информативными по выделенным событиям в 2007 г. были станции ARU, TIXI и YAK, немного уступали им станции BILL, OBN, YSS и KIV. У остальных станций в течение года были проблемы с передачей данных.

Кроме российских станций, в режиме, близком к реальному (NRTS), поступают волновые формы еще от 19 станций IRIS, входящих в Глобальную сеть IRIS: AAK, BRVK, KURK, ERM, EFI, JTS, MBAR, WRAB (IRIS-IDA), KONO, GNI, ULN, HIA, DGAR, ANMO, COLA, HKT, KIP, PMG, KBS (IRIS-USGS). Особенно информативными из них являются казахстанские станции BRVK и KURK.

В режиме близком к реальному времени в ИОЦ ГС РАН поступают также данные и продукты из МЦД ОДВЗЯТ: автоматически выделенные вступления записей станций MCM – SLSD (Standard List of Signal Detections) и через два часа после события - бюллетень SEL1. В последние годы по соглашению с Институтом геофизических исследований Национального ядерного центра Республики Казахстан в ИОЦ приходят автоматически выделенные вступления записей станций НЯЦ РК из казахстанского центра данных.

В связи с начавшимся в 2006 г. оснащением станций сети ГС РАН спутниковыми терминалами для передачи данных в Обнинск, сеть ССД пополнилась данными отечественных цифровых станций Владивосток – VLA, Хову-Аксы, Красноярский край – HVS, Сеймчан – SEY и других. В частности, записи станции Владивосток имели исключительно важное значение при определении в ССД параметров взрыва, произведенного в Северной Корее, так как эта станция из всех имеющихся наиболее близка к эпицентру взрыва (эпицентральное расстояние 2.8°). На рисунке 2 показаны фрагменты трехкомпонентной записи северокорейского взрыва цифровой станцией Владивосток. Станция оснащена широкополосным сейсмометром CM3-OC и

16-ти разрядной цифровой регистрирующей аппаратурой SDAS (Геотех+, ГС РАН, Обнинск), которая обеспечивает столбообразную характеристику по скорости в полосе частот 0.02 – 5 Гц.



Цвет сейсмограмм: синий – не фильтрованные записи, красный – записи, фильтрованные в полосе частот 0.7 - 1.4 Гц

Рисунок 2. Трехкомпонентная запись ядерного взрыва в Северной Корее цифровой станцией Владивосток (VLA)

В ГС РАН параметры эпицентра ядерного взрыва в Северной Корее определены в режиме ССД. Первое решение было получено по данным 5 станций (VLA, HIA, SEY, COLA, WRAB), уточнение сделано по данным 11 станций (VLA, HIA, SEY, MKAR, COLA, FINES, WRAB, WRA, YKA, AKASG, GERES), удаленных на расстояния от 2.8° до 73° и достаточно равномерно окруживших эпицентр взрыва (рисунок 1б). Уточнение проведено после получения результатов автоматического выделения фаз SLSD по данным станций MKAR, FINES, WRA, YKA, AKASG, GERES. Полученные параметры эпицентра выявили различие в положении эпицентра, полученного в REB, на 5 км, что можно считать хорошей сходимостью.

В ИОЦ ГС РАН также поступила информация из ряда сейсмологических центров, данные которых представлены в таблице 1 и на рисунке 3.

По проверенным данным МЦД (REB) эллипс ошибок описывает область менее 1000 км^2 . Сравнение результатов локализации показало, что эпицентр взрыва, определенный в ИОЦ ГС РАН по данным 11-ти станций, удален от эпицентра, полученного в МЦД, менее чем на 5 км.

Таблица 1. Основные параметры ядерного взрыва в Северной Корее 9 октября 2006 г. по данным различных центров обработки

№ п/п	Время в очаге ч-мин-с (GMT)	Широта град.	Долгота град.	Глубина км	К-во станций	mb/ N	GAP	Центр
1	01-35-26.0	41.31	128.96	0	11	4.0/6	125	ИОЦ ГС РАН
2	01-35-27.0	41.294	129.094	0	34	4.3	83	NEIC
3	01-35-28.33	41.2796	129.0137	0	13	4.0/11	121	IDC-SEL1
4	01-35-27.58	41.3119	129.0189	0	22	4.1/6	112	IDC-REB

ИОЦ ГС РАН – Информационно-обрабатывающий центр Геофизической службы РАН; NEIC – Национальный центр информации о землетрясениях Геологической службы США; IDC – Международный центр данных, Австрия, Вена. GAP – азимутальная брешь в окружении эпицентра станциями

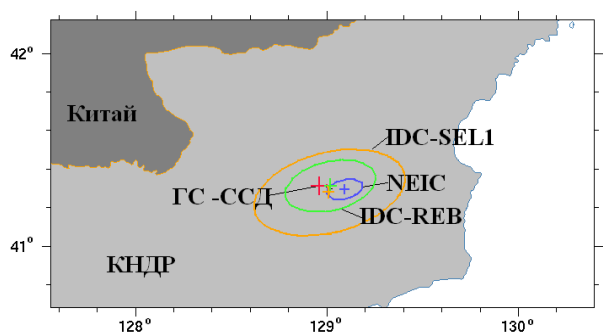


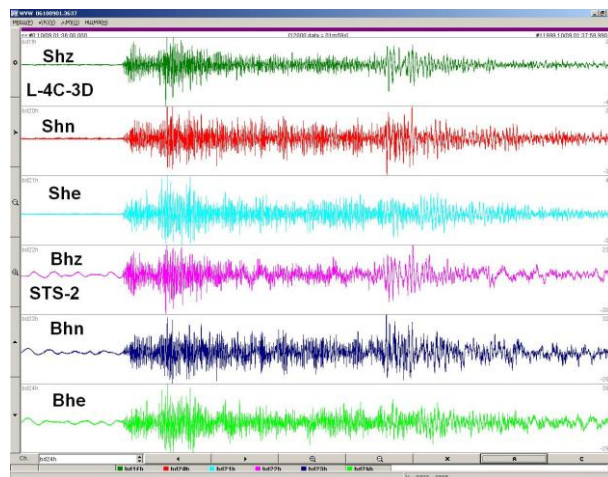
Рисунок 3. Результаты локализации ядерного взрыва в Северной Корее 9 октября 2006 г. по данным различных источников

Дальнейшие исследования показали, что из станций всей Российской сети, северокорейское событие было зарегистрировано, кроме уже использованных в ССД станций (рисунок 1), цифровой станцией Горнотаежное (Сахалинский филиал ГС РАН). Станция открыта в рамках совместного проекта с Японией и оснащена сейсмометрами STS – 2 и короткопериодными каналами с сейсмометрами L-4C-3D. Станция удалена от эпицентра взрыва на 3.3°. Записи северокорейского ядерного взрыва этой станцией приведены на рисунке 4.

Удаленные примерно на одинаковые расстояния – чуть более 8 градусов, – станции Хабаровск и Кульдур по-разному отреагировали на событие. Цифровая станция Хабаровск, менее благоприятная по сейсмическим шумам, зафиксировала лишь следы группы каналов волн Lg. Станция Кульдур, имеющая хорошую шумовую обстановку, записала событие в аналоговом виде более четко: обработчики выделили вступления двух фаз – Pn и Lg. В настоящее время на станции Кульдур, которая включе-

на в систему станций MCM, идет подготовка к установке цифрового оборудования.

Представляют интерес особенности волновой картины записей ядерного взрыва в Северной Корее на станциях Владивосток и Горнотаежное. Записи станции Владивосток после их фильтрации с использованием набора октавных полосовых фильтров по программе «Geotool» [3] приведены на рисунке 5. Масштаб амплитуд отфильтрованных записей выровнен.



Верхние три сейсмограммы – записи короткопериодного сейсмометра L-4C-3D – вертикальная (Shz) и горизонтальные компоненты (Shn, She). Нижние три сейсмограммы – записи широкополосного сейсмометра STS-2: Bhz, Bhn, Bhe – вертикальная и две горизонтальные компоненты

Рисунок 4. Записи ядерного взрыва в Северной Корее 9 октября 2006 г. станцией Горнотаежное. Все записи не фильтрованные

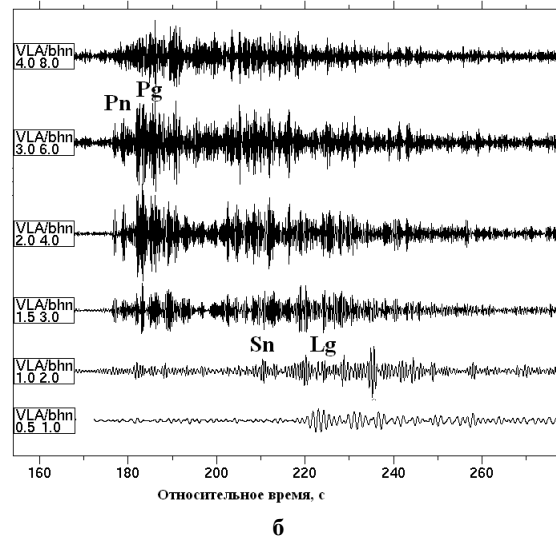
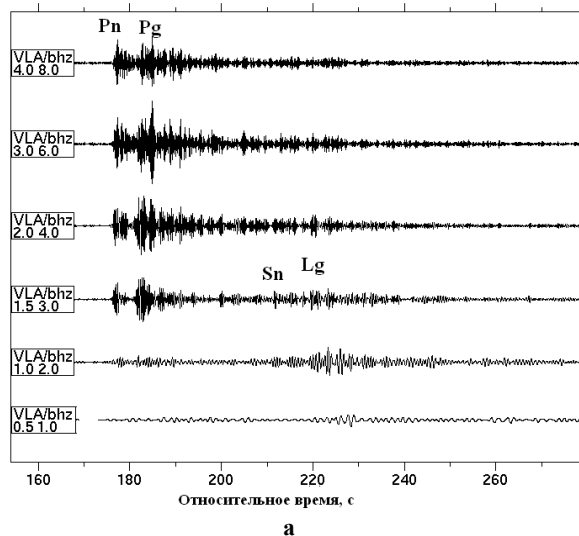


Рисунок 5. Записи ядерного взрыва в Северной Корее 9 октября 2006 г. станцией Владивосток: а – вертикальная; б – горизонтальная (север-юг) компоненты, полученные в результате фильтрации сигнала полосовыми фильтрами Баттерворта 0.5 – 1.0 Гц, 1.0 – 2.0 Гц, 1.5 – 3.0 Гц, 2.0 – 4.0 Гц, 3.0 – 6.0 Гц, 4.0 – 8.0 Гц

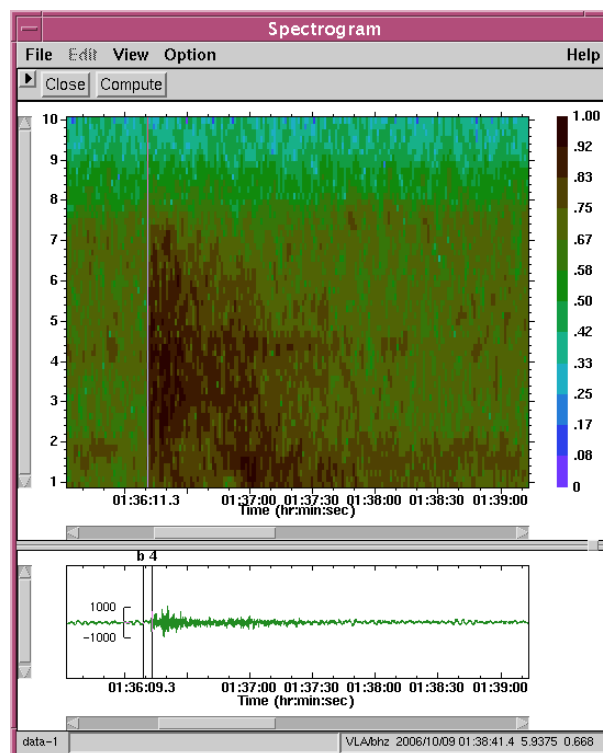
В полосе частот 1-2 Гц преобладают поверхностные каналовые волны, вступление Sn выделяется слабым цугом в основном в этом же интервале частот. Напротив, объемные волны Pn и Pg максимально выражены в полосах частот более 1.5 Гц и, особенно, в полосе 3 - 6 Гц. На спектрограмме, построенной по записи вертикальной компоненты станции Владивосток отчетливо видно, что максимум энергии относится к объемным волнам. Учитывая, что частотная полоса сейсмометра СМЗ-ОС, установленного на станции Владивосток, ограничена примерно 6-7 Гц, можно предположить, что эти волны могут быть еще более насыщены высокими частотами.

Записи станции Горнотаежное (рисунок 6а) получены в более широкой полосе, с расширением в сторону высоких частот. Проанализирован частотный состав записей обеих станций и спектральные отношения выделенных сейсмических фаз (рисунок 6). Спектрограммы, построенные с использованием программы «Geotool», показывают изменчивость частотного состава со временем вдоль всей записи. Длина скользящего временного окна составила 5 сек., сдвиг – 0.6 сек. Амплитуда спектра мощности нормировалась по максимуму и показана цветом согласно правой шкале. Левая шкала показывает частоты. Внизу размещена исследуемая сейсмограмма - запись вертикальной компоненты прибора STS-2.

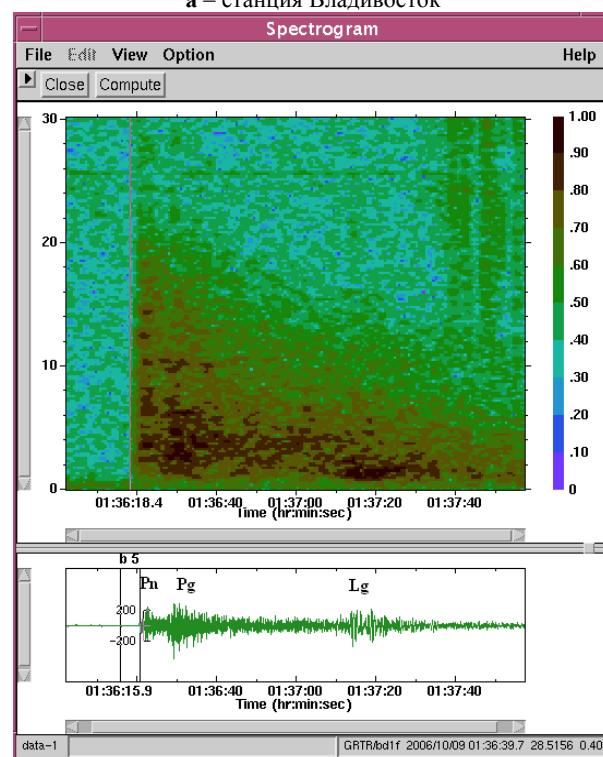
Как видно из спектрограмм, наибольшую энергию несут в себе объемные продольные волны, зарегистрированные станцией Владивосток в полосе частот от 1 до 7 Гц и станцией Горнотаежное в полосе частот от 1 до 15 Гц. Большая часть энергии поверхностных каналовых волн Lg сосредоточена в полосе 1 - 3 Гц.

Таким образом, характер зарегистрированной волновой картины в целом подтверждает ранее установленные признаки ядерного взрыва [2]: коротко-периодный характер записи в первых вступлениях продольных волн, максимальная энергия в объемных волнах, малая интенсивность поперечных волн, весьма интенсивная в узком частотном диапазоне поверхностная каналовая волна типа Lg.

Для получения вероятностного критерия различия взрывов и землетрясений (дискриминантов), как правило, анализируются динамические параметры (амплитудные спектры и их отношения) волн Pn, Pg, Sn и Lg [4,5]. По записи вертикальной компоненты на станции Горнотаежное построены и рассмотрены спектральные отношения этих фаз в различных комбинациях. Амплитудные спектры Фурье построены для фрагментов записи длительностью пять секунд от начала вступления сейсмических фаз Pn, Pg, Sn и Lg (рисунок 7).



а – станция Владивосток



б – станция Горнотаежное

Рисунок 6. Спектрограммы записей ядерного взрыва в Северной Корее 9 октября 2006 г (вертикальная компонента)

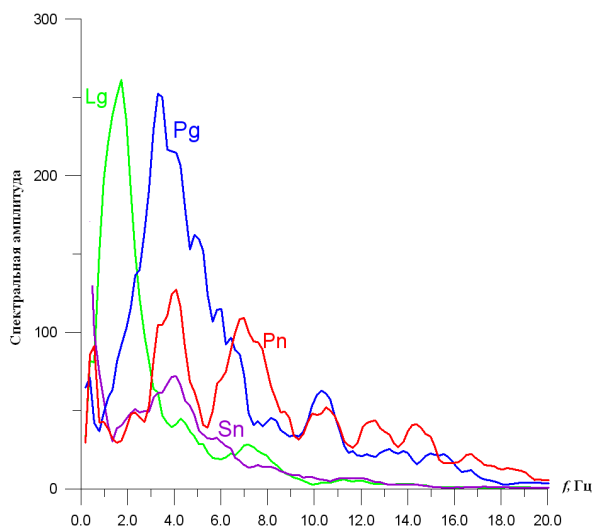


Рисунок 7. Сопоставление спектров сейсмических фаз, зарегистрированных станцией Горнотаежное при ядерном взрыве в Северной Корее 9 октября 2006 г.

Определены средние значения спектральных амплитуд в четырех частотных полосах и рассчитаны их отношения (таблица 2).

Наиболее употребляемыми в качестве дискриминанта являются амплитудные и спектральные отношения фаз Lg/Pn, Lg/Pg и Lg/Sn [4,5]. В случае записей станции Горнотаежное спектральные отношения Lg/Pn, Lg/Pg имеют тенденцию к уменьшению по мере увеличения анализируемых частот. Только на частотах 1 – 2 Гц спектральная амплитуда Lg-волны максимальна и близка к амплитуде Pg-волны, но на частотах 4 Гц и более спектральная амплитуда Lg-волны значительно меньше спектральной амплитуды Pg- волны. Фаза Sn наиболее слабо выражена на частотах более 6 Гц, и поэтому отношение Lg/Sn, на наш взгляд, менее информативно.

Проведенный анализ волнового поля и оценки динамических характеристик волн Pn, Pg, Sn и Lg позволяют считать, что записи сейсмического события 9 октября 2006г на региональных расстояниях не противоречат известным общим характеристикам записей подземного ядерного взрыва.

Таблица 2. Значения отношений средних значений амплитудных спектров в различных частотных полосах

Полоса частот, Гц	Спектральные отношения										
	Pn/Pg	Pn/Sn	Pn/Lg	Pg/Pn	Pg/Sn	Pg/Lg	Sn/Pn	Lg/Pn	Sn/Pg	Lg/Pg	Lg/Sn
1—2	0.4	1.0	0.1	2.4	2.3	0.3	1.0	8.7	0.4	3.7	8.4
2.2—4	0.4	1.5	1.0	2.5	3.7	2.6	0.7	1.0	0.3	0.4	1.4
4.2—8	0.7	2.4	2.8	1.4	3.2	3.8	0.4	0.4	0.3	0.3	0.8
8.2—16	1.2	6.5	7.8	0.8	5.3	6.4	0.2	0.1	0.2	0.2	0.8

ЛИТЕРАТУРА

1. CTBTO Preparatory commission. Ежегодный доклад: 2006 год // [электронный ресурс] – режим доступа: www.ctbto.org.
2. Пасечник, И.П. Характеристики сейсмических волн при ядерных взрывах и землетрясениях / И.П. Пасечник // М.: Наука, 1970. – 193 с.
3. Coyne, J. IDC Documentations Geotool Software User Tutorial / J. Coyne, K. Clark, S. Lloyd. - 16 July 2003. - P 59.
4. Гамбурцева, Н.Г. Сейсмический метод идентификации подземных ядерных взрывов и землетрясений на региональных расстояниях / Н.Г. Гамбурцева [и др.] // Физика Земли, 2004. – № 5. – С. 80 - 94.
5. Кедров, О.К. Сейсмические методы контроля ядерных испытаний / О.К. Кедров // М. : изд-во ИФЗ РАН, 2005. – С 420.

2006 ЖЫЛҒЫ ҚАЗАННЫҢ 9-ЫНДА СОЛТҮСТІК КОРЕЯДАҒЫ ЖЕРАСТЫНДАҒЫ ЯДРОЛЫҚ ЖАРЫЛЫСТЫ РҒА ГЕОФИЗИКАЛЫҚ ҚЫЗМЕТІ ТІРКЕУ

Старовойт О.Е., Габсатарова И.П., Коломнец М.В.

РҒА Геофизикалық қызметі, Обнинск, Ресей

РҒА ақпараттық-өңдеу орталығында (АӨО) оперативтік жеңілді алынған Солтүстік Кореядағы ядролық жарылыстың параметрлері мен магнитудасын анықтау нәтижелері келтірілген. Нәтижелері басқа сейсмологиялық орталықтардың деректерімен салыстырылуда.

**REGISTRATION OF UNDEGROUND NUCLEAR EXPLOSION
IN NORTH KOREA DATED OCTOBER 9, 2006 BY GEOPHYSICAL SURVEY OF RAS**

O.E. Starovoit, I.P. Gabsatarova, M.V. Kolomiets

Geophysical Survey of RAS, Obninsk, Russia

This paper presents results of parameters and magnitude detection for nuclear explosion in the North Korea which were obtained on-line by Information Processing Center (IPC) of Geophysical Survey of RAS. The obtained results were compared with data from other seismological centers.

УДК 504.064.36(100):622.81

ИНФОРМАТИВНОСТЬ КАК МЕРА ОЦЕНИВАНИЯ МЕЖДУНАРОДНОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА И ЕЕ НАЦИОНАЛЬНЫХ СЕГМЕНТОВ

Эльтеков А.Ю., Хохлов Ю.П., Липатов А.В.

Научно-исследовательский институт импульсной техники, Россия, Москва

Обсуждается возможность использования для оценки качества систем мониторинга, - международной, территориальной, национальной, их сегментов, - информативности как обобщенного критерия, наряду с другими параметрами.

В ряду политических и практических мер по обеспечению нераспространения ядерного оружия особое место занимает Договор о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (ДВЗЯИ). Не заменяя других мер, ограничивающих распространение ядерных оружейных технологий, ДВЗЯИ направлен на исключение испытательной стадии, что, несомненно, ограничивает возможности неядерных стран в создании собственного ядерного оружия. Особенностью контроля за соблюдением ДВЗЯИ, является сформированная в его рамках постоянно действующая Международная система мониторинга (МСМ), представляющая собой обширную сеть станций, обеспечивающих сбор геофизической и радионуклидной информации, потенциально характерной для ядерных взрывов [1]. Проектирование и создание сети станций МСМ осуществляются, исходя из принципа регистрации ею сигналов и последующей локализации места проведения ядерных взрывов (ЯВ) в любой точке Земного шара путем обработки в Международном центре данных (МЦД) с погрешностью не более 1000 кв. км, что считается достаточным для начала дальнейших контрольных действий методами инспекций на месте. В статье рассматриваются информационные подходы к оценке качества МСМ и МЦД с точки зрения полезности вырабатываемых данных для установления факта нарушения ДВЗЯИ.

Оценка качества информации, формируемой МСМ совместно с МЦД, должна быть объективной и достоверной. С другой стороны, должна обеспечиваться возможность прогнозирования потенциальной информативности подсистемы мониторинга при недостаточности соответствующих данных по какому-либо из регионов, например, в связи с отсутствием событий или с несовершенством алгоритмов обработки, применяемых в МЦД. Поэтому вполне уместно применение как методов статистической обработки данных, представленных в продуктах МЦД (бюллетенях, фрагментах данных), так и расчетно-аналитических методов, основанных на моделировании процессов генерации и распространения сигналов, учитывающих топологию сейсмологических (или других) сетей, реальные уровни шумов в местах размещения датчиков, а также пороги обнаружения сигналов, установленные в центре данных.

Требования к методическому аппарату оценки возможностей режима контроля соблюдения ДВЗЯИ можно сформулировать следующим образом:

- методы оценки должны обеспечивать объективную, достоверную информацию о характеристиках сейсмологической подсистемы МСМ с точки зрения получения сведений, характеризующих обнаружение, локализацию и идентификацию явлений, похожих на ядерный взрыв (ЯВ);
- технология оценки должна заключаться в определении совокупности параметров, отражающих характеристики сейсмологической подсистемы МСМ, разработке алгоритмов статистической обработки данных и получении количественных значений параметров;
- оценка должна производиться по исходным материалам, являющимся преимущественно продуктами МЦД и представляющим собой результаты обработки первичных данных, вырабатываемых сейсмологической подсистемой МСМ;
- параметры оценки должны характеризовать содержательность информации в продуктах МЦД в пределах указанной достоверности.

Международная система мониторинга совместно с Международным центром данных и глобальной инфраструктурой связи представляет собой распределенную по всему миру информационно-измерительную систему. Качество систем такого рода характеризуется количеством вырабатываемой полезной (с точки зрения потребителя) информации [2]. Общий объем измерительной информации, ежегодно собираемой МСМ и накапливаемой в МЦД, составляет сотни терабайт. Очевидно, что даже при условии проведения ЯВ такое количество информации вовсе не является полезной, поскольку, основной объем сырых данных не содержит сигналов от ядерных взрывов. Выходные продукты МЦД, содержащие сведения о месте, времени и типе зарегистрированного источника геофизических сигналов, являются значительно информативнее сырых данных МСМ. На рисунке 1 показан пример событий, зафиксированных МЦД в течение одного года (около 30 000 событий).

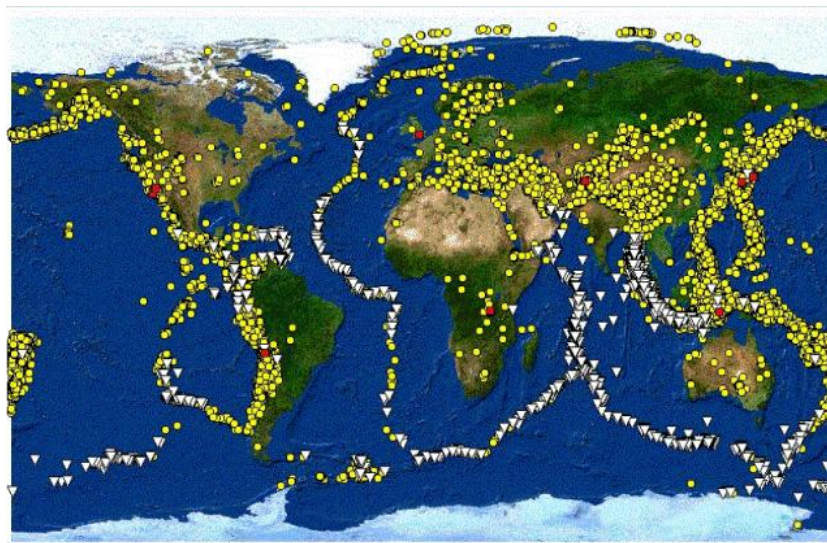


Рисунок 1. События, зарегистрированные МСМ за год (по бюллетеням МЦД)

Известные показатели качества МСМ являются многомерными и, в основном, характеризуют отдельные станции [3]. В последние годы информационный подход к оценке качества применяется в самых различных областях физики и техники, где имеют дело с пространственным распределением вероятности. При этом переход от вероятностного к детерминированному представлению процесса осуществляется посредством, так называемого, оператора коллапса вероятности [4]. В результате многомерное вероятностное поле сводится к набору скалярных величин. Понятие «полезная информация» в каждом случае определяется спецификой объекта. В [5] предложено в качестве обобщенной меры качества МСМ использовать так называемую информативность – способность МСМ формировать информацию, необходимую для установления факта нарушения ДВЗЯИ на определенном участке Земного шара. Суть этого показателя – в полезности информации, которую вырабатывает МСМ в совокупности с МЦД в случае проведения ЯВ. В отличие от общего объема информации, содержащейся в вырабатываемых МСМ данных (десятки терабит в год), информативность может быть невелика. Однако именно она отражает реализацию целей функционирования МСМ и МЦД. Предложенная количественная оценка информативности I определяется следующим образом:

$$I = - \sum РПСМ_i \cdot РЛОК_i \times \times РИД_i \cdot РПСМ_i \cdot РЯВ_i \cdot \log_2(РЯВ_i) \quad (1)$$

где: $РПСМ_i$ – вероятность регистрации МСМ сейсмических сигналов от ядерного взрыва (ЯВ) в пределах i -го участка; $РЛОК_i$ – вероятность локализации источника в пределах участка заданной площади (например, 1000 кв.км); $РИД_i$ – вероятность идентификации источника, как ЯВ, в пределах i -го участка; $РЯВ_i$ – вероятность проведения ЯВ в пределах i -го участка.

Суммирование ведется по всем участкам Земного шара, либо во всем участкам заданного района.

Вероятность регистрации сигналов от ЯВ зависит от уровня сейсмического фона на станциях МСМ и расстояний от станций до места проведения ЯВ [6]. На практике вероятность регистрации сигналов от ЯВ может быть оценена как доля событий, обнаруженных сейсмологической подсистемой МСМ относительно общего количества сейсмических источников (подобных ЯВ по основным параметрам сигналов) в исследуемом регионе. Общее количество источников можно оценить по данным более плотной сейсмологической сети (региональной или локальной).

Вероятность локализации источника с заданной точностью зависит от степени откалиброванности участка и, в частности, от того, происходили на участке хорошо локализованные (калибровочные) сейсмические события, зарегистрированные сетью станций, или нет. Положим, что вероятность идентификации источника как ЯВ для событий типа ЯВ практически близка к 1, т.е. предполагается, что сигналы от ЯВ интерпретируются именно как сигналы от ЯВ.

Поскольку информативность представляет собой одномерный скалярный параметр (некоторое число), то ее можно использоваться для анализа и графического представления динамики качества сейсмологической подсистемы при изменениях во времени сейсмической обстановки, при изменении конфигурации или работоспособности сети и т.д. Оценки информативности МСМ ДВЗЯИ базируются на гипотезе о возможности регистрации станциями МСМ и последующего детектирования геофизических сигналов (в первую очередь, сейсмических) от испытательных ЯВ, а также локализации по ним местоположения источника сигналов. Поскольку погрешность 1000 кв. км является достаточной для получения требуемой информации от МСМ, то для оценок ин-

формативности разобьем поверхность Земного шара на районы площадью 1000 кв. км. Количество таких районов N_{reg} составит около 510 тысяч или приблизительно 2^{19} . Если ограничиваться мониторингом ЯВ на суше, то количество районов сократиться почти в 4 раза.

Для выбранной топологии МСМ каждый i -ый район характеризуется некоторой вероятностью $PIM-Si$, того, что сигналы от ЯВ внутри участка будут зарегистрированы МСМ и обработаны в МЦД с формированием соответствующей записи в бюллетене.

Положим, что факт проведения ЯВ в любом районе Земного шара равновероятен и что он регистрируется станциями МСМ с вероятностью 1. Положим также, что вероятность идентификации источника как ЯВ для событий типа ЯВ практически близка к 1, т.е. что сигналы от ЯВ практически интерпретируются именно как сигналы от ЯВ. Это соответствует максимальной информативности МСМ, которая, исходя из (1) составит

$$I_{max} = -N_{reg}/N_{reg} \cdot \log_2(1/N_{reg}). \quad (2)$$

Для $N_{reg} \approx 5,1 \cdot 10^5$ по формуле (2) получаем $I_{max} \approx 19$ бит.

Для оценки информативности МСМ рассмотрим сначала, какую информативность может обеспечить одиночная сейсмологическая станция МСМ. Пусть известны зависимости $P(R)$ - вероятности обнаружения сейсмических сигналов ЯВ заданной магнитуды, - от расстояния R . Тогда суммированием по всем районам можно рассчитать информативность $I1$ одиночной сейсмологической станции МСМ. Для N станций суммарная информативность IN составит

$$IN = N \cdot I1 / K_{red}, \quad (3)$$

где K_{red} – коэффициент избыточности информации.

Избыточность информации обусловлена тем, что один и тот же источник регистрируется несколькими станциями. Для уверенной локации ЯВ необходимо иметь коэффициент избыточности не менее 3, а с учетом запаса устойчивости системы, не менее 4. Исходя из оценок максимальной информативности МСМ и информативности одиночной станции на основе формулы (3) можно оценить необходимое количество станций сети МСМ N_{stmin} как

$$N_{stmin} = K_{red} \cdot I_{max} / I1 \quad (4)$$

В таблице 1 приведены примеры расчета информативности одиночной сейсмологической станции МСМ для различных магнитуд и уровня фона на сейсмологической станции. Расчеты проведены по формулам (3, 4) с привлечением экспериментальных зависимостей $P(Ri)$ для подземных ЯВ, использованных при обосновании и проектировании сети станций МСМ [6]. В таблице 1 также приведены расчетные значения минимального количества станций для обеспечения мониторинга ЯВ при различных условиях.

Таблица 1. Расчетные значения информативности одиночной станции и минимального количества необходимых станций в различных условиях мониторинга

Характеристика события	Информативность одиночной станции	Минимальное количество станций
Магнитуда 5 $K_{red}=4$	11,1	7
Магнитуда 4 Низкий шум, $K_{red}=4$	2,2	34
Магнитуда 4 Высокий шум, $K_{red}=4$	0,7	110
Декаплинг $K_{red}=3$	0,3	210

Из таблицы 1 видно, что спроектированная сеть МСМ из 50 первичных и 120 вторичных сейсмологических станций может обеспечить необходимую информативность при сейсмическом мониторинге ЯВ с магнитудой 4 даже при высоком уровне шумов на всех станциях, однако может оказаться недостаточной для мониторинга ЯВ с применением методов сокрытия. Аналогичные оценки по критерию пороговой чувствительности МСМ ранее были получены на основе значительно более сложных сейсмологических исследований. Таким образом, показатель информативности адекватно и наглядно характеризует качество сейсмологической сети МСМ. Используя данные о регистрации сейсмических событий, накопленные в МЦД, можно получить оценки фактической информативности по каждой сейсмологической станции, а также всей сети. Такие исследования проводятся по мере создания новых станций и формирования сети МСМ.

Оценка возможности обнаружения сейсмического сигнала решается как статистическая задача выделения сигнала на фоне шума. Как правило, стационарные шумы описывают нормальным законом распределения. Однако многолетняя практика сейсмологических наблюдений показала, что для больших интервалов времени распределение амплитуд сейсмических шумов (включая сигналы от удаленных землетрясений) может быть близко аппроксимировано логнормальным законом. То-есть, нестационарность уровня микросейсмического шума может быть представлена в виде логнормального распределения амплитуды шума. При таких предпосылках вероятность того, что на i -ой станции будет обнаружен сигнал от j -ого источника, выражается, согласно [6], формулой

$$p_{ij} = \frac{1}{2} \cdot \left[1 + \operatorname{erf} \left[\frac{\lg A_s^{ij} - (\lg SDT + \lg \bar{A}_n^i)}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{\sigma_n^{i2} + \sigma_s^{j2}}} \right] \right], \quad (5)$$

где: $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-z^2) dz$ - интеграл ошибок;

A_s^{ij} - амплитуда сигнала, зарегистрированного i -ой

станций, от события в j -ом источнике; SDT - порог обнаружения (отношение амплитуды сигнала к амплитуде шума, при котором сигнал считается зарегистрированным данной станцией); $\overline{A}_n^i$ - средняя амплитуда шума (математическое ожидание ожидающей шумового сигнала) для i -ой станции; σ_n^{i2} - дисперсия десятичного логарифма шума; σ_s^{i2} - дисперсия десятичного логарифма сигнала.

Параметр SDT , в общем случае, может быть различным для каждой станции МСМ. Для упрощения модельных оценок он полагается одинаковым для всех актуализированных станций, хотя может изменяться при исследовании показателей качества. Значения A_n^i , σ_s^{i2} и σ_n^{i2} в формуле (5) определяются по результатам статистической обработки материалов регистрации сигналов и шумов для каждой станции сети. Определение этих параметров является предметом длительных исследований качества сейсмологической подсистемы.

Вероятность обнаружения сигнала от j -го источника K станциями из общего их числа n в сети P_{knj} определяется по формуле общей теоремы о повторении опытов.

$$P_{nj}^k = \frac{1}{k!} \frac{\partial^k}{\partial z^k} \left[\prod_{i=1}^n (q_{ij} + p_{ij}z) \right]_{z=0},$$

где: p_{ij} - вероятность обнаружения сигнала на i -ой станции; $q_{ij} = 1 - p_{ij}$ - вероятность пропуска сигнала; z - переменная дифференцирования.

Вероятность обнаружения j -ого источника не менее, чем K станциями данной сети, выражается формулой

$$P_j = \sum_{k=K}^n P_{nj}^k.$$

Сеть станций определяется общим списком сейсмологических станций, входящих в основную и вспомогательную сети МСМ. Из этого списка по выбору оператора может актуализироваться вся сеть

или ее любая подсеть. Список станций включает код (имя) станции, координаты станции как для всей территории земного шара так и для отдельных районов. Характеристики станций включают: среднее квадратическое значение (СКЗ) сейсмического фона, определенное за большой интервал времени для каждой станции, среднее квадратическое отклонение (СКО) логарифма амплитуд сейсмического фона, СКО логарифма амплитуд сейсмических сигналов, приведенных к одной магнитуде в источнике. СКЗ сейсмического фона для каждой станции определяются по данным МЦД. При этом выбирается либо последнее значение, представленное в бюллетене, либо значение, усредненное за какой-либо период наблюдений (месяц, год). СКО логарифма амплитуд сейсмического фона определяется по серии данных МЦД для одной станции. Аналогичным образом определяются СКО логарифма амплитуд сейсмических сигналов, приведенных к одной магнитуде в источнике [7].

Границы, определяющие исследуемую географическую область, задаются минимальным и максимальным значениями широты и долготы в градусах: $\phi_{\min}$, $\phi_{\max}$ - по широте, $\lambda_{\min}$, $\lambda_{\max}$ - по долготе. Пример разбиения земного шара на участки равной площади показан на рисунке 2. Точками обозначены центры участков.

Анализ показателей качества сейсмологической подсистемы в целом начинается с формирования полей вероятности по территории земного шара или исследуемого района. Под полем вероятности понимается совокупность значений вероятности обнаружения явлений для каждого участка исследуемого района не менее, чем заданным числом сейсмологических станций. Расчеты поля вероятности производятся для набора значений магнитуды, порогового значения отношения сигнал/шум и минимального числа регистрирующих станций (K). Пример поля вероятности для сети основных сейсмологических станций МСМ приведен на рисунке 3.

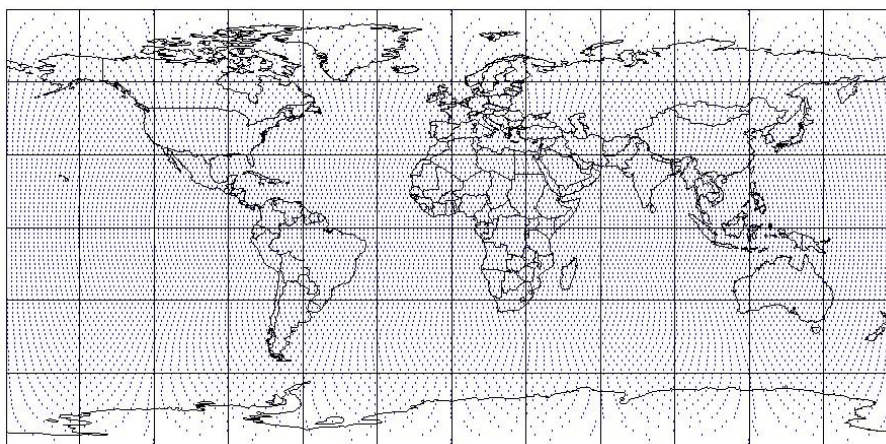


Рисунок 2. Пример разбиения территории земного шара на равные участки

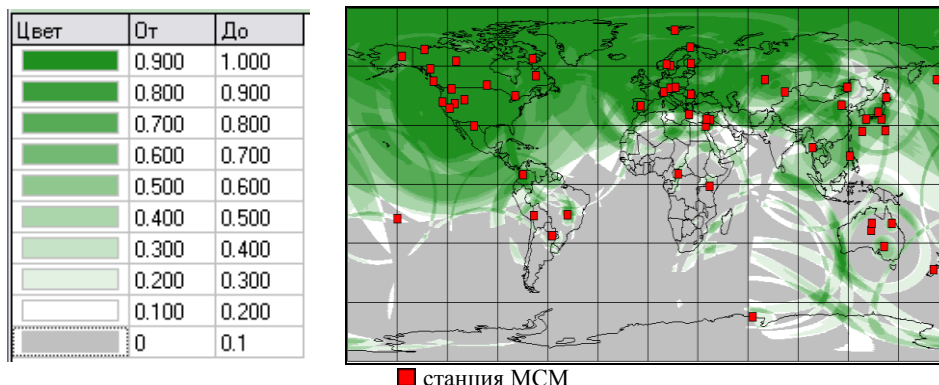


Рисунок 3. Пример расчета поля вероятности обнаружения явления. Параметры расчета: магнитуда - 3,3; минимальное число регистрирующих станций - 3; пороговое соотношение сигнал/шум (SDT)- 2

На основе расчетных полей вероятности строятся графики зависимости информативности обнаружения явлений с заданной вероятностью от магнитуды $I(m)$. Информативность рассчитывается для задаваемых значений: магнитуды, минимального количества регистрирующих станций, порогового отношения сигнал/шум. Примеры зависимости информативности от магнитуды $I(m)$ для различных конфигураций сейсмологических станций приведены на рисунке 4.

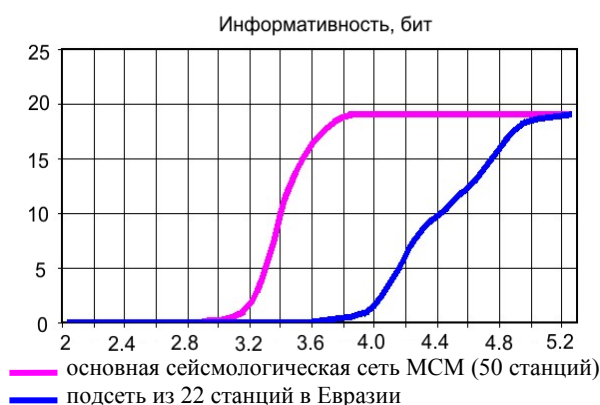


Рисунок 4. Примеры зависимости информативности сейсмологической подсистемы от магнитуды

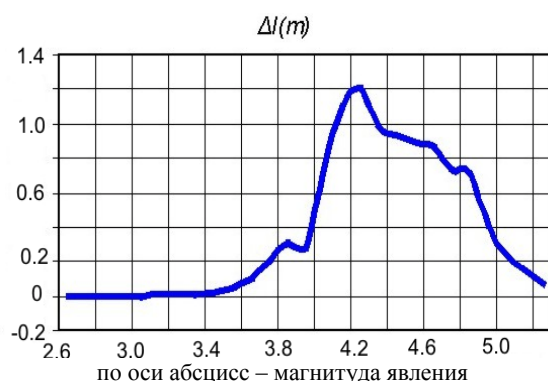


Рисунок 5. Пример снижения информативности сейсмологической подсети из 22 станций в Северной Евразии при отключении одной станции

Приведенные графики демонстрируют зависимость информативности от количества актуализированных сейсмологических станций.

Качество подсистемы сейсмологического мониторинга может снижаться в случае неработоспособности одной или нескольких станций. В технике работоспособность какой-либо системы может характеризоваться такими показателями как наработка на отказ и время восстановления. Однако эти показатели не позволяют судить о том, насколько снижается качество системы с точки зрения выполнения ее целевой функции. В качестве меры устойчивости сети станция мониторинга можно использовать величину снижения информативности при исключении из сети одного из элементов: $\Delta I = I_N - I_{(N-1)}$. Для анализа устойчивости сейсмологической подсистемы для каждой актуализированной подсети станций проводятся расчеты характеристик при последовательном исключении из списка одной из станций. Такая процедура имитирует отключение какой-либо сейсмологической станции и позволяет оценить роль отдельной станции в обеспечении информативности сейсмологической подсистемы в целом или ее отдельного сегмента. Исключая поочередно одну станцию из списка, можно получить величину среднего и предельного снижения информативности ΔI_{cp} , ΔI_{max} при отказе одной станции. Выполнив расчеты при различных значениях магнитуды, получим зависимости $\Delta I_{cp}(m)$ и $\Delta I_{max}(m)$, соответственно. На рисунке 5 показан пример снижения информативности в зависимости от магнитуды сейсмологической подсети из 22 станций в северной Евразии, включая Российские станции МСМ, при исключении (отключении) одной из станций. Из данного примера видно, что для локаций событий с магнитудой меньше 3,4 и больше 5,2, уменьшение (увеличение) количества станций практически не влияет на информативность подсети. Это объясняется тем, что площадь, на которой обнаруживаются слабые сейсмические сигналы, ограничена конфигурацией подсети, а события магнитудой 5 и выше регистрируются относительно редкой сетью станций мониторинга. На-

против, в области магнитуд от 3,6 от 5,0 исключение (добавление) сейсмологической станции снижает (повышает) информативность, и, соответственно, вероятность обнаружения сигналов от ЯВ. Динамика изменения информативности во времени позволяет оперативно оценить качество МСМ. На рисунках 6 показаны изменения информативности и устойчивости МСМ для действующей сейсмологической сети в период от 0 до 24 часов 31 марта 2008 г (информация поступала от 25 станций). На рисунке 6 приведена среднесуточная информативность МСМ (INF0), средняя по станциям (INFmidl) и минимальная информативность (INF min) при отключении одной станции. Из рисунка 6 видно резкое снижение качества МСМ в период с 01 до 03 часов, когда временно в МЦД не поступала информация от станции LPAZ. Небольшие изменения информативности (1 - 2 бит) в течение суток обусловлены вариациями сейсмического фона на станциях.

Из рисунков 6 видно резкое снижение качества МСМ в период с 01 до 03 час, когда временно в МЦД не поступала информация от станции LPAZ. Небольшие изменения информативности (1-2 бит) в течение суток обусловлены вариациями сейсмического фона на станциях.

Для оценки вклада отдельных сегментов в общую информативность МСМ проведены модельные расчеты. На рисунке 7 приведен пример зоны информативности различных сегментов сейсмологической сети МСМ.

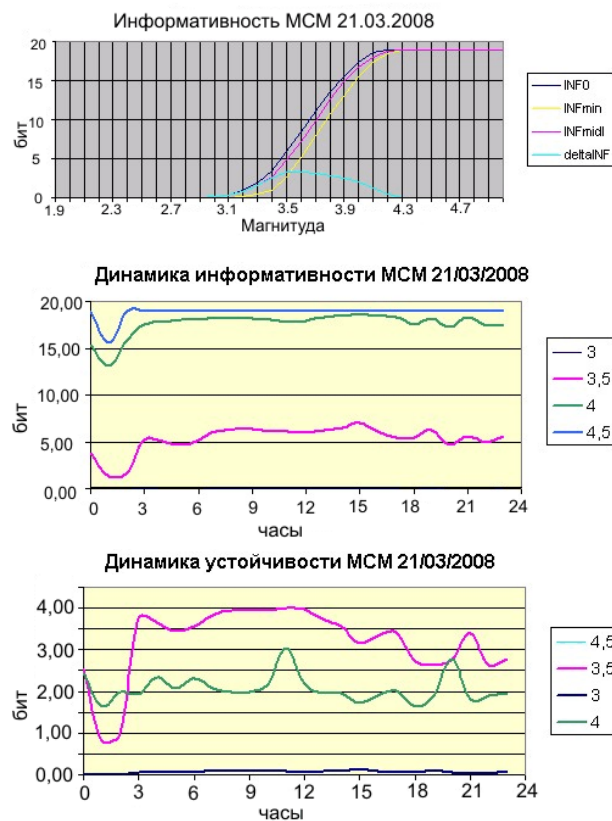
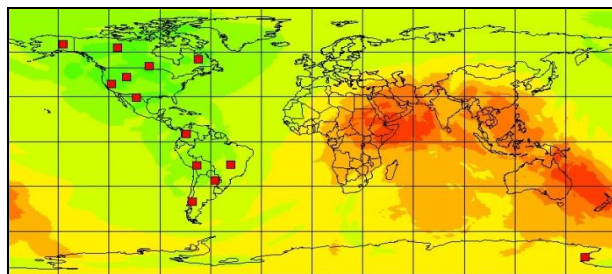
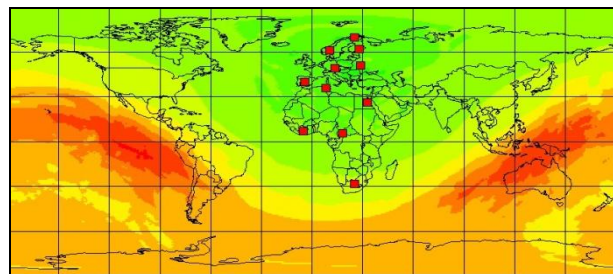


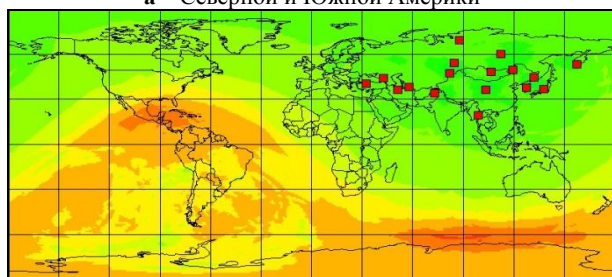
Рисунок 6. Динамика информативности сейсмологической сети МСМ в течение суток 21 марта 2008 г.



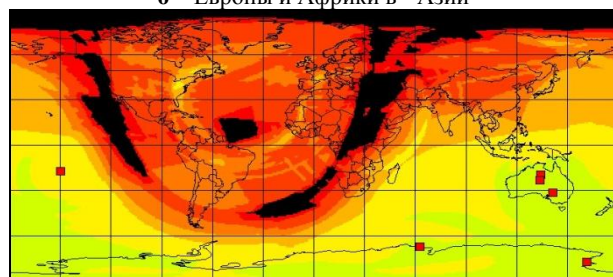
а – Северной и Южной Америки



б – Европы и Африки в - Азии



в – Австралии



г – Океании и Антарктиды

Цвет	От	До
Красный	4.90	5.00
Оранжевый	4.71	4.90
Желтый	4.52	4.71
Зеленый	4.32	4.52
Синий	4.13	4.32
Фиолетовый	3.93	4.13

Цвет	От	До
Светло-зеленый	3.74	3.93
Зеленый	3.55	3.74
Светло-зеленый	3.35	3.55
Зеленый	3.16	3.35
Светло-зеленый	2.97	3.16
Зеленый	2.77	2.97

Цвет	От	До
Светло-голубой	2.58	2.77
Синий	2.38	2.58
Светло-голубой	2.19	2.38
Синий	2.00	2.19
Светло-голубой	1.90	2.00

■ станция МСМ

Рисунок 7. Примеры оценки зон информативности подсетей сейсмологических станций МСМ для различных территорий

Таблица 2. Рассчитанная информативность различных сегментов сейсмологической сети МСМ

Магнитуда события	Информативность, бит				
	Северная и Южная Америка (13 станций)	Европа и Африка (11 станций)	Азия (17 станций)	Австралия, Океания и Антарктида (6 станций)	Сеть первичных станций МСМ
4,0	9,59	9,37	11,96	3,72	18,86
3,5	0,26	0,51	0,41	0,02	2,29

Полученные результаты позволяют наглядно продемонстрировать вклад отдельной национальной сети или группы станций в информативность МСМ. В таблице 2 приведены модельные оценки параметра информативности различных сегментов сейсмологической сети МСМ. Расчеты проведены при одинаковом значении сейсмического фона на всех станциях.

Результаты расчетов, приведенные в таблице 2, наряду с диаграммами отражают пространственную конфигурацию станций в каждом сегменте сейсмологической сети.

Таким образом, информативность является удобным параметром для оценки качества МСМ, её подсистем и отдельных национальных сегментов. По сравнению с другими методами контроля

качества МСМ, связанными с площадным распределением тех или иных характеристик, информативность служит обобщенным показателем качества, достаточно наглядно представляющим текущее состояние МСМ.

Выводы

Информативность, наряду с другими критериями, может служить удобной и наглядной оценкой качества МСМ, её подсистем, а также территориальных и национальных сегментов. Использование информативности в качестве обобщенного критерия и регулярное применение вычислительных процедур оценки информативности позволяет осуществлять оперативный контроль качества системы мониторинга.

ЛИТЕРАТУРА

1. Договор о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (ДВЗЯИ), ПК ОДВЗЯИ, Вена, Австрия, 2001.
2. Шилейко, А.В. Введение в информационную теорию систем / А.В. Шилейко, В.Ф. Кочнев, Ф.Ф. Химушин / М.: Радио и связь, 1985.
3. Михайлова, Н.Н., Синева З.И. Оценка эффективности группы PS23-Маканчи при регистрации региональных и телесеизмических событий / Н.Н. Михайлова, З.И. Синева // Вестник НЯЦ РК, 2004. – Вып. 2. – С. 13 - 19.
4. Кажомцев, Б.Б. Динамика и информация / Б.Б. Кажомцев // М.: Редакция журнала «Успехи физических наук», 1977. – 400 с
5. Эльтеков, А.Ю. Оценки информативности данных, представляемых Международной системой мониторинга по ДВЗЯИ: Материалы 6-го российско-китайского семинара по проблемам стратегической стабильности и контроля над вооружениями, 16-17 августа 2006 г. / А.Ю. Эльтеков [и др.] // М.: ИСС, 2006.
6. CTBT Integrated Verification System Evaluation Model (1997) Sandia Report. SAND97-2818, US-700.
7. Thorne, L. Arrowsmith Development of regional phase tomographic attenuation models for Eurasia / L. Thorne // 28th Seismic Research Review: Ground-Based Nuclear Explosion Monitoring Technologies, 2006.

ХАЛЫҚАРАЛЫҚ МОНИТОРИНГ ЖҮЙЕСІ МЕН ОНЫҢ ҰЛТТЫҚ СЕГМЕНТТЕРІН БАҒАЛАУЫНЫҢ ШАРАСЫ РЕТІНДЕГІ АҚПАРТТЫЛЫҚ

Эльтеков А.Ю., Хохлов Ю.П., Липатов А.В.

Импульс техникисы ғылыми-зерттеу институты, Ресей, Мәскеу

Мониторинг жүйелер – халықаралық, аумақтық, ұлттық, олардың сегменттері – сапасын бағалау үшін басқа параметрлермен қатар қорытынды критерий ретінде ақпараттылықты пайдалану мүмкінділігі талқылануда.

**SELF-DESCRIPTIVENESS AS A WAY TO ASSESS INTERNATIONAL
MONITORING SYSTEM AND ITS NATIONAL COMPONENTS**

A.Yu. Eltekov, Yu.P. Khokhlov, A.V. Lipatov

Scientific-Research Institute of Pulse Technique, Moscow, Russia

A possibility to use self-descriptiveness as generalized criterion along with other parameters for monitoring system quality assessment – international, territorial, national, and their components – is proposed.

УДК 504.064.3:621.039.9

SEISMIC AND INFRASONIC MONITORING OF THE EUROPEAN ARCTIC

F. Ringdal, T. Kværna, S.J. Gibbons, S. Mykkeltveit, J. Schweitzer

NORSAR, Kjeller, Norway

Scientists at NORSAR have for a number of years conducted research to improve seismic and infrasonic monitoring tools at regional distances, with emphasis on the European Arctic region, which includes the former Novaya Zemlya test site. This presentation will concentrate on two aspects which are currently being focused upon: 1) Study of high-frequency signal propagation across the Barents Sea, using newly installed seismic instrumentation, 2) Development of a regional infrasound network in Fennoscandia and Northwest Russia, and initial research results from combined seismic / infrasonic processing.

REGIONAL PROCESSING

Norway will host six monitoring stations (Figure 1) in the International Monitoring System (IMS): two primary seismic arrays (ARCES near Karasjok and the NORSAR array near Hamar), two auxiliary seismic stations (Spitsbergen array and Jan Mayen), one radionuclide station (Spitsbergen) and one infrasound array (Karasjok). Five of the stations are currently providing data to the IDC, while the sixth station (the infrasound array) has not yet been built.

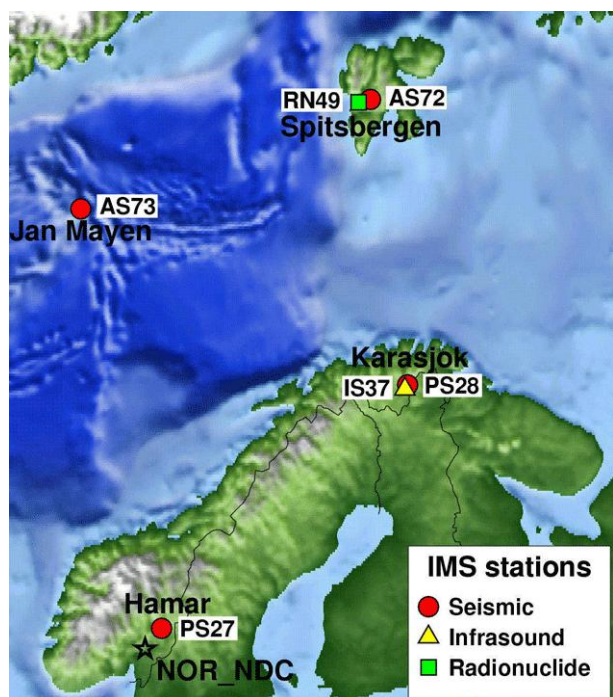


Figure 1. Map showing the location of the Norwegian IMS stations

Ever since NORSAR was established in 1968, the focus of research has been upon developing advanced array processing techniques. Originally, NORSAR was constructed as a large aperture array, with an initial diameter of 100 km, and 22 subarrays comprising a total of 132 short period and 22 three-component long-period seismometers. NORSAR is still the largest stand-alone array in the world, even after it was reduced in size to 60 km

diameter (7 subarrays) in 1976. From the beginning, the research at NORSAR focused on processing techniques for large, so-called teleseismic arrays.

In the 1980s, emphasis shifted to smaller arrays, since the prospects of in-country stations for CTBT monitoring were emerging. This resulted in the first regional array, NORES, which was constructed in southern Norway in 1984, and had 25 seismometer sites within an area of only 3 km in diameter. A sister array, ARCES, was established in northern Norway in 1987. NORES, ARCES and later the Spitsbergen array have since become the standard for arrays in the International Monitoring System.

The relative size of the arrays range from a diameter of 60 km for the array at Hamar, to 3 km at Karasjok and 1 km at Spitsbergen. Naturally, different processing techniques are required for arrays of such vastly different sizes. In the case of the large NORSAR array, the signals are only partially coherent across the array, and therefore standard plane-wave delay and sum beamforming does not provide optimum processing. On the other hand, the smaller arrays often exhibit coherent noise, and this must be appropriately taken into account when devising processing methodology. The current regional processing system at the NORSAR Data Center comprises the following steps:

- Automatic single array processing, using a suite of bandpass filters in parallel and a beam deployment that covers both P and S type phases for the region of interest.
- An STA/LTA detector applied independently to each beam, with broadband f-k analysis for each detected phase in order to estimate azimuth and phase velocity.
- Single-array phase association for initial location of seismic events, and also for the purpose of chaining together phases belonging to the same event, so as to prepare for the subsequent multi-array processing.
- Multi-array event detection, using the Generalized Beamforming (GBF) approach to associate phases from all stations in the regional network and thereby provide automatic network locations for events in all of northern Europe. The result-

ing automatic event list is made available on the Internet (www.norsar.no).

- Interactive analysis of selected events, resulting in a reviewed regional seismic bulletin, which includes hypocentral information, magnitudes and selected waveform plots. This reviewed bulletin is also available on the Internet.

The 90% detection threshold for this network is $m_b=2.5$ or better in large parts of the European Arctic. Even at Novaya Zemlya, which is more than 1000 km from the closest array, several seismic events of m_b well below 3.0 have been detected and located.

HIGH-FREQUENCY PROPAGATION OF SEISMIC SIGNALS ACROSS THE BARENTS SEA

The upgrade in 2004-2005 of the Spitsbergen seismic array, which has included installation of five new three-component seismometers, as well as an increase in the sampling rate from 40 to 80 Hz, has resulted in significant improvements in S-phase detection. Furthermore, the increased sample rate has made possible more detailed studies of high-frequency propagation in the vicinity of the array.

We demonstrate some results from analysis of recent small seismic events near Novaya Zemlya and in the Barents Sea (Table 1). The events are also shown in Figure 2.

These four events are particularly important since they were the first recordings from Novaya Zemlya after the SPITS array was upgraded in 2004-2005. One important feature of this upgrade was an increase in the sampling rate from 40 to 80 samples per seconds, which means that signals at much higher frequencies can be analyzed than was possible before the upgrade. Figure 3 shows spectrograms of the Spitsbergen B1 seismometer (vertical component) for the Novaya Zemlya event on 5 March 2006.

The waveform is plotted below the spectrogram. The most noticeable feature is the high SNR of the P-phase for this small ($m_b=2.65$) event. In fact, the SNR on the array beam is above 100, indicating that even an event at this site more than an order of magnitude smaller

could have been detected. Furthermore, the amount of high-frequency energy is remarkable, taking into account the large epicentral distance (more than 1000 km). There is significant P-wave energy even above 20 Hz. The high signal-to-noise ratios at these frequencies is further demonstrated in Figure 4, which shows data from the same seismometer filtered in various frequency bands. This observation is important both from a scientific point of view and for the future possibilities of identifying small seismic events in the region.

Another feature of the SPITS upgrade has been the introduction of several three-component stations in the array. This has significantly improved the possibility of detecting S-phases, which is essential in order to monitor the smallest seismic events.

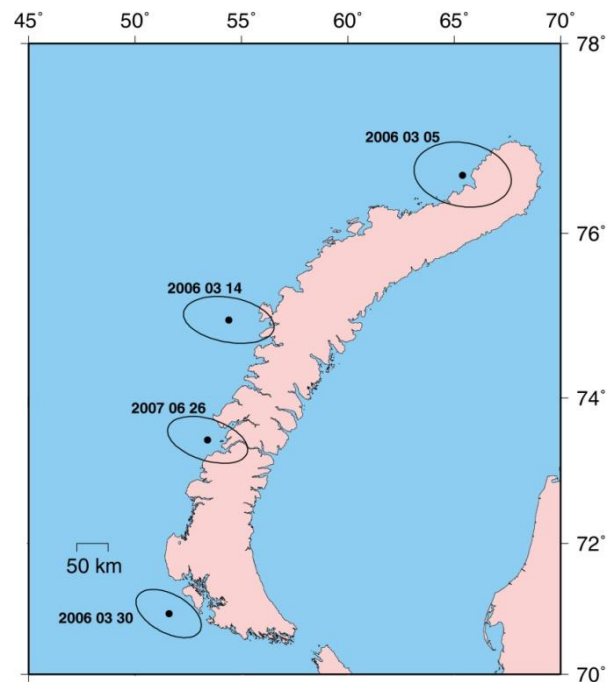


Figure 2. The map shows seismic events near Novaya Zemlya that have been recorded by NORSAR's systems during 2006 and 2007. The ellipses denote the 90% uncertainty in the estimated locations

Table 1. Seismic events near Novaya Zemlya detected during 01.2006 - 01.2008

Date	Origin time	Latitude (N)	Longitude (E)	Magnitude (mb)
05/03/2006	23.17.35.7	76.80	66.04	2.65
14/03/2006	20.57.02.4	75.07	53.05	2.23
30/03/2006	10.46.02.8	70.79	51.50	2.30
26/06/2007	03.19.05.0	73.45	53.43	2.75

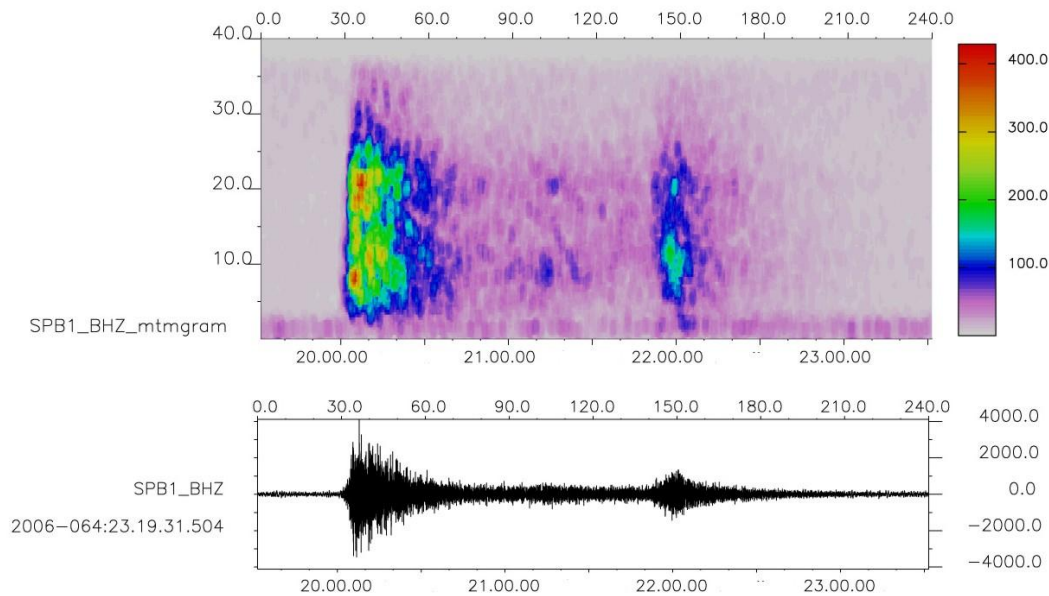


Figure 3. Spectrograms of the Spitsbergen B1 seismometer (vertical component) for the Novaya Zemlya event on 5 March 2006. The waveform is plotted below the spectrogram

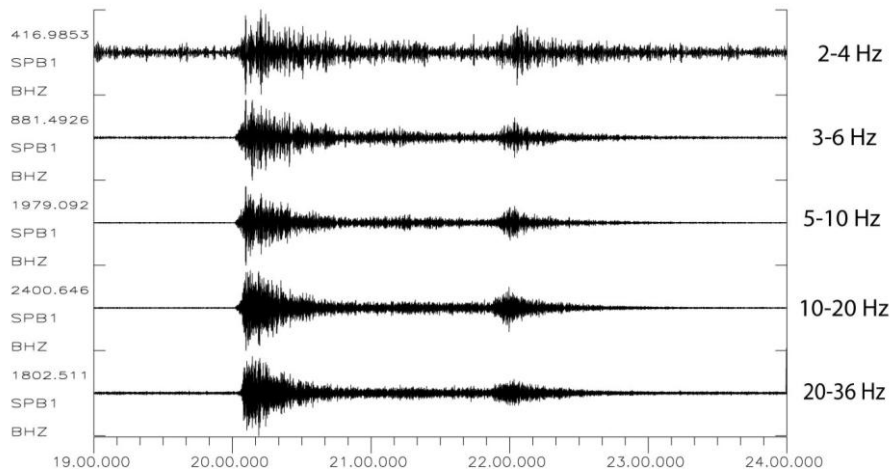


Figure 4. The small event near Novaya Zemlya on 5 March 2006 as recorded by the Spitsbergen B1 seismometer (vertical component) filtered in different frequency bands

This is illustrated in Figure 5, which shows selected Spitsbergen array beams for the 5 March 2006 Novaya Zemlya event. The top trace is a beam steered to the epicenter with a P-wave velocity, and using a typical detection filter (3-16 Hz). Note that the S-wave on this trace is fairly small, and would give a fairly marginal detection by the automatic process. The middle trace is an “optimum” beam designed to detect the S-wave. It represents the beams of the transverse components of the six three-component seismometers in the array, filtered in the band 2-4 Hz and steered to the epicenter with an S-phase velocity. Note the greatly improved gain in signal-to-noise ratio (SNR) on this trace. The bottom trace shows, for comparison, an S-beam of vertical sensors using the same (2-4 Hz) filter. Clearly, the detection of S-phases can be greatly improved by augmenting the beam deployment with several steered

beams, rotated so as to provide transverse components, toward the grid points in the beam deployment system. This is one of the research results that have been implemented in the NORSAR regional processing system.

We have recently (in March 2008) installed a high-frequency 3-component seismometer in the ARCES array in northern Norway. With a sampling rate of 100 Hz (as opposed to the 40 Hz sampling rate available until now), this installation gives us an opportunity to assess the high-frequency characteristics of seismic phases recorded at the ARCES array. Initial results show that the propagation from Spitsbergen to ARCES across the Barents Sea is quite similar to the propagation from Novaya Zemlya to Spitsbergen. Further details will be presented at the meeting.

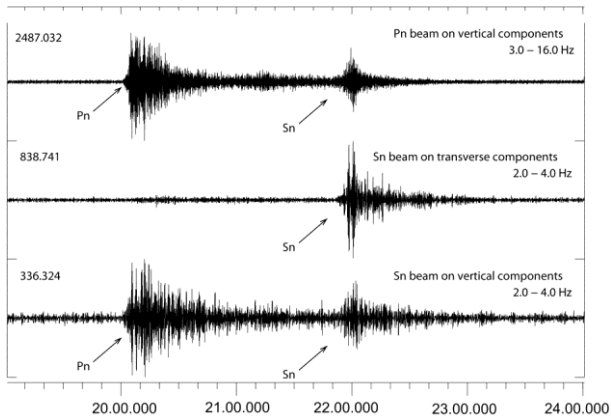


Figure 5. Results from processing horizontal as well as vertical components of the Spitsbergen array for the small event near Novaya Zemlya on 5 March 2006

COMBINED SEISMIC/ INFRASONIC STUDIES

NORSAR has in recent years devoted considerable resources to the study of joint seismic/infrasonic monitoring. The infrasonic studies are a relatively new topic at NORSAR. An important aspect of infrasonic studies (like for the seismic studies) is the availability of data from a distributed network of arrays. The Swedish infrasonic array network provides a useful supplement to the seismic and infrasonic arrays in Norway and NW Russia. We have begun exploiting the data from this combined network (Figure 6), which will allow a much improved joint seismic/infrasonic regional processing at NORSAR.

The Apatity infrasonic array is a three-element array co-located with the nine-element Apatity short-period regional seismic array, which was installed in 1992 on the Kola Peninsula, Russia by the Kola Regional Seismological Centre (KRSC). The 25 element ARCES array is a short-period regional seismic array, located in northern Norway. ARCES has no infrasonic sensors, but because of special near surface installation conditions, many of its seismic sensors are also sensitive to infrasonic signals. Current plans are to install an infrasonic array near the ARCES site in 2009. The Swedish Infrasonic Network has been in operation since the beginning of the 1970s. Operated by the Swedish Institute of Space Physics, the network has until recently comprised four infrasonic stations: Kiruna, Jamton, Lycksele and Uppsala. The station in Uppsala was moved to Sodankyla, Finland, during the summer of 2006.

We have carried out detailed studies of a particularly interesting data set, which comprises seismic and infrasonic recordings of a set of more than 100 surface explosions in northern Finland, carried out for the purpose of destroying old ammunition. (Explosion site 1 in Figure 6). Waveform correlation analysis indicates that these explosions were very closely spaced, and occurred at most within a few hundred meters of each other. This is a unique set of events given the repeatable nature of the source.

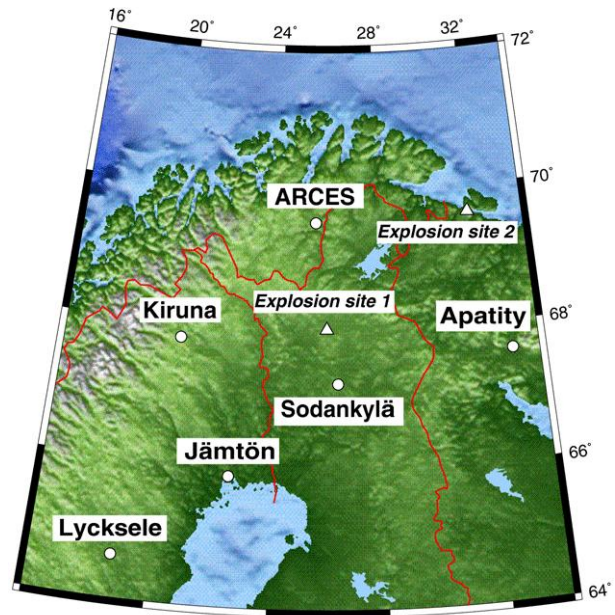


Figure 6. The current Nordic infrasonic network, along with two explosion sites of which we have made special studies

Typical seismic and infrasonic signals generated by these explosions are shown in Figure 7.

The figure shows waveform data from the ARCES seismic array one minute prior to and 14 minutes after a surface explosion in northern Finland at a distance of approximately 175 km. The top left panel shows waveforms on the central seismometer: the seismic P-phase (A), seismic S-phase (B), and an infrasonic arrival (C) approximately 640 seconds after the estimated origin time. The broadband f-k analysis plots (right side) indicate that all of these signals come from a backazimuth of about 173 degrees. The bottom left panel shows P, S and infrasonic array beams steered towards the epicenter, and illustrates the gain in signal-to-noise ratio resulting from the beamforming process.

As shown in Figure 8, very similar waveforms and amplitudes are observed for the seismic phase arrivals, indicating a similar explosion yield and source function for each event. In contrast, the infrasonic recordings show great variation between events, both with regard to the number and amplitudes of detected infrasonic phases, as well as their travel times. A large amplitude acoustic signal approximately 600 seconds following the origin time is observed for almost all of these events but, unlike the seismic signals which are almost identical for each explosion, the temporal nature and amplitudes of the acoustic signals differ greatly from event to event. A variation of several tens of seconds in travel times for corresponding phases for different events is observed at a distance of about 175 km.

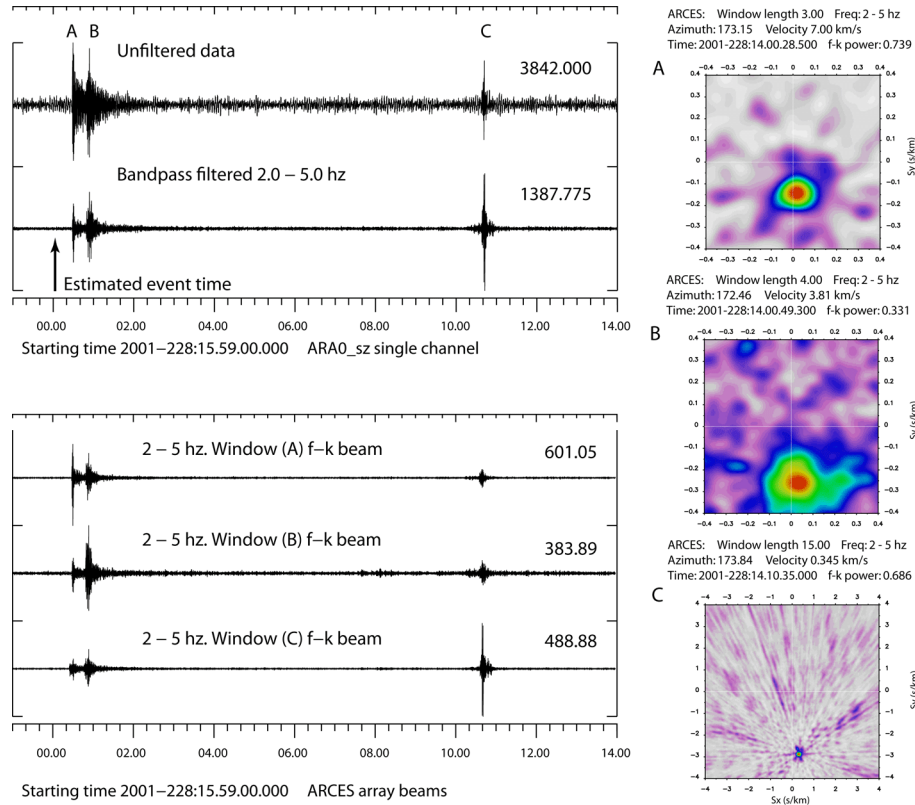


Figure 7. This figure shows various ARCES array beams together with results from frequency-wavenumber analysis of ARCES array data. See text for details.

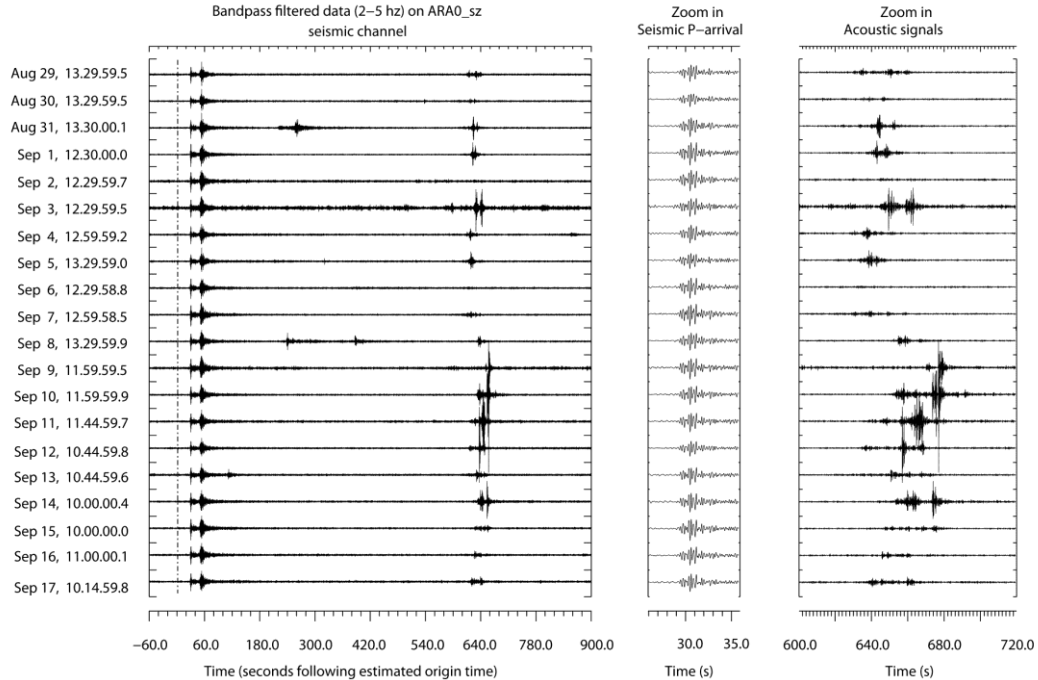


Figure 8. The plot shows time-aligned signals on the ARA0_sz sensor of the ARCES array for all the explosions at the northern Finland site which took place in the year 2002

FUTURE PLANS

The future research at NORSAR will continue to focus on improved automatic processing, with emphasis on use of array technology. While the need for analyst review will never completely disappear, the goal is to eliminate as many of the detailed analyst tasks as possible, by optimum use of advanced computer algorithms.

One of the current trends in ground-based nuclear explosion monitoring is increased emphasis on small seismic events recorded at local or near-regional distances. Therefore, the collection of reliable ground truth information for mining events and other seismic events with well-established source parameters will continue to be essential. Developing automatic methods for detection, location and magnitude estimation of seismic events at local distances will be a field of increasing importance in NORSAR's future research.

We will continue our work towards developing and evaluating full waveform correlation techniques, in particular with application to arrays. The correlation method requires ground-truth information at a site "close" to the target site. The term "close" is ambiguous, since at present it is not known how close to the

master event the target site must be in order for the correlation detector to remain effective. We will work towards determining the "footprint" of the correlation detector as a function of a variety of parameters (e.g. the filter band, the source-station distance, the type of phases recorded, the length and placement of the correlation window, and so on).

Arrays form the basic tools for monitoring small seismic events at regional distances. Many of the tools currently applied in array processing were first developed and tested at NORSAR. We will continue to work towards further improvement of array processing methods. An interesting application will be to routinely process infrasonic array data in conjunction with seismic data. In particular, joint seismic-infrasonic processing will become a focus of our research once the IMS infrasonic array at Karasjok, northern Norway, has been established. In the meantime, as demonstrated in this paper, we can use the seismic array at Karasjok also for detecting infrasound signals, but admittedly at a lower level of sensitivity that will be achieved once the IMS infrasonic array becomes operational.

**АРКТИКАНЫҢ ЕУРОПАЛЫҚ БӨЛШЕГІНДЕ СЕЙСМИКАЛЫҚ
ЖӘНЕ ИНФРАДЫБЫСТЫҚ МОНИТОРИНГІ**

Рингдал Ф., Кверна Т., Гиббонс С., Маккелтвейт С., Швайтцер Дж.

NORSAR, Норвегия

Бұрын болған Новая Земля полигоны кіретін Арктиканың Еуропалық бөлшегіне қатысты аумақтық қашықтықтарында сейсмикалық және инфрадыбыстық мониторингтің құралдарын жақсартуына бағытталған зерттеулерін көп жылдар ағымында NORSAR ғалымдары жүргізуде. Мақалада, осы кезде акценттелетін екі бағдар баяндалады: 1) жақында орнатылған сейсмикалық жабдықтарын қолдануымен Баренцев теңізі бойы жоғары жиілікті сигналдар таралуын зерделеу; 2) бірлескен сейсмикалық және инфрадыбыстық өңдеуінің бастапқы зерттеулік нәтижелерімен Ресейдің солтүстік-батысында Фенноскандиядағы аумақтық инфрадыбысты желісін дамыту.

СЕЙСМИЧЕСКИЙ И ИНФРАЗВУКОВОЙ МОНИТОРИНГ ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ АРКТИКИ

Рингдал Ф., Кверна Т., Гиббонс С., Маккелтвейт С., Швайтцер Дж.

NORSAR, Норвегия

Учеными NORSAR на протяжении ряда лет проводятся исследования, направленные на улучшение инструментов сейсмического и инфразвукового мониторинга на региональных расстояниях применительно к Европейской части Арктики, куда входит бывший полигон Новая Земля. В статье освещены два направления, на которых в настоящее время акцентируются исследования: 1) изучение распространения высокочастотных сигналов вдоль Баренцева моря с использованием недавно установленного сейсмического оборудования; 2) развитие региональной инфразвуковой сети в Фенноскандии на северо-западе России, начиная с исследовательских результатов совместной сейсмической и инфразвуковой обработки.

УДК 534.2:504.06(5)

РЕЗУЛЬТАТЫ ИНФРАЗВУКОВОГО МОНИТОРИНГА В г. ТОМСКЕ

Соловьев А.В., Колесник А.Г.

Томский государственный университет, Томск, Россия

Приведены результаты мониторинга вариаций инфразвукового фона в условиях г. Томска и статистическое описание его временной динамики. Показана выявленная суточная и сезонная изменчивость среднеквадратичного отклонения фоновых инфразвуковых колебаний давления. Предложено математическое описание спектрального состава инфразвуковых шумов.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование фоновых микропульсаций атмосферного давления являются актуальными при решении ряда прикладных и фундаментальных задач, к которым можно отнести, например, мониторинг ядерных испытаний, поиск нетрадиционных предвестников катастрофических возмущений атмосферы и земной поверхности, экологический контроль состояния окружающей среды и, наконец, медико-биологические исследования воздействия акустических полей на живые системы.

Опубликован ряд работ, описывающих инфразвуковую обстановку в разных частотных диапазонах и в различных регионах земного шара [1, 2]. Однако имеющиеся данные разрозненны и по ним сложно представить общую картину инфразвуковых шумов. Необходимы комплексные исследования закономерностей фоновых инфразвуковых флуктуаций давления, что позволит получить информацию о сезонно-суточных вариациях шумов в инфразвуковом диапазоне частот. Вместе с тем, появится возможность на основе сопоставления с данными других исследователей определить локальный или глобальный характер носят данные вариации. Статья посвящена описанию результатов исследований фоновых инфразвуковых флуктуаций давления, проводимых на базе инфразвукового мониторинга в условиях г. Томска.

1. АППАРАТУРА И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ МОНИТОРИНГА

Для исследования инфразвуковых колебаний давления в Сибирском физико-техническом институте (СФТИ) разработан и создан мобильный инфразвукометрический комплекс, предназначенный для регистрации микропульсаций атмосферного давления в диапазоне частот 0.01 - 50 Гц. Инфразвукометрический комплекс состоит из трех измерительных модулей и центральной станции (рисунок 1).

В качестве устройства преобразования акустических колебаний в электрические используется электретный микрофон МКЭ-3 с паспортной чувствительностью от 4 до 20 мВ/Па на частоте 1000 Гц. Предварительное усиление электрического сигнала производится в непосредственной близости от микрофона для уменьшения помеховых электрических сигналов и наводок. Активный фильтр нижних час-

тот Чебышева пятого порядка обеспечивает частоту среза 50 Гц. Усилитель с перестраиваемым коэффициентом усиления дает возможность выбора оптимального режима сбора данных для конкретной метеорологической обстановки.

Для оцифровки аналогового сигнала используется 12-разрядный аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Управление АЦП, формирование слова данных и передача оцифрованных данных на передающее устройство (ПУ) производится встроенным микропроцессором (МП).

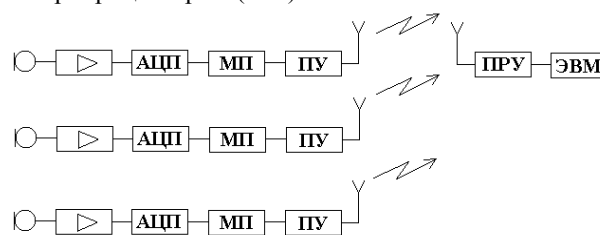


Рисунок 1. Блок-схема инфразвукометрического комплекса

Центральная станция обеспечивает прием и накопление цифровых данных, поступающих от измерительных модулей в потоковом режиме, и включает в себя приемное устройство (ПРУ), ЭВМ и пакет программного обеспечения.

Мобильность инфразвукометрического комплекса позволяет изменять конфигурацию и местоположение акустической антенной решетки, составленной из измерительных модулей, а также место расположения измерительного комплекса в целом. Использование трех измерительных модулей дает возможность производить пространственную фильтрацию акустических сигналов с определением углового положения источников инфразвука. Блочная структура измерительных модулей позволяет использовать для передачи оцифрованных данных на центральную станцию радиоканал, проводную связь или любое другое средство связи. Конструктивно каждый измерительный модуль может работать независимо от других.

Для абсолютной калибровки и последующей проверки измерительных модулей в СФТИ создан калибровочный стенд. Калибровка производится методом пистонфона, который является одним из основных методов абсолютной градуировки микрофонов

на инфразвуковых частотах [3]. Метод основан на изменении по гармоническому закону давления внутри измерительной камеры с жесткими стенками. Звуковое давление внутри камеры известного объема возбуждается при помощи поршневой системы, установленной на боковой стенке камеры. Пор-

шень приводится в движение двигателем, который снабжен ступенчатым редуктором. С использованием созданного калибровочного стенда была произведена абсолютная калибровка измерительных модулей и измерены их амплитудно-частотные характеристики (рисунок 2).

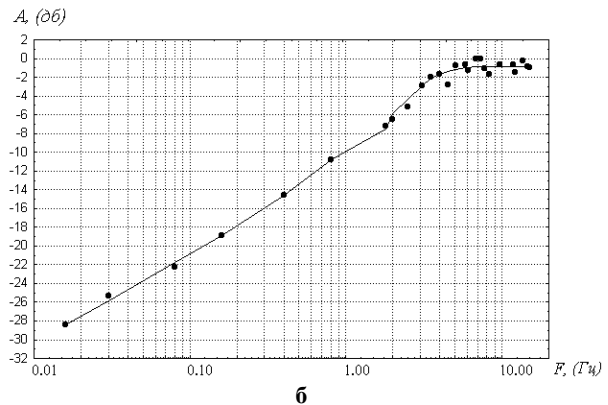
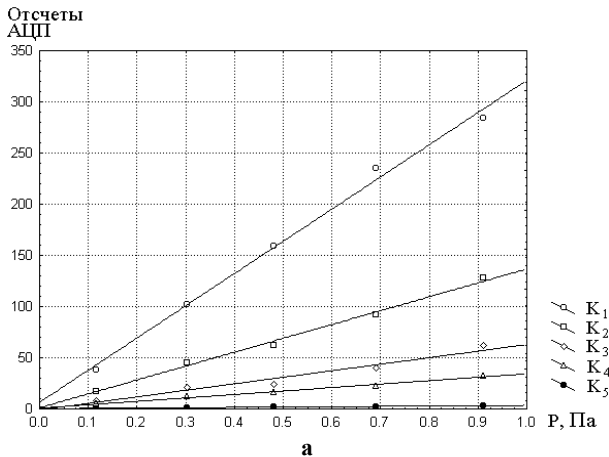


Рисунок 2. Калибровочные характеристики измерительного модуля при различных коэффициентах усиления (а), АЧХ измерительного модуля (б)

2. СЕЗОННО-СУТОЧНЫЕ ВАРИАЦИИ ФОНОВЫХ ИНФРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ДАВЛЕНИЯ

С 1.09.99 г. в СФТИ с помощью инфразвукометрического комплекса проводятся круглосуточные непрерывные измерения инфразвуковых колебаний давления. Анализ инфразвукометрических данных заключался в исследовании закономерностей изменения амплитуд фоновых инфразвуковых колебаний давления в диапазоне частот 0.01 - 1.6 Гц. Прежде всего, из исследуемого набора данных инфразвукового мониторинга исключались регистрограммы, полученные во время действия импульсных источников инфразвука, таких как, например, грозовые явления. Для исключения флуктуаций давления с частотами выше 1.6 Гц к исходным данным применялась цифровая низкочастотная фильтрация. Затем, для уменьшения локальных флуктуаций давления и, так называемого, "псевдозвука", связанного с порывами ветра, для каждого пятиминутного интервала измерений насчитаны взаимные спектры мощности $W_{12}(f)$:

$$W_{12}(f) = \frac{1}{T} S_1(f) S_2^*(f) A_1(f) A_2(f),$$

где $S_1(f)$, $S_2(f)$ - амплитудные спектры для первого и второго канала измерений; $A_1(f)$, $A_2(f)$ - амплитудно-частотные характеристики для первого и второго измерительного модуля; T - период измерений.

Известно, что интегрирование $W_{12}(f)$ по частоте позволяет получить общую мощность флуктуаций или дисперсию. Данный факт позволил получить среднеквадратичное отклонение микропульсаций атмосферного давления для каждого интервала измерений:

$$\sigma = \sqrt{\Delta f \sum_i W_{12}(f_i)},$$

где Δf - частотный интервал между спектральными составляющими дискретного взаимного спектра мощности $W_{12}(f)$.

Анализ среднеквадратичных отклонений за исследуемый промежуток времени показал увеличение уровня шумов в зимние месяцы и их уменьшение в летние месяцы (рисунок 3), что не противоречит литературным данным [1, 2].

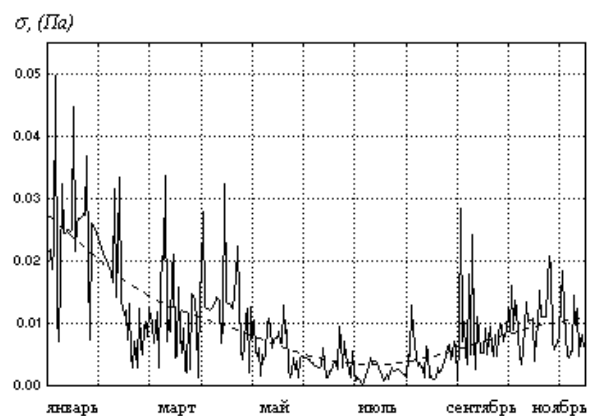


Рисунок 3. Сезонное изменение среднеквадратичного отклонения микропульсаций атмосферного давления

В [2] описаны результаты измерений инфразвуковых шумов в диапазоне частот 0.1 - 1 Гц с использованием инфразвукометрического комплекса СиБИЗ-МИР СО АН СССР, проведенных в 150 км к юго-западу от г. Иркутска. В годовом ходе инфразвуковых

шумов, приведенном авторами, так же установлено увеличение уровня шумов в зимнее время года. В [2] высказана гипотеза, что основные источники фонового инфразвука находятся в области метеорологических центров действия (или пониженного давления) в Тихом (Алеутский) и Атлантическом (Исландский) океанах. В [2] описана также связь между инфразвуковой эмиссией от морской поверхности (микробаромы) по данным регистрации во Фрибурге и высотой океанских волн в Северной Атлантике. Данная зависимость подтверждена другими авторами, изучавшими направления прихода микробаромов и указывавшими на происхождение микробаромов от сильных морских штормов. Следует отметить, что спектр микробаромов лежит в частотной области 0.1 - 0.3 Гц с максимумом на частоте 0.15 Гц.

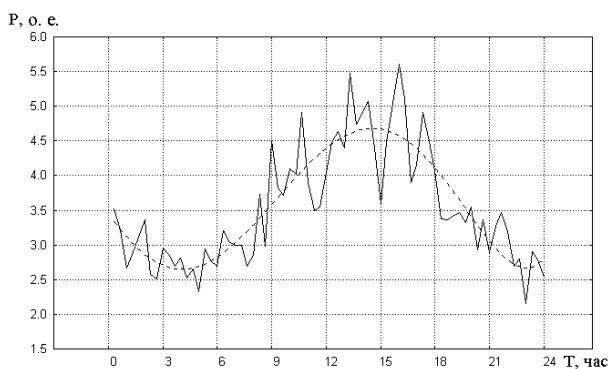


Рисунок 4. Суточное изменение микропульсаций атмосферного давления

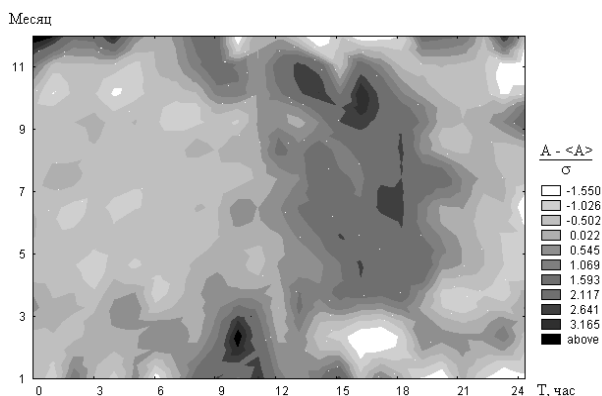


Рисунок 5. Сезонное изменение суточных вариаций микропульсаций атмосферного давления

Для выявления суточных изменений интенсивности инфразвуковых шумов анализу были подвергнуты суточные ряды среднеквадратичных отклонений амплитуд колебаний давления без учета АЧХ измерительной аппаратуры. Анализ позволил выявить качественную картину суточного хода среднеквадратичного отклонения микропульсаций атмосферного давления. На рисунке 4 показан среднемесячный суточ-

ный ход среднеквадратичного отклонения для сентября месяца 2000 г. Форма суточного хода является характерной для всего анализируемого периода измерений. Вместе с тем, наблюдаются сезонные изменения суточного хода среднеквадратичного отклонения инфразвуковых колебаний давления (рисунок 5).

Изменение суточного хода в зависимости от сезона года заключается в смещении максимального значения среднеквадратичного отклонения, которое наблюдается около 16 час в летнее время и приблизительно в 11 час в зимнее время года.

3. СПЕКТРАЛЬНЫЙ СОСТАВ ФОНОВЫХ ИНФРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ДАВЛЕНИЯ

Для определения особенностей спектрального состава фоновых микропульсаций атмосферного давления проведен анализ энергетических спектров для всего периода круглосуточных измерений - с 01.11.2000 г. по 30.11.2000 г. Полный объем анализируемой выборки за этот временной интервал составил порядка 2000 регистрограмм. При построении энергетических спектров применена цифровая фильтрация с шириной полосы пропускания в пол-октавы для выявления регулярных спектральных составляющих. Каждый энергетический спектр нормирован на собственную дисперсию. В результате получены усредненный нормированный энергетический спектр для регистрограмм каждого измерительного модуля в отдельности (рисунок 6 а) и усредненный нормированный взаимный энергетический спектр (рисунок 6 б).

Общая форма спектров не противоречит литературным данным [1, 4]. Отличительной чертой взаимного энергетического спектра от спектра, рассчитанного по регистрограммам одиночного измерительного модуля, является более резкое падение амплитуды спектральных составляющих в области высоких частот, больше, чем приблизительно 0,03 Гц. Зависимость амплитуды энергетического спектра, рассчитанного по регистрограммам одиночного измерительного модуля (рисунок 6, а), от частоты ап-

проксимируется соотношением: $S(f) \approx f^{-\frac{5}{3}}$. Данная зависимость связана с наличием в спектре так называемого "псевдозвука", причиной которого являются пульсации скорости ветровых потоков в месте измерений. Амплитуда взаимного энергетического спектра аппроксимируется соотношением:

$S(f) \approx f^{-\frac{7}{3}}$. Таким образом, при вычислении взаимного энергетического спектра удастся избежать влияния локальных флуктуаций давления в зоне расположения измерительных модулей.

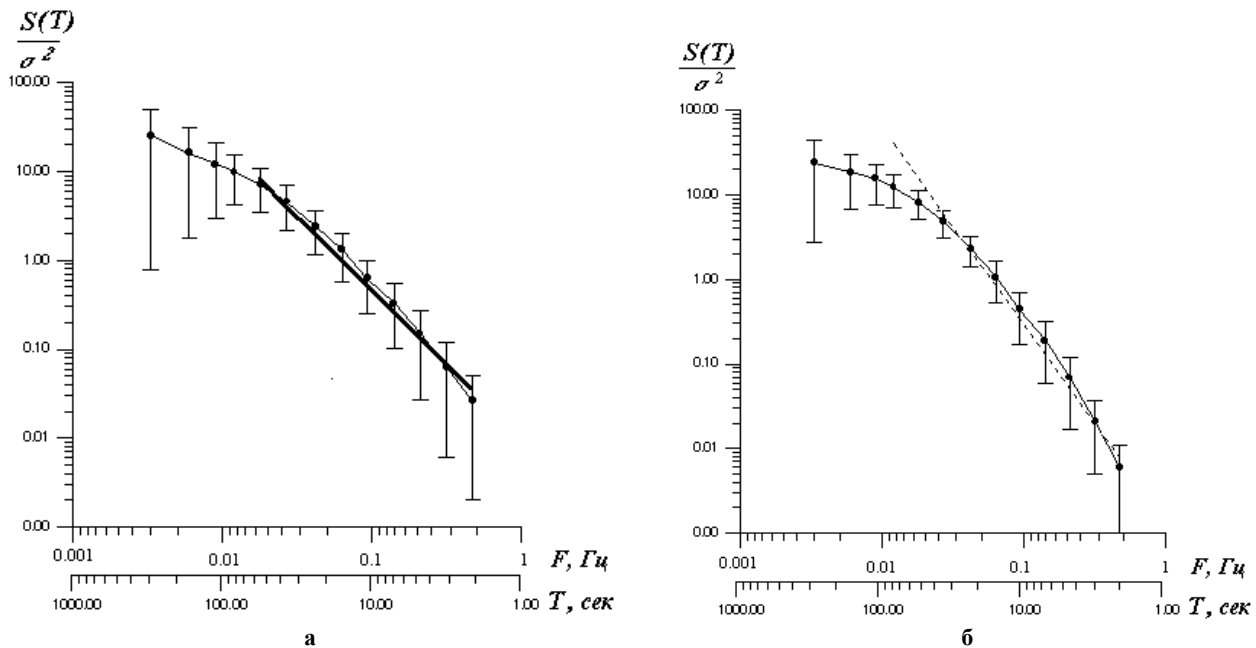


Рисунок 6. Нормированный энергетический спектр регистрограмм одиночного измерительного модуля (а) и взаимный нормированный взаимный энергетический спектр (б)

В случае, когда в спектральном составе нет ярко выраженных характерных частот, наглядное представление распределения энергии по спектру можно получить, рассматривая энергию, приходящуюся на интервал частот, порядка самой частоты [4]. На рисунке 7 представлен усредненный взаимный энергетический спектр, рассчитанный по спектрам, умноженных на частоту спектральных составляющих и нормированных на собственную дисперсию. Характерной чертой данного спектра является наличие максимума в области периодов от 20 до 100 сек, что также согласуется с литературными данными [4].

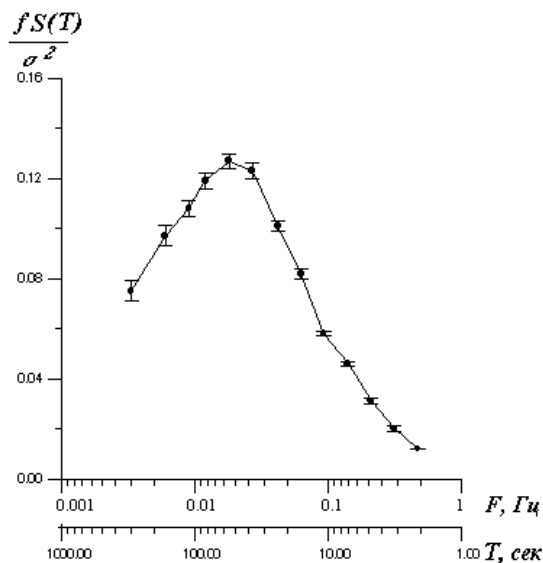


Рисунок 7. Усредненный взаимный энергетический спектр

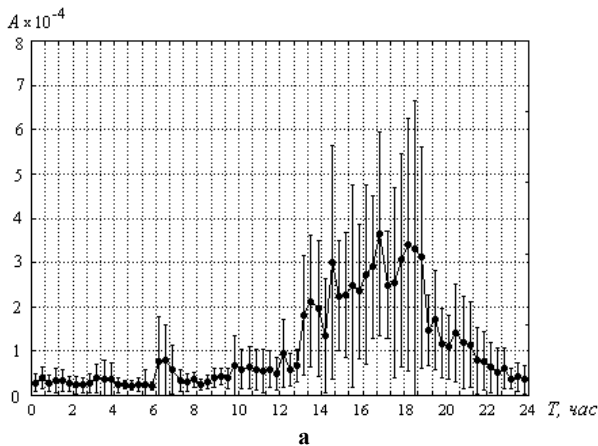
Для выявления временной устойчивости формы спектральной плотности инфразвукового фона использована эмпирическая функция:

$$S(f) = Af^B, \quad (1)$$

Анализу методом наименьших квадратов подвержены спектральные плотности фоновых микропульсаций атмосферного давления за период круглосуточных измерений с 01.01.2000 г по 30.12.2001 г. В ходе анализа были выявлены суточные изменения коэффициентов функциональной зависимости, которые описывают суточное изменение уровня инфразвукового фона (рисунок 8 а), и суточную трансформацию формы спектральной плотности (рисунок 8 б). На данных рисунках представлены усредненные суточные изменения параметров для всего периода измерений. Усреднение проведено по ансамблю суточных реализаций коэффициентов аппроксимации, где среднее рассчитывалось по величинам, соответствующим каждому временному срезу суточных измерений.

Как следует из рисунка 8, суточное изменение уровня инфразвукового фона сопровождается увеличением амплитуд флуктуаций в дневное время с максимумом приблизительно в 17 час местного времени и уменьшением в ночное время. Суточная трансформация формы спектральной плотности сопровождается увеличением уровня высокочастотных составляющих спектра в дневное время суток с максимумом в 17 час местного времени и уменьшением в ночное время с минимумом в 6 час местного времени. Качественная картина суточного изменения параметров аппроксимации спектральной плотности является характерной для всего периода измерений.

Для определения сезонных особенностей изменения коэффициента A в формуле (1) вычислены медианные значения для месячных интервалов измерений. Медианное значение коэффициента A в качестве оценочного параметра было выбрано исходя из того, что временное изменение коэффициента A имеет достаточно резкий подъем и значительный разброс в дневное время суток (рисунок 8 а). Медианное значение более устойчиво к резким изменениям оцениваемого параметра по сравнению со средним значением. Для оценки разброса значений коэффициента A рассчитаны верхние и нижние квартили.



На рисунке 9 а представлено сезонное изменение коэффициента A для двухлетнего периода измерений инфразвукового фона. Качественно сезонное изменение коэффициента A совпадает с полученным ранее сезонным изменением среднеквадратичного отклонения амплитудных значений инфразвуковых шумов (рисунок 3). Обращает на себя внимание значительный разброс величин коэффициента A в зимнее время года, что объясняется усилением метеорологической активности [1, 5]. Плавной линией указан сезонный тренд коэффициента A .

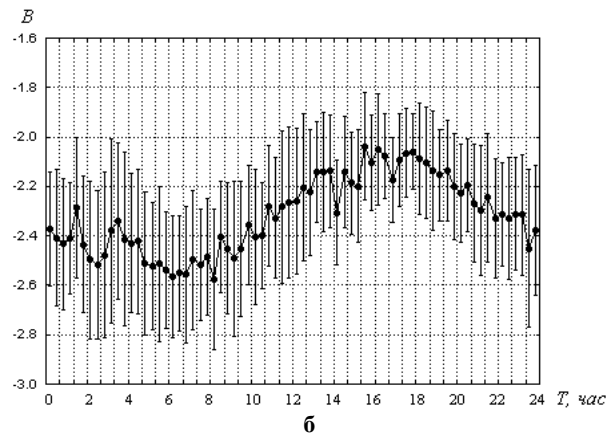


Рисунок 8. Суточное изменение коэффициента A (а) и коэффициента B (б) формулы (1)

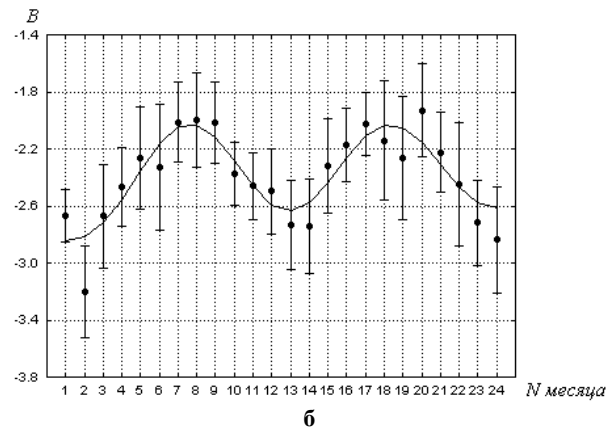
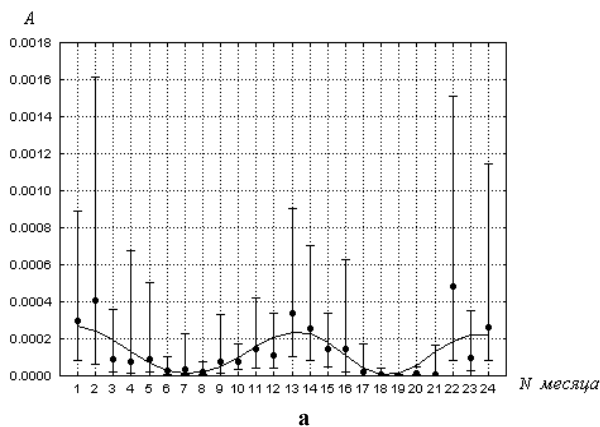


Рисунок 9. Сезонное изменение коэффициента A (а), сезонное изменение коэффициента B (б)

Для определения сезонного изменения величины коэффициента B рассчитаны ее среднемесячные значения. Разброс значений оценен по величине среднеквадратического отклонения. Сезонное изменение величины коэффициента B состоит в увеличении его значений в летнее время года и уменьшении в зимнее время года (рисунок 9 б). В летнее время года величина коэффициента B составляет в среднем (-2) , в зимнее время года (-2.8) . Обращает на себя внимание, что сезонные вариации показателя степени частоты (коэффициента B) в среднем происходят относительно величины $(-7/3)$. Коэффициент детер-

минации для всего анализируемого периода составил в среднем 86%.

Для восстановления интенсивности фоновых инфразвуковых шумов, регистрируемых в г. Томске использованы среднемесячные значения коэффициентов эмпирической функции (1). Сезонное изменение уровня инфразвуковых шумов на частоте 0.1 Гц, регистрируемых в г. Томске, качественно и количественно совпадают с данными регистрации инфразвуковых шумов, зарегистрированных инфразвукометрическим комплексом СиБИЗМИР СО РАН (рисунок 10).

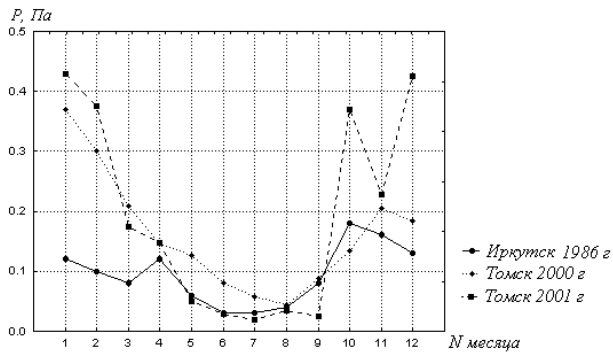


Рисунок 10. Сравнение данных регистрации инфразвукового фона на частоте 0.1 Гц в г. Томске с данными регистрации инфразвуковых шумов на инфразукометрическом комплексе СиБИЗМИР СО РАН в г. Иркутск

Некоторое расхождение полученных данных можно объяснить следующим образом. Во-первых, каждый микрофон конструкции СиБИЗМИР оборудован линейным пространственным фильтром, увеличивающим соотношение полезного сигнала к атмосферному шуму в регистрируемом спектре в 3 - 5 раз, в то время как данные регистрации в г. Томске получены с применением пространственной фильтрации. Во-вторых, данные регистрации инфразвуковых шумов на инфразукометрическом комплексе СиБИЗМИР СО РАН приведены для периода безветренной погоды, когда уровень шумов минимален. Результаты регистрации инфразвуковых шумов в г. Томске характеризуют состояние атмосферы в пункте регистрации за двухлетний период измерений без дифференциации по погодным условиям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных исследований и сопоставления результатов с данными других авторов можно сделать вывод о едином сезонном изменении интенсивности флуктуаций давления в диапазоне частот 0.01 - 1 Гц для различных регионов земного шара. В то же время нельзя отрицать различий в количественных характеристиках, связанных с региональными особенностями мест регистрации при сохранении общей качественной картины инфразвукового фона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Госсард, Э. Волны в атмосфере / Э. Госсард, У.Х. Хук // М: Мир, 1978. – 532 с.
2. Ерущенков, А.И. Уровень инфразвукового шума атмосферного давления в диапазоне частот 0,1 - 1 Гц / А. И. Ерущенков, Н. А. Смирнов, А. Г. Сорокин // XI Всесоюзная акустическая конференция. - М., 1991. – С. 13 - 16.
3. Коньков, А. В. О методе пистонфона / А.В. Коньков // Акустические измерения, 1976. – С. 5 - 13.
4. Голицин, Г.С. О временном спектре микропульсаций атмосферного давления / Г.С. Голицин // Изв. АН СССР. – 1964. – № 8. – С. 1253 - 1258.
5. Обухов, А.М. Турбулентность и динамика атмосферы / А.М. Обухов. - Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 412 с.
6. Ламли, Дж. Структура атмосферной турбулентности / Дж. Ламли, Г. Пановский. - М: Мир, 1966. – 263 с.

Физическую интерпретацию полученных результатов на данном этапе можно делать только на уровне предположений. Суточные колебания амплитуд инфразвукового давления, вероятно связаны с суточными термическими приливами. В случае справедливости данной гипотезы основными источниками фоновых инфразвуковых колебаний следует считать возмущения турбулентного характера в верхней атмосфере. В пользу данного предположения свидетельствует сезонное смещение максимума среднеквадратичных отклонений инфразвуковых колебаний в сторону времени максимального прогрева атмосферы. Спектральный анализ так же свидетельствует о турбулентном происхождении флуктуаций в указанном диапазоне частот. Данный факт подтверждает амплитудно-частотная аппроксимация турбулентного энергетического спектра, выведенная А.М. Обуховым [5, 6]. В случае турбулентной природы источников инфразвуковых колебаний давления амплитуда энергетического спектра должна быть пропорциональна $S(f) \approx f^{-\frac{7}{3}}$.

Зависимость амплитуды энергетического спектра, рассчитанного по регистрациям одиночного измерительного модуля, от частоты как $S(f) \approx f^{-\frac{5}{3}}$ связана с наличием в спектре, так называемого, "псевдозвука", причиной которого являются пульсации скорости ветровых потоков в месте измерений.

Для того, чтобы математически описать фоновые инфразвуковые колебания давления необходимо учитывать следующее: во-первых, по расчетам А.М. Обухова [5] структурная функция поля давления пропорциональна квадрату продольной компоненты структурной функции поля скоростей в турбулентном потоке, т.е. связь данных величин нелинейная; во-вторых, необходимо учитывать параметры окружающей среды, влияющие на образование турбулентных потоков и диссипацию энергии в рассматриваемом потоке. Другими словами, фоновые инфразвуковые колебания давления должны выражаться в виде многопараметрической функции параметров окружающей среды.

ТОМСК ҚАЛАСЫНДА ИНФРАДЫБЫСТЫ МОНИТОРИНГТІҢ НӘТИЖЕЛЕРІ

Соловьев А.В., Колесник А.Г.

Томск мемлекеттік университеті, Томск, Ресей

Томск қаласы жағдайларында инфрадыбысты ая вариацияларының мониторингі нәтижелері мен оның уақыттық динамикасының статистикалық сипаттамасы келтірілген. Қысымның ая инфрадыбысты тербелістердің квадраттық орташа ауытқуының айқындалған тәуліктік және маусымдық өзгеруі көрсетілген. Инфрадыбысты шулардың спектрлік құрамының математикалық сипаттамасы ұсынылған.

RESULTS OF INFRASONIC MONITORING IN A TOMSK

A.V. Solovyev, A.G. Kolesnik

Tomsk State University, Tomsk, Russia

Monitoring results of infrasonic background variations within Tomsk and statistical description of time dynamics are given. Daily and seasonal variability of a root-mean-square deviation of pressure background infrasonic fluctuations is shown. The mathematical description of infrasonic noise spectral structure is proposed.

УДК 534.2:550.34

К ВОПРОСУ РЕГИСТРАЦИИ ХИМИЧЕСКИХ ВЗРЫВОВ ИНФРАЗВУКОВЫМ МЕТОДОМ ОБНАРУЖЕНИЯ

Васильев А.П.

Служба специального контроля Министерства обороны Российской Федерации, Москва

Анализируются данные трех инфразвуковых станций Международной системы мониторинга (I26, I31, I46) зарегистрировавших взрыв на словацком заводе боеприпасов 02.03.2007 г. и обсуждаются возможные причины полученных больших расхождений в определении параметров взрыва. Используются бюллетени Международного центра данных REB (Reviewed event bulletin) и привлечены литературные данные по химическим взрывам. Для повышения достоверности обнаружения подобных источников предлагается использовать при анализе форму зарегистрированных волн.

2 марта 2007 г. на словацком заводе боеприпасов произошёл взрыв. Взрывной волной один цех был сравнен с землёй, другие здания сильно разрушены. Были жертвы и много раненых [1]. Данное событие стало источником первого инфразвукового явления, отраженного в бюллетене Международного центра данных REB (Reviewed event bulletin) в 2007 г. Для определения местоположения источника в автоматическом режиме (бюллетень SEL3 - Standard Event Lists-3) использованы инфразвуковые фазы, зарегистрированные тремя инфразвуковыми группами: I26-Фрайунг, Германия (48,9°СШ и 13,7°ВД), I31-Актюбинск, Казахстан (50,4°СШ и 58,0°ВД), I46-Залесово, Россия (53,9°СШ и 84,8°ВД), а также данные одной сейсмической группы Германии GERES, входящей в первичную сеть Международной системы мониторинга (МСМ). После проведения интерактивного анализа к группе сигналов были добавлены сейсмические фазы, зарегистрированные трёхкомпонентной станцией вспомогательной сети AS026-Вранов (Чешская республика, $\Delta=1,44^\circ$). С учётом новых данных в бюллетень REB вошли скорректированные координаты и время события в источнике: 48,7°СШ и 18,6°ВД; $T_0=15:28:03,65$ (UTC), магнитуда – 2,7. Наиболее примечательным в регистрации акустических волн является выделение сигналов на записях станций I31-Актюбинск и I46-Залесово, отстоящих от места взрыва на расстояния 2822 км и 4475 км, соответственно. В таблицу 1 сведены значения измеренных параметров и отклонения их от расчётных величин для аку-

стических волн, зарегистрированных на каждой из трех инфразвуковых станций.

Из таблицы 1 следует, что измеренные азимуты и кажущиеся скорости довольно хорошо совпадают с расчётными значениями, тогда как измеренные времена пробега волны до пунктов регистрации имеют значительные расхождения с расчётными значениями. Очевидно поэтому оператор, занимавшийся интерактивным анализом, для исключения случайности принятия решения о сигнале среди интенсивных помех и подтверждения принадлежности всех трёх выделенных инфразвуковых фаз к одному источнику, применил «прогрессивный многоканальный корреляционный метод РМСС (Progressive Multi-Channel Correlation)», позволивший отследить частотную, азимутальную и скоростную составляющие сигнала. Результаты этой обработки по [1] показаны на рисунках: 1 - для станции I26-Фрайунг, 2 – для станции I31-Актюбинск, 3 – для станции I46-Залесово. Здесь, в двухчасовом временном окне, в нижней части приведены волновые формы от высокочастотных (Н) и низкочастотных (Л) элементов. Вверху показаны рассчитанные азимуты прихода и кажущиеся скорости волны как функции частоты и времени. Обработка сигналов проведена в частотной полосе $1,0 \div 2,0$ Гц. Цветовая шкала позволяет отследить изменение значений азимута и кажущейся скорости и сгруппировать семейства одинаковой направленности. Полученные и проиллюстрированные значения азимута (Азизм) и кажущейся скорости (Сизм) приведены в таблице 1 - колонки 5 и 7, соответственно.

*Таблица 1. Измеренные значения параметров акустических волн
и их отклонения от расчётных величин по инфразвуковым станциям*

Станция	Δ [град.]	Время прихода волны, $T_{изм.1}$ [с]	$T_{рез}$ [с]	$Az_{изм}$ [град]	$Az_{рез}$ [град]	$S_{изм}$ [м/с]	$S_{рез}$ [м/с]
I26-Фрайунг	3,24	15:50:52,865	235,0	90,9	0,8	330,0	- 20
I31-Актюбинск	25,42	18:01:20,095	300,7	279,8	- 1,9	334,2	- 15,8
I46-Залесово	40,32	19:33:12,208	596,7	288,8	- 1,8	339,0	- 11,0
Примечание: $T_{рез} = T_{изм} - T_0$; $Az_{рез} = Az_{изм} - Az_{расч}$; $S_{рез} = S_{изм} - S_{расч}$, где $Az_{расч}$ и $S_{расч}$ - расчётные азимут на источник и кажущаяся скорость волны.							

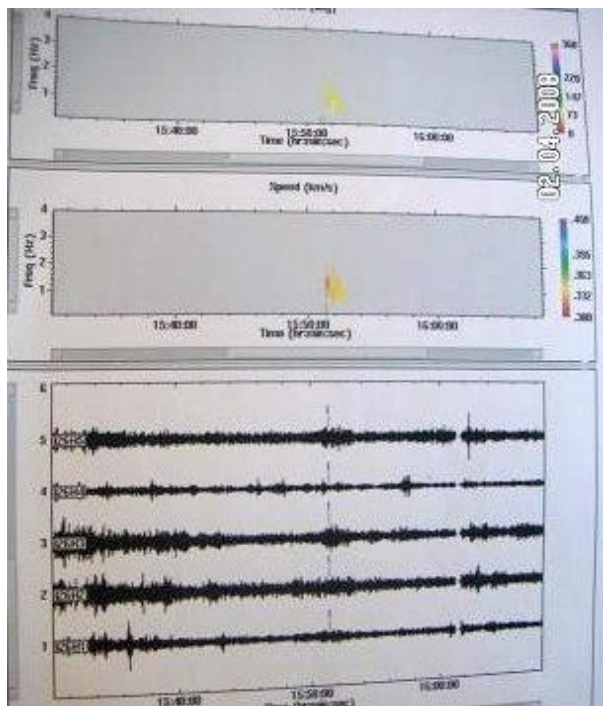


Рисунок 1. Результаты 5-канальной регистрации и обработки записей станции I26-Фрайунг

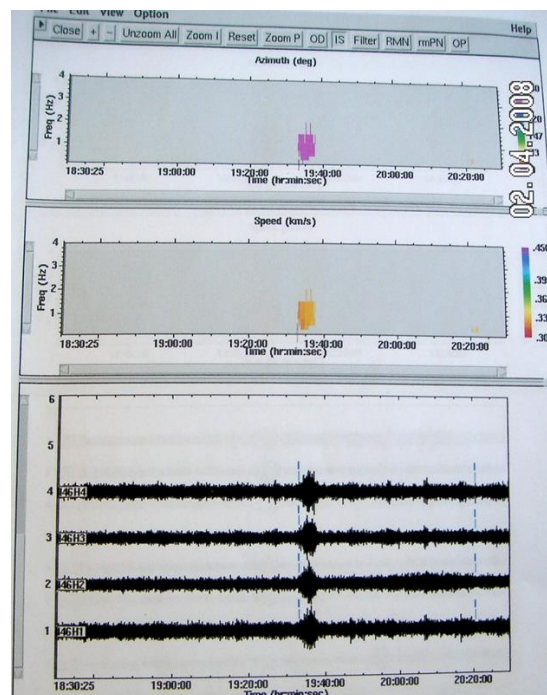


Рисунок 3. Результаты 4-канальной регистрации и обработки записей станции I46-Залесово

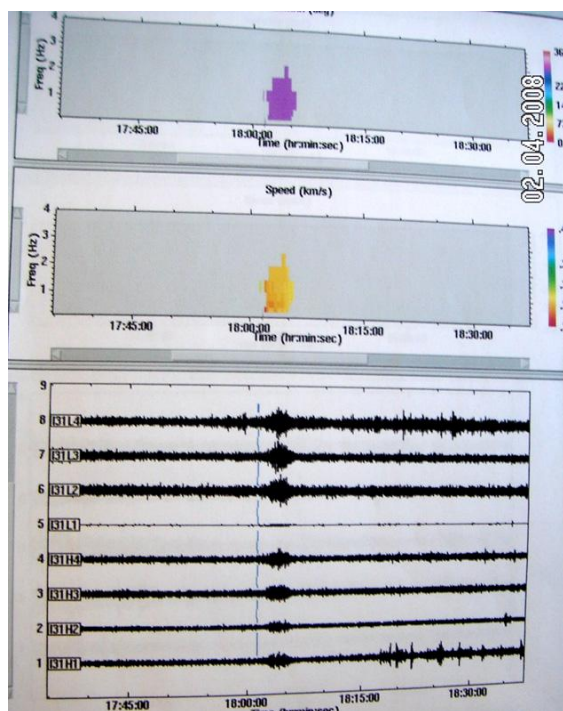
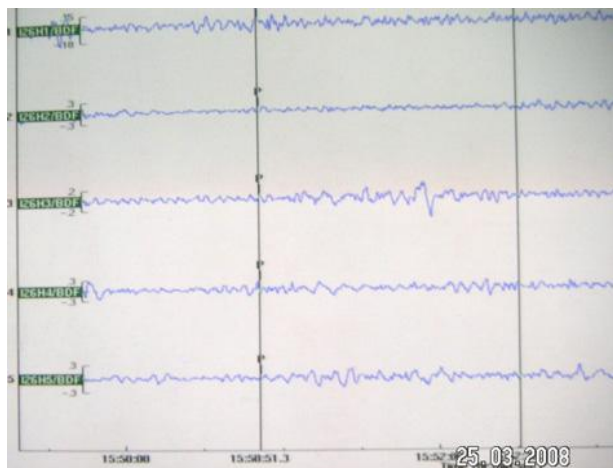


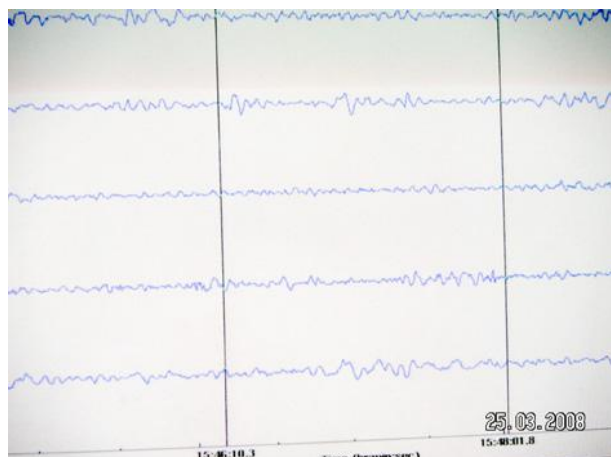
Рисунок 2. Результаты 8-канальной регистрации и обработки записей станции I31-Актюбинск

При сопоставлении записей, приведенных на рисунках 1, 2 и 3 можно обнаружить хорошую корреляцию между длительностями участков увеличенной амплитуды записей, азимутами и кажущейся скоростью для станций I31-Актюбинск и I46-Залесово и, наоборот, отсутствие такой корреляции для станции I26-Фрайунг. Для более детального анализа сигналы, зарегистрированные на всех трёх станциях, были профильтрованы в полосе частот 0,33 - 1,0 Гц и приведены к единому масштабу - примерно 1 секунда на 1 мм. Участки, соответствующие выделенным по методике РМСС временам, показаны на рисунках 4а, б, 5 и 6.

Из сравнения реализаций (рисунки 4а, б, 5 и 6) следует, что формы сигналов, полученные на станциях I31-Актюбинск и I46-Залесово, имеют большое сходство и представляют собой колебания с амплитудой сначала плавно нарастающей и затем спадающей до уровня фона на временных участках длительностью 5 мин 50 с и 4 мин 48 с, соответственно, со средним периодом колебаний 2,0 с (I31-Актюбинск) и 1,8 с (I46-Залесово). Для станции I26-Фрайунг на соответствующем участке реализации отсутствует характерная форма огибающей колебаний, присущая первым двум станциям.



а – для интервала времени 15:49:50 - 15:53:10
(масштаб развёртки 35 мм в мин)



б – для интервала времени 15:44:50 - 15:48:40
(масштаб развёртки 40 мм в мин)

Рисунок 4. Детализация записей станции I26-Фрайунг в полосе частот 0,3 - 1,0 Гц

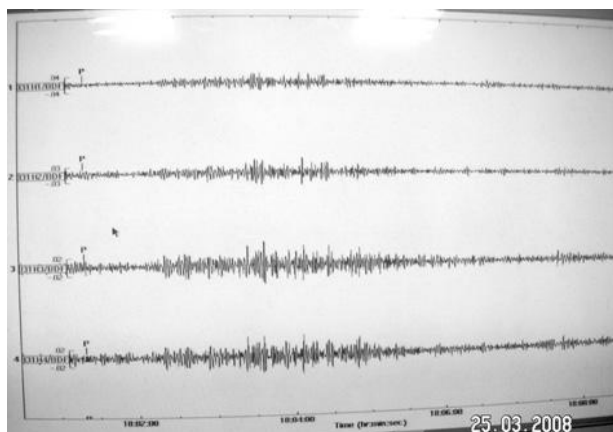


Рисунок 5. Детализация записей станции I31-Актюбинск. Полоса частот 0,33 - 1,0 Гц. Интервал времени 18:00:30 - 18:08:30. Масштаб развёртки 20 мм в мин

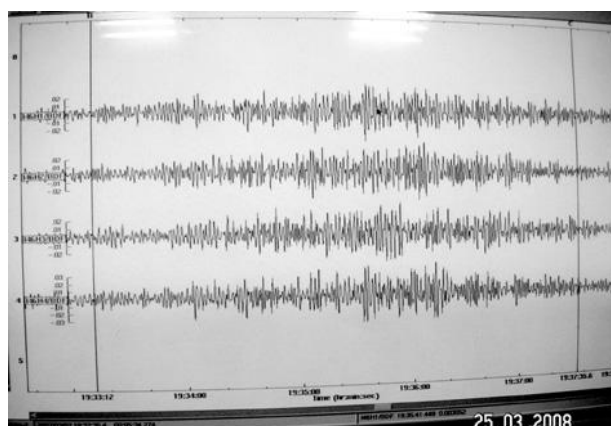


Рисунок 6. Детализация записей станции I46-Залесово. Полоса частот 0,33 - 1,0 Гц. Интервал времени 19:32:40 - 19:38:05. Масштаб развёртки 30 мм в мин

Отдельные всплески то на одном, то на другом канале имеют минимальный период 2,5 с. К сходству форм акустических волн, зарегистрированных на станциях I31-Актюбинск и I46-Залесово следует добавить, что они имеют похожие структуры, характеризующиеся последовательностью множества цугов колебаний, каждый из которых состоит из 5 - 7 квазиполупериодов со средним значением периода примерно 2 с и длительностью 10 - 15 с.

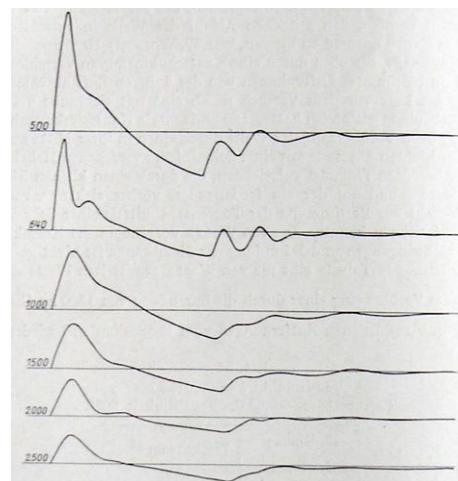
Для сравнения величин кажущейся скорости распространения волны по временам вступления на каждой станции с оценками, полученными непосредственно на инфразвуковых группах, для всех трёх станций была рассчитана кажущаяся скорость, исходя из расстояния от места взрыва до каждой станции и времен прихода на них волн, полученных с помощью методики РМСС. Результаты расчётов сведены в таблицу 2, которая дополнена данными колонки 7 из таблицы 1.

Таблица 2. Сравнение экспериментальных и рассчитанных по РМСС значений кажущейся скорости по инфразвуковым станциям

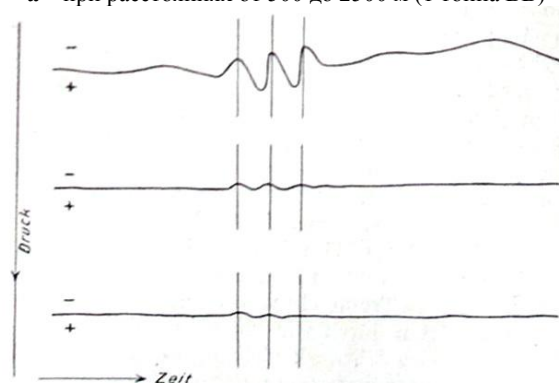
Станция	Расстояние между станциями и взрывом, Δ [км]	Время пробега, T [с]	$V_{\text{каж}}^{\text{изм}}$ [м/с]	$V_{\text{каж}}^{\text{РМСС}}$ [м/с]	
I26-Фрайунг	360	1369	263	330	
I31-Актюбинск	2822	9196	307	334	
I46-Залесово	4475	14708	304	339	
Примечание: $T = T^{\text{РМСС}} - T_0$; $V_{\text{каж}}^{\text{изм}} = \Delta/T$;					

Из таблицы 2 следует, что для станции I26-Фрайунг величина отклонения $V_{\text{каж}}^{\text{изм.}}$ от $V_{\text{каж}}^{\text{PMCC}}$ значительно больше, чем для двух других станций. Если предположить, что сигнал на записи станции I26-Фрайунг выделен верно, то такую значительную разницу можно объяснить, например, сильным встречным верхним ветром (азимут со станции I26-Фрайунг на взрыв примерно на 180° отличается от азимута на взрыв со станций I31-Актюбинск и I46-Залесово). Кстати, это же могло явиться причиной существенного ослабления акустической волны на станции I26-Фрайунг. В виду отсутствия явно выраженного сигнала на станции I26-Фрайунг в период времени, определённый по методике PMCC, был расширен его поиск на более длительном временном интервале в предположении о возможно большем разбросе величины скорости распространения акустической волны. Для этого рассмотрен участок записи станции I26-Фрайунг, соответствующий кажущимся скоростям $V_{\text{мин}} = 230$ м/с до $V_{\text{макс}} = 330$ м/с, что соответствует временам вступление волны в период от 15:46:13,65 до 15:54:08,65 (рисунок 4б). Однако и в этом интервале акустической волны, подобной волнам на станциях I31-Актюбинск и I46-Залесово, не обнаруживается. Значит, на месте расположения данной станции акустическая волна либо ещё не сформировалась, либо ослабла по предположенной выше причине, либо рельеф местности направил фронт ударной волны преимущественно на восток.

Для получения ответов на поставленные вопросы были проработаны литературные источники [2 - 4]. На один из них в 1950 г. указал в своём письме Л.П. Берия академик Ю.Б. Харитон [2]. Юлий Борисович писал, что в 1924 г. в Германии на расстоянии 1162 км относительно простым прибором был зарегистрирован химический взрыв весом в 10 тонн, произведённый в Ля Кортине (Франция). Он предлагал разработать подобный прибор для дальней регистрации отечественных ядерных испытаний в 1951 г., ссылаясь на статью, опубликованную в [3], где, помимо прибора, описан сам факт регистрации трёх экспериментальных взрывов, произведённых на различных расстояниях от места взрыва и сделана ссылка на первоисточник – [4]. В [4] приведены формы зарегистрированных сигналов и детально описаны их параметры на разных расстояниях от места взрыва акустических волн трёх экспериментальных взрывов мелинита (ВВ, близкий по характеристикам тринитротолуолу). Вес ВВ при трех взрывах составлял: 10 т - 13.05.1924 г., 5 т - 23.05.1924 г. и 10 т - 25.05.1924 г. На рисунке 7а показано изменение формы ударной волны на расстоянии от 500 м до 2500 м для взрыва ВВ весом в 1 т [3], а рисунке 7б приведены формы сигналов на расстоянии 1162 км от взрывов ВВ весом от 5 до 10 т.



а – при расстояниях от 500 до 2500 м (1 тонна ВВ)



б – при расстоянии 1162 км 5 – 10 тонн ВВ) [4]

Рисунок 7. Изменение формы ударной волны

На рисунке 8 приведены формы этих же, но увеличенных сигналов в последовательности (сверху вниз), соответствующей выше перечисленным датам [4]. Средние периоды колебаний (от пика до пика) составляют $1,3 \div 1,4$ с, длительность первого цуга колебаний 3,5 с. Формы сигналов для каждого взрыва повторяются практически полностью.

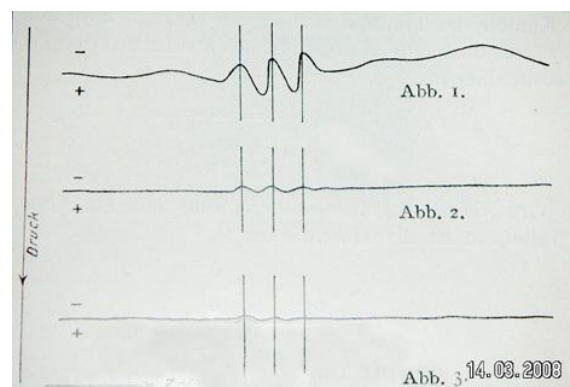


Рисунок 8. Форма ударной волны (увеличение в 2,5 раза) на расстоянии 1162 км от взрывов мощностью (сверху вниз): 10 т - 13.05.1924; 5 т - 23.05.1924; 10 т - 25.05.1924

В [4] отмечается, что за первым следовало несколько таких цугов и их интенсивность становилась всё меньше и меньше, из чего можно заключить, что общая длительность, по крайней мере, трёх цугов с перерывами между ними составляла 12-15 с. В [3] отмечен ещё один интересный факт: при взрывах 13.05, 23.05 и 25.05.1924 г. на расстоянии 343 км наблюдались волны, по форме и дли-

тельности аналогичные волнам, зарегистрированным на расстоянии 1162 км. Это даёт основание считать, что на расстояниях от 300 км и больше акустические волны от взрывов более 5 т уже сформированы и их формы и частотный состав не меняются с последующим увеличением расстояния. В таблице 3 сведены данные о параметрах волн, зарегистрированных на расстоянии 1162 км согласно [3,4].

Таблица 3. Значения параметров акустических волн, зарегистрированных на расстоянии 1162 км от трёх химических взрывов в 1924 г.

Дата взрыва	Вес ВВ [т]	Тср [с]	ΔТ [с]	А [Па]	Вкаж 1924[м/с]
13.05.1924	10	1,4	3,5	0,4	316
23.05.1924	5	1,3	3,5	0,069	317
25.05.1924	10	1,3	3,5	0,049	309

Сравнение данных, приведенных в таблицах 2 и 3, показывает, что при регистрации взрывов в 1924 г. в Берлине и в 2007 г. в Западном Казахстане и в России, наблюдается достаточно хорошее согласие полученных значений скорости распространения и среднего периода колебаний акустических волн, а также в какой-то степени - формы огибающей сигнала. Что касается записей, полученных в 2007 г. в Фрайунге, то на основании литературных источников можно было бы ожидать более уверенного обнаружения акустического сигнала от взрыва на расстоянии примерно в 350 км. Однако расположение станции Фрайунг к западу от места взрыва делает это предположение весьма сомнительным, так как в [3,4] все регистрирующие станции располагались в одном направлении.

Анализ результатов регистрации акустических волн от химических взрывов мог бы быть более полным с привлечением их динамического параметра – амплитуды. В отсутствии амплитудных оценок для станций МСМ в качестве примера рассмотрим эту оценку только для станции I46-Залесово. О максимальной амплитуде сигнала можно судить по тому же сигналу, зарегистрированному штатным инфразвуковым каналом Залесовской лаборатории спецконтроля. Амплитуда составляет 0,015 Па, что может считаться оценкой, неплохо сходящейся с данными графы 5 таблицы 3.

Выводы

1. Совместный анализ параметров акустической волны, выделенной на записях станции I26-Фрайунг с применением методики РМСС, с формой участка записи, соответствующей времени прихода акустической волны, показал, что факт регистрации акустического события 02.03.2007 г. на данной станции не подтверждается. На станциях I31-Актюбинск и I46-Залесово зарегистрированы чёткие сигналы с весьма сходными формами и периодами 1,8 - 2,0 с.

2. В дальнейшем при интерактивном анализе акустических сигналов целесообразно привлечение формы записи, имеющей характерные особенности в огибающей сигнала, амплитуде и частотном составе.

Относительно использования формы акустического сигнала напрашивается историческая аналогия, связанная с привлечением формы электромагнитного импульса (ЭМИ) для улучшения качества обнаружения ядерных взрывов радиотехническим методом [5]. В период с 1954 по 1957 гг. при регистрации ЭМИ от ядерного взрыва в дальней зоне использовался принцип совпадения нескольких частотных составляющих ЭМИ в одном пункте и совпадения ЭМИ по времени от разнесённых пунктов наблюдения, что не позволяло достоверно обнаруживать факт ядерного взрыва. И только начиная с 1957 г, когда стали регистрировать форму ЭМИ, проведение воздушных ядерных взрывов устанавливалось с помощью радиотехнического метода обнаружения почти со 100% достоверностью, даже по одному пункту наблюдения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бюллетень РЕВ Международного центра данных за 2007 г.
2. Письмо Ю.Б. Харитона Л.П. Берия с предложением об использовании при испытаниях в 1951 году аппаратуры, регистрирующей взрывы на больших расстояниях, 16.06.1950 г./ под общ. ред. Л.Д. Рябева // Атомный проект СССР, 2007. - том II, книга 7. – С. 137 - 138.
3. Боле, Э Экспериментальные исследования воздушных ударных волн, возбуждаемых в свободной атмосфере / Э. Боле // Handbuch der technischen und physikalischen Mechanik, 1928. – С. 386 - 389.
4. Риттер, Ф Доклад о наблюдении звуковых волн, произведённых взрывами в Ля Кортине в мае 1924 г. / Ф. Риттер // Zeitschrift der technischen Physik, 1926. – № 3. – С. 152 - 154.
5. Пустовит, В.И. Освоение сверхдлинноволнового диапазона для приёма электромагнитного импульса в дальней зоне / В.И. Пустовит // Рождённая атомным веком, изд. 2, 2002. – Часть 3. – С. 29 - 30.

ТАБУДЫҢ ИНФРАДЫБЫСТЫ ӘДІСІМЕН ХИМИЯЛЫҚ ЖАРЫЛЫСТАРДЫ ТІРКЕУ МӘСЕЛЕСІНЕ

Васильев А.П.

Ресей Федерациясы Қорғаныс министрлігінің Арнайы бақылау қызмет, Мәскеу

2007 ж. 03.02-сіндегі словак оқ-дәрі зауытындағы жарылыстарды тіркеген Халықаралық мониторинг жүйесінің үш инфрадыбысты станциясының (I26, I31, I46) деректері талдануда және жарылыс параметрлерін айқындауында үлкен алшақтауының мүмкіндік себептері талқыланды. REB (Reviewed event bulletin) Халықаралық деректер орталығы бюллетеньдері қолданылған және ұқсас жарылыстар бойынша әдебиет деректері пайдаланылған. Ұқсас көздерін табу шүбәсіздігін жоғарылату үшін талдау кезінде тіркелген толқындардың түрін қолдануы ұсынылған.

RECORDING OF CHEMICAL EXPLOSIONS BY INFRASOUND DETECTION METHOD

A.P. Vasiliev

Special Control Service of the Ministry of Defense of the Russian Federation, Moscow

Three IMS infrasound stations (I26, I31, I46) data are being analyzed, which recorded explosion at Slovak ammunition factory dated 02.03.2007 and possible reasons of great explosion parameter discrepancies are being discussed. Reviewed event bulletin is used and literature data on such explosions is also applied. To increase efficiency of such sources detection, it is proposed to use recorded wave form during analyses.

УДК 534.2:[504.75:001.8]

ИНФРАЗВУКОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ПРИ ЗАПУСКАХ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА ЗДОРОВЬЕ НАСЕЛЕНИЯ

¹Краснов В.М., ¹Дробжева Я.В., ²Пак Г.Д., ¹Салихов Н.М.,
³Козловский В.А., ³Мухамеджанов Э.К., ⁴Маханов Д.И., ⁵Лазуркина В.Б.

¹Институт ионосферы МОН РК, Алматы

²Институт физиологии человека и животных МОН РК, Алматы

³ДГП «Инфракос-Экос», Алматы

⁴НИИ Кардиологии и внутренних болезней, Алматы

⁵Библиотека Академии наук России, Санкт-Петербург

Описаны развитые физические модели, созданные комплексы программ и проведенные эксперименты, позволившие определить на Земле уровни инфразвука (ударных волн), излучаемого при работе двигателей ракеты-носителя, при полете ракеты-носителя со сверхзвуковой скоростью, при падении ступени ракеты-носителя, при взрыве ракеты-носителя на активном участке траектории. По результатам исследования воздействия всех этих источников инфразвука на состояние сердечно-сосудистой системы человека, установлено, что опасными для здоровья человека являются инфразвуковые волны, генерируемые двигателями ракеты-носителя в районах пусковых площадок. Построена карта зон, опасных для человека, в районе пусковых площадок ракет-носителей «Протон» и «Союз». На основе расчета мощности взрыва оценено количество выброшенного токсичного топлива в атмосферу при падении ракеты-носителя «Днепр» 26 июля 2006 г.

ВВЕДЕНИЕ

Вопросы воздействия инфразвука на здоровье населения являются составной частью проблемы обеспечения экологической безопасности эксплуатации различных видов техники и технологических цепочек, в том числе, ракетно-космических комплексов [1]. Проблема оценки влияния инфразвука на организм человека не нова. Являясь биологически активными факторами, инфразвуковые и другие виды излучения техногенного происхождения оказывают неблагоприятное воздействие на человека и окружающую природную среду, что было отмечено Всемирной организацией здравоохранения еще в 1989 г. Установлено, что живые клетки в организме человека взаимодействуют друг с другом, обмениваются информацией с помощью колебаний инфракрасного, микроволнового, акустического и др. диапазонов. Внешние воздействия могут вызывать нарушение информационного взаимодействия между клетками организма, т.е. воздействовать на регуляторные системы и затем вызывать нарушение деятельности органов и систем человека. Легкие и сердце, как всякие объемные резонирующие системы склонны к интенсивным колебаниям при совпадении частот их резонансов с частотой инфразвука. Под влиянием инфразвука ухудшается умственная работа, повышается артериальное давление и др. В Казахстане разработаны «Методические указания по осуществлению государственного санитарно-эпидемиологического надзора за соблюдением «санитарных правил и норм «предельно-допустимых уровней инфразвука и низкочастотного шума в помещениях жилых и общественных зданий и на территории жи-

лой застройки» (СанПиН № 3.01.030/у-97, № 3.05.031 – 97)» [2].

Источниками инфразвука при полете ракет на активном участке траектории являются:

- турбулентные пульсации реактивной струи продуктов сгорания ракетного топлива,
- «присоединенная» ударная волна при полете ракеты со сверхзвуковой скоростью,
- ударная волна при падении ступеней ракеты-носителя,
- взрыв ракеты-носителя (РН) при нештатной ситуации (включая распыление в атмосфере токсичных компонент ракетного топлива, и соответственно, экологическое загрязнение среды).

ИНФРАЗВУК ОТ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ РЕАКТИВНОЙ СТРУИ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ РАКЕТНОГО ТОПЛИВА

На рисунке 1 приведен пример регистрации инфразвука, генерируемого пульсациями реактивной струи продуктов сгорания ракетного топлива, в поселке Тюра-Там (расстояние от места старта 55 км) во время старта РН «Союз-ФГ». Место старта - космодром «Байконур», площадка №31, ПУ № 6. Ноль на временной оси соответствует времени старта РН. Предельно допустимый уровень (ПДУ) для палат больниц и санаториев, операционных больниц взят в соответствие с Казахстанским ГОСТом [2].

На рисунке 2 представлены результаты регистрации инфразвука, генерируемого пульсациями реактивной струи продуктов сгорания ракетного топлива, в поселке Тюра-Там (расстояние от места старта 52 км) во время старта РН «Протон-М» Место старта - космодром «Байконур», площадка № 200, ПУ № 39.

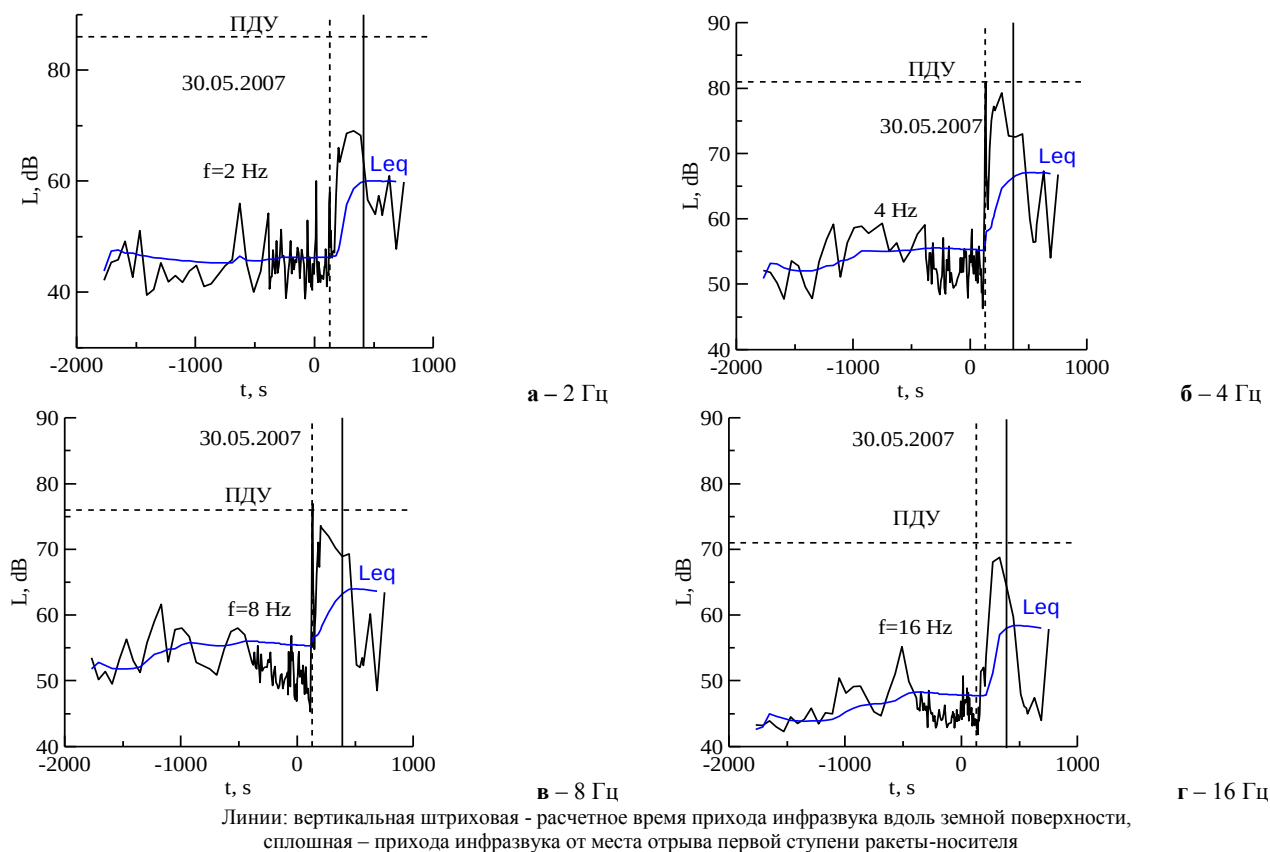


Рисунок 1. Старт РН «Союз-ФГ» 30 мая 2007г. Результаты измерения инфразвука шумомером ШИ-01 на разных частотах, пос. Тюра-Там

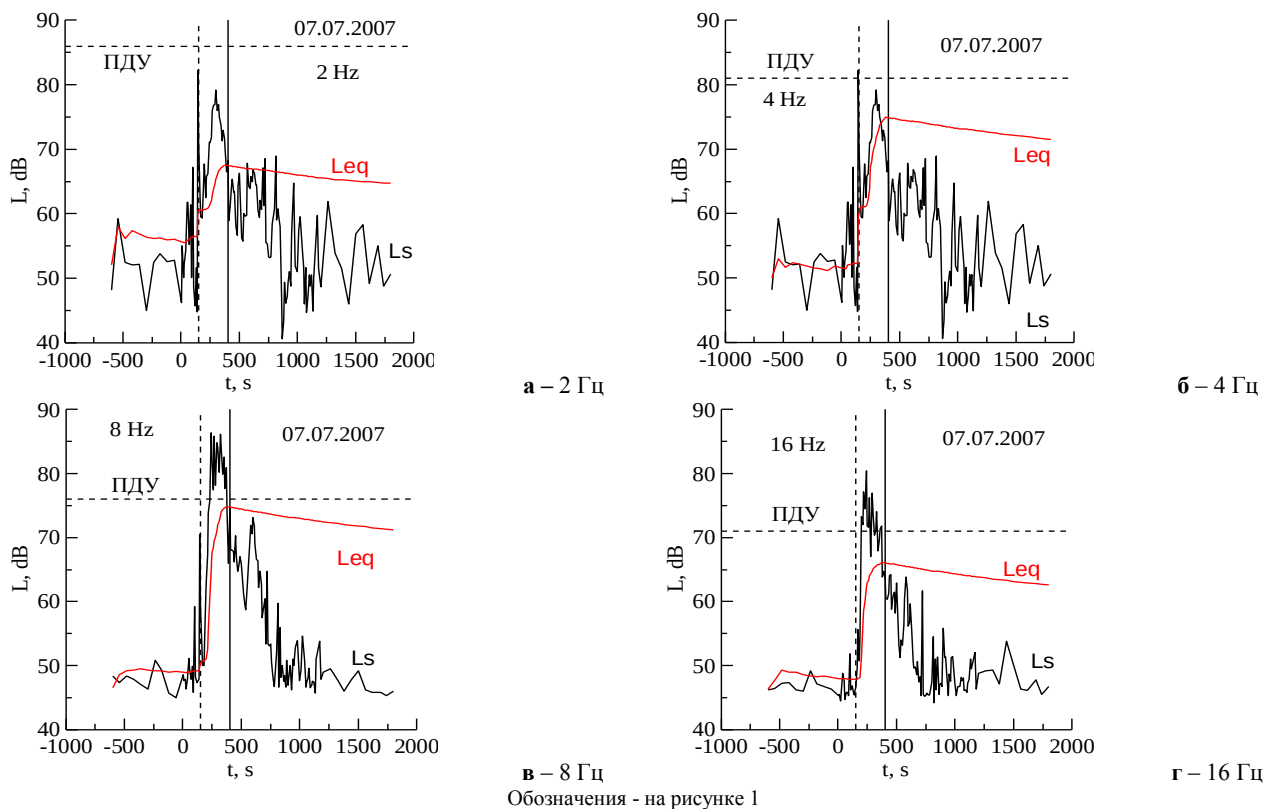


Рисунок 2. Старт РН «Протон-М» 07 июля 2007г. Результаты измерения инфразвука на разных частотах, пос. Тюра-Там

С использованием полученных величин инфразвука как граничного условия рассчитана амплитуда инфразвука от двигателей РН на более близких расстояниях от старта ракеты. При расчетах использована модель, разработанная на основе [3,4] и учитывающая неоднородность атмосферы (реальные профили плотности, температуры, горизонтального ветра и др.), нелинейные эффекты, поглощение, а также

расходимость фронта акустической волны. Согласно нормам, ПДУ инфразвука на частоте 4 Гц равен 89 дБ для территорий, прилегающим к жилым домам. На рисунке 3 представлена геометрия опасных для человека зон вокруг пусковых площадок РН «Союз» и «Протон», внутри которых уровень инфразвука при запусках превышает 89 дБ.

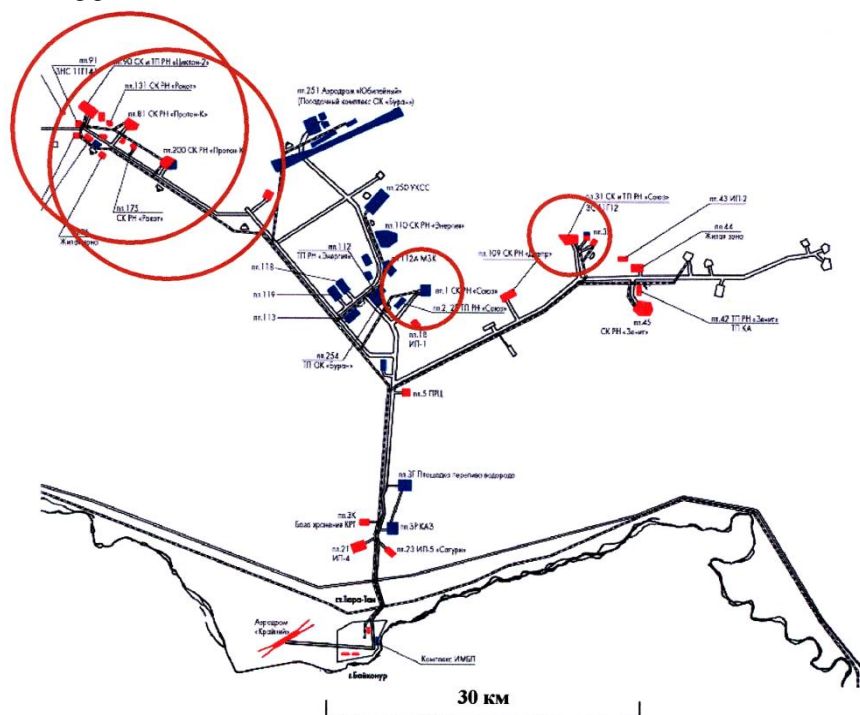


Рисунок 3. Зоны инфразвука вокруг пусковых площадок РН «Союз» и «Протон», опасные для человека во время их пусков (красные окружности)

«ПРИСОЕДИНЕННАЯ» УДАРНАЯ ВОЛНА ПРИ ПОЛЕТЕ РАКЕТЫ СО СВЕРХЗВУКОВОЙ СКОРОСТЬЮ

Для расчета поля ударной волны при полете РН со сверхзвуковой скоростью развита физическая модель и созданы программы, позволяющие рассчитывать распространение акустических волн вниз до земной поверхности как непосредственно вдоль траектории полета ракеты-носителя, так и на различных расстояниях, перпендикулярных траектории полета. Начальные параметры ударной волны рассчитаны на основе формул М.А. Цикулина [5], учитывающих давление атмосферы по траектории полета, радиус ударной волны, диаметр ракеты, скорость ракеты и звука, угол между фронтом ударной волны и осью симметрии, плотность атмосферы и ряд других факторов. Для описания распространения слабой ударной волны в неоднородной атмосфере использована модель, развитая Я. В. Дробжевой и др. [4]. Модель учитывает неоднородность атмосферы, нелинейные эффекты, цилиндрическую расходимость волнового фронта, траекторию полета РН, параметры атмосферы в зависимости от времени и координат, параметры солнечной активности и др. В качестве примера на рисунке 4 представлена рассчитанная

форма начального акустического импульса, генерированного ударной волной РН «Протон», для высоты нахождения РН 21.8 км (начальная высота генерации ударной волны). На рисунке 5 приведена траектория полета РН и указаны горизонтальные расстояния, на которые распространяется акустический луч, при различных высотах нахождения РН.

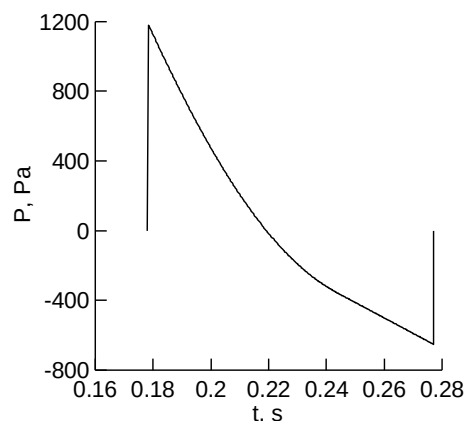
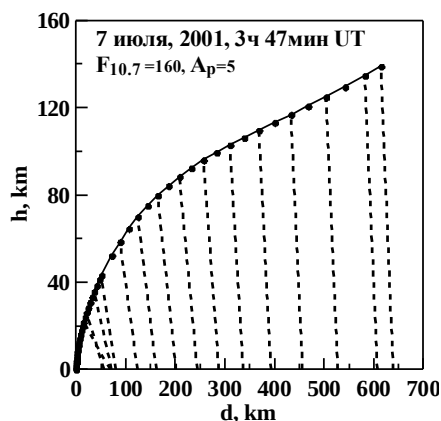


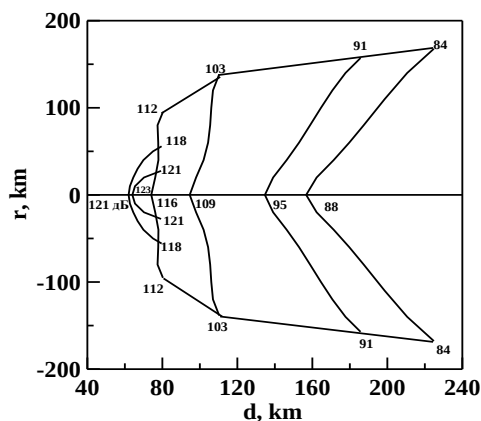
Рисунок 4. Начальный акустический импульс, генерированный ударной волной от РН «Протон», находящегося на высоте 21.8 км



Линии: сплошная – часть траектории РН;
 штриховая – между РН и точкой на земной поверхности,
 до которой распространяется акустический луч

Рисунок 5. К оценке расстояния на земной поверхности, на которое распространяется акустический луч от РН при разных высотах его нахождения

Из рисунка 5 видно, что ближайшее горизонтальное расстояние от места старта РН, до места, куда дойдет инфразвук, сгенерированный полетом РН со сверхзвуковой скоростью, составляет 56 км. Это расстояние обусловлено наклоном РН к вертикали при полете, а также углом между осью ракеты и фронтом ударной волны. Для расчета геометрии профиля поля ударной волны на поверхности Земли и уровня поля были найдены аналитические выражения и создана программа расчета траектории акустического луча в зависимости от угла между осью РН и вертикалью, а также угла выхода луча в плоскости сечения фронта ударной волны. На рисунке 6 даны результаты расчета, проведенного до расстояния вдоль траектории полета $d=230$ км.



Цифры у кривых - уровень поля в децибелах

Рисунок 6. Геометрия зоны воздействия слабой ударной волны на Земле при полете РН «Союз»

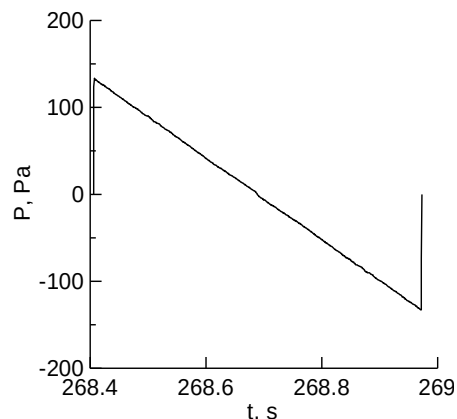


Рисунок 7. Наибольший по амплитуде импульс слабой ударной волны от РН «Союз» на Земле

Как видно из рисунка 6, поперечные размеры (r) «следа» ударной волны на Земле составляют порядка 300 км. Ограниченность поперечного размера «следа» связана с тем, что акустические лучи, вышедшие из фронта ударной волны вблизи ракеты под малыми углами к горизонту, отклоняются атмосферой вверх и не доходят до земной поверхности.

На рисунке 7 показан импульс слабой ударной волны от РН «Союз», самый большой по амплитуде, зарегистрированный на земной поверхности. Амплитуда импульса 123 Па = 136 дБ, а длительность – 0,57с. Столь кратковременное воздействие, практически, не дает возрастания эквивалентного уровня инфразвука при измерении шумомером «ШИ-01». С точки зрения воздействия ударной волны на человека, ее амплитуда слишком мала, чтобы привести к ушибам или нарушениям ткани. В частности, величина безопасного давления на открытой местности для людей составляет до 9800 Па. Легкие поражения, такие как повреждение слуха, ушибы, вывихи конечностей и др. возникают при избыточном давлении 20000-40000 Па [6].

УРОВЕНЬ ПОЛЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ В РАЙОНЕ ПАДЕНИЯ СТУПЕНИ РН

18 июня 2006 г. с помощью РН "Протон-К" был произведен запуск космического аппарата «Казсат». Место старта - космодром «Байконур», площадка № 200. Азимут пуска $\theta_1=61.2828^\circ$. Проведены измерения инфразвука в поселке Карсакпай, на расстоянии 38 км от места падения первой ступени. Результаты измерений в полосах частот 2, 4, 8, 16 Гц и на линейном (Lin) выходе шумомера «ШИ-01» представлены на рисунке 8. На графиках началом временной оси является время старта РН. ПДУ взято для территорий, непосредственно прилегающих к зданиям больниц и санаториев [2]. Вертикальная красная пунктирная линия показывает время (655 с), когда оператор слышал громкий глухой звук, как от сильного удара тяжелого предмета о стену здания.

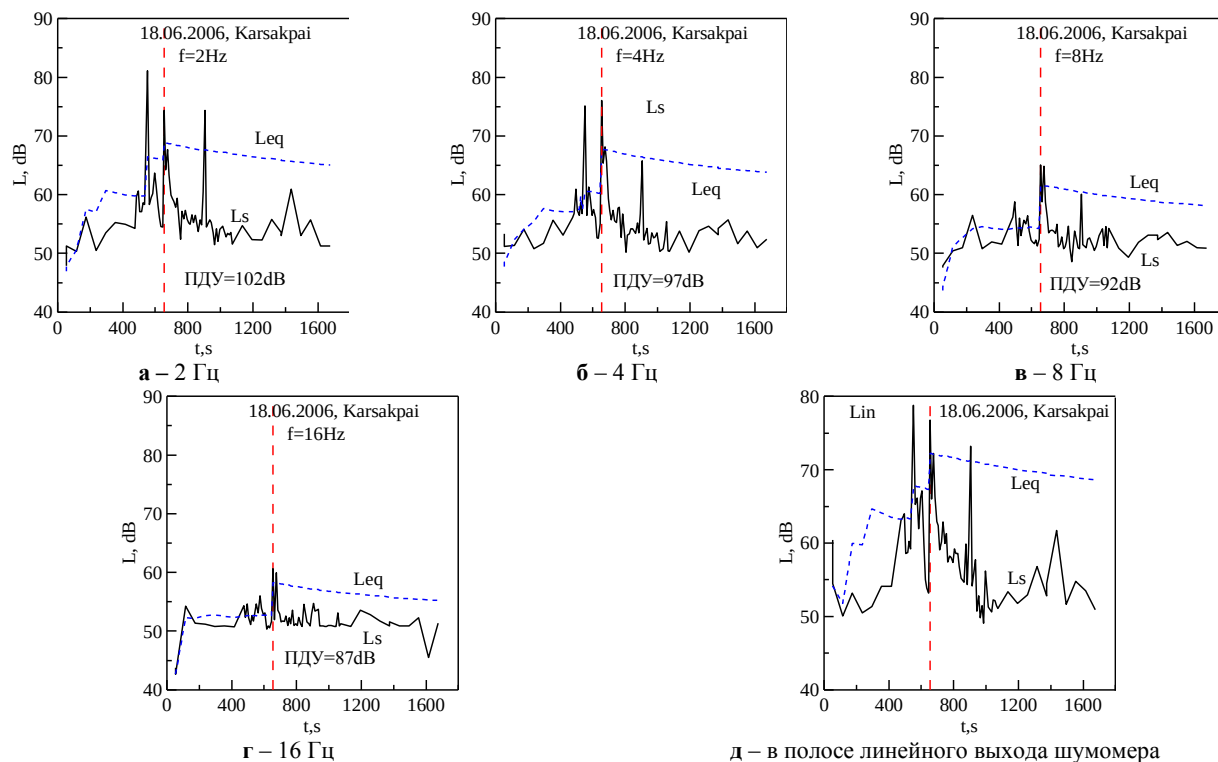


Рисунок 8. Пуск РН "Протон-К" 18 июня 2006 г. Результаты измерения инфразвука на разных частотах, пос. Карсакапай

Из рисунка 8 видно, что уровень инфразвука значительно меньше ПДУ, и в частности, для жителей пос. Карсакапай не представляет опасности. Изменения выполнены в точке, находившейся в стороне от места падения первой ступени, на расстоянии 36 км. На более близких расстояниях уровень амплитуды поля будет выше, и в частности, максимальный в районе падения первой ступени. Практически определить заранее место падения первой ступени и провести здесь измерения инфразвука не представляется возможным. Поэтому была создана физическая модель и разработан комплекс программ, позволяющий провести расчеты. В качестве начальных и граничных условий программа использует следующие данные: модель атмосферы MSIS-93 для расчета профиля скорости звука по высоте; модель горизонтального ветра HWM-93; траектория падения ступени с координатами и высотой каждой точки; скорость движения ступени во времени; координаты точки наблюдения; время отрыва ступени после старта; время после отрыва ступени. Необходимо отметить, что при падении ступень может вращаться вокруг собственных осей произвольным образом. Параметры ударной волны существенным образом зависят от формы тела, его поперечных размеров и ориентации по отношению к траектории полета. Отсутствие данных об ориентации ступени в пространстве по траектории падения не позволяет точно оп-

ределить, с какого участка траектории пришел акустический луч в точку наблюдения. Вместе с тем, возможно решение обратной задачи: по имеющимся экспериментальным данным - времени наблюдения акустических возмущений, — определить точки на траектории падения ступени, откуда пришли акустические лучи. Для решения этой задачи был разработан следующий алгоритм. Последовательно, для каждой точки траектории падения ступени определяются координаты и высота. Затем определяется расстояние и азимут до точки наблюдения. Для данных координат, времени, индексов солнечной и геофизической активности, азимута — определяется высотный профиль составляющей скорости ветра вдоль направления на точку наблюдения. От точки траектории падения ступени рассчитывается траектория распространения луча до точки наблюдения с учетом профиля скорости звука по высоте и ветра. При совпадении расчетного времени распространения акустического луча с экспериментальным определяется точка на траектории падения ступени и угол выхода акустического луча. На следующем этапе рассчитывается акустический импульс вдоль траектории акустического луча. В соответствии с данным алгоритмом создана программа расчета. В таблице 1 приведены результаты расчета амплитуды трех пиков, наблюдаемых в эксперименте (рисунок 8).

Таблица 1. Сравнение результатов расчета амплитуды трех пиков давления с экспериментальными, представленными на рисунке 8

Первый пик - 552 с			Второй пик - 655 с			Третий пик - 848 с		
Частота Гц	Амплитуда эксперим. дБ	Амплитуда расчет. дБ	Частота Гц	Амплитуда, эксперим. дБ	Амплитуда расчет. дБ	Частота Гц	Амплитуда эксперим. дБ	Амплитуда расчет. дБ
2	74	90	2	74	90	2	74	82
4	76	85	4	76	85	4	66	76
8	65	79	8	65	79	8	60	68
16	61	73	16	61	73	16	55	61

Из таблицы видно, что расчетные величины превышают экспериментальные во всех случаях, что может быть в значительной степени связано, с неточностью задания координаты и высоты отрыва первой ступени. Можно предположить также, что, на основе данной модели можно получить завышенные значения поля и для точки падения ступени. Расчеты поля проведены для геофизических условий дня пуска РН, а, именно: индекс солнечной активности $F10.7=68.1$; индекс геомагнитной активности $A_p=6$. Средний за 3 месяца индекс солнечной активности $F10.7A=75.4$. На основе этих данных, а также времени пуска – 81845с UT, дня пуска - 168 день года, - и модели MSIS-90 рассчитаны профили атмосферы для средней точки между местом пуска и местом измерения инфразвука: координаты точки 47.1228^0 сш, 65.1715^0 вд. На рисунке 9 представлены профили

плотности, скорости звука и поглощения, использованные для расчета.

Траектории полета РН и его ступеней после отрыва, принятые для расчета (по данным Научно-производственного центра им. Хруничева), представлены на рисунке 10.

Из рисунка 10 видно, что дальность полета первой ступени составила 320 км, высота отрыва первой ступени - 64 км, а высота максимума траектории - 72 км. Расчетная скорость полета первой ступени в момент отрыва - 1600м/с, а угол между вектором скорости и вертикалью - 76^0 . Эти данные были взяты как начальные для расчета зависимости амплитуды вектора скорости падения (включающей и горизонтальную составляющую) первой ступени от высоты (рисунок 11).

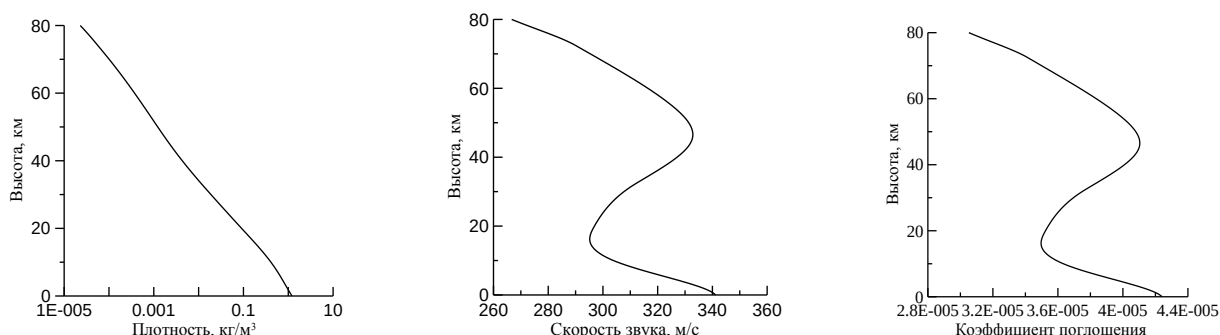


Рисунок 9. Профили плотности, скорости звука и поглощения в момент пуска РН "Протон-К" 18 июня 2006 г.

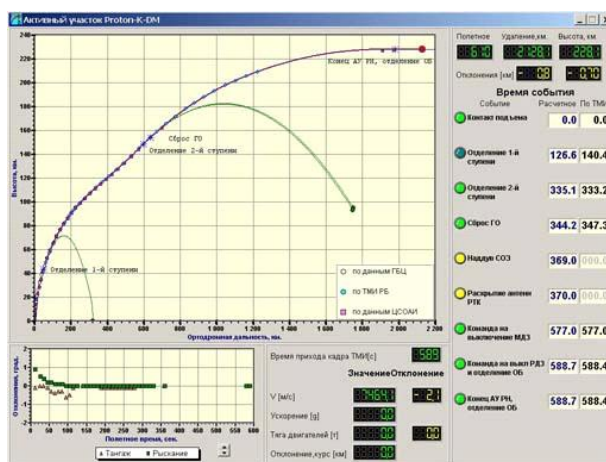


Рисунок 10. Траектории полета РН и ступеней после отрыва

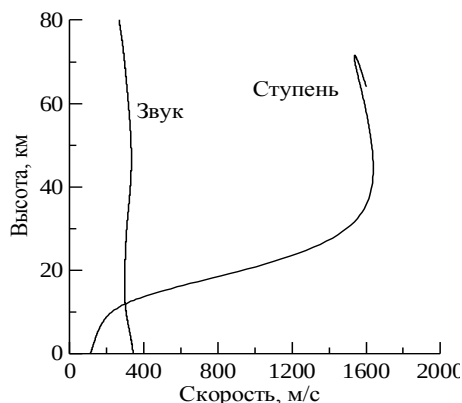


Рисунок 11. Сопоставление профилей скорости падения ступени и скорости звука

На рисунке 11 представлено также изменение скорости звука с высотой. Сопоставление двух кривых позволяет определить высотную область генерации ударной волны, определяемую условием: скорость падения ступени превышает скорость звука. Видно, что после отрыва ступени скорость сначала падает (инерция полета вверх «гасится»), затем, в пределах до высоты ~40 км скорость падения возрастает, а после 40 км падение ступени замедляется из-за возрастания силы сопротивления атмосферы на низких высотах. Из рисунка 11 также видно, что

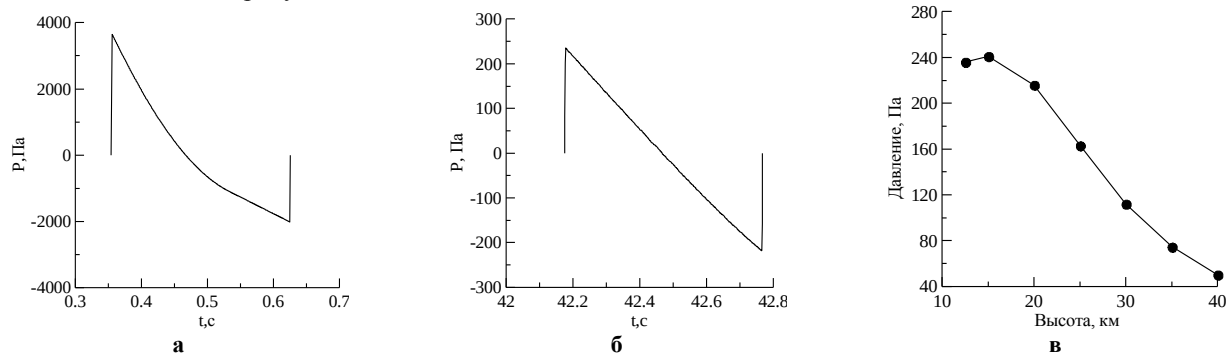


Рисунок 12. Акустический импульс, генерированный падением ступени со сверхзвуковой скоростью: а – на высоте 12,5 км; б – после прихода на земную поверхность; в – зависимость амплитуды ударной волны на земной поверхности от высоты полета первой ступени при падении.

ВЗРЫВ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ ПРИ НЕШТАТНОЙ СИТУАЦИИ

26.07.2006г. РН «Днепр» был запущен с космодрома «Байконур» и этот запуск оказался аварийным. По данным «Инфракос-Экос» на месте падения РН «Днепр» образовалась воронка диаметром $2a=50$ м, глубиной $h=15$ м, по виду похожая на шаровой сегмент (рисунок 13).

При наземном взрыве заряда ВВ на поверхности грунта согласно методике ВИА им. В.В. Куйбышева радиус воронки равен $a = 0.84Q^{1/3}$.

Отсюда вес заряда (полная энергия взрыва в тротиловом эквиваленте – ТНТ) по известному значе-

нию $a = 25$ м вычисляется по формуле: $Q = \left(\frac{a}{0.84} \right)^3 = 26362$ кг ТНТ. С другой стороны, общий вес топлива на момент падения составлял 93.9 т. При тротиловом эквиваленте топлива 0.57, максимально возможная мощность взрыва могла быть $Q=0.57*93.9=53.52$ т ТНТ. Учитывая, что взрыв оказался наполовину слабее, следует предположить, что половина остатков токсичного топлива была выброшена в атмосферу. Экологические последствия выброса выходят за рамки настоящей работы. В нашем случае рассмотренный пример демонстрирует необходимость знания мощности взрыва при оценке экологических последствий аварийной ситуации.

Видно, что поле на Земле не превышает 250 Па. Эта величина на порядок меньше предельного безопасного давления на открытой местности для людей – 9800 Па [6]. В целом можно сделать вывод, что ударная волна, образующая при падении первой ступени РН «Протон» не может оказать вредного влияния на здоровье человека, в том числе, в районе падения первой ступени.

нию $a = 25$ м вычисляется по формуле:

$$Q = \left(\frac{a}{0.84} \right)^3 = 26362 \text{ кг ТНТ.}$$

С другой стороны, общий вес топлива на момент падения составлял 93.9 т. При тротиловом эквиваленте топлива 0.57, максимально возможная мощность взрыва могла быть $Q=0.57*93.9=53.52$ т ТНТ. Учитывая, что взрыв оказался наполовину слабее, следует предположить, что половина остатков токсичного топлива была выброшена в атмосферу. Экологические последствия выброса выходят за рамки настоящей работы. В нашем случае рассмотренный пример демонстрирует необходимость знания мощности взрыва при оценке экологических последствий аварийной ситуации.



Рисунок 13. Фотография воронки на месте падения «Днепра» («Инфракос-Экос»)

В случае взрыва РН в воздухе локализация места взрыва и оценка его мощности возможна с помощью инфразвуковых измерений. В [3] показана возможность оценки мощности взрыва по инфразвуковым измерениям с точностью до 10%. В этой связи представляется целесообразным сопровождать пуски РН с космодрома «Байконур» инфразвуковыми измерениями. Вместе с тем, для выбора оптимальных пунктов измерений на Земле необходимо заранее знать вели-

чины акустического поля для различных аварийных ситуаций. В последние годы разработана теория и физическая модель, позволяющие адекватно эксперименту проводить такие расчеты [3]. Развитая модель позволяет полностью описать распространение акустических волн в неоднородной атмосфере с учетом поглощения, нелинейных эффектов и геометрической расходимости волнового фронта. Расчеты величин акустического поля на Земле при различных положениях РН на траектории полета и различных мощностях взрыва проведены для серии мощностей взрыва и различных сезонов запуска. На рисунке 14 представлены расчетные зависимости величины максимума (амплитуды) акустического импульса, генерированного взрывами РН мощностью в тротиловом эквиваленте 0.001, 0.1 и 0.5 т на земной поверхности в зависимости от расстояния до места пуска.

Наиболее быстрое уменьшение амплитуды акустического сигнала происходит на первых 10 км от места пуска: в 8 раз для $Q = 0,001$ т, в 11 раз для $Q = 0,1$ т и в 12 раз для $Q = 0,5$ тонн. Это объясняется тем, что на начальной траектории РН резко набирает высоту ~ 15 км, при этом отклонение РН от вертикали незначительно.

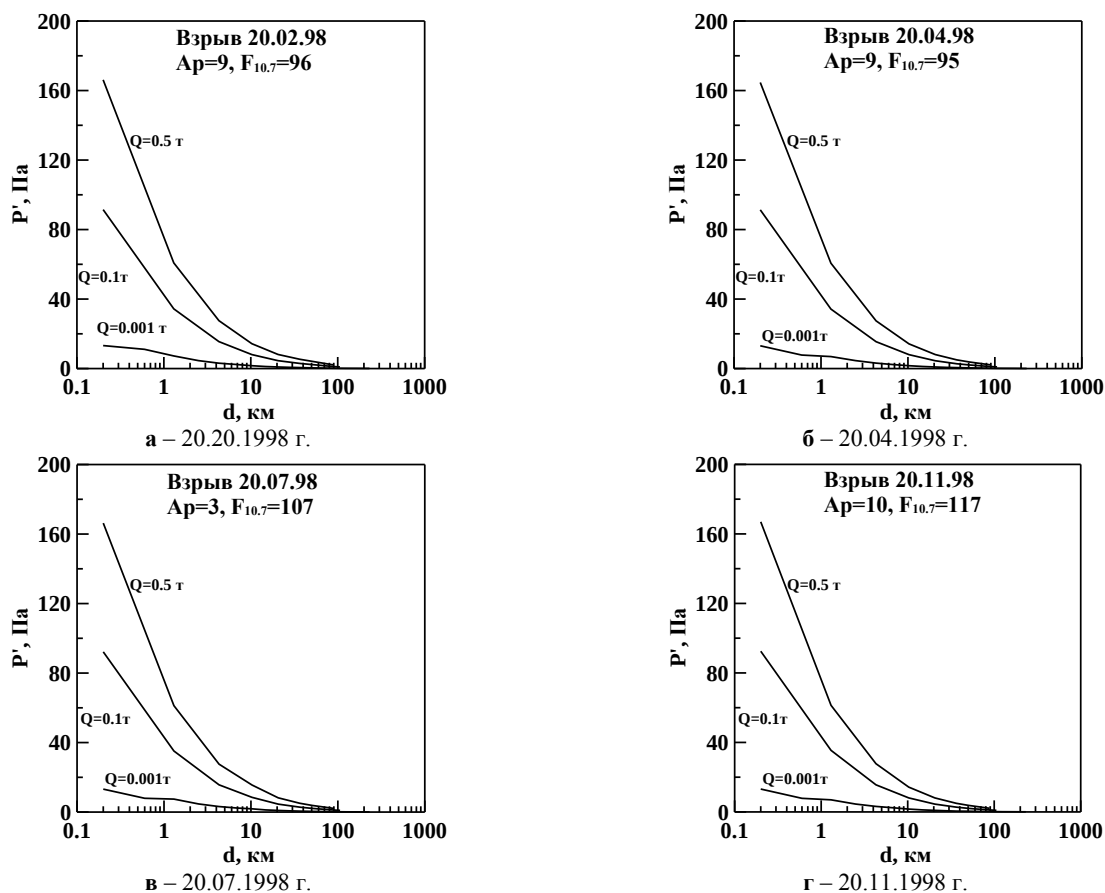


Рисунок 14. Изменение величины максимума акустического импульса на земной поверхности с расстоянием от места пуска РН для различных мощностей взрыва (Q) и сезонов запуска РН

На расстоянии от 10 км до 20 км ракета набирает уже меньшую высоту ~ 8 км и величина амплитуды акустического сигнала уменьшается в 2 раза для всех мощностей взрыва, затем амплитуда поля плавно уменьшается с увеличением горизонтального расстояния. Амплитуда уменьшается примерно до 0.1 Па на расстоянии около 120 км, при этом высота полета ракеты около $h=70$ км. Следует отметить, что величина амплитуды не имеет явной сезонной зависимости из-за того, что высотные профили плотности атмосферы, скорости звука, а также коэффициент поглощения атмосферы практически не зависят от сезона.

Модельные расчеты выявили следующие закономерности. Амплитуда поля резко убывает с расстоянием от места пуска и составляет величины порядка 0.1 Па на расстоянии около 120 км, при этом РН находится на высоте около 70 км. Величина амплитуды не имеет явной сезонной зависимости. Учитывая чувствительность измерений современных микробарографов – 0.01 Па, инфразвуковое сопровождение полета РН оказывается возможным только до высот около 70 км, при этом измерительный пункт должен находиться на расстоянии, не превышающем 120 км

от места старта. При взрывах РН на высотах выше 70 км при самых неблагоприятных ситуациях выпадение токсичного облака распыленных компонент ракетного топлива на Землю происходит за пределами Казахстана – на расстояниях 4 – 7 тысяч километров от места старта. В этой связи можно предположить, что для диагностики экологических последствий на территории Казахстана в случае взрыва РН достаточно организовать инфразвуковой мониторинг на расстоянии около 100 км от места пуска РН.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развиты физические модели, созданы комплексы программ и проведены эксперименты, позволившие определить на Земле уровни инфразвука, излучаемого при: работе двигателей РН, полете РН со сверхзвуковой скоростью, падении ступени РН, взрыве РН на активном участке траектории. Определено, что опасными для здоровья человека являются только инфразвуковые волны, генерируемые двигателями ракеты-носителя. Построена карта опасных для человека зон вокруг двух пусковых площадок РН «Протон» и двух пусковых площадок РН «Союз».

ЛИТЕРАТУРА

1. Экологические проблемы и риски воздействий ракетно-космической техники на окружающую природную среду. Справочное пособие. Под общей редакцией чл.-кор. РАН В.В. Адушкина, С.Н. Козлова, А.В. Петрова – М.: Анкил, 2000. – 639 с.
2. Методические указания по осуществлению государственного санитарно-эпидемиологического надзора за соблюдением санитарных правил и норм «предельно-допустимых уровней инфразвука и низкочастотного шума в помещениях жилых и общественных зданий и на территории жилой застройки» (санпин № 3.01.030/у97, № 3.05.031 – 97).
3. Drobzheva, Ya., The acoustic field in the atmosphere and ionosphere caused by a point explosion on the ground / Ya Drobzheva., V.M. Krasnov // J. Atmos. and Solar-Terr. Phys., 2003. V. 65. - Issue 3. – P. 369-377.
4. Drobzheva, Ya. Disturbances of the ionosphere of blast and acoustic waves generated at ionospheric heights by rockets / Ya. Drobzheva., V.M Krasnov, O.I. Sokolova // Journal of Atmos. and Solar-Terr. Phys., 2003, Vol. 65, Issues 16-18, – P. 1385-1392.
5. Цикулин, М.А. Ударные волны при движении в атмосфере крупных метеоритных тел. / М.А. Цикулин // М., 1969. – 47 с.
6. Долин, П.А. Справочник по технике безопасности. «Энергия» / П.А. Долин, М., 1973. – 448 с.
7. Hedin, A.E. Extension of the MSIS thermospheric model into the middle and lower atmosphere / A.E.Hedin // J. Geophys. Res. – 1991. – A. 96 – P. 1159 - 1172.
8. Empirical wind model for the upper, middle and lower atmosphere / A.E Hedin [at all] // J. Atmos. Terr. Phys. – 1996, 58 – P. 1421 - 1447.

ЖЕТКІЗГІШ-РАКЕТАЛАРДЫ ЖІБЕРУІНДЕ ИНФРАДЫБЫСТЫҚ СӘУЛЕЛЕНУ ЖӘНЕ ОНЫҢ ХАЛЫҚ ДЕНСАУЛЫҒЫНА ӘСЕРІ

¹⁾ Краснов В.М., ¹⁾ Дробжева Я.В., ²⁾ Пак Г.Д., ¹⁾ Салихов Н.М.,
³⁾ Козловский В.А., ³⁾ Мухамеджанов Э.К., ⁴⁾ Маханов Д.И., ⁵⁾ Лазуркина В.Б.

¹⁾ ҚР БҒМ Ионосфера институты, Алматы

²⁾ ҚР БҒМ Адам мен хайуандардың физиологиясы институты, Алматы

³⁾ «Инфракос-Экос» ЕМК, Алматы

⁴⁾ Кардиология және ішкі аурулар ҒЗИ, Алматы

⁵⁾ Ресей Ғылыми Академиясының кітапханасы, Санкт-Петербург

Жеткізгіш-ракета қозғалтқышы жұмыс істеуінде, жеткізгіш-ракета дыбыстан асқын жылдамдықпен ушуында, жеткізгіш-ракетаның сатылары құлауында, траекториясының активтік учаскесінде жеткізгіш-ракета жарылуында сәулеленетін инфрадыбыстың (соққы толқындардың) деңгейін Жерде анықтауына мүмкіншілік берген дамытылған физикалық модельдері, жасалған программалар кешендері мен жүргізілген эксперименттері

сипатталған. Инфрадыбыстың осындай барлық көздердің адамның жүрек-тамыр жүйесінің күйіне ықпалын зерттеу нәтижелері бойынша жіберу алаңдардың аудандарында жеткізгіш-ракетаның қозғалтқышы өндіретін инфрадыбысты толқындар адамның денсаулығына қауіпті болып табылатыны анықталған. «Протон» және «Союз» жеткізгіш-ракеталарын жіберу алаңдардың ауданында адамға қауіпті зоналардың картасы жасалған. Жарылыстың қуатын есептеу негізінде 2006 ж. шілденің 26-сында «Днепр» жеткізгіш-ракета құлауында атмосфераға шашыратылған уытты отынның мөлшері бағаланған.

INFRASONIC RADIATION DUE TO STARTS OF CARRIER ROCKETS AND ITS INFLUENCE ON HEALTH OF THE POPULATION

¹V.M Krasnov, ¹Ya. Drobzheva, ²G.D. Pak, ¹N.M., Salikhov,
³B.A. Kozlovskii, ³E.K. Muhamedzhanov, ⁴D.I. Mahanov, ⁵Lazurkina V.B.

¹*Institute of Ionosphere of MES RK, Almaty*

²*Institute of human physiology and animals of MES RK, Almaty*

³*«Infrakos-Ecos», Almaty*

⁴*Scientific research institute of Cardiology and internal illnesses, Almaty*

⁵*Library of Russia Academy of Science, Saint-Petersburg*

Developed physical models, number of created programs, conducted tests, which facilitated determination of infrasonic levels (shock waves) on the surface radiated by engines of a carrier rocket, by supersonic flight of a carrier rocket, by incidence of a stage from a carrier rocket, and by an explosion of a carrier rocket at its active part of the path have been described. Based on the research results obtained after all infrasonic sources influence on human cardiovascular system, it was found that most dangerous for human health were infrasonic waves, generated by rocket engines at launching pad. Mapping of dangerous areas for people within launching pad of “Proton” and “Soyuz” rocket-carriers was done. We have determined the quantity of toxic fuel ejected into air based on calculation of explosion yield after carrier rocket “Dnepr” touched down in 26 of July 2006.

УДК 550.34:621.039.9

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ПРОЦЕДУРА ПОТОЧНОГО ОБНАРУЖЕНИЯ И ИДЕНТИФИКАЦИИ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ

¹⁾Авроров С.А., ²⁾Хайретдинов М.С.¹⁾Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия²⁾Институт Вычислительной математики и Математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия

Предложена автоматизированная технология поточного обнаружения сейсмических событий – промышленных, ядерных взрывов, землетрясений и др., - на фоне шумов в условиях многоканальной обработки данных с дальнейшим применением процедур классификации и определения параметров источника в режиме реального времени. Разработана программная система, включающая набор алгоритмов, и оценена эффективность предложенного подхода на примерах обработки ряда сейсмических записей промышленных взрывов в Алтае-Саянском регионе.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема локации разного типа сейсмических источников – землетрясений, ядерных и промышленных взрывов является одной из ключевых в современной сейсмологии. В ее основе лежит решение обратной задачи восстановления параметров (географических координат, глубины, мощности, времени в очаге) источника по данным регистрации сейсмических сигналов с помощью сети сейсмических станций либо сейсмических групп. При этом проблема понижения погрешности локации является одной из основных. Трудность ее решения обусловлена присутствием техногенных шумов и иных событий, которые являются фоновыми по отношению к изучаемому событию.

При локации сейсмических источников можно выделить ряд основных этапов [1]:

- выделение и измерение времени вступления сейсмических волн Р и S;
- идентификация источника;
- определение параметров очага;
- отображение координат источника на цифровой карте.

Существует большая потребность в автоматизированной технологии решения задач на обозначенных этапах, призванной в помощь человеку – оператору, чтобы снять с него множество рутинных операций обработки данных в условиях непрерывного мониторинга событий. В статье рассматриваются алгоритмы, предназначенные для решения двух первых этапов локации сейсмических источников.

МНОГОКАНАЛЬНАЯ ОБРАБОТКА

В основе задачи локации сейсмических источников лежит решение обратной задачи - восстановление параметров (географических координат, глубины, мощности, времени в очаге) источника по результатам определения параметров сейсмических волн, регистрируемых группой пространственно разнесенных сейсмических датчиков [2]:

$$\vec{t} = \vec{\eta}(X, \theta) + \vec{\varepsilon}, \quad (1)$$

где: $\vec{t} = (t_1, t_2, \dots, t_N)$ – вектор времен вступлений сейсмических волн; $\vec{\eta}(X, \theta)$ – N -мерный вектор вычисляемых времен вступлений (теоретический годограф) или функция регрессии; $\vec{\varepsilon} = (\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_N)^T$ – вектор невязок. Здесь: ε_i – взаимно независимые случайные величины, имеющие распределение с нулевым средним и заданными дисперсиями; $\vec{\theta} = (x, y, z, v, t)^T$ – m -мерный вектор оцениваемых параметров, $X = (\vec{x}_1, \vec{x}_2, \dots, \vec{x}_N)$ – матрица координат датчиков (или точек излучения), N – число датчиков.

Из (1) видно, что основными исходными параметрами являются времена вступлений основных типов волн, распространяющихся в упругой среде – продольных и поперечных волн. При этом задача повышения точности измерений является одной из основных: от точности измерений этих параметров напрямую зависит точность определения параметров источника. Трудность решения задачи усугубляется влиянием шумов техногенной природы.

Стремление повысить точность определения моментов вступлений волн на вибрационных сейсмограммах при ограниченном числе сейсмоприёмников приводит к идее использования принципа нелинейной обработки, лежащего в основе мультипликативной антенны, используемой в радиофизике. Как известно, в отличие от антенн с линейной обработкой в этом случае достигается возможность более острого разрешения по направлению распространения волны при одном и том же числе элементов антенны. Группа сейсмических датчиков эквивалентна сейсмической антенне, представленной на рисунке 1. Здесь $u_1, u_2, \dots, u_N$ – сигналы, регистрируемые с датчиков.

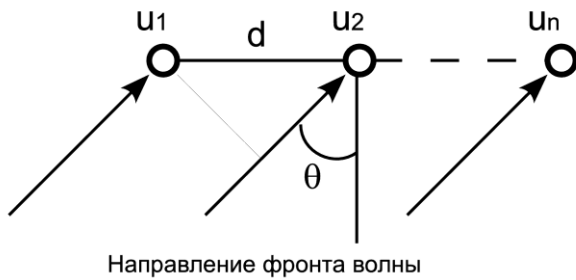


Рисунок 1. Сейсмическая антенна, образованная группой сейсмических датчиков $u_1, \dots, u_n$

В частности, если сигнал на выходе первого датчика принять равным $u_1 = F_s \cdot \cos(\omega t)$, то на выходе соседнего датчика, отстоящего на шаг d , $u_2 = F_s \cdot \cos(\omega t + kd \sin \theta) = F_s \cdot \cos(\omega t + \tau)$, где F_s – характеристика чувствительности датчика по направлению, θ – угол между направлением прихода волны и перпендикуляром к линии расположения сейсмоприемников, $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число. Тогда, в случае линейной обработки $u_z = u_1 + u_2 = F_s(\theta) \cdot \cos\left(\frac{kd}{2} \sin \theta\right)$, а в случае нелинейной обработки $u_{\Pi} = u_1 \cdot u_2 = F_s^2 \cdot \cos(kd \sin(\theta))$.

В общем случае:

$$u_z = u_1 + u_2 + \dots + u_n \approx n \cdot F_s \cdot \psi_2(k, \theta, d), \quad (1)$$

$$u_{\Pi} = u_1 \cdot u_2 \cdot \dots \cdot u_n \approx F_s^n \cdot \psi_1(k, \theta, d). \quad (2)$$

Дисперсия оценки времени вступления волны по направлению распространения θ определяется второй производной [2, 3] в виде:

$$D_{\theta} = -1 / \left. \frac{d^2 u}{d\theta^2} \right|_{\theta_0},$$

где θ_0 соответствует наибольшей чувствительности регистрирующей линейки сейсмоприемников, достигаемой в направлении распространения фронта волны. Алгоритм поиска такого направления основан на вычислении $u_{\Pi}^* = \max u_{\Pi}$ на множестве линейных годографов, угловое положение которых заключено в пределах углового окна, выбираемого изначально с учетом ожидаемой скорости волны. Вычисление при этом осуществляется методом последовательного перебора. Для частного случая, когда $\theta_0 = 0$ (случай перпендикулярного падения фронта волны), $F_{\theta_0} = 1$ и $n \gg 1$ по отношению к случаю мультипликативной обработки D_{θ_1} имеет порядок $\sim -1/n^2$, а к случаю аддитивной обработки –

$D_{\theta_2} = -1/n$. Таким образом, погрешность оценки направления распространения волны, определяемой направлением годографа времен вступлений волн на сеймотрассах, в случае мультипликативной обработки (2) в n раз меньше, чем в случае аддитивной обработки (1). В качестве подтверждающего примера ниже приводятся результаты эксперимента по выделению и измерению времен вступлений сейсмических сигналов, порождаемых взрывами на открытых угольных разрезах Кузбасса. На рисунке 2а представлена запись исходных сейсмических сигналов, которая характеризуется сильно выраженным шумом. По отношению к записям такого типа актуальной является задача автоматического выделения моментов вступлений сейсмических волн от удаленного взрыва (в данном случае 287 км), поскольку исходные записи являются многочасовыми и оператору достаточно сложно справиться с выделением коротких по длительности (единицы секунд) полезных волн в режиме визуального просмотра. Данная длительная запись от начала до конца подверглась обработке двумя методами – аддитивным и мультипликативным. Факт наличия полезных сейсмических волн фиксировался путем определения функций (1) и (2) вдоль предполагаемых годографов волн, соответствующих предполагаемым скоростям основных типов волн. При этом времена вступлений продольных Р- и поперечных S-волн соответствуют максимумам обеих функций. На рисунке 2б приведен результат выделения продольной волны с помощью аддитивного метода, на рисунке 2в – с помощью мультипликативной обработки.

Особенно остро задача повышения контрастности вступления волн стоит в задачах активного сейсмического мониторинга среды с помощью вибрационных источников. Это связано с тем, что, в сравнении со спектром взрывов, спектр вибросейсмических колебаний беднее, и это приводит к затягиванию передних и задних фронтов вибрационных сейсмограмм, в результате чего вибрационные сейсмограммы являются менее компактными в сравнении со взрывными. В этом случае при определении времени вступления волн нелинейная обработка является достаточно эффективной, что иллюстрируют вибрационные сейсмограммы, представленные на рисунке 3. Сейсмограммы получены в результате многоканальной (в данном случае 5-ти канальной) обработки сейсмических сигналов, зарегистрированных в пунктах на удалении 324, 342, 371 м от вибратора.

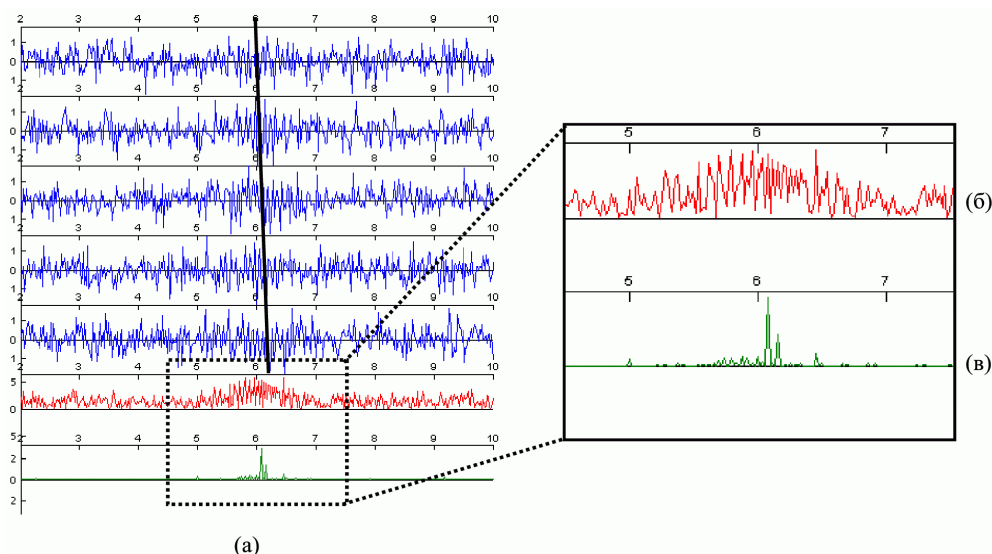


Рисунок 2. Результат модельного эксперимента по вычислению времени вступления импульсного сигнала: а – исходная сейсмограмма (соотношение сигнал/шум $A/\sigma=2$); б – выделение волны путем аддитивной обработки, в – то же - путем мультипликативной обработки

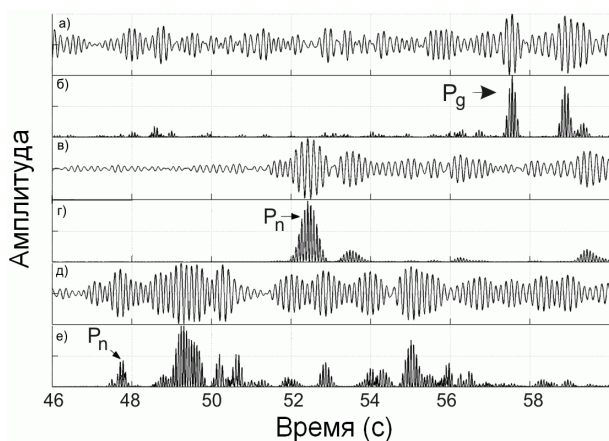


Рисунок 3. Вибрационные сейсмограммы после линейной (а, в, д) и нелинейной (б, г, е) обработки

Сейсмограммы а, в, д на рисунке 3 получены путем линейной обработки, а сейсмограммы б, г, е – путем нелинейной обработки. Как видно из сопоставления обработанных сейсмограмм, в первом случае, вступления Р-волн характеризуются более высокой контрастностью и компактностью. Таким образом, рисунки 2 и 3 подтверждают, что мультипликативная функция (2) является по форме намного более острой и, соответственно, позволяет более точно оценивать времена вступлений волн. Очевидно, что предоставление в распоряжение оператора подобных интегральных функций, указывающих на моменты вступления сейсмических волн, является значительной помощью в процессе углубленного анализа сейсмических записей. Реализация алгоритмов (1) и (2) возможна в режиме реального времени, что позволяет автоматизировать процессы выделения и измерения параметров сейсмических волн.

РАСПОЗНОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ

Результат многоканальной мультипликативной обработки – мультипликативная функция (2), – служит объектом анализа для выявления амплитудных всплесков, указывающих на появление сейсмических волн, и определения времен вступлений Р- и S-волн, необходимых для дальнейшего решения задачи определения координат сейсмического источника, т.е. функции $\vec{\theta} = (x, y, z, v, t)^T$. Другой важный этап обработки связан с идентификацией сейсмических источников, результатом которой является отнесение сигнала к одному из двух классов: промышленный взрыв или помеха (идентификация ядерных взрывов и землетрясений является дальнейшей задачей). В результате изучения особенностей сейсмических записей взрывов выбрана система из трёх признаков: задержка между временами вступления Р и S волн, отношение амплитуд волн A_s/A_p и отношение средних частот волн F_p/F_s .

Известно, что разность времён вступления продольных и поперечных волн, распространяющихся в упругой среде, есть функция расстояния от источника волн до точки регистрации. В качестве примера на рисунке 4 представлена зависимость между расстоянием «источник-приёмник» и разностью времён вступлений $t_S - t_P$ волн, зарегистрированных от промышленных взрывов Кузбасса на удалениях 190 – 335 км. Располагая данными о скоростях распространения волн для конкретного региона, задав необходимый временной интервал Δt , можно настроиться на обнаружение событий в интересующем диапазоне расстояний. Это свойство может использоваться как дополнительный признак в процессе обнаружения и распознавания сейсмических сигналов и должно учитываться на этапе определения времён вступления Р- и S-волн.

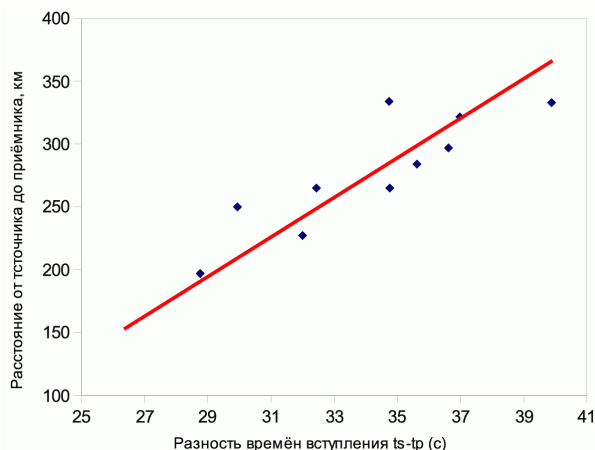


Рисунок 4. Экспериментальная зависимость между расстоянием источник-приёмник и разностью времён вступлений $t_s - t_p$

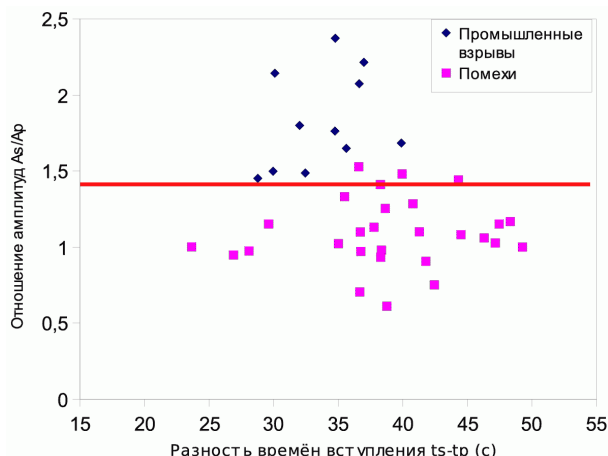


Рисунок 5. Диаграмма рассеяния отношения амплитуд волн A_s/A_r взрывов и помех; данные с компоненты X

При вычислении соотношения амплитуд волн A_s/A_r используются усредненные зарегистрированные значения амплитуды P- и S- волн. Амплитуда вычисляется с учётом положения линии годографа, найденного методом аддитивной или мультипликативной обработки. Диаграмма распределения значений признака для промышленных взрывов и помех приведена на рисунке 5. Здесь представлены результаты расчетов значений отношения амплитуды S-

волны к амплитуде P- волны (A_s/A_r) для компоненты X. Для шумовых амплитудных всплесков значение A_s/A_r имеет математическое ожидание $M = 1$ и значение дисперсии $D = 0,00793$, тогда как соответствующие значения для волн от промышленных взрывов составляют $M = 1,724$; $D = 0,114$.

ОЦЕНИВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМА НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Для оценки помехоустойчивости созданной системы автоматизированного обнаружения и распознавания сейсмических событий проведена обработка сейсмической записи (рисунок 6) мощного 100-тонного химического взрыва «Омега-3», произведенного на Семипалатинском испытательном полигоне в Казахстане. Расстояние от точки регистрации до эпицентра взрыва составляло 321 км. Запись сигнала начата за 2 часа 10 минут до взрыва, общая длительность сеанса записи составила 10800 с (3 часа).

В результате многоканальной автоматической обработки данной трехчасовой записи было обнаружено и распознано 2 события: на 7857 с и на 8392 с после начала сеанса. Первое событие соответствует истинному моменту вступления P волны искомого взрыва, в то время как второе – ложное срабатывание на нестационарную высокоамплитудную помеху, по свойствам подпадающую под определение взрыва с точки зрения таких используемых критериев, как ожидаемый угол годографа, расстояние между волнами P и S, а также соотношение амплитуд и частот. В процессе обработки было отброшено 60 ложных событий (высокоамплитудных помех).

Время обработки записи длительностью 3 часа составило 36 с на ЭВМ с ЦПУ AMD Athlon XP 1533 МГц, что свидетельствует о пригодности разработанных алгоритмов обнаружения и распознавания сейсмических событий в режиме реального времени. Точность вычисления координат источника сейсмических событий зависит от точности определения времён вступления P и S волн. Исходя из этого, проведена оценка точности определения данных характеристик с использованием записей промышленных взрывов на угольных карьерах Кузбасса.

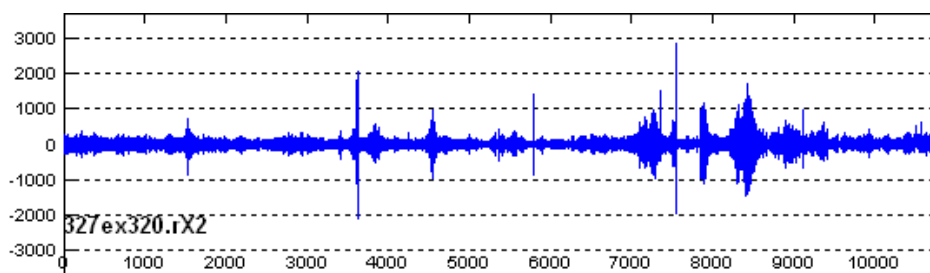


Рисунок 6. Запись 100-тонного химического взрыва «Омега-3» длительностью 10800 с

По отношению к пунктам регистрации кузбасские карьеры расположены на различных азимутальных направлениях в пределах 58 – 270 град. и в диапазоне расстояний 130 – 334 км (рисунок 7).

Оценка точности определения времён вступления Р- и S- волн проведена по имеющимся сейсмическим записям промышленных взрывов на 4 карьерах (таблица). При этом сравнивались результаты, полученные в результате автоматизированной и ручной обработки сейсмических записей взрывов.

Как следует из таблицы, результаты определения времен вступления Р- и S- волн отличаются в среднем в пределах 2.5%. Максимальная погрешность оценивания расстояния при использовании многоканального метода составила 5%. В [6] на основе при-

менения вейвлет-фильтрации погрешность определения времен вступления Р- и S- волн и расстояний до источника составила не более 1%. Это означает, что при необходимости, рассматриваемый подход может быть дополнен алгоритмом вейвлет-анализа с целью дальнейшего повышения точности результатов.

В процессе опробования разработанной системы на сейсмических записях промышленных взрывов в Кузбассе и химического взрыва на Семипалатинском испытательном полигоне, все сигналы от взрывов были автоматически обнаружены. При этом в процессе обработки возникли ложные срабатывания. В итоге, вероятность ошибки при классификации взрывов и помех составила 2%.

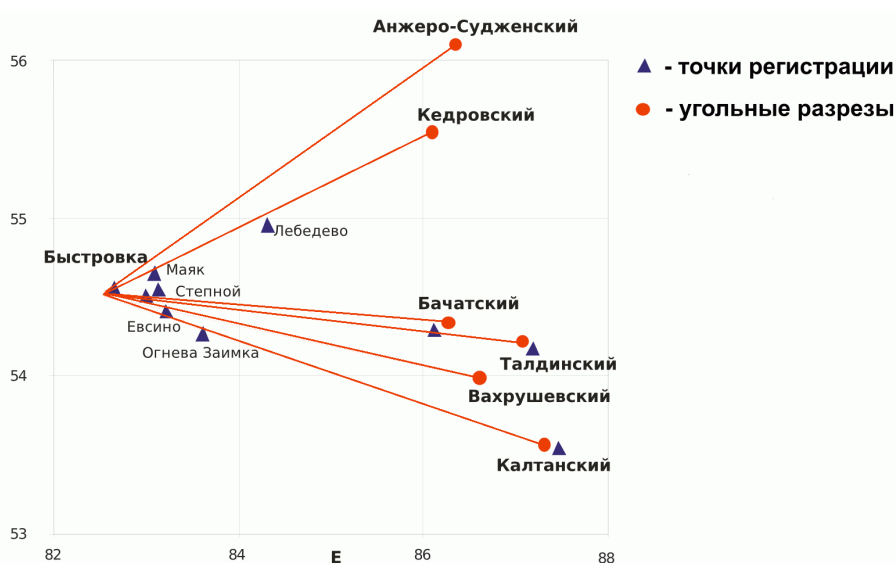


Рисунок 7. Схема расположения пунктов взрыва и регистрации, а также азимутальные направления «взрыв-приемник»

Таблица. Результаты автоматического определения времён вступления Р- и S- волн от карьерных взрывов

Разрез, дата	tp		ts		ts-tp	Вычисленное расстояние	Истинное расстояние
	авт.	ручн.	авт.	ручн.			
Бачатский, 10.08.01	36,78	37.9	66,72	65.5	29,94	236,526	227
Бачатский, 10.08.01	39	37.76	67,1	66.58	28,1	221,99	227,29
Калтанский, 06.07.01	57,36	55.84	97,24	97.03	39,88	315,052	333
Талдинский, 09.08.01	48,84	49.14	85,46	87.9	36,62	289,298	297

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны алгоритмы для автоматического многоканального обнаружения и распознавания сейсмических сигналов от промышленных взрывов. Реализована программная система, включающая разработанные алгоритмы с целью автоматизации процесса обработки сейсмических данных.

Оценены временные затраты на обработку сейсмических данных с использованием разработанной программной системы: обработка записи длительностью 1 час занимает около 12 с, что говорит о воз-

можности применения разработанной системы для обработки данных. Вероятность ошибки при классификации взрывов и помех составила 2%.

Созданная система позволяет автоматизировать процесс обнаружения сейсмических сигналов от промышленных взрывов на фоне помех. Наличие данного инструмента способно существенно снизить трудозатраты человека-оператора на обработку многочасовых сейсмических записей и является эффективным инструментом сейсмолога на этапах интерпретации результатов полевых экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хайретдинов, М. С. Автоматизированная технология локации сейсмического источника / М.С. Хайретдинов, О.К. Омельченко, Ю.И. Родинов / Математические методы в геофизике: Труды междунар. конф.- Ч. II // Новосибирск: Изд. ИВМиМГ СО РАН, 2003. - С. 529 - 535.
2. Khairtdinov, M.S. Numerical algorithms and results of experiments to determine the parameters of the borehole bottom and medium / M.S. Khairtdinov [et al] // Bull. Nov. Comp. Center, Math. Model. In Geoph., 2005. - 10 – P. 33 - 41.
3. Хайретдинов, М.С. Нелинейный метод выделения и измерения параметров сейсмических волн / М.С. Хайретдинов, С.А. Авроров / Сборник материалов международного научного конгресса «ГЕО-Сибирь-2006». Т.3.: Мониторинг окружающей среды, геоэкология, дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия // Новосибирск: Изд-во СГГА, 2006. - Часть 2. – С. 8 - 13.
4. Авроров, С.А. Поточное обнаружение и распознавание сейсмических волн в шумах / С.А. Авроров // Сборник материалов международного научного конгресса «ГЕО-Сибирь-2007». Т.3: Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология. - Новосибирск: Изд-во СГГА, 2007. – С. 269 - 273.
5. Седухина, Г.Ф. Интерактивная система обработки сейсмоданных ASTRA в среде MATLAB / Г.Ф. Седухина // Информ. системы и технологии. ИСТ`2000 - Междунар. науч.-техн. конф.: Материалы конф. (докл. и тез. докл.). – Новосибирск: НГТУ, 2000. – Т. 3. – С. 342 - 346.
6. Хайретдинов, М.С. Программная система автоматизированной локации и визуализации сейсмических источников / М.С. Хайретдинов, С.М. Клименко // Труды III Междунар. конф. "Мониторинг ядерных испытаний и их последствий", Боровое: Вестник НЯЦ РК. – Курчатов: НЯЦ РК. - 2004. – Вып. 2 - С. 70 - 76.

СЕЙСМИКАЛЫҚ ОҚИҒАЛАРЫН ТАСҚЫНДЫ ТАБУ МЕН СӘЙКЕСТЕНДІРУІНІҢ АВТОМАТТАНҒАН ПРОЦЕДУРАСЫ

¹⁾Авроров С.А., ²⁾Хайретдинов М.С.

¹⁾Новосибирск мемлекеттік техникалық университеті, Новосибирск, Ресей

²⁾РҒА СБ Есептеу математика және Математикалық физика институты, Новосибирск, Ресей

Сейсмикалық оқиғаларын – өнеркәсіптік, ядролық жарылыстар, жерсілкінулер, ж.б. – кейінде нақты уақыт режимінде көздің параметрлерін түрлендіру мен анықтау процедураларын қолданумен деректерді көп арналы өңдеу жағдайларында шулар аясында тасқынды табуының автоматтанған технологиясы ұсынылған. Алгоритмдер жиынтығын қосатын программалық жүйесі әзірленген, және Алтай-Саян аумағында өнеркәсіптік жарылыстардың бір қатар сейсмикалық жазбаларын өңдеу үлгісінде ұсынылған көзқарастың тиімділігі бағаланған.

AUTOMATED PROCEDURE OF FLOW SEISMIC WAVES DETECTION AND RECOGNITION

¹⁾S.A. Avrorov, ²⁾M.S. Khairtdinov

¹⁾Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

²⁾Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia

An automated technology for the detection and recognition of seismic signals from earthquakes, nuclear and industrial explosions against background noise under multi-channel data processing with further recognition procedures application and source parameters determination in real time has been proposed. Software that includes a number of algorithms was developed. Efficiency of the proposed approach by the examples of seismic records processing of industrial explosions within Altai-Sayan region was evaluated.

УДК 550.311: 550.341

ВАРИАЦИИ ВРЕМЕНИ ПРОБЕГА ПРОДОЛЬНОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ В КАЛЕНДАРНОМ ВРЕМЕНИ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ НА ТЕРРИТОРИИ СЕВЕРНОЙ АМЕРИКИ

Ан В.А., Годунова Л.Д., Каазик П.Б.

Институт динамики геосфер Российской Академии Наук, Москва, Россия

Исследованы изменения времени пробега продольной сейсмической волны в интервале лет 1961 - 1992 гг. по данным наблюдений подземных ядерных испытаний на полигоне Невада (США), выполненных сейсмическими станциями Северной Америки.

ВВЕДЕНИЕ

По наблюдениям подземных ядерных взрывов на сейсмических станциях бывшего Советского Союза было обнаружено, что времена пробега продольной сейсмической волны не постоянны в календарном времени [1, 2]. В интервале лет 1961 - 1989 гг. на Семипалатинском испытательном полигоне (СИП) в СССР было произведено 345 подземных испытаний [3], а на Невадском полигоне (NTS) США в период 1961 - 1992 гг. - 872 испытания [4]. Наиболее мощные подземные взрывы в СССР выполнены на площадке Балапан СИП (106), а в США - на площадке Pahute NTS (85). Результаты предыдущих исследований позволили высказать гипотезу - на евразийском континенте в интервале лет 1961 - 1992 гг. до глубины порядка 1000 км происходит уплотнение, а на больших глубинах - разуплотнение среды в календарном времени [5]. Цель настоящего исследования - определить тенденцию вариаций времени пробега продольной

сейсмической волны за этот же календарный период на территории Северной Америки.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В течение 1961 - 1992 гг. на территории Северной Америки работало более ста сейсмических станций, бюллетени которых публиковались Международным сейсмологическим центром (ISC). Для первого этапа исследований было выбрано 9 сейсмических станций, расположенных севернее Невадского полигона (таблица 1).

Время вступления продольной волны в бюллетенях ISC публикуется с точностью до 0.1 с, время в гипоцентре взрыва - с точностью до 0.01 с [4]. Методика пересчета времени в гипоцентре во время в эпицентре (на уровне моря) дана в [6]. В таблице 2 приведены параметры взрывов на площадке Pahute NTS, использованные в данном исследовании. Локальный годограф продольной волны рассчитан по взрывам, времена вступления продольной волны, которых приведены в бюллетенях ISC.

Таблица 1. Параметры сейсмических станций севере полигона Невада

Станция	Код	φ° (N)	λ° (W)	h (м)	D (км)	α°
Topopah	TNP	38.0820	-117.2180	1932	110	320
Eureka	EUR	39.4833	-115.9700	2178	250	9
Oroville	ORV	39.5550	-121.5000	360	510	301
Byerly	BKS	37.8767	-122.2350	276	520	95
Newport	NEW	48.2633	-117.1200	760	1220	357.5
Edmonton	EDM	53.2216	-113.3500	730	1790	6.7
College Outpost	COL	64.9000	-147.7933	320	3700	336
Mould Bay	MBC	76.2417	-119.3600	15	4340	358
Alert	ALE	82.5030	-62.3500	65	5420	8

Примечание: φ° (N), λ° (W) - широта и долгота, h - высота над уровнем моря, D - эпицентрально расстояние (среднее) от NTS, α° - азимут на станцию (средний).

Таблица 2. Параметры подземных ядерных взрывов на площадке Pahute NTS

№ п/п	Дата д.м.г.	Время в эпицентре (Гринвич) ч-м-с	Координаты (градус)		m_b	№ п/п	Дата д.м.г.	Время в эпицентре (Гринвич) ч-м-с	Координаты (градус)		m_b
			Широта (N)	Долгота (W)					Широта (N)	Долгота (W)	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	14.04.65.	13-14-00.62	37.280	-116.524		44	12.06.80.	17-15-00.43	37.282	-116.455	5.6
2	12.05.65.	18-15-00.42	37.243	-116.432		45	25.07.80.	19-05-00.40	37.256	-116.478	5.5
3	24.02.66.	15-55-07.37	37.272	-116.435	5.0	46	17.12.80.	15-10-00.48	37.325	-116.316	5.1
4	14.04.66.	14-13-43.48	37.243	-116.432	5.4	47	06.06.81.	18-00-00.46	37.303	-116.326	5.6
5	06.05.66.	15-00-00.45	37.348	-116.323	5.4	48	12.02.82.	14-55-00.41	37.224	-116.464	5.4
6	30.06.66.	22-15-00.39	37.316	-116.300	6.0	49	12.02.82.	15-25-00.47	37.348	-116.317	5.4
7	20.12.66.	15-30-00.27	37.302	-116.409	6.3	50	25.04.82.	18-05-00.24	37.256	-116.423	5.4

**ВАРИАЦИИ ВРЕМЕНИ ПРОБЕГА ПРОДОЛЬНОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ
В КАЛЕНДАРНОМ ВРЕМЕНИ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ НА ТЕРРИТОРИИ СЕВЕРНОЙ АМЕРИКИ**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
8	23.05.67.	14-00-00.31	37.275	-116.371	5.7	51	24.06.82.	14-15-00.46	37.236	-116.371	5.6
9	26.05.67.	15-00-01.84	37.248	-116.481	5.5	52	26.03.83.	20-20-00.46	37.301	-116.461	5.2
10	26.01.68.	16-00-00.49	37.281	-116.515	4.7	53	01.09.83.	14-00-00.45	37.273	-116.356	5.5
11	22.03.68.	15-00-00.40	37.333	-116.312	5.6	54	25.07.84.	15-30-00.44	37.268	-116.412	5.4
12	23.04.68.	17-01-30.58	37.338	-116.376	4.6	55	09.12.84.	19-40-00.45	37.270	-116.498	5.5
13	26.04.68.	15-00-00.27	37.295	-116.457	6.3	56	15.12.84.	14-45-00.39	37.281	-116.306	5.4
14	15.06.68.	14-00-00.35	37.265	-116.316	5.9	57	02.05.85.	15-20-00.46	37.253	-116.326	5.7
15	28.06.68.	12-22-00.43	37.245	-116.484	5.3	58	12.06.85.	15-15-00.40	37.248	-116.490	5.5
16	29.08.68.	22-45-00.39	37.250	-116.348	5.9	59	25.07.85.	14-00-00.09	37.297	-116.439	5.2
17	08.12.68.	16-00-00.60	37.343	-116.567	4.8	60	28.12.85.	19-01-00.47	37.238	-116.474	5.3
18	19.12.68.	16-30-00.16	37.231	-116.474	6.3	61	22.04.86.	14-30-00.45	37.264	-116.441	5.3
19	07.05.69.	13-45-00.04	37.283	-116.502	5.8	62	25.06.86.	20-27-00.46	37.265	-116.500	5.5
20	16.09.69.	14-30-00.23	37.314	-116.462	6.2	63	17.07.86.	21-00-00.44	37.279	-116.356	5.7
21	08.10.69.	14-30-00.50	37.257	-116.442	5.5	64	04.09.86.	16-09-00.46	37.240	-116.369	3.5
22	26.03.70.	19-00-00.35	37.300	-116.535	6.5	65	30.09.86.	22-30-00.50	37.300	-116.308	5.5
23	06.06.73.	13-00-00.34	37.245	-116.347	6.1	66	16.10.86.	19-25-00.44	37.220	-116.463	5.6
24	14.05.75.	14-00-00.46	37.221	-116.475	6.0	67	13.12.86.	17-50-05.46	37.263	-116.413	5.5
25	03.06.75.	14-20-00.43	37.340	-116.524	5.9	68	18.04.87.	13-40-00.38	37.248	-116.510	5.5
26	19.06.75.	13-00-00.39	37.350	-116.321	6.1	69	30.04.87.	13-30-00.45	37.233	-116.424	5.5
27	26.06.75.	12-30-00.34	37.279	-116.369	6.2	70	24.09.87.	15-00-00.44	37.228	-116.376	5.7
28	28.10.75.	14-30-00.34	37.290	-116.412	6.4	71	15.02.88.	18-10-00.47	37.314	-116.472	5.3
29	20.11.75.	15-00-00.41	37.225	-116.368	6.0	72	02.06.88.	13-00-00.46	37.260	-116.442	5.4
30	03.01.76.	19-15-00.32	37.297	-116.334	6.2	73	07.07.88.	15-05-30.44	37.252	-116.378	5.6
31	12.02.76.	14-45-00.32	37.271	-116.489	6.3	74	17.08.88.	17-00-00.49	37.297	-116.307	5.5
32	14.02.76.	11-30-00.36	37.243	-116.421	6.0	75	22.06.89.	21-15-00.48	37.283	-116.413	5.3
33	09.03.76.	14-00-00.39	37.310	-116.365	6.0	76	27.06.89.	15-30-00.40	37.275	-116.354	4.9
34	14.03.76.	12-13-00.32	37.306	-116.472	6.3	77	31.10.89.	15-30-00.43	37.263	-116.492	5.7
35	17.03.76.	14-15-00.40	37.256	-116.329	6.1	78	08.12.89.	15-00-00.46	37.231	-116.410	5.5
36	11.04.76.	15-30-00.54	37.300	-116.328	5.3	79	13.06.90.	16-00-00.42	37.262	-116.421	5.7
37	11.04.76.	17-45-00.45	37.233	-116.369	5.5	80	12.10.90.	17-30-00.43	37.248	-116.495	5.6
38	31.08.78.	14-00-00.51	37.276	-116.358	5.6	81	14.11.90.	19-17-00.45	37.227	-116.372	5.4
39	02.11.78.	15-25-00.57	37.288	-116.298	4.2	82	04.04.91.	19-00-00.40	37.296	-116.314	5.6
40	16.12.78.	15-30-00.50	37.273	-116.411	5.5	83	16.04.91.	15-30-00.44	37.245	-116.443	5.4
41	11.06.79.	14-00-00.50	37.290	-116.456	5.5	84	14.09.91.	19-00-00.43	37.226	-116.429	5.5
42	26.09.79.	15-00-00.46	37.229	-116.365	5.6	85	26.03.92.	16-30-00.37	37.272	-116.361	5.5
43	26.04.80.	17-00-00.43	37.248	-116.423	5.4						

Примечание: время в эпицентре - время в гипоцентре [4], приведенное к уровню моря; координаты - по [4]; m_b - по ISC

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Экспериментальные исходные данные приведены в таблице 3.

Обращает на себя внимание достаточно большое количество слабых вступлений (e) продольной волны на достаточно близком эпицентрального расстоянии при относительно больших значениях магнитуды (m_b (таблицы 2, 3). Оценки линейного тренда времени пробега продольной волны на территории Северной Америки в некоторых случаях отличаются от результатов, полученных на евразийском континенте [5]. Возможно, это связано с недостаточной точностью определения локального годографа из-за малой протяженности эпицентрального расстояния (13 - 26 км для различных станций).

Оценки линейного тренда времени пробега продольной волны на территории Северной Америки в некоторых случаях отличаются от результатов, полученных на евразийском континенте [5]. Возможно, это связано с недостаточной точностью определения локального годографа из-за малой протяженности эпицентрального расстояния (13 - 26 км для различных станций).

Таблица 3. Параметры линейного тренда времени пробега продольной волны в календарном времени

Станция	t, с	n	e	V _k , км/с	Оценка линейного тренда времени пробега	
					мс/год	% × 10 ⁻³ в год
Топорух	20	35	0	5.674	+9.74 ± 25.3	+48.7
Eureka	38	61	0	8.197	-4.42 ± 4.03	-11.6
Oroville	71	54	1	8.228	+6.71 ± 3.80	+ 9.5
Byerly	72	82	18	8.404	-4.07 ± 2.66	-5.7
Newport	161	65	43	9.898	-4.73 ± 4.53	-2.9
Edmonton	228	73	47	6.592	+0.792 ± 3.82	+0.35
College Outpost	400	56	16	16.474	-6.21 ± 4.31	-1.6
Mould Bay	449	69	26	14.510	-0.522 ± 3.87	-0.12
Alert	525	58	25	14.804	+0.154 ± 4.12	+0.03

Примечания: t - время пробега (среднее), n - количество измерений, e - количество слабых вступлений, V_k - скорость продольной волны

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данные сейсмических станций Северной Америки подтверждают наличие вариаций времени пробега продольной сейсмической волны в календарном времени. Однако результаты анализа в некоторых случаях отличаются от результатов, полученных в аналогичных исследованиях для евразийского континента. Необходимо продолжить исследование ва-

риаций времени пробега продольной сейсмической волны на территории Северной Америки по данным других сейсмических станций. Возможно, необходимо дополнительно использовать данные регистрации взрывов, произведенных на испытательной площадке Юсса NTS, чтобы повысить надёжность определения локального годографа продольной волны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гамбурцева, Н. Г. Периодические вариации параметров сейсмических волн при просвечивании литосферы мощными взрывами / Н.Г. Гамбурцева [и др.] // ДАН СССР, 1982. – Т. 266, № 6. – С. 1349 – 1353.
2. Ан, В. А. Вариации параметров сейсмических волн при просвечивании Земли на расстоянии 90° / В.А. Ан, Е.И. Люкэ, И.П. Пасечник // ДАН СССР, 1985. – Т. 285, № 4. – С. 836 - 840.
3. Ядерные испытания СССР // М.: ИздАТ, 1997. – 304 с.
4. Springer, D.L. Seismic Source Summary for All U.S. Below-Surface Nuclear Explosions / D.L. Springer, G.A. Pawloski, J.L. Ricca, R.F. Rohrer, D.K. Smith // Bull. Seism. Soc. Am., 2002. – V. 92. No. 5. – P. 1806 - 1840.
5. 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. – № 2. – С. 27 - 32.
6. 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.

СОЛТҮСТІК АМЕРИКА АУМАҒЫНДА БАҚЫЛАУЛАР БОЙЫНША КҮНТІЗБЕЛІК УАҚЫТЫНДА ҚУМА СЕЙСМИКАЛЫҚ ТОЛҚЫННЫҢ ЖҮГІРУ УАҚЫТЫНЫҢ ВАРИАЦИЯЛАРЫ

Ан В.А., Годунова Л.Д., Каазик П.Б.

Ресей Ғылыми Академиясының Геосфералар динамикасы институты, Мәскеу, Ресей

1961-1992 ж.ж. аралығында Невада (АҚШ) полигонындағы ядролық жарылыстарын Солтүстік Американың сейсмикалық станцияларымен орындалған бақылауының деректері бойынша қума сейсмикалық толқынның жүгіру уақытының өзгерулері зерттелген.

LONGITUDINAL WAVE TRAVELTIME VARIATIONS BASED ON OBSERVATIONS AT NORTHERN AMERICA

V.A. An, L.D. Godunova, P.B. Kaazik

Institute for the Dynamics of Geospheres Russian Academy of Science, Moscow, Russia

Longitudinal wave travel time variations within 1961-1992 based on underground nuclear explosions data at Nevada test site (USA), recorded by American seismic stations, have been investigated.

УДК 550.344

СЕЙСМИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ СТАНЦИЙ НЯЦ РК ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ СЕЙСМОБЕЗОПАСНОСТИ КАЗАХСТАНА

Михайлова Н.Н.

Институт геофизических исследований НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

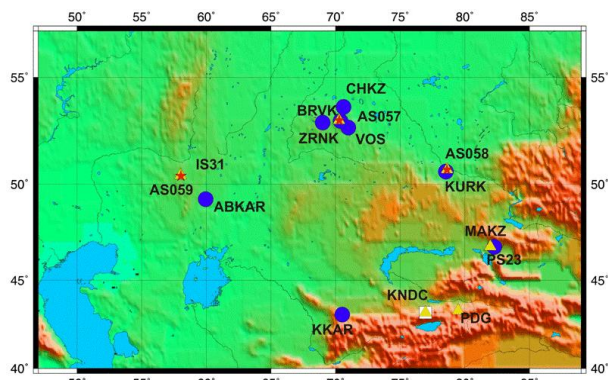
Приводится обзор принципиально новых результатов в отношении сейсмичности территории Казахстана и оперативного сейсмомониторинга по данным сети НЯЦ РК. Главным достижением за годы работы сейсмической системы НЯЦ РК является новое представление о сейсмической активности ряда районов Казахстана, ранее считавшихся асейсмичными, и плодотворное сотрудничество с международными центрами данных по оперативному слежению за сейсмической ситуацией на всей территории Центральной Азии.

За последнее десятилетие усилиями НЯЦ РК и ряда международных и зарубежных организаций на территории Казахстана сформирована новая сейсмическая сеть – сеть станций НЯЦ РК. По расположению, оснащению, режиму работы сеть имеет ряд отличий от ранее существовавших в Казахстане станций. *Во-первых*, станции сети НЯЦ РК расположены, в основном, по периметру территории Республики и их расположение не связано со степенью сейсмической активности отдельных частей территории (рисунок 1). Ранее станции старались установить в местах с высоким уровнем сейсмичности, поэтому они были сконцентрированы на юге, юго-востоке и, частично, на востоке Казахстана (сеть Сейсмологической опытно-методической экспедиции, СОМЭ МОН РК). *Во-вторых*, большинство станций НЯЦ РК – это сейсмические группы, а не отдельные станции. В группу входят от 10 до 21 элемента, оснащенных одно- и трехкомпонентными сейсмометрами. *В-третьих*, все сейсмометры размещены в скважинах глубиной от 30 до 80 м, что обеспечивает пониженный уровень сейсмических шумов и высокую чувствительность станций. *В-четвертых*, все новые станции НЯЦ РК являются частью глобальных сетей наблюдений (Международной сети мониторинга, ОДВЗЯИ, AFTAC, IRIS). Благодаря этому все получаемые данные соответствуют современным международным стандартам, а станции соответствуют требованиям, предъявляемым к станциям международного мониторинга. Такая интеграция в мировую сеть позволила поднять технический и научный уровень наблюдений и исследований, обеспечить надежный обмен данными в единых форматах. Ранее ни одна станция Казахстана не входила ни в одну международную сеть наблюдений. *В-пятых*, создана система коммуникаций в пределах сети с помощью радиотелеметрических и спутниковых каналов, что сделало возможным сбор и передачу данных в режиме реального времени. Это дало возможность повысить оперативность получения решений о происходящих событиях как непосредственно только по казахстанским данным, так и в международных центрах с использованием казахстанских данных. Таким образом, казахстанская сеть станций НЯЦ РК стала полноценной и неотъемлемой частью глобального мониторинга.

Казахстанские станции международного мониторинга могли бы стать просто поставщиком сейсмических и инфразвуковых данных в Международные центры данных в соответствии с подписанными Республикой Казахстан международными Договорами и Соглашениями. Но в 1999 г. было решено в рамках национальной системы мониторинга создать Центр данных, в функции которого входила бы обработка всех получаемых данных, их хранение, использование для научных исследований в интересах Казахстана. Таким центром стал Центр сбора и обработки специальной сейсмической информации (ЦСОСИ) в г. Алматы, являющийся подразделением Института геофизических исследований НЯЦ РК.

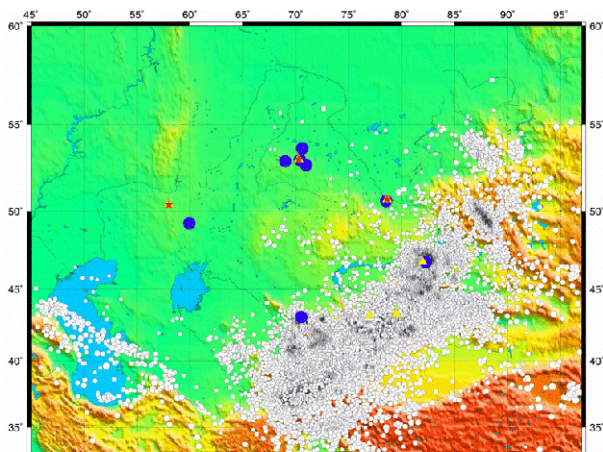
Со второй половины 2002 г. в ЦСОСИ начал систематически составляться интерактивный оперативный сейсмический бюллетень по данным станций НЯЦ РК. С 2003 г. по взаимной договоренности с СОМЭ МОН РК создается сводный бюллетень по данным двух сетей станций – НЯЦ РК и СОМЭ МОН РК. Составленный за каждые сутки бюллетень рассылается в СОМЭ МОН РК и Институт сейсмологии (ИС) МОН РК. Ведется служба срочных донесений Центра данных. Все происходящие сильные землетрясения обрабатываются в срочном порядке. Результаты сообщаются в СОМЭ МОН РК, а также по запросам областные подразделения Министерства по чрезвычайным ситуациям РК. Значительным шагом вперед явилось создание специализированного web-сайта Центра данных, где оперативно представляется фактическая информация о зарегистрированных сейсмических событиях: www.kndc.kz.

Получаемая в Центре данных информация отражает сейсмическую ситуацию на всей территории Центральной Азии (рисунок 2). Ранее обработка велась только в пределах Северного Тянь-Шаня и Джунгарии [1, 2] Публикация материалов обработки в открытой печати происходила с большим запаздыванием – сейчас это 6 лет. Причем, каталоги землетрясений публикуются в российских ежегодниках «Землетрясения Северной Евразии». К сожалению, в Казахстане последний раз каталоги землетрясений были опубликованы в 1990 г. [3].



Синие кружки – сейсмические группы, треугольники – трехкомпонентные сейсмические станции, звездочки – инфразвуковые станции, квадрат – Центр данных в г. Алматы

Рисунок 1. Расположение станций НЯЦ РК на территории Казахстана



Обозначения - на рисунке 1

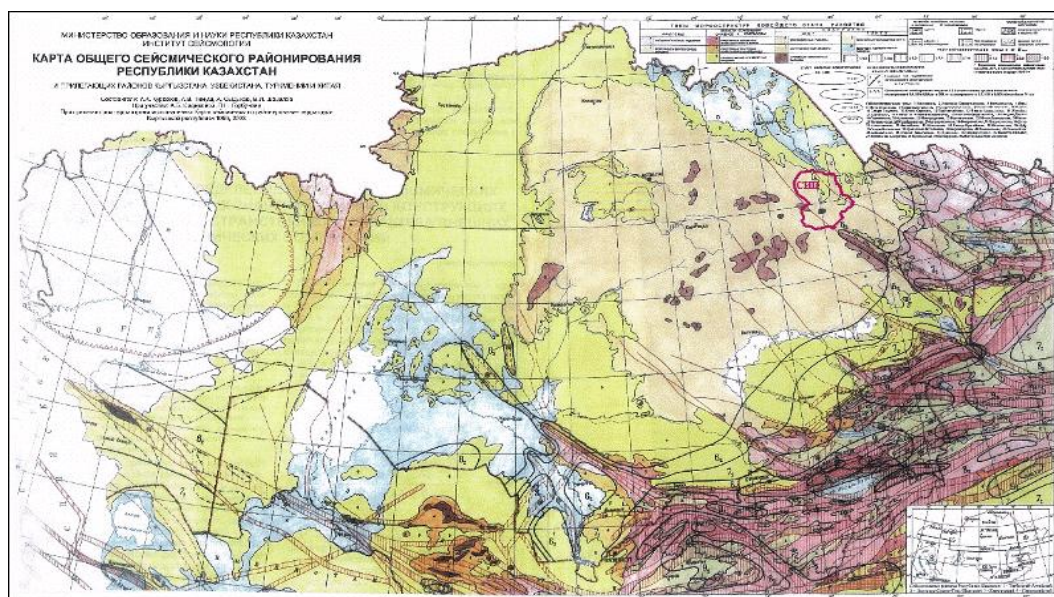
Рисунок 2. Эпицентры землетрясений за период с 2003 г. до середины 2007 г. по оперативным данным сети НЯЦ РК

Сеть станций НЯЦ РК и Центр данных позволили повысить оперативность представляемых бюллетеней сейсмических событий, пространственно расширить изучаемую территорию сейсмомониторинга, сделать оперативную информацию открытой для специалистов-пользователей.

Уже первые годы работы Центра данных позволили получить важные результаты. Сейсмологи традиционно считали, что сейсмоактивной частью Казахстана являются ограниченные территории юга-востока Республики. Это представление нашло отражение в действующих строительных нормах и правилах Республики Казахстан [4], составной частью которых является карта общего сейсмического районирования территории Казахстана (рисунок 3).

Из карты следует, что за пределами линий с ожидаемой интенсивностью сотрясений 6 баллов по шкале MSK64, опасных землетрясений, представляющих угрозу зданиям и сооружениям, быть не может.

В 2001 г. произошло землетрясение, позволившее усомниться в правильности подобной трактовки сейсмичности. Речь идет о Шалгинском землетрясении 2001 г. в Центральном Казахстане. Это землетрясение было не только зарегистрировано станциями НЯЦ РК, но и детально изучено специальной экспедицией ИГИ НЯЦ РК [5]. По результатам изучения построены карта изосейст землетрясения, карта эпицентров афтершоков. Землетрясение ощущалось интенсивностью в эпицентральной зоне 6 баллов. Регистрация этого землетрясения положило начало специальному направлению исследований – сейсмологии слабоактивных областей Казахстана, ранее считавшихся «асейсмичными».



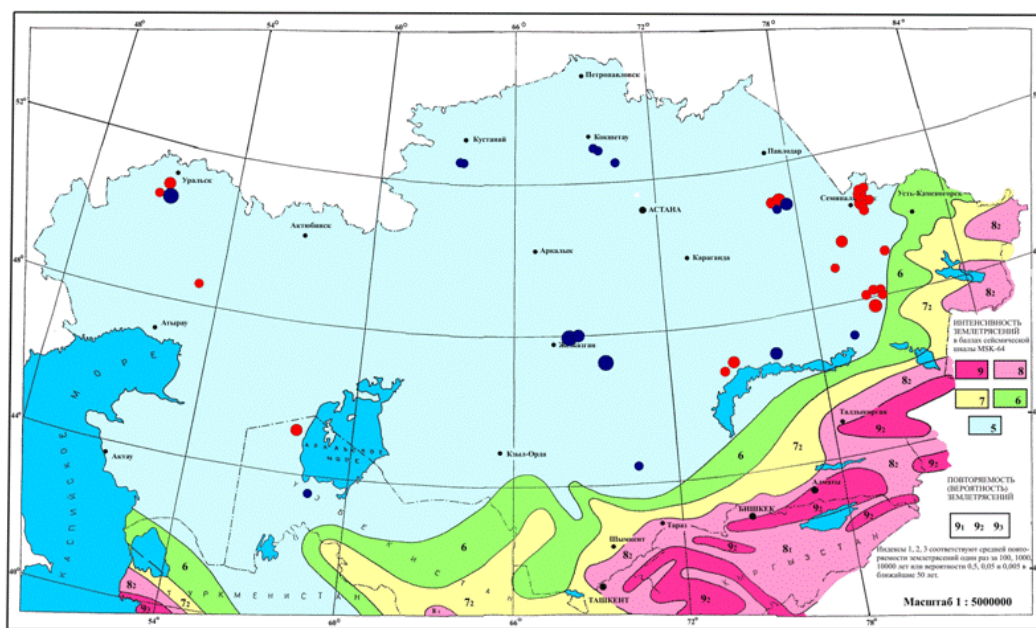
Красный контур - Семипалатинский испытательный полигон

Рисунок 3. Карта общего сейсмического районирования Республики Казахстан из [1]

Исследования сейсмичности проводились в разных направлениях. Во-первых, собирались архивные исторические и современные данные из сейсмологических бюллетеней ряда известных Международных центров данных (ISC, NEIC, REB, GS RAS). Особое значение придавалось сбору цифровых сейсмических записей по найденным событиям. Проведенная работа имеет очень большое значение потому, что в слабоактивных районах нельзя полностью доверять любому найденному решению, необходимо доказать достоверность данного сейсмического события, а также установить природу его источника, т.е. установить, не является ли обнаруженное событие промышленным или ядерным взрывом, оценить точность определения параметров таких событий. В результате таких исследований обнаружены землетрясения, свидетельствующие о проявлении тектонической активности в ряде районов Восточного Казахстана, в Центральном, Западном и Северном Казахстане. Выявлены землетрясения в таких «экзотических» для сейсмологии Казахстана районах, как вблизи курорта Боровое, около г. Рудный, в районе г. Уральска. На рисунке 4 показана карта эпицентров землетрясений с магнитудой $m_b \geq 3$ на территории Казахстана, отнесенной к слабосейсмичной.

Выявленные сейсмические события свидетельствует о том, что назрела необходимость пересмотра карты общего сейсмического районирования территории Казахстана, неадекватно отражающей реальность сейсмического процесса.

Отдельным аспектом исследований является детальное изучение сейсмичности отдельных территорий, в частности, Семипалатинского испытательного полигона (СИП) и его окрестностей. Как можно видеть из рисунка 2, эта территория также считается «асейсмичной». Однако по ряду литературных источников, по историческим данным были найдены землетрясения непосредственно у границ полигона, самое сильное из которых имело магнитуду $m_b=5,8$. На территории СИП в течение полевых сезонов 2005 – 2008 гг. организованы полевые наблюдения сетью из 8 – 10 сейсмических станций, которые подтвердили вывод о том, что в этом районе имеют место землетрясения. Основным источником сейсмической опасности – Главный Чингизский разлом, пересекающий всю территорию СИП с юга-востока на северо-запад. Концентрация довольно сильных событий наблюдается в зоне пересечения Главного Чингизского разлома с Муржикским разломом у западной границы полигона (рисунк 5).



Красные кружки – исторические землетрясения, начиная с 19 века до 1994 г., синие кружки – землетрясения, зарегистрированные сетью НЯЦ РК за 1994 – 2007 гг.

Рисунок 4. Эпицентры землетрясений с $m_b \geq 3$ в «асейсмичных» районах на фоне карты общего сейсмического районирования Казахстана

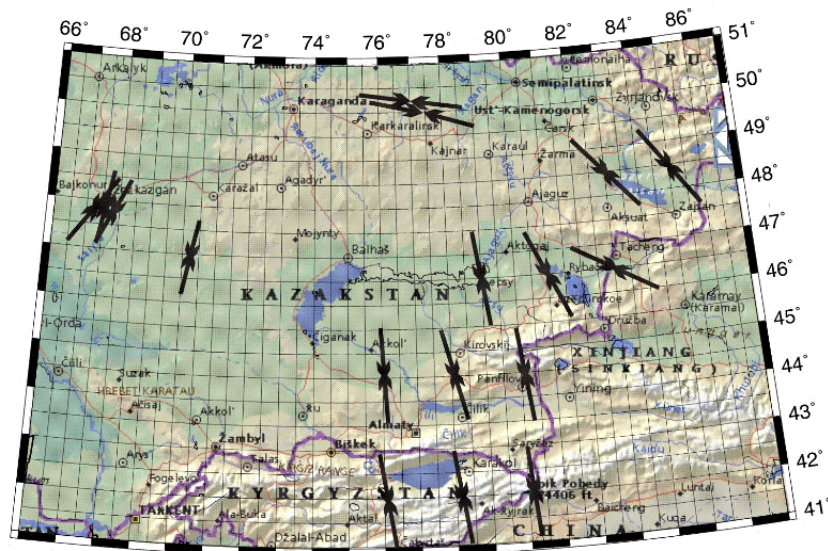


Рисунок 5. Карта направлений осей напряжений сжатия в очагах землетрясений в пределах территории Казахстана и прилегающих территорий

Магнитуда отдельных толчков превышала 5. Если учесть, что на территории СИП работают и планируется построить ряд ответственных объектов, эксплуатация которых связана с необходимостью обеспечения радиационной безопасности, то фактор сейсмической опасности приобретает особую важность. Необходимо срочно провести работы по организации не эпизодических, а стационарных сейсмических наблюдений, начать исследования по сейсмическому районированию территории СИП, результаты которого должны войти в действующие СНиП РК.

Следующей важной стороной деятельности по изучению сейсмичности является выделение из общего количества зарегистрированных сейсмических событий промышленных взрывов. Этому аспекту сейсмомониторинга ранее не уделялось должного внимания. Но известно, что все выводы о сейсмической активности не могут быть достоверными без исключения из каталогов сейсмических событий взрывов. Анализ архивных исторических данных по различным источникам показал, что в ряде достаточно авторитетных каталогов землетрясений содержались даже ядерные взрывы. В годы работы ЦСОССИ впервые на всей территории Казахстана начал проводиться мониторинг промышленных взрывов и составляться их каталог. Разработана специальная методика, распознавания, основанная на ряде совместно использующихся критериев [6,7]. Для большинства взрывов определяется только факт того, что это взрыв. Для некоторых удастся уточнить, к какому карьеру он относится. Одновременно

создается база данных эталонных взрывов, для которых известны как минимум точные координаты и мощность взрыва. Эти данные очень важны для работ по уточнению скоростных характеристик среды, а также для решения задач распознавания природы источника.

Данные станций НЯЦ РК явились удачным дополнением к данным СОМЭ МОН РК в определении механизмов очагов землетрясений на территории Казахстана, так как обеспечивают хорошее азимутальное окружение очагов и повышают точность определений. Удалось впервые определить механизмы очагов в зонах за пределами достаточно хорошо изученных Северного Тянь-Шаня и Джунгарии, оценить параметры системы действующих напряжений в пределах огромного региона [8, 9] (рисунок 5). Эти результаты важны как для исследований по геодинамике Центральной Азии, так и в исследованиях по прогнозу сейсмической опасности.

Небольшим по объему, но важным аспектом сейсмологических исследований является изучение сильных движений по цифровым записям акселерометров. Акселерометр сильных движений установлен в ЦСОССИ для изучения параметров сейсмических воздействий на этой площадке города. Цифровые записи осужитимых на территории г. Алматы землетрясений в унифицированном виде заархивированы и обработаны. Пример такой обработки с использованием программы VIEWWAVE [10] приведен на рисунке 6.

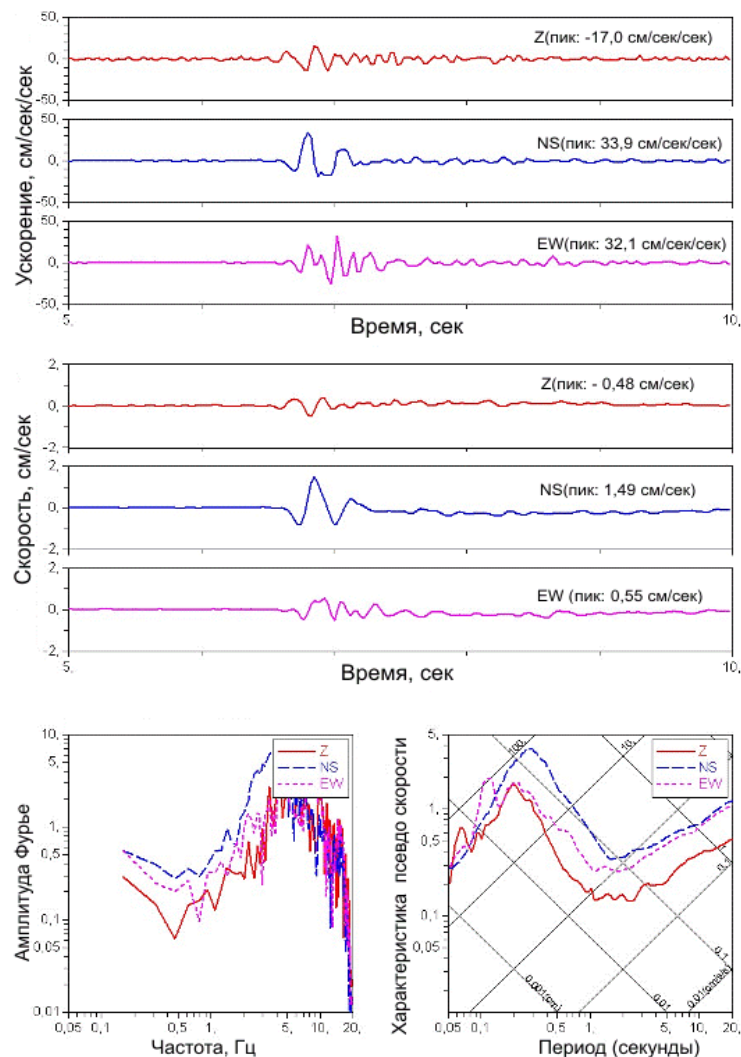


Рисунок 6. Пример обработки записи сильных движений землетрясения 29 декабря 2007 г., зарегистрированных станцией KNDC (г. Алматы)

На рисунке 6 приведены записи ускорения одного из самых сильных за последние годы землетрясений на территории г. Алматы, ощущавшегося с интенсивностью 4-5 баллов (только S-волны). Здесь же представлены результаты интегрирования ускорений – велосиграммы, по трем компонентам (средняя часть рисунка), спектры Фурье (внизу слева) и спектры реакции (внизу, справа). Все полученные спектры реакции по всем зарегистрированным записям станции KNDC использованы для построения спектральной кривой $\beta(T)$, которая была сравнена с нормативными кривыми динамичности $\beta(T)$. Получено удовлетворительное согласие с кривой для грунтов 2 категории по СНиП.

Каждая дополнительная точка в наблюдениях за сильными движениями важна для работ по сейсмическому микрорайонированию территории города Алматы. Поскольку приборов сильных движений на территории г.Алматы катастрофически мало, то данные станции KNDC будут важным дополнительным элементом к существующей сети сильных движений

ИС МОН РК для составления карты параметров воздействий.

Аналогичная работа выполнена и по данным акселерометра, установленного на станции Маканчи – IRIS/GSN в восточном Казахстане. Приборы сильных движений необходимы на всех станциях НЯЦ РК, а также на СИП для получения прямой информации о параметрах колебаний грунта.

Таким образом, за годы функционирования сети станций НЯЦ РК и Центра данных накоплены огромные массивы исходных записей и результатов их обработки, сформированы базы данных по различным аспектам исследований. Все данные хранятся в международных форматах. Они доступны казахстанским и зарубежным пользователям и уже используются в самых разных научных исследованиях. Важно, чтобы эти данные были использованы при разработке нормативных документов (карты сейсмического районирования, СНиП) для уменьшения ущерба и избежания человеческих жертв от будущих землетрясений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Калмыкова, Н.А. Северный Тянь-Шань / Землетрясения Северной Евразии в 1995 году / Н.А.Калмыкова, Н.Н. Михайлова, Н.П. Неверова // М.: РАН – С. 59 - 61.
2. Неверова, Н.П. Каталог землетрясений Северного Тянь-Шаня / Землетрясения Северной Евразии в 1995 / Н.П. Неверова // М.: РАН, 2001. – С. 277 - 296.
3. Михайлова, Н.Н. Каталог землетрясений Северного Тянь-Шаня и прилегающих территорий / Н.Н. Михайлова, А.А. Власова. - Алма-Ата: Наука. – 1990. – С. 202.
4. Строительство в сейсмических районах (СНиП РК 2.03-30-2006). – Алматы: Комитет по делам строительства и жилищно-коммунального хозяйства Министерства индустрии и торговли Республики Казахстан. – 2006 – С. 80.
5. Михайлова, Н.Н. Шалгинское землетрясение 22 августа 2001 года с $M_w = 5,2$, $J_0 = 6$ (Центральный Казахстан / Землетрясения Северной Евразии в 2001 году / Н.Н. Михайлова [и др.]. – Обнинск: ГС РАН, 2007.- С. 317 - 330.
6. Соколова, И.Н. Исследования по сейсмическому распознаванию подземных ядерных взрывов, химических взрывов и землетрясений на Семипалатинском использованием полигона / И.Н. Соколова, Г.С. Султанова // Сборник трудов конференции конкурса молодых ученых. - Курчатов: ИАЭ НЯЦ РК, 2003. – С. 195.
7. Соколова, И.Н. Критерии распознавания сейсмических событий Семипалатинского испытательного полигона / И.Н. Соколова // Тезисы докладов третьей международной конференции «Мониторинг ядерных испытаний и их последствий», Боровое, Казахстан. – Курчатов: НЯЦ РК, 2004.
8. Михайлова, Н.Н. О механизмах очагов землетрясений Восточного Казахстана / Н.Н. Михайлова, Н.Н. Полешко // Вестник НЯЦ РК, 2005. - Вып. 2.
9. Михайлова, Н.Н. Тензоры моментов центроидов и механизмы очагов землетрясений Центральной Азии / Н.Н. Михайлова, Н.Н., Полешко // Известия НАН РК, серия геологическая, 2007. – № 6 – С. 87 - 90.
10. ViewWave software by T.Kashima (<http://iisee.kenken.go.jp/staff/kashima/viewwave.html>).

ҚАЗАҚСТАН СЕЙСМОҚАУІПСІЗДІГІНІҢ ПРОБЛЕМАЛАРЫН ШЕШУ ҮШІН ҚАЗАҚСТАН СТАНЦИЯЛАРЫНЫҢ СЕЙСМИКАЛЫҚ ДЕРЕКТЕРІ

Михайлова Н.Н.

ҚР ҰЯО Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатов, Қазақстан

Қазақстан аумағының сейсмикалылығына қатысты негізінде жаңа нәтижелерінің және ҚР ҰЯО жүйесімен орындалған оперативтік сейсмомониторингтің шолуы келтірілген. ҚР ҰЯО сейсмикалық жүйесі жұмысының жылдарындағы басты табысы болып табылатыны бұрын асейсмикалық болып саналатын Қазақстанның бір қатар аудандарының сейсмикалық белсендігі туралы жаңа көзқарастар мен Орталық Азияның барлық аумағында сейсмикалық ахуалына оперативтік бақылау бойынша халықаралық деректер орталықтарымен жемісті ынтымақтастық.

SEISMIC DATA OF KAZAKHSTANI STATIONS TO SOLVE SEISMIC SAFETY PROBLEMS IN KAZAKHSTAN

N.N. Mikhailova

Institute of Geophysical Research NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

Review of update results in terms of seismicity within Kazakhstan and efficient seismic monitoring done by NNC RK network are given. The main achievement of NNC RK network is a new notion on seismic activity of a number of regions at Kazakhstan, which were earlier considered as non-seismic ones and fruitful cooperation with international data centers to monitor seismic situation over the whole territory of Central Asia

УДК 621.39:550.34

МОНИТОРИНГ АФТЕРШОКОВЫХ ПРОЦЕССОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ ОДВЗЯИ НА ПРИМЕРЕ КУРИЛЬСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ 15.11.2006 И 13.01.2007

Старовойт О.Е., Коломиец М.В.

Геофизическая служба РАН, Обнинск, Россия

Использование данных и продуктов Международного центра данных (МЦД) ОДВЗЯИ в национальной сейсмической сети Российской академии наук позволяет добиться снижения магнитудного уровня регистрации землетрясений в службе срочных донесений (ССД) Геофизической службы РАН. Проиллюстрирована работа ССД в период афтершоковых процессов на примере Курильских землетрясений 15.11.2006 г. и 13.01.2007 г.

Основными направлениями развития Службы срочных донесений (ССД) Геофизической службы РАН являются снижение магнитудного уровня землетрясений по России и уменьшение времени передачи срочного донесения. Объем работ ССД постоянно растет. На рисунке 1 показан рост числа землетрясений, данные по которым обработаны в ССД за последние 12 лет (1996 - 2007 гг.).

Особенностью периода 2006 – 2007 гг. является не только продолжающийся рост общего числа обработанных данных по землетрясениям, но и увеличение их числа в 3 раза для территории России. Из рисунка 1 видно, что в 2006 г. из общего прироста числа обработанных данных по землетрясениям (на 755), доля прироста землетрясений по России, составила 82% (621). Аналогичная картина наблюдалась и в 2007 г. Показанный на рисунке 1 рост обработанных данных по землетрясениям в России обусловлен двумя факторами. Во-первых, это развитие афтершоковых процессов Олютерского землетрясения 20 апреля 2006 г., а также Курильских землетрясений 15.11.2006 г. и 13.01.2007 г., во-вторых, - снижение магнитудного уровня землетрясений России, обработанных в ССД. Входные потоки данных, использованные в ССД до 2006 г. [1 - 3], и методики

обработки [1, 4] позволяли регистрировать землетрясения Курило-Камчатского региона, начиная с магнитуды 4.5. Для повышения точности определения основных параметров и снижения магнитудного уровня землетрясений была организована подписка на бюллетень Международного центра данных (МЦД ОДВЗЯИ) [5]. Получаемый бюллетень SEL1 (Standard Event List 1) представляет собой создаваемые на основе автоматического программного выделения вступления основных сейсмических волн, позволяющие дополнить данные национальной сейсмической сети. В настоящее время бюллетень SEL1 поступает в ГС РАН через 2 часа после землетрясения. С использованием SEL1 удалось снизить магнитудный уровень изучаемых землетрясений на территории России. Однако при этом увеличилось время передачи срочного донесения.

Специфика работы ССД рассмотрена на примере Курильского землетрясения 15.11.2006 г. в период афтершоковых процессов [6]. После землетрясения с магнитудой $M_S=8.2$, произошедшего в 11 час 14 мин (по Гринвичу), началось развитие афтершокового процесса. До конца первых суток в ССД было зафиксировано 40 афтершоков, причем, иногда на один час приходилось по 5 - 6 событий.

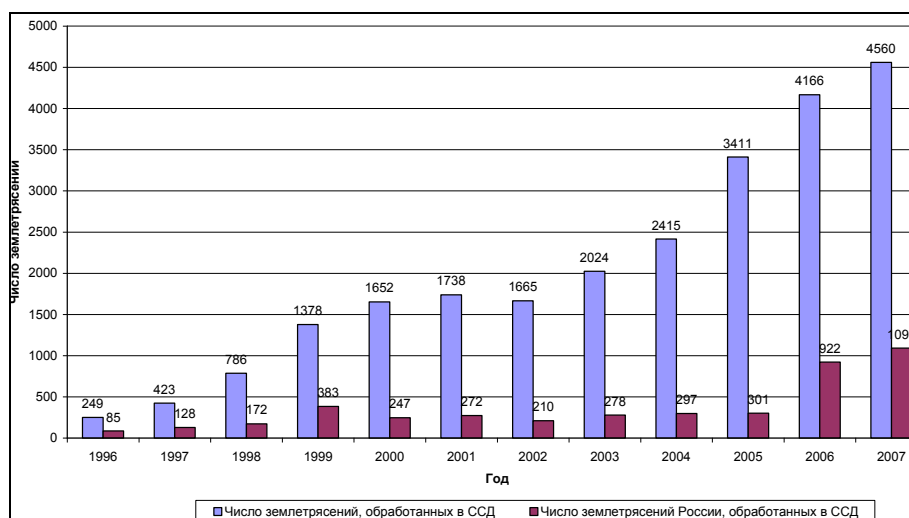


Рисунок 1. Число землетрясений, записи которых обработаны в ССД в 1996 - 2007 гг.

Время, затрачиваемое на обработку данных одного землетрясения, было сведено до минимума – до 20 - 30 минут вместо 40- 60 минут, затрачиваемых при обычном режиме работы. В основном, обрабатывались данные по землетрясениям, которые были локализованы автоматической программой AssocW [4], как правил, с магнитудой 4.8 - 5 (при условии отсутствия наложения нескольких событий). Возврат через 2 часа к обработке более слабых толчков, когда поступали новые данные бюллетеня SEL1, было практически невозможно. В нижеследующей таблице 1 представлены данные ССД о развитии афтершокового процесса Курильского землетрясения в течение 10 дней, последовавших за главным толчком 15.11.2006 г.

Поскольку в ССД обрабатывались данные и по землетрясениям, происходящих в других регионах, вернуться к обычному режиму и обработать более слабые толчки с использованием бюллетеня SEL1 стало возможно только 23 ноября, т.е. через 8 дней после землетрясения. Данный пример показывает,

что нижний магнитудный уровень землетрясений ССД может зависеть от общей напряженности сейсмической обстановки в конкретный период времени.

На рисунке 2 показано участие 25 станций, из числа наиболее часто участвующих в определении параметров Курильских землетрясений, с 15.11.2006 г. по 12.01.2007 г. Вдоль оси абсцисс станции расположены в порядке возрастания эпицентрального расстояния - от YSS ($\Delta 7.2^\circ$) до KHC ($\Delta 78.4^\circ$). Станции MKAR, YKA, FINES, AKASG, BRTR (на рисунке 2 показаны красным цветом) поступают в ССД в виде выделенных вступлений (ARRIVAL), остальные – в виде волновых форм в режиме, близком к реальному времени.

На рисунке 3 показано участие 25 станций, из наиболее часто встречающихся в определении параметров Курильских землетрясений в последующий период - с 13.01.2007 г. по 10.03.2007 г. Станции расположены также в порядке возрастания эпицентрального расстояния - от PET ($\Delta 7.3^\circ$) до KHC ($\Delta 79.1^\circ$).

Таблица 1. Курильское землетрясение. Развитие афтершокового процесса по данным ССД

Дата	Число афтершоков	Средняя магнитуда Mb	Разброс по магнитуде Mb	Дата	Число афтершоков	Средняя магнитуда Mb	Разброс по магнитуде Mb
15.11	40	5.6	4.5 – 6.7	21.11	9	5	4.7 – 5.6
16.11	34	5.3	4.6 – 6.1	22.11	12	5	4.5 – 5.7
17.11	21	5.1	4.5 – 5.9	23.11	14	5	4.3 – 5.8
18.11	16	5.1	4.5 – 5.7	24.11	9	4.9	4.3 – 5.9
19.11	10	4.9	4.4 – 5.8	25.11	7	4.8	4.5 – 5.1
20.11	14	5	4.8 – 5.3	-	-	-	-

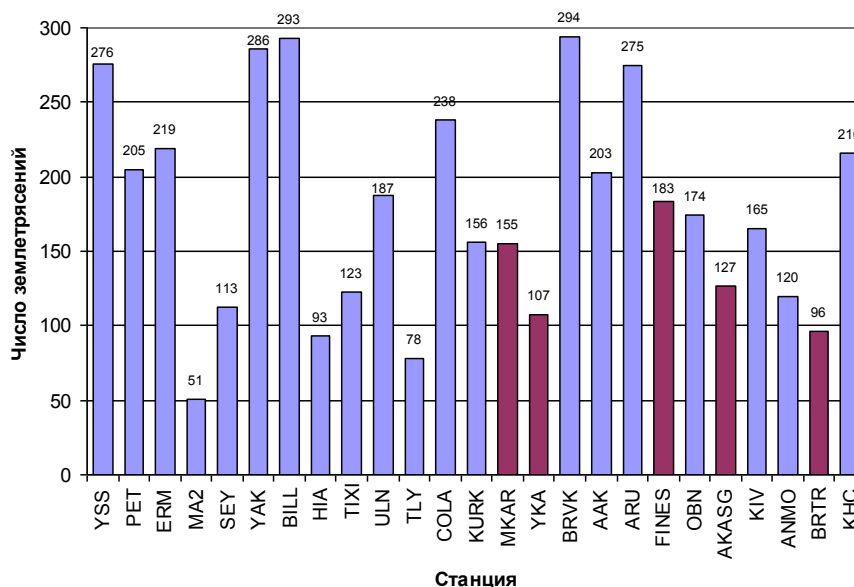


Рисунок 2. Участие станций в определении параметров афтершоков Курильского землетрясения за период с 15.11.2006 г. по 12.01.2007 г. Общее количество землетрясений 359

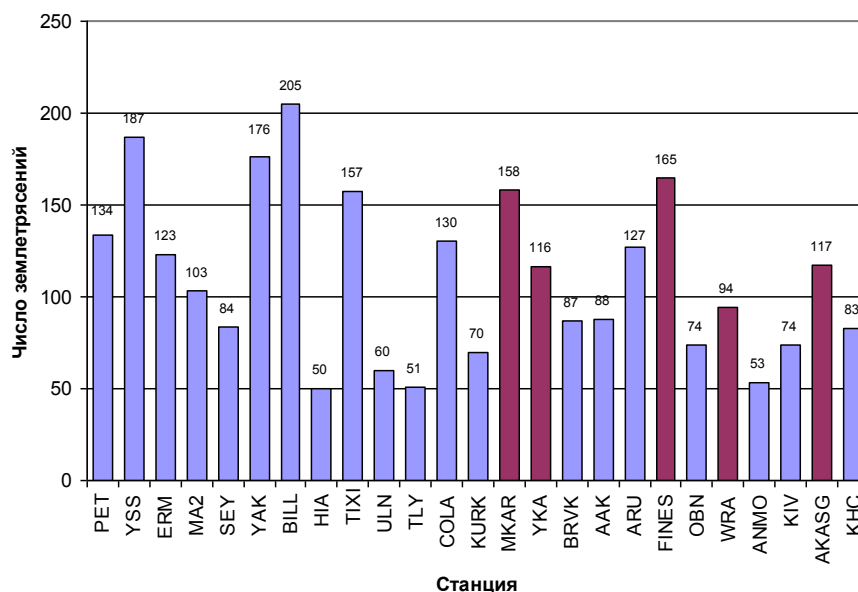


Рисунок 3. Участие станций в определении параметров афтершоков Курильских землетрясений за период с 13.01.2007 г. по 10.03.2007 г. Общее количество землетрясений 235

В течение обоих рассматриваемых периодов наиболее информативными были станции BILL, YSS и YAK, зарегистрировавшие 80 % афтершоков. Станции BRVK и KURK, обычно отличающиеся таким же уровнем выделения событий, имели проблемы с передачей данных: BRVK – в течение второго периода, а станция KURK – в течение обоих периодов.

На рисунке 4 показаны эпицентры землетрясений 15.11.2006 г. и 13.01.2007 г. и расположение относительно них ближайших станций сети ГС РАН. Здесь желтым цветом обозначены цифровые станции Южно-Сахалинск (YSS), Петропавловск

(PET), синим цветом – аналоговые станции Курильск (KUR), Северо-Курильск (SKR), Южно-Курильск (YUK).

На рисунке 5 приведены диаграммы процентного вклада трех аналоговых станций Сахалинской сети SKHL (KUR, SKR, YUK) и десяти станций Международной системы мониторинга (МСМ ОДВЗЯИ) – AKASG, ARCES, ASAR, BRTR, FINES, GERES, MKAR, WRA, YKA, ZAL, - в определение параметров всех афтершоков (а – за первый период, в – за второй период) и слабых афтершоков с магнитудой $M_b < 4.5$ (б и г, соответственно).

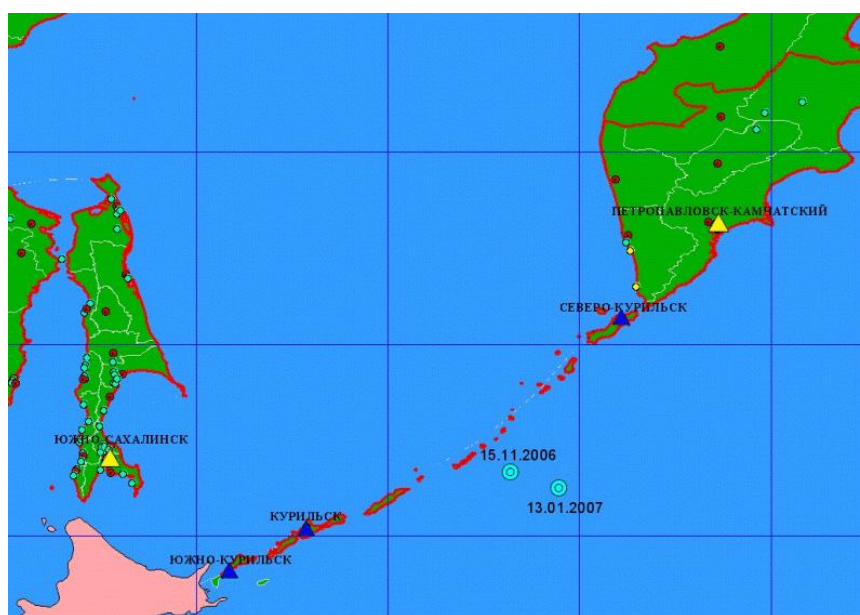


Рисунок 4. Расположение эпицентров Курильских землетрясений 15.11.2006 г. и 13.01.2007 г.

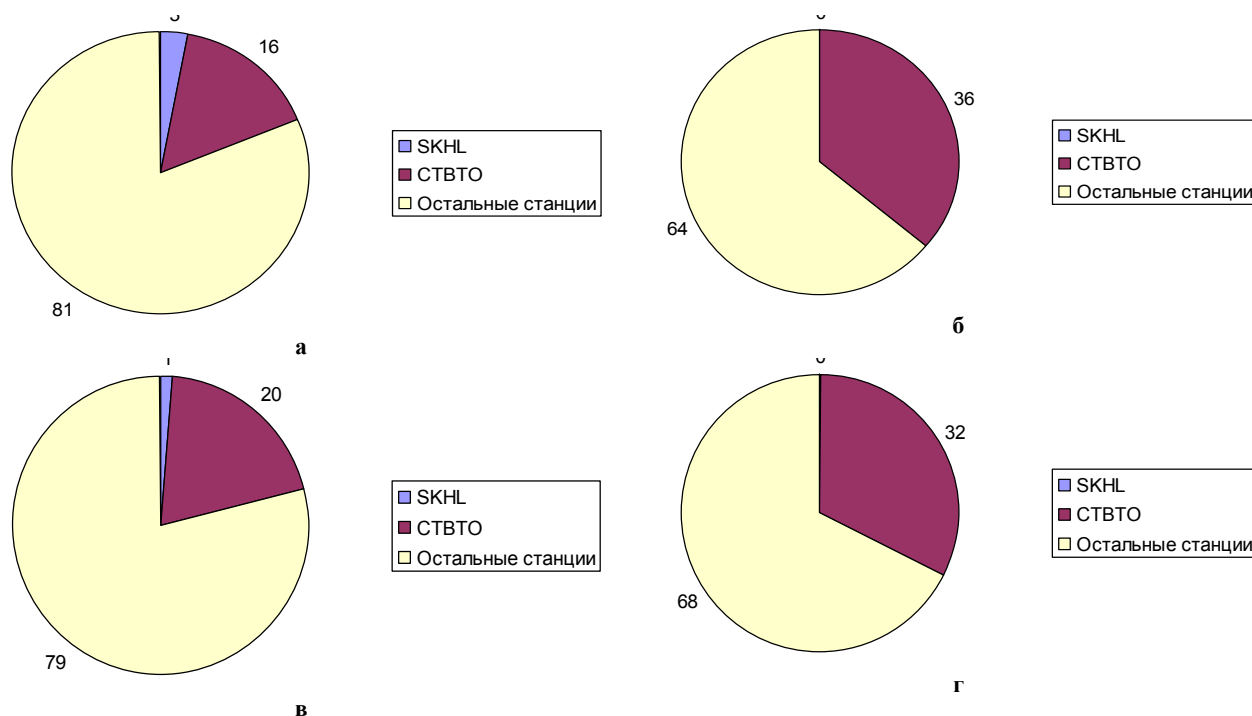


Рисунок 5. Участие станций Сахалинской сети SKHL и МСМ ОДВЗЯИ (СТВТО) в определении параметров афтершоков Курильских землетрясений: а, в – все афтершоки, б, г – афтершоки с $M_b < 4.5$

Из приведенных диаграмм видно, что в определении параметров землетрясений с $M_b < 4.5$ аналоговые станции Сахалинской сети SKHL совсем не участвуют, а доля участия станций МСМ ОДВЗЯИ значительна. Поскольку большая часть станций МСМ является сейсмическими группами, полученный результат еще раз подчеркивает более высокую эффективность при группировании. Следует отметить также, что для 20 % афтершоков с $M_b < 4.5$ возможность локации появилась только после добавления данных станций МСМ ОДВЗЯИ. На рисунке 6 приведен пример локации афтершока с $M_b = 3.9$ по дан-

ным 10 станций, от 4-х из которых (ERM, BILL, KURK, BRVK) данные непрерывно поступают в ССД в виде волновых форм в режиме, близком к реальному времени, а от 6 станций МСМ ОДВЗЯИ (MKAR, YKA, FINES, WRA, GERES, BRTR) – в виде выделенных вступлений (ARRIVAL). Последние на рисунке 6 обведены красным кружком.

Таким образом, использование в ССД данных станций МСМ ОДВЗЯИ позволило увеличить число обработанных афтершоков при землетрясениях на Куриллах 15.11.2006 и 13.01.2007 с магнитудного уровня $M_b < 4.5$ примерно на 20 %.

Параметры землетрясения 08 декабря 2006 00:06:55.8:
lat=46.54° N lon=155.4° E depth=10km $M_b=3.9/7$
рассчитаны по данным следующих станций

№	Код	Время	Фаза	Δ	Азимут	M_b	Сеть	Источник
1	ERM	00:09:20.4	P	9.87	247	-	HSS	OBN
2	BILL	00:11:55.3	P	22.32	11	4.3	NERS	OBN
3	MKAR	00:15:40.5	P	48.62	299	3.6	NNC	IDC
4	KURK	00:15:42.7	P	48.79	305	3.9	NNC	OBN
5	YKA	00:15:51.8	P	50.15	37	-	OTTR	IDC
6	BRVK	00:16:09.6	P	52.24	310	4.4	NNC	OBN
7	FINES	00:17:36.0	P	64.89	336	3.9	HEL	IDC
8	WRA	00:18:03.0	P	68.85	201	3.9	CAN	IDC
9	GERES	00:19:03.6	P	79.33	335	3.5	BGRD	IDC
10	BRTR	00:19:05.5	P	79.61	318	3.4	ISK	IDC

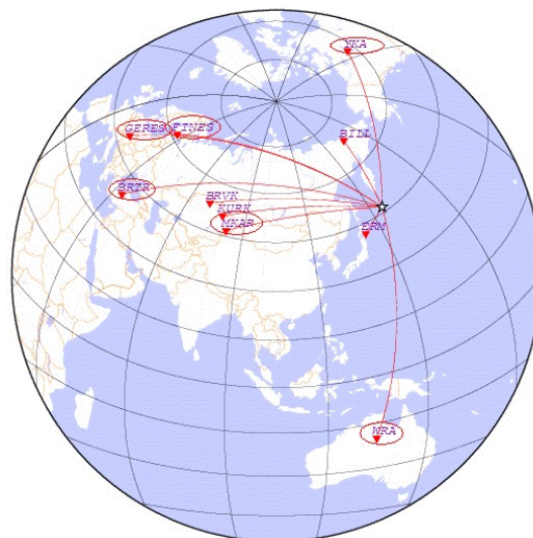


Рисунок 6. Определение параметров афтершока $M_b = 3.9$ с использованием данных МСМ ОДВЗЯИ

ЛИТЕРАТУРА

1. Старовойт, О.Е. Служба срочных донесений ГС РАН / О.Е. Старовойт, Л.С. Чепкунас, М.В. Коломиец // Землетрясения Северной Евразии в 2001 году, 2007. - Обнинск: ГС РАН. – С. 252 – 258.
2. Старовойт, О.Е. Система информационного обеспечения о землетрясениях в России / О.Е. Старовойт // Вестник ОГГГГН РАН, 1999. – № 1 (7) // [электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-99/starovt.htm#begin
3. Старовойт, О.Е. Участие России в международных проектах по сейсмическим наблюдениям / О.Е. Старовойт О, И.П. Чернобай // Федеральная система сейсмологических наблюдений и прогноза землетрясений: Инф. - аналит. бюл. - 1994. - М.: МЧС РФ и РАН. — № 2. – С. 33 – 40.
4. Красилов, С.А. Организация процесса обработки цифровых сейсмических данных с использованием программного комплекса WSG / С.А. Красилов, М.В. Коломиец М.В., А.П. Акимов // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: Материалы международной сейсмологической школы, посвященной 100-летию открытия сейсмических станций «Пулково» и «Екатеринбург», 2006. - Обнинск: ГС РАН. – С. 77 – 83.
5. Старовойт, О.Е. Использование данных и продуктов Организации по ДВЗЯИ в сейсмическом мониторинге России / О.Е. Старовойт, И.П. Габсатарова, М.В. Коломиец // Вестник НЯЦ РК, 2007. – Вып. 2. – С. 9 – 12.
6. Коломиец, М.В. Развитие Службы срочных донесений ГС РАН. Специфика работы в период афтершоковых процессов / М.В. Коломиец // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: Материалы международной сейсмологической школы. Пермь, 13-17 августа 2007 г., 2007. - Обнинск: ГС РАН, – С. 102 – 105.

2006 11.15 ЖӘНЕ 2007 01.13-ІНДЕГІ КУРИЛ ЖЕРСІЛКІНУЛЕРІ ҮЛГІСІНДЕ ЯСБТШ ДЕРЕКТЕРІН ПАЙДАЛАНУЫМЕН АФТЕРШОҚ ПРОЦЕССТЕРІНІҢ МОНИТОРИНГІ

Старовойт О.Е., Коломиец М.В.

РФА Геофизикалық қызметі, Обнинск, Ресей

Ресей ғылыми академиясының ұлттық желісінде ЯСБТШҰ Халықаралық деректер орталығының (IDC CTBTO) деректері мен өнімдерін пайдалануы РФА Геофизикалық қызметінің жедел хабарлама қызметінде жерсілкінулерді тіркеуінің магнитудалық деңгейін төмендетуіне мүмкіндік береді. 2006 ж. 11.15 мен 2007 ж. 01.13-індегі Курил жерсілкінулері үлгісінде афтершоқтар кезеңінде ЖХҚ жұмысы көрсетілген.

MONITORING OF AFTERSHOCK PROCESSES USING CTBTO DATA WITH EXAMPLE OF KURIL EARTHQUAKES DATED 15.11.2006 AND 13.01.2007

O.E. Starovoit, M.V. Kolomiets

Geophysical Survey of RAS, Obninsk, Russia

The usage of IDC CTBTO data and products in a national seismic network of the Russian Academy of Science allows achieving decrease magnitude level for the earthquakes registered by Routine Report Service of Geophysical Service RAS. RRS work during aftershock processes by an example of Kuril earthquakes dated 15.11.2006 and 13.01.2007 is considered.

УДК 550.34

МОНИТОРИНГ ДИЛАТАНСНЫХ ЗОН ВИБРОСЕЙСМИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Алексеев А.С., Глинский Б.М., Ковалевский В.В., Хайретдинов М.С.*Институт Вычислительной математики и Математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия*

Явление образования «пограничного слоя дилатансии» - разуплотнения протяженных зон верхней части земной коры под действием касательных и растягивающих тектонических напряжений вблизи свободной от напряжений дневной поверхности, - обнаружено в результате вычислительных экспериментов. В статье рассмотрена схема вибросейсмического просвечивания дилатансных зон «очагового» и «пограничного» типов с целью повышения надежности определения взаимосвязи предвестников. Описываются крупномасштабные эксперименты по активному вибромониторингу с использованием мощных вибраторов и мобильных регистрирующих систем в районах Новосибирска и Таманской грязевулканической провинции.

ВВЕДЕНИЕ

Перед крупными землетрясениями в районах формирования будущего очага возникают аномальные геофизические поля разной геофизической природы (гравитационное поле смещений поверхности, поле сейсмичности, уровня грунтовых вод, электропроводности и др.). Аномалии этих полей ведут себя во времени и пространстве весьма сложным образом, формируясь в эпицентральной зоне будущего землетрясения и мигрируя по площади на расстояния до 200 - 300 км и более, в зависимости от его силы.

Китайские сейсмологи, организовавшие полигоны комплексного мониторинга динамики аномалий геофизических полей разной геофизической природы и создавшие большие базы данных свойств аномалий сильных землетрясений ($M \geq 6$), отмечают, что не все аномалии можно рассматривать как предвестники землетрясений [1]. Иногда при использовании аномалий в качестве предвестников (из-за их повторяемости при разных землетрясениях) они противоречат друг другу. Сложная взаимосвязь аномалий-предвестников между собой и со свойствами очага, а часто – и отсутствие видимой связи, усложняют развитие междисциплинарных методов прогноза и создание непротиворечивого комплекса предвестников - интегрального предвестника [2]. Получается, что наличие большого числа предвестников, к которому сейсмологи всегда стремятся, чтобы не пропустить подготовку сильного землетрясения, весьма затрудняет прогноз из-за увеличения «количества степеней свободы выбора». Интуитивно ясно, что чисто статистические методы поиска решающего правила приводят к резкому возрастанию объема экспериментальных выборок при добавлении каждого нового признака. Лавинообразное возрастание необходимых многомерных статистических выборок происходит из-за необходимости оценивания статистических взаимоотношений нового признака со всеми старыми признаками, что деформирует предшествующее многомерное распределение. Интуитивно также ясно, что за всеми взаимоотношениями признаков (предвестников) между собой и со свойствами очага стоит некоторая универсаль-

ная физическая причина. Такой физической причиной, по-видимому, является наиболее универсальный процесс при подготовке землетрясений – эволюция поля микротрещин в среде под действием концентрации напряжений. В ходе этой эволюции происходит укрупнение микротрещин, появление новых областей повышенной трещиноватости и, наконец, развитие магистральных трещин – разрывов среды, выделяющих сейсмическую энергию землетрясений. Поэтому в качестве количественной характеристики базового процесса, порождающего аномалии-предвестники естественно использовать пространственно - временную функцию плотности числа трещин в области готовящегося очага и в зонах аномальных геофизических полей на поверхности Земли.

«ОЧАГОВАЯ» И «ПОГРАНИЧНАЯ» ЗОНЫ ДИЛАТАНСИИ

Землетрясения реализуются через разрушение горных пород, начинаясь с разрушения пород в очаговой зоне. Поэтому для прогноза землетрясений первостепенное значение имеет изучение процессов *подготовки разрушения* и мониторинг этих процессов. Изучение процессов разрушения в образцах различных материалов в лабораторных условиях, а также в крупномасштабных природных объектах, в том числе, в блоках земной коры при землетрясениях, позволили выявить основные закономерности процесса разрушения, наиболее общей из которых является поэтапное развитие процесса во времени. В работах С.Н. Журкова и его коллег из Физико-Технического Института РАН (С.-Петербург) установлен ряд кинетических законов и представлений о разрушении [3], которые близки к представлениям сотрудников Института физики Земли РАН о схеме разрушения крупномасштабных объектов земной коры при землетрясениях. В [4] Г.А.Соболевым сформулированы три следующие закономерности, имеющие «...ключевое значение для проблем поиска предвестников и прогноза землетрясений»:

1. Представление о развитии системы трещин в области подготовки очага землетрясений в результате роста объемной плотности числа микротрещин, через

стадии укрупнения размеров трещин и уменьшения их числа до образования магистральных разрывов.

2. Закономерность ступенчатого перехода размеров трещин от мелких к более крупным при достижении мелкими трещинами некоторого критического числа, соответствующего концентрационному критерию С.Н. Журкова

$$K^* = \frac{N^{-\frac{1}{3}}}{L}, \quad (1)$$

где N - число трещин размера L , K^* - критическое среднее расстояние между трещинами в единицах средней длины трещин, а $N^{-\frac{1}{3}}$ - объемная концентрация трещин.

При уменьшении среднего расстояния ниже критического происходит резкая перестройка всей системы трещин с увеличением средних размеров трещин в некоторой геометрической пропорции и уменьшением средней объемной их концентрации. При этом трещины приобретают тенденцию локализоваться в области будущего макроразрыва. Эти закономерности универсальны для любого масштабного уровня и любого режима нагружения.

3. Перестройка системы трещин проявляется в изменении некоторых характеристик среды в созревающем очаге, а также в образовании аномалий ряда геофизических полей. В частности, концентрация процесса трещинообразования может выражаться в пространственно - временном изменении режима сейсмичности для слабых землетрясений, в изменении механизма очагов предшествующих микроземлетрясений, в появлении анизотропии свойств пород в будущем очаге. Последнее наиболее четко проявляется в образовании аномалии величин отношений скоростей распространения продольных и поперечных сейсмических волн перед крупными землетрясениями.

Некоторые геофизические поля могут испытывать влияние процессов раскрытия микротрещин. В частности, естественно предполагать увеличение газовой и флюидной проницаемости областей земной коры, в которых происходит этот процесс. Поэтому может измениться уровень грунтовых вод, интенсивность газовых потоков, электрическое сопротивление. Разуплотнение пород за счет увеличения суммарного объема трещин должно вызвать также аномалии гравитационного поля там, где поле локальных тектонических напряжений вызывает активизацию процесса трещинообразования. Процесс подготовки землетрясений, хотя и растянут во времени на несколько лет, тем не менее, является энергонасыщенным процессом. Происходят крупные реологические изменения в среде и формируются аномальные зоны геофизических полей разной природы. Наиболее универсальным механизмом развития из-

менений в среде является раскрытие трещин в зонах повышенных значений сдвиговых и растягивающих напряжений. Такие зоны образуются в окрестности очагов будущих землетрясений, если здесь неравномерно в пространстве распределены силы. Начальную стадию раскрытия трещин и последующее состояние среды, при котором развиваются процессы разрушения, большинство сейсмологов связывают с состоянием дилатансии среды, описанным в [5].

Дилатансия - это нелинейное разуплотнение среды за счет образования трещин сдвига вследствие превышения наибольших касательных напряжений некоторого порога. К области дилатансии относят множество точек упругой среды, для которых при заданном поле напряжений σ_{ij} в среде выполнено условие:

$$D_r \equiv \tau - \alpha(P + \rho g z) - Y \geq 0, \quad (2)$$

где ρ - плотность породы; g - ускорение свободного падения; z - глубина точки; P - гидродинамическое давление;

$$P = -\frac{1}{3}(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}), \quad (3)$$

α - коэффициент внутреннего трения; Y - сцепление породы; τ - интенсивность касательных напряжений:

$$\tau = \frac{\sqrt{3}}{2} \left[\frac{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2 + \sigma_{23}^2)}{2} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (4)$$

Условие (2) совпадает с критерием Шлейхера-Надаи разрушения материала под воздействием скалывающих нагрузок, который удовлетворительно описывает начало процесса разрушения горных пород. Критерий применим и к стадии «предразрушение» (нагрузка до 60 – 90 % от критической) для качественного описания формы областей активизации раскрытия трещин.

Для моделирования поля напряжений в упругом полупространстве были использованы точные решения для упругих смещений и напряжений от точечного источника в однородном, изотропно-упругом полупространстве, удовлетворяющие условиям отсутствия напряжений на границе $z = 0$. На рисунке 1 изображена граница области $D_r = 0$ из формулы (2) для источников двух видов, расположенных на глубине 15 км: - момент сил и двойной момент сил. Параметры упругого полупространства и источников выбраны следующими: значения скорости продольных и поперечных волн $VP=6000$ м/с, $VS=3500$ м/с, плотность $\rho = 2900$ кг/м³, коэффициент внутреннего трения $\alpha=0.5$, сцепление породы $Y=3 \cdot 10^6$ Па, момент сил в источнике $M=3 \cdot 10^{20}$ Н, двойной момент сил в источнике $M=6.75 \cdot 10^{20}$ Н.

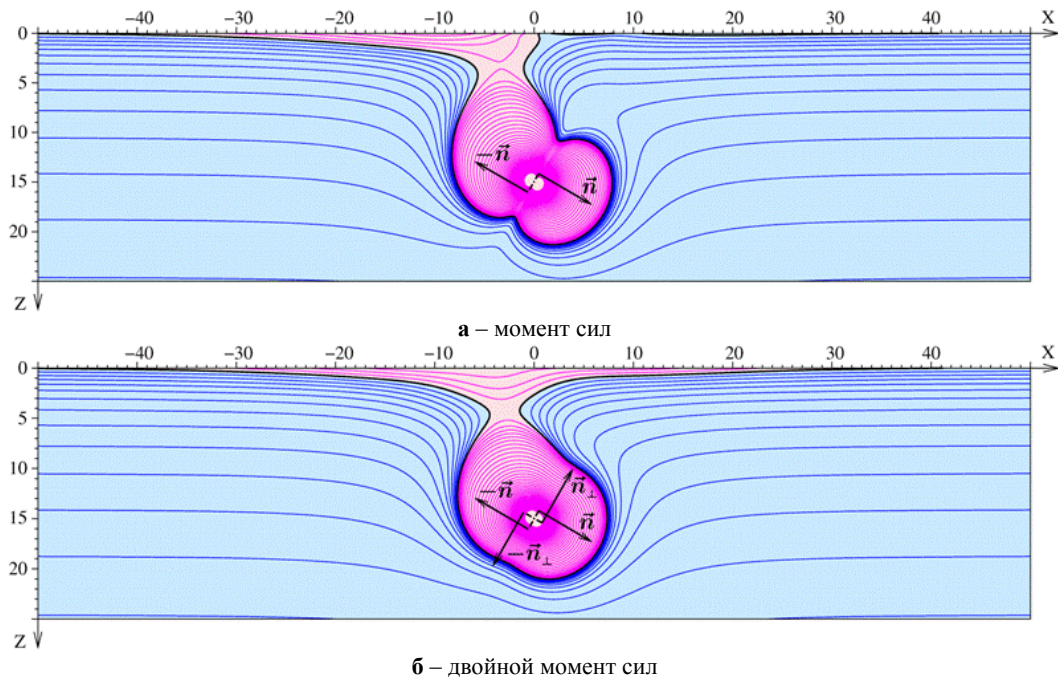


Рисунок 1. Формы очаговой и поверхностной зон дилатансии в сечении $y = 0$ для источника двух видов

Внутри области $D_r \geq 0$ касательные напряжения доминируют над сжимающими напряжениями. Сопротивление среды скалывающим усилиям за счет сцепления здесь преодолено и сложились условия, благоприятные для роста числа трещин. Сами механизмы раскрытия трещин и реологические изменения среды в зоне $D_r \geq 0$ используемыми решениями не описываются. Решения относятся лишь к определению границы перехода упругого состояния в состояние нелинейного разуплотнения с образованием системы трещин. Интересным фактом оказывается образование двух зон дилатансии: «очаговой», в окрестности точки приложения силы, и «пограничной» – в слое около свободной поверхности (рисунок 1). Здесь поле напряжений от источника может содержать сильный вклад касательных напряжений на фоне слабого влияния сжимающих напряжений и гидростатического давления в связи с близостью поверхности, свободной от внешних напряжений.

«Пограничная» зона дилатансии ведет себя довольно изменчиво в зависимости от параметров источника, его глубины, интенсивности и ориентации. Зона может исчезать при увеличении глубины источника или соединяться с «очаговой» зоной при изменении параметров источника как на рисунке 1. В некоторых случаях «пограничная» зона имеет горизонтальную протяженность 200 км и более, а также весьма сложную форму в проекции на поверхность Земли. Легко убедиться, что при действии нескольких, разнесенных в пространстве источников переменной во времени интенсивности, картина перемещения дилатансных зон по поверхности может быть сложной.

При краткосрочном прогнозе землетрясений особое значение имеет контроль за изменением плотности трещин в очаговой зоне. Этот контроль может осуществляться по наблюдениям за «пограничной» зоной дилатансии и связанными с ней аномальными полями. Во-первых, положение будущего очага еще точно не известно и определение его в сильной степени связано с поведением поверхностных аномальных зон. Во-вторых, надежность и точность оценки функции плотности трещин в «очаговой» зоне зависит от информации об аномалиях полей в «пограничных» зонах.

В тех случаях, когда дилатансные зоны двух типов объединяются в одну, возникает единая область трещиноватости, соединяющая поверхностные зоны аномальных полей с очаговой зоной, развитие процесса разрушения которой может напрямую влиять на изменение геофизических аномалий. В случае раздельных областей дилатансии, «очаговая» зона может сохранять свое прямое влияние на аномалии некоторых полей (например, на значения скоростей V_P , V_S) через единую область наложенной анизотропии среды. При этом можно ожидать, что в процессе укрупнения трещин коэффициенты анизотропии будут меняться специальным образом из-за сохранения ориентации осей симметрии. Это может упростить задачу оценки среднего числа трещин вибросейсмическим методом высокого разрешения.

Наиболее детальные данные о структуре областей среды с изменяющейся во времени трещиноватостью способен давать сейсмический метод наблюдения продольных и поперечных волн от мощных контролируемых вибросейсмических источников. В случае использования передвижных мощных источников и

систем наблюдений с многократным перекрытием метод дает в сейсмологии результаты, близкие по разрешающей способности к широко известным результатам сейсмики в нефтяной сейсморазведке.

СХЕМА ВИБРОСЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА СЕЙСМООПАСНЫХ ЗОН

В Сибирском отделении РАН имеются уникальные экспериментальные данные полевых наблюдений. С помощью созданных образцов вибраторов силой 50, 100, 250 тонн и систем регистрации с длительным накоплением сигналов получены сейсмограммы на расстояниях до 400 км и записи гармонических сигналов до 1000 км. На этой основе развиваются методы «активной сейсмологии», в которых вместо неуправляемого источника сейсмических сигналов - землетрясения, используется хорошо управляемый механический источник с точно известными координатами эпицентра и временем начала его работы. Для методов «активной сейсмологии» доступны сейсморазведочные схемы наблюдений, алгоритмы и пакеты программ обработки данных [6]. К числу важных проблем «активной сейсмологии» нужно отнести создание метода вибросейсмического мониторинга сейсмоопасных районов и, в частности, метода определения функции $\theta(x,y,z,tk)$, характеризующей развитие систем трещин в очаге землетрясения и в зонах образования аномалий геофизических полей. Для определения функции $\theta(x,y,z,tk)$ можно применить схему глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) совместно со схемой общей глубинной точки (ОГТ) на профилях длиной 150 - 200 км над очагом готовящегося землетрясения (рисунок 2).

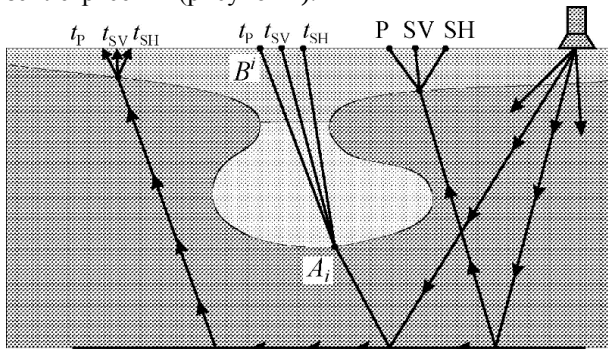


Рисунок 2. Схема профиля вибросейсмических наблюдений P-, SV-, SH-волн для мониторинга функции $\theta(x,y,z,tk)$ в дилатантной зоне

При долгосрочном прогнозе период между зондированиями может быть равным полугода – год; при более краткосрочном прогнозе зондирования следует учащать, одновременно детализируя систему наблюдений.

Достаточно частые периодические зондирования среды дают возможность повысить точность определения параметров среды, характеризующих трещиноватость. Можно предполагать, что за периоды времени между зондированиями характеристики

среды мало изменяются (именно так и следует выбирать эти периоды). Малые изменения свойств среды можно сделать основными элементами изменчивости сейсмических разрезов с помощью метода «межкадровой корреляции» (по существу, путем вычитания последовательных изображений среды одно из другого и анализа приращений).

Методами математического моделирования были получены оценки чувствительности метода вибросейсмического мониторинга дилатантных зон [7]. Как показывает опыт, на расстояниях 100 - 400 км от вибратора при среднем уровне микросейсмического шума возможно определение вариаций амплитуд гармонических сигналов с точностью 10^{-2} . Показано, что при мониторинге на частоте $f=6$ Гц и характерных расстояниях «источник – регистратор», «источник - область изменений» 50 – 100 км для очаговой зоны с радиусом 1 – 10 км получаются оценки возможного определения относительных вариаций скорости сейсмических волн $\delta c/c = 10^{-2} - 10^{-5}$. Полученные оценки показывают, что чувствительность метода активного мониторинга является очень высокой для сейсмологических методов, что доказывает его ключевую роль в методах слежения за изменениями характеристик дилатантных зон в областях подготовки землетрясений.

На рисунке 2 изображена схема профильных наблюдений отраженных и преломленных волн от границы Мохоровичича в земной коре при вибросейсмическом зондировании «очаговой» и «поверхностных» зон дилатансии. Наличие трещин в этих зонах и изменение их объемной плотности в течение периодов между сеансами мониторинга можно определить по изменению коэффициентов анизотропии и скоростей распространения волн. Происходит расщепление поперечной волны S на две: SV и SH на границах зон дилатансии. По запаздываниям Δt_{SV} , Δt_{SH} моментов вступления соответствующих волн в точки B'_{SV} , B'_{SH} относительно порождающих их волн в точке A_i можно хорошо известными методами определить глубину и форму границ, а также величины скоростей волн.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РАБОТ

Для экспериментальных исследований возможностей вибросейсмического метода при решении обозначенных задач в качестве объектов исследований нами были выбраны земные приливы [8], грязевые вулканы [9,10], в которых геодинамические процессы характеризуются достаточно высокой временной динамикой, а также зоны тектонических разломов.

Влияние приливных процессов на скорости сейсмических волн

Приливное гравитационное воздействие на земную кору является глобальным, периодически изменяющимся, предсказуемым с очень высокой точностью явлением, наблюдаемым в любой точке Земного шара. С учетом этого оно может служить природ-

ным эталоном деформирующей силы в литосфере. Использование этого эталона для изучения вариаций напряженно-деформированного состояния земной коры и верхней мантии с помощью сейсмических методов требует высоких метрологических характеристик систем глубинного сейсмического зондирования. Таким требованиям отвечает система вибрационного глубинного сейсмического зондирования Земли (вибро ГСЗ) с помощью мощных управляемых с высокой точностью вибраторов.

Известно, что в земной коре существуют полусуточные и суточные приливы с периодами близкими к 12 и 24 часам. Приливные деформации земной коры уверенно регистрируются с помощью гравиметров. Измерение их с помощью сейсмического метода представляет значительную проблему. Такие измерения были успешно выполнены объединенными силами организаций СО РАН: Института вычислительной математики и математической геофизики и Геофизической службы. Для обнаружения временных вариаций параметров вибросейсмического поля в экспериментах использовалось периодическое излучение сигналов. Возбуждение гармонических сигналов постоянной частоты из диапазона 6 – 8 Гц с интервалами 3 часа в течение 4 суток осуществлялось 100 тонным центробежным вибратором ЦВ-100, расположенным на Быстровском полигоне. Регистрация сигналов производилась на расстояниях 430 км - сейсмостанция п. Усть-Кан (Республика Горный Алтай) и 356 км – п. Савушки (Алтайский край). Схема эксперимента на удалении 356 км представлена на рисунке 3.

Методика предусматривала одновременную регистрацию излученного сигнала в ближней зоне вибратора и в удаленных точках с единой временной привязкой. На полигоне Быстровка система для контрольной регистрации излучаемых сейсмосигналов включала три однокомпонентных датчика (X,Y,Z), установленных в 30 м от работающего вибратора. Для выделения суточных вариаций параметров вибросигналов проводились периодически повторяющиеся сеансы излучения на частотах 6.3 и 7.0 Гц в периоды двух сизигийных и одной квадратурной фаз земных приливов. Зондирования осуществлялись с интервалом в 3 часа в режиме излучения 25-минутных монохроматических сигналов и, в общем, охватывали интервал времени 96 часов. Синхронизация сигналов излучения и приема осуществлялась с применением GPS перед каждым сеансом. Измеряемыми параметрами сигнала являлись амплитуда и фаза спектральной компоненты волнового поля на частоте гармонического сигнала в полосе частот 0.0008 Гц.

Для выявления связи полученных вариаций амплитуд и фаз сигналов с земными приливами был проведен анализ полученных временных рядов амплитуд и фаз сигналов для поиска скрытых периодичностей. На рисунке 4 приведены осредненные спектры временных вариаций для амплитуд и фаз гармонических вибросигналов на частотах 6,3 Гц и 7,0 Гц, а также их сравнение со спектром вариаций ускорения силы тяжести.

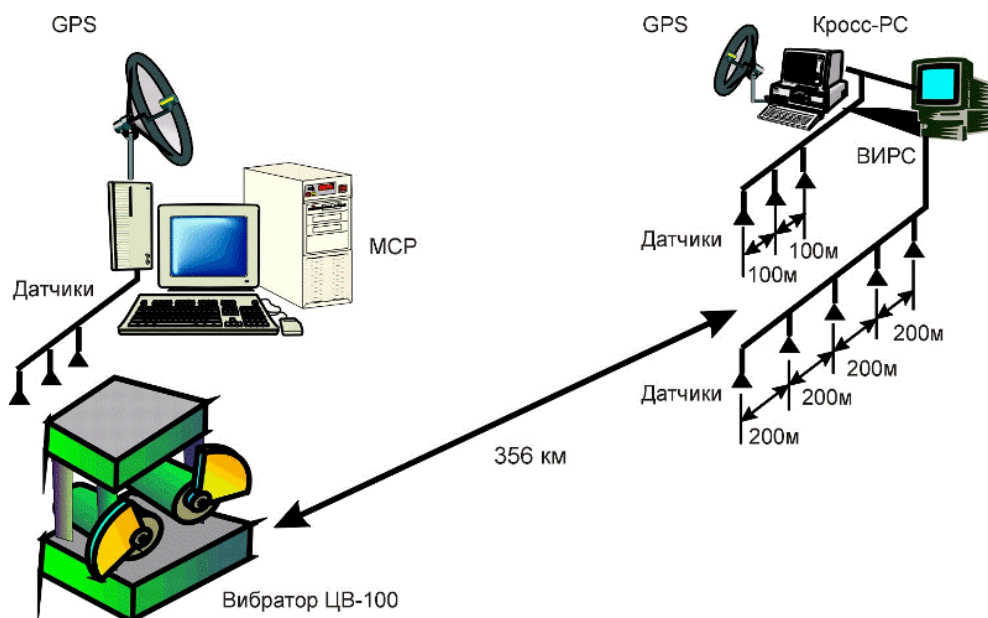


Рисунок 3. Схема эксперимента

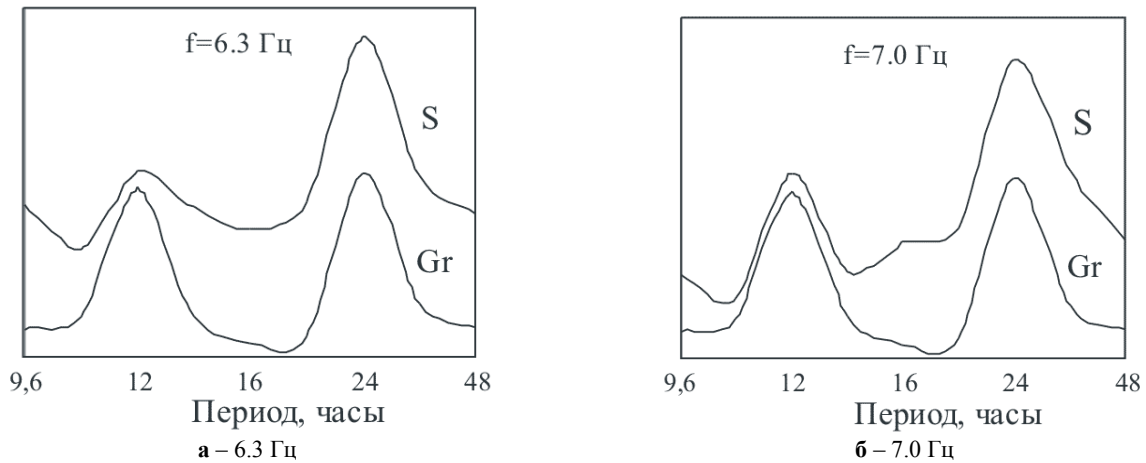


Рисунок 4. Усреднённые спектры параметров вибросигналов (S) и спектр приливных вариаций силы тяжести (Gr). Вибратор ЦВ-100, расстояние от вибратора 356 км

Оба спектра на рисунке 4 содержат максимумы с периодами 12 и 24 часа. Ширина спектральных линий определяется общей длительностью эксперимента (96 часов) и позволяет отчетливо выделить суточную и полусуточную периодичности. Оценки для 24 и 12 – часовой периодичности вариаций амплитуд сигналов дают величину около 3%, а соответствующая периодичность в вариациях фаз составляет приблизительно 1.5 градуса. Присутствие в спектре вариаций параметров именно тех гармонических компонент, которые характерны для прилива, может служить важнейшим критерием их связи с приливами. Это позволяет предположить, что выявленные вариации параметров вибросейсмического поля обусловлены деформационными процессами, вызванными земными приливами и влияющими на скорости сейсмических волн. Полученные оценки амплитуды 12 и 24 часовых периодичностей в вариациях параметров сейсмических сигналов позволяют оценить эффект влияния земных приливов на времена прихода сейсмических волн и скорости их распространения на базах 356 – 430 км величиной относительных изменений скоростей $\delta V/V \approx 10^{-5}$ – 10^{-6} . Таким образом, проведенные эксперименты позволили на два порядка поднять чувствительность сейсмического метода для оценивания эффектов влияния приливных деформационных процессов на скорости сейсмических волн в земной коре.

Вариации скоростей сейсмических волн в зонах грязевых вулканов

Эксперименты по вибрационному зондированию грязевых вулканов Шуго, Ахтанизовский (Таманская грязевулканическая провинция) проведены впервые в практике сейсмических исследований вулканов силами Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Института физики Земли РАН, Кубанского Госунивер-

ситета. Работы выполнялись путем прохождения продольных профилей на траверсах «вибратор – регистрирующая сейсмостанция – вулкан» и «вибратор – вулкан – регистрирующая сейсмостанция». В качестве вибратора использовался сейморазведочный вибратор типа СВ-10/100. В состав сейсмостанции входили 12 групп сейсмических датчиков. Группы располагались на линейном профиле с шагом 30 м. В составе каждой группы было по 5 датчиков типа СВ-5. Методика проведения экспериментальных работ предусматривала проведение сеансов зондирования в 4-х пространственно разнесенных пунктах, условно обозначаемых как пункты «55», «62», «63», «64», при расстояниях между соседними пунктами 550 м, 1175 м и 2115 м соответственно. Кроме перемещения вибратора осуществлялась перестановка сейсмических групп вдоль указанных траверсов в пределах базы «источник-приемник» 500 – 5500 м. Общая схема зондирования приведена на рисунке 5, схема расстановки вибратора и приемной группы дана в [10].

При проведении эксперимента за основу были выбраны следующие параметры зондирующего сигнала с линейной разверткой частоты: $f_0 = 10$ Гц (нижняя частота развертки), $f_{\max} = 64$ Гц (верхняя частота развертки), $T = 60$ с. (длительность развертки свип-сигналов). Полученные в экспериментах вибрационные сейсмограммы характеризуются высоким соотношением уровней полезных волн к уровням шума, достигающим в отдельных случаях 20. Это позволяет определять моменты вступления головных волн с точностью не хуже 1% по времени, что является определяющим при оценивании малых вариаций скоростей волн в процессе распространения в трещиноватых средах.

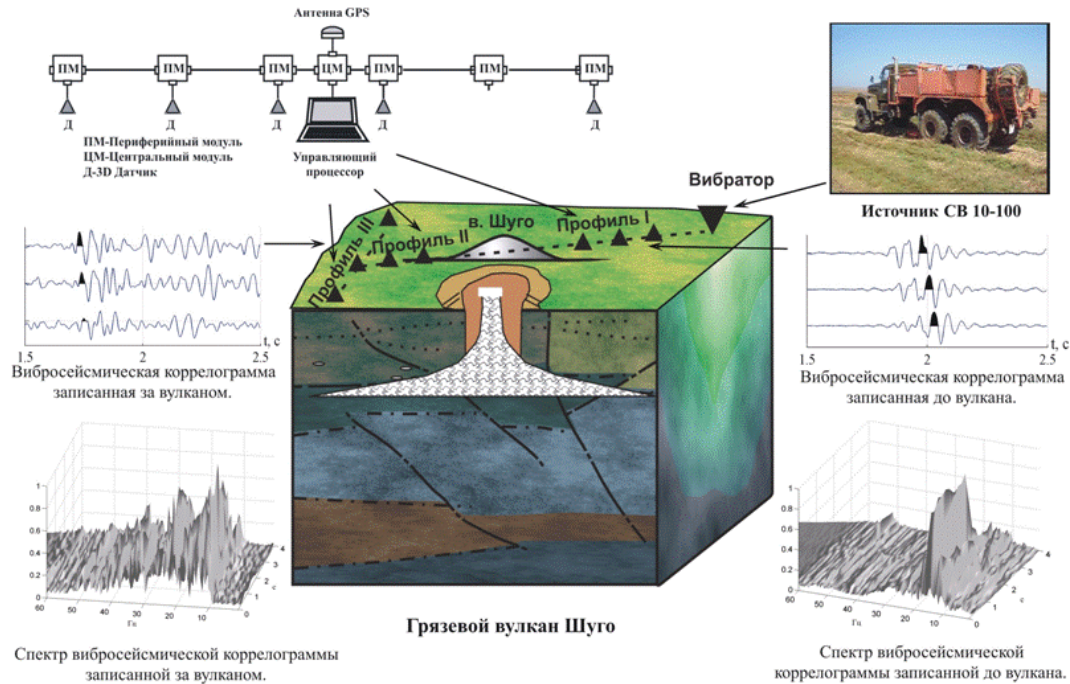
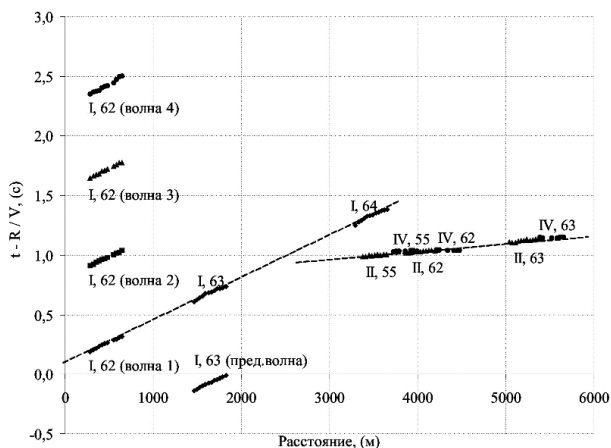


Рисунок 5. Общая схема вибрационного зондирования грязевых вулканов Ахтанизовский, Шуго

Редуцированные годографы головных сейсмических волн (скорость редукции $V=4550\text{ м/с}$), полученные по данным вибрационного зондирования вулкана Шуго, имеют хорошо выраженные линейные зависимости «время - расстояние» в диапазоне 300 - 5000 м (рисунок 6). Годографу, полученному на профиле «вибратор-приемник-вулкан», соответствует кажущаяся средняя скорость 1740 м/с, которая с точностью 0.5% повторяется на разных участках зондирования.



Геотраверсы: I - «вибратор – регистрирующая сейсмостанция – вулкан», II, IV «вибратор – вулкан – регистрирующая сейсмостанция»

Рисунок 6. Редуцированные годографы волн для разных траверсов и пунктов зондирования 55, 62, 63, 64

Второму годографу, охватывающему профили за вулканом и соответствующему схеме расстановки «вибратор-вулкан-сейсмостанция» (т.е. вулкан оказывается между источником и приемником) с точностью до 3% соответствует кажущаяся скорость 3400 м/с. В последнем случае наблюдается почти двухкратное увеличение скорости по сравнению с той, что определяется первым годографом.

По отношению к вулкану «Ахтанизовский» годографы волн, полученные на профилях до вулкана (профили I) и за вулканом (профиль II и IV), соответствуют кажущимся скоростям головных волн: на профиле I – 1815 м/с, на профиле IV, проходящем через вулкан, кажущаяся скорость упала до 1592 м/с, т.е., на 12%, что, по-видимому, обусловлено прохождением через тело вулкана.

Вариации скоростей сейсмических волн в зонах тектонических разломов

В методическом плане оценивание вариаций скоростей волн первых вступлений в зонах тектонических разломов осуществлялось аналогично рассмотренному выше по отношению к зонам грязевых вулканов. Схема проведения экспериментов предусматривала профильную регистрацию зондирующих широкополосных (сви-п) сигналов от низкочастотного вибратора типа ЦВ-40 по обе стороны разлома. Схема расстановки такой «пары», включавшей в себя по пять трехкомпонентных сейсмоприемников X,Y,Z, представлена на рисунке 7.

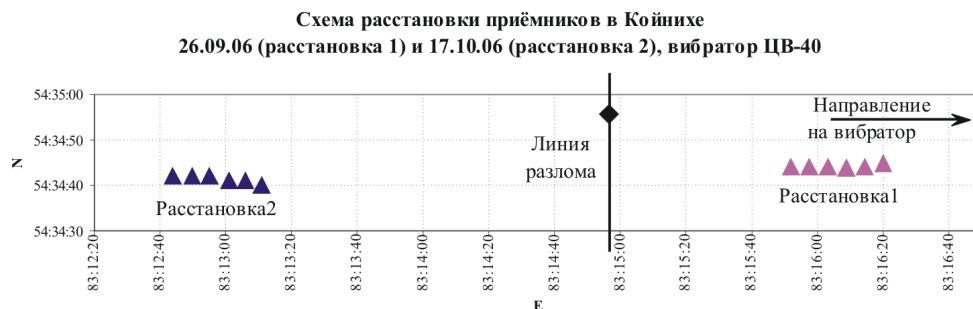


Рисунок 7. Схема расстановки «пар» линеек сейсмоприемников при зондировании тектонического разлома

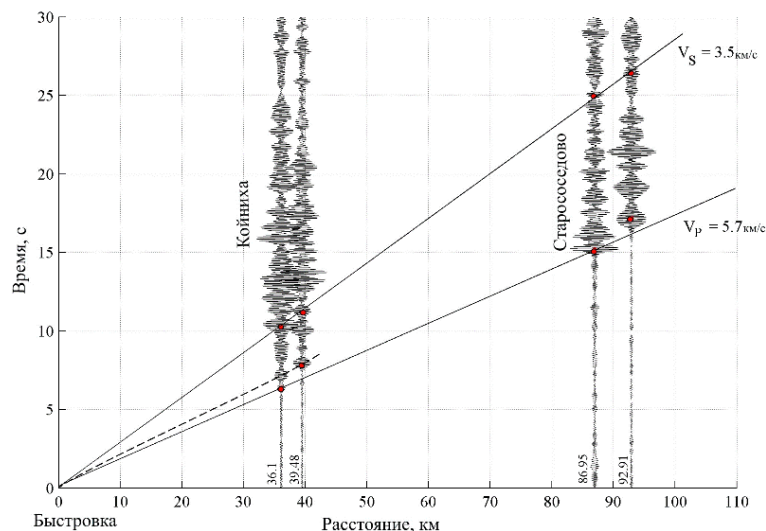


Рисунок 8. Годографы волн P, S

Регистрация осуществлялась на расстояниях «источник-приемник» 39.1 км (район села Койнихи) и 86.9 км (район села Старососедово), соответственно. В первом случае расстояние внутри «пары» составляло 3.4 км, во втором случае - 6 км. Для каждой из расстановок сейсмоприемников были получены вибрационные кореллограммы, описывающие набор сейсмотрасс. На рисунке 8 в качестве примера приводятся вибрационные Z-кореллограммы, полученные для каждой «пары» расстановок сейсмоприемников.

Особенность каждой из «пар» расстановок состоит в том, что наблюдается запаздывание по времени вступления головной волны, регистрируемой за раз-

ломом. На рисунке 8 таким сейсмотрассам соответствуют расстояния 39.48 км и 92.91 км. В первом случае наблюдается уменьшение продольной скорости с $V_p = 5.72$ км/с до 5.0 км/с, во втором - до 5.51 км/с, что соответственно составляет 12.6% и 3.6%.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 03-05-65292, № 05-05-64245, № 06-05-65265, № 04-05-64177, №07-07-00214, №07-05-00858, Программ фундаментальных исследований РАН № 16.12, 16.13, 16.15, Междисциплинарных интеграционных проектов СО РАН № 16, 57.

ЛИТЕРАТУРА

- Guomin, Z. The study of multidisciplinary earthquake prediction in China / Z. Guomin, Z. Zhaocheng // J. of Earthquake Prediction Research, 1992. - Vol. 1, № 1. - P. 71 - 85.
- Alekseev, A.S. A multidisciplinary mathematical model of combined foreshock for earthquake prediction research / A.S. Alekseev // J. of Earthquake Prediction Research, 1993. - Vol. 2, № 2. - 37 - 150.
- Журков, С.Н. К вопросу о прогнозировании разрушения горных пород / С.Н. Журков, В.С. Куксенко, В.А. Петров // Изв. АН СССР: Физика Земли. - 1977. - № 8. - С. 11 - 18.
- Соболев, Г.А. Изучение образования и предвестников разрыва сдвигового типа в лабораторных условиях / Г.А. Соболев // Поиск предвестников землетрясений. - Москва, 1978. - С. 86 - 99.
- Николаевский, В.Н. Обзор: земная кора, дилатансия и землетрясения / В.Н. Николаевский // Успехи науки и техники. М.: Мир. 1982. - С. 133 - 215.
- Алексеев, А.С. Активная сейсмология с мощными вибрационными источниками / А.С. Алексеев [и др.] // Отв. ред. Г.М. Цибульчик. - Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН, филиал "Гео" Издательства СО РАН, 2004. - С. 387.

7. Ковалевский, В. В. Моделирование активного вибросейсмического мониторинга / В.В. Ковалевский // Вестник НЯЦ РК, 2006. – Вып. 2. – С. 136 - 141.
8. Глинский, Б.М. Взаимосвязь волновых полей мощных вибраторов с атмосферными и геодинамическими процессами / Б.М. Глинский, В.В. Ковалевский, М.С. Хайретдинов // Геология и геофизика, 1999. – Т. 40, № 3. – С. 431 - 441.
9. Глинский, Б.М. Опыт вибросейсмического зондирования сложно построенных геологических структур (на примере грязевого вулкана Шуго) / Б.М. Глинский, А.Л. Собисевич, М.С. Хайретдинов // Доклады РАН. - 2007. - Т.413, № 3. - С. 398 - 402.
10. Глинский, Б.М. О возможности применения вибросейсмических методов для изучения флюидонасыщенных и трещиноватых зон / Б.М. Глинский, А.Г. Фатьянов, М.С. Хайретдинов // Вестник НЯЦ РК, 2006. – Вып. 2. – С. 155 - 160.

ВИБРОСЕЙСМИКАЛЫҚ ӘДІСТЕРІМЕН ДИЛАТАНС ЗОНАЛАРДЫҢ МОНИТОРИНГІ

Алексеев А.С., Глинский Б.М., Ковалевский В.В., Хайретдинов М.С.

РФА СБ Есептеу математика және Математикалық физика институты, Новосибирск, Ресей

«Дилатансияның шекаралық қабаты» – кернеуден бос жер бетіне жақын жанама және созатын тектоникалық кернеулер әсерінен жер қыртысының жоғарғы бөлшегінде созылған зоналардың босаңсуы – пайда болу оқиғасы есептеу эксперименттер нәтижесінде айқындалған. Мақалада, жаршылардың арабайланысын анықтау сенімділігін жоғарылату мақсатында «ошақтық» және «шекаралық» дилатанс зоналарда вибросейсмикалық толқындар жіберу сұлбасы қаралған. Новосибирск және Таман жанартау провинциялары аудандарында күрделі вибраторлар мен ұтқыр тіркеу жүйелерін қолдануымен активтік вибромониторинг бойынша үлкен масштабты эксперименттері сипатталады.

MONITORING OF DILATANCY ZONES BY VIBROSEISMIC METHODS

A.S. Alekseyev, B.M. Glinsky, V.V. Kovalevsky, M.S. Khairatdinov

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia

The phenomenon of formation of a “boundary dilatancy layer” – decrease of extensive zones in the Earth’s crust upper part under influence of tangential and tensile tectonic stresses near the daily surface free from stresses – was detected as a result of computational experiments. A scheme of vibroseismic sounding of dilatancy zones of the “source” and “boundary” types to increase the reliability while determining the interrelation among precursors are considered. Large-scale experiments on active vibroseismic monitoring within Novosibirsk, and Taman mud-volcanic province with the use of powerful vibrators and mobile recording systems are described.

УДК 550.34:621.39.9

АНАЛИЗ СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛНОВЫХ ПОЛЕЙ В ТРЕЩИНОВАТЫХ И ФЛЮИДОНАСЫЩЕННЫХ СРЕДАХ

Хайретдинов М.С., Воскобойникова Г.М., Седухина Г.Ф.

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия

Для решения проблемы активного вибросейсмического мониторинга процессов трещинообразования и дилатансии в сейсмovolканоопасных зонах предлагается учитывать динамические характеристики волнового поля при слежении за изменениями коэффициентов анизотропии среды и скоростей распространения продольных и поперечных волн, предложенному ранее Алексеевым А.С. Тем самым будут учитываться вариации волновых форм и нелинейная трансформация волновых полей, связанные с развивающимися геодинамическими процессами в очаговых зонах. Эффективность предлагаемого подхода подтверждена результатами экспериментальных исследований методом вибрационного зондирования грязевых вулканов Таманской грязевулканической провинции и тектонического разлома в Новосибирской области. Задача по оцениванию динамики развития геодинамических процессов в очаговой зоне приобретает статус многопараметрической задачи, решение которой возможно методами распознавания образов.

ВВЕДЕНИЕ

Сейсмическая гетерогенность земной коры является ее фундаментальным свойством. Она присуща многим областям земной коры: зонам подготовки природных катастроф (землетрясений, извержений вулканов), разломным зонам, нефтяным коллекторам и др. Данный тип гетерогенности характеризуется локальными неоднородностями, различающимися масштабом (геометрическими параметрами), контрастностью, структурной организацией, плотностью распределения. В частности, геодинамические процессы зарождения и развития сейсмического очага в сейсмоопасных зонах увязывают с процессами трещинообразования (С.Н. Журков, А.С. Алексеев). С учетом этого, в качестве количественной характеристики базового процесса, порождающего аномалии-предвестники, естественно использовать пространственно - временную функцию плотности числа трещин в области готовящегося очага и в зонах аномальных геофизических полей на поверхности Земли. В качестве такой функции А.С. Алексеевым была предложена интегральная функция вида $\theta(x, y, t) = \text{div} \vec{U}$ (где $\vec{U}$ – геофизическое поле, регистрируемое на поверхности Земли), с помощью которой можно пытаться приближенно описать плотность трещин в среде [1]. Функция $\theta(x, y, z, t)$ может быть названа *функцией разуплотнения среды*.

Создание метода определения функции $\theta(x, y, z, t)$, в частности, метода вибросейсмического мониторинга сейсмоопасных районов, следует отнести к числу важных проблем «активной сейсмологии». Наиболее детальные данные о структуре областей среды с изменяющейся во времени трещиноватостью способен дать сейсмический метод наблюдения продольных и поперечных волн от мощных контролируемых вибросейсмических источников. Эффективность вибросейсмического метода мони-

торинга на основе такого подхода теоретически и методически обоснована в [2]. С помощью этого метода наличие трещин в зонах разрушения и изменение их объемной плотности в течение периодов между сеансами мониторинга можно определить по изменению коэффициентов анизотропии и скоростей распространения волн.

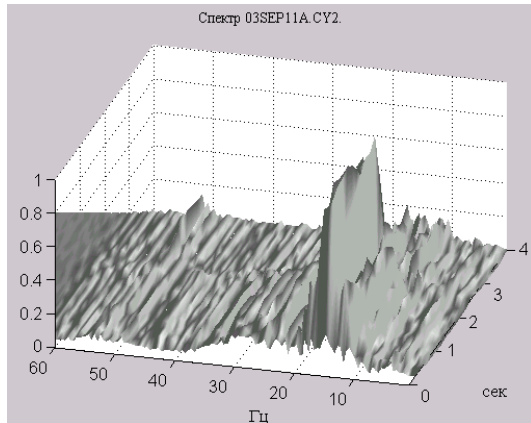
ИНФОРМАТИВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СЕЙСМИЧЕСКОГО ВОЛНОВОГО ПОЛЯ В АКТИВНОМ МОНИТОРИНГЕ

Имеются предпосылки расширения списка информативных параметров сейсмических волновых полей, выбираемых в качестве контролируемых в проблеме активного мониторинга флюидонасыщенных и трещиноватых сред. Выбор таких параметров может быть обоснован следующими соображениями.

Параметры нелинейности волнового поля

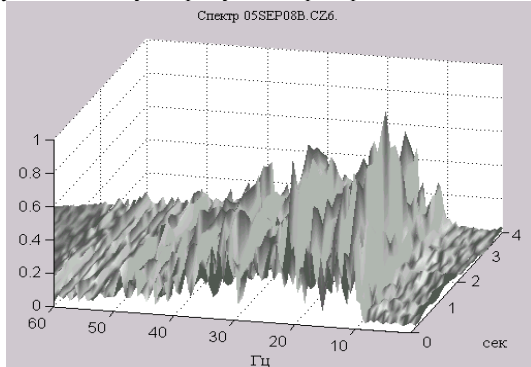
Трещиноватость среды является физической основой развития нелинейных процессов распространения сейсмических колебаний в очаговых зонах. Это обстоятельство является основанием для учета параметров нелинейности волнового поля, характеризующейся появлением высших гармоник, которыми обогащается первоначальное зондирующее вибросейсмическое колебание. В данной работе анализ процесса трансформации волновых полей выполнен на основе изучения вибрационных сейсмограмм, полученных при вибрационном зондировании районов, прилегающих к грязевым вулканам Шуго и Ахтанизовский (Таманская грязевулканическая провинция). Регистрация сейсмических сигналов осуществлена вдоль продольных профилей на траверсах «вибратор – регистрирующая сейсмостанция – грязевой вулкан» и «вибратор – вулкан – регистрирующая сейсмостанция». В последнем случае вулкан располагался между вибратором и сейсмостанцией [3]. По отношению к вибрационным сейсмограммам, полученным при обоих вариантах регистрации, вычислялись спектрально временные функ-

ции (СПФ) [4]. В качестве примера на рисунке 1 представлены частные виды функций для двух исследованных вариантов. Дальность зондирования составила $R=3290$ м, когда вибратор и сейсмостанция были расположены на профиле перед вулканом Шуго, и $R=3380$ м, когда вулкан располагался между вибратором и сейсмостанцией.



а – $R=3290$ м

(вулкан по одну сторону от вибратора и сейсмостанции)



б – $R=3380$ м

(вулкан между вибратором и сейсмостанцией)

Рисунок 1. Спектрально-временные функции
вибрационных коррелограмм

Сопоставление двух полученных СПФ наглядно показывает вклад вулканической постройки в широкополосное обогащение спектра колебаний - наблюдается 10-ти кратное расширение преобладающего спектра колебаний. Подобные эффекты представляется возможным связать с трансформацией излучаемых сигналов на нелинейных структурах геологической среды в условиях распространения сейсмических волн во флюидонасыщенных образованиях, какими являются выводящие каналы грязевых вулканов.

Численная оценка влияния процесса трещинообразования в среде на нелинейные эффекты распространения колебаний получена для следующего модельного случая. В качестве исходной модели трещиноватости приняты хаотически ориентированные пустоты сферической формы, равномерно рассеянные в однородной и изотропной среде. Уравнение распространения плоских монохроматических упругих волн вдоль оси Ox при наличии только про-

дольных движений в моделируемой среде ($u_x \neq 0, u_z = u_y = 0$) имеет вид [5]:

$$\rho_0 \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} - M_0 \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} = B \frac{\partial u_x}{\partial x} \cdot \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2}$$

При граничном условии $u_x|_{0,t} = U_x \sin \omega t$ решение уравнения во втором приближении примет вид:

$$u_x = U_x \sin \omega \left(t \pm \frac{x}{C_p} \right) - \left(\frac{U_x}{2} \right)^2 \frac{B}{M_0} k_p^2 \cos 2 \omega t \pm k_p x \quad (1)$$

где $k_p = \omega / c_p$, B – функция, сложным образом зависящая от характера трещиноватости среды и ее параметров упругости, M_0 – число, также связанное с характеристиками упругости сплошной среды, x – длина пути пробега волны, c_p – скорость продольных волн.

Из выражения (1) следует, что в трещиноватой среде появляются гармоники удвоенной частоты, уровень которых определяется соотношением пересчитанных параметров. На рисунке 2 приведены зависимости коэффициента нелинейности формы монохроматической волны от линейных размеров трещин, определяемых соотношением большой и малой осей сфероида. Коэффициент нелинейности u_2/u_1 определяется соотношением амплитуды второй и первой гармоник гармонического колебания на выходе из трещиноватой среды. Графики рассчитаны для следующих параметров сплошной среды (гранита) и колебаний: модуль Юнга $E=1.5 \cdot 10^{10}$, коэффициент Пуассона $\nu=0.42$, статическое давление $p_0=10^3$ Па, частота колебаний $f=7$ Гц, скорость продольной волны $C_p=5500$ м/с. Приведенные зависимости получены при следующих параметрах: путь пробега волны $x=10$ км (кривые 1, 2) и $x=100$ км (кривые 3, 4); колебательная скорость $U_x=2.7 \cdot 10^{-8}$ м/с (кривые 1, 3) и $U_x=70 \cdot 10^{-8}$ м/с (кривые 2, 4).

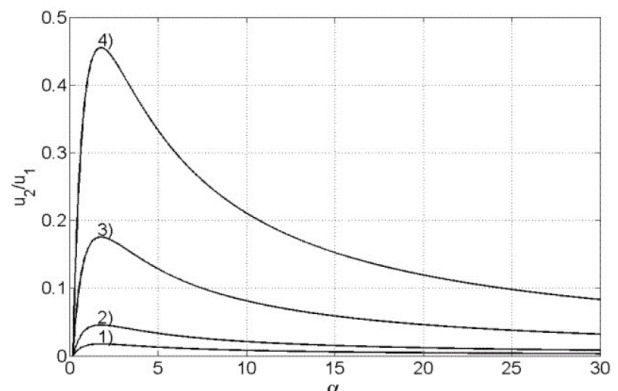


Рисунок 2. Зависимость коэффициента нелинейности
формы монохроматической волны от соотношения осей
сфероида α , моделирующего трещины в граните

Фракталы рассеянных волн

Большую часть информации о гетерогенности среды несет в себе поле рассеянных волн, случайно распределенных во времени и пространстве. Есть основание выделять их особо высокую чувствительность к тонким структурным перестройкам сложно-построенной среды в очаговых зонах и, тем самым, нести дополнительную информацию о геодинамических процессах. Проявление рассеянных волн на вибрационных сейсмограммах вслед за головными волнами иллюстрируется на рисунке 3б. В отличие от вибрационных сейсмограмм, полученных, когда вибратор и сейсмостанция располагались на профиле до вулкана (рисунок 3а), хорошо видно усложнение структуры сейсмограмм, полученных при расположении сейсмостанции за вулканом. Очевидно, что такое усложнение вызвано прохождением вибро-сейсмических колебаний через тело вулкана.

Для отображения структуры волнового поля в частотной области на рисунке 4 приведены фракталы

сейсмограмм, представляющие собой проекции спектрально-временных функций (рисунок 1) на плоскость «частота - время». Амплитудные значения СПФ представлены соответствующей цветовой гаммой.

Двумерное представление параметров сейсмических волн по частоте и во времени, прежде всего, показывает компактность распределения частотно-временных параметров преобладающих волн (головных волн, выделенных фиолетовым цветом), регистрируемых на профиле перед вулканом. Напротив, волновая картина, регистрируемая сейсмостанцией за вулканом, характеризуется «расплыванием» этих параметров на плоскости «частота-время». Таким образом, переходный характер поля между этими двумя состояниями, вызванный развитием процессов трещинообразования и флюидонасыщения, может быть охарактеризован с помощью рассмотренных фракталов. Последние могут оказаться эффективным инструментом для отслеживания этих процессов в комплексе с другими параметрами.

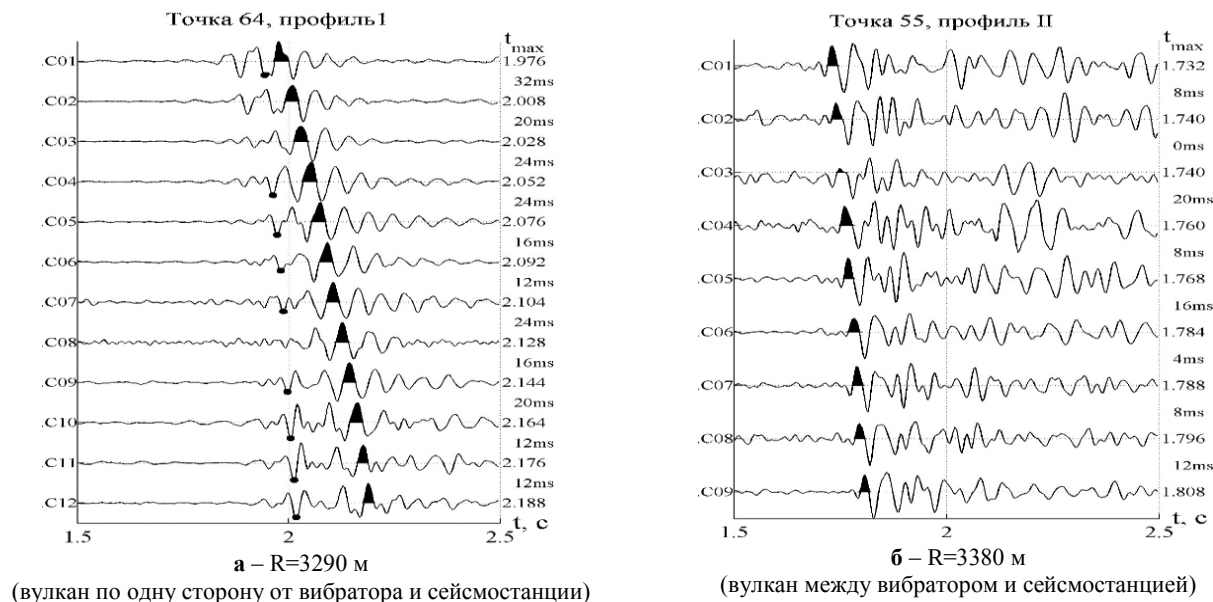


Рисунок 3. Вибрационные сейсмограммы, полученные на трассе «вибратор-вулкан Шуго»

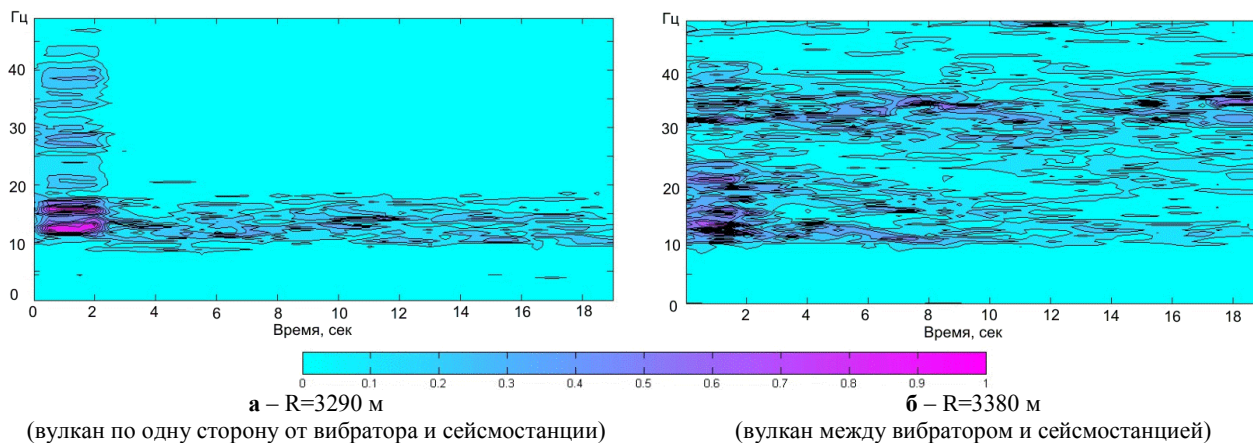


Рисунок 4. Фракталы вибрационных сейсмограмм, полученных на трассе «вибратор - сейсмостанция - вулкан Шуго»

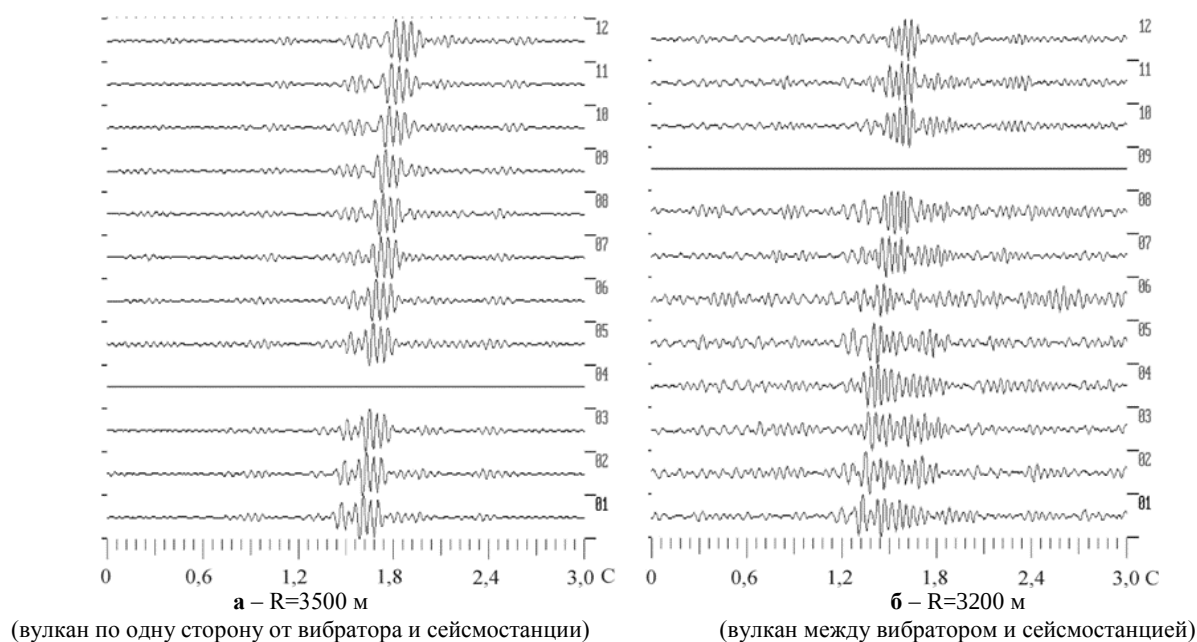


Рисунок 5. Вибрационные сейсмограммы, полученные на траверсе «вибратор-вулкан Ахтанизовский»

На рисунке 5, по аналогии с рисунком 3, представлены вибрационные сейсмограммы, полученные в результате вибрационного зондирования грязевого вулкана Ахтанизовский.

Как можно видеть из рисунка 5, наблюдается усложнение структуры сейсмограмм за счет появления вслед за головными волнами рассеянных волн, обусловленных прохождением вибросейсмических колебаний через тело вулкана (аналогичное рисунку 3б) и зарегистрированных на выходе вулкана. Таким образом, на двух примерах проявляется общая закономерность в виде усложнения структуры волнового поля в частотной и временной областях на выходах грязевых вулканов.

Характеристики вариаций волновых форм

Дополнительным информативным признаком, характеризующим влияние зон разрушения на проходящие сейсмические волны, являются вариации форм основных типов сейсмических волн. В первую очередь, это относится к поперечным волнам. Еще в свое время Н.Н. Пузырев обратил внимание на то, что анизотропия по-разному влияет на прохождение продольных и поперечных волн. В связи с этим было быстро осознано, что сама анизотропия является исключительно яркой характеристикой среды, которая доступна эффективному изучению на основе многоволновой сейсмики [6, 7]. Изучение вариаций волновых форм проведено в экспериментах по вибрационному зондированию тектонических разломов в Новосибирской области. В качестве примера на рисунке 6 представлен фрагмент разломной зоны, имеющей характер «сброса».



Рисунок 6. Фрагмент общего вида разломной зоны

Схема расстановки датчиков по обе стороны разлома представлена на рисунке 7.

На рисунке 8 представлены вибрационные сейсмограммы, полученные при работе вибратора типа ЦВ-40, по компоненте Z при расстановке сеймоприемников по обеим сторонам разлома на удалениях: 86.9 км и 92.9 км (п. Старососедово) и 36.1 км и 39.5 км (п. Койниха). Из сопоставления сейсмограмм хорошо видно нарушение волновых форм основных типов волн, вносимых структурами разлома. Нарушение может быть оценено количественно путем измерения коррелированности волновых форм, зарегистрированных до разлома и за разломом. Соответствующие оценки коэффициентов корреляции приведенных вибрационных сейсмограмм по компоненте Z, даны в таблице 1 для двух участков разлома (Старососедово 1 и Старососедово; Койниха 1 и Койниха 2).

АНАЛИЗ СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛНОВЫХ ПОЛЕЙ В ТРЕЩИНОВАТЫХ И ФЛЮИДОНАСЫЩЕННЫХ СРЕДАХ

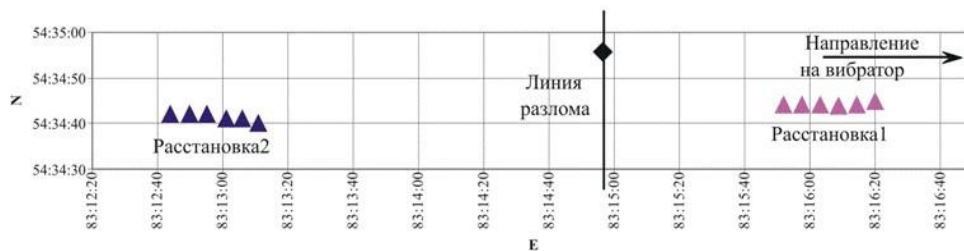


Рисунок 7. Схема расстановки датчиков относительно разлома в Койнихе: расстановка 1 – 17.10.2006; расстановка 2 – 17.10.2006. Вибратор ЦВ-40

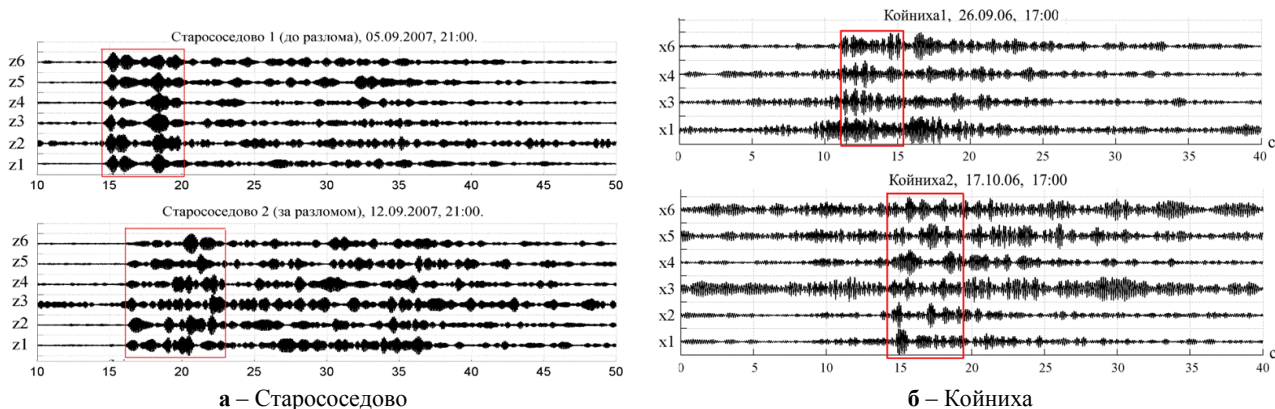


Рисунок 8. Вибрационные сейсмограммы, зарегистрированные по обеим сторонам разлома на двух участках

Таблица. Значения коэффициента взаимной корреляции волновых форм

Компоненты датчика	Кой-ниха 1	Кой-ниха 2	Старососедово-1	Старососедово-2	Компоненты датчика	Кой-ниха 1	Кой-ниха 2	Старососедово-1	Старососедово-2
x1	1,000	1,000	1,000	1,000	z1	1,000	1,000	1,000	1,000
x2		0,124		0,177	z2			0,620	0,433
x3	0,325	0,167	0,210	0,220	z3	0,513	0,293	0,798	0,509
x4	0,387	0,120	0,091	0,181	z4	0,376	0,333	0,836	0,560
x5		0,177	0,163	0,097	z5			0,840	0,357
x6	0,313	0,144	0,131	0,163	z6	0,424	0,206	0,789	0,377

Рассчитаны коэффициенты корреляции вида $K(z1,z1)$, $K(z1,z2)$, $K(z1,z6)$, т.е. между сейсмограммами, полученными с первого датчика, и сейсмограммами остальных датчиков на участках существования волн Р и S (таблица).

Из таблицы видно, что, если в графе «Старососедово 1» значения коэффициента взаимной корреляции лежат в пределах 0.620 - 0.840 (до разлома), то в графе «Старососедово-2 (за разломом)» соответствующие оценки имеют диапазон значений 0.377 - 0.560. Аналогичные оценки, полученные по компоненте Z для второго пункта «Койниха», имеют значения 0.424 - 0.513 и 0.206 - 0.333. Соответствующие оценки, полученные по компоненте X для пункта «Койниха», составляют 0.313 – 0.387 и 0.124 - 0.177. Таким образом, просматривается тенденция уменьшения коррелированности волновых форм на сейсмограммах, вносимая разломом.

Параметры флуктуаций скоростей сейсмических волн

Вибросейсмический метод активного мониторинга сейсмоопасных зон, основанный на слежении

за медленными флуктуациями скоростей основных типов волн, достаточно полно обоснован данными теоретических исследований и подкреплён результатами экспериментов. В этой связи данный информативный параметр, характеризующий процессы трещинообразования и флюидонасыщения, здесь не рассматривается. Следует лишь отметить, что слежение за вариациями скоростей волн, функционально зависящих от динамики рассматриваемых процессов, потребует высокой метрологической точности соответствующей системы мониторинга. С этой точки зрения дополнительный учет динамических характеристик волнового поля, связанный с вариациями волновых форм и нелинейной трансформацией волновых полей в связи с развивающимися геодинамическими процессами, может дать высокий дополнительный эффект в решении проблем активного сейсмического мониторинга.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные результаты базируются на многодисциплинарном подходе, разработанном академиком А.С. Алексеевым в интересах решения пробле-

мы активного сейсмического мониторинга процессов трещинообразования и дилатансии, развивающихся в сеймовулканоопасных зонах. В дополнение к подходу, связанному со слежением за изменением коэффициентов анизотропии среды и скоростей распространения продольных и поперечных волн, предлагается учитывать динамические характеристики волнового поля. Последние позволяют учитывать вариации волновых форм и нелинейную трансформацию волновых полей в связи с развивающимися геодинамическими процессами в очаговых зонах. Такой подход обосновывается результатами экспериментальных исследований по вибрационно-зондированию грязевых вулканов Таманской

грязевулканической провинции и тектонического разлома в Новосибирской области. Показана эффективность использования данных параметров волнового поля в интересах решения проблемы активного сейсмического мониторинга. При этом задача по оцениванию динамики развития геодинамических процессов в очаговой зоне приобретает статус многопараметрической задачи, решение которой возможно методами распознавания образов.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 07-07-00214-а, №07-05-00858-а, №08-07-10000к, междисциплинарного интеграционного проекта СО РАН № 16.

ЛИТЕРАТУРА

1. Alekseev, A.S. A multidisciplinary mathematical model of combined foreshock for earthquake prediction research / A.S. Alekseev // J. of Earthquake Prediction Research, 1983. – Vol. 2, № 2. – С. 137 - 150.
2. Алексеев, А.С. Активная сейсмология с мощными вибрационными источниками / А.С. Алексеев [и др.]. Отв. ред. Г.М. Цибульчик. - Новосибирск : Филиал "Гео" Издательства СО РАН, 2004. - С. 387.
3. Глинский, Б.М. Опыт вибросейсмического зондирования сложно построенных геологических структур (на примере грязевого вулкана Шуго) / Б.М. Глинский, А.Л. Собисевич, М.С. Хайретдинов // Доклады РАН, 2007. - Т. 413, № 3. - С. 398 - 402.
4. Глинский, Б.М. О возможности применения вибросейсмических методов для изучения флюидонасыщенных и трещиноватых зон / Б.М. Глинский, А.Г. Фатьянов, М.С. Хайретдинов // Вестник НЯЦ РК, 2006. – Вып. 2. – С. 155 - 160.
5. Вербицкий, Т.З. Особенности распространения упругих волн в нелинейно-упругих пористых средах / Т.З. Вербицкий // Проблемы нелинейной сейсмики, 1987. - М.: Наука.– С. 94 - 103.
6. Гольдин, С.В. Сейсмические исследования земной коры: сборник докл. Межд.науч. конф., 23 - 25 ноября 2004 г. / / С.В. Гольдин, Н.Н. Пузырев, 2004. – Новосибирск: изд. СО РАН – С. 5 - 9.
7. Пузырев, Н.Н. Методы и объекты сейсмических исследований. Введение в общую сейсмологию / Н.Н. Пузырев. Новосибирск, 1997. – 301 с.

ЖАРЫҚШАҚТЫ ЖӘНЕ ФЛЮИДТЕРМЕН ҚАНЫҚҚАН ОРТАЛАРДА СЕЙСМИКАЛЫҚ ТОЛҚЫНДАР ӨРІСІНІҢ ҚҰРЫЛЫМДЫ ӨЗГЕРУІН ТАЛДАУ

Хайретдинов М.С., Воскобойникова Г.М., Седухина Г.Ф.

РФА СБ Есептеу математика және Математикалық физика институты, Новосибирск, Ресей

Сейсможанартау қауіпті белдемдерінде жарықшақты пайда болу және дилатансия процесстерінің активті вибросейсмикалық мониторингі проблемаларын шешу үшін, бұрын А.С. Алексеев ұсынған орта анизотропиясы мен құма және көлденең толқындардың жылдамдығы өзгеруіне байқауларына қосымша ретінде толқындық өрістің динамикалық сипаттамаларын есепке алуы ұсынылады. Сонымен ошақ белдемдерінде дамудағы геодинамикалық процесстерімен байланысты толқындық түрлерінің вариациялары мен толқындық өрістердің сызықты емес трансформациялары есепке алынады. Ұсынылған көзқарастың тиімділігі Таман лайлы жанартау провинциясы мен Новосибир облысындағы тектоникалық жарылымын вибрациялық зондтау әдісімен эксперименталды зерттеулердің нәтижелерімен расталған. Ошақ белдемінде геодинамикалық процесстері даму динамикасын бағалау бойынша міндеттер, оларды түрлерін тану әдісімен шешуіне болатын, көп параметрлі есеп дәрежесін алады.

**STRUCTURAL VARIATIONS ANALYSIS OF THE SEISMIC
WAVE FIELDS IN THE FRACTURED AND FLUID-SATURATED MEDIA**

M.S. Khairtdinov, G.M. Voskoboynikova, G.F. Sedukhina

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia

The problem solution approach of the active vibroseismic monitoring of a fracturing and dilatancy processes in seismic volcanic dangerous zones is offered. Taking into account earlier proposed approach by A.S. Alekseev, which consisted of tracking changes of Medium Anisotropy coefficients and longitudinal and transverse wave propagations, we propose to introduce additional considerations of wave field dynamic characteristics. These characteristics are related to variations of wave forms and wave fields' nonlinear transformation as a result of progressive geodynamic processes in source zones. This approach is based on experimental research results on mud volcano vibrational sounding within Taman mud-volcanic province and tectonic fracture in Novosibirsk region. A problem to estimate geodynamic processes development dynamics in source zones obtains status of polyvalent problem, which could be solved with image recognition methods.

УДК 551.532.52

ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ РАДИАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА ТЕРРИТОРИИ СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА

¹Поляков Л.Е., ²Кругликов Д.А.¹ТОО «Семейгидрогеология», Семей, Казахстан²Территориальное управление «Востказнедра», Усть-Каменогорск, Казахстан

На основе ретроспективных данных обосновывается необходимость и поэтапная последовательность оценки радиологического состояния подземных вод, сформированного при взаимодействии подземных вод с природными и техногенными радионуклидами.

С 1949 г. по 1991 г. ядерные испытания в Казахстане проводились на Семипалатинском испытательном ядерном полигоне (СИП) [1, 2]. Установлено, что определяющими загрязнителями территории являются техногенные радионуклиды (стронций-90, цезий-137, плутоний-239,240), на долю которых приходится свыше 90% загрязненной площади. Из числа изученных, приоритетными загрязнителями являются цезий-137 среди техногенных элементов, уран среди природных элементов. Содержание этих радионуклидов на «следах взрывов» и на аномальных участках превышает фон глобальных выпадений (ФГП) для северного полушария: цезий-137 в 1,8 - 4,3 и в 6 - 10 раз; стронций-90 - в 1,2 - 8 и 10 - 50 раз; плутоний -239, - 240 - в 2 - 10 и в 25 - 70 раз, соответственно.

В Восточном Казахстане поисковые работы и разведка подземных вод проводились за пределами СИП на территориях, в различной мере подвергшихся радиационному загрязнению. В 1974 - 1984 гг. при разведке месторождений подземных вод в Семипалатинском регионе Восточного Казахстана (в речных долинах, в отложениях предгорных шлейфов и конусов выноса северо-восточной, восточной и юго-восточной окраин Центрально-Казахстанского мелкосопочника), в краевой части артезианского бассейна Семипалатинского Прииртышья в процессе оценки пригодности питьевого водоснабжения согласно Государственным стандартам, определены содержания радия-226, стронция-90 и урана. Было установлено, что содержание природного урана во всех случаях ниже нормы на 2 - 3 порядка, содержание радия-226 - от 0,01 до 2,8 Бк/дм³, стронция-90 - от 0,01 до 14,8 Бк/дм³ при допустимых концентрациях по действовавшим тогда нормам радиационной безопасности НРБ-76, соответственно, 2 и 14,8 Бк/дм³. Содержание радия-226 на пределе ПДК (14,8 Бк/дм³) зафиксировано по юго-восточному радиоактивному «следу» на месторождении трещинно-карстовых вод Ащису, разведенном для технического использования.

Современные требования к радиационному состоянию воды являются более жесткими. По НРБ-99 [3] для радия - 226 установлен уровень вмешательства (УВ) 0,5 Бк/дм³, для стронция-90 - 5 Бк/дм³. В связи с

этим перечень объектов, в воде которых содержание радионуклидов превышает УВ, увеличился: на участках Северный Кайнар, Мизек содержание стронция-90 14,7 и 2,2-7,4 Бк/дм³, соответственно, на Каракольском месторождении содержание радия-226 - 0,06-1,1 Бк/дм³. Низкое содержание радионуклидов на территории СИП также определено на ряде участков:

- на горном массиве Дегелен - в воде родника ниже штольни 108 (с последним подорванным зарядом) на удалении 250 м от штольни; в воде ручья на удалении 500, 2000 и 3000 м, где в 1995 г. содержание стронция-90 и цезия-137 составляло 0,03 - 0,89 и 0,03 - 0,09 Бк/дм³, соответственно;
- в воде угольного карьера Каражыра (площадка Балапан), где в сентябре 1996 г. содержание стронция-90 и цезия-137 составляло до 0,019 и до 0,09 Бк/дм³, соответственно.

Наибольшее загрязнение зафиксировано в воде родника горы Мыржык на СИП - содержание стронция-90 и цезия-137 здесь составило 129 и 65 Бк/дм³, соответственно.

Полученные данные однозначно свидетельствуют о наличии на территории Восточного Казахстана участков развития подземных вод с радионуклидным загрязнением и о необходимости постоянного контроля за радиационным состоянием подземных вод как основного источника водоснабжения населения.

В 1995 г. в зоне возможного воздействия СИП были сооружены три скважинных поста и определено содержание в подземных водах стронция-90 и цезия-137: 1) Курчатовский район, г. Курчатов - 0,04 - 0,05 Бк/дм³ и 0,02 - 0,03 Бк/дм³, соответственно; 2) Центральный (южный склон горного массива Дегелен) - 0,02 Бк/дм³ и 0,03 Бк/дм³, соответственно; 3) Сарапанский (северная граница площадки ПЯВ с подземными ядерными взрывами на участке Балапан) 0,08 - 0,09 Бк/дм³ и 0,01 - 0,02 Бк/дм³, соответственно, при ПДК (НРБ-76) по ⁹⁰Sr = 14,8 Бк/дм³, ¹³⁷Cs = 55,5 Бк/дм³.

С введением в действие Санитарных правил и норм № 3.01.067-97, № 3.02.002-04, норм радиационной безопасности (НРБ-99) СП 2.6.1.758-99 предварительная оценка радиационного состояния питьевой воды стала выполняться по общей альфа- и бета-активности

(допустимые нормы по ^{90}Sr - 0,1 Бк/дм³ и по ^{137}Cs - 1,0 Бк/дм³). В случае превышения допустимых норм по общей альфа- и бета-активности, предусмотрено обязательное проведение идентификации радионуклидов. При возможном присутствии в воде ^3H , ^{14}C , ^{131}I , ^{210}Pb , ^{228}Ra , ^{232}Th и ^{222}Rn определение их удельной активности обязательно [3, стр.18, таблица 1]. С учетом этих требований в 2004 – 2006 гг. на территории съемочного листа М-44-ХІХ проведена оценка радиологического состояния грунтовых вод по 160 водопунктам (колодцы, скважины отгонного животноводства), в том числе по 21 режимному водопункту с посезонным отбором проб подземных вод [5]. Всего было проанализировано 230 проб. В 182 случаях (80% от общего количества проанализированных проб) выявлено превышение ПДК по α -активности в 1,1 - 63 раза, в том числе, в 50 пробах по β -активности - в 1,1 - 58,7 раза и в 6 пробах - в 128 - 735 раз. Таким образом, подземные воды большинства водопунктов территории не пригодны для питьевого водоснабжения. Учитывая высокую степень радиологического загрязнения водных ресурсов территории съемки, по четырем водопунктам с превышением нормы суммарной α -активности от 18,2 до 57,3 раз и β -активности от 1,64 до 7,5 раз, проведена идентификация присутствующих в воде природных и техногенных радионуклидов. Выполнено изменение удельной активности в точках наблюдения на территории летников Культабар и Каражан и зимниках Каракунды и Аккора. (таблица 1). Как следует из таблицы, в трех пробах воды выявлено превышение содержания природного радионуклида радия-226 над уровнем вмешательства от 7,4 до 16 раз, в одной – превышение содержание тория-232 в 1,22 раза, во всех пробах отмечается наличие следов цезия-137, стронция-90 и трития.

Что касается α - и β -радиоактивности, то на территории СИП и в приграничных районах, в воде 20 водопунктов режимной сети за 2004 - 2005 гг. выявлены кратные превышения α - и реже β -радиоактивности [4]. При этом наблюдается следующая закономерность: при подъеме уровня грунтовых вод происходит уменьшение активности, при снижении уровня в летне-осеннюю межень – увеличение α - и β -активности. За долготелетний период, часть поверхностных растворимых техногенных радионуклидов просочилась в зону аэрации и, растворяясь при подъеме уровня, попадает в подземные воды. В целом по данным проведенной гидрогеологической съемки 2004 - 2006 гг. на листе М-44-ХІХ и мониторинга подземных вод установлено, что загрязнение поверхностных и подземных вод носит пятнистый характер, степень изменчивости радиационного состояния подземных вод весьма высокая.

В 2005 - 2006 гг. по заданию Комитета геологии и недропользования РК, в рамках государственного мониторинга радиационного состояния подземных вод, на территории СИП построены 9 режимных по-

стов. Первые результаты выполненных наблюдений приводятся ниже.

В снеготалой воде, установлена общая α -активность с превышением питьевых норм от 1,2 – 1,7 до 5,2 – 8,5 раз (посты Каражал, Есимжал, Атомколь, Саржал, Самай, Мырза, Шубра), до 10,1 – 17,3 раза (посты Каражыра, Тайлан) и бета-активность с превышением питьевых норм от 1,06 до 2,6 раза (посты Есимжал, Тайлан, Каражал). Таким образом, воздушный путь (по снегу) является основным переносчиком радиоактивности внутри и за пределами СИП.

По результатам радиационного обследования мест заложения режимных скважин и прилегающих к ним территорий, установлено, что мощность γ -излучения колеблется от 0,08 до 0,3 мкЗв/час и не превышает установленную в [3] норму для зоны радиационного контроля. Плотность потока β -частиц на площадках режимных скважин соответствуют фоновым значениям для данных территорий. Аномальные значения - до 247 част/(см²*мин), - обусловлены близким расположением портала «боевой» штольни горного массива Дегелен.

Значения общей α -активности почв на 11 площадках скважин изменяются от 386 (пост Каражыра) до 1486 Бк/кг (пост Атомколь), значения β -активности - от 170 до 2701 Бк/кг. На посту Каражал эти значения фиксируются соответственно как 935 и 3203 Бк/кг.

В подземных водах 20 водопунктов (из 26 водопунктов 9-ти постов) общая α -активность фиксируется с превышением ПДК от 1,04 до 199 раз, при этом по шести водопунктам превышения ПДК нет. По β -активности отмечено превышение ПДК в восьми водопунктах - от 1,2 до 16,6 раза, при этом по 16 водопунктам превышения ПДК нет. Данные внутреннего и внешнего контроля показали удовлетворительную сходимость результатов.

Оценка радиационного состояния территории и подземных вод требует дальнейших исследований. В первую очередь, необходимо исследовать изменчивость показателей во времени и установить влияние на нее применяемых методов и лабораторий, поскольку имеются основания для некоторых сомнений в достоверности отдельных лабораторных исследований. Необходимо конкретизировать исполнение ряда рекомендаций, например, таких как рекомендация дополнительно исследовать месторождения подземных вод на ^{222}Rn для учета особенностей геологического строения участков водозаборов. Для экономии средств и более четкого выполнения требований, отраженных в [3], необходимо определиться и закрепить нормативным документом перечень и порядок идентификации радионуклидов в случаях, когда выявлено превышение нормативов по общей альфа и бета-активности. Пока Департаментом Гос.санэпиднадзора ВКО (исх.№04/2178 от 13.04.07 г) предложен порядок, исследования радионуклидов, приведенный в таблице 2.

**ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ РАДИАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД
НА ТЕРРИТОРИИ СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА**

Таблица 1. Результаты идентификации радионуклидов в поверхностной/подземной воде за 2005 г. (данные ИРБиЭ НЯЦ РК) и определения общей альфа и бета-активности (данные ОАО «НаЦЭиС» г. Семей)

№№ п/п	Место отбора	Точка отбора	Дата отбора	Содержание (удельная активность, Бк/дм ³) радионуклидов (Аi) Уровень вмешательства (Бк/дм ³)		
				⁴⁰ K/22 = А _к	²³² Th/0,6 = А _{Th}	²²⁶ Ra/0,5 = А _{Ra}
1	2	3	4	5	6	7
1	р. Ащису	12п/0.17	28-25.06.05г. г.	$\frac{7,8}{22} = 0,35$	$\frac{0,28}{0,6} = 0,47$	$\frac{3,7}{05} = 7,4$
2	зим. Каракундык	13п/0.57	30.06.05г.	$\frac{7,8}{22} = 0,35$	$\frac{0,28}{0,6} = 0,47$	$\frac{4}{05} = 8$
3	лет. Культабар	14п/0.14	30.06.05г.	$\frac{7,8}{22} = 0,35$	$\frac{0,28}{0,6} = 0,47$	$\frac{8}{05} = 16$
4	лет. Каражан	10п/0.23	01.07.05г.	$\frac{7,8}{22} = 0,35$	$\frac{0,73}{0,6} = 1,22$	$\frac{0,49}{05} = 0,98$
5	зим. Аккора	9п/0.141 ^а	01.07.05г.	$\frac{7,8}{22} = 0,35$	$\frac{0,28}{0,6} = 0,47$	$\frac{0,49}{05} = 0,98$

Продолжение таблицы 1

№№ п/п	Место отбора	Содержание (удельная активность, Бк/дм ³) радионуклидов (Аi) Уровень вмешательства (Бк/дм ³)			Радиационная безопасность воды по СанПиН РК 3.02.002-04 (в ПДК)		Аэф.* (предварительная оценка пригодности воды для питьевых целей)	
		¹³⁷ Cs/11 = А _{Cs}	⁹⁰ Sr/5 = А _{Sr}	³ H/7,7(кБк/дм ³) = А _H	α(ПДК=0,1 Бк/дм ³)	β(ПДК=1,0 Бк/дм ³)	Пригодные Аэф <1	Не пригодные Аэф >1
1	2	8	9	10	11	12	13	14
1	р. Ащису	$\frac{0,28}{11} = 0,03$	$\frac{0,28}{5} = 0,06$	$\frac{0,68}{7,7} = 0,09$	3,29	0,42	-	8,4
2	зим. Каракундык	$\frac{0,28}{11} = 0,03$	$\frac{0,16}{5} = 0,03$	$\frac{0,42}{7,7} = 0,05$	1,82	0,36	-	8,93
3	лет. Культабар	$\frac{0,28}{11} = 0,03$	$\frac{0,16}{5} = 0,02$	$\frac{0,22}{7,7} = 0,03$	2,36	1,64	-	16,9
4	лет. Каражан	$\frac{0,28}{11} = 0,03$	$\frac{0,16}{5} = 0,03$	$\frac{0,68}{7,7} = 0,09$	5,73	3,9	-	2,63
5	зим. Аккора	$\frac{0,28}{11} = 0,03$	$\frac{0,1}{5} = 0,02$	$\frac{0,68}{7,7} = 0,09$	2,48	7,51	-	1,91

Таблица 2. Последовательность выполнения анализов на радионуклиды в зависимости от измеренных уровней общей альфа- и бета-активностей (согласно Рекомендаций Госсанэпиднадзора ВКО, 2007)

№	Измеренные уровни суммарной α и β-активности, Бк/л	Контролируемые радионуклиды	Примечание
1	Аα+Δα≤0,10 Аβ+Δβ≤1,0	Радионуклидный состав не контролируется	
2	0,10<Аα+Δα≤0,20 Аβ+Δβ≤1,0	Сокращенный: ²¹⁰ Po, ²¹⁰ Pb	
3	0,20<Аα+Δα≤0,40 Аβ+Δβ≤1,0	Расширенный: ²¹⁰ Po, ²¹⁰ Pb, ²²⁶ Ra, ²²⁸ Ra	
4	Аα+Δα>0,40 Аβ+Δβ≤1,0	Полный: ²¹⁰ Po, ²¹⁰ Pb, ²²⁶ Ra, ²²⁸ Ra, ²³⁸ U, ²³⁴ U	Необходимо дополнительное определение ²³² Th, ²³⁰ Th, ²²⁸ Th, в районах техногенного загрязнения
5	Аβ+Δβ>1,0 (при любых значениях Аα+Δα)	¹³⁷ Cs, ⁹⁰ Sr, при необходимости другие техногенные бета-излучающие нуклиды, ⁴⁰ K	

Выводы

Территория Семипалатинского испытательного полигона в пределах Курчатовского района и Восточно - Казахстанской области испытала загрязнение техногенными радионуклидами. Степень загрязнения поверхностных и подземных вод носит пятнистый характер. Степень изменчивости радиационного состояния подземных вод весьма высокая, что, возможно, связано с временными колебаниями (не исключается также вероятность лабораторных ошибок).

Подземные воды на значительных территориях являются безальтернативным источником водоснабжения. Мониторинг радиационного состояния подземных вод должен быть обязательным. Контроль подземных вод для питьевых целей, в случае превышения нормативов по общей активности, порядок и последовательность идентификации присутствующих радионуклидов, лаборатории по их определению, необходимо установить в директивном порядке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Испытания ядерного оружия и ядерные взрывы в мирных целях СССР 1949 - 1990 г.г. / Под редакцией В.Н. Михайлова. – Саров: Российский федеральный центр – ВНИИЭФ, 1996.
2. Ядерные испытания СССР. Семипалатинский полигон / под редакцией В.А. Логачева. – М., 1997. – 320 с.
3. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99). – М.: Минздрав России. – 1999.
4. Инженерно-геологическая съемка с гидрогеологическим доизучением и геоэкологическими исследованиями масштаба 1:200 000 листа М-44-ХІХ. 2004 - 2006 гг. / Л.Е. Поляков. – РЦГИ, Астана, 2006.
5. Организация постов наблюдательной сети на территории Семипалатинского испытательного ядерного полигона в 2005 - 2006 гг. / Л.Е. Поляков (соавтор). – Астана: РЦГИ, «Казгеоинформ», 2006.

СЕМЕЙ СЫНАУ ПОЛИГОНЫ АУМАҒЫНДА ЖЕРАСТЫ СУЛАРДЫҢ РАДИАЦИЯЛЫҚ КҮЙІН БАҒАЛАУ ЕРЕКШЕЛІКТЕРІ

¹⁾Поляков Л.Е., ²⁾Кругликов Д.А.

¹⁾*«Семейгидрогеология» ЖШС, Семей, Қазақстан*

²⁾*«Востказнедра» аумақтық басқарма, Өскемен, Қазақстан*

Ретроспективтік деректер негізінде, жерасты сулардың табиғи және техногендік радионуклидтермен әрекеттестігінде түзілген радиологиялық күйін бағалау қажеттілігі мен кезенділік тізбегі қажет болуы негізделді.

PECULIARITIES OF UNDERGROUND WATER RADIATION CONDITION ASSESSMENT WITHIN SEMIPALATINSK TEST SITE

¹⁾L.Ye. Polyakov, ²⁾D.A. Kruglikov

¹⁾*“Semeyhydrogeology” Ltd., Semey, Kazakhstan*

²⁾*“Vostkaznedra” Branch Department, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan*

Based on historical data, a necessity and stage by stage consistency of underground water radiation condition assessment, generated under natural and man-made radionuclides interaction, are being justified.

УДК 621.791.75.037

МИКРОСТРУКТУРА И МИКРОТВЕРДОСТЬ МНОГОСЛОЙНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТАЛИ 30ХГСА

¹Скаков М.К., ²Увалиев Б.К., ³Чинахов Д.А., ³Градобоев А.В.¹Восточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан²Восточно-Казахстанский государственный университет им. С. Аманжолова, Усть-Каменогорск, Казахстан³Юргинский технологический институт (филиал) Томского политехнического университета, Россия

Исследованы особенности сварки легированных сталей в щелевую разделку. Изучены структура и микротвердость сварных соединений стали 30ХГСА, выполненных способами сварки с импульсной подачей электродной проволоки и длинной дугой. Установлено, что способ сварки длинной дугой не обеспечивает требуемой однородности структуры сварного шва по сравнению со способом сварки с импульсной подачей электродной проволоки и металл шва по сравнению с остальными участками сварного соединения является “мягкой” прослойкой.

ВВЕДЕНИЕ

Сталь 30ХГСА относится к группе термически упрочняемых сталей, чувствительных к скоростям охлаждения. Для предупреждения образования холодных трещин необходимо знать критическую скорость охлаждения. Согласно [1] эта скорость колеблется в интервале 6-12°С/с. Структура и свойства сварных соединений из стали 30ХГСА связаны с технологическим процессом сварки и зависят от выбранного способа и режимов (фронт газовой защиты, скорость сварки, напряжение дуги, сила сварочного тока, температура предварительного подогрева, температура последующей термообработки и т.д.) [2]. Наибольшую опасность представляет зона сплавления наплавленного металла с основным (околошовная зона), где наблюдается повышенная химическая и структурная неоднородность, а также пик концентрации внутренних сварочных напряжений. Еще одним важным фактором является наличие “мягкой” прослойки в сварном соединении, т.к. именно она лимитирует несущую конструктивную прочность изделий.

В связи с вышеизложенным, целью данной работы является изучение изменений микроструктуры и механических свойств многослойных сварных соединений из стали 30ХГСА, полученных 2 различными способами сварки.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Как известно, микротвердость связана со всеми механическими характеристиками, и ее измерение позволяет оценить прочностную однородность сварного соединения [3]. Определяющим является измерение микротвердости не только в металле шва или в зоне термического влияния (ЗТВ), а по всему сечению сварного образца, т.к. перепад значений твердости на 20% свидетельствует о пиковых изменениях твердости и необходимости послесварочной термообработки [4].

Для оценки эксплуатационной надежности сварных соединений из стали 30ХГСА и изучения распределения микротвердости провели экспериментальные исследования с применением следующих способов сварки:

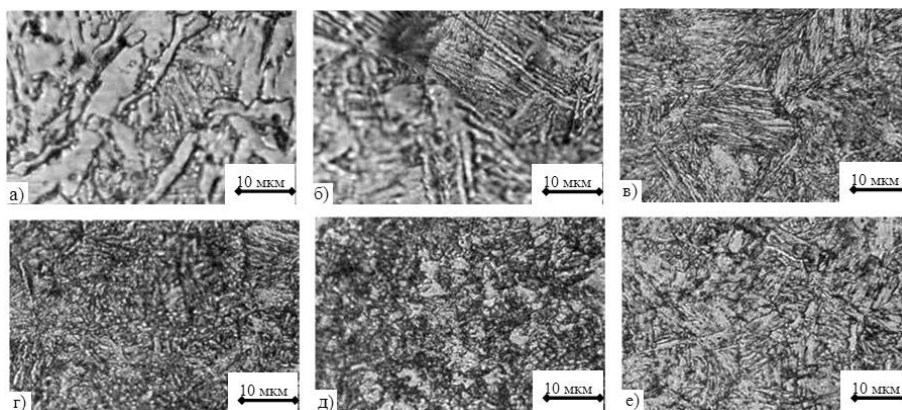
1. импульсная сварка длинной дугой
2. импульсная подача сварочной проволоки.

Исследование микроструктуры проводили на металлографическом микроскопе НЕОРНОТ-21, а измерение микротвердости на приборе ПМТ-3.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

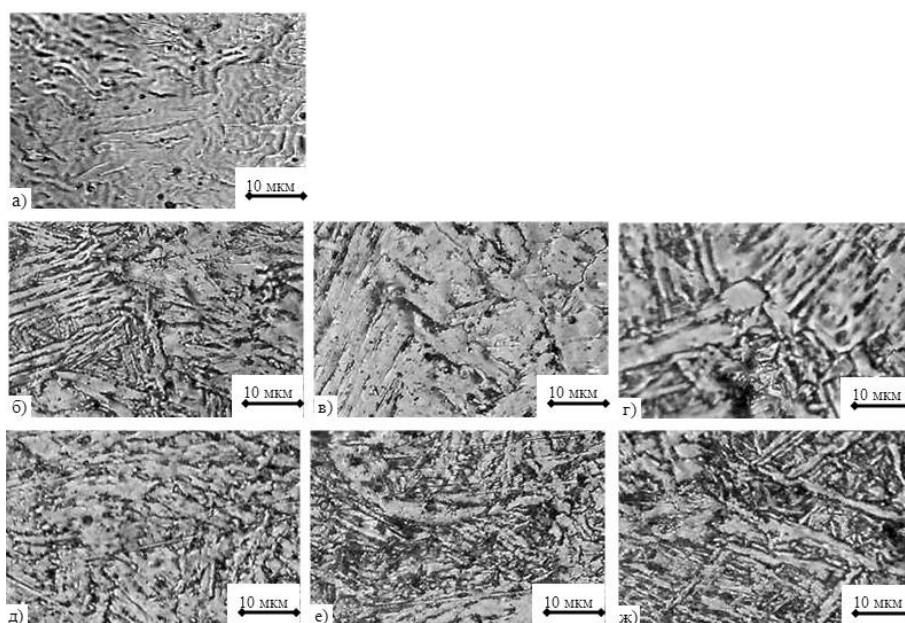
Для металла шва (рисунок 1 а) характерна структура феррита. На рисунке 1 б, представляющем зону сплавления четко видна линия перехода из одной зоны в другую. Левая сторона на снимке более размыта, а правая более четкая. Такой эффект возник из-за разности в высоте сопряженных зон. Все это позволяет утверждать, что данная область (зона сплавления) может считаться опасной с точки зрения зарождения и развития трещин. На рисунке 1в видна структура зоны неполного расплавления. Зерна микроструктуры зоны перегрева (рисунок 1г) не имеют определенной ориентации. Также для данного участка характерен большой разброс по величине зерен. Микроструктура зоны нормализации (рисунок 1б) при данном способе сварки (длинной дугой) отличается от микроструктуры этой же зоны при других способах сварки. В частности, отличие заключается в неравномерности распределения зерен феррита.

На рисунке 2 представлено сложение микроструктуры металла шва по слоям. Видно, что строение слоев носит градиентный характер. В 6-м слое четко видна направленность под различными углами структурных составляющих, а в 5-м слое (рисунок 2в) просматривается дендритность. По остальным слоям можно сказать, что они являются смесью зерен различного размера и с разным коэффициентом неравноосности.



а) металл шва б) зона сплавления в) участок неполного расплавления г) участок перегрева д) зона нормализации е) зона матрицы

Рисунок 1. Микроструктура образца, полученного импульсной сваркой длинной дугой



а) 7-й слой (облицовочный), б) 6-й слой, в) 5-й слой, г) 4-й слой, д) 3-й слой, е) 2-й слой, ж) 1-й слой (корневой)

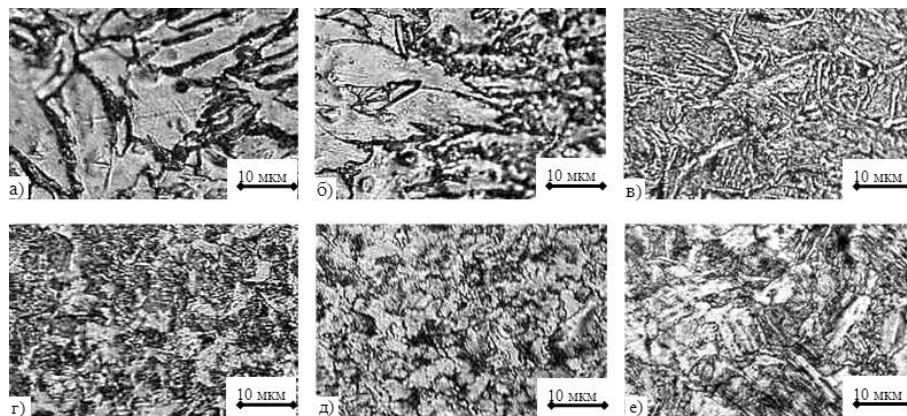
Рисунок 2. Сложение зоны металла шва послойно:

Для данного способа сварки распределение микротвердости по зонам носит следующий характер: металл шва (сварочная проволока Св-08Г2С) является наименее прочным участком сварного соединения по сравнению с ЗТВ (4155 МПа) и матрицей (3214 МПа). Причиной такого высокого значения микротвердости в ЗТВ могут быть закалочные структуры, например мартенсит, образовавшиеся при охлаждении материала.

Послойное измерение микротвердости (рисунок 3) показало, что большая часть слоев за исключением 6-го имеет H_{μ} ниже 2144 МПа. Погрешность измерений составляет 5,12%.

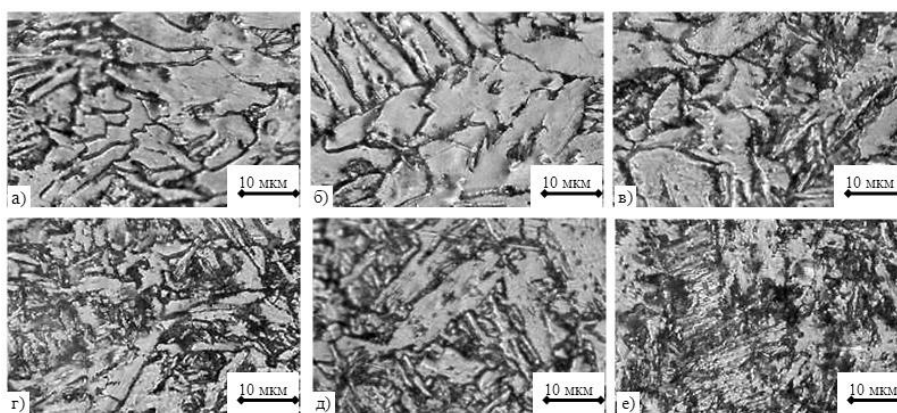


Рисунок 3. Микротвердость металла шва по слоям сварного соединения (сварка длинной дугой $I_{св} (ср) = 150-155$ А, $I_{св} (имп) = 520-530$ А, $U_d = 30$ В, $\nu = 50$ Гц)



а) металл шва б) зона сплавления в) участок неполного расплавления г) участок перегрева д) зона нормализации е) зона матрицы

Рисунок 4. Микроструктура образца, полученного после сварки с импульсной подачей электродной проволоки $I_{св}=180$ А, $U_{св}=27$ В, $\nu = 50$ Гц



а) 6-й слой (облицовочный), б) 5-й слой, в) 4-й слой, г) 3-й слой, д) 2-й слой, е) 1-й слой (корневой) - способ сварки с импульсной подачей электродной проволоки $I_{св}=180$ А, $U_{св}=27$ В, $\nu = 50$ Гц

Рисунок 5. Сложение зоны металла шва послойно

Структура зоны металла шва (рисунок 4а) может быть описана как структура грубой феррито-перлитной смеси. Также надо отметить, что данную зону можно охарактеризовать как зону литого металла электродной проволоки. Зона сплавления (рисунок 4б) является “буфером” между металлом шва и участком неполного расплавления. Структура ЗТВ (рисунок 4в-д) представлена 3 участками с различной микроструктурой. Как видно из рисунка 4, в возможно наличие закалочных структур.

При послойном изучении зоны металла шва (рисунок 5) наблюдается следующая тенденция – облицовочный слой представлен крупными ферритными зернами, на следующем 5-м слое можно наблюдать дендритные структуры. С дальнейшим увеличением глубины структура начинает представляться смесью зерен различного размера и ориентации.

Анализ распределения микротвердости по зонам сварного соединения показывает, что наибольшее значение $\bar{H}_\mu = 3631$ МПа имеет ЗТВ. По сравнению с матрицей “разбег” составляет 800 МПа. Большой разброс значений в зонах образца до 83% не может гарантировать долговечной работы трубы, получен-

ной сваркой с таким режимом. Для выравнивания механических и усталостных свойств в данном случае требуется проводить ТО или подбирать такой режим сварки, который обеспечит более равномерное распределение микротвердости.

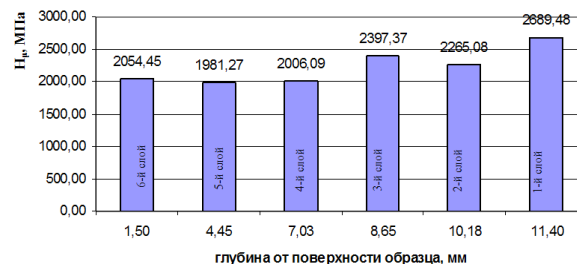


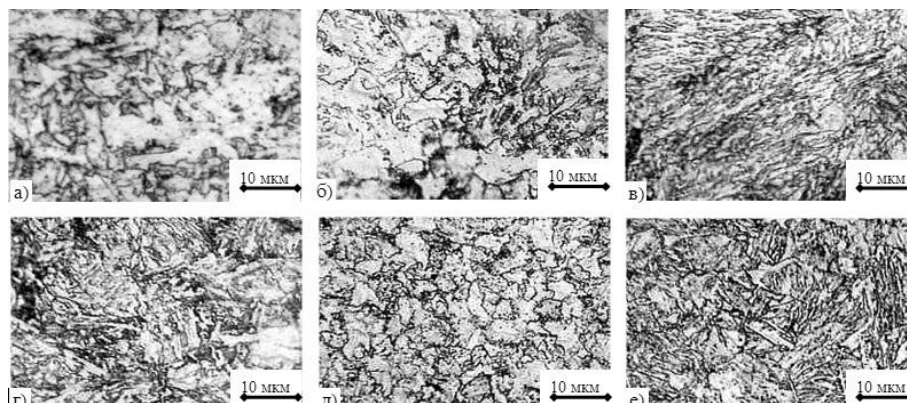
Рисунок 6. Микротвердость металла шва по слоям (способ сварки с импульсной подачей электродной проволоки $I_{св}=180$ А, $U_{св}=27$ В, $\nu = 50$ Гц)

При данном режиме сварки не наблюдается какой-либо конкретной зависимости микротвердости от глубины. Вместе с этим, начиная с глубины 8,65 мм от поверхности образца заметен рост микротвердости. Повышенное значение микротвердости кор-

невого шва объясняется его соседством с более твердой матрицей.

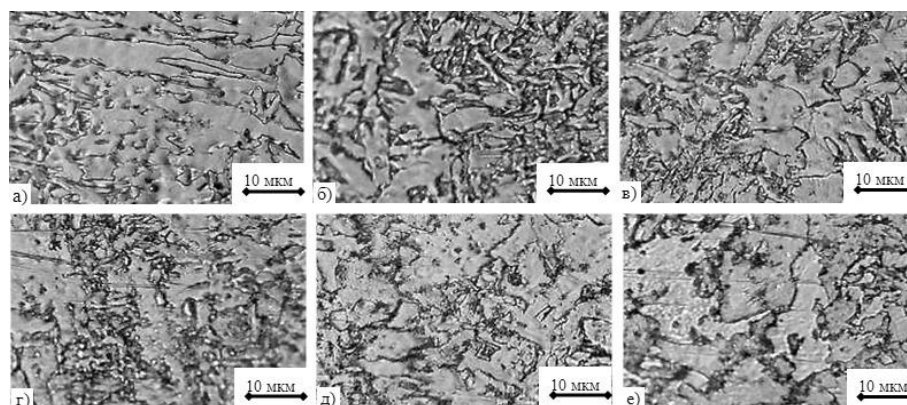
Металл шва (рисунок 7а) представляет собой феррито - перлитную смесь. Данная микроструктура характерна для сварки с применением проволоки Св-08Г2С независимо от метода сварки и материала матрицы. Граница сплавления совмещает в себе две смежные зоны – металл шва и участок неполного расплавления. При этом на рисунке 7б виден плав-

ный переход этих зон. Участок неполного расплавления, как видно на рисунке 7в, вероятнее всего имеет структуру пластинчатого перлита. В зоне перегрева (рисунок 7г) отчетливо видны границы бывших аустенитных зерен. Зона нормализации (рисунок 7д) вполне типична для сварных соединений стали 30ХГСА, а небольшие изменения в микроструктуре матрицы могут быть объяснены различной предысторией образцов.



а) металл шва б) зона сплавления в) участок неполного расплавления г) участок перегрева д) зона нормализации е) зона матрицы

Рисунок 7. Микроструктура образца, полученного после сварки с импульсной подачей электродной проволоки $I = 180 \text{ A}$, $U_{св} = 26 \text{ В}$, $\nu = 66 \text{ Гц}$



а) 6-й слой, б) 5-й слой, в) 4-й слой, г) 3-й слой, д) 2-й слой, е) 1-й слой

Рисунок 8. Сложение зоны металла шва послойно, способ сварки с импульсной подачей электродной проволоки $I = 180 \text{ A}$, $U_{св} = 26 \text{ В}$, $\nu = 66 \text{ Гц}$

Послойное строение металла шва определяет различное строение структуры по глубине. Для облицовочного слоя (рисунок 8а) характерны зерна с большим коэффициентом неравноосности. Слоем ниже (рисунок 8б), структура видоизменяется, и переходит в смесь зерен различного размера и формы. Строение слоев 3 и 4 (рисунок 8 в, г) схожи по структуре с 5-м слоем (рисунок 8б). 2-й слой (рисунок 8д) имеет определенное отличие от остальных – в нем нет четких границ зерен. Видны лишь отдельные границы.

Анализ измерений микротвердости по зонам сварного соединения показал, что разница между соседними участками - металлом шва и ЗТВ составляет порядка 1000 МПа, а между ЗТВ и матрицей – 500 МПа.

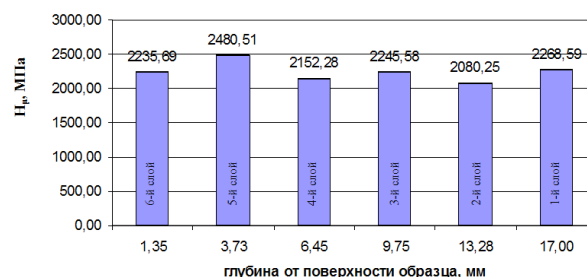


Рисунок 9. Послойное распределение микротвердости в сварном соединении (сварка с импульсной подачей проволоки $I = 180 \text{ A}$, $U_{св} = 26 \text{ В}$, $\nu = 66 \text{ Гц}$)

Микросложение зоны металла шва определяет относительно равномерное послойное распределение микротвердости на уровне $2200 \text{ МПа} \pm 200 \text{ МПа}$.

Выводы

Таким образом, на основании вышеизложенного, для исследованных сварных соединений стали 30ХГСА можно сделать следующие выводы:

- способ сварки длинной дугой не обеспечивает требуемой микроструктуры сварного шва;
- по сравнению с остальными участками сварного соединения, металл шва является более “мягкой” прослойкой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шоршоров М.Х. Фазовые превращения и изменения свойств стали при сварке: Атлас / М.Х. Шоршоров, В.В. Белов. – М.: Наука, 1972. – 220с.
2. Сараев Ю.Н. Регрессионные модели механических свойств многослойных сварных соединений стали 30ХГСА / Ю.Н. Сараев, Д.А. Чинахов // Сварочное производство, 2002. № 5. С. 3 - 5.
3. Харитонов Л.Г. Определение микротвердости / Л.Г. Харитонов - М.: Металлургия, 1967. – 46 с.
4. Сараев Ю.Н. Влияние режима сварки на структуру, распределение твердости и механические свойства сварных соединений паропроводов / Ю.Н. Сараев, И.М. Полетика, А.В. Козлов, Н.В. Кирилова, И.В. Никонова, А.Е. Салько // Сварочное производство, 2002. № 8. С. 3 – 8

30ХГСА БОЛАТЫНЫҢ ПІСІРЕЛГЕН ҚОСПАЛАРЫНЫҢ МИКРОҚАТТЫЛЫҒЫ ЖӘНЕ МИКРОҚҰРЫЛЫМЫ

¹⁾Скаков М.К., ²⁾Увалиев Б.К., ³⁾Чинахов Д.А., ³⁾Градобоев А.В.

¹⁾Д. Серикбаев атындағы Шығыс Қазақстан мемлекеттік техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан

²⁾С. Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан мемлекеттік университеті, Өскемен, Қазақстан

³⁾Томск Политехникалық университетінің Юрга техникалық институты, Юрга, Ресей

Легірілген болаттарды санылаулық бөлшектеп пісіру ерекшеліктері зерттелген. Электродтық сымды импульсті беру және ұзын доғамен пісіру тәсілдері арқылы алынған 30ХГСА болаттың құрылымы мен микроқаттылығы зерттелген. Сымды импульсті беру тәсілімен салыстырғанда ұзын доғамен пісіру әдесі құрылымының қажетті біртектілігін алуға мүмкіндік бермейді. Қосынды бөлігінің металы басқа бөліктерге карағанда “жұмсақ” қабатты болатыны анықталады.

MICROHARDNESS AND MICROSTRUCTURE OF MULTILAYERED WELDS OF STEEL 30CHGSA

¹⁾M.K. Skakov, ²⁾B.K. Uvaliev, ³⁾D.A. Chinakhov, ³⁾A.V. Gradoboev

¹⁾East-Kazakhstan state technical university named after D. Serikbaev, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

²⁾East-Kazakhstan state university named after S. Amanzholov, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

³⁾Yurga technical institute of Tomsk polytechnical university

Peculiarities of alloyed steels in fissural cutting has been researched. Structure and microhardness of welds of steel 30chgsa by welding manners pulsed submission of electrode wire and long edge. Manner of weld by long edge haven't give necessary structure.

УДК 621.039

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ И ЯДЕРНОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЖИДКОМ ТОПЛИВЕ ГОМОГЕННОГО РЕАКТОРА

Потребеников Г.К., Павлова Н.Н., Лотов А.Б.

Национальный ядерный центр Республики Казахстан, Алматы

В работе получены оценочные данные теплофизических и ядернофизических характеристик топливной суспензии частиц диоксида урана в свинцово-висмутовом сплаве с целью их использования в расчетных исследованиях по выбору оптимальных нейтронно-физических параметров топливной суспензии для цилиндрического гомогенного реактора.

В настоящее время традиционные твердотопливные реакторы наряду с простотой конструкции обладают значительными недостатками, основанными на отсутствии возможности манипуляции с топливом. Это приводит к накоплению продуктов деления, нарушению баланса нейтронов за счет размещения теплообменника в самом реакторе, слабой эффективности использования топлива и т.д. В качестве альтернативы твердотопливным реакторам принята концепция гомогенных ядерных реакторов, которая строится на использовании ядерного топлива в жидкой фазе, допускающей в процессе работы реактора постоянную коррекцию состава топливной композиции, что позволяет осуществлять непрерывное управление ядерно-физическими, химическими и теплофизическими процессами, происходящими в топливе.

Знание поведения жидкого топлива в гомогенном реакторе, его размещение в активной зоне – решающий фактор для разработки нового поколения гомогенных реакторов, как наиболее безопасных для ядерной энергетики, а, соответственно, и для перспективы строительства АЭС в различных странах мира и в Казахстане.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗМЕРОВ, РАСПОЛОЖЕНИЯ И КОНФИГУРАЦИИ ГРАФИТОВЫХ ОТРАЖАТЕЛЕЙ НА РАЗМНОЖАЮЩИЕ СВОЙСТВА ТОПЛИВНОЙ СУСПЕНЗИИ И УТЕЧКУ НЕЙТРОНОВ ИЗ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ АКТИВНОЙ ЗОНЫ

При реализации реактора с псевдоожженным слоем топливных частиц [1] исходным для псевдоожжения может быть, например, неподвижный слой частиц с минимальной порозностью. Такой слой может обладать значительным гидравлическим сопротивлением. Это сопротивление снижается при расширении слоя в режиме псевдоожжения [2], существенно улучшаются также условия теплообмена топливных частиц с несущей (дисперсионной) средой, выполняющей в таком реакторе функцию теплоносителя. При расширении псевдоожженного слоя увеличивается утечка нейтронов из активной зоны. При отсутствии эффективного отражателя нейтронов это приводит к уменьшению эффективного коэффициента размножения нейтронов по сравнению с неподвижным слоем топливных частиц [1]. В таких условиях критическое состояние реактора в

режиме псевдоожжения либо не может быть реализовано из-за состояния неподвижного слоя топливных частиц, либо должно быть запрещено по соображениям безопасности из-за возможной седиментации топливных частиц с образованием слоя с порозностью, близкой к минимальной, в случае снижения скорости теплоносителя.

Для реактора небольших размеров с достаточно жестким спектром нейтронов указанные затруднения могут быть преодолены с использованием бокового отражателя нейтронов, расположенного в области расширения псевдоожженного слоя. Увеличение утечки быстрых нейтронов из активной зоны через боковую поверхность в этом случае может компенсироваться возвращением в активную зону нейтронов, существенно замедленных в отражателе.

На рисунке 1 показана конфигурация графитовых отражателей для реактора на топливной суспензии (диоксид урана с обогащением 14% по U-235 в свинцово-висмутовом сплаве). Диаметр активной зоны 164,5 см, высота активной зоны определяется высотой псевдоожженного слоя [1]: минимальная высота $H = 90$ см соответствует слою с минимальной порозностью ($\varepsilon = 0,4$, неподвижный слой), максимальная высота $H = 200$ см соответствует псевдоожженному слою с порозностью $\varepsilon = 0,73$. Толщина бокового и торцовых отражателей – 100 см. Боковой отражатель размещается на высоте 90 см, как это показано на рисунке 1; что соответствует толщине неподвижного слоя частиц.

На рисунке 2 показана расчетная зависимость эффективного коэффициента размножения для такого реактора от высоты псевдоожженного слоя, полученная с использованием кода MCNP 4B [3] в гомогенном приближении при обогащении уранового топлива 0,14. Из рисунка видно, что критическое состояние может быть достигнуто из исходного некритического состояния при расширении псевдоожженного слоя из неподвижного слоя топливных частиц.

При этом эффективный коэффициент размножения возрастает монотонно. Поэтому реактор может выйти в надкритическое состояние при непредусмотренном возрастании скорости несущей среды.

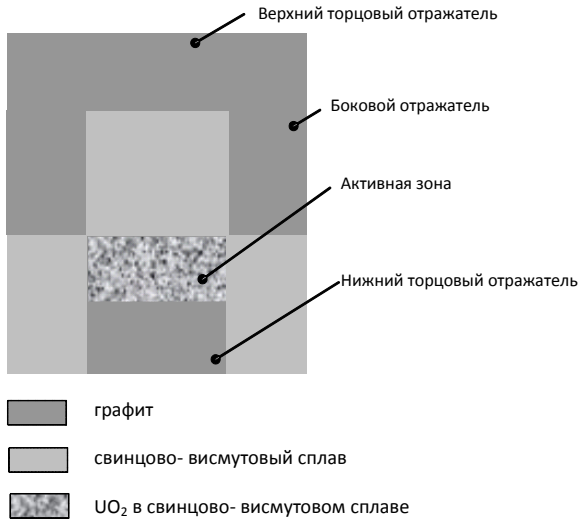


Рисунок 1. Конфигурация графитовых отражателей

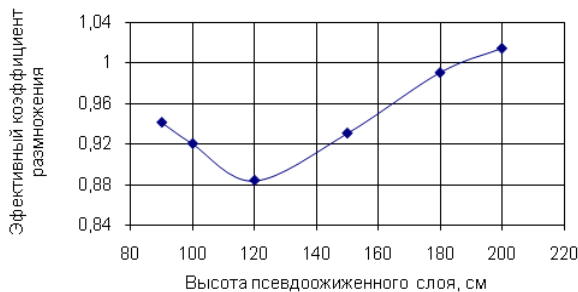


Рисунок 2. Значение эффективного коэффициента размножения в зависимости от высоты псевдооживленного слоя топливных частиц

Предполагалось, что смещение верхнего торцевого графитового отражателя с образованием зазора между ним и боковым отражателем приведет к образованию максимума на кривой зависимости эффективного коэффициента размножения от высоты псевдооживленного слоя. Для такой модели были проведены предварительные расчеты, которые показали, что при достаточно широком зазоре между боковым и верхним торцевым отражателями критичность не достигается; увеличение обогащения топлива в этом случае приводит к критическому состоянию слоя с минимальной порозностью, т.е. неподвижного слоя топливных частиц.

В отсутствие эффективного нижнего торцевого отражателя и при наличии зон абсолютного поглотителя в области боковой поверхности активной зоны можно ожидать снижения значения эффективного коэффициента размножения при минимальной порозности слоя топливных частиц, а также усиления влияния верхнего торцевого отражателя на размножающие свойства расширяющего псевдооживленного слоя.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ ОСКОЛКОВ ДЕЛЕНИЯ В ТОПЛИВНОЙ ЧАСТИЦЕ

При выделении кинетической энергии осколков деления в топливной суспензии часть энергии осколков, образованных в топливной частице, выносятся из частицы осколками, выходящими в несущую (дисперсионную) среду. Если диаметр сферической частицы $2r_0$ значительно превосходит длину (среднего) пробега осколка в материале частицы L , то пространственное распределение энерговыделения в топливной частице равномерное, за исключением приповерхностного шарового слоя толщиной L . Обозначим $E(r, r_0, L)$ энерговыделение в приповерхностном слое топливной частицы, толщиной $(L - r)$, $r_0 - L \leq r \leq r_0$ и $E(r_0, L)$ - энерговыделение в приповерхностном слое толщиной L . Отношение

$$E(r) = \frac{E(r, r_0, L)}{E(r_0, L)} \quad (1)$$

определяет пространственное (по радиусу r) распределение энерговыделения в приповерхностном слое, отличное от равномерного распределения в остальной части топливной частицы.

Рассмотрим осколок, образованный в элементарном объеме на расстоянии c от центра частицы, $r_0 - L \leq c \leq r_0$. Направление движения осколка определяется полярным углом u (отсчитывается от радиуса, проходящего через точку образования осколка (рисунок 3) и азимутальным углом φ , $0 \leq \varphi \leq 2\pi$). Осколок выходит в дисперсионную среду, если

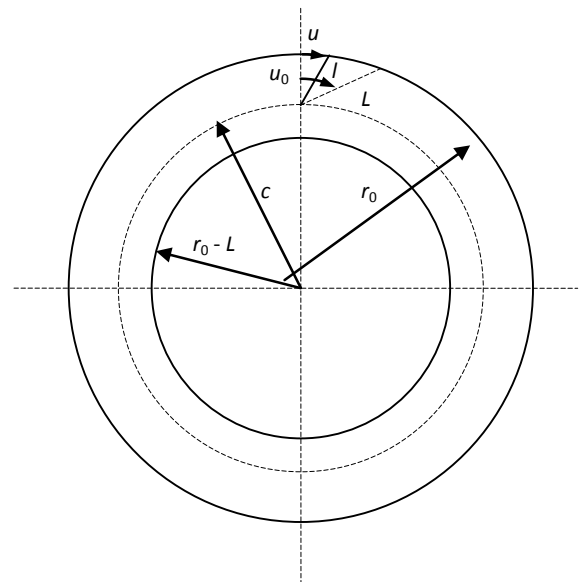


Рисунок 3. К геометрии расчета

$$\theta \leq \theta_0 = \arccos \left(\frac{r_0^2 - \rho^2 - L^2}{2\rho L} \right).$$

При этом он проходит в топливной частице расстояние

$$l = -\rho \cos \theta + \sqrt{2\rho \cos^2 \theta + (r_0^2 - \rho^2)}$$

с выделением энергии в частице [4]

$$E_l = E_0 \left[1 - \left(1 - \frac{l}{L} \right)^2 \right].$$

где E_0 – начальная энергия осколка.

Интегрируя $E l$ по u и φ , получим энерговыделение в приповерхностном слое толщиной $(L-c)$ осколками, образованными в элементарном шаровом слое $4\pi c^2 dc$ [4]

$$4\pi q E_0 \rho^2 d\rho \int_0^{\theta_0} \left[1 - \left(1 - \frac{l}{L} \right)^2 \right] \sin \theta d\theta, \quad (2)$$

где q – плотность делений,

$$\sin \theta d\theta = \left(\frac{r_0^2 - \rho^2 + l^2}{2\rho l^2} \right) dl.$$

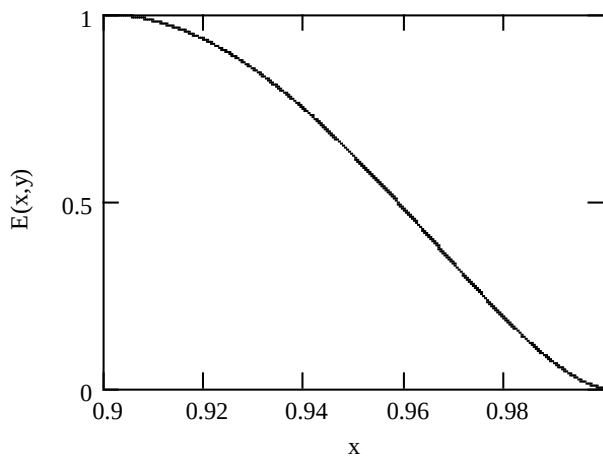
Интегрируя (2) по c , $r \leq c \leq r_0$, $r > r_0 - L$, получим

$$E(r, r_0, l) = 4\pi q E_0 \int_r^{r_0} \rho^2 d\rho \int_0^{\theta_0} \left[1 - \left(1 - \frac{l}{L} \right)^2 \right] \sin \theta d\theta$$

и

$$E(r_0, l) = 4\pi q E_0 \int_{r_0-L}^{r_0} \rho^2 d\rho \int_0^{\theta_0} \left[1 - \left(1 - \frac{l}{L} \right)^2 \right] \sin \theta d\theta.$$

Результаты расчета распределения пространственного энерговыделения в приповерхностном слое $E(r/L)$ показаны на рисунке 4.



По оси абсцисс отложено расстояние в единицах радиуса частицы $x = r/r_0$, $1 - L/r_0 \leq x \leq 1$.

Рисунок 4. Пространственное распределение энерговыделения в приповерхностном слое сферической частицы

РАСЧЕТ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ, ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ И СПЕКТРА НЕЙТРОНОВ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ АКТИВНОЙ ЗОНЕ КРИТИЧЕСКОГО РЕАКТОРА НА ТОПЛИВНОЙ СУСПЕНЗИИ С ГРАФИТОВЫМ ОТРАЖАТЕЛЕМ

Расчет эффективного коэффициента размножения для реактора на топливной суспензии (диоксид урана с обогащением 14% по U-235 в свинцово-висмутовом сплаве) с боковым графитовым отражателем (рисунок 5) показал, что при изменении объемного содержания топлива v (соответственно – при изменении высоты активной зоны H) критичность достигается при $v > 0,3$.

При $v = 0,27$ ($H = 200$ см) реактор выходит в надкритическое состояние с эффективным коэффициентом размножения $K_{эфф} = 1,015$. Поскольку избыточная реактивность такого реактора невелика, то следует ожидать, что ее компенсация при сохранении высоты топливного слоя частиц, не приведет к заметному изменению пространственного распределения и спектра нейтронов в активной зоне. Ниже приводятся результаты расчета пространственного распределения потока нейтронов, спектра нейтронов и энерговыделения в активной зоне реактора с $H = 200$ см и обогащением 14%.

Расчет пространственного распределения потока нейтронов в активной зоне реактора выполнялся с использованием кода MCNP 4B [3] (управляющая карта F4). Для расчета высотного распределения потока объем активной зоны разбивался по высоте системой плоскостей на ячейки одинакового объема, для расчета радиального распределения – системой цилиндрических поверхностей на цилиндрические слои. Диапазон энергий нейтронов деления разбивался на интервалы в соответствии с групповым разбиением работы [5]. Для представления спектрального распределения нейтронов в определенной области активной зоны расчетные данные суммировались по соответствующим пространственным ячейкам; для представления пространственного распределения нейтронов в определенном энергетическом диапазоне расчетные данные суммировались по соответствующим энергетическим интервалам.

На рисунке 6 приведено интегральное по энергии распределение потока нейтронов по высоте активной зоны. Утечка нейтронов через верхний торцовый отражатель существенно меньше, чем через нижний (оба отражателя из свинцово-висмутового сплава), соответственно максимум распределения потока нейтронов смещен в нижнюю часть активной зоны. На рисунке 7 приведены высотные распределения потока нейтронов для различных энергетических интервалов. Как видно из рисунка, поток нейтронов в верхней части активной зоны обусловлен сильно замедлившимися нейтронами, возвращенными в активную зону боковым графитовым отражателем. В нижней части активной зоны боковой отражатель отсутствует, и поток нейтронов обусловлен, в основном, быстрыми нейтронами.

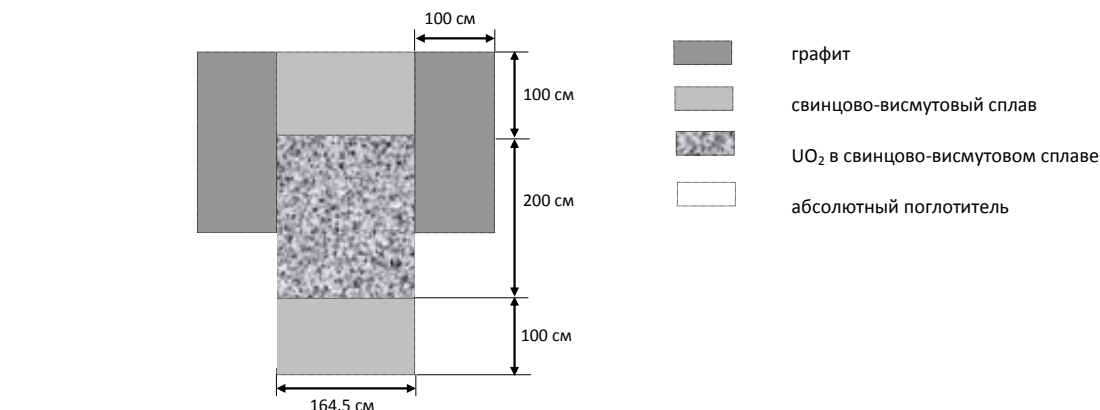


Рисунок 5. АЗ с боковым графитовым отражателем

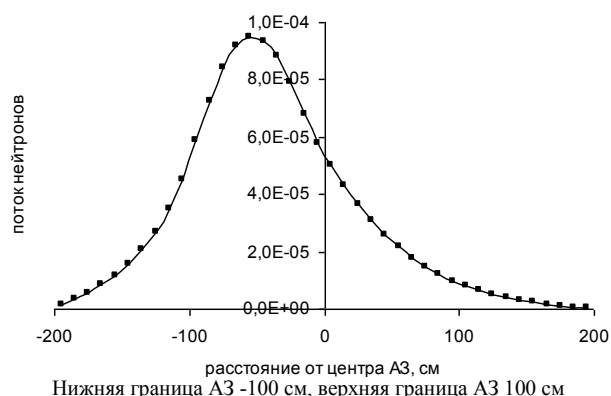


Рисунок 6. Высотное распределение потока нейтронов

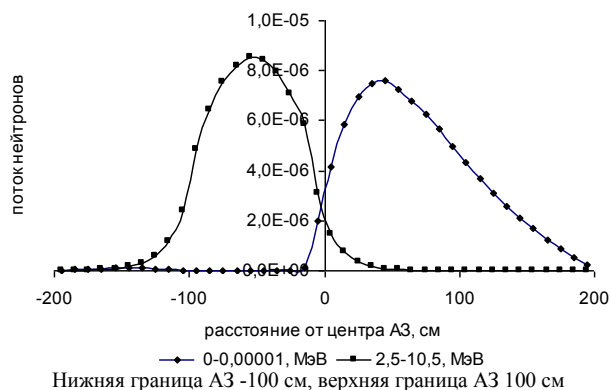


Рисунок 7. Высотное распределение потока нейтронов различных энергий

Таким образом, активная зона реактора по высоте делится на две части, существенно различающиеся по спектральному составу нейтронов, между которыми циркулирует топливная суспензия.

На рисунках 8, 9 приведены радиальное распределение интегрального по энергии потока нейтронов и радиальные распределения быстрых и замедлившихся нейтронов. Утечка нейтронов через боковую поверхность активной зоны обусловлена быстрыми нейтронами из нижней части активной зоны. Поток замедлившихся нейтронов значительно возрастает на периферии активной зоны.

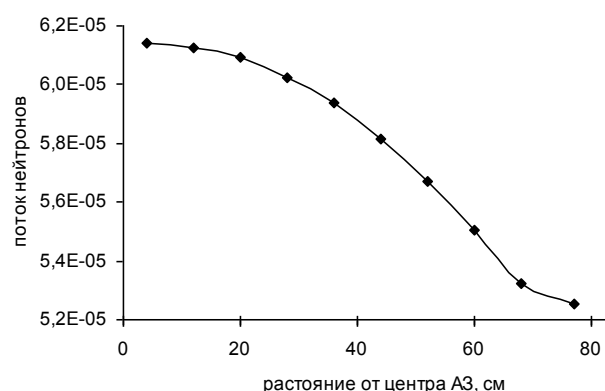


Рисунок 8. Радиальное распределение потока нейтронов

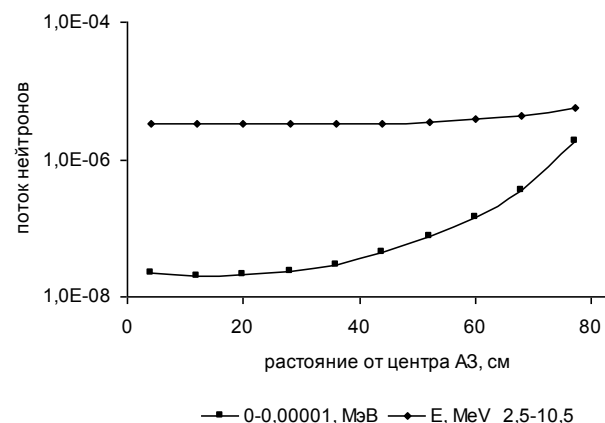


Рисунок 9. Радиальное распределение потока нейтронов различных энергий

Сопоставление данных, приведенных на рисунках 7 и 9 показывает, что это нейтроны, возвращаемые отражателем в верхней части активной зоны.

На рисунках 10, 11 приведены результаты расчета спектрального распределения нейтронов в различных частях активной зоны. Маркеры на кривых соответствуют верхним границам энергетических интервалов. Данные по спектральному составу нейтронов в верхней и нижней части активной зоны подтверждают вывод, сделанный по результатам анализа высотного распределения потока нейтронов.

Спектры нейтронов в центре активной зоны (цилиндрическая ячейка 0 - 8 см) и на ее периферии (цилиндрический слой 64 - 72 см) существенно различаются по относительной доле замедлившихся нейтронов. Спектры имеют локальный максимум в энергетическом интервале 0 - 0,1 эВ, что указывает на заметное присутствие тепловых нейтронов в активной зоне.

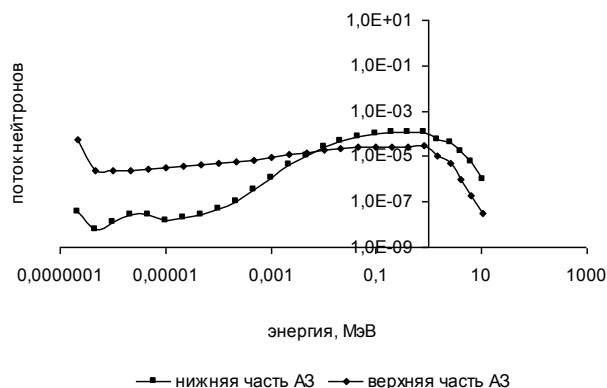


Рисунок 10. Спектр нейтронов в верхней и нижней частях АЗ

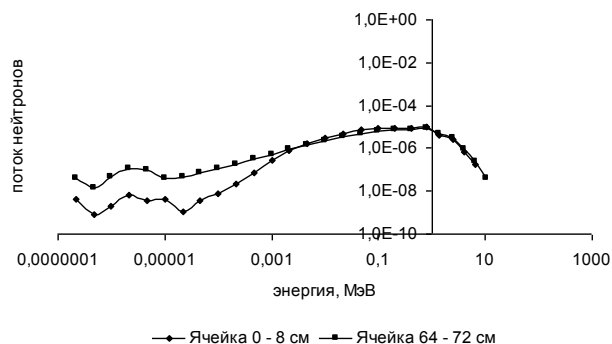


Рисунок 11. Спектр нейтронов в центре и на периферии АЗ

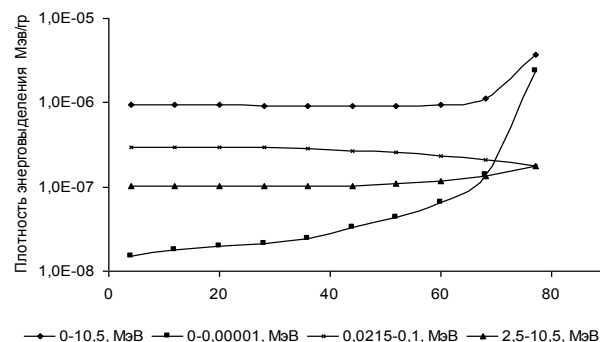


Рисунок 12. Радиальное распределение энерговыделения, обусловленного нейтронами различных энергий

На рисунке 12 приведены результаты расчета радиального распределения энерговыделения в активной зоне (управляющая карта F6 кода MCNP 4B), обусловленного нейтронами различных энергий. Как видно из рисунка, энерговыделение существенно неоднородно по радиусу активной зоны. Максимальное энерговыделение на периферии активной зоны обусловлено нейтронами тепловых энергий. Следует отметить, что в реакторе с псевдоожигенным слоем топливной суспензии неравномерность энерговыделения не должна порождать проблемы, характерные для реакторов с неподвижным топливом: перенос тепла в пределах топливного слоя обеспечивается интенсивным перемешиванием топливных частиц.

Полученные результаты по исследованию поведения топливной порошковой суспензии в жидкометаллических сплавах рекомендуется применять при разработке гомогенного реактора с жидкометаллическим топливом, в процессе работы которого постоянно корректируется состав топливной композиции, что позволяет осуществлять непрерывное управление ядерно-физическими, химическими и теплофизическими процессами, происходящими в топливе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Моделирование оптимальных нейтронно-физических параметров топливной суспензии для цилиндрического гомогенного реактора на быстрых нейтронах / Г.К. Потребеников [и др.] // - Вестник НЯЦ РК. – 2006. Вып.4. – С. 7-15.
2. Касаткин, А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А.Г.Касаткин – М.: Химия, 1971. – 784 с.
3. MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4B, Manual LA-12625-M, 1997.
4. Физические основы использования кинетической энергии осколков деления в радиационной химии / В.Т.Казарян [и др.] - Минск: Наука и техника, 1972. - 248 с.
5. Групповые константы для расчета ядерных реакторов /Л.П.Абагян [и др.] - М.: Атомиздат, 1964. - 140 с.

ГОМОГЕНДІ РЕАКТОРДЫҢ СУЙЫҚ ОТЫНЫНДАҒЫ ЖЫЛУФИЗИКАЛЫҚ ЖӘНЕ ЯДРОФИЗИКАЛЫҚ ПРОЦЕССТЕРДІ ҮЛГІЛЕУ

Потребеников Г.К., Павлова Н.Н., Лотов А.Б.

Қазақстан Республикасының Ұлттық ядролық орталығы, Алматы

Цилиндрлі гомогенді реакторға арналған отындық суспензияның оңтайлы нейтронды-физикалық параметрлерін таңдау бойынша аларды есептік зерттеулерде пайдалану мақсатымен, қорғасын-висмутты

қорытпада уран диоксиді бөлшектерінің отындық суспензиясының жылуфизикалық және ядрофизикалық сипаттамасының бағалау деректері алынған.

**MODELLING OF THERMALPHYSICAL AND NUCLEARPHYSICAL
PROCESSES IN LIQUID FUEL OF A HOMOGENEOUS REACTOR**

G.K. Potrebenikov, N.N. Pavlova, A.B. Lotov

National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Almaty

The evaluation of thermalphysical and nuclearphysical characteristics of fuel suspension of particles of dioxide of uranium in lead-bismuthic alloy are obtained with the purpose of their use in design studies at the choice of optimal neutron-physical parameters of fuel suspension for a cylindrical homogeneous reactor.

УДК 621.039.531: 621.78: 620.187.3

ПЭМ-ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ МИКРОСТРУКТУРЫ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ

Цай К.В., Турубарова Л.Г., Щербинина Н.В.

Институт ядерной физики НЯЦ РК, Алматы, Казахстан

В работе представлен ряд результатов ПЭМ-исследований тонкой структуры аустенитных сталей 12X18H10T, 12X18H9T после облучения нейтронами до высоких флюенсов. Исследовалось влияние пост-радиационных часовых изохронных отжигов в интервале температур 200-1050°C на изменение микроструктуры и величины микротвердости облученных сталей.

ВВЕДЕНИЕ

Просвечивающая электронная микроскопия как метод микроструктурного исследования играет важную роль в характеристике фазово-структурного состояния металлических материалов после радиационного и термического воздействия. В связи с декомиссией реактора на быстрых нейтронах БН-350, а также плановой заменой деталей исследовательского реактора ВВР-К появилась возможность наряду с модельными материалами исследовать элементы активных зон: чехлы тепловыделяющих сборок, фрагменты стержня автоматического регулирования, которые находились в реальных условиях облучения в течение длительного времени и были изготовлены из нержавеющей сталей аустенитного класса. Исследованию особенностей изменения микроструктуры аустенитных сталей в результате нейтронного облучения посвящена данная работа.

Проведенные ПЭМ исследования реакторных материалов показали, что тип дефектной микроструктуры, образующейся под облучением, сильно зависит от условий облучения. Оцененные по данным ПЭМ величины плотностей радиационных дефектов (кластеров, петель Франка, пор, вторичных выделений) и средних размеров дефектов позволили оценить радиационное упрочнение реакторных материалов и связать параметры дефектной структуры с изменением механических свойств материала.

Кроме характеристики микроструктуры сталей после облучения и хранения, проводились работы по термообработке облученных сталей и изучению влияния пост-радиационных отжигов на изменение микроструктуры дефектов. Данные исследования важны не только в свете решения проблемы восстановления исходных свойств материала после облучения посредством термообработки, но и как источник дополнительной информации о состоянии облученного материала.

ПЭМ-ИССЛЕДОВАНИЯ РЕАКТОРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

При характеристике условий облучения в различных реакторных установках (исследовательские реакторы, быстрые реакторы, легководные реакторы LWR и др.), помимо распределения нейтронного по-

тока по энергиям выделяют три параметра, в основном, определяющих характер радиационного повреждения в металлах: повреждающая доза, скорость набора дозы и температура облучения. Условия облучения в активной зоне исследовательского реактора ВВР-К более близки к легководным реакторам по энергетическому спектру нейтронов (тепловые нейтроны и нейтроны с энергиями $>1\text{МэВ}$). Существенные отличия заключаются в сравнительно низкой температуре облучения (80°C) и крайне низкой скорости набора повреждающей дозы ($<10^{-9}\text{сна/с}$). В LWR-реакторах, согласно [1-2], температуры облучения ниже 300°C (270÷290°C), что близко к условиям эксплуатации материала нижней части бланкетных сборок быстрого реактора БН-350 (280°C).

Условия длительного облучения определяют тип радиационной деградации свойств материала, в том числе доминирующую структуру радиационных дефектов. Первопричиной изменения свойств облучаемого материала служат каскадные явления смещения атомов решетки, производимых нейтронами высоких энергий, с образованием междоузельных атомов и вакансий, а также их кластеров. Миграция и взаимодействие точечных дефектов и кластеров приводят к формированию наблюдаемой микроструктуры и, связанному с ней изменению физико-механических свойств.

В рамках работ по характеристике состояния отработанных элементов активных зон реакторов в последние годы были исследованы материалы тепловыделяющих сборок Н-214(1), СС-19 (аустенитная сталь 12X18H10T) реактора БН-350 и стержня автоматического регулирования (АР) реактора ВВР-К (аустенитная сталь 12X18H9T). Микроструктурные данные были получены с помощью просвечивающего электронного микроскопа JEM-100CX при ускоряющем напряжении 100кВ. Основные типы микроструктур радиационных дефектов, наблюдаемые в сталях 12X18H10T и 12X18H9T, представлены на рисунке 1. В таблице 1 приведены сводные данные по условиям облучения исследуемых материалов и численным характеристикам дефектной структуры.

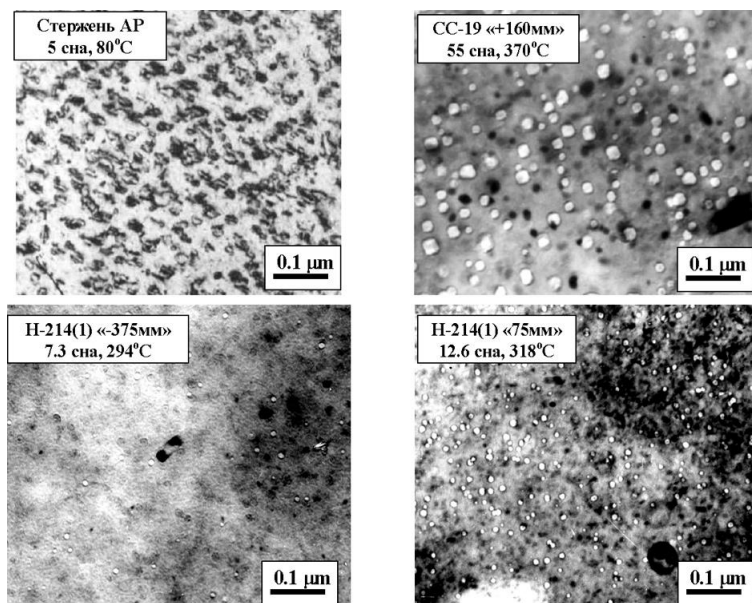


Рисунок 1. Микроструктура облученной нейтронами стали 12X18H10T из сборок Н-214(1) с отметок «-375мм» и «+75мм» и сборки СС-19 с отметки «+160мм» в сравнении с микроструктурой стержня АР

Таблица 1. Сводные данные по дефектной структуре материала стержня АР реактора ВВР-К и чехлов тепловыделяющих сборок Н-214(1), СС-19 реактора БН-350

Материал	Доза, сна	10^{-8} сна/с	T, °C	H _и , кг/мм ²	Тип дефектов	Плотность, см ⁻³	Размеры, нм	Средний размер, нм
12X18H9T	5.0	~0.1	80	391	Петли Франка	6.6×10^{15}	5 ÷ 60	23
					Черные пятна	1.4×10^{17}	1 ÷ 4	2.7
12X18H10T Н-214(1) «-375мм»	7.3	1.36	294	412	Петли Франка	2.7×10^{15}	15 ÷ 75	17.6
					Ваканс.поры	0.5×10^{15}	10 ÷ 20	11.6
12X18H10T Н-214(1) «75мм»	12.6	2.34	318	380	Петли Франка	8.7×10^{15}	5 ÷ 60	12.8
					Ваканс.поры	2.9×10^{15}	8 ÷ 18	9.0
12X18H10T СС-19 «+160мм»	55.4	113	370	384	Дислокации	Есть		
					Ваканс.поры	2.8×10^{15}	10 ÷ 45	22.8
					Дисл. петли	Есть		
					G-фаза	2.4×10^{15}	10 ÷ 35	21.3

Известно [3], что микроструктура аустенитной стали, облученной при температуре ниже 300°C существенно отличается от стали, облученной выше данной температуры. Главное различие - в полном отсутствии вакансионных пор и наличии малых кластеров дефектов, дислокационных петель, а в ряде случаев - мелкодисперсных выделений. Заметим, что в случае, когда условия облучения не являются, в среднем, характерными для используемого типа реактора могут иметь место отдельные исключения. ПЭМ- исследование, проведенное нами для бланкетных сборок реактора БН-350, показало, что низкая скорость набора повреждающей дозы (0.12×10^{-8} сна/с при дозе 0.65сна, Н-214(1) отметка «-900мм») в стали 12X18H10T может привести к некоторому снижению температурного порога вакансионного порообразования до 281°C [4]. Аналогичный результат был получен для стали 08X16H11M3, материала бланкетной сборки Н-214(2) реактора БН-

350, на отметке «-900мм» (при скорости набора дозы 0.39×10^{-8} сна/с и дозе 1.27сна) [5].

Температуре 300°C применительно к нержавеющей стали придается статус переходной температуры, выше которой вакансионные кластеры становятся термически неустойчивыми и начинают распадаться, испуская одиночные вакансии в решетку. При этом визуально микроструктура описывается как смесь дефектов типа «black spots» (черные пятна) и петель Франка с вектором Бюргерса $a/3 \langle 111 \rangle$. Согласно обзору [6] при T<300°C концентрация «черных пятен» составляет $\sim 2 \div 4 \times 10^{17}$ см⁻³, а содержание петель Франка несколько ниже. Размеры «черных пятен» менее 5 нм, размеры петель Франка могут достигать 40нм. При температуре облучения выше 300°C содержание «черных пятен» уменьшается, а петли Франка и линейные дислокации становятся преобладающими дефектами. Размеры петель Франка при этом возрастают значительно вплоть до 200нм (при 360°C) и вы-

ше в зависимости от температуры облучения. Относительно природы «черных пятен» в ряде последних исследований (например, [3]) с помощью «telrod»-методики темнопольной съемки в слабых пучках было показано, что, скорее всего, они представляют собой мелкие петли Франка (со средним размером $\sim 1\div 4$ нм), которые могут быть как междоузельной, так и вакансионной природы. Микроструктура дефектов при $T > 400^\circ\text{C}$ состоит из гелиевых и вакансионных пор, а также радиационно индуцированных выделений. В работах [1-3] на примере сталей типа 304SS, 316SS, облученных нейтронами при 275°C в диапазоне повреждающих доз $0.6\div 13.3$ сна, было продемонстрировано, что содержание петель Франка достигает насыщения (на величине кратной 10^{17}см^{-3}) уже при малых дозах (до 1 сна). При этом средний размер, растущий с увеличением дозы до 1 сна, при более высоких дозах испытывал насыщение на величине ~ 8 нм.

Указанные литературные данные хорошо согласуются с результатами ПЭМ, полученными в наших исследованиях на материале стержня АР реактора ВВР-К (таблица 1 и рисунок 1-2), хотя оцененный уровень дефектов типа «черных пятен» и петель Франка меньше примерно на порядок, чем в работах [3, 6]. По-видимому, это связано с низкой температурой облучения, при которой большая часть малоподвижных вакансий остается в виде точечных дефектов (или простейших комплексов) в материале. Наблюдаемое в [1-3] насыщение роста концентрации и размеров в случае междоузельных петель объясняется тем, что при температурах, близких к 300°C , петли внедрения становятся доминирующим стоком точечных дефектов, к которым с одинаковой скоростью притягиваются и аннигилируют вакансии и междоузельные атомы. В результате изменение размеров существующих петель приостанавливается. В нашем случае, при температуре облучения $< 80^\circ\text{C}$ подвижность свободных вакансий и вакансионных комплексов в материале все еще сильно уступает подвижности несвязанных междоузельных атомов, что объясняет наблюдаемый в эксперименте рост среднего размера дислокационных петель.

Уровень радиационного повреждения материала в быстрых реакторах при более высоких скоростях набора дозы достигает от единиц (на периферии) до нескольких десятков сна, в зависимости от близости к центру активной зоны. При этом температуры облучения существенно выше 300°C ($350\div 600^\circ\text{C}$), что не может не отразиться существенно на картину дефектной структуры. Микроструктура стали, облученной в условиях быстрого реактора, может характеризоваться наличием высокой плотности вакансионных пор, наряду с выделениями вторичной фазы, отдельными дислокационными петлями и сеткой линейных дислокаций. В частности, для стали 12X18H10T при высоких повреждающих дозах наблюдается наличие вакансионных пор и выделения

вторичной G-фазы на порах и в матрице (сборка СС-19). При этом анализ ПЭМ-исследований облученных материалов показывает, что средние размеры дефектов (пор, петель, выделений) определяются, главным образом, температурой облучения, тогда как концентрации дефектов, прежде всего, зависят от величины повреждающей дозы.

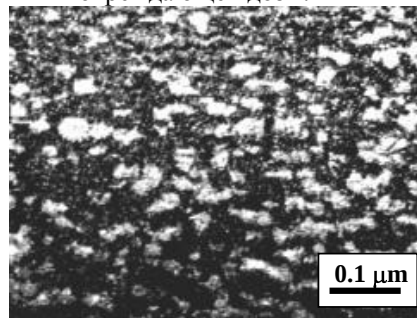


Рисунок 2. ПЭМ - изображение в темном поле в рефлексии 002 микроструктуры облученной нейтронами стали 12X18H9T (нижний конец стержня АР)

ВЛИЯНИЕ ПОСТ-РАДИАЦИОННОГО ОТЖИГА НА ИЗМЕНЕНИЕ ДЕФЕКТНОЙ МИКРОСТРУКТУРЫ

Различия параметров облучения в разных реакторных установках приводят к формированию своего типа дефектной структуры в облученном материале и специфическим радиационно-индуцированным изменениям его свойств. То же самое можно сказать о поведении облученного материала после проведения пост-радиационных изохронных отжигов в широком интервале температур. Для сравнения были рассмотрены примеры изменения микроструктуры и микротвердости стали 12X18H10T – материала сборки Н-214(1) (реактор БН-350) и стали 12X18H9T - материала стержня АР (реактор ВВР-К) после проведения пост-радиационных часовых изохронных отжигов (рисунок 3 и таблица 2).

Уменьшение радиационного прироста микротвердости с повышением температуры изохронного отжига представлено на рисунке 4. Крайняя левая точка на каждой кривой отжига отвечает разным температурам облучения. В случае стержня-АР измеряли микротвердость образцов, вырезанных из нижнего конца стержня вблизи оси стержня и вблизи боковой поверхности. Как видно из графика на рисунке 4, H_n образцов облученной стали до отжига близки по величине независимо от условий облучения и типа наблюдаемой микроструктуры радиационных дефектов (рисунок 1). Однако после проведения пост-радиационной термообработки в течение 1 часа характер отжига радиационного упрочнения существенно отличен для стали сборок Н-214(1), СС-19 и стержня-АР.

Одной из характерных особенностей отжиговой эволюции радиационных нарушений в аустенитной стали 12X18H9T, облученной в условиях ВВР-К, является сохранение дислокационной петлевой структуры при повышенных температурах изохронного

отжига (вплоть до 850°C) за счет закрепления дислокационных дефектов атомами гелия и атмосферами примесных атомов, образующих метастабильные мелкодисперсные выделения вторичных карбидов. Для случая сборки Н-214(1) характерны следующие особенности отжига: при незначительных сна и небольших размерах вакансионных пор, отжиг пор и укрупнение размера оставшихся происходит достаточно быстро, уже при 500°C в микроструктуре наблюдаются лишь отдельные поры, тогда как дислокационная структура меняется мало; в окрестности температуры изохронного отжига 650°C имеют место интенсивные процессы сегрегации примесных атомов, приводящие к образованию множественных вторичных нитридов и карбидов титана. Начиная с температуры 800°C и выше, отжиг стальных образцов, вырезанных на разных отметках «-375» и «+75мм» по высоте сборки Н-214(1), т.е. облучавшихся в разных условиях, приводит к состоянию,

характеризующемуся одним значением микротвердости $\sim 155 \text{ кг/мм}^2$. При этом микроструктура отожженной стали на обеих отметках близка к аустенизированному состоянию и содержит вторичные выделения типа карбидов и нитридов титана, а также отдельные гелиевые поры (рисунок 3).

После отжига частицы вторичных фаз не когерентны с матрицей и, по-видимому, слабо влияют на ее упрочнение. Тем не менее, они «уводят» из матрицы атомы Ti, вследствие чего матрица дополнительно «размягчается». В случае сборки СС-19 с большими значениями повреждающей дозы эффективность отжига вакансионных пор с ростом температуры относительно невелика, что также подтверждается данными работы [7]. В частности даже при 850°C в материале наблюдается тот же тип дефектной микроструктуры, что и до проведения отжига с той лишь разницей, что концентрация дефектов уменьшается, а их средние размеры растут.

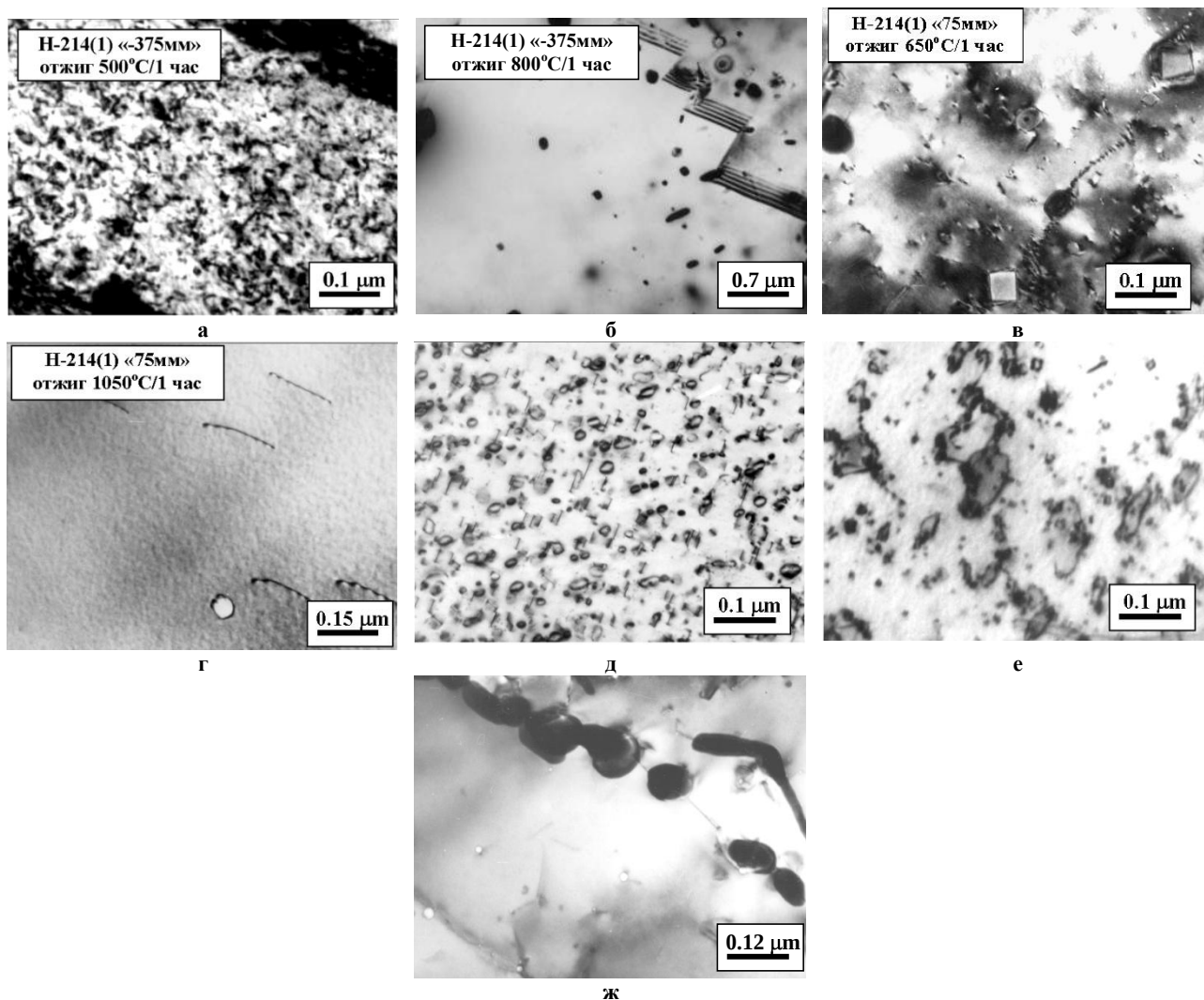


Рисунок 3. Микроструктура облученной стали после часового изохронного отжига: сборка Н-214(1) «-375мм», отжиг (1 час) при 500°C (а) и 800°C (б); сборка Н-214(1) «75мм», отжиг (1 час) при 650°C (в), 1050°C (г); стержень-АР, отжиг (1 час) при 550°C (д), 850 (е), 1050°C (ж)

Таблица 2. Микротвердость и особенности дефектной структуры сталей 12X18H10T, 12X18H9T сборок реактора БН-350 и стержня АР реактора ВВР-К после облучения и часовых изохронных отжигов

Материал	Состояние	H _ц , кг/мм ²	Особенности микроструктуры
12X18H9T Стержень АР	Облучение при 80°C	391	Петли Франка, «черные пятна»
	Отжиг 550°C/1 час	260	Дислокационные петли, «черные пятна»
	Отжиг 850°C/1 час	244	Вторичные выделения, дисл. петли, дислокации
	Отжиг 1050°C/1 час	223	Вторичные выделения, гелиевые поры
12X18H10T Н-214(1) «-375мм»	Облучение при 294°C	412	Петли Франка, вакансионные поры
	Отжиг 500°C/1 час	370	Дисл. петли, единичные выросшие ваканс. поры
	Отжиг 800°C/1 час	158	Полный отжиг петель и пор, выделения
12X18H10T Н-214(1) «+75мм»	Облучение при 317°C	380	Петли Франка, вакансионные поры
	Отжиг 650°C/1 час	340	Множественные выделения, фрагменты дислокационной сетки
	Отжиг 1050°C/1 час	160	Аустенизированная матрица, единичные гелиевые поры
12X18H10T СС-19 «+160мм»	Облучение при 370°C	384	Вакансионные поры, выделения G-фазы,
	Отжиг 650°C/1 час	306	отдельные петли Франка и дислокационная сетка
	Отжиг 850°C/1 час	220	

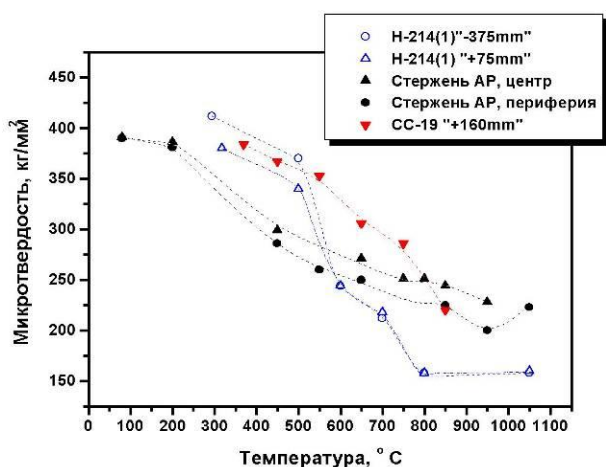


Рисунок 4. Изменение микротвердости сталей 12X18H9T (материал стержня АР) и 12X18H10T (материал сборки Н-214(1) и СС-19), облученных в реакторах ВВР-К и БН-350 и подвергнутых часовому пост-радиационному отжигу

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод ПЭМ показал свою наибольшую эффективность применительно к облученным нейтронами до высоких флюенсов реакторным материалам. Во-пер-

вых, он дает наиболее подробную качественную и количественную информацию о внутреннем строении облученного материала, во-вторых, оперирует с относительно небольшим по размеру его количеством.

Полученные нами результаты исследования микроструктуры облученных сталей реакторов БН-350 и ВВР-К хорошо согласуются с известными литературными данными. В ходе исследования было показано, что:

1. тип доминирующей микроструктуры радиационных дефектов, образующейся при длительном радиационном воздействии, определяется, прежде всего, условиями облучения, наиболее важными из которых являются суммарная доза радиационного повреждения, скорость набора дозы и температура облучения;
2. предварительная история облучения, по-видимому, оказывает определяющее влияние на характер изменения микроструктуры облученной нейтронами стали при проведении пост-радиационных часовых изохронных отжигов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bruemmer, S.M. New Issues Concerning Radiation-Induced Material Changes and Irradiation-Assisted Stress Corrosion Cracking in Light-Water Reactors / S.M. Bruemmer // The 10-th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors.- 2002.- CD.
2. Simonen, E.P. Light-Water Reactor Microstructural Characterisation from Post-Irradiation Annealing Behavior / E.P.Simonen, D.J.Edwards, S.M.Bruemmer, et.al. // The 10-th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors.- 2002.- CD.
3. Edwards, D.J. Evolution of fine-scale defects in stainless steels neutron-irradiated at 275°C / D.J. Edwards, E.P.Simonen, S.M.Bruemmer // Journal of Nucl. Mater.- 317.- 2003.- P.13-31.
4. Maksimkin, O.P. Void Swelling of AISI 321 analog stainless steel irradiated at low dpa rates in the BN-350 reactor / O.P. Maksimkin, K.B. Tsai, L.G. Turubarova, T.A. Doronina, F.A. Garner // Journal of Nucl. Mater. - 2007.- V.367-370. P. 990-994.
5. Maksimkin, O.P. Characterization of 08Cr16Ni11Mo3 stainless steel irradiated in the BN-350 reactor / O.P.Maksimkin, K.V.Tsai, L.G.Turubarova, T.Doronina, F.Garner // Journal of Nucl. Mater.- 2004.- V.329-333.-P.625-629.
6. Zinkle, S.J. Dose dependence of the microstructural evolution in neutron-irradiated austenitic stainless steels / S.J.Zinkle, P.J.Maziasz, R.E. Stoller // Journal of Nucl. Mater.- 1993.- V. 206.- P.266-286.
7. Porter, D.L. Response to Annealing and Reirradiation of AISI 304L Stainless Steel Following Initial High-Dose Neutron Irradiation in EBR-II / D.L.Porter, G.L.McVay, L.C.Walters // Effects of Radiation on Metals Proceeding of the 10-th International ASTM Symposium, Savannah, ga. -3-5 June 1980.- P.500-511.

**АУСТЕНИТТІ БОЛАТТАР МИКРОҚҰРЫЛЫМЫНЫҢ
РАДИАЦИЯЛЫҚ-ЖЫЛУЛЫҚ ӨЗГЕРІСТЕРІН ПЭМ – ЗЕРТТЕУ**

Цай К.В., Турубарова Л.Г., Щербинина Н.В.

ҚР ҰЯО Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан

Бұл жұмыста нейтрондармен жоғары флюенстерге дейін сәулелендіргеннен кейін 12X18H10T, 12X18H9T аустенитті болаттардың нәзік құрылымының ПЭМ-зерттеулері нәтижелерінің бірсыпырасы келтірілген. Сәулелендірілген болаттардың микроқұрылымы мен микроқаттылығы шамасының өзгерістеріне 200-1050 °C температуралар аралығында радиациядан кейінгі бір сағат бойы изохрондық күйдірудің ықпалына зерттеу жүргізілді.

**TEM-INVESTIGATION OF RADIATION-THERMAL CHANGES
IN MICROSTRUCTURE OF AUSTENITIC STEELS**

K.V. Tsai, L.G. Turubarova, N.V. Sherbinina

Institute of Nuclear Physics NNC RK, Almaty, Kazakhstan

The paper presents some results of TEM-investigation of fine structure of 12Cr18-Ni10-Ti, 12Cr18-Ni9-Ti austenitic steels after irradiation by neutrons up to high fluences. The influence of post-irradiation 1-hour isochronal annealing in the range 200-1050°C on irradiated steel microstructure and microhardness changes was studied.

УДК 621.039.531: 621.78: 620.187.3

**СТРУКТУРНОЕ СОСТОЯНИЕ И РАДИАЦИОННОЕ УПРОЧНЕНИЕ
СТАЛИ 08X16H11M3 - МАТЕРИАЛА ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕЙ СБОРКИ РЕАКТОРА БН-350**

Цай К.В., Максимкин О.П., Турубарова Л.Г., Сильнягина Н.С., Щербинина Н.В.

Институт ядерной физики НЯЦ РК, Алматы, Казахстан

Приведены результаты материаловедческих исследований стали 08X16H11M3, материала чехла отработавшей тепловыделяющей сборки Н-214(2) реактора БН-350. Сборка эксплуатировалась до выгорания ~10% при температуре 280-450°C. Анализируются результаты радиационного изменения микроструктуры (ПЭМ, металлография) и прочностных свойств (микротвердость) нержавеющей стали, облученной до повреждающих доз 0.3-0.6 сна.

ВВЕДЕНИЕ

В результате вывода из эксплуатации реактора на быстрых нейтронах БН-350, возникла необходимость характеристики материала отработанных сборок с целью прогнозирования их возможного поведения в условиях перемещения и хранения. В этой связи у исследователей появилась возможность непосредственного изучения воздействия долговременного нейтронного облучения на структуру и свойства реакторных материалов. Работы подобного направления сейчас проводятся достаточно активно. При этом, несмотря на то, что первопричина структурных исследований отработанных деталей реакторов связана, главным образом, с проблемами безопасности при их транспортировке и последующем хранении, одновременно создается международная база данных по влиянию нейтронного облучения на состояние реакторных материалов [1-5]. Совокупность полученных микроструктурных данных и сопутствующие им исследования изменений физико-механических свойств достаточно важны для прогнозирования поведения данных материалов в условиях реакторного облучения и долговременного хранения (по окончании эксплуатации), а также для создания новых конструкционных материалов, удовлетворяющих требованиям высокой радиационной стойкости.

Целью данной работы являлись исследование микроструктуры и измерение микротвердости облученной нейтронами аустенитной стали 08X16H11M3 – материала шестигранного чехла тепловыделяющей сборки Н-214(2), эксплуатировавшейся в активной зоне реактора БН-350 в течение 25 лет.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Материалом для исследования служила аустенитная нержавеющая сталь 08X16H11M3 (аналог AISI 316), из которой был изготовлен шестигранный чехол бланкетной сборки Н-214(2) реактора БН-350 (рисунок 1). Химический состав стали (в вес. %) следующий: С: 0.08÷0.12, Fe: 67.9, Cr : 17.5, Ni :11.1, Mo : 1.65, Mn: 1.5, Si- 0.7, Zp : 0.38. Чехол сборки Н-214(2), имеющий грани шириной 50 мм и толщиной 2мм, облучался в области рефлектора активной зоны реактора БН-350. При этом максимальная повреждающая доза, достигнутая на сборке, составляла 15.6сна при средней скорости набора дозы

4.9×10^{-8} сна/с, усредненной по времени эксплуатации в реакторе. Условия облучения материала сборки на разных отметках относительно центра активной зоны (ц.а.з.), представлены в таблице 1. Известно, что за срок эксплуатации сборку пять раз перемещали на новые позиции в области рефлектора активной зоны. При этом температура на нижнем конце сборки была 280°C, а на верхнем конце достигала 420°C. Предполагалось, что температура стального чехла отличалась от локально контролируемой температуры теплоносителя не более чем на 1-2°.

Для исследования микроструктуры облученной стали был использован ряд методик: оптическая металлография (оптический микроскоп MeF-2) и просвечивающая электронная микроскопия (электронный микроскоп JEM-100CX при ускоряющем напряжении 100 кВ). Измерения микротвердости поверхности стальных образцов выполнялись по методу Виккерса на микротвердомере ПМТ-3 с алмазным индентором в форме пирамидки с углом при вершине 136° (нагрузка на индентор составляла 50г).

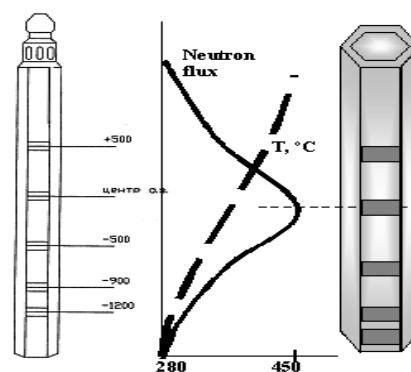


Рисунок 1. Схематическое изображение чехла сборки Н-214(2) с указанием отметок, на которых вырезались пробы стали 08X16H11M3 для исследований

Из грани стального чехла на различных отметках по высоте сборки вырезались пластины 10 × 50 мм. Из них были приготовлены плоские образцы с размерами 5×6мм (вырезанные из грани вблизи ребра чехла) для проведения металлографических исследований и измерений микротвердости. Для выявления границ зерен данные образцы подвергались дополнительной механической шлифовке и полировке.

Диски диаметром 3мм для ПЭМ-исследований вырезались из середины грани чехла. Для получения ПЭМ-объектов проводилось утонение дисков посредством механической шлифовки и полировки, а также последующей двухсторонней струйной электрополировки в электролите следующего состава 20% HClO_4 + 80% $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$.

Таблица 1. Параметры облучения материала сборки Н-214(2) на разных отметках от ц.а.з. реактора БН-350

Отметка, мм	Доза сна	Скорость набора дозы, $\times 10^{-8}$ сна/с	Т, °С
-1200	0.25	0.08	280
-900	1.27	0.39	281
-500	7.08	2.2	309
0	15.6	4.85	337
+500	6.03	1.87	365

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Металлографические снимки микроструктуры облученной стали 08X16H11M3 (боковая поверхность чехла) и соответствующие ПЭМ снимки, сделанные на разных отметках по высоте сборки, представлены на рисунке 2. Гистограммы распределения зерен в облученной стали по размерам приведены на рисунке 3.

Из металлографии образца, вырезанного с нижней отметки «-1200мм» от ц.а.з., где интенсивность облучения была мала, а температура минимальна, следует, что первоначально сталь чехла (на данной отметке) имела почти однородную мелкозернистую структуру с достаточно большой долей равноосных зерен. В микроструктуре преобладают зерна размером меньше 12 мкм, а средний размер зерен составляет 14.7 мкм. Можно предположить, что в среднем микроструктура чехла до облучения была близка к описанному выше типу микроструктуры.

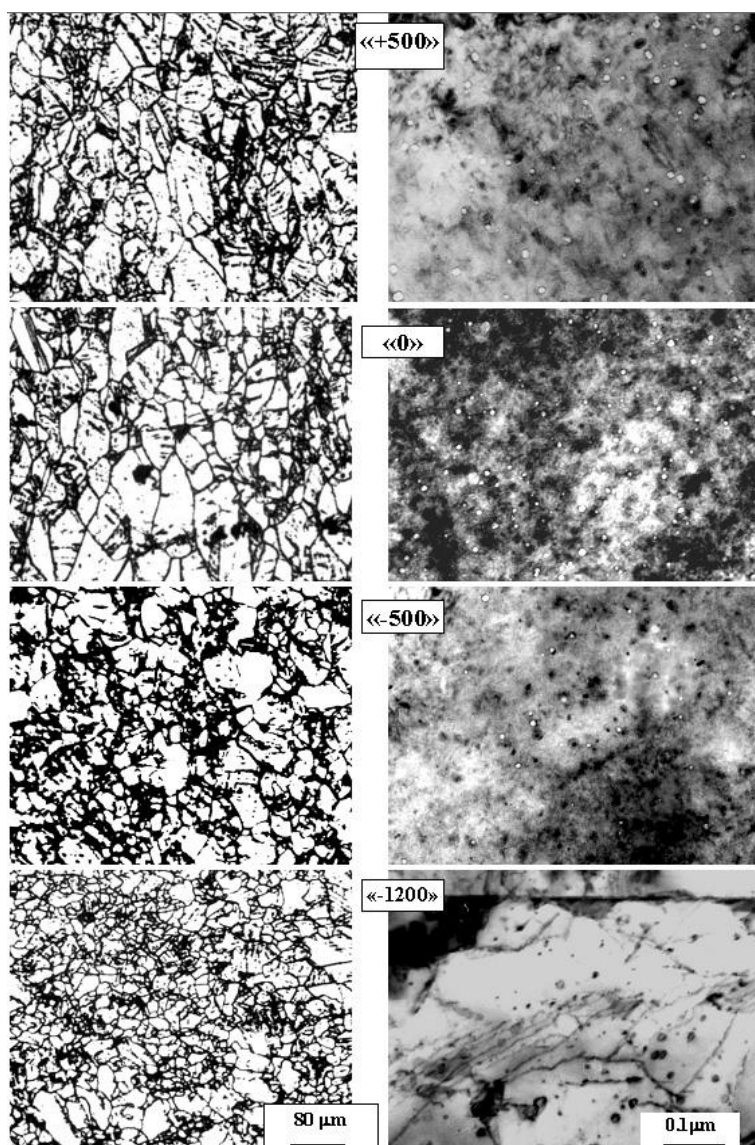


Рисунок 2. Металлографические и ПЭМ-снимки микроструктуры стали 08X16H11M3 с разных отметок по высоте чехла бланкетной сборки Н-214(2)

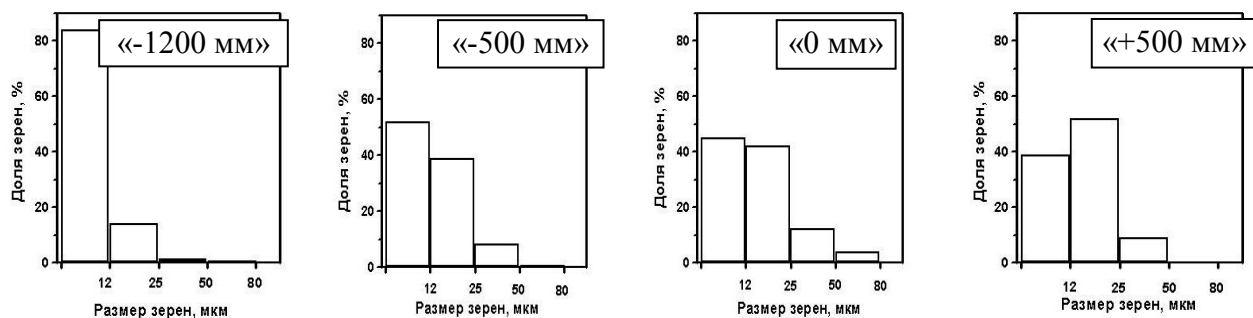


Рисунок 3. Гистограммы распределения зерен по размеру для облученной нейтронами стали 08X16H11M3, чехол сборки Н-214(2)

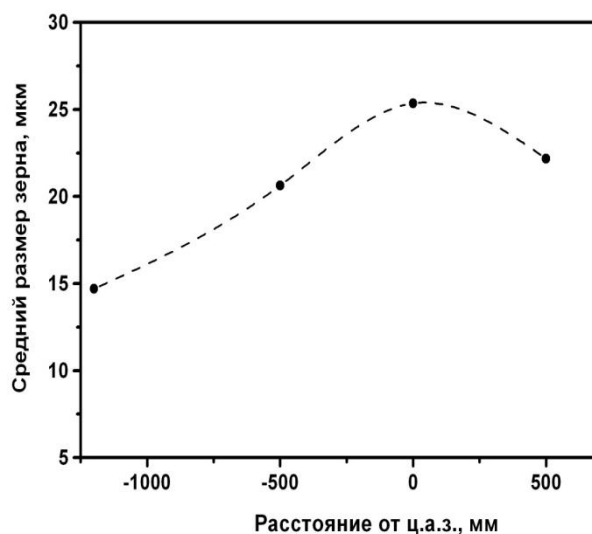


Рисунок 4. Изменение среднего размера зерна в облученной нейтронами стали 08X16H11M3 по высоте сборки

Пост-радиационные исследования показали, что с ростом температуры облучения доля зерен более крупных размеров возрастает, а максимум распределения зерен по размерам на отметке «+500мм» приходится на зерна, чьи размеры лежат в интервале от 25 до 50 мкм. В результате средний размер зерен также увеличивается (рисунок 4) и на отметке «0мм» достигает максимума, 25,4 мкм. Также следует отметить отсутствие выраженной текстуры на нижних отметках по высоте сборки и появление текстуры в направлении, параллельном оси сборки, на отметках «0» и «+500 мм». Последнее может быть обусловлено как влиянием на микроструктуру более высокой температуры облучения (337-365°C), так и локальными неоднородностями исходного состояния стали по длине чехла, появившимися в процессе его изготовления.

ПЭМ-исследование образцов материала чехла бланкетной сборки Н-214(2), вырезанных на разных отметках от ц.а.з., показало, что микроструктура облученной нейтронами стали характеризуется наличием дислокаций (на отметках «-1200мм» и «-900мм»), дислокационных петель Франка, вакансионных пор и, в ряде случаев, вторичных выделений. Основные параметры дефектов, полученные из ана-

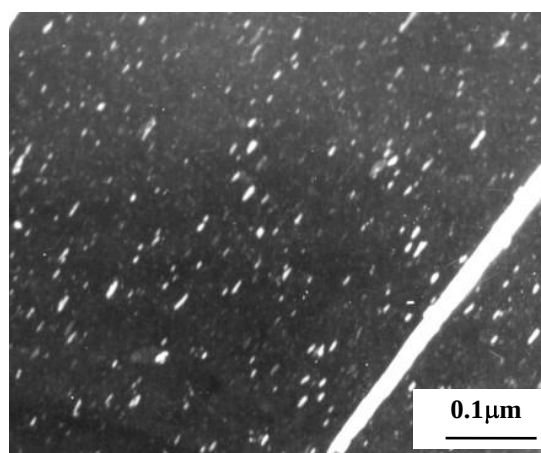
лиза ПЭМ-снимков, приведены в таблице 2. Из таблицы 2 видно, что радиационными дефектами, присутствующими на всех отметках по высоте сборки, являются дислокационные петли Франка. Их максимальное содержание в материале фиксируется на отметке «-500мм» (рисунок 5а). По аналогии с работой [6] дефекты размером <2-3нм, проявляющиеся на темнопольном ПЭМ-снимке в виде светлых точек, принимали в расчет как мелкие дислокационные петли. Вторичные выделения, скорее всего карбидного состава, наблюдались в исследуемой сборке только на отметке «-500» (рисунок 5б).

Особого внимания заслуживает обнаружение вакансионных пор в образце стали 08X16H11M3, вырезанного с отметки «-900мм», которой соответствовали низкие значения скорости набора повреждающей дозы и температуры (0.39×10^{-8} сна/с, 281 °C) [7]. ПЭМ-изображение микроструктуры стали с отметки «-900» в условиях максимального разрешения пор представлено на рисунке 6. Это один из немногих фактов прямого наблюдения начала вакансионного распухания в нержавеющих сталях типа AISI 316 при температурах < 300°C.

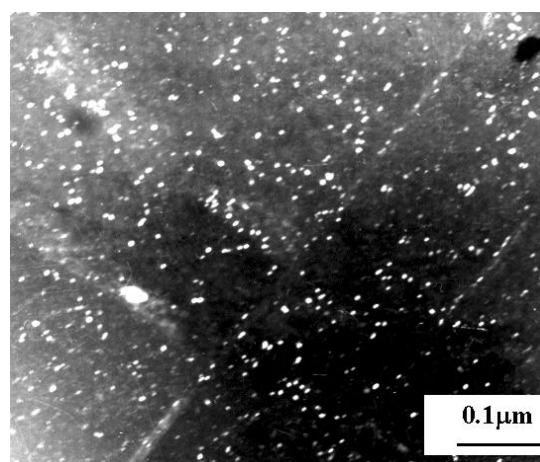
Таблица 2. Характеристики дефектной микроструктуры облученной стали 08X16H11M3

**СТРУКТУРНОЕ СОСТОЯНИЕ И РАДИАЦИОННОЕ УПРОЧНЕНИЕ
СТАЛИ 08X16H11M3 - МАТЕРИАЛА ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕЙ СБОРКИ РЕАКТОРА БН-350**

Отметка	Тип дефектов	Плотность, м^{-3}	$\bar{d}$, нм	Размеры, нм	S, %
«-1200»	петли дислокации	1.7×10^{21} $2.4 \times 10^{14} (\text{м}^{-2})$	7.5 -	3÷25 -	-
«-900»	петли поры дислокации	3.6×10^{21} Единичные $2.0 \times 10^{14} (\text{м}^{-2})$	14.4 - -	3÷25 <7.0 -	Начало распухания
«-500»	петли поры выделения	3.7×10^{22} 7.0×10^{20} 6.9×10^{21}	25.0 10.0 19.3	5÷50 10÷15 15÷45	0.04
«0»	петли поры	1.3×10^{22} 2.6×10^{21}	20.0 9.4	5÷40 4÷15	0.13
«+500»	петли поры	4.2×10^{21} 7.8×10^{20}	31.0 14.0	5÷80 10÷35	0.16



а



б

Рисунок 5. Петли (а) и вторичные выделения (б) в облученной нейтронами стали 08X16H11M3 на отметке «-500мм» от ц.а.з.

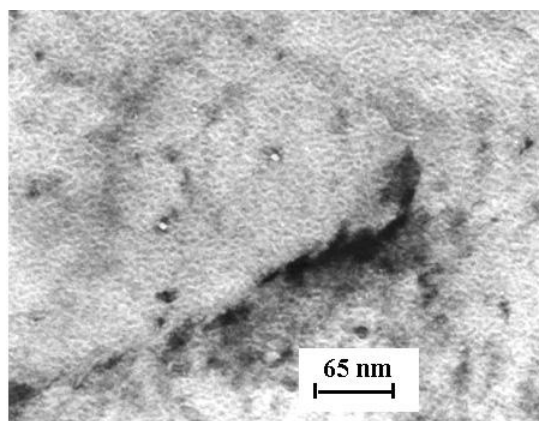


Рисунок 6. Вакансионные поры в стали 08X16H11M3 на отметке «-900мм»

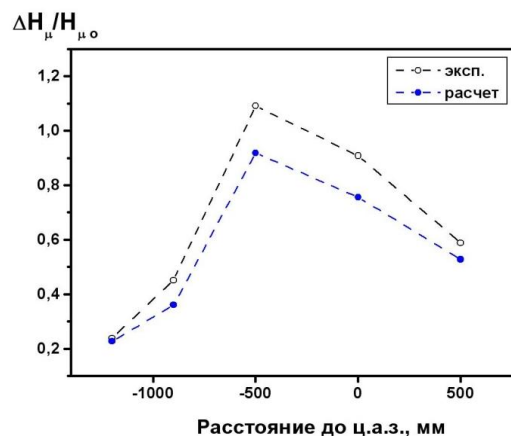


Рисунок 7. Изменение микротвердости облученной нейтронами стали 08X16H11M3 на разных отметках от ц.а.з.

Результаты измерений микротвердости облученной стали 08X16H11M3 на разных отметках по высоте сборки Н-214(2) приведены на рисунке 7. Микротвердость необлученной стали 08X16H11M3 в состоянии поставки принималась равной 197 кг/мм^2 . Из рисунка 7 видно, что максимальное радиационное упрочнение материала сборки достигается на интервале «-500» ÷ «0» мм от ц.а.з., которому соответствуют наиболее высокие параметры радиацион-

ного повреждения по высоте сборки. Стоит отметить, что радиационный прирост микротвердости ΔH_{μ} на отметке «0», где была набрана максимальная повреждающая доза, меньше по величине ΔH_{μ} на отметке «-500». По-видимому, это связано с наличием на отметке «-500» более высокой плотности петель Франка и вторичных выделений, которые дополнительно упрочняют аустенитную матрицу.

В работе проведена оценка прироста микротвердости облученной стали в рамках модели дисперсных барьеров, согласно которой полное изменение предела текучести можно представить в виде

$$\Delta\sigma_{tot} = \Delta\sigma_{LR} + \sqrt{\sum_i \Delta\sigma_{SR,i}^2},$$

где $\Delta\sigma_{LR} = M\alpha \mu b \sqrt{\rho_d}$ - это вклад от дислокаций, а $\Delta\sigma_{SR,i} = M\alpha \mu b \sqrt{Nd}$ - вклад от локального «барьера» i-го сорта. Здесь M – фактор Тейлора; α - мера мощности барьера; μ - модуль сдвига матрицы; b - вектор Бюргерса движущейся дислокации; N и d, соответственно, значения плотности и среднего размера дефектов, ρ_d - плотность дислокаций.

Для расчета были использованы следующие константы: M = 3, b = 2.5×10^{-10} м, $\mu = 6.7 \times 10^{10}$ Па и мощность барьеров α , соответственно равная 1 (для пор), 0.45 (для петель Франка), 0.33 (для выделений) и 0.15 (для дислокаций) [8]. Для определения соотношения между приростом предела текучести облученной стали и изменением микротвердости по Виккерсу ΔH_{μ} было использовано корреляционное соотношение $\Delta\sigma_{tot} = 2.96 \cdot \Delta H_{\mu}$, полученное в работе [9]. Результаты расчета прироста микротвердости в сравнении с экспериментальными данными приведены на рисунке 7. Видно, что полученные ПЭМ-данные в рамках использованной модели неплохо согласуются с экспериментом. Количественное расхождение расчета с экспериментом можно объяснить недостаточно полным учетом мелких радиационных дефектов (пар Френкеля, кластеров дефектов и мелких петель и пор), обу-

словленным разрешающей способностью используемой микроскопической техники.

Выводы

Проведено пост-эксплуатационное микроструктурное исследование облученной нейтронами стали 08X16N11M3 – материала бланкетной сборки Н-214(2) реактора БН-350. Определены характеристики дефектной структуры методами оптической металлографии и просвечивающей электронной микроскопии.

1. Показано, что с ростом температуры облучения средний размер зерен увеличивается и на отметке «0мм» относительно ц.а.з. достигает максимума. На отметках «0» и «+500» наблюдается текстура зерен в направлении, параллельном оси сборки.

2. В микроструктуре облученной нейтронами стали, вырезанной из материала сборки на разных отметках от ц.а.з., наблюдались дефекты типа дислокаций, дислокационных петель Франка, вакансионных пор. Вторичные выделения в данной стали обнаружены только на отметке «-500мм».

3. Из модели дисперсных барьеров рассчитана величина относительного прироста микротвердости $\Delta H_{\mu}/H_{\mu 0}$ стали, облученной на разных отметках. Сравнение расчетных данных с экспериментом показывает, что основной вклад в радиационное упрочнение для материала сборки вносят вакансионные поры и петли Франка. Некоторое количественное несогласование с экспериментом обусловлено, по-видимому, недоучетом дефектов размером менее 2-3нм, плохо различимых на ПЭМ-снимках.

ЛИТЕРАТУРА

1. Maziasz, J. Overview of microstructural evolution in neutron-irradiated austenitic stainless steels / J.Maziasz // Journal of Nucl. Mater.- 1993.- V. 205.- P. 118-145.
2. Zinkle, S.J. Dose dependence of the microstructural evolution in neutron irradiated austenitic stainless steel / S.J.Zinkle, P.Masiasz, R.E.Stoller // Journal of Nucl. Mater.- 1993.- V. 206.- P.266-286.
3. Allen, T.R. The effect of dose rate on the response of austenitic stainless steels to neutron radiation / T.R.Allen, J.I.Cole, C.L.Trybus et.al. // Journal of Nucl. Mater.- 2006.- V.348.- P.148-164.
4. Bruemmer, S.M. Radiation-induced material changes and susceptibility to intergranular failure of light-water-reactor core internals / S.M.Bruemmer, E.P.Simonen, P.M.Scott et.al. // Journal of Nucl. Mater.- 1999.-V.274.-P.299-314.
5. Воеводин, В.И. Особенности микроструктурных изменений в аустенитных и ферритных нержавеющих сталях при облучении / В.И.Воеводин., В.Ф.Зеленский, И.М. Неклюдов и др. // ФММ. –1996.- Т. 81.- № 3.- С. 91-95.
6. Edwards, D.J. Evolution of fine-scale defects in stainless steels neutron-irradiated at 275°C / D.J.Edwards, E.P.Simonen, S.M.Bruemmer // Journal of Nucl. Mater.- 2003.- V.317.- P.13-31.
7. Maksimkin, O.P. Characterization of 08Cr16Ni11Mo3 stainless steel irradiated in the BN-350 reactor / O.P.Maksimkin, K.V.Tsai, L.G.Turubarova, T.Doronina, F.Garner // Journal of Nucl. Mater.- 2004.- V.329-333.-P.625-629.
8. Lucas, G.E. The evolution of mechanical property change in irradiated austenitic steels / G.E.Lucas // Journal of Nucl. Mater.- 1993.- V. 206.- P.287-305.
9. Gusev, M.N. Correlation of yield stress microhardness 08Cr16Ni11Mo3 stainless steel irradiated to high dose in the BN-350 fast reactor / M.N.Gusev, O.P.Maksimkin, O.V.Tivanova, N.S.Silnagina, F.A.Garner // Journal of Nucl. Mater.- 2006.- V. 359.- P. 258–262.

**БН-350 РЕАКТОРЫНЫҢ ЖЫЛУШЫҒАРУШЫ ЖИНАМАСЫНЫҢ
МАТЕРИАЛЫ - 08X16H11M3 БОЛАТТЫҢ ҚҰРЫЛЫМДЫҚ КҮЙІ ЖӘНЕ РАДИАЦИЯЛЫҚ БЕРІКТЕНУІ**

Цай К.В., Максимкин О.П., Турубарова Л.Г., Сильнягина Н.С., Щербинина Н.В.

ҚР ҰЯО Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан

08X16H11M3 болаттың материалтану зерттеулерінің, БН-350 реакторының Н-214 (2) пайдаланып шығарылған жылушығарушы жинамасының құндағы материалының нәтижелері келтірілген. Температура 280-450°С кезінде отын жануы ~10% дейін болғанда жинама пайдаланылды. Зақымдаушы 0.3-0.6 аж дозаларға дейін сәулелендірілген тоттанбайтын болаттың микроқұрылымының (ПЭМ, металграфия) және беріктік қасиеттерінің (микроқаттылық) радиациялық өзгеруінің нәтижелері талдауға алынды.

**STRUCTURAL CONDITION AND RADIATION HARDENING
OF 08CR16-NI11-MO3 STEEL – THE MATERIAL OF BN-350 FUEL ASSEMBLY**

K.V. Tsai, O.P. Maksimkin, L.G. Turubarova, N.S. Sylniagina, N.V. Sherbinina

Institute of Nuclear Physics NNC RK, Almaty, Kazakhstan

The results of material science investigations on 08Cr16-Ni11-Mo3 steel as a material of reactor BN-350 spent fuel assembly H-214(2) were reported. The assembly was operated in the reactor up to burnup ~10% at temperature 280-450°C. The radiation induced changes in microstructure (TEM, metallography) and strength properties (microhardness) are analyzed for stainless steel irradiated to 0.3-0.6dpa.

УДК 539.17

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ АЛЬФА-ИЗЛУЧЕНИЯ УРАНА И ТОРИЯ В МАТЕРИАЛАХ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

¹Грищенко В.Ф., ²Степанов В.М.

¹*Институт космических исследований, Алматы, Казахстан*

²*Институт ядерной физики НЯЦ РК, Алматы, Казахстан*

В работе получена оценка плотности альфа-излучения от урана и тория в кварце. Разработан доступный метод определения малых концентраций урана и тория в материале полупроводниковой электроники, основанный на радиохимическом выделении урана и тория с последующей регистрацией α -излучения трековыми детекторами. Описываются методика разделения урана и тория, регистрации α -излучения, приводятся результаты исследований.

Известно, что во время полетов космических аппаратов (КА) происходят сбои и отказы модулей памяти бортовой аппаратуры, которые снижают срок их активного функционирования в реальных условиях.

Существует мнение, что сбои вызваны, в основном, радиационным воздействием солнечных и галактических космических лучей (СКЛ, ГКЛ). Различают радиационные условия на орбитах с высотами 200 - 1000 км и 1000 - 30000 км. На орбитах ниже 1000 км, проходящих под радиационными поясами Земли, состоящими из протонов с энергией 5 - 30 МэВ и электронов с энергией 2 МэВ, радиационная обстановка определяется, в основном, протонами СКЛ в области Бразильской аномалии, в которой радиационные пояса опускаются наиболее близко к Земле [1].

В состав СКЛ входят также ядра более тяжелых элементов, которые имеют низкие энергии и практически не достигают пилотируемых комплексов. Наличие нейтронного и гамма излучения в околоземном космическом пространстве незначительно и не оказывает существенного влияния на сбои. Более подробно анализ радиационной обстановки на ОК «Мир» приводится в работе [2].

На ИСЗ, находящихся на геостационарных орбитах ($> 36\,000$ км), сбои происходят преимущественно за счет радиационного воздействия СКЛ. В работе [3] представлены данные о сбоях бортовой аппаратуры более чем 300 непилотируемых КА различного назначения. Авторы связывают эти отказы с увеличением числа протонов с энергией 30 МэВ во время солнечных вспышек. Накоплен значительный статистический материал по сбоям запоминающих устройств (ЗУ) со спутников серии SPOT, которые находятся преимущественно на высоте около 822 км [4].

В спектре ГКЛ тяжелые ядра космических лучей имеют энергии > 4 ГэВ/нуклон, поэтому они способны достигнуть низких орбит и, несмотря на малую интенсивность, воздействовать на бортовую аппаратуру пилотируемых комплексов.

Орбиты пилотируемых комплексов ОК «Мир» и Международной космической станции находятся на высоте 320-350 км с наклоном 51.6° . Как показали результаты космического эксперимента, прово-

димого на ОК «Мир» рамках трехстороннего соглашения (Франция-Россия-Казахстан), вклад первичных ГКЛ в интенсивность сбоев на пилотируемых КА, который оценивался с учетом бортовых и наземных моделирующих экспериментов, составлял около 10% от всех сбоев [2].

Однако, работоспособность модулей памяти бортовой аппаратуры зависит не только от радиационного воздействия СКЛ, ГКЛ и их фрагментов, образующихся при взаимодействии этих ядер с материалами защиты. Значительную роль играет и выбор комплектующих, как правило, повышенной надежности; технологии изготовления, материалов защиты, назначения, условий эксплуатации модулей памяти и других факторов. Например, заслуживает внимание тот факт, что КА Вояджер 1 и 2, которые были запущены 5 сентября и 20 августа 1977 г., соответственно, продолжают посылать сигналы с орбиты. Сейчас оба корабля покидают Солнечную систему со скоростью порядка 15 км/с. С ними будет поддерживаться связь до тех пор, пока их ядерные источники, основанные на радиоактивном распаде плутония, будут выдавать достаточную мощность [5]. Следует отметить, что на этих КА используются микросхемы первого поколения, которые являются более радиационно стойкими. Современные микросхемы имеют большую степень интеграции и с увеличением степени интеграции увеличивается вероятность сбоев элементов памяти от одиночных частиц, поскольку область нарушений (разупорядоченная область), образующаяся при прохождении одиночных ядер, сравнима с размерами активных элементов микросхем.

Поэтому необходимо изучать и вклад других факторов в работоспособность элементов бортовой аппаратуры, особенно при прогнозировании интенсивности отказов модулей памяти для многолетних космических полетов. Не исключена и вероятность того, альфа-излучение от естественных примесей урана и тория, находящихся в материале базы и защитном покрытии (корпусах микросхем), также может вызывать сбои элементов модулей памяти. В связи с этим, определение малых количеств урана и тория в материалах твер-

дотельной электроники представляет большой научный и практический интерес.

В данной работе проведена оценка плотности альфа-излучения от естественных примесей урана и тория в кварце, являющимся основным сырьем для материалов полупроводниковой электроники.

Для того, чтобы оценить вероятность вклада α -излучения в образование сбоев элементов микросхем, необходимо использовать чувствительный метод, который бы позволил однозначно экспериментально зарегистрировать α -излучение в материале базы и корпусах микросхем.

Имеются различные традиционные методы определения урана и тория в веществе: ядерно-физический, радиохимический метод с последующей α -спектрометрией; нейтронно-активационный и другие методы. Известный рентгеноспектральный метод определения малых количеств урана и тория обладает низкой чувствительностью (10^{-3} %) и точностью (20%) полученных результатов [6]. Чувствительность известного метода с использованием ядерно-магнитного резонанса (ЯМР) составляет 10^{-1} % по урану и торию. Такая низкая чувствительность связана с переводом твердой пробы в жидкое или газообразное состояние, необходимостью определения интенсивности сигнала в зависимости от аппаратных параметров. Это создает большие трудности в измерении абсолютной интенсивности спектральных линий [7]. Каждый из этих и других существующих методов обладает определенными преимуществами и недостатками, но во всех случаях необходимы дорогостоящие установки (реактор) или проведение сложных технологических процессов анализа.

Для оценки α -излучения в материалах полупроводниковой электроники от примесей урана и тория в исходном сырье был разработан доступный метод определения малых концентраций урана и тория (естественная фоновая распространенность) в исходном сырье, т.е. в кварцевых песках из различных месторождений. Метод основан на радиохимическом выделении урана и тория с последующей регистрацией α -излучения трековыми детекторами. Разработан методика разделения урана и тория, а также способ регистрации α -излучения.

МЕТОДИКА РАЗДЕЛЕНИЯ УРАНА И ТОРИЯ

Методика разделения урана и тория основана на кислотном вскрытии образцов и перевода нуклидов U и Th в раствор, ионообменном разделении с последующим электроосаждением их на Ni – катод. Разделение состоит из следующих этапов.

1. Исследуемый образец массой 10 г смачивается водой, добавляется H_2SO_4 и перемешивается с HF. Полное разложение образца и удаление Si в виде SiF_4 достигается при обильном выделении паров $NaHSO_4$. Остаток сплавляется при температуре $470^\circ K$ в течении 1 час.

2. Сплав растворяется в HCl и раствор переносится в колонку с АВ-17х3 в Cl^- – форме. Элюат разбавляется вдвое 4н HCl и пропускается через колонку с КУ-2х3 в H^+ форме.

3. Уран элюируется с колонки с АВ-17х3 20 мл 1н HCl, раствор упаривается до 1-2 мл. 1%-раствор объемом 20 мл переносится в ячейку для электролиза, который проводится при $I = 1,6 A$; $V = 10B$, $t = 363^\circ K$.

4. Колонка с КУ 2х3 промывается последовательно 2н HCl, водой и 10% раствором NaCl. Торий элюируется 1% раствором ЭДТА (~ 50 мл). Элюат упаривается в присутствии $NH_4 Cl$ (NH_4) $_2C_2O_4$ до 20 мл и переносится в ячейку для электролиза, который проводится при $I = 2,5 A$; $V = 10 \div 15 B$, $t = 340 \div 350^\circ K$.

РЕГИСТРАЦИЯ α -ИЗЛУЧЕНИЯ

Существует несколько способов регистрации α -излучения. В физике высоких энергий интенсивно используется эффективный метод определения концентрации α -излучения высокочувствительной ядерной эмульсией. Этот метод не сможет быть использован в данном случае, поскольку для определения допустимой концентрации необходимы большие времена экспозиции, а исследуемые образцы имели большой естественный фон γ - и β - излучения. Для измерения α -частиц радиометрами имеющейся интенсивности фонового излучения α -частиц не достаточно.

В данной работе использовался метод регистрации α -излучения трековыми детекторами типа Kodak-85, которые имеют малую концентрацию собственных дефектов, а порог регистрации детектора по α – излучению составляет ≥ 3 МэВ.

Регистрация α – излучения детектором типа Kodak -85 проводилась следующим образом. Трековые детекторы вместе с исследуемыми и эталонными образцами, приготовленными радиохимическим способом на Ni – катоде, экспонировались при комнатной температуре. Время экспозиции составляло от 50 до 100 часов. Затем детектор травился в 22% растворе Na(OH) при температуре $t=333^\circ K$ в течении 60 мин. После химического травления детектор просматривался на МБИ-9 и обрабатывался на ЭМ.

ФОНОВОЕ α -ИЗЛУЧЕНИЕ ОТ U И Th В КРЕМНИИ

С использованием разработанного метода получены значения концентрации и плотности α – излучения для урана и тория в различных образцах. Воспроизводимость данного метода составила 34% на уровне концентраций урана $3 \cdot 10^{-6}$ г/г. Предел обнаружения, оцененный по (трехкратному) критерию, равен $SF = 1 \cdot 10^{-9}$ г/г, где SF - флуктуация концентрации урана и тория фоновых образцов.

Исследованы образцы кварцевого песка (основа для получения кремния) из 20 различных месторождений бывшего СССР и ГДР. Некоторые полученные результаты представлены в таблице 1, где I г/г – концентрация урана или тория, а N част /см² ч – плотность α – излучения.

Таблица 1. Экспериментальные данные концентрации и плотности α -излучения урана и тория

№ образца (кварц)	U		Th	
	N част /см ² ·ч	I г/г	N част/ см ² ·ч	I г/г
1. Кварц	0,76	$6,16 \cdot 10^{-7}$	0,41	$1,1 \cdot 10^{-7}$
2. Кварц	0,77	$6,23 \cdot 10^{-7}$	9,01	$2,43 \cdot 10^{-7}$
3. Кварц	0,79	$6,39 \cdot 10^{-7}$	0,6	$1,62 \cdot 10^{-7}$
4. Кварц	0,59	$4,77 \cdot 10^{-7}$	0,48	$1,29 \cdot 10^{-7}$
5. Кварц (ГДР)	0,3	$4,46 \cdot 10^{-7}$	3,35	$1,23 \cdot 10^{-7}$
6. Кварц	0,22	$3,27 \cdot 10^{-7}$	1,45	$1,45 \cdot 10^{-7}$

Если не принимать во внимание тип частицы и условия прохождения в микросхеме, в общем плане, вероятность попадания одиночной частицы в активный элемент будет определяться отношением площади активного элемента к площади микросхемы. Если принять степень интеграции микросхемы равной 10^4 эл/см² (площадь активного элемента будет 1 мкм²), то вероятность попадания альфа-частицы для образцов, из которых будут изготовлены микросхемы, будет составлять $\sim 10^{-8}$. Это очень малая величина и ею можно на первом этапе прогнозирования надежности микросхем пренебречь.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты эксперимента показали, что концентрация α -излучения урана и тория в исходном сырье, т.е. в кварцевых песках из различных месторождений, незначительна и вероятность попадания альфа-частицы в активный элемент микросхем мала.

Разработанный метод концентрирования и разделения урана и тория с последующей регистрацией α -частиц трековым детектором позволяет непосредственно измерить α -излучение от всех нуклидов, входящих в цепочку распада как урана, так и тория. При этом не требуется дорогостоящих установок и сложных технологий.

По своим возможностям разработанный метод не уступает известному чувствительному методу нейтронно-активационного анализа с радиохимическим разделением [7]. Поэтому изложенный метод может быть использован для определения концентраций урана и тория в промышленных условиях. Метод доложен на 5th Meeting on Nuclear Analytical Methods, Dresden, May 13-17, 1991.

Авторы бесконечно благодарны Бурмистрову В.Р. за предоставление экспериментальных образцов и оказанные научные консультации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Радиационные условия на борту КА / М.: в кн. Модель космоса под ред. С.Н. Вернова, 1983. - Т.3. - С. 298-308.
2. Грищенко, В.Ф. Изучение причин отказов модулей памяти в условиях полета ОК «Мир» / В.Ф. Грищенко : в кн. Космические исследования в Казахстане под ред. У.М. Султангазина, - 2002. - С.78-91.
3. Белов, А.В. Влияние космической среды на функционирование искусственных спутников Земли / А.В. Белов, Дж. Виллорези, Л.И. Дорман [и др.] // Геомагнетизм и аэрономия, - 2004. - Т. 44, №4. - С. 502-510.
4. Chapuis, T. / Heavy ion effect on SPOT Satellites comparison between on-orbit observation and upset Rate Prediction / T. Chapuis // First European conference on Radiation and its effects on Devices and Systems, Montpellier, France, 1991. - С.302-306.
5. Межпланетные станции. Величайший межпланетный проект. К 30-летию юбилею «Вояджер» // Новости космонавтики - 2007. - № 10. - С. 75.
6. Лосев, Н.Ф. Количественный рентгеноспектральный флуоресцентный анализ / Н.Ф. Лосев / Москва. - 1962. - С. 277- 325.
7. Филей, Дж. Спектроскопия ЯМР высокого разрешения / Дж. Филей, Л. Сатклир. – М., 1968. - Т. 1. - 220 с.

ЖАРТЫЛАЙ ӨТКІЗГІШ ЭЛЕКТРОНИКАСЫ МАТЕРИАЛДАРЫНДАҒЫ УРАН МЕН ТОРИЙДІҢ АЛЬФА-СӘУЛЕЛЕНУІНІҢ ТЫҒЫЗДЫҒЫН БАҒАЛАУ

¹Грищенко В.Ф., ²Степанов В.М.

¹Ғарыштық зерттеулер институты, Алматы, Қазақстан

²ҚР ҰЯО Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан

Бұл жұмыста кварцтағы уран мен торийдің альфа-сәулеленуінің тығыздығын бағалау орындалған. Жартылай өткізгіш электроникасы материалындағы уран мен торийдің аз мөлшерлерін анықтау бойынша, α -сәулеленуді тректік детекторлар арқылы тіркей отырып, уран мен торийдің радиохимиялық бөлінуіне негізделген қарапайым әдіс жасалған. Уран мен торийдің бөлінуіне және α -сәулеленуді тіркеуге қатысты әдістеме сипатталған, зерттеу нәтижелері кеңірітілген.

**DETERMINATION OF DENSITY ALPHA-RADIATION OF URANIUM
AND THORIUM IN MATERIALS OF SEMICONDUCTORS ELECTRONICS**

¹V.F. Grishchenko, ²V.M.Stepanov

¹*Space Research Institute, Almaty, Kazakstan*

²*Institute of Nuclear Physics NNC RK, Almaty, Kazakstan*

The present paper suggests an available method of determination of uranium and thorium small concentrations in materials of semiconductor electronics, based on radiochemical separation of uranium and thorium with subsequent registration of alpha-radiation by track detectors. Technique of uranium and thorium separation is described as well as the method of alpha-radiation. The results of investigations are presented.

СПИСОК АВТОРОВ

- Авrorов С.А., 70
Алексеев А.С., 90
Ан В.А., 76
Беляшова Н.Н., 5, 16
Васильев А.П., 54
Воскобойникова Г.М., 99
Габсатарова И.П., 27
Гиббонс С., 41
Глинский Б.М., 90
Годунова Л.Д., 76
Градобоев А.В., 110
Грищенко В.Ф., 133
Дробжева Я.В., 60
Каазик П.Б., 76
Кверна Т., 41
Ким В.-Я., 21
Ковалевский В.В., 90
Козловский В.А., 60
- Колесник А.Г., 47
Коломиец М.В., 27, 85
Краснов В.М., 60
Кругликов Д.А., 106
Лазуркина В.Б., 60
Липатов А.В., 33
Лотов А.Б., 115
Маккелтвейт С., 41
Максимкин О.П., 127
Маханов Д.И., 60
Михайлова Н.Н., 5, 16, 79
Мухамеджанов Э.К., 60
Павлова Н.Н., 115
Пак Г.Д., 60
Поляков Л.Е., 106
Потребеников Г.К., 115
Рингдал Ф., 41
Ричардс П., 21
- Салихов Н.М., 60
Седухина Г.Ф., 99
Сильнягина Н.С., 127
Скаков М.К., 110
Соловьев А.В., 47
Старовойт О.Е., 27, 85
Степанов В.М., 133
Турубарова Л.Г., 121, 127
Увалиев Б.К., 110
Хайретдинов М.С., 70, 90, 99
Хохлов Ю.П., 33
Цай К.В., 121, 127
Чинахов Д.А., 110
Швайтцер Дж., 41
Щербинина Н.В., 121, 127
Эльтеков А.Ю., 33

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Статьи предоставляются в виде электронной (на гибком диске или по электронной почте присоединенным (attachment) файлом) в формате MS WORD и печатной копии.

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 (300-600 dpi). Горизонтальное расположение листов не допускается.

Используются шрифт Times New Roman высотой 10 пунктов для обычного текста и 12 пунктов для заголовков. Пожалуйста, для заголовков используйте стили (Заголовок 1, 2...) и не используйте их для обычного текста, таблиц и подписочных подписей.

Текст печатается через одинарный междустрочный интервал, между абзацами – один пустой абзац или интервал перед абзацем 12 пунктов.

В левом верхнем углу должен быть указан индекс УДК. Название статьи печатается ниже заглавными буквами. Через 3 интервала после названия, печатаются фамилии, имена, отчества авторов и полное наименование, город и страна местонахождения организации, которую они представляют. После этого, отступив 2 пустых абзаца или с интервалом перед абзацем 24 пункта, печатается основной текст.

При написании статей необходимо придерживаться следующих требований:

- Статья должна содержать аннотации на казахском, английском и русском языках (130-150 слов) с указанием названия статьи, фамилии, имени, отчества авторов и полного названия, города и страны местонахождения организации, которую они представляют;
- Ссылки на литературные источники даются в тексте статьи цифрами в квадратных [1] скобках по мере упоминания. Список литературы следует привести по ГОСТу 7.1-2003;
- Иллюстрации (графики, схемы, диаграммы) должны быть выполнены на компьютере (ширина рисунка 8 или 14 см), либо в виде четких чертежей, выполненных тушью на белом листе формата А4. Особое внимание обратите на надписи на рисунке – они должны быть различимы при уменьшении до указанных выше размеров. На обороте рисунка проставляется его номер. В рукописном варианте на полях указывается место размещения рисунка. Рисунки должны быть представлены отдельно в одном из форматов *.tif, *.gif, *.png, *.psx, *.dxf с разрешениями 600 dpi.
- Математические формулы в тексте должны быть набраны как объект Microsoft Equation или MathType. Химические формулы и мелкие рисунки в тексте должны быть вставлены как объекты Рисунок Microsoft Word. Следует нумеровать лишь те формулы, на которые имеются ссылки.

К статье прилагаются следующие документы:

- рецензия высококвалифицированного специалиста (доктора наук) в соответствующей отрасли науки;
- выписка из протокола заседания кафедры или методического совета с рекомендацией к печати;
- акт экспертизы (экспертное заключение);
- на отдельном листе автор сообщает сведения о себе: фамилия, имя, отчество, ученая степень, должность, кафедра и указывает служебный и домашний телефоны, адрес электронной почты.

Текст должен быть тщательным образом выверен и отредактирован. В конце статья должна быть подписана автором с указанием домашнего адреса и номеров служебного и домашнего телефонов, адрес электронной почты.

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

Ответственный секретарь д.т.н. М.К. Мукушева
тел. (722-51) 2-33-35, E-mail: MUKUSHEVA@NNC.KZ

Технический редактор А.Г. Кислухин
тел. (722-51) 2-33-33, E-mail: KISLUHIN@NNC.KZ

Адрес редакции: 071100, Казахстан, г. Курчатов, ул. Тәуелсіздік, 6.
<http://www.nnc.kz/vestnik>

© Редакция сборника «Вестник НЯЦ РК», 2001.

Регистрационное свидетельство №1203-Ж от 15.04.2000г.
Выдано Министерством культуры, информации и общественного согласия Республики Казахстан

Тираж 300 экз.

Выпуск набран и отпечатан в типографии
Национального ядерного центра Республики Казахстан
071100, Казахстан, г. Курчатов, ул. Ленина, 6.

