ISSN 1729-7516



ПЕРИОДИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ НАЦИОНАЛЬНОГО ЯДЕРНОГО ЦЕНТРА РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

ВЫПУСК 3(43), СЕНТЯБРЬ 2010

Издается с января 2000 г.

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ: К.х.н. АРТЕМЬЕВ О.И., д.ф.-м.н. БАТЫРБЕКОВ Э.Г., 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, к.б.н. КАДЫРОВА Н.Ж., к.ф.-м.н. КЕНЖИН Е.А., д.ф.-м.н. КОПНИЧЕВ Ю.Ф., д.г.-м.н. КРАСНОПЕРОВ В.А., д.ф.-м.н. МИХАЙЛОВА Н.Н., д.т.н. МУКУШЕВА М.К., д.г.-м.н. НУРМАГАМБЕТОВ А.Н., д.б.н. ПАНИН М.С., к.г.-м.н. ПОДГОРНАЯ Л.Е., д.т.н. САТОВ М.Ж., д.ф.-м.н. СОЛОДУХИН В.П.

# ҚР ҰЯО Жаршысы

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҰЛТТЫҚ ЯДРОЛЫҚ ОРТАЛЫҒЫНЫҢ МЕРЗІМДІК ҒЫЛЫМИ-ТЕХНИКАЛЫҚ ЖУРНАЛЫ

3(43) ШЫҒАРЫМ, ҚЫРҚҮЙЕК, 2010 ЖЫЛ

## NNC RK Bulletin

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

ISSUE 3(43), SEPTEMBER 2010

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,
- по специальности 25.00.00 наука о Земле.

В журнале представлены доклады VI Международной конференции «Мониторинг ядерных испытаний и их последствий» 09 – 13 августа 2010 г., Курчатов

## СОДЕРЖАНИЕ

О РЕГИОНАЛЬНОМ СОТРУДНИЧЕСТВЕ В ОБЛАСТИ СЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА В ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ
ВКЛАД МОНГОЛИИ В ОДВЗЯИ 11 Сухбаатар У.
РАЗВИТИЕ СЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА В КЫРГЫЗСТАНЕ 17 Абдрахматов К.Е., Березина А.В.
СЕТЬ ЦИФРОВЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ В УЗБЕКИСТАНЕ И ЕЁ РАЗВИТИЕ
СОВРЕМЕННАЯ СЕТЬ СЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ТАДЖИКИСТАНА И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕЕ РАЗВИТИЯ
ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ СЕЙСМОЛОКАЦИИ ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКОВ
МЕТОД И РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АДИОТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ РОССИЙСКОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ЗА НЕПРОВЕДЕНИЕМ ЯДЕРНЫХ ИСПЫТАНИЙ 40 Знаменщиков Б.П., Московенко В.М., Орешин В.П.
ОСОБЕННОСТИ ВОЛНОВОЙ КАРТИНЫ ПОДЗЕМНОГО ЯДЕРНОГО ВЗРЫВА В СЕВЕРНОЙ КОРЕЕ 25 МАЯ 2009 г. ПО ДАННЫМ РЕГИСТРАЦИИ РОССИЙСКИМИ СЕЙСМИЧЕСКИМИ СТАНЦИЯМИ
К ВОПРОСУ ИНТЕРПРЕТАЦИИ НАЧАЛЬНЫХ ФАЗ ПРОДОЛЬНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН, РЕГИСТРИРУЕМЫХ В РЕГИОНАЛЬНОЙ ЗОНЕ ПОДЗЕМНЫХ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ КНДР
О НОРМАЛЯХ МАГНИТНЫХ ЦИФРОВЫХ ЗАПИСЕЙ АРХИВА ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ "БОРОВОЕ"
СЕЗОННЫЕ ВАРИАЦИИ ИНФРАЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ ОТ ГАЗОВЫХ ФАКЕЛОВ: НАБЛЮДЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ
ОБЪЯСНЕНИЕ ПРИРОДЫ ИСТОЧНИКОВ КОГЕРЕНТНЫХ НИЗКОЧАСТОТНЫХ СИГНАЛОВ, РЕГИСТРИРУЕМЫХ МОНИТОРИНГОВОЙ СЕТЬЮ НЯЦ РК
ИТЕРАТИВНЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ГЛУБИНЫ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ СПОСОБОМ КОМПЛЕКСНОГО КЕПСТРАОшибка! Закладка не определена. Кемерайт Р.К.
СЕЙСМОРЕЗОНАНСНЫЙ МЕТОД ОБНАРУЖЕНИЯ ОЧАГОВ ПОДЗЕМНЫХ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ
Спивак А.А., Лукишов Б.Г., Кишкина С.Б.
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УПРУГИХ ВОЛН В КАВЕРНОЗНЫХ СРЕДАХ
і линский Б.м., караваев Д.А., Мартынов Б.п., Хайретдинов М.С.

ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ ТЕХНОГЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ В ЗОНАХ ПОДЗЕМНЫХ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ	101
МОНИТОРИНГ РАДИОНУКЛИДНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПРИЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЫ СЕМИПАЛАТИНСКОГО ПОЛИГОНА И ПРИЛЕГАЮЩЕГО РЕГИОНА 1 Артемьев О.И.	117
ОЦЕНИВАНИЕ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ ОТ КАРЬЕРНЫХ ВЗРЫВОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИБРАЦИОННЫХ ИСТОЧНИКОВ	125
О МЕХАНИЗМЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ 1 Садиков Ф.С., Алимухамедов И.М., Адылов И.И., Саттаров А.	130
О РЕАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ПЛАНЕТЫ ЗЕМЛЯ 1 Садиков Ф.С.	134
ОБ ОСНОВНОЙ ПРИЧИНЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ СИЛЬНОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ И ЕГО ПРЕДВЕСТНИКОВ	137
ЗАМЕТКИ О ПРОГНОЗЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ	141
STUDIES OF REPEATING EARTHQUAKES IN CHINA 1 D.P. Schaff, P.G. Richards	149

УДК 550.34

## О РЕГИОНАЛЬНОМ СОТРУДНИЧЕСТВЕ В ОБЛАСТИ СЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА В ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ

#### Михайлова Н.Н.

#### Институт геофизических исследований НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

Рассмотрены история и современное состояние регионального сотрудничества постсоветских стран Центральной Азии в области сейсмического мониторинга. Описаны меры по налаживанию обмена данными в регионе, предпринимаемые при содействии и помощи международных и зарубежных организаций.

Среднеазиатская сейсмическая область относится к Средиземноморско-Азиатскому поясу и представлена в рельефе основном как высокогорная и сильно расчлененная территория. Основные горные сооружения - Тянь-Шань, Памир, Копетдаг. Сейсмическая история всех пяти постсоветских стран Центральной Азии: Казахстан, Кыргызстан, Узбекистан, Таджикистан, Туркменистан, - чрезвычайно богата событиями, которые, к сожалению, принесли сотни тысяч жертв и страшные разрушения. За последние немногим более ста лет здесь зафиксированы четыре землетрясения с магнитудой более 8. При этом интенсивность сотрясений в эпицентральной области составляла 10 - 11 баллов. Это - Красноводское землетрясение 1895 г. с М=8,2 в Туркменистане, Чиликское 1889 г. с М=8,3 в Казахстане, Кеминское 1911 г. с М=8,2 в приграничной области Кыргызстана и Казахстана, Кашгарское 1902 г. с М=8.2 вблизи границы Кыргызстана и Китая. Сильными землетрясениями были разрушены г. Верный (ныне Алматы) при 9 - 10 балльном Верненском землетрясении 1887 г., г. Ашхабад в 1948 г. при 9 - 10 балльном землетрясении, г. Ташкент в 1966 г. при 8-9 балльном землетрясении. Широко известны такие сейсмические катастрофы региона, как 9-балльное Беловодское землетрясение 1885 г., 9-балльное Андижанское 1902 г., два 9-балльных Каратагских землетрясения в 1907 г., 9-балльное Сарезское 1911 г., 9-балльное Чаткальское 1946 г.,

9 - 10 балльное Хаитское 1949 г., 9-балльные Газлийские 1976 и 1984 г.г., 9-балльное Суусамырское 1992 г.

Глядя на карту сильнейших землетрясений территории Центральной Азии (рисунок 1), можно отметить единство всей системы сейсмоопасных зон, имеющих трансграничное простирание. Такие протяженные зоны имеют единые закономерности сейсмического режима, определяемые масштабными геодинамическими процессами. Исследованиями последних лет неопровержимо доказана связь процессов подготовки сильных землетрясений в различных сейсмоопасных зонах, находящихся на значительных расстояниях друг от друга. Поэтому для понимания законов геодинамики, успешного продвижения в решении вопросов прогноза землетрясений и правильной оценки сейсмической опасности, успешного решения задач ядерного мониторинга необходимо объединять усилия разных стран, осуществлять обмен данными разных сетей наблюдений, координировать работы по сейсмическому мониторингу в Центральной Азии.

В советское время, особенно после Ташкентского землетрясения 1966 г., началось более тесное сотрудничество между организациями сейсмологического профиля в регионе. На первом этапе координацию работ по изучению землетрясений в Средней Азии и Казахстане осуществлял Институт сейсмологии АН Узбекистана.



Зеленый кружок - сильнейшее землетрясение с магнитудой более 7.

Рисунок 1. Карта эпицентров сильных землетрясений (М= 4-8) в Центральной Азии с исторических времен

Создавались общие каталоги землетрясений, велась совместная активная работа по созданию карты общего сейсмического районирования территории СССР. Безусловно, большую роль в этом сотрудничестве имело методическое руководство Института физики Земли АН СССР и его специалистов.

Новый импульс сотрудничеству был придан в конце 70-х – в 80-х годах прошлого столетия, когда был создан Центр по прогнозу землетрясений Средней Азии и Казахстана, располагавшийся в г. Душанбе на базе ТИССС (Таджикского института сейсмостойкого строительства). Таджикистан был избран не случайно для создания на его территории регионального Центра. В Таджикистане в те годы были сосредоточены и научные исследования по прогнозу землетрясений на специально созданном советско-американском полигоне по прогнозу землетрясений в Гарме, где работали замечательные специалисты СССР и США. Все среднеазиатские республики бывшего СССР самым активным образом включились в работу Центра. Этот региональный Центр, в свою очередь, в методическом плане

тесно сотрудничал с Единой системой сейсмологических наблюдений СССР, что обеспечивало унификацию подходов к обработке данных и параметризации очагов землетрясений в рамках всего Советского Союза. Благодаря работам регионального Центра выпускался ежедекадный оперативный каталог землетрясений территории Средней Азии и Казахстана. составлялся сводный каталог основных параметров землетрясений. каталог параметров механизмов очагов. Были проведены работы по созданию магнитудной калибровочной зависимости для классификации землетрясений в Центральной Азии (региональная шкала MPVA). Функционировали рабочие группы по разным методическим направлениям – оценке представительности сети наблюдений, магнитудной классификации, сильным движениям, макросейсмике и др. Научные статьи и результаты сейсмических наблюдений публиковались в систематических сборниках (рисунок 2), которыми пользуются сейсмологи Центральной Азии до сих пор.





Рисунок 2. Сборники, регулярно издававшиеся региональным Центром по прогнозу землетрясений Средней Азии и Казахстана в 70-х – в 80-х годах прошедшего века

В начале 90-х годов прошлого столетия на территории стран Центральной Азии бывшего Советского Союза в силу известных причин произошли события, негативные для изучения сейсмологии региона. Резко сократилось число сейсмических станций в некоторых странах. Прекратил свою работу среднеазиатский Центр по прогнозу землетрясений в г. Душанбе. Было прервано составление ежедекадных оперативных сейсмических бюллетеней Средней Азии и Казахстана и сводных каталогов для всей территории. Прекратился обмен данными между странами на разных уровнях оперативности. Существовавшие до этого унифицированные подходы и методики претерпели изменения. Последствия этих изменений не преодолены до сих пор.

С другой стороны, в 90-х годах начали происходить и положительные перемены. При поддержке зарубежных организаций началось внедрение цифровых методов регистрации в практику сейсмологических наблюдений. Стали строиться новые станоснащенные современными цифровыми нии. приборами мирового уровня, модернизироваться старые. В отдельных странах началась интеграция с глобальными сетями наблюдений, кооперация с Международными Центрами данных. Создавались новые системы коммуникаций для оперативного сбора данных и обмена ими (интернет и спутниковые каналы связи). Это открыло новые перспективы для анализа данных при решении самых различных задач сейсмологии и геодинамики.

Важным положительным аспектом является то, что все страны Центральной Азии являются странами-подписантами Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (ДВЗЯИ). В соответствии с этим договором после 1999 г. в некоторых из них построены станции и созданы Национальные центры данных (НЦД). Основная задача НЦД – содействие Международному центру данных в мониторинге ядерных взрывов и землетрясений. Однако не все из них работают в полную силу, в некоторых странах их пока просто нет.

Создание цифровых сетей потребовало новых подходов к обработке данных, их хранению и обмену. В процессе работ с новыми данными стало понятно, что в каждой стране региона необходимо стремиться:

- к унификации форматов получаемых данных с мировыми форматами данных, позволяющей обмениваться исходными данными в режиме реального времени или близком к нему;
- к использованию единых программных пакетов для обработки данных, позволяющих в конечном итоге формировать сейсмические бюллетени в едином формате;
- к созданию баз данных «сырых» записей и продуктов обработки, пригодных для обмена не только в рамках региона, но и мира.

Особенно остро проблемы региона проявились в процессе выполнения работ по проекту МНТЦ КР-1176 по управлению сейсмическим риском в Центральной Азии. Одной из задач проекта было создание сейсмологической базы данных территории Центральной Азии по событиям до 2005 г. Координация этих работ была возложена на Центр данных Института геофизических исследований НЯЦ РК. В работах по сбору данных разных стран, попытках их стыковки для единой базы данных стал четко виден разрыв в уровне современных сейсмических наблюдений между странами и в обработке данных, разрозненность сетей наблюдений, огромные трудности по сведению разнородных данных в единые базы данных вследствие различия используемых форматов, подходов и т. д.

Первый шаг к координации при обмене сейсмологическими данными в Центральной Азии (САDE) был сделан в апреле 2009 г., когда в г. Алматы по инициативе IRIS (Incorporated Research Institutions for Seismology) /DMS на базе Казахстанского национального центра данных был проведен рабочий семинар с участием представителей 11 организаций из 7 стран мира, в том числе наиболее опытных и квалифицированных сейсмологов Казахстана, Кыргызстана, Таджикистана, Узбекистана (рисунок 3). Встречу проводил менеджер программ Центра IRIS доктор Тим Ахерн (США).



Рисунок 3. Апрель 2009 г. На встрече представителей стран Центральной Азии в Алматы

В результате этой встречи удалось получить общее представление о современных сетях цифровых наблюдений на территории Центральной Азии (рисунок 4) и выработать общий взгляд на развитие регионального сотрудничества.

Подтвердилось, что созданные в разных странах с помощью самых разных зарубежных организаций станции и сети наблюдений используют различные форматы данных.



Рисунок 4. Современная сеть цифровых наблюдений на территории Центральной Азии по состоянию на апрель 2009 г.

При этом, форматы данных различаются не только в разных странах, но и в пределах одной страны в разных организациях, а также в пределах одной сети наблюдений на разных станциях. Например, в Казахстане сейсмический мониторинг осуществляется в основном двумя организациями: Сейсмологической опытно-методической экспедишией МОН РК и ИГИ НЯШ РК. В ИГИ НЯШ РК исмежлународные форматы данных пользуются CSS3.0 и SEED, в COMЭ - формат данных WGSN и miniseed. Для создания общей базы данных при работе в рамках проекта CASRI пришлось создать специальную технологию преобразования форматов. Преобразование включало в себя следующие этапы: 1) с помощью специально написанной утилиты 'dimas2wfdi' осуществляется перевод данных из формата DIMAS ASCII в формат Geotool ASCII; 2) с помощью программы Geotool осуществляется перевод из формата Geotool ASCII в формат CSS3.0.

Участниками совещания в г. Алматы было принято решение, направленное на объединение усилий по созданию региональной в пределах Центральной Азии, системы обмена данными (CADE). В основе этого обмена – создание унифицированной региональной сети сейсмических наблюдений, начатое по трансграничному проекту GFZ (Германия), а также партнерами центрально-азиатских стран из Норвегии, Швейцарии, США, Японии, Китая. Очень важно, что все участники из разных стран признают, что получаемые данные должны быть открыты и доступны как для других стран в регионе, так и для международных центров данных, таких как IRIS и GFZ. Намечены следующие шаги для САDE на будущее:

- определить сейсмические станции, которые будут участвовать в региональной унифицированной сети Центральной Азии;
- подсоединить центры данных к высокоскоростному Интернету;
- принять и установить общую систему обработки во всех центрах данных;
- организовать проведение тренинга для сотрудников организаций Центральной Азии по использованию систем обработки и интересующим научным вопросам;
- поддержать обмен научными сотрудниками между странами, включая молодых специалистов. Способствовать взаимодействию научных сотрудников стран Центральной Азии и Европы, США и т.д.
- организовать выпуск оперативного регионального центрально-азиатского сейсмического бюллетеня.

В июле 2009 г. в г. Душанбе на региональной конференции по снижению сейсмического риска, посвященной 60-летней годовщине Хаитского землетрясения в Таджикистане, которая была организована Представительством секретариата Международной стратегии уменьшения опасности бедствий ООН в Центральной Азии и Кавказе, поддержана инициатива по созданию в Центральной Азии регионального центра по обучению, совместной обработке сейсмических данных и обмену результатами.

Для реализации решений, принятых на двух региональных встречах, уже удалось многое сделать.

## **1.** Создание опорной сети станций Центральной Азии для сейсмического мониторинга

Благодаря огромной работе специалистов Института им. Гельмгольца Центра изучения Земли (GFZ) Германии Анжелло Стролло, Дино Бинди и др. по проекту CASCADE (Central Asian Cross-border natural disaster prevention), начавшемся в июле 2008 г. и закончившемся в феврале 2010 г., на территории Центральной Азии создана новая сеть цифровых сейсмических станций CAREMON. В ее составе действуют шесть станций, расположенных в Туркменистане (одна станция - Ашгабат), Таджикистане (одна станция - Джерино), Кыргызстане (две станции: Талас и Суфикурган), Казахстане (две станции: Ортау и Подгорное). На всех станциях установлены широкополосные сейсмоприемники и акселерометры сильных движений. Важной особенностью сети этих станций является то, что их данные передаются в режиме реального времени как в национальные центры данных, так и в Центр данных GFZ. Благодаря вводу в эксплуатацию этой сети станций, в Центре данных ИГИ НЯЦ РК осуществляется прием данных мониторинга в режиме реального времени со всей сети CAREMON, которая достаточно хорошо может быть использована в качестве опорной для Центральной Азии (рисунок 5).



Рисунок 5. Сеть станций, данные которых в реальном времени поступают в Центр данных ИГИ НЯЦ РК в г. Алматы

Данные этих станций с помощью специальных программ начали обрабатываться совместно с данными других сейсмических станций ИГИ НЯЦ РК, что сделало более полным составляемый в Центре сейсмологический бюллетень Центральной Азии

## 2. Обмен данными с киргизской цифровой сетью **KRNET**

Начат обмен данными с киргизской цифровой сетью KRNET, созданной на территории Кыргызстана при содействии норвежского сейсмического центра HOPCAP. Данные этой сети поступают в Центр данных ИГИ НЯЦ РК, где переводятся в формат SEED и представляются в Центр IRIS. Вместе с данными казахстанской сети станций KazNET и киргизской сети KNET данные новых станций сети KRNET становятся доступными через IRIS/DMC для любых пользователей мира. В дальнейшем планируется проведение процедуры генерации SEED –архивов по киргизской сети сотрудники ИС АН КР.

## **3.** Открытие Международного учебного центра в поддержку ДВЗЯИ

21 июня 2010 г. в г. Алматы состоялось открытие Международного учебного центра в поддержку ДВЗЯИ (рисунки 6, 7).

Международный учебный центр организован на базе Центра сбора и обработки специальной сейсмической информации Института геофизических исследований Национального ядерного центра РК, выполняющего функции Казахстанского национального центра данных (КНДЦ) в международной системе мониторинга ОДВЗЯИ. На период открытия Учебного центра именно в Казахстане введен в эксплуатацию самый представительный в Центральной Азии сегмент Международной системы мониторинга (МСМ), создаваемой Организацией ДВЗЯИ. Согласно Приложению к ДВЗЯИ, открытому к подписанию в 1996 г., в Казахстане построены пять объектов: четыре сейсмические и одна инфразвуковая станция. На территории Кыргызстана работает одна трехкомпонентная станция МСМ, на территории Туркменистана создана одна сейсмическая группа МСМ.

С предложением о технической и методической поддержке Учебного центра выступил норвежский сейсмологический центр НОРСАР при финансовой поддержке Министерства иностранных дел Норвегии. НОРСАР имеет богатый опыт в работах по мониторингу ядерных испытаний, в нем ведут исследования опытные специалисты области в сейсмологии. В конце 2009 - начале 2010 г. в Центре ланных в г. Алматы полготовлена техническая база для проведения лекций и практических занятий по изучению и освоению программных пакетов обработки цифровых записей и интерпретации получаемых результатов. Учебный центр призван помочь в подготовке специалистов для других национальных центров данных, в первую очередь, стран Центральной Азии. Будет достигнута унификация применяемых во всех странах форматов данных, методов обработки, а также начнется практический обмен данными для повышения эффективности мониторинга. Все это, безусловно, будет содействовать как решению задач мониторинга ядерных испытаний, так и сейсмической безопасности.



Рисунок 6. На открытии Учебного центра представитель МИД РК Б. Оспанов и координатор программ НОРСАР С. Миккелтвейт



Рисунок 7. Учебный центр в поддержку ДВЗЯИ открыт

## 4. РАБОТЫ ПО ОЦИФРОВКЕ АРХИВНЫХ ЗАПИСЕЙ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ, ПРОИЗВЕДЕННЫХ НА РАЗНЫХ ПОЛИГОНАХ МИРА

В ИГИ НЯЦ РК ведутся работы по оцифровке записей ядерных взрывов, произведенных на разных полигонах мира, из архивов сейсмограмм разных организаций Центральной Азии. Выполнение оцифровки архивных сейсмограмм также могут быть темой для сотрудничества В архивах Институтов сейсмологии всех стран региона имеется большое количество уникальных записей как взрывов, так и землетрясений. Пока использованы ресурсы только архивов ИГИ НЯЦ РК, СОМЭ МОН РК, КСЭ ОИФЗ РАН, начаты работы с архивом ИС АН КР. Сотрудничество сейсмологов стран Центральной Азии должно развиваться. В 2009 – 2010 гг., по существу, только начат новый этап этого сотрудничества. Нерешенных задач - очень много. Необходимы систематические встречи для решения насущных проблем по обмену данными, методам обработки и хранения данных. Необходимы совместные научные исследования, публикация результатов совместных научных работ и представление совместных докладов. Все это будет способствовать достижению целей ДВЗЯИ, а также поможет решению такой важной проблемы, как снижение сейсмического риска на территории Центральной Азии.

## ОРТАЛЫҚ АЗИЯДА СЕЙСМИКАЛЫҚ МОНИТОРИНГІ САЛАСЫНДА ЫНТЫМАҚТАСТЫҚ ТУРАЛЫ

#### Михайлова Н.Н.

#### ҚР ҰЯО Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатов, Қазақстан

Орталық Азияның кеңес дәуірінен кейінгі елдерінде сейсмикалық мониторингі саласында аймақтық ынтымақтастықтың тарихі мен қазәргі күйі қарастырылған. Халықаралық және шетел ұйымдардың көмегімен аймақта деректермен алмасуын жолға салу бойынша іске асырылып жатқан шаралары сипатталған.

## ON REGIONAL COOPERATION IN THE FIELD OF SEISMIC MONITORING IN CENTRAL ASIA

### N.N. Mikhailova

## Institute of Geophysical Research NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

Current and past status of regional cooperation among post-Soviet Central Asian countries in the field of seismic monitoring was considered. Measures to develop data exchange in this region taken with the help of international and foreign organiztions are described.

## УДК 550.34:621.039.9

#### ВКЛАД МОНГОЛИИ В ОДВЗЯИ

#### Сухбаатар У.

#### Исследовательский центр астрономии и геофизики Монгольской академии наук, Монголия, Улан-Батор

Приводится описание современного состояния системы мониторинга для комплексных инструментальных наблюдений на территории Монголии, проводимых в рамках Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний, а также по национальным программам. Характеризуется работа национального центра данных и применение данных мониторинга для решения прикладных задач.

#### Введение

25 сентября 1992 г. президент Монголии Пунсалмаагиин Очирбат сделал заявление о том, что Монголия желает стать одним из государств, свободных от ядерного оружия. Эта инициатива была радушно принята соседними странами, в первую очередь, Российской Федерацией и Китаем, являющимися ядерными державами, а также мировым сообществом в целом. 28 февраля 2000 г. посол Монголии при ООН Джаргалсайхан Енхсайхан представил письмо с Законом об отказе Монголии от ядерного оружия, которые затем были распространены как документ ООН А/55/56 S/2000/160. На этом этап международного признания Монголии как страны без ядерного потенциала был официально завершен.

Договор о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (ДВЗЯИ) подписан правительством Монголии 01 октября 1996 г. и ратифицирован Парламентом Монголии 08 августа 1997 г. Соглашение о проведении работ, включая постсертификационные работы, в отношении установок международного мониторинга для ДВЗЯИ между правительством Монголии и Подготовительной Комиссией Организации ДВЗЯИ (ОДВЗЯИ) подписан 05 июня 2000 г.

## Международная система мониторинга ДВЗЯИ

Согласно ДВЗЯИ Международная система мониторинга (МСМ) должна обеспечить обнаружение скрытых ядерных взрывов в любой среде: подземной, подводной или на земле. Целью МСМ является обнаружение, идентификация и определение местоположения любого такого испытания. В систему контроля вовлечен комплекс технологий: сейсмологическая, гидроакустическая, инфразвуковая и радионуклидная. Поддержку этим технологиям обеспечивают соответствующие средства глобальной связи (ГС) и Международный центр данных (МЦД), куда передаются данные мониторинга. МСМ, предусматривающей создание 321 станций и 16 лабораторий по всему миру. Эти 337 установок обеспечат отслеживание на планете событий с различпризнаками проведенного ными ядерного испытания. Для обеспечения равномерного охвата всей планеты многие станции находятся в отдаленных и труднодоступных местах. Это, в свою очередь, налагает особые требования к инженерным изысканиям, которые ранее здесь не применялись. В МСМ входят следующие виды станций: 1 - первичные и вспомогательные сейсмические станции. обнаруживающие и локализующие сейсмические события: 2 гидроакустические станции. обнаруживающие источники акустических волн в океане природного и техногенного характера; 3 инфразвуковые станции, обнаруживающие источники низкочастотных сигналов в атмосфере, также природного и техногенного характера; 4 - радионуклидные станции для обнаружения радиоактивных частиц от атмосферных взрывов или освободившихся частиц от подземных/подводных взрывов.

Станции	Запланировано	Сертифицировано	Тестируемые	Строится	Запланировано	
Первичная сейсмическая	50	41	4	2	3	
Вспомогательная сейсмическая	120	94	13	7	6	
Инфразвуковая	60	42	-	7	11	
Гидроакустическая	11	10	-	1	-	
Радионуклидная	80	58	5	10	7	
Благородного газа	40	24	-	-	16	
Радионуклидная лаборатория	16	10	-	-	6	

Таблица 1. Состав Международной системы мониторинга

## Установки МСМ в Монголии

В 1994 г. при поддержке французских специалистов вблизи г. Улан-Батор установлена первая цифровая телеметрическая сейсмическая сеть. Это стало началом долговременного, успешного научного и технического сотрудничества между RCAG (Research Center for Astronomy and Geophysics of Mongolian Academy of Sciences) в Монголии и DASE (Departement Analyse Surveillance, Environnement) во Франции в области геофизики, в частности, в поддержку ДВЗЯИ. С 1998 г. в Улан-Баторе созданы четыре установки MCM: сейсмическая минигруппа PS25, инфразвуковая станция IS34, радионуклидная станция RN45 и станция измерения благородного газа SPALAX (Рисунок 1). RCAG как исполнительный агент по обслуживанию станций МСМ в Монголии вместе с французскими специалистами создали инфраструктуру для станций и установили необходимое оборудование.

В настоящее время обслуживание установок МСМ в Монголии осуществляется на двух уровнях. Первый уровень - это 8 операторов, которые осуществляют ежедневные рабочие процедуры, второй уровень – высококвалифицированные инженеры и ответственные специалисты по каждой из технологий мониторинга в RCAG, которые осуществляют профилактическое обслуживание станций. В том случае, когда возникающая проблема не может быть разрешена на первом уровне, на площадку станции приезжает специалист второго уровня обслуживания.



Рисунок 1. Объекты МСМ в Монголии

## Сейсмическая минигуппа PS25

Сейсмическая минигруппа PS25 установлена в 2000 г. в районе Сонгино - Тув аймаг в 55 км от Улан-Батора на северо-запад (рисунок 2). Группа из 10 элементов оснащена современным сейсмическим оборудованием, системами независимого питания и передачи данных. После успешного тестирования и оценки сейсмическая минигруппа PS25 была сертифицирована комиссией ВТС ОДВЗЯИ 05 декабря 2003 г. PS25 - одна из 50 первичных станций МСМ, которая отправляет свои данные в режиме реального времени в МЦД и позволяет с высокой точностью обнаружить и локализовать источники природных и техногенных сейсмических событий.



Рисунок 2. Конфигурация сейсмической станции PS25

Основная задача сейсмических данных в верификационной системе – это распознавание подземных ядерных взрывов среди многочисленных землетрясений, происходящих на территории Земли. Минигруппа PS25 расположена в отдаленной зоне, далеко от промышленных объектов, и поэтому регистрирует высококачественные анные при низком уровне шумов. Данные играют важную роль при проведении исследований в области сейсмологии и изучения структуры земной коры вместе с другими станциями MCM, а также в изучении сейсмичности Улан-Батора и прилегающих территорий.

#### Инфразвуковая станция IS34MN

Инфразвуковая станция I34MN расположена в районе Сонгино, в 55 км к северо-западу от Улан-Батора (рисунок 3). Станция сертифицирована комиссией ВТС ОДВЗЯИ 19 декабря 2002 г.

МЦД использует инфразвуковые данные для определения местоположения и распознавания ядерного взрыва среди таких природных явлений как метеориты, вулканы, другие метеорологические события, а также среди техногенных явлений - запуски ракет, полеты сверхзвуковых самолетов. На рисунке 4 приведен пример записи запуска ракеты Шенжу-5 с космодрома Джиудуан в Китае 15 октября 2003 г. станцией IS34MN.

#### ВКЛАД МОНГОЛИИ В ОДВЗЯИ



Рисунок 3. Инфразвуковая станция IS34MN



1 - количество элементов; 2 – взаимосогласованность (сек); 3 – корреляция; 4 – амплитуда (Па); 5- азимут (град); 6 – скорость (км/сек); 7 – записи каналов

Рисунок 4. Запись запуска ракеты Шенжу-5 с космодрома Джиудуан 15 октября 2003 г. инфразвуковой станцией IS34 MN

По доступности данных 2009 г. инфразвуковая станция IS34 MN является одной из лучших станций MCM.

## Радионуклидная станция MNP45 и станция измерения благородного газа MNX45 (SPALAX)

Радионуклидная станция MNP45 (рисунок 5) расположена на территории Алтанбулаг провинции Тув в 55 км на юго-восток от Улан-Батора. Станция сертифицирована комиссией ВТС ОДВЗЯИ 26 мая 2003 г.

Станция MNP45 содержит пробоотборник воздуха, оборудование для обнаружения элементов, компьютеры и коммуникационное оборудование. В пробоотборнике воздух проходит через фильтр, который удерживает более 85% всех частиц из потока, поступающего в него. Фильтры меняются ежедневно. Снятые фильтры сначала охлаждаются в течении 24 час, а затем еще в течении 24 час обрабатываются в специальном устройстве. Получаемый гаммаспектр пересылается в МЦД для дальнейшего анализа. Ежедневные рабочие процедуры на станции выполняют 10 инженеров и техников, в том числе 2 оператора в здании, где и установлена станция MNP45.



Рисунок 5. Радионуклидная станция МNP45

Станция SPALAX (Systeme de Prelevement d'air Automatique en Ligne avec l'Analyse des radio Xenons)

Станция измерения благородных газов SPALAX (рисунок 6) с анализатором, который обнаруживает радиоактивность в атмосфере, установлен в Монголии Комитетом по атомной энергии Франции (CEA/DIL/CRCE) в мае 2006 г.

#### ВКЛАД МОНГОЛИИ В ОДВЗЯИ



Рисунок 6. Станция измерения благородного газа SPALAX МСМ

Станция SPALAX полностью автоматизирована и отбирает благородный газ из атмосферы для обнаружения 4-х радиоизотопов ксенона - Xe131m, Xe133m, Xe133, Xe135. SPALAX работает в автоматическом режиме 24 часа в сутки, из которых в течение 23,6 часов производятся спектральные измерения. Результаты измерения этих изотопов дают наибольшую возможность различить ядерные взрывы от взрывов гражданского назначения. Структурная схема станции приведена на рисунке 7.



Рисунок 7. Структурная схема станции измерения благородных газов SPALAX

Монгольский национальный центр данных

Сейсмологические наблюдения и исследования начаты в Монголии еще в 1957 г. благодаря записям установленной аналоговой сейсмической станции. Число аналоговых станций из года в год возрастало, а в 1994 г. была установлена сеть цифровых сейсмических станций вокруг Улан-Батора в рамках программы сотрудничества Монголии с Францией в области геофизики. Эта сеть включает 6 станций, расположенных на расстоянии от 25 до 75 км от Улан-Батора. Одна комплексная станция установлена в Улан-Баторе Геологической Службой США (USGS). Кроме того, как описано выше, в 2001 г. установлена сейсмическая минигруппа PS25, входящая в состав МСМ. Данные станций передаются в режиме реального времени в МЦД и параллельно в монгольский национальный центр данных МНЦД. В рамках сотрудничества между AFTAC, США и RCAG в Монголии установлены также сейсмические группы малых апертур - ALMAR, ERMAR и DOMAR. Передача данных с этих групп в МНЦД осуществляется по сети VSAT с очень небольшой задержкой.

МНЦД создан в 2007 г. как часть и полноценный компонент МЦД. МНЦД ответственен за сбор данных мониторинга, их обработку и анализ, а также за проведение исследований по сейсмической активности с использованием данных, получаемых национальной сейсмической сетью Монголии, а также некоторыми установками МСМ, находящимися за пределами ее территории. Результаты обработки и анализа данных затем подготавливаются как продукты МНЦД в виде каталогов, бюллетеней и отчетов (рисунок 8). Не только эти информационные продукты, но также и архивы волновых форм позволяют проводить ряд исследований, включающих изучение сейсмической активности Монголии, регионального сейсмического режима, механизмов очагов сильных землетрясений, поглощения сейсмических волн, оценки сейсмической опасности, глубинной структуры земной коры, а также развитие геодинамических процессов. Всего по состоянию на начало 2010 г. в Монголии функционируют 69 сейсмических станций, которые следят за сейсмическими событиями как в Монголии, так и на прилегающих территориях 24 часа в сутки 7 дней в неделю. Передача и регистрация данных ведется по 114 каналам, из которых 8 каналов - с инфразвуковыми данными. Ежедневно МНЦД получает и обрабатывает чуть больше 1 терабайта информации.

#### ВКЛАД МОНГОЛИИ В ОДВЗЯИ



Рисунок 8. Структура обработки данных в МНЦД

## НАУЧНОЕ И ГРАЖДАНСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

События, которые детектируются сейсмической группой PS25, представляют большую значимость для изучения сейсмической активности территории от границ Сонгино-Сонголонской области и до зоны разлома Хустая около Улан-Батора.

С середины 2005 г. наблюдалась высокая сейсмическая активность в Сонгино-Сонсголонском регионе – к западу от центраУлан-Батора на удалении порядка 20 км. Полученная информация свидетельствует о том, что данный регион стал активным. PS25 детектирует порядка 1300 землетрясений, по которым прослеживается зона активности от 20 - 26 км в длину и 13 км на глубину.

Модель распространения инфразвуковой волны в атмосфере рассчитана с использованием базы инфразвуковых данных с 2000 г. по 2009 г. Проведены исследования, направленные на определение типов источников, генерирующих инфразвуковые волны. Благодаря этим исследованиям установлено, что скорость инфразвуковых волн, распространяющихся на короткие расстояния, относительно низкая. Инфразвуковые волны на высоте 10 м от поверхности или проходящие через стратосферный слой имеют скорость 330 - 350 м/сек, что означает, что инфразвук может быть зарегистрирован на расстоянии более 200 км от источника. Детально изучено распространение инфразвука от карьерного взрыва в Багануре на расстоянии 140 км (скорость 240 - 280 м/сек).

## Заключение

Монголия как государство, не обладающее ядерным оружием, активно участвует во всех мероприятиях, организованных ОДВЗЯИ. Правительство Монголии и ОДВЗЯИ эффективно работают с целью развития взаимовыгодного и успешного сотрудничества, а также продвижения ДВЗЯИ во всем мире и, в частности, в Азиатском регионе. Сейсмическая минигруппа PS25, инфразвуковая станция IS34, радионуклидные станции RN45 и SPALAX установлены являются частью MCM.



Рисунок 9. Карта эпицентров землетрясений на территории вокруг Улан-Батора

Установка и функционирование современных верификационных технологий ДВЗЯИ в Монголии повышает и улучшает национальные технические и научные возможности. Последние результаты показали насколько данные МСМ и продукты МЦД могут быть полезны для изучения сейсмической опасности для Улан-Батора. Сейсмические данные также применяются в исследованиях землетрясений и структуры земной коры. Большие надежды возлагаются на дальнейшее развитие сотрудничества ОДВЗЯИ и Монголии в продвижении реализации ДВЗЯИ во всем мире и в, частности, в Азии, а также на успешное функционирование верификационного режима в Монголии.

## ЯСБТШ МОНГОЛИЯНЫҢ ҮЛЕСІ

## Сухбаатар У.

#### Монголия Ғылыми академиясының Астрономия және геофизиканың зерттеулік орталығы, Монголия, Улан-Батор

Ядролық сынақтарына бәрін сыйдыратын тыйым салу туралы шарты шегінде және ұлттық бағдарламалары бойынша жүргізілетін Монголия аумағындағы кешенді инструментальды бақылау үшін мониторингі жүйесінің қазіргі күйінің сипаттамасы келтіріледі. Ұлттық деректер орталығының жұмысы және мониторингі деректерін қолданбалы міндеттерін шешуінде пайдалануы сипатталады.

### CONTRIBUTION OF MONGOLIA TO CTBTO

#### U. Sukhbaatar

#### Research Center for Astronomy and Geophysics of Mongolian Academy of Sciences, Mongolia, Ulaanbaatar

This paper describes a present-day monitoring system for integrated instrumental measurements on the territory of Mongolia under the Comprehensive Nuclear Test-Ban Treaty. Routine operation of Mongolian National Data Center and monitoring data applications are characterized.

## РАЗВИТИЕ СЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА В КЫРГЫЗСТАНЕ

#### Абдрахматов К.Е., Берёзина А.В.

#### Институт сейсмологии Национальной Академии наук Кыргызской Республики, Бишкек

Освещается история создания и современное состояние сети инструментальных сейсмических наблюдений, проводимых Институтом сейсмологии Национальной Академии наук Кыргызской Республики (ИС НАН КР), характеризуются особенности условий мониторинга, использование его данных и оценка качества работы сейсмических сетей на примере двух промышленных взрывов, проведённых 22.12.2009 г. при строительстве гидроэлектростанции «Камбар-Ата2»

В Кыргызстане 94.6% территории составляют горы, и, следовательно, высокая сейсмическая активность является естественным явлением для Республики. Ежегодно здесь фиксируют около 3500 землетрясений, десятки из которых являются ощутимыми, а некоторые разрушительными. Поэтому сейсмический мониторинг является одним из приоритетных направлений в научно-исследовательской деятельности Академии наук КР.

Инструментальные сейсмические наблюдения на территории Кыргызстана ведутся с 1927 г. - со времени установки первой сейсмической станции в столице Республики г. Фрунзе (ныне г. Бишкек). Однако планомерное расширение сети сейсмических наблюдений было начато только в конце 1960-х годов, и к середине 1980-х её плотность достигла своего максимума - было установлено 34 аналоговых станций. С распадом СССР из-за материальных трудностей количество станций стало сокращаться, к тому же возникла объективная необходимость модернизации национальной сети наблюдений. Так, если к 1990 г. все станции Института сейсмологии были еще аналоговыми, то в развитых странах уже в 1970е годы проходила испытание аппаратура нового поколения с цифровой формой регистрации, а к концу 70-х годов была создана первая мировая сеть цифровых станций GSN (Global Seismograph Network). Одна из станций этой сети, по Соглашению с Правительством Кыргызстана, в 1990 г. была установлена в штольне геофизической обсерватории «Ала-Арча» Института сейсмологии НАН КР, расположенной на северном склоне Кыргызского хребта в ущелье Ала-Арча, на высоте 1700 м над уровнем моря и 30 км от г. Бишкек. С 1991 г. по соглашению с Консорциумом IRIS (Incorporated Research Institutions for Seismology, США) в Кыргызстане создана и начала функционировать сеть KNET (Kyrgyzstan Telemetered Network), состоящая из 10 цифровых широкополосных сейсмических станций с телеметрической передачей данных в режиме реального времени в г. Бишкек и в г. Сан-Диего (Калифорния, США). Данные этих цифровых станций совместно с данными аналоговых станций используются Институтом сейсмологии НАН КР для составления каталога землетрясений, что обеспечивает значительное повышение точности локализации событий.

В 1996 г. на Генеральной Ассамблее ООН был открыт для подписания Договор о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (ДВЗЯИ). В этом же году Кыргызстан подписал, а в 2003 г. ратифицировал его. С самого начала создания Организации Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (ОДВЗЯИ) Кыргызская Республика, в лице Института сейсмологии НАН КР, является активным её участником, внося свой посильный вклад в проведение сейсмического мониторинга Центрально-Азиатского региона.

В соответствии с Приложением к ДВЗЯИ в 1996 г в состав вспомогательной сети Международной системы мониторинга (МСМ) ОДВЗЯИ вошла трёхкомпонентная цифровая сейсмическая станция «Ала-Арча» сети GSN под аббревиатурой AS060. В странах ближнего и дальнего зарубежья станция широко известна благодаря уникальным условиям, обеспечивающим регистрацию очень слабых сейсмических сигналов высокочувствительными измерительными приборами. Кроме того, Кыргызстан имеет достаточно выигрышное территориальное расположение как с точки зрения мониторинга ядерных взрывов, так и для изучения сейсмичности Центрально-Азиатского региона. При текущих политических событий, когда некоторые страны проводят активные работы по освоению и различному использованию ядерной энергии. очевидна возросшая роль станции AS060 в Международной системе мониторинга. В 2002 - 2003 г. Технический совет Подготовительной комиссии ОДВЗЯИ проводит работы по реорганизации станции, создаёт Национальный центр данных (NDC093) на базе ИС НАН КР и устанавливает спутниковую связь между станцией AS060 и Международным центром данных (МЦД) в Вене, а также между станцией AS060 и Центром данных NDC093 в г. Бишкеке. В марте 2007 г. на заседании экспертной комиссии ОДВЗЯИ проведена сертификация сейсмической станции AS060, чем признано соответствие ее работы международным стандартам. Станция Ала-Арча одновременно является составной частью Национальной системы сейсмического мониторинга.

В 2007 г. Сейсмологическая служба Норвегии (NORSAR), в рамках сотрудничества с ОДВЗЯИ, предоставила ИС НАН КР десять цифровых станций системы GURALP (Англия) для замены морально устаревших аналоговых станций в местах их размещения. 02.10.2009 г. Международная Федерация Цифровых Сейсмографических Сетей FDSN (Federation of Digital Broadband Seismograph Networks) зарегистрировала эти станции как сеть KRNET (Kyrgyz Republic Digital Network). Для контроля качества работы сети KRNET результаты обработки ряда событий, зарегистрированных станциями сети, были сопоставлены с решениями различных глобальных и региональных Центров данных. Анализ показал, что данные, полученные по сети KRNET, хорошо согласуются с данными других агентств. Кроме того, решения, полученные по данным сети KRNET, имели высокую точность локализации событий, что подтверждалось самыми малыми эллипсами ошибок.

Одной из важнейших характеристик работы любой цифровой сети является оперативность передачи данных. Институт сейсмологии НАН КР ведёт работу по налаживанию передачи данных станций сети KRNET в режиме реального времени сначала в Центр данных ИС НАН КР (на базе GPRS-Интернета) и далее, на базе свободного доступа, - в центр данных FDSN (на базе оптико-волоконного Интернета). Эти работы проводятся при финансовой поддержке IRIS и NORSAR. Проводимая модернизация открывает новые возможности для регионального и международного сотрудничества, так как создается материально-техническая база для перехода от статистического подхода в исследованиях сейсмичности Тянь-Шаня к детерминистскому.

В 2008 г. по инициативе Германской организации по международному развитию потенциала (InWent) в тесном сотрудничестве с Германским центром исследований Земли (GFZ, г. Потсдам) и при финансовой поддержке Министерства иностранных дел Германии начаты работы по проекту «Трансграничное предотвращение стихийных бедствий в Центральной Азии» создание Центральносейсмического Азиатской сети мониторинга CAREMON (GEOFON). По проекту в каждом из государств Центральной Азии (Казахстан, Кыргызстан, Таджикистан, Туркмения и Узбекистан) установлены широкополосные цифровые станции, данные которых по спутниковым каналам связи в режиме реального времени поступают в центральный пункт сбора данных в г. Потсдам с последующей их передачей всем участникам проекта. На территории Кыргызстана в рамках этого проекта установлены две цифровые станции - на севере и юге Республики, - данные которых в режиме реального времени поступают в г. Бишкек.

Таким образом, в национальную систему сейсмического мониторинга входят 15 аналоговых станций, 10 цифровых станций сети KNET, 10 цифровых станций сети KRNET и 2 цифровые станции сети CAREMON, что позволяет решать многие вопросы изучения и мониторинга землетрясений, техногенных явлений на контролируемой территории (рисунок 1).

Результаты наблюдений Национальной системой мониторинга явились частью обширного исходного материала для раскрытия известных на сегодня основных закономерностей сейсмичности Тянь-Шаня. Сводный каталог землетрясений для территории Кыргызстана содержит сведения об исторической сейсмичности с M ≥ 6.5, начиная с 250 года до нашей эры.



Треугольный значок: белый - станция сети KNET, чёрный - аналоговая станция, красный – станция сети KRNET, жёлтый – станция сети CAREMON на территории Кыргызстана

Рисунок 1. Схема расположение станций системы сейсмического мониторинга в Кыргызстане

Инструментальные данные в этом каталоге представлены с 1929 г. и содержат, без пропуска, информацию о более слабых событиях, с  $M \ge 4.5$ . С 1970 г. для всей территории Кыргызстана стало возможным не только определять эпицентры еще более слабых событий, с  $M \ge 3$ , но и начать систематическое определение механизмов очагов землетрясений.

Высокая сейсмичность территории Кыргызстана обусловлена высокой активностью тектонических процессов и крайне сложным геологическим строением Тянь-Шаня. Только за последнее столетие здесь произошло три землетрясения с магнитудой М  $\geq 8$ , семь – с магнитудой М  $\geq 7$  (рисунок 2).

Ежегодно регистрируется в среднем около трёх тысяч землетрясений, из которых примерно два-три десятка входит в категорию ощутимых, с  $M \ge 2.5$  (рисунок 3).

Приблизительно каждые 10 – 15 лет происходят сильные, разрушительные события. Поскольку наиболее густонаселённые районы Кыргызстана расположены в высокосейсмичных областях, оценка сейсмической опасности является крайне важной задачей. Сейсмический мониторинг Тянь-Шаня даёт основание для более адекватного и оперативного реагирования на произошедшие сейсмические катастрофы, а также позволяет осуществлять превентивные меры по предотвращению и снижению ущерба от природных катастроф.

Материалы, получаемые при проведении сейсмического мониторинга, используются в фундаментальных и прикладных научных исследованиях, проводимых специалистами Института сейсмологии НАН КР, а именно:

• Оценка сейсмической опасности и сейсмическое районирование различных масштабов.

- Изучение строения земной коры и верхней мантии сейсмогенных областей.
- Изучение сейсмического режима в очаговых зонах сильнейших землетрясений.
- Оценка современной геодинамики Тянь-Шаня.
- Изучение влияния инженерной деятельности человека на сейсмический режим региона.
- Изучение напряжённо-деформационного состояния земной коры Тянь-Шаня.

Наряду с изучением сейсмического режима Тянь-Шаня, национальная система мониторинга позволяет регистрировать и анализировать подземные ядерные, а также промышленные взрывы. Полученные результаты используются для решения ряда прикладных задач. Одной из них является изучение и совершенствование скоростных моделей для повышения точности параметров сейсмических событий, необходимость которых неоднократно отмечена в документах ОДВЗЯИ. Государства Центральной Азии расположены в регионе со сложными тектоническими условиями, где эта задача особенно актуальна. Обработка и анализ записей произведённых взрывов позволяют составить более детальную картину скоростной структуры земной коры рассматриваемой территории и уточнить используемые скоростные модели. Последним значимым событием, позволившим обратиться к задаче уточнения скоростного разреза, был двойной взрыв, произведённый 22.12.2009 г. на территории Кыргызской Республики при строительстве гидроэлектростанции «Камбар-Ата2» и ставший уникальным сейсмическим событием. По своему эффекту взрыв соизмерим с подземным ядерным взрывом или тектоническим землетрясением (рисунок 4).



Рисунок 2. Эпицентры землетрясений на территории Кыргызстана с M ≥ 4.5 за весь период инструментальных наблюдений



Рисунок 3. Эпицентры землетрясений на территории Кыргызстана с М ≥ 2.5 за период с 2007 г. по 2009 г.



Рисунок 4. Двойной взрыв, произведённый при строительстве гидроэлектростанции «Камбар-Ата2»

Район расположения каскада Нарынских ГЭС на р. Нарын считается сейсмически активным, здесь интенсивно проявляются новейшие и современные тектонические движения. В тектоническом отношении территория находится на стыке складчатых систем Северного, Южного и Срединного Тянь-Шаня, разделённых Талассо-Ферганским и Атойнокским глубинными разломами. Макросейсмические данные за достаточно большой промежуток времени свидетельствуют о стабильной тектонической активности района. Основная тектоническая деятельность связана с Таласо-Ферганским глубинным разломом, который проходит вблизи района расположения гидроэлектростанции. Активным также является Чаткальский разлом, расположенный северо-западнее Таласо-Ферганского глубинного разлома. Часть территории этого района охватывает плейстосейстовую область зоны катастрофического 9 - 10 балльного

Чаткальского землетрясения (1946). За всё время наблюдений было зафиксировано ещё несколько сильных землетрясений в пределах восточной части Ферганской впадины и её горного обрамления.

Строительство Камбаратинской ГЭС-2 было возобновлено в 2008 г. На основе приостановленного в конце 1980-х годов и ныне дорабатываемого проекта плотина гидростанции сооружается с применением взрыва, в результате которого происходят дробление и сброс породного массива в русло р. Нарын. Для образования тела плотины в её створе на правом берегу р. Нарын произведены взрывы двух зарядов массой 700 т и 2160 т взрывчатых веществ (ВВ) с временным интервалом в 1.7 сек. Заряды были заложены в штольнях, субпараллельных дневной поверхности, так что линия наименьшего сопротивления (нормаль к этой поверхности — ЛНС) для взрыва основного заряда (2160 т) превышала 100 м. Камбаратинский взрыв зарегистрирован сетью сейсмических станций, расположенных на территории Кыргызстана: 10 цифровыми сейсмическими станциями сети KNET; 9 цифровыми сейсмическими станциями сети KRNET; 15 аналоговыми сейсмическими станциями сети. Несмотря на достаточно сложный характер записи (рисунок 5), удалось получить очень хорошую локализацию события и дать корректную энергетическую оценку мощности взрывов: первого - M = 4.31, и второго - M = 5.14.



Рисунок 5. Запись Камбаратинского взрыва станциями сети KNET

Сведения о взрывах, произведенных при строительстве Камбаратинской ГЭС-2, и результаты обработки сейсмограмм станций сети KNET приведены в нижеследующей таблице.

Записи взрывов использованы для тестирования работы сетей KRNET и KNET. Был построен годограф по измеренным временам первых вступлений. Выяснилось, что времена первых вступлений на записях станций сети KRNET: Эркин-Сай (ERK), Арал (ARL), Нарын (NRN) хорошо легли на годограф, построенный по данным станций сети KNET (рисунок 6).

Полученный результат свидетельствует в пользу того, что к востоку от 74-го меридиана верхняя часть земной коры довольно однородна по скоростной структуре, что, в общем, совпадает с выводами член-корреспондента НАН КР Сабитовой Т. М., сделанными ранее при построении 3-х мерной скоростной модели.

Nº	Дата	Время	Широта	Долгота	Глубина, км	Магнитуда, (М <sub>РV</sub> )	Vp/Vs	Vp	Vs
1-й взрыв	22.12.2009	5 <sup>h</sup> 54 '33.66"	N 41.776 <sup>0</sup>	E 73.330 <sup>0</sup>	2.67	4.31	1.712	6.20	3.62
2-й взрыв	22.12.2009	5 <sup> h</sup> 54 ′35.44″	N 41.770 <sup>0</sup>	E 73.335 <sup>0</sup>	7.19	5.14	1.715	6.21	3.62
Координаты взрыва по GPS			N 41.775 <sup>0</sup>	E 73,3 <sup>0</sup>					
Inumerature Vn Vs. B. KM/CeK									

Таблица. Сведения о взрывах при строительстве Камбаратинской ГЭС-2 и полученные характеристики по записям сейсмических станций Полго Вроид Широго Полгого Глубина, Магнитуда, Va



Рисунок 6. Схема регистрации исходных данных (а) и годограф, построенный по сейсмограммам второго взрыва (б)

Таким образом, изучение данных, полученных при проведении Камбаратинских взрывов, уже дало конкретные научные и практические результаты по изучению строения земной коры Тянь-Шаня и оценки качества работы сетей станций, используемых для сейсмического мониторинга территории Кыргызстана.

Как и любые другие природные явления, землетрясения не признают государственных границ (они трансграничны), поэтому изучение сейсмических процессов в странах юго-восточного региона Азии носит международный характер. Сейсмический мониторинг Тянь-Шаня с использованием современных цифровых сетей наблюдений позволяет создать информационную базу для научных исследований не только учёных Кыргызской Республики, но и всего мирового научного сообщества.

## ҚЫРҒЫЗСТАНДА СЕЙСМИКАЛЫҚ МОНИТОРИНГІН ДАМЫТУ

#### Абдрахматов К.Е., Берёзина А.В.

#### Кыргыз Республикасы Ұлттық ғылыми академиясының Сейсмология институты (ҚР ҰҒА СИ), Бишкек

Қырғызстан аумағында ҚР ҰҒА Сейсмология институты жүргізетін инструментальды сейсмикалық бақылау желілерін құру тарихы мен қазіргі күйі баяндалады, мониторингі жағдайларының ерекшеліктері, оның деректерің пайдалануы және «Қамбар-Ата 2» гидроэлектрстанциясы құрылысында 2009 ж. 12.22-сінде жүргізілген екі өнеркәсіптік жарылыстары үлгісінде сейсмикалық желілер жұмысының сапасын бағалауы сипатталады.

### DEVELOPMENT OF SEISMIC MONITORING IN KYRGYZSTAN

#### K.E. Abdrakhmatov, A.V. Berezina

#### Institute od Seismology of National Academy of Sciences KR, Bishkek, Kyrgyz Republic

The report is dedicated to history of creation and existing state of instrumental seismic observational network in Kyrgyzstan. The observations are carried out by Institute of Seismology NAS KR. Monitoring conditions are described its data application and seismic networks performance estimation in terms of two industrial explosions carried out in December 22, 2009 in constructing water-power station Kambar-Ata 2.

## СЕТЬ ЦИФРОВЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ В УЗБЕКИСТАНЕ И ЕЁ РАЗВИТИЕ

<sup>1)</sup>Садиков Ф.С., <sup>1,2)</sup>Ибрагимов А.Х., <sup>1)</sup>Алимухамедов И.М.

<sup>1)</sup>Институт сейсмологии АН РУз, Ташкент, Узбекистан <sup>2)</sup>Ташкентская сейсмологическая обсерватория, Ташкент, Узбекистан

Описана действующая цифровая система мониторинга сейсмических событий в Узбекистане, включающая 18 станций, центр данных и систему сбора, а также перспективы расширения системы уже к концу 2011 г., что улучшит качество и полноту решения основных задач мониторинга сейсмических событий.

Мониторинг сейсмических событий до 2006 г. осуществлялся в Узбекистане на основе аналоговой (гальванометрической) регистрации, а с 2006 г. - на основе цифровой регистрации.

#### ДЕЙСТВУЮЩАЯ ЦИФРОВАЯ СИСТЕМА МОНИТО-РИНГА СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ

В 2006 г. при поддержке STCU (Science Technology Center in Ukraine) в рамках гранта STCU #3394 было приобретено оборудование и произведен монтаж 18 сейсмических станций по всей территории Узбекистана (рисунок 1).

В состав комплекта каждой станции входят четырехканальные 16-разрядные АЦП "Webtronics", GPS-приемник "Garmin", 4 фотоэлектрических солнечных панели, контроллер заряда аккумуляторов, UPS "NOVA 600AVR" и промышленный компьютер EBS-1363. Система способна работать в энергонезависимом режиме неопределенно долгое время. Регистрация ведется на двух уровнях усиления сейсмических колебаний. Для регистрации сильных землетрясений использован канал пониженной чувствительности с усилением в 25 раз меньше, чем в обычных каналах. Для регистрации используется программа WinSDR, позволяющая в реальном времени фильтровать сигнал. Формат событийных файлов – SAC, PSN или MiniSEED.

#### ПЕРЕДАЧА ДАННЫХ

Восемь станций (Ташкент, Андижан, Фергана, Наманган, Мингтут, Самарканд, Хива, Карши) подключены к выделенным каналам связи. Событийные файлы автоматически отправляются на FTP- сервер, расположенный в здании Ташкентской сейсмической обсерватории. На остальных 10 сейсмических станциях (Шахимардан, Чимион, Газли, Нурата, Тамдыбулак, Чарвак-1, Чарвак-2, Чимган, Бухара, Джизак) после срабатывания триггера событийные файлы отправляются на сервер по dial-up дозвону. Для сводной обработки применяется программа WinQuake. На рисунке 2 приведена блок-схема цифровой станции и структура системы передачи данных.



Значки: кружок – работающая сейсмическая станция, прямоугольник – планируемая сейсмическая станция

Рисунок 1. Схема расположения сети цифровых сейсмических станций в Узбекистане с учетом её развития



Рисунок 2. Блок-схема цифровой станции и структура системы передачи данных

В Институте сейсмологии АН РУз создан сайт службы срочных донесений (http://isas.uzsci.net), на котором размещена информация по локации и определению основных параметров событий, зарегистрированных сетью сейсмического мониторинга.

## ПЛАНИРУЕМАЯ ЦИФРОВАЯ СИСТЕМА МОНИТО-РИНГА СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ

Постановлением Кабинета Министров РУз № 191 от 9.07.2009 г. предусмотрено развитие сети цифровых сейсмических станций в ближайшее время для улучшения решения следующих задач:

- автоматической локации и определения основных параметров землетрясений;
- оперативного информирования населения об основных параметрах землетрясений;
- создания системы рассылки информации о сейсмических событиях по электронной почте;
- информирования населения об ощутимых землетрясениях по SMS с использованием сервиса операторов сотовой связи;
- развития системы AutoDRM (Automatic Data Requesr Manager – менеджера автоматического формирования набора данных по запросу с использованием специальной формы) с обращением к базе данных;
- обеспечения доступа к FTP-серверу с сейсмическими событийными файлами в формате MiniSEED или SAC по выделенному аккаунту для ведущих сейсмологических центров, а также организации с ними обмена данными в режиме реального времени.

Цифровая система сейсмического мониторинга в Узбекистане будет обеспечивать: 1. Полное покрытие территории цифровой системой мониторинга с регистрацией сейсмических событий с магнитудой М≥1,5.

2. Передачу данных в центр обработки в непрерывном режиме (для автоматической локации) или отправку сейсмических событийных файлов.

3. Локацию сейсмических событий по принципу региональных «кустов», т.к. земная кора Узбекистана характеризуется неоднородным строением и для каждого региона существуют своя скоростная модель и годограф.

 Создание куста из 8 широкополосных станций для автоматической локации удаленных телесейсмических событий.

5. Автоматическую локацию землетрясений и определение их основных параметров, а также автоматическое построение механизма их очагов. Для этого существует ряд программных средств (EarthWorm, SeiScomp). Все эти программные пакеты позволяют также производить автоматическую локацию в интерактивном режиме с участием интерпретатора, размещать информацию в базе данных ОRACLE и выкладывать её на WEB-странице службы срочных донесений.

6. Создание единой системы, позволяющей непрерывно контролировать работоспособность локальных станций и качество поступающей информации.

Предусмотрено оборудовать каждую цифровую сейсмическую станцию следующим комплектом аппаратуры:

 трехкомпонентным велосиметром производства Guralp, трехкомпонентным акселерометром и цифровым регистратором;

- коммуникационным процессором, сохраняющий и передающий данные разными методами (если в сейсмостанции не предусмотрены хранение и передача данных);
- системой энергонезависимого питания солнечные панели, контроллер заряда аккумуляторов, сами аккумуляторы и источник беспе-

ребойного питания (если оборудование работает при напряжении 220 В).

Ожидается, что уже в конце 2011 г. система сейсмического мониторинга Республики Узбекистан будет состоять из 40 цифровых сейсмических станций (рисунок 1).

## ӨЗБЕСТАНДА ЦИФРЛЫҚ СЕЙСМИКАЛЫҚ СТАНЦИЯЛАР ЖЕЛІСІ ЖӘНЕ ОНЫҢ ДАМУЫ

<sup>1)</sup>Садиков Ф. С., <sup>1,2)</sup> Ибрагимов А. Х., <sup>1)</sup>Алимухамедов И. М.

<sup>1)</sup>ӨзР ҒА Сейсмология институты, Ташкент, Өзбекстан <sup>2)</sup>Ташкент сейсмологиялық обсерваториясы, Ташкент, Өзбекстан

18 станциясын, деректер орталығы мен жинау жүйесін қосатын Өзбестандағы сейсмикалық оқиғалар мониторингінің істегі цифрлық жүйесі, сондай-ақ 2011 ж. аяғына жүйені кеңейту перспективалары сипатталған, бұл сейсмикалық оқиғалар мониторингінің негізгі міндеттерін шешу сапасы мен толықтығын жақсартады.

## NETWORK OF DIGITAL SEISMIC STATIONS IN UZBEKISTAN AND ITS FURTHER DEVELOPMENT

## <sup>1)</sup>F.S. Sadikov, <sup>1,2)</sup>A.Kh. Ibragimov, <sup>1)</sup>I.M. Alimuhamedov

<sup>1)</sup>Institute of Seismology Academy of Science of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan <sup>2)</sup>Tashkent Seismological Observatory, Tashkent, Uzbekistan

The description is given of a current digital monitoring system for seismic events in Uzbekistan including 18 stations, data center and data collection system as well as of the system's growth prospects by the end of 2011 what will improve quality and completeness in solving the problems of seismic event monitoring.

УДК 550.34:621.039.9

## СОВРЕМЕННАЯ СЕТЬ СЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ТАДЖИКИСТАНА И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕЕ РАЗВИТИЯ

#### Негматуллаев С.Х.

#### Геофизическая служба Академии наук, Душанбе, Таджикистан

Приведены сведения о системе сейсмического мониторинга в Таджикистане, восстановленной с участием Швейцарского правительства. Семь станций обеспечивают регистрацию событий на территории Республики с очагами в районах действующих, строящихся и проектируемых гидротехнических сооружений, и на многие сотни километров за ее пределами. Предусмотрено расширение сети станций. В связи с подписанием Договора о безъядерной зоне в Центральной Азии ведется подготовка к работам по контролю над ядерными испытаниями на региональном уровне.

Уникальная система сейсмологических и геофизических наблюдений Таджикистана, созданная усилиями Института физики Земли АН СССР, Института сейсмостойкого строительства и сейсмологии АН Таджикской ССР (ТИССС), а также благодаря совместному сотрудничеству с рубежными странами, в годы гражданской войны была фактически выведена из строя. Перестал функционировать и Среднеазиатский центр по прогнозу землетрясений и оценки сейсмической опасности в г. Душанбе, признанный одним из лучших в бывшем СССР, прекратился оперативный обмен сейсмологическими данными, перестал выходить ежегодник «Землетрясения Средней Азии и Казахстана».

Для восстановления системы сейсмического мониторинга с помощью и при поддержке Швейцарского управления по развитию и сотрудничеству (ШУРС) проведены работы по проекту «Реабилитация сети сейсмического мониторинга в Таджикистане», порученному НПО «РМР International». Швейцарское правительство через ШУРС профинансировало поставку и монтаж первых широкополосных цифровых сейсмических станций со спутниковой связью. Эти новые станции в соответствии с договоренностью с «Барки Точик» расположены так, чтобы наилучшим образом охватить районы существующих, строящихся и проектируемых ГЭС в центральной части Республики, на юге, на севере и на Памире (рисунки 1, 2): Гарм, Чуян-Гарон (в 25км северо-восточнее Душанбе), Шаартуз, Гезан (в районе Пенджикента), Чорук-Дарон (в районе Кайраккумской ГЭС), Игрон (в районе Нурекской ГЭС), Манем (в районе ГЭС Памир-1).

Установка станций произведена при содействии специалистов канадской фирмы Nanometrics (Девид Риийки Мур) и Швейцарского Федерального Геофизического института (Питер Цвайфель). Сотрудникам «PMP International» прошли специальное обучение за рубежом.



Рисунок 1. Сеть цифровых широкополосных сейсмических станций на территории Таджикистана по состоянию на 2010 г.



Рисунок 2. Сейсмические станции на территории Таджикистана

Каждая из установленных станций представляет комплект, включающий трехкомпонентный сейсмометр Trillium, преобразователь Trident, солнечные панели с аккумуляторами, работающими в буферном режиме, спутниковую антенну VSAT, приемопередатчик Cygnus. Сейсмометр воспринимает колебания земной поверхности в широком диапазоне частот, Trident преобразовывает сигналы из аналоговой формы в цифровую и передает ее на приемо-передатчик Cygnus. Далее через спутниковую антенну информация попадает на центральную сейсмическую станцию в г. Душанбе, где установлены два компьютера. Один из них служит для сбора и хранения данных, другой – для анализа и обработки. На компьютерах установлено специальное программное обеспечение. Вся цифровая сейсмическая система работает в режиме TDMA - множественного доступа с временным разделением, когда каждая станция передает данные в определенный промежуток времени. Связь удаленных станций с Центром сбора и обработки данных, расположенном в г. Душанбе (рисунок 3), обеспечивается с помощью космического спутника Intelsat. Передача данных происходит непрерывно, в масштабе реального времени.



Рисунок 3. Центр сбора и обработки сейсмических данных в г. Душанбе

Созданная сеть из семи широкополосных сейсмических станций со спутниковой системой связи является опорной для создания в будущем локальных сетей в районе строительства Рогунской, Дашти-Джумской ГЭС, каскада Зеравшанских ГЭС, а также для проведения сейсмологического мониторинга и обмена сейсмическими данными со всеми сейсмологическими центрами мира [1]. Данные сети доступны для всех заинтересованных организаций -Министерства энергетики и промышленности, «Барки Точик», Комитета по чрезвычайным ситуациям и гражданской обороне, научно-исследовательских институтов и других организаций.

Созданная система послужила основой для организации при Президиуме Академии наук Республики Таджикистан Геофизической службы, задачами которой является проведение непрерывных сейсмологических, геодинамических, геодезических и других видов наблюдений на территории Республики, а также оперативное обеспечение всех заинтересованных организаций сейсмологической информацией о землетрясениях, происходящих на ее территории и территории сопредельных государств. К настоящему времени сейсмическая система регистрирует в месяц от 500 до 700 событий с энергетическим классом К ≥ 3, из которых более 200 событий имеют энергетический класс К ≥ 10. Ежемесячный сейсмологический бюллетень передается всем заинтересованным организациям. Геофизической службой создана база волновых форм событий объемом более 300 Гб за период с 2005 г. по настоящее время. Для полного освоения программного обеспечения в вопросах обработки и анализа получаемых цифровых данных, центр данных нуждаемся в технической и научно-методической помощи.

Благодаря сотрудничеству с Германским исследовательским центром Земли (GFZ, Потсдам), с Центрально-Азиатским институтом прикладных наук о Земле (CAIAG, Бишкек, КР), с Научно-исследовательской станцией РАН (Бишкек, КР) на Памире уже второй год осуществляется регистрация землетрясений в ждущем режиме сетью из 30 сейсмических станций Guralp в рамках Тянь-Шань-Памирской геодинамической программы (рисунок 4).

В связи с подписанием в 2009 г. Договора о создании новой безъядерной зоны на территории Центральной Азии (включая Таджикистан), Геофизической службе предстоит участвовать в работах по контролю за ядерными испытаниями в региональном аспекте. Проведение такой работы планируется в тесном сотрудничестве с Институтом геофизических исследований Национального ядерного центра Республики Казахстан и его Центром данных, а также с соответствующими организациями других центрально-азиатских республик.







Для обеспечения контроля за сейсмической безопасностью строящегося каскада ГЭС, запланировано создание локальной сети станций вдоль среднего течения реки Вахш. Для этого потребуется 5 - 6 широкополосных цифровых станций со спутниковой связью. Базовую станцию в районе Рогунского гидроузла планируется организовать на площадке Верхний Майдон. Дирекцией строящего гидроузла для этих целей уже построены специальные здания для Центра сейсмо - геофизического мониторинга головного участка Рогунского гидроузла и акватории будущего водохранилища (рисунок 5).



Рисунок 5. Здания будущего Центра сейсмо-геофизического мониторинга головного участка Рогунского гидроузла и акватория водохранилища на площадке Верхний Майдон

Всю сейсмологическую информацию планируется передавать для обработки и анализа в г. Душанбе и обеспечить доступность этой информации для Дирекции строящегося гидроузла и всех заинтересованных организаций. На рисунке 6 показана планируемая система сейсмического мониторинга для Нурекско–Рогунского района на базе цифровых широкополосных станций со спутниковой связью.



Рисунок 6. Планируемая система сейсмического мониторинга для Нурекско–Рогунского района на базе цифровых широкополосных станций со спутниковой связью

Как видно из рисунка 6, в состав планируемой системы входят опорные, функционирующие сейсмические станции Гарм (грм), Чуян-Гарон(ч-г) и Игрон (игр). Их оснащение и работу обеспечивает Геофизическая служба АН РТ и НПО «РМР International». Другими сейсмическими станциями системы должны стать Больджуан (блд), Рогун (ргн), Пештава (пшт), Чор-Сада (чрс), Яхч (яхч), Тавиль-Дара (твд). Все эти станции должны быть оснащены также аппаратурой для регистрации сильных движений (типа SMA). Для организации новых станций необходимым оборудованием требуются соответствующие средства.

Имеется необходимость в создании сети наклономерно – деформометрических и геофизических станций в акватории Нурекско – Рогунского водохранилища. В районе Нурека действует комплексная станция сейсмологических и наклономерно – деформометрических наблюдений – станция Лангар (лнг). Другие станции необходимы в районе Оби – Гарм (обг), Чор – Сада (чрс), Нуробод (нрд), Яхч (яхч), Гарм (грм). Для их организации необходимо использовать существующие подземные сооружения – специально для этих целей пройденные в горных породах, - штольни протяжностью 200 м (100 м – подходная, 2 по 50 м, С-Ю, В-З) в акватории будущего водохранилища. Для оснащения остальных станций необходимым оборудованием требуются соответствующие средства.

Создание системы сейсмического мониторинга для каскада ГЭС на р. Вахш является актуальной задачей.

Освоение гидроэнергетических ресурсов в горных сейсмически активных районах имеет свою специфику. Кроме непосредственного воздействия землетрясения на гидротехнические сооружения. большую опасность представляют, так называемые, вторичные последствия землетрясений - оползни, обвалы, сели. Они, чаще всего, не влияют непосредственно на сооружения гидроузла, поскольку при проектировании место для строительства выбирается довольно тщательно, но могут осложнить или даже составить угрозу работе гидроузлов каскада гидросооружений. Случай с Оби-Шурским селем или Байпазинским оползнем служат ярким тому примером. Поэтому необходимо избежать негативных последствий такого воздействия, используя данные сейсмологического, деформационного и геологического мониторинга по всей долине р. Вахш. Особого внимания требует изучение возбужденной сейсмичности, связанной с техногенными процессами из-за строительства крупных водохранилищ. Опыт изучения возбужденной сейсмичности в районе Нурекского водохранилища показал, что выбор оптимального режима заполнения вновь строящегося гидроузла может существенно повлиять на режим сейсмичности в районе строительства и снизить опасные последствия спровоцированных землетрясений [2].

Заполнение Нурекского водохранилища показало, что напряжения от создаваемой пригрузки на земную кору, передается по системе разломов на большие расстояния [3]. Завершение строительства Сангтудинских и Рогунской ГЭС создаст практически непрерывное водохранилище длиной 200 - 250 км, расположенное в зоне одного из самых сейсмически активных разломов на территории Таджикистана. Такое единое, по сути, большое водохранилище может существенно повлиять на сейсмический режим не только территории, прилегающей к нему, но и на всю эту сейсмоактивную зону. В связи с этим важно уже сейчас начать сейсмологические наблюдения как в акватории будущего Рогунского водохранилища, так и всего среднего течения реки Вахш. Для этого необходимо установить не менее 5 - 6 цифровых широкополосных сейсмических станций со спутниковой связью для осуществления мониторинга за сейсмическим режимом территории и выбора оптимального режима заполнения строящегося водохранилища. Для уверенной интерпретации возбужденных землетрясений необходимы детальные сейсмологические наблюдения за достаточно длительный промежуток времени не только в период и после, но и перед заполнением водохранилища (рисунок 7).



Рисунок 7. Схема каскада водохранилищ на реке Вахш

При интерпретации сейсмологических данных планируется использовать такие методы прогноза, как

- хорошо известный метод сейсмического затишья (с группированием землетрясений и рассмотрением 2-х типов затиший - групповых и одиночных толчков независимо друг от друга);
- концентрационного критерия укрупнения трещин во времени, предложенный академиком С.Н. Журковым [4, 5]. Этот метод ранее был использован с целью прогноза землетрясений (в том числе и возбужденных) по кинетике накопления разрывов для района Нурекского гидроузла [6].

Такой прогноз необходим для землетрясений с К ≥10, 11, 12, 13, 14 и т.д. за большой период времени в зависимости от уровня представительности энергии

землетрясений, и особенно до начала заполнения водохранилища Рогунской ГЭС, пока не проявилась возбужденная сейсмичность. К началу заполнения Рогунского водохранилища целесообразно организовать вибрационное воздействие для снятия накопленных напряжений в земной коре. К тому времени уже будут определены места концентрации напряжений в зоне Гиссаро-Кокшаальского разлома на основе среднесрочных прогнозов. Организация работ по снятию накопленных напряжений в земной коре с помощью вибрации позволит контролировать процесс трещинообразования и придать им пластический характер [7, 8]. Такой подход позволит не только прогнозировать возможные толчки, но и уменьшать их негативное воздействие и даже предотвращать их.

## ЛИТЕРАТУРА

- 1. Негматуллаев, С. Х. Возрождение сети сейсмического мониторинга в Таджикистане / Негматуллаев С.Х. Девонашоев А. Ю., Мирбаева З. Д. Сб. научно-практической конференции агентства «Точиккоинот» «Уменьшение стихийных бедствий и управление этими рисками», Душанбе, 2006.
- 2. Мирзоев, К.М. Возбужденная сейсмичность в районе водохранилища Нурекской ГЭС / К.М. Мирзоев, С.Х. Негматуллаев, Д. Симпсон, О.В. Соболева. - Душанбе-Москва: Дониш, 1987. - 403 с.
- 3. Негматуллаев, С.Х. Влияние водохранилища на прилегающие территории / С.Х. Негматуллаев, В.И. Старков // Докл. АН РТ – 2006. – том 49, № 3. – С. 244 - 250.
- 4. Журков, С.Н. К вопросу о прогнозировании разрушения горных пород / С.Н. Журков [и др.] // Изв. АН СССР, Физика Земли, 1977. – № 8. – С. 8.
- 5. Петров, В.А. Принципы кинетической теории прогнозирования макроразрушения / В.А. Петров // ФТТ, 1981. т. 23. -C. 3372.
- 6. Куксенко, В. С. Долгосрочный прогноз землетрясений по кинетике накопленных разрывов (район Нурекского водохранилища) / В. С. Куксенко, В. А. Пикулин, С. Х. Негматуллаев, К. М. Мирзоев // Прогноз землетрясений. -Душанбе-Москва: Изд. Дониш, 1984. – № 5. – С. 139 - 148.
- 7. Мирзоев, К.М. Влияние механических вибраций на сейсмичность / К.М. Мирзоев, С.Х. Негматуллаев // Докл. АН СССР. - 1990.- E. 313, № 1.- C. 78 - 83.
- 8. Мирзоев, К.М. Влияние механических вибраций на сейсмичность и пластические деформации / К.М. Мирзоев, С.Х. Негматуллаев // ред. Садовский М.А. - Душанбе: Дониш, 1992. - 51 с.

## ТӘЖІКСТАННЫҢ ҚАЗІРГІ ЗАМАНҒЫ СЕЙСМИКАЛЫҚ ЖЕЛІСІ ЖӘНЕ ОНЫҢ ДАМУ ПЕРСПЕКТИВТЕРІ

### Негматуллаев С.Х.

#### Ғылыми академиясының геофизикалық қызметі, Душанбе қ., Тәжікстан

Швейцария үкіметі қатысуымен қалпына келтірілген Тәжікстандағы сейсмикалық мониторингі жүйесі туралы мәліметтер келтірілген. Істегі, құрылыстағы және жобадағы гидротехникалық құрылыстар аудандарындағы ошақтарымен Республика аумағы мен оның шегінен тыс бір неше жүз километрлердегі оқиғаларын тіркеуін жеті станция қамтамасыз етеді. Станциялар желісін кеңейтуі ескерілуде. Орталық Азияда ядролықсыз зона туралы Шартына қол қоюына байланысты аумақтық деңгейінде ядролық сынауларын бақылау жөнінде дайындық жұмыстары жүргізілуде.

## A MODERN NETWORK FOR SEISMIC MONITORING OF TADJIKISTAN AND ITS DEVELOPMENT PROSPECTS

#### S.H. Negmatullayev

#### Geophysical Survey of Academy of Science, Dushanbe, Tadjikistan

The information of the system for seismic monitoring in Tadjikistan reconstructed with help of Swiss government has been provided in this paper. Seven stations provide the recording of the events within and beyond the territory of the Republic with foci in the regions of active, being engineered and projected water-development structures and beyond its territory.

## УДК 550.34:621.039

## ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ СЕЙСМОЛОКАЦИИ ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКОВ

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

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

Рассмотрены основные задачи вычислительных технологий, лежащих в основе современных иерархических мониторинговых сетей. Последние предназначены для слежения за природными процессами, прежде всего, в сейсмовулканоопасных районах, а также за техногенными процессами, связанными с проведением промышленных и полигонных взрывов, с разрушительными процессами на ГЭС, АЭС и др. Предложены алгоритмические подходы к оперативному решению задач и пути их реализации для повышения точности и производительности вычислений на разных уровнях иерархии сетей.

В мире создан ряд глобальных информационных сетей, предназначенных для мониторинга природных и техногенных процессов в интересах защиты экологии окружающей среды, в социальных и научных интересах. Примером такого рода сетей является мировая сеть сейсмического мониторинга IMS (International Monitoring System) для регистрации землетрясений, ядерных и промышленных взрывов [1], происходящих в различных районах Земли. Несмотря на специфику решаемых задач в каждой из сетей можно выделить некоторую общую архитектуру, характеризуемую тремя уровнями иерархии: нижний уровень - это датчики физических процессов совместно с промежуточными центрами сбора данных (автономные станции), средний уровень локальные центры сбора и обработки данных на уровне региона, верхний уровень - глобальный центр сбора и обработки данных на уровне страны, мира. Одна из основных задач мониторинга сейсмических событий связана с восстановлением их параметров в очаге (географических координат, глубины, мощности, времени в очаге) по данным регистрации сейсмических сигналов с помощью сети сейсмических станций либо сейсмической группы.

Решения задач мониторинга распределяются между различными уровнями сети: на нижнем уровне осуществляется первичная обработка регистрируемых колебаний разной физической природы – сейсмических, акустических, гидроакустических и т.д., – в реальном масштабе времени с целью определения основных характеристик упругих волн (времена вступлений различных типов волн и их амплитуд). На верхних уровнях сети получают уточненное решение задачи по определению параметров сейсмических событий. Целью данной работы является рассмотрение вычислительных технологий, способствующих повышению точности и производительности решения задач мониторинга на разных уровнях иерархии в условиях воздействия внешних шумов.



Рисунок 1. Архитектура геомониторинговой сети

#### Постановка задачи

Задача оценивания неизвестных параметров источника сводится к решению нелинейной системы условных уравнений [2]:

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

где:  $\vec{t} = (t_1, t_2, ..., t_N)$  – вектор времен пробега сейсмических сигналов;  $\vec{\eta}(X,\theta) - N$ -мерный вектор вычисляемых времен пробега (теоретический годограф) или функция регрессии;  $\vec{\varepsilon} = (\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_N)^T$  – вектор невязок;  $\vec{\theta} = (x, y, z, v, t)^T - m$ -мерный вектор оцениваемых параметров;  $X = (\vec{x}_1, \vec{x}_2, ..., \vec{x}_N)$  – матрица координат датчиков (или точек излучения); Nчисло датчиков (или точек излучения). В качестве оцениваемых параметров выступают пространственные координаты источника x, y, z, скоростная характеристика среды v и время в источнике t. В ряде случаев скорость в среде является известной. При оценивании параметров пользуются сведениями о распределении ошибок  $\varepsilon_i = t_i(\vec{x}_i, \vec{\theta}) - \eta(\vec{x}_i, \vec{\theta})$ . Будем в дальнейшем предполагать, что *є* <sub>*i*</sub> – взаимно независимые случайные величины, имеющие распределение с нулевым средним и заданными дисперсиями:  $E\varepsilon_i = 0, \quad E\varepsilon_i\varepsilon_i = \sigma_i^2\delta_{ii}, \quad \sigma_i = \sigma(\vec{x}_i), \quad \delta_{ii} =$ символ Кронекера, i = 1, 2, ..., N. В случаях затруднений с заданием дисперсий принимают их равными и получают несмещенную оценку дисперсии наблюдения с единичным весом по ходу решения задачи. Решение уравнения (1) сводится к решению обратной задачи. При этом точность решения зависит, в первую очередь, от ошибок оценивания вектора времен  $\vec{t} = (t_1, t_2, ..., t_N)$  скорости *v*, шумов измерения  $\vec{\varepsilon} = (\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_N)^T$ , а также выбора геометрии расстановки датчиков на дневной поверхности Земли.

В частности, для триады сейсмических станциий (*N*=3) ошибки определения азимута на источник и расстояния «источник - приемник» в полярной системе координат соответственно составляют [3]:

$$\sigma_{AZ}^2 = \sigma_t^2 F_1(\bar{t},\bar{\eta}), \quad \sigma_R^2 = \sigma_t^2 F_2(\bar{t},\bar{\eta})$$

Здесь:  $\sigma_t^2$  является ошибкой оценивания времен

прихода, а  $\eta$  - вектор параметров, характеризующий геометрию расстановки сейсмической группы. С учетом сказанного выделяется ряд основных этапов в решении поставленной задачи:

 обнаружение и измерение времен вступлений волн на фоне внешних шумов;

2) расчет параметров источника;

3) отображение координат источника на цифровой карте местности.

На первом этапе, реализуемом на нижнем уровне структуры сети (рисунок 1), имеет место большая

потребность в автоматизированной технологии решения задач в режиме реального времени. Такая технология призвана снять с человека – оператора множество рутинных операций обработки данных в условиях непрерывного мониторинга событий, к тому же регистрируемых на фоне, как правило, повышенных шумов. По отношению к источникам импульсного типа, например, промышленным взрывам, ошибка определения времен прихода волн характеризуется дисперсией вида:

$$\sigma_{\tau}^{2} = \frac{\tau_{u}}{2\Delta f \left(2E / N_{0}\right)} \tag{2}$$

Здесь:  $\tau_u$  – длительность волнового импульса,;  $\Delta f$ ширина его спектра;  $E/N_0$  – отношение энергии импульса к спектральной плотности внешнего шума. Как следует из (2), уменьшение погрешности определения времени прихода волн можно достичь за счет увеличения соотношения энергий сигнала и шума, расширения спектра частот  $\Delta f$ , занимаемого импульсом, а также за счет сжатия волнового импульса во времени путем приведения его к  $\delta$ -образному импульсу. Ниже рассмотрены алгоритмы перечисленных решений задачи минимизации погрешностей оценивания времен с учетом (2).

## Повышение соотношения сигнал/шум и оценивание времен с помощью вейвлетфильтрации

Алгоритм повышения соотношения сигнал/шум по отношению к волновым импульсам наиболее эффективно реализуется с помощью вейвлет-фильтрации, основанной на разложении одномерного сигнала по базису, сконструированному из обладающей определенными свойствами солитоноподобной функции (вейвлета) посредством масштабных изменений и переносов. В основе вейвлет-фильтрации лежит интегральное вейвлет-преобразование:

$$X(\tau,s) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Psi_{\tau,s}(t) dt$$
(3)

где f(t) - волновой импульс;

$$\psi_{\tau,s}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right)$$
  
$$\tau, s \in R$$
  
$$\psi \in L^{2}(R)$$
 (4)

Базис функционального пространства  $L^2(R)$  может быть построен с помощью непрерывных масштабных преобразований и переносов вейвлета  $\psi(t)$  с произвольными значениями базисных параметров – масштабного коэффициента *s* и параметра сдвига  $\tau$ . В [4] показано, что наиболее подходящими для аппроксимации сейсмических колебаний являются вейвлеты Добеши. В качестве примера на рисунке 2. приведены вейвлеты семейства Добеши 2-го, 4-го, 5-го, 8-го и 10-го порядков.



Рисунок 2. Семейство вейвлетов Добеши 2-го, 4-го, 5-го, 8-го и 10-го порядков

Подбором порядка материнского вейвлета можно добиться наилучшего приближения. Например, по отношению к волновым импульсам, порождаемым промышленными взрывами, среди вейвлетов Добеши порядков 3, 5, 8, 12 было отобран вейвлет порядка 8. Более высокий уровень вейвлета не вносит дополнительной информации и, следовательно, является избыточным. В качестве парадигмы шумоподавления с помощью вейвлет-фильтрации по отношению к сейсмическим колебаниям успешно использована трехшаговая процедура Донохо-Джонстона [5]. Для вычисления времен вступления волн в автоматическом режиме предварительно необходимо найти огибающую полученного сигнала A(t) в ви-

де 
$$A(t) = \sqrt{f^2(t) + f^{*2}(t)}$$
, где  $f^*(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{f(x)}{t - x} dx$ . –

преобразование Гильберта. В качестве примера успешного использования рассмотренной вычислительной технологии на рисунке 3 приведены результаты обнаружения волновых импульсов от двух последовательно проведенных взрывов мощностью 4 тонны и 12 тонн с задержкой между ними 52.843 с. Исходная запись в полосе частот 1 – 10 Гц приведена рисунке 3а. На рисунке 3 в графическом виде показан процесс обнаружения прихода волн с помощью вейвлет-преобразования. Выделенные фрагменты отображают моменты вступления сейсмических волн от первого и второго взрывов. Следует отметить, что первая волна на исходной сейсмограмме (рисунок 3a) не обнаруживается. Погрешность оценивания времен вступления осуществлялась по калибровочным временам пробега волн для данного региона и составила 0.9%.

Особенность рассматриваемого подхода связана с тем, что эффективность использования вейвлетфильтрации определяется согласованием базиса функционального пространства  $L^{2}(R)$  в (4) с моделями волновых импульсов. В тоже время, с учетом вариабельности форм волновых импульсов, получаемых от разного вида сейсмических источников, обнаружение и измерение их выполняются в условиях априорной неопределенности о параметрах сейсмических волн. В этой ситуации эффективное решение задачи возможно на основе использования двухэапной процедуры обнаружения - первоначально с использованием алгоритма обнаружения типа «разладки» (алгоритм АРПСС) [6, 7] с последующей оптимизацией обработки с использованием вейвлетфильтрации.



 а – исходный сигнал; б – сигнал после очищения от шума с использованием вейвлет-преобразования; в – огибающая сигнала (пунктирная линия)

Рисунок 3. Пример вычисления времен вступлений волн от двух последовательных взрывов

## Оценивание времен вступления волн с помощью алгоритма «разладки»

Рассматривается алгоритм определения момента разладки случайной временной последовательности по максимуму специально формируемой решающей функции, представляемой в виде ряда функции авторегрессии проинтегрированного скользящего среднего (АРПСС) [6]. При этом случайная последовательность x<sub>1</sub>, x<sub>2</sub>,..,x<sub>M</sub>. образуется дискретными отсчетами «фонового» шума и волнового импульса. В рамках этих предположений на первый план выдвигается задача гарантированного обнаружения моментов разладки. В основе процедуры обнаружения лежит последовательный алгоритм кумулятивных сумм (АКС), основанный на аппроксимации участков чистого шума и волновых импульсов моделями - авторегрессии проинтегрированного скользящего среднего (АРПСС). Если наблюдается последовательность гауссовых случайных величин x<sub>i</sub>, то решающая функция, по которой оцениваются времена вступлений волн, имеет вид:

$$g_N = (g_{N-1} + \Delta g)^+,$$
  

$$g_0 = 0, , \qquad (5)$$
  

$$\Delta g_N = F(\Phi_1, \dots \Phi_n; \sigma_c^2)$$

где

$$\Delta g_{N} = \left[ \frac{\left(1 - \sum_{i=1}^{p} \Phi_{i}\right)}{\sigma_{\varepsilon}^{2}} \left(1 - \sum_{i=1}^{q} \varphi_{i}\right) \right] \overline{\varepsilon_{N}} \quad m_{0}$$
$$x_{t} = \Phi_{1}^{(i)} x_{t-1} + \dots + \Phi_{p}^{(i)} x_{t-p} + \varepsilon_{t}$$

Здесь:  $(g)^+ = max(0,g); \Phi_1,..., \Phi_p - коэффициенты авторегрессии порядка <math>p; \varphi_1,..., \varphi_q$  – коэффициенты скользящего среднего;  $\varepsilon_N$  – независимая гауссовская случайная последовательность;  $\sigma_{\varepsilon}^2$  – дисперсия случайных значений ряда  $x_i$ . При этом правило подачи сигнала о разладке:  $t_p = \inf \{t: g_N > h\}$ , где h – пороговый уровень. В качестве примера на рисунке 4 приведены: вид решающей функции  $g_N$  (верхняя часть рисунка), соответствующей исходной записи шума и двух волновых импульсов на его фоне от двух последовательно проведенных промышленных взрывов (исходная запись в нижней части рисунка). Вычисленные максимумы решающей функции определяют времена вступлений волн.

Результаты практического использования обоих вычислительных процедур при обработке данных, полученных от множества промышленных взрывов, показали, что при приблизительно одинаковой точности оценивания времен (расхождение в пределах 1%), алгоритм кумулятивных сумм имеет значительно более высокую вычислительную трудоемкость. Соответствующие оценки приводятся в [4, 6]. Снижение вычислительной трудоемкости является принципиально важным в условиях поточного измерения параметров волн, особенно при обработке данных в масштабе реального времени.

#### Сжатие волнового импульса

Как было показано в (2), погрешность оценивания времен вступлений волновых импульсов в числе прочих факторов зависит от длительности импульса. В связи с этим рассмотрена задача временного сжатия волнового импульса f(t) на фоне внешнего шума n(t) с использованием линейного оператора вида y(t) = L f(t) + n(t) таким образом, чтобы в результате преобразования получить  $\delta$ -образный импульс. Такое преобразование достигается с помощью соответствующего варианта обратной фильтрации Колмогорова-Винера. При этом импульсная функция обратного фильтра h(i), (i=1, 2, ...N) определяется в результате решения интегрального уравнения вида:

$$\sum_{j=0}^{N-1} h \ i \cdot \left[ b_f \ i-j \ +b_n \ i-j \ \right] = b_f \ -i \tag{6}$$

Здесь  $b_f(i)$ ,  $b_n(i)$  - автокорреляционные функции волнового импульса и шума.



Рисунок.4. Пример вычисления времен вступлений волн от двух последовательных промышленных взрывов. Вверху – вид решающей функции, внизу – искомая запись шума и двух волновых импульсов на фоне шума

Выражение (6) описывает систему линейных уравнений порядка N. Решение системы стандартными методами требует  $N^2$  ячеек памяти для хранения матрицы коэффициентов, а затраты времени пропорциональны  $N^3$ . Как известно, один из способов ускорения решения системы в случае высокого порядка N достигается с помощью алгоритма Левинсона, позволяющего сократить обе эти характеристики в N раз. Суммарная трудоемкость решения уравнения (6) составляет  $O(N^2) + 2O(N \log N) + 2N$ . Для иллюстрации результата работы алгоритма в виде комбинации вейвлет- и обратной фильтрации на рисунке 5 приведены записи волновых импульсов. Это - записи низкоамплитудной сейсмической и высокоамплитудной акустической волн, зарегистрированных от промышленного взрыва (слева), а также соответствующие им амплитудные спектры (справа).



Рисунок 5. Результат комбинирования вейвлет и обратной фльтрации: а, б - исходная волновая форма и ее спектр; в, г - сжатая волновая форма и ее спектр

В результате применения комбинированной фильтрации ширина спектра сейсмической волновой формы расширилась с 10 до 50 Гц (пятикратное увеличение), а отношение сигнал/шум возросло в 5 раз, что соответственно увеличивает точность измерения времен вступлений волн.

## О ВОССТАНОВЛЕНИИ ПАРАМЕТРОВ ИСТОЧНИКА

Задача оценивания параметров  $\vec{\theta}$  в уравнении (1) является частью т.н. регрессионного анализа, а ее решением служат оценки метода наименьших квадратов:

$$\vec{\theta} = \arg\min_{\vec{\theta} \in \Omega} Q(\vec{\theta}),$$

$$Q(\vec{\theta}) = \sum_{i=1}^{N} \sigma_i^{-2} (t_i - \eta(\vec{x}_i, \vec{\theta}))^2$$
(7)

С точки зрения критериев точности оценивания параметров  $\vec{\theta}$  и скорости сходимости к получаемым оценкам, проанализированы различные методы решения уравнения (7). Для отыскания минимума функционала  $Q(\vec{\theta})$  применен итерационный метод Гаусса-Ньютона, основанный на линейной аппроксимации функции регрессии в окрестности точки  $\vec{\theta}^{k}$ [3]:

$$I(X,\vec{\theta}^k)\Delta\vec{\theta}^k + \vec{\eta}(X,\vec{\theta}^k) - \vec{t} + \vec{\varepsilon} = 0$$
(8)

где

$$J(X,\vec{\theta}) = \left(\frac{\partial \eta(\vec{x}_i,\vec{\theta})}{\partial \theta_1}, \frac{\partial \eta(\vec{x}_i,\vec{\theta})}{\partial \theta_2}, \dots, \frac{\partial \eta(\vec{x}_i,\vec{\theta})}{\partial \theta_m}\right), \qquad (9)$$
$$i = 1, 2, \dots, n$$

В дальнейшем оценки  $\vec{\theta}$  находят как результат реализации итерационного процесса ( $\vec{\theta} = \lim_{k \to \infty} \vec{\theta}^k$ ):

$$\vec{\theta}^{k+1} = \vec{\theta}^k + \Delta \vec{\theta}^k,$$
  
$$[J^T(X, \vec{\theta}^k) \ J(X, \vec{\theta}^k) + \alpha^2 I] \Delta \vec{\theta}^k =$$
  
$$= J^T(X, \vec{\theta}^k) y(X, \vec{\theta}^k), \quad k = 0, 1, 2$$

здесь  $y(X,\vec{\theta}) = (\vec{t} - \eta(X,\vec{\theta}))^T$ ,  $\alpha$  – параметр регуляризации, а I – единичная матрица.

Другой подход к решению уравнений (7) - (9) состоит в непосредственном решении системы (8) с помощью метода псевдообращения (или обобщенного обращения), основанного на сингулярном разложении (SVD-разложении). В современных версиях системы MATLAB имеется встроенная функция svd(A) [8], реализующая это разложение для произвольной матрицы A: svd (A) = [U, S, V]. Используя это обращение, можно получить матрицу U, которая состоит из ортонормированных собственных векторов, отвечающих наибольшим собственным значениям матрицы  $A^*A^T$ ; матрицу V, состоящую из ортонормированных собственных векторов матрицы  $A^{T}*A;$ матрицу S, являющуюся диагональной матрицей, содержащую неотрицательные значения квадратных корней из собственных значений матрицы  $A^{T*A}$ (сингулярные числа). Получаемые таким образом матрицы удовлетворяют соотношению  $A = U^*S^*V^T$ . В ланном случае в роли U выступают измеренные времена пробега волн, содержащие ошибки измерений; в роли V - оцениваемые параметры. Применительно к (8) SVD-разложение запишется в виле:  $J(\overline{\theta}^k, x) = U_k \cdot S_k \cdot V_k^T.$ 

Недостаток данного метода, как и других методов, связанных с обращением и умножением матриц, состоит в том, что он позволяет решать системы с небольшим числом неизвестных. Это обусловлено тем, что: с ростом числа уравнений растут ошибки, связанные с умножением матриц; время счета растет пропорционально N<sup>3</sup>, память для хранения ковариационных матриц - пропорционально
N<sup>2</sup>. В этом случае более эффективным оказывается итерационный метод оценивания Качмажа [9].

Пусть заданы дисперсии для входных параметров и для неизвестных. Тогда решение можно получить через следующую рекуррентную формулу оценивания:

$$x_{j}^{(k+1)} = x_{j}^{1} + a_{ij} \frac{\sigma_{xj}^{2}}{\sigma_{ui}^{2} \sum_{k=1}^{m} a_{ij}^{2} \sigma_{xj}^{2^{k}}},$$

Ŀ

где:  $\Delta t_i^k = t_i - \eta_i(x^k)$ , k = i + n(l-1) – номер шага уточнения (не является показателем степени); *i* – порядковый номер уравнения; *n* – число уравнений в системе, *j* – порядковый номер неизвестного, *m* – число неизвестных;  $a_{ij}$  – коэффициент в *i*-ом уравнении *j*-го неизвестного. В случае нелинейной системы он будет зависеть от k;  $(\sigma_{xj}^2)^k$  – оценка дисперсии неизвестного на k-ом шаге;  $\sigma_{ui}$  – дисперсия ошибки измерения параметра *u* в *i*- ом уравнении. Оценки дисперсии неизвестных параметров на каждом шаге изменяются следующим образом:

$$\sigma_{xj}^{2} \stackrel{(k+1)}{=} \sigma_{xj}^{2} \stackrel{k}{=} \left( 1 - \frac{\sigma_{xj}^{2}}{\sigma_{ui}^{2} \sum_{k=1}^{m} a_{ij}^{2}} \sigma_{xj}^{2} \right)^{k}$$

Особенность данного метода состоит в том, что он не накапливает ошибок округления и позволяет решать системы с большим числом неизвестных. Сравнительный анализ обоих методов выполнен на примере решения задачи локации промышленных взрывов с помощью сети из 15-ти пространственно распределенных сейсмодатчиков. Сравнение осуществлено по скорости сходимости оценок и точности локации, определяемой невязкой вычисленных координат источника по отношению к истинным их значениям. В результаты сравнения было показано, что метод Качмажа дает более высокую точность определения положения источника при более низкой скорости сходимости в сравнении с SVD-разложением. В частности, по отношению к локации тестовых взрывов (рисунок 5) невязка по методу Качмажа на 2000 итерациях составила 5%, а на 500 итерациях по SVD-разложениею невязка равна 10%, причем дальнейшее увеличение количества итераций не привело к уменьшению невязки.

## ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ВЫЧИСЛЕНИЙ НА НИЖНЕМ УРОВНЕ ИЕРАРХИИ СЕТИ

На данном уровне обработки первоочередной необходимостью является обеспечение высокой производительности вычислений, что связано с требованиями поточной обработки данных, т.е. в темпе их постыпления. Большие перспективы открывает здесь использование средств вычисления на основе GPU- Graphics Processing Unit (графическое вычислительное ядро). Как известно, последние являются дополнением к универсальным процессорам СРU и позволяют многократно увеличивать производительность обработки данных в случае применения алгоритмов вычислений с высоким распараллеливанием. Для иллюстрации возможностей ускорения вычислений с использованием GPU оценена их производительность по отношению к алгоритмам обработки данных, приведенных в данной работе. Исходный объем сейсмических данных был выбран равным 10<sup>6</sup>. При вычислениях аппаратная платформа была представлена двухядерным CPU ПIntel Core 2 Duo- 2.4 ГГц с Кэш-памятью 3 Мб и частотой шины 1066 Мгц; графический процессор представлен видеокартой NVIDIA GeForce 9400M, содержащей 16 вычислительных блоков (что достаточно мало, так как современные видеокарты в среднем обладают сотнями вычислительных блоков). В этом варианте применения GPU до 256 Мб памяти выделяется из системной. В качестве ОС на СРU использовалась Windows Vista SP1. Вычисления базировались на технологии CUDA (Compute Unified Device Architecture – Вычислительна унифицированная архитектура устройств») от компании NVIDIA, предназначенной для разработки приложений для массивно-параллельных вычислительных устройств (в первую очередь, для GPU начиная с серии G80). В данном случае использовалась версия CUDA SDK 2.2 code samples for Windows Vista 32-bit.

Результаты вычислений по различным алгоритмам сведены в таблицу. Как следует из табличных данных, при использовании алгоритмов с высоким распараллеливанием (БПФ, свертки) производительность вычислений возрастает на порядок и более. При использовании алгоритмов последовательного действия (вейвлет фильтрация, фильтр Колмогорова-Винера) выигрыш является менее значимым. Приведенные данные иллюстрируют перспективность применения графических процессоров как эффективного средства ускорения вычислений в поточном режиме регистрации данных, особенно на нижнем уровне иерархии мониторинговой сети.

Таблица. Сравнение скорости работы алгоритмов (объем выборки 10<sup>6</sup>)

Алгоритм	Время на CPU (сек)	Время на GPU (сек)	Разница времен (сек)
Модуль быстрого преобразования Фурье	7.9872	0.6240	7.3632
Модуль взаимокрреляционной свертки	23.9616	1.8720	22.0896
Вейвлет фильтрация	97.8134	53.8000	44.0000
Модуль фильтрации Колмогорова-Винера	9.5844	7.8620	1.7200

#### Система визуализации

Составной частью разрабатываемого комплекса является система визуализации, обеспечивающая отображение вычисленных координат сейсмических источников на цифровой карте местности. Взаимодействие между системой визуализации и системой расчета координат источника осуществляется через базу данных с информацией о параметрах каждого из внешних источников. В качестве ядра системы визуализации могут быть использованы уже известные ГИС-пакеты работы с цифровыми картами: MapX компании Esti Map, обеспечивающими полную интеграцию с ГИС системой Map-Info, Googleтар и др. Последовательность отображения результатов следующая: вычисленные времена вступлений волновых импульсов и параметры источников передаются в базу данных, после чего происходит вызов программы визуализации и отображение на карте сохраненных в базе данных координат.



Рисунок 6. Пример отображения с использованием ГИС Google Earth тестовых взрывов (черные кружки) и регистрирующей группы типа «Крест (черные треугольники)

Система визуализации может быть использоваться независимо, что позволяет работать с раннее полученными данными. При этом в базе данных хранится только сейсмическая информация об источнике, а сама цифровая карта – в системе визуализации. Это позволяет отображать одни и те же сейсмические данные на различных картах без каких-либо дополнительных затрат времени, а так же использовать одни и те же сейсмологические данные в различных системах визуализации. На рисунке 6 приведен пример отображения на цифровой карте местности регистрирующей группы и источников (тестовых взрывов). Погрешность восстановления координат тестовых взрывов с использованием алгоритма направленного приема составила в среднем 1%.

#### Выводы

Рассмотрены информационные технологии, лежащие в основе сейсмических мониторинговых систем и сетей. Решение задач повышения точности обнаружения и определения координат сейсмических событий рассмотрены как решение двухэтапной обратной задачи: на первом этапе обработки исходных данных и на втором этапе восстановления параметров события по результатам обработки данных первого этапа. Пронализированы соответствующие алгоритмы. Оценены возможности реализации используемых алгоритмов в реальном масштабе времени на основе использования графических процессоров. Рассмотрены вопросы сопряжения с существующими ГИС-системами для отображения координат источников на цифровой карте местности. Эффективность предлагаемых подходов подтверждена результатами обработки сигналов, зарегистрированных от тестовых и промышленных взрывов.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ №07-07-00214а, 09-07-12075.

#### Литература

- Зербо, Л. Возможности Подготовительной Комиссии ОДВЗЯИ отслеживать соответствие Договору о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний / Л. Зербо // Доклад на V Межд. конф. «Мониторинг ядерных испытаний и их последствий», 4 - 8 авг. 2008, Боровое, Казахстан.
- Khairetdinov, M.S. A computing technology to determine the parameters of the borehole bottom and medium / M.S. Khairetdinov, O.K.Omelchenko, G.F. Sedukhina, G.M. Woskoboynikova // Bull. Nov. Comp. Center, Math. Model. In Geoph. – 2005. – Iss.10. – P. 19 - 26.
- 3. Kijko, The accuracy of teleseismic events location by a tripartite seismic network in Hungary / Kijko, J. Ungvarai // Acta Geodaet., Geophys. et Montanist. Acad. Sci. Hung. Tomus 15 (2 4). Pp. 239 246.
- 4. Хайретдинов, М.С., Клименко С.М. Программная система автоматизированной локации и визуализации сейсмических источников / М.С. Хайретдинов, С.М. Клименко // Вестник НЯЦ РК, 2004. С. 70 76.
- 5. Donoho, D.L. De-noising by soft-thresholding / D.L. Donoho // IEEE Trans. on Inform. Theory, 1995. #3. P. 613 627.
- 6. Никифоров, И.В. Последовательное обнаружение свойств временных рядов / И.В. Никифоров. М.: Наука, 1989.
- Хайретдинов, М.С. Автоматизированная технология локации сейсмического источника / М.С. Хайретдинов, О.К. Омельченко, Ю.И. Родионов // Труды Междунар. конф. Математические методы в геофизике. - Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН. - 2003. - ч. 2. - С.529 - 535.
- 8. Лазарев, Ю. Моделирование процессов и систем в МАТLАВ / Ю. Лазарев. Питер, 2005. -. 511 с.
- 9. Наттерер, Ф. Математические аспекты компьютерной томографии / Ф. Наттерер. М: Мир, 1990,. 288 с.

## ИМПУЛЬСТІК КӨЗДЕРІН СЕЙСМОҚШАУЛАЫНЫҢ АҚПАРАТТЫҚ ТЕХНОЛОГИЯСЫ

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

#### РҒА СБ Есептеу математика және математикалық геофизика институты, Ресей, Новосибирск

Қазіргі заманғы иеархиялық мониторингтік желілерінің негізінде жататын есептеу технологиялардың негізгі міндеттері қаралған. Соңғылары табиғи процесстерін, алдымен сейсможанартау қауіпті аударында, сондай-ақ, өнеркәсіптік және полигондық жарылыстар жүргізуімен байланысты техногендік процесстерін, есептеулердің дәлдігі мен өнімділігін жоғарылату үшін міндеттерді жедел шешу мен оларды іске асыру жолдарына алгоритмдік көзқарастары ұсынылған.

## INFORMATION TECHNOLOGY FOR SEISMIC LOCATION OF IMPULSIVE SOURCES

#### M.S. Hairetdinov, G.M. Voskoboynikova, G.F. Sedukhina

#### Institute of computational mathematics and mathematical geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia

Main tasks of computing technologies forming the basis of modern hierarchical monitoring networks are consider. The latter are designed for tracing natural processes, first, in seismo-vulcanic active regions, and technogenic processes as well related to the industrial and test explosions, destructive processes in water-power stations atomic stations and other. It offers algorithmic approaches to solve problems promptly and ways of their implementation to improve accuracy and computational performance at different levels of hierarchic networks.

УДК 551.594:621.039.9

## МЕТОД И РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ РОССИЙСКОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ЗА НЕПРОВЕДЕНИЕМ ЯДЕРНЫХ ИСПЫТАНИЙ

## <sup>1)</sup>Знаменщиков Б.П., <sup>2)</sup>Московенко В.М., <sup>1)</sup>Орешин В.П.

#### <sup>1)</sup>ФГУ ''12 Центральный научно исследовательский институт Минобороны России'', Москва, Россия <sup>2)</sup>Центральная база Авиационной охраны лесов, Москва, Россия

Показано, что использование данных о грозовой обстановке, полученных средствами регистрации молниевых разрядов, позволяет провести оценку систематической погрешности радиопеленгаторов как средств контроля за ядерными испытаниями и компенсировать ее. Установлено, что погрешность пеленгования в таком случае уменьшается в 3 - 4 раза.

Радиотехнические средства играют важную роль в российской системе контроля за непроведением ядерных испытаний. Это обстоятельство обусловлено, в частности, такими особенностями радиотехнического метода контроля ядерных испытаний как высокая оперативность (единицы/десятки миллисекунд) и большая зона контроля – (3-4) тысячи и более километров.

Основным вопросом соответствия системы контроля ядерных испытаний (ЯИ) ее функциональному назначению является точность местоопределения источника электромагнитного излучения (ЭМИ), которая в случае пеленгационного метода определяется, в частности, ошибками измерения пеленга на источник излучения из пунктов регистрации. Определение пеленга основано на анализе формы фронта электромагнитного импульса.

При распространении от источника к приемнику электромагнитный сигнал последовательно отражается от ионосферы и земной поверхности, что определяет зависимость процесса распространения сигнала от электрических свойств верхней и нижней отражающих границ, приводит к искажению структуры поля, обуславливает, так называемые, поляризационные ошибки пеленгования (продольная и поперечная неоднородность трассы распространения радиоволн, а также анизотропия ионосферы приводят к варьированию направления движения фронта волны).

Погрешность пеленгования возрастает еще и изза переизлучения ЭМИ электропроводящими объектами, расположенными вблизи антенн пеленгатора (железобетонное здание, силовой кабель неглубокого залегания и т.п.) [1]. Локальные неоднородности пространства вблизи антенны, существенно меньшие по протяжённости, чем длина волны ЭМИ ЯВ, вызывают явление девиации. Таким образом, неоднородность электрических свойств подстилающей поверхности в географическом плане, а также отличие электрических свойств пространства вблизи антенн от свойств свободного пространства, в совокупности приводят к искажению формы фронта регистрируемого сигнала и диктуют необходимость определения ошибок пеленгования в реальных условиях эксплуатации пеленгаторов.

Задача исследований, результаты которых обсуждаются в статье, заключалась в том, чтобы найти и оценить метод компенсации влияния вышеперечисленных неблагоприятных факторов и связанных с ними погрешностей определения пеленгов, не устраняемых до настоящего времени, с тем, чтобы улучшить работу национальной систем контроля за ядерными испытаниями.

Погрешность пеленгования традиционно принято характеризовать двумя составляющими - систематической ошибкой и стандартным отклонением [1]. При этом систематические ошибки могут быть устранены соответствующей калибровкой пеленгаторов, то есть предварительным определением ошибок. Известны два основных способа определения точностных характеристик технических средств: при помощи более точного средства; по реперному (привязанному к географическим координатам) источнику излучения[2]. В данном случае исследуется возможность использования в качестве средства поверки систематических и случайных ошибок радиопеленгаторов (радиотехнических средств контроля ЯИ) - многопунктовой системы местоопределения молниевых разрядов "Верея-АМ". Система "Верея-АМ" развернута по заказу Авиационной охраны лесов, состоит из 26 пунктов регистрации и реализует гиперболический метод местоопределения молниевых разрядов [3]. Зона контроля системы с точностью местоопределения до 5 км показана на рисунке 1.

Идея метода заключается в экспериментальном получении выборки электромагнитных сигналов молниевых разрядов (атмосфериков), синхронно зарегистрированных радиотехническими средствами контроля ЯИ и системой регистрации молниевых разрядов "Верея-АМ".



Рисунок 1. Зона контроля системы регистрации молниевых разрядов "Верея-АМ" (точность местоопределения 5 км)

Для регистрации сигналов ЭМИ в обеих системах используются рамочные радиопеленгаторы и штыревые антенны. Оценка систематической составляющей погрешности пеленгования производится по выборке сигналов молниевых разрядов, зарегистрированных тремя и более пунктами регистрации. Объем выборки должен быть таким, чтобы с каждого градуса пеленга было зарегистрировано 40 - 50 сигналов, то есть в общей сложности должно быть зарегистрировано около 15 - 20 тысячи сигналов, равномерно распределенных по разным азимутальным направлениям. Такой объем выборки на Европейской территории страны может быть получен за 1 - 2 месяца в летний период.

Вычисление поправок для пункта регистрации включает несколько процедур:

1) по заданным координатам рассчитывают пеленги на источник сигналов;

 вычисляют углы между измеренными и рассчитанными (п. 1) значениями пеленга. При этом, если угол по абсолютной величине больше 150 град, к измеренному значению прибавляют 180 град и повторяют вычисление разности между пеленгами;

3) измеренные и рассчитанные значения пеленгов сортируют по возрастанию значений измеренного пеленга; группируют значения измеренного пеленга через 1 град и строят гистограмму на интервале от 0 до 359 град с шагом 1 град, если значений пеленгов в интервале больше 30. Находят и запоминают номер интервала, соответствующий максимальному значению на гистограмме. Полученные значения поправок сглаживают методом скользящего среднего (желтая линия на рисунке 2).



Рисунок 2. Зависимость разности пеленгов (измеренного и рассчитанного) от значения измеренного пеленга

На рисунке 2 по оси ординат отложены значения разности (измеренного и рассчитанного) пеленгов в градусах, а по оси абсцисс – значения пеленга, полученные по данным РДСМ "Верея-2М". Точки - значения разности мгновенных пеленгов. Как следует из рисунка 2, мгновенные значения девиационных поправок группируются в области, имеющей характерную квазисинусоидальную форму с нулевыми значениями в окрестности углов кратных 90 град. При этом процесс в целом носит квазислучайный характер и может быть описан как сумма квазисинусоидальнего детерминированного тренда и случайного шума, подчиняющегося закону близкому к нормальному закону распределения мгновенных значений при нулевом среднем. Для физической интерпретации полученных экспериментальных данных, прежде всего, необходимо получить ответ на вопрос о характере помех в синусном и косинусном каналах пеленгатора, наличие которых формируют указанную зависимость разности пеленгов.

Пеленгаторная антенна регистрирует магнитную составляющую ЭМИ в виде двух компонент – проекций вектора **H** на оси местной (антенной) прямоугольной системы координат ХОҮ. При этом сигнал **H1** = **H**×**sin** $\alpha$ , **H2** = **H**×**cos** $\alpha$ ., где  $\alpha$  - угол (по часовой стрелке) между осью ОХ и направлением на источник.  $H = \sqrt{(H1)^2 + (H2)^2}$ , т. е., по вектору **H** диаграмма направленности приёма сигналов - круговая, а по **H1** и **H2** – "восьмёрки", причём угол между осями этих "восьмёрок" равен 90° (рисунок 3).

В данном случае в качестве математической модели помех, формирующих квазисинусоидальный тренд разности пеленгов, допустимо выбрать модель вида:  $\Delta H1 = \mathbf{A} \times \mathbf{SIN}(\alpha + \delta \phi)$  - в синусном канале;  $\Delta H2 = -\mathbf{A} \times \mathbf{COS}(\alpha + \delta \phi)$ . - в косинусном канале. Здесь  $\mathbf{A}$  – амплитуда помехи;  $\alpha$  - пеленг на источник сигнала;  $\delta \phi$  - фаза помехи. Зависимость нормированных амплитуд горизонтального магнитного поля сигнала от пеленга на источник излучения имеют вид:  $H1 = SIN(\alpha)$ ;  $H2 = COS(\alpha)$ . Данные выражения адекватно описывают зависимость нормированных амплитуд магнитных компонент сигнала H1, H2 в синусном и косинусном канале пеленгатора при отсутствии помех. Здесь:

$$H1 = \frac{H_x}{\sqrt{H_x^2 + H_y^2}}, \qquad H2 = \frac{H_y}{\sqrt{H_x^2 + H_y^2}}$$

где: H<sub>x</sub>, H<sub>y</sub> - амплитуды сигналов на входе синусного и косинусного каналов.

Тогда для нормированных амплитуд сигналов с помехами в ортогональных каналах имеем:

 $\delta H1 = H1 + \Delta H1; \quad \delta H2 = H2 + \Delta H2.$ 

Модельные зависимости пеленга на источник излучения как функция точного пеленга для случаев отсутствия и наличия помех в каналах пеленгатора представлены на рисунке 4 (в прямоугольной и полярной системе координат).





Рисунок 3. Диаграммы направленности приёма сигналов пеленгаторными антеннами (полярная система координат)





Значения разности пеленгов в каналах - с шумами и без шумов, - может быть оценено выражением вида:

$$\delta P2 = arctg\left(\frac{H1}{H2}\right) - arctg\left(\frac{\delta H1}{\delta H2}\right).$$
 (1)

На рисунке 5 иллюстрируется полученная в этом случае зависимость разности  $\delta P2$  от  $\alpha$ , для частного случая, когда  $\mathbf{A} = 0.25$  и  $\delta \boldsymbol{\varphi} = 0$  (в прямоугольной и полярной системе координат).

Сравнение экспериментально полученных зависимостей (рисунок 2), описывающих поведение тренда разности пеленгов, и модельных зависимостей (рисунок 5) обнаруживает их качественное совпадение, что позволяет сделать вывод об адекватности выбранной модели шумов реально существующим шумам в каналах пеленгатора. Коррелированность изменения уровня рассматриваемых помех в каналах с изменением уровня сигнала в зависимости от направления его прихода (пеленга на источник сигнала) указывает на присутствие поля переизлучения ЭМИ электропроводящими предметами, находящимися вблизи антенн пеленгатора, как основного источника этого вида помех.

Таким образом, основным физическим источником помех в каналах пеленгатора, формирующих тренд разности пеленгов, представленный на рисунке 2, скорее всего, является переизлучение ЭМИ электропроводящими предметами, находящимися вблизи антенн пеленгатора.

Физическая природа источника случайной составляющей наблюдений (рисунок 2) предположительно связана с инструментальной точностью используемых пеленгаторов, со случайными ошибками местоопределения разностно – дальномерной системы местоопределения "Верея-АМ", а также со случайными вариациями наклона и ориентации молниевых каналов. При этом оценка уровня этой составляющей процесса (~2 град) указывает на то, что в рассматриваемом случае основным источником случайной составляющей ошибок определения пеленга является инструментальная ошибка пеленгования источника, оцениваемая такой же величиной (~1.5 - 2 град).

Для получения оценок точного значения пеленгов составлена таблица значений поправок к измеренным пеленгам, построенная через 1 град. Значение поправки внутри градуса может быть получено путем линейной интерполяции. Аналогичным образом поправки вычисляют для остальных пунктов регистрации.

Компенсация систематической погрешности заключается в вычислении расчетного пеленга по формуле:

Pp = (Ризм – 
$$T_{i,1}$$
)\*( $T_{i,2} - T_{i+1,2}$ ) \* 180 / $\pi$  +  $T_{i,2}$ , (2)

где: Рр – искомый расчетный пеленг в рад; Ризм - измеренный пеленг в рад;  $i = INT(Pизм*180 / \pi) - це-$ лая часть измеренного пеленга в град;  $T_{i,1}, T_{i,2}, T_{i+1,2} -$ значения из таблицы поправок в рад.

Оценка случайной составляющей погрешности пеленгования производят по выборке сигналов молниевых разрядов после компенсации систематической составляющей погрешности. Методика расчета случайной составляющей погрешности радиопеленгаторов состоит из следующих шагов:

1) для измеренных пеленгов на источники сигналов ищут разности

$$C_i = P_{\mathcal{H}3\mathcal{M}_i} - Ppi, \qquad (3)$$

где: i = 1 n, n – число измерений.





Рисунок 5. Зависимость разности δP2 от угла α., моделирующая влияние помех (1) в каналах пеленгатора

2) находят дисперсию случайной погрешности измерений пеленгов по формуле:

$$\sigma^{2} = 1/(n-1) \cdot \sum_{i=1}^{n} C_{i}^{2}$$
(4)

3) отбрасывают значений Сі, превышающие 3 σ и значение дисперсии пересчитывают заново.

Проведенные расчеты для данных, показанным на рисунке, показали, что значения систематической ошибки лежат в интервале от (-7) до 12 град. СКО случайной составляющей ошибки имеет значение 2 град. Таким образом, оценку систематических погрешностей радиопеленгаторных средств контроля за ядерными испытаниями и их компенсацию можно осуществлять путем использования данных о грозовой обстановке, полученных средствами регистрации молниевых разрядов. Разработанная методика компенсации систематической ошибки позволяет повысить точность пеленгования импульсных источников электромагнитных сигналов в 3 – 4 раза.

#### Литература

- 1. Кукес, И.С. Основы радиопеленгации / И.С. Кукес, М.Е. Старик // М. : Советское радио, 1964.
- 2. Кашпровский, В.Е. Экспериментальное исследование расспространения радиоволн /М., Наука, 1980.
- 3. Азметов, Р.Р. Использование радиотехнического метода контоля в интересах народного хозяйства/ Р.Р. Азметов, В.А.

Григорьев, Б.П. Знаменщиков, В.М. Московенко // Вестник НЯЦ РК, выпуск 2(18), июнь 2004.

## ЯДРОЛЫҚ СЫНАУЛАРЫН ЖҮРГІЗБЕУІНЕ РЕСЕЙ БАҚЫЛАУ ЖҮЙЕСІНІҢ РАДИОТЕХНИКАЛЫҚ ҚҰРАЛДАРЫНЫҢ ДӘЛДІК СИПАТТАМАЛАРЫН БАҒАЛАУ ӘДІСІ МЕН НӘТИЖЕЛЕРІ

## <sup>1)</sup> Знаменщиков Б.П., <sup>2)</sup> Московенко В.М., <sup>1)</sup> Орешин В.П.

#### <sup>1)</sup>"Ресей Қорғаныс министрлігінің 12-ниі Орталық ғылыми-зерттеулік институты» ФММ, Мәскеу, Ресей <sup>2)</sup>Орманды авиациялық қорғауының орталық базасы, Мәскеу, Ресей

Найзағай разрядтарын тіркеу құралдарымен алынған нажағай жайғдайы туралы деректерін пайдалануы, ядролық сынауларына бақылау құралдары ретіндегі радиоторуылдауыштардың жүйелі қателіктерін бағалауына және олардың орнын толтыруына мүмкіндік береді. Бұл ретте торуылдау қателігі 3-4 рет азаятыны анықталған.

## METHOD & EVALUATION OF ACCURACY CHARACTERISTICS OF RADIO-TECHNICAL MEANS OF RUSSIAN MONITORING SYSTEM FOR NUCLEAR NON-TESTING

## <sup>1)</sup>B. Znamenshikov, <sup>2)</sup>V. Moskovenko, <sup>1)</sup>V. Oreshin

## <sup>1)</sup>FSI (Federal State Institution) 12<sup>th</sup> MOD Central Scientific and Research Institute, Moscow, Russia <sup>2)</sup>Central Air Base of Aviation Forest Protection, Moscow, Russia

It was shown in the report that application of thunderstorm data acquired by means of lightning discharge recording instruments allows to estimate and compensate systematic error of radio direction-finders as monitoring tools for nuclear tests. I was established that in this case error in direction-finding lessens by 3 - 4 times.

УДК 550.34:621.039.9

## ОСОБЕННОСТИ ВОЛНОВОЙ КАРТИНЫ ПОДЗЕМНОГО ЯДЕРНОГО ВЗРЫВА В СЕВЕРНОЙ КОРЕЕ 25 МАЯ 2009 ГОДА ПО ДАННЫМ РЕГИСТРАЦИИ РОССИЙСКИМИ СЕЙСМИЧЕСКИМИ СТАНЦИЯМИ

#### Маловичко А.А., Габсатарова И.П., Коломиец М.В.

#### Геофизическая служба РАН, Обнинск, Россия

Представлены результаты регистрации Службой срочных донесений (ССД) Геофизической службы Российской академии наук (ГС РАН) подземного ядерного взрыва, произведенного 25 мая 2009 г. в Северной Корее: записи волновых форм и параметры взрыва. Приводится сравнительная оценка эффективности использования различных критериев для различения ядерных взрывов и землетрясений.

25 мая 2009 г. Народная Демократическая Республика Корея объявила о проведении второго ядерного испытания. С точки зрения задач сейсмического мониторинга - это еще одно калибровочное событие, поэтому представляется полезным рассмотреть возможности сети ГС РАН и особенности волновой картины на региональных расстояниях при регистрации подобного рода событий.

## Параметры взрыва по данным Службы срочных донесений ГС РАН

Событие 25 мая 2009 г., магнитуда которого почти на единицу превышала магнитуду аналогичного события 9 октября 2006 г., было зарегистрировано многими мировыми сетями, в том числе и станциями Геофизической службы РАН. Как отмечалось в [1] сейсмическая сеть в режиме работы Службой срочных донесений ГС РАН представлена не только российскими станциями, но и станциями других сетей (рисунок 1). Это обеспечивает удовлетворительное окружение эпицентра события и получение статистически значимого решения для гипоцентра.

По сравнению со временем первого ядерного взрыва КНДР, проведенного в октябре 2006 г., состояние Службы срочных донесений (ССД) ГС РАН [1] к 2009 г. претерпело существенные изменения. Во-первых, увеличилось число станций, входящих в Глобальную сеть IRIS, записи которых стали доступны в режиме, близком к реальному времени (NRTS). В их число вошли станции, расположенные на территории Японии, а также пять станций сети Центра изучения Земли (GFZ, Потсдам, Германия): APE, ISP, KHC, MAUI, SNAA, VSU. Информационный поток был расширен в 2008 г. за счет результатов автоматической обработки данных по выделенным вступлениям сейсмических фаз, поступавших из Казахстанского национального центра данных (KNDC) Института геофизических исследований Национального ядерного центра Республики Казахстан по станциям IRIS-IDA (с января 2008 г.) и станциям Киргизской сети KNET (с октября 2008 г).



Треугольник: красный - станция, данные которой обработаны в Информационно-обрабатывающем центре ГС РАН; зеленый – станция, данные которой получены из МЦД ОДВЗЯИ как результат автоматической обработки

Рисунок 1. Схема расположения сейсмических станций, зарегистрировавших ядерный взрыв 25 мая 2009 г. в Северной Корее и участвовавших в определении его параметров в режиме ССД ГС РАН

Во-вторых, было усовершенствовано программное обеспечение ИОЦ ГС РАН за счет внедрения программы автоматизированного определения параметров гипоцентра ASSOCW [2, 3], которая перебором возможных комбинаций неассоциированных фаз вступлений обеспечивает нахождение возможного гипоцентра события. В качестве входной информации для программы использовались срабатывания детектора LTA/STA, записанные в БД программой АУЗ [2] в ССД, а также полученные по электронной почте arrival-вступления из международных центров данных. В случае нахождения при неком наборе вступлений решения со станционными невязками менее 1.5 - 2 сек, оно сохранялось в БД и использовалось далее как первое приближение для оценки гипоцентра в программном комплексе WSG [2]. Магнитуда события по объемной волне рассчитывалась автоматически по всем используемым станциям и их значения осреднены. Реализованные действия позволили улучшить качество и скорость получения параметров сейсмических событий в ССД ГС РАН.

Параметры эпицентра ядерного взрыва, произведенного в Северной Корее, были определены в три этапа:

- предварительное автоматическое решении получено уже через 17 минут после взрыва по данным 16 станций: ULN, TLY, YAK, SEY, TIXI, MK31, KURK, AAK, BRVK, ARU, AB31, KDAK, OBN, WRAB, GNI, BFO, расположенных на телесейсмических расстояниях от эпицентра взрыва;
- первое интерактивное решение получено по данным 34 станций, из которых 6 добавившихся: VLA, TJN, MAJO, HIA, ERM, YSS, расположены на региональных расстояниях от эпицентра взрыва;
- уточненное решение получено по данным 51 станции, из которых добавившиеся станции из бюллетеня SEL1 ОДВЗЯИ расположены на расстояниях от 2.8° до 94.5° и достаточно равномерно окружают эпицентр взрыва (рисунок 1).

Параметры взрыва 25 мая 2009 г., полученные в ССД ГС РАН, сравнены с аналогичными параметрами, полученными в разных сейсмологических центрах (таблица 1).

Таблица 1. Сравнение результатов определения основных параметр ядерного взрыва в Северной Корее 25 мая 2009 г., полученных в различных сейсмологических центрах

NN	Время в очаге, ч-мин-с (GMT)	Широта, град.	Долгота, град.	Глубина, км	Количество станций	mb/ N	GAP	Центр
1	00-54-40.9	41.29	129.07	0	51	5.0/31	95	ИОЦ ГС РАН
2	00-54-43.8	41.33	129.01	0	76	4.7/57	83	NEIC
3	00-54-44.6	41.29	128.98	10	86	4.9	46	CSEM
4	00-54-42.8	41.3110	129.0464	0.0	59	4.5/45	53	IDC-REB
Приме	Примечание: ИОЦ ГС РАН – Информационно-обрабатывающий центр Геофизической службы РАН; NEIC – Национальный центр информации о замлятика Салигии							

IDC – Международный центр данных, Австрия, Вена; GAP – максимальная азимутальная брешь в окружении эпицентра станциями

Как видно из таблицы, отмечается хорошее совпадение определений местоположения ядерного взрыва по данным различных центров (рисунок 2). Так, например, расхождение в определениях эпицентра, выполненных в ИОЦ ГС РАН и IDC-REB, не превышает 5 км.



Рисунок 2. Результаты локации ядерного взрыва в Северной Корее 25 мая 2009 г. по данным различных источников

## Записи ближайших станций на территории России

Ядерные взрывы 2006 и 2009\_гг. зарегистрированы несколькими ближайшими к ним станциями на территории России: Владивосток - VLA, Мыс Шульца - MSH, Горнотаежное – GRTR (зарегистрировала только взрыв 6 октября 2006 г.) и Терней-ТЕҮ. На рисунке 3 показано расположение этих станций относительно эпицентра ядерного взрыва.

Станция Владивосток расположена на эпицентральном расстоянии  $\Delta$  2.8°, оснащена широкополосным сейсмометром СМЗ-ОС и 16-ти разрядной цифровой регистрирующей аппаратурой SDAS (Геотех+, ГС РАН, Обнинск), которая обеспечивает столообразную характеристику по скорости в полосе частот 0.02 - 5 Гц. Сейсмостанция Мыс Шульца удалена от эпицентра взрыва на расстояние  $\Delta 2^{\circ}$ , оснащена велосиметром СМG3TB (120 с, 50 Гц) и акселерометром CMG5T (0.02 – 5 Гц). Станция Терней находится на расстоянии ∆ 6.6°. Это - цифровая широкополосная станция DATAMARK LS7000XT с сейсмометрами L4C-3D.(1.0 - 20 Гц), STS2 (0.00833 - 50 Гц). Все станции расположены в узком азимутальном створе, от 40° до 55°. Записи ядерного взрыва станциями MSH, VLA и ТЕУ приведены на рисунке 4 а. К сожалению, во время второго ядерного взрыва не работала станция Горнотаежное, одна из ближайших станций, зарегистрировавших первый взрыв в Северной Корее [1].

Характерная черта взрыва на записях двух ближайших станций - MSH и VLA, - выражается, в первую очередь, в максимальной энергии колебаний продольных волн (рисунок 4 б). В более удаленной зоне (например, записи станции TEY) волновая картина существенно изменяется: Рд волна вообще не регистрируется, а максимальная энергия отмечается в поперечных и поверхностных волнах.

Особенности волновой картины записей станциями VLA и MSH ядерного взрыва в Северной Корее хорошо видны в наборе записей октавных полосовых фильтров, приведенных на рисунке 5. При изображении отфильтрованных записей используется одинаковый амплитудный масштаб.



Рисунок 3. Местоположение эпицентра взрыва 25 мая 2009 г. в Северной Корее и ближайшие станции сети ГС РАН



Рисунок 4. К результатам регистрации второго ядерного взрыва в Северной Корее: а - трехкомпонентные записи цифровых станций MSH, VLA, TEY (отфильтрованы в полосе частот 0.1 - 4 Гц, выровнены по первому вступлению волны Pn); б - сравнение спектров мощности P и LRM волн вертикальной компоненты станции MSH в окне длительностью 7.5 с.



Рисунок 5. Разложение записи вертикальной компоненты ядерного взрыва в Северной Корее 25 мая 2009 г. на записи в 8 частотных диапазонах: 0.2 - 0.6 Гц, 0.5 - 1.0 Гц, 1.0 - 2.5 Гц, 1.5 - 3.0 Гц, 2.0 - 4.0 Гц, 3.0 - 6.0 Гц, 4.0 - 8.0 Гц, 10 - 20 Гц

На 12 станциях Байкальского филиала ГС СО РАН, удаленных от ядерного взрыва на расстояния от 14° до 23°, также отчетливо зарегистрированы волны Pn и Sn,. Волновая картина наиболее представительна при фильтрации в полосе частот 0.7 – 2 Гц.

## Сравнение записей взрывов 9 октября 2006 г. и 25 мая 2009 г.

Параметры двух северокорейских взрывов по данным Информационно-обрабатывающего центра ГС РАН приведены в таблице 2.

Как видно из таблицы 2, расхождение между эпицентрами двух взрывов составляет 8.4 км, что примерно соответствует погрешности определения координат сейсмических событий в этом регионе. Благодаря использованию более плотной сети станций, обеспечившей лучшее окружение эпицентра и меньшее значение пустого максимального азимутального угла GAP, параметры второго взрыва определены с более высокой точностью.

Исследование спектральных особенностей записей зарегистрированных сейсмических фаз имеет большое методическое значение в задаче обнаружения ядерных испытаний и дискриминации взрывов и землетрясений. Особенно важны они на близких расстояниях, так как, взрывы умеренной силы будут наиболее отчетливо записаны на региональных расстояниях. Представляет интерес провести сравнительный анализ записей двух взрывов на одной из ближайших станций - «Владивосток». Трехкомпонетные записи станции «Владивосток» на широкополосном канале (сейсмометр СМЗ-ОС) обоих событий приведены в одной амплитудной и временной относительной шкале на рисунке 6.

В волновой картине двух взрывов наблюдаются как схожие, так и отличные характерные черты.

:30 Time (hr:min:sec)

а - трехкомпонентные записи

Время

Особенно это заметно на трассах, рассчитанных по программе «Geotool» [4] через набор полосовых фильтров Баттерворта (рисунок 7).

В качестве подобных черт, объясняемых, вероятно, общей трассой распространения сейсмических волн, в обоих случаях, можно назвать проявление интенсивной вторичной волны Pg, которая регистрируется через 5.1 с после первого вступления и хорошо заметна как на вертикальных, так и на горизонтальных составляющих.

Как следует из рисунка 6, оба события характеризуются очень нечеткими, слабовыраженными поперечными волнами Sn, но значительными (особенно при фильтрации в полосе 0,5 - 1 Гц и на горизонтальных компонентах) каналовыми волнами Lg (рисунок 7).

Среди самых заметных особенностей отличительного характера - отсутствие поверхностной волны при первом взрыве на вертикальной компоненте, при втором взрыве, напротив, поверхностная волна относительно хорошо видна даже на записи без фильтрации (рисунок 6). На фильтрованной записи (рисунок 7б) поверхностная волна отчетливо выделяется при фильтре 0.2 - 0.6 Гц и имеет нормальную дисперсию, максимум колебательной скорости приходится на цуг с периодом 2 с. Это отчетливо видно и на частотновременной диаграмме (спектрограмме). Спектрограммы по записям станции VLA (рисунок 8), построенные по программе «Geotool», показывают изменчивость частотного состава со временем в пределах всей записи. Длина скользящего временного окна составила 5 с, сдвиг – 0.6 с. Значения амплитуды спектров мощности нормированы по максимуму и показаны цветом, согласно приводимой шкале.

> Time (hrm б – фрагменты записи вертикальной компоненты

NN	Время в очаге (ч-мин-с GMT)	Широта, град.	Долгота, град.	Глубина, км	Число станций	mb/ N	GAP	Эпицентральное расстояние, Δ
1	01-35-26,0	41,31	128,96	0	11	4,0/6	125	2.83 – 73.66°
2	00-54-40,9	41,29	129,07	0	51	5,0/31	95	2.78 – 94.48°
I           Via/bhz           09Oction           013220           Via/bhz           03Oction           via/bhz           Via/bhz	00-54-40,9         41,29         129,07         0           Pn Pg'         Sn Lg					р мулимини р п		MMMMMMMMM

Таблица 2. Основные параметры ядерных взрывов в Северной Корее 9 октября 2006 г. и 25 мая 2009 г. Глубица

Рисунок 6. Станция VLA. Сравнение сейсмограмм двух взрывов в Северной Корее

:04:00

:01:00

:30

## ОСОБЕННОСТИ ВОЛНОВОЙ КАРТИНЫ ПОДЗЕМНОГО ЯДЕРНОГО ВЗРЫВА В СЕВЕРНОЙ КОРЕЕ 25 МАЯ 2009 ГОДА ПО ДАННЫМ РЕГИСТРАЦИИ РОССИЙСКИМИ СЕЙСМИЧЕСКИМИ СТАНЦИЯМИ







Рисунок 8. Станция VLA. Сравнение спектрально-временных диаграмм для двух взрывов в Северной Корее: а – 9 октября 2006 г., б – 25 мая 2009 г.

Как видно из спектрограмм, наибольшую энергию несут в себе объемные продольные волны в полосе частот от 1,5 до 7 Гц. Большая часть энергии поверхностных каналовых волн Lg сосредоточена в полосе частот 1 - 3 Гц.

В спектрах продольных волн Pn и Pg и каналовой волны Lg прослеживаются отчетливые минимумы, связанные, вероятно, с поглощающими свойствами геологической среды, так как они наблюдаются на спектрах сигналов, полученных при обоих взрывах (рисунок 9). Для Pn - это минимумы на частотах 0.8, 2,3, 3.9, 4.7, 5.6 Гц, для Pg - 3.3, 4.15, 5.7, 7.2 Гц, для Lg - 2.85, 3.85, 5.3, 6.15, 8.15 Гц. Некоторые минимумы с небольшим сдвигом выделяются на спектрах всех волн – 4.0±0.15 (3.85 - 4.15) Гц, 5.5±0.2 (5.3 - 5.7) Гц.

Таким образом, анализ зарегистрированной волновой картины в целом подтверждает ранее установленные признаки ядерного взрыва [4 - 7]: короткопериодный 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.



Рисунок 9. Станция VLA. Сопоставление спектров волн: а - Рп; б - Рg; в- Lg, - при ядерных взрывах 09 октября 2006 г. (желтые линии) и 25 мая 2009 г. (красные линии)

## Сейсмические дискриминанты

Для различения взрывов и землетрясений, как правило, анализируются амплитудные спектры и их отношения для волн Pn, Pg, Sn и Lg [1, 5 - 7], а также логарифмы спектральных отношений фрагментов названных фаз [8].

Для станций MSH и VLA наиболее представительной является спектральная плотность Pg/Lg, для более удаленной станции TEY ( $\Delta$  6.6°) - спектральная плотность Pn/Lg. Для станции GRTR ( $\Delta$  3.3°) в [1] рассмотрены отношения Pg/Lg и Pn/ Lg. На рисунке 10 для вертикальной компоненты записей этих станций приведена спектральная плотность, усредненная в частотных интервалах (1, 3, 5,...Гц).

В [8] Р.G. Richards, W.-Y.Кіт приводят построенную зависимость значений логарифма спектрального отношения Pg/Lg от частоты для восьми дискретных значений частот (Гц): 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15 по трехкомпонентной записи для взрывов и землетрясений в районе исследования. На рисунке 10 б для взрыва 9 октября 2006 г. эти значения частот равны 0.65, 0.3, 0.43, 0.3, 0.6, 0.42, 0.45 и 0.41, соответственно. В ГС РАН осредненные спектральные отношения получены для записей на вертикальной компоненте. Все они имеют общую тенденцию к увеличению значений с ростом частоты в диапазоне от 1 до 9 Гц (рисунок 10). Для взрыва 2006 г. данные по сейсмостанции GRTR достаточно хорошо согласуются с данными [8], полученными P.G. Richards, W.-Y.Kim для сейсмостанции MDJ.

Проведенный анализ волнового поля и оценки спектральных отношений амплитуд волн Pn, Pg и Lg позволяют считать, что запись сейсмического события 25 мая 2009 г. (так же как и события 9 октября 2006 г.) не противоречат известным [5 - 8] характеристикам записей подземного ядерного взрыва.

# ОСОБЕННОСТИ ВОЛНОВОЙ КАРТИНЫ ПОДЗЕМНОГО ЯДЕРНОГО ВЗРЫВА В СЕВЕРНОЙ КОРЕЕ 25 МАЯ 2009 ГОДА ПО ДАННЫМ РЕГИСТРАЦИИ РОССИЙСКИМИ СЕЙСМИЧЕСКИМИ СТАНЦИЯМИ



Рисунок 10. Спектральные плотности Pg/Lg и Pn/Lg, осредненные в частотных интервалах, станций

## Литература

- Старовойт, О.Е. Регистрация подземного ядерного взрыва в Северной Корее Геофизической службой РАН / О.Е. Старовойт, И.П. Габсатарова, М.В. Коломиец // Вестник НЯЦ РК, 2008. – Вып.2. – С. 27 - 32.
- Красилов, С.А. Организация процесса обработки цифровых сейсмических данных с использованием программного комплекса WSG / / С.А. Красилов, М.В. Каломиец, А.П. Акимов / Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы международной сейсмологической школы, посвященной 100-летию открытия сейсмических станций «Пулково» и «Екатеринбург». – Обнинск: ГС РАН, 2006. – С. 77 – 83.
- Акимов, А.П. Автоматический модуль быстрого определения параметров гипоцентра землетрясения по данным цифровой сейсмической сети / А.П. Акимов // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Четвертой международной сейсмологической школы, Листвянка, 10 - 14 августа 2009 г. – Обнинск: ГС РАН, 2009. – С. 3 – 7.
- 4. Coyne, J. IDC Documentations Geotool Software User Tutorial / J. Coyne, K. Clark, S. Lloyd // 16 July 2003. P 59.
- Пасечник, И.П. Характеристики сейсмических волн при ядерных взрывах и землетрясениях / И.П. Пасечник // М.: Наука, 1970. – 193 с.
- 6. Гамбурцева, Н.Г. Сейсмический метод идентификации подземных ядерных взрывов и землетрясений на региональных расстояниях / Н.Г. Гамбурцева // Физика Земли. 2004. № 5 С. 80 94.
- Кедров, О.К. Сейсмические методы контроля ядерных испытаний / О.К. Кедров // Москва Саранск: Изд-во ИФЗ РАН, 2005. – С. 420.
- 8. Richards, P.G. Analysis of digital seismograms from nuclear explosions across forty years / P.G. Richards, W.-Y.Kim // Вестник НЯЦ РК, 2008. Вып. 2. С. 21 26.

## РЕСЕЙ СЕЙСМИКАЛЫҚ СТАНИЯЛАРЫМЕН ТІРКЕУ ДЕРЕКТЕРІ БОЙЫНША 2009 ЖЫЛҒЫ МАМЫРДЫҢ 25-ІНДЕГІ СОЛТҮСТІК КОРЕЯДАҒЫ ЖЕРАСТЫ ЯДРОЛЫҚ ЖАРЫЛЫСТЫҢ ТОЛҚЫНДЫҚ СҮРЕТІНІҢ ЕРЕКШЕЛІКТЕРІ

#### Маловичко А.А., Габсатарова И.П., Коломиец М.В.

#### РҒА Геофизикалық қызметі, Обнинск, Ресей

Солтүстік Кореяда 2009 ж. мамырдың 25-інде жүргізілген жерасты ядрполық жарылысты Ресей ғылыми академиясы Геофизикалық қызметінің Жедел хабарлама қызметімен тіркеу нітижелері келтірілген: толқындық түрлерінің жазбалары мен жарылыстың параметрлері. Ядролық жарылыстар мен жерсілкінулерін айыру үшін әр түрлі критерийлерін қолдану тиімділігінің салыстырма бағалауы келтірілген.

## WAVEFORM FEATURES OF UNDEGROUND NUCLEAR EXPLOSION IN NORTH KOREA ON MAY 25, 2009 ACCORDING TO DATA FROM RUSSIAN SEISMIC STATIONS

#### A.A. Malovichko, I.P. Gabsatarova, M.V. Kolomiets

#### Geophysical Survey of RAS, Obninsk, Russia

The report presents recording results by Earthquake Early Alert Service (EEAS) of the Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences (GC RAS) for the underground nuclear explosion carried out on the 25th of May, 2009 in North Korea: waveform records, parameters of the explosion. Comparative estimation is given for effective use of various parameters to identify nuclear explosions and earthquakes.

## К ВОПРОСУ ИНТЕРПРЕТАЦИИ НАЧАЛЬНЫХ ФАЗ ПРОДОЛЬНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН, РЕГИСТРИРУЕМЫХ В РЕГИОНАЛЬНОЙ ЗОНЕ ПОДЗЕМНЫХ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ КНДР

## <sup>1)</sup>Васильев А.П., <sup>2)</sup>Поплавский А.С.

<sup>1)</sup>Служба специального контроля, Москва, Россия <sup>2)</sup>Национальный центр данных, Дубна, Россия

Приводятся некоторые результаты интерпретации продольных преломлённых волн Pg, Pb, Pn, а также запредельных отражённых волн PgPg, PbPb, PnPn, зарегистрированных в региональной зоне двух подземных ядерных взрыв на полигоне Хвадэ (Пуангери) в КНДР: 6.10.2006 г. и 25.05.2010 г. Уточнен порядок следования фаз в группе коровых волн, приходящих за волной Pn, для разных эпицентральных расстояний, установлены характерный участок записи перед первым вступлением волны Pn и особенности этого вступления

Как известно [1], при подземных ядерных взрывах (ПЯВ) в региональной зоне, на эпицентральных расстояниях до 800 - 1200 км, регистрируются несколько типов продольных волн: прямые волны Р<sub>0</sub>, преломлённые волны Pg, Pb, Pn, а также запредельные отражённые волны PbPb, PgPg, PnPn. Из-за большого разнообразия геологического и тектонического строения земной коры различных регионов, которое оказывает сильное влияние на условия распространения волн, сейсмические сигналы имеют сложную форму, специфичную для каждой из сейсмических станций в данном регионе, и отличную от формы сигналов на телесейсмических расстояниях. Поскольку сигналы региональной зоны несут в себе большой объём информации о взрыве и условиях его проведения, а в обработке сигналов в сейсмологических центрах используют сигналы, принятые во всём диапазоне эпицентральных расстояний, возникает задача выделения, тщательного анализа и правильной интерпретации сейсмических волн региональной зоны. В статье эта задача рассматривается применительно к продольным волнам. Хорошее знание формы сигналов региональной зоны имеет большое значение также и для идентификации ПЯВ, произведенных на конкретном полигоне.

### ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Для анализа использованы волновые формы сейсмических сигналов, зарегистрированных от двух ПЯВ, произведённых на полигоне Хвадэ (Пуангери) в КНДР: 6.10.2006 г. и 25.05.2010 г. Параметры этих взрывов приведены в таблице 1.

Отобраны сейсмограммы, полученные группой станций Владивосток (VLA) - ГС РАН; Mudanjang (MDJ) - IRIS (КНР); Горнотаёжное (GRT) - Сахалинский филиал ГС РАН; Уссурийск (УСС) - ССК МО; Уссурийск (USRK) - МСМ (РФ); Wonju (KSRS) -МСМ (Республика Корея); Inch оп (INCH) - IRIS (Республика Корея) на региональных расстояниях. Сведения об этих станциях приведены в таблице 2.

Обрабатывающий центр	Время в эпицентре, час, мин, сек	Координаты эпицентра, СШ; ВД, в град.	Количество станций (n)	Магнитуда m <sub>ь</sub> / n
	ПЯ	7B 9 октября 2006 г.		
ИОЦ ГС РАН	01:35:26,0	41,31; 128,96	11	4,0/6
NEIC USGS	01:35:27,0	41,294; 129,094	17	4,2/-
IDC-SEL1	01:35:28,33	41,2796; 129,0137	13	4,0/11
IDC-REB	01:35:27,58	41,3119; 129,0189	22	4,1/6
	Γ	IЯВ 25 мая 2009 г.		
ИОЦ ГС РАН	00:54:40,9	41,29; 129,07	51	5,0/31
NEIC USGS	00:54:43,76	41.334; 129,011	51	4,7/
IDC-SEL1	00:54:42,84	41,289;129,048	23	4,5/20
IDC-REB	00:54:42,80	41,311; 129,046	59	4,5/45

Таблица 1. Параметры подземных ядерных взрывов в КНДР по данным различных обрабатывающих центров

Таблица 2. Сведения о станциях, участвующих в исследованиях

Название станции и её принадлежность	Код	Координаты	Эпицентральное расстояние, град (км)	Азимут на эпицентр, град
Владивосток, ГС РАН	VLA	43,12; 131,88	2,85 (320)	229
Mudanjang, IRIS (KHP)	MDJ	44,62; 129,59	3,30 (366)	188
Горнотаёжное, Сахалинский филиал ГС РАН	GRT	43,71; 132,15	3,40 (378)	232
Уссурийск, ССК МО	УСС	44,09; 132,02	3,51 (389)	216
Уссурийск, IMS (РФ)	USRK	44,20: 131,98	3,61 (401)	216
Wonju, IMS (PK)	KSRS	37,50; 127,90	3,97 (441)	14
Inch`ŏn, IRIS (PK)	INCH	37,47; 126,50	4,30 (478)	34
Taejŏn, IRIS (PK)	TJN	36,37; 127,36	5,80 (644)	36

Как следует из таблицы, использованные исходные данные охватывают диапазон эпицентральных расстояний от 320 до 478 км и диапазон азимутов от 14 до 232 град.

В Уссурийской лаборатории сейсмограммы обоих взрывов зарегистрированы вертикальным короткопериодным каналом цифровой аппаратуры без фильтра. На остальных шести станциях, работали трёхкомпонентные широкополосные установки, хотя при анализе использованы только записи вертикальных каналов. Кроме того, по станциям KSRS и USRK использованы фрагменты записей трёхкомпонентных установок и сейсмических групп. Регистрация на всех станциях проводилась цифровой аппаратурой, имеющей достаточно близкие частотные характеристики. На рисунке 1 приведены амплитудночастотные характеристики вертикальных каналов использованной аппаратуры.

Амплитудно-частотные характеристики № 2 и № 3 для станций IRIS даны по скорости в диапазоне частот от 0,2 до 8 Гц. Как видно из рисунка 1, цифровая аппаратура на станциях практически идентична и предназначена для регистрации объемных волн в короткопериодном диапазоне. Перечень фрагментов непрерывной записи, использованных для анализа, приведен в таблице 3.



АЧХ №1 - канал Z станции УСС; АЧХ № 2 - канал BHZ станции VLA; АЧХ № 3 - канал BHZ станций INCH и MDJ; АЧХ № 4 - канал SHZ станции KSRS; АЧХ № 5 - канал BHZ станции KSRS

Рисунок 1. Нормированные амплитудно-частотные характеристики

Таблица 3. Перечень фрагментов сейсмограмм, использованных при исследованиях

Станция, код	Канал	Период регистрации	Примечание	
		ПЯВ 9 октября 2006 г. (взрь	в№ 1)	
Владивосток, VLA	Z	с 01:36:7,2 по 01:36:23,4 и	фрагменты записи 3-К профильтрованы	
	3-K	с 01:35:00 по 01:39:00	в полосе частот 0,7 - 1,4 Гц	
Mudanjang, MDJ	3-K	с 01:36:10 по 01:36:55.		
Уссурийск, УСС	Z	с 01:36:18 по 01:36:55	московское время приведено к всемирному	
Горнотаёжное, GRT	3-K	с 01:36:03,2 по 01:37:43,8 [4].		
Inch`ŏn, INCH	3-K	с 01:36:20 по 01:37:05.		
ПЯВ 25 мая 2009 г. (взрыв № 2)				
Владивосток , VLA	Z	с 00:55:17,2 по 00:55:34,3.		
Mudanjang, MDJ	3-K	с 00:55:17 по 00:56:00.		
Уссурийск, УСС	Z	с 00:55:30,74 по 00:56:45,21		
Уссурийск, USRK	Z	с 00:55:38,5 по 00:55:51,2		
		с 00:55:37,67 по 00:55:56	со всех элементов системы	
			сейсмического группирования	
Wonju, KSRS	Z	с 00:55:44,275 по 00:55:59,275		
		с 00:55:42,750 по 00:56:01.	со всех элементов системы	
			сейсмического группирования	
Inch`ŏn, INCH	3-К	с 00:55:40 по 00:56:20.		

#### Анализ данных и материалов

Анализ волновых форм коровых волн от ПЯВ, зарегистрированных на эпицентральных расстояниях от 320 до 644 км, проведён с использованием схемного изображения, приведенного на рисунке 2.

На рисунке 2 по оси абсцисс - разность времён пробега коровых волн относительно момента вступления волны Pn в секундах. Вдоль оси ординат указаны станции в порядке возрастания их эпицентральных расстояний (от 320 км для VLA и до 644 км для TJN). Каждой станции отведены две парные линии с нанесёнными на них разностями времён пробега: верхняя (Г) по годографу IASPEI (International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior) [7] ( $\Gamma$ ),  $\mu$ нижняя (Р) - по измерениям на реальных записях. Времена вступления коровых волн на сейсмограммах станций с эпицентральным расстоянием, отличным от имеющихся в таблицах IASPEI, рассчитаны путем интерполяции между двумя соседними значениями времён вступления одноимённых фаз, взятых из таблиц IASPEI. Проверка правильности расчётных значений для волны Pn осуществлена по таблицам Джеффриса-Буллена с дискретом расстояний 0,5 град [6]. На рисунке 2 для каждого типа волн, или фаз информация представлена следующим образом. На линиях «Р» построены прямоугольники, соответствующие фазам, выделенным на реальных фрагментах записи. Длина основания прямоугольника соответствует длительности, высота - нормированной амплитуде выделенной фазы. В качестве нормирующего делителя использована максимальная амплитуда на участке записи про-





дольных коровых волн. Критерием выделения фаз на записях являлась бо́льшая интенсивность выделяемой фазы на фоне продолжающейся записи сигнала и длительность их огибающей не менее 1 - 2 сек. При этом использованы записи волн, главным образом, от второго (более мощного) взрыва, хотя формы сигналов от первого и второго взрывов мало, чем отличаются между собой. Однако на сейсмограммах второго взрыва вступления фаз являются более чёткими и интенсивными, что иллюстрирует пример записей трёх станций (рисунки 3 и 4).



Цифры («1» и «2») - номера ПЯВ. Трапеция слева от оси ординат указывет на факт регистрации малоамплитудной фазы перед вступлением интенсивной волны P<sub>n</sub>. Высота трапеции соответствует длительности этой фазы





Рисунок 4. ПЯВ 25.05.2009 г. Начальные фрагменты записи продольных сейсмических волн (канал Z) на станциях

Сопоставление времен вступления фаз, определенных по годографу и по измерениям на реальных записях (рисунок 2) показало, что для большинства станций (INCH, USRK и УСС, GRT, MDJ) они совпадают. Характерной особенностью сигналов, зарегистрированных этими станциями, является то, что большая доля их энергии заключена в цугах колебаний фаз Pb. PnPn. PbPb. следующих за волной Pn. Однако в сигналах, регистрируемых станцией KSRS, наиболее интенсивной является фаза Pn, а из выделенных на записях трёх фаз лишь одна, последняя, совпадает по времени с вступлением по годографу IASPEI – это волна Рд. На записях станций VLA и MDJ после последних коровых волн (по годографу IASPEI) присутствуют цуги интенсивных колебаний общей длительностью 6 - 6,5 сек. Случаи отклонения времён вступления фаз, измеренных на реальных записях, от фаз, рассчитанных по годографу IASPEI нередки, и объясняются существенным отличием реальной толщины слоёв земной коры и углами их залегания от принятых средних величин в модели IASPEI.

В отличие от схемного изображения цугов фаз (рисунок 2) на реальных записях ПЯВ временной промежуток от фазы Pn до вступления следующих коровых фаз заполнен повторяющимися колебаниями, похожими на цуги волны Pn, с уменьшающейся амплитудой, но превышающей фон, зарегистрированный до вступления сигнала. Частотное заполнение записи продольных волн, на всём ее протяжении, характеризуется периодами 0,1 – 0,3 сек. По всей длительности сигнала наблюдаются интерференционные участки, участки квазиколебаний с переменной частотой, цуги колебаний с разными длительностями и амплитудами.

Обращает на себя внимание то, что в бюллетенях сейсмологических центров для станций, расположенных на региональных расстояниях, из всего многообразия коровых волн указаны только волны Pn и Pg. Обобщённые данные сейсмологических центров по результатам обработки записей обоих ПЯВ, произведенных в КНДР, приведены в таблице 4.

На основании годографа IASPEI и с учётом величин медленностей, опубликованных в бюллетене REB (Reviewed event bulletin -каталог Международного центра данных) за 25.05.2009 г., для станций USRK и KSRS проведена дополнительная интерпретация коровых волн, следующих за волной Рп. Интерпретация выполнена по наименьшему отклонению времени вступления фазы от годографа и, при наличии измеренной медленности, - по наибольшему соответствию значений медленностей фаз - измеренной и по годографу. Обобщённые результаты сведены в таблицу 5.

T ( 1	( ) )	~		)	
Iaonuua 4	Сводные данные	сеисмологических	иентров по	двум ядерн	ым взрывам в КН/ІР
1 0000000000000000000000000000000000000	coonnore ourmore	contentono con recontant	<i>yennp</i> 00 <i>m</i> 0	00,111 110 ep	own osporotan o ranga

Кол	9.10.2006; To=	=01:35:28 (REB)	25.05.2009; To:		
станции	Время вступле- ния/ пробега Pn	Время вступле- ния/пробега Рg	Время вступле- ния/пробега Pn	Время вступле- ния/пробега Рg	Приме- чание
VLA	1:36:12,6/44,6	1:36:17,7/49,7	00:55:24/41,9	00:55:30,0/47,0	
MDJ	1:36:21,6/53,6	1:36:29,13/61,1	00:55:36,7/53,7*	00:55:43,7/60,7*	
GRT	1:36:21,4/53,4*	1:36:28,2/59,2*			
УСС	1:36:23,7/55,7*	1:36:23,75/63,3*	00:55:39,0/56,0*	00:55:46,9/66,9*	
USRK			00:55:39,35/56,3	00:55:47,35/64,3	
KSRS			00:55:44,60/61,6	00:55:45,7/62,5 00:55:57,0/74,0	Канал 31sZ REB
INCH	1:36:33,86/65,9	1:36:47,38/73,5	00:55:49,6/66,6	00:55:56,2/73,2* 00:56:03,8/80,8*	Доп. фаза
TJN			00:56:00,4/77,4		
Примечание: со	звёзпочкой - значения г	олученные в результате	измерений на записях разн	юстей межлу моментами в	етуплений группы

примечание: со звездочкой - значения, полученные в результате измерении на записях разностей между моментами вступлении группы коровых волн и волны Pn (также как в сейсмологических бюллетенях они обозначены символом Pg), без звездочки – значения, заимствованные из бюллетеней или сейсмограмм с автоматическим выделением фазы по заданному значению медленности.

Таблица 5. Сопоставление результатов экс	периментальных и расчетных (	по годограф	by IASPEI,
--	------------------------------	-------------	------------

Код	Реально измеренные Код величины		Фвза по го с соответствующи	Интерпретация фа-	
станции	Δt=t <sub>κop</sub> – t <sub>Pn,,</sub> C	медленности, с/град	Фаза перед, с/град	Фаза после, с/град	Рn
VLA	5,1	-	Pb (4,0)	Pg ( 5,5)	Pg
MDJ	7,5	-	Pb (7,0)	PnPn (8,0)	Pb или PnPn
GRT	5,8	-	-	Pb (7,5)	Pb
VCC	7,5	-	-	Pb (7,8)	Pb
JCC	9,0	-	PnPn (8,5)	PbPb (10)	PnPn
USRK	8,0	16,3	PnPn (7,8/13,75)	Pb (8/17,05)	Pb
KSRS	12,2	17,8	PbPb (1,5/17,05)	Pg (13,5/24,7)	PbPb
INCL	6,2	-	-	PnPn (7,0)	PnPn
	14,2	-	PbPb (13,0)	Pg (17,0)	PbPb

Из таблицы 5 следует, что только для станции Владивосток (VLA) в группе коровых волн первой фазой, следующей за Pn, является Pg, для всех остальных станций – это Pb, PnPn или PbPb.

Таким образом, проведённый анализ позволил уточнить порядок следования фаз за волной Pn, хотя каждая фаза в отдельности в этой группе коровых волн осталась не интерпретированной. Установлено, что величина разности времён между фазой Pn и началом вступления первой интенсивной фазы коровых волн для каждой из станций, привлечённых для исследований, является характерным отличительным признаком сигналов от ПЯВ, произведенных на полигоне Хвадэ КНДР. Обращает на себя внимание автоматическое выделение фазы Pg на записи канала 31/bhz станции KSRS (таблица 5) спустя 0,7 сек. Сопоставление записей начальной части сигналов,



Рисунок 5. ПЯВ 25.05.2009 г. Сопоставление сейсмограмм, зарегистрированных станциями USRK (вверху) и KSRS (внизу)

зарегистрированных 25.05.2009 г. на станциях KSRS и USRK (рисунок 5) однотипными каналами «sz» показало, что на этот момент приходится сложение двух фаз – с малой и с большой (от десяти до несколько десятков раз) амплитудами. Аналогичная картина наблюдается на записях взрывов 09.10.2006 г. и 25.05.2010 г. вертикальным каналом станции УСС (рисунок 6), где за слабой волной (примерно через 1 сек) следует второе вступление, максимальная амплитуда которого превышает в 40 - 25 раз первое вступление. Фаза с малой амплитудой на рисунке 6 выделена двойными вертикальными линиями (временная сетка через 5 сек).

Вступление фазы с малой амплитудой чётко прослеживается и на записях станций MDJ (рисунок 7), особенно для ПЯВ, произведенного 25.05.2009 г. (рисунок 7б).



Рисунок 6. Сопоставление начальных фрагментов сейсмограмм (в относительном времени) ПЯВ 25.05.2009 г. (вверху) и 09.10.2006 г. (внизу). Станция УСС



Рисунок 7. Сопоставление записей первых вступлений вертикальной составляющей станции MDJ от ПЯВ

Таким образом, перед интенсивным вступлением волны Pn отмечен некий предвестник малой амплитуды в одно-полтора квазиколебания. Период его заметно больше (примерно в 2 раза) периода колебаний интенсивной фазы, а амплитуда, как уже отмечалось, в десятки раз меньше. Результаты обработки таких участков записей приведены в таблице 6.

С целью получения дополнительной информации о начальном цуге волны Pn проведён поляризационный анализ трёхкомпонентной записи станцией USRK [3] начального участка сигнала: 10 сек записи фона и 15 сек записи сигнала (рисунок 8). На верхних трёх дорожках рисунка 8 приведены фрагменты записи трёх компонент сигнала (N-S, E-W, Z); на 4-й дорожке - азимутальная функция (аzp), которая, начиная с момента Po, принимает значение, соответствующее азимуту на эпицентр взрыва, в пределах 206 – 213 град вплоть до начала 3-го квазиполупериода интенсивной второй фазы сигнала. Функция угла выхода («uvp») на 5 дорожке в начальной части соответствует 44 - 45 град, а с вступлением интенсивной волны увеличивается до 50 град, т.е. более полого падающая волна сменяется более интенсивной волной, приходящей под углом на 5 град больше, чем предыдущая. Функция линейности поляризации («R») приведена на нижней, 6 дорожке. От вступления волны Ро до вступления волны Рп линейность поляризации является высокой (0,7 - 0,8), но с приходом интенсивной волны вследствие интерференции последовательно снижается.

По записям сейсмических групп USRK и KSRS проведено определение значения медленностей на участках-«предвестниках» [3]. Результаты F-K-анализа приведены на рисунках 9, 10.

Таблица 6. Результаты обработки участка сейсмограммы, предшествующего первому вступлению

Код станции	Номер ПЯВ	Длительность фазы, с	Нормированная амплитуда	Средний период, с
MDJ	1	0,25	0,004	0,10
	2	0,44	0,01	0,25
VCC	1	0,50	0,0005	0,50
300	2	0,86	0,005	0,45
USRK	2	0,85	0,03	0,45
KSRS	2	0,90	0,08	0,20



Рисунок 8. ПЯВ 25.05.2009 г. Результаты поляризационного анализа трёхкомпонентной сейсмограммы. Станция USRK



Рисунок 9. Результаты анализа азимута и медленности сейсмического сигнала от ПЯВ КНДР 25.05.2009 г. по данным сейсмической группы станции USRK



Рисунок 10. Результаты анализа азимута и медленности сейсмического сигнала от ПЯВ КНДР 25.05.2009 г. по данным сейсмической группы станции KSRS

Получено хорошее совпадение с истинными значениями азимутов на эпицентр первого подземного ядерного взрыва от станций USRK и KSRS (217 и 12 град, соответственно) и значений медленности волны Pn (12.5 и 13,2 секунд/градус, соответственно). Однако какого-либо различия между величинами медленностей на участках записей фазы с малой амплитудой и основной фазы не установлено, несмотря на факт автоматического выделения интенсивной фазы Pn на записи станцией KSRS 25.05.2009 г. Помимо выявленного «предвестника» волны Pn по записям 4-х станций, обнаружена ещё одна ее особенность, связанная с полярностью первых вступлений. На рисунке 11, где для 4 сигналов от 1-го северо-ко-



Рисунок 11. Сопоставление первых вступлений вертикальной составляющей сейсмограмм станций региональной зоны от ПЯВ КНДР: 1–09.10.2006, 2–25.05.2009

На записях сигналов от 2-го северо-корейского взрыва, зарегистрированных станциями USRK и KSRS, первые интенсивные вступления имеют отрицательную полярность, характерную для станции УСС (разница в эпицентральных расстояниях между станциями УСС и USRK - 12 км). Характерно, что на всех этих 3-х станциях с эпицентральными расстояниями 389 – 441 км мало интенсивная фаза перед волной Pn выделяется наиболее чётко.

Таким образом, несмотря на то, что длительность начальных цугов волны Pn для всех сигналов от

рейского взрыва приведены все сигналограммы, первое интенсивное вступление имеет отрицательный знак на записи станцией УСС, в то время как на записях станций MDJ и INCH – знак положительный и первое вступление для обоих взрывов надо считать чётким положительным. Отрицательное вступление сигнала на станции VLA (запись на VLA повторяет запись сигнала (рисунок 12), заимствованного из [5]) надо считать положительным, что следует из сопоставления форм сигналов на рисунке 11, а также устного заявления автора [5]. Для всех остальных станций полярность первого вступления при регистрации второго взрыва повторилась.



Рисунок 12. Фрагменты начала записей станцией Владивосток двух ПЯВ: 09.10.2006 (вернхий) и 25.05.2009 (нижний) в одной и той же амплитудной и относительной временной шкалах [7]

обоих взрывов примерно одинаковая и составляет около 2 сек, сигналы по форме цуга волны Pn могут быть разделены на две группы: 1 - для станций VLA, MDJ и INCH; 2 – для станций УСС, USRK и KSRS. Для станций VLA, MDJ и INCH цуг начинается со значительного положительного квазиполупериода (КВП), имеющего более пологий передний фронт, чем задний. Уже на заднем фронте 2-го КВП (для 1го взрыва – 3-го КВП) имеет место «излом», свидетельствующий о начале интерференционного участка. Он состоит из двух КВП, подобных двум первым КВП, после которых частота колебаний увеличивается в 1,5 - 2 раза. Для станций УСС, USRK и KSRS интенсивное вступление начинается с отрицательного КВП (длительность примерно в 2 раза больше длительности положительного вступления на других станциях). Как и в записях первой группы станций, первый положительный квазиполупериод имеет более пологий фронт. чем залний. Интерференционный участок начинается с излома на обратном фронте второго положительного КВП. Заметно увеличение частоты колебаний в конце цуга. Сигналы, зарегистрированные на станции MDJ, имеют признаки как первой группы (положительное первое вступление), так и второй группы (перед первым положительным вступлением обнаруживается фаза с малой амплитудой). Сигнал станции KSRS отличается от сигналов 2-й группы тем, что на отрицательный КВП небольшой амплитуды накладывается вступление малой амплитуды из двух КВП, а уж затем следует большой положительный КВП.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ АНАЛИЗА

Изучение записей двух ПЯВ, произведенных в КНДР, показало, что форма колебаний интенсивной волны Pn носит явно интерференционный характер. Такая форма наблюдается при сложении коротких импульсных сигналов с близким частотным заполнением в противофазе. Так происходит, например, при сложении прямой и отражённой волн ПЯВ в районе эпицентра (вопрос о влиянии глубины ПЯВ на форму сигнала требует отдельного рассмотрения).

Фаза с малой амплитудой, предшествующая интенсивной волне Pn, проявляется в записях разных станций, которые имеют не только различные эпицентральные расстояния и азимуты на эпицентр (вплоть до противоположного), но и расположены в существенно разных сейсмогеологических условиях. Однако, несмотря на это, записи фазы весьма схожи и по периоду колебаний, и по амплитуде для всех регистрирующих станций в региональной зоне. Это может быть объяснено только тем, что причина появления фазы общая, связанная с очаговой зоной.

Следует отметить достаточно малую мощность ПЯВ, при которой подмечено проявление сигнала, предшествующего первому интенсивному вступлению Рп. Так, первый взрыв (09.10.2006 г.) имел мощность порядка 1 килотонны (магнитуда 4,1), второй (25.05.2009 г.) – порядка 10 килотонн (магнитуда 4,5). Этим подчеркивается, что в перспективе особенности волновых форм коровых фаз, регистрируемых на станциях в региональной зоне, могут служить дополнительным отличительным признаком для обнаружения ПЯВ, начиная с малой мощности, на полигоне КНДР Хвадэ.

#### Выводы

Анализ типов волн, зарегистрированных в региональной зоне от двух северо-корейских ПЯВ: 09.10.2006 г. и 25.05.2009 г., позволили интерпретировать группу коровых волн, следующую за фазой Рп в составе Рb, Pg, PnPn и PbPb. Характерно, что энергия продольных волн сейсмического сигнала в основном распределяется между волной Pn и этой, следующей за ней группой. Выявленные особенности волновых форм сигнала для разных пунктов наблюдения с различными эпицентральными расстояниями могут быть использованы в качестве дополнительного идентификационного признака. Учёт особенностей первого интенсивного вступления волны Pn, а также характерного участка записи сигнала с малой амплитудой, опережающего первое вступление на 0,25 - 0.9 сек, может позволить уточнять время в очаге и координаты эпицентра, а также повысить достоверность идентификации ПЯВ на данном полигоне.

Благодарность. Авторы выражают искреннюю благодарность О.Е. Старовойту за помощь в предоставлении фрагментов сейсмических записей станций ГС РАН и IRIS, а также Н.И. Росанову за помощь в расшифровке и обработке этих записей.

#### Литература

- 1. Пасечник, И. П. Характеристика сейсмических волн при ядерных взрывах и землетрясениях / И.П. Пасечник // М.: Наука, 1970.
- 2. Буллен, К. Е. Введение в теоретическую сейсмологию / К.Е. Буллен. М.: Мир, 1966.
- Кедров, О. К. Сейсмические методы контроля ядерных испытаний / О.К. Кедров. Москва-Саранск, 2005. Р. 83 84, 106 - 108.
- Старовойт, О.Е. Регистрация подземного ядерного взрыва в Северной Корее 9 октября 2006 года Геофизической службой РАН / О.Е. Старовойт, И.П. Габсатарова, М.В. Коломиец // Вестник НЯЦ РК, 2008. – Вып.2. – С. 27 – 32.
- Габсатарова, И.П. Сравнительная характеристика записи сейсмических волн двух ядерных взрывов в Северной Корее / И.П. Габсатарова // Предварительные данные. Рукопись, 2010 г.
- 6. Seismological Tables by Harold Jeffris and K.E. Bullen. London: Office of the Brritish Association Burlington House, W. 1948.
- IASPEI 1991 Sesmological Tables / Edited by B.N. Kennett // Research School of Earth Sciences Australian National University.

## КХДР ЖЕРАСТЫ ЯДРОЛЫҚ СЫНАУЛАРЫНЫҢ АУМАҚТЫҚ БЕЛДЕМІНДЕ ТІРКЕЛЕТІН ҚУМА СЕЙСМИКАЛЫҚ ТОЛҚЫНДАРДЫҢ БАСТАПҚЫ ФАЗАЛАРЫН ПАЙЫМДАУ МӘСЕЛЕСІНЕ

<sup>1)</sup>Васильев А.П., <sup>2)</sup>Поплавский А.С.

<sup>1)</sup>Арнайы бақылау қызметі, Мәскеу, Ресей <sup>2)</sup>Ұлттық деректер орталығы, Дубна, Ресей

КХДР Хвадэ полигонында (Пуангери) екі жерасты ядролық жарылыстардың – 2006 ж. 10.06 және 2010 ж. 05.25 – аумақтық белдемінде тіркелген Рg, Pb, Pn сынған кума және PgPg, PbPb, PnPn, шағылысқан шектен тыс толқындарды пайымдауының кейбір нәтижелері келтірілген. Әр бір эпиорталықтық қашықтықтары үшін Pn толқыннан кейін келетін қыртыстағы тоқындардың тобында фазалар жалғасу реті дәлденген, Pn толқынның бірінші ену алдында жазбаның өзгеше учаскесі және сол енуінің ерекшелітері анықталған.

## ON INTERPRETATION OF INITIAL PHASES OF LONGITUDINAL SEISMIC WAVES RECORDED FROM THE NORTH KOREA UNDERGROUND EXPLOSIONS IN THE REGIONAL ZONE

## <sup>1)</sup>A.P. Vassiliev, <sup>2)</sup>A.S. Poplavskiy

<sup>1)</sup>Special Monitreing Service, Moscow, Russia <sup>2)</sup>National Data Centre, Dubna, Russia

There are given some results in the report for interpretation of the longitudinal refracted Pg, Pb, Pn waves as well as evanescent reflected PgPg, PbPb, PnPn waves recorded in the regional zone of two nuclear explosions on Khwade Test Site Hwadaeri (Puangaeri) in the North Korea at 06.10.2006 and 25.05.2010. Phase sequence in crust a wave group arriving after Pn has been adjusted for the different epicentral distances as well as a specific section on the records before the Pn wave arrival and its peculiarities have been determined.

УДК 550.34:621.039.9

## О НОРМАЛЯХ МАГНИТНЫХ ЦИФРОВЫХ ЗАПИСЕЙ АРХИВА ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ "БОРОВОЕ"

<sup>1)</sup>Ан В.А., <sup>2)</sup>Башилов И.П., <sup>1)</sup>Каазик П.Б., <sup>2)</sup>Коновалов В.А.

<sup>1)</sup>Институт динамики геосфер РАН, Москва, Россия <sup>2)</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

В статье описываются нормали цифровых магнитных лент, хранящихся в архивах Геофизической обсерватории «Боровое», с записями сейсмограмм, зарегистрированных, начиная с 1966 г., аппаратурой, разработанной в бывшем Советском Союзе для контроля за ядерными испытаниями, – КОД, Звезда-1, СЦР, ПЦС. В цифровом формате, наряду с сейсмическими событиями, регистрировались микровариации атмосферного давления и другие метеорологические параметры, а также вариации электрического и магнитного полей Земли.

В связи с 50-тилетием сейсмической станции «Боровое» уместно вспомнить о первых шагах цифровой геофизической аппаратуры, её создании и применении в геофизических исследованиях.

В 1960 г. в Спецсекторе института физики Земли (ИФЗ) им. О.Ю. Шмидта Академии наук СССР была начата разработка комплекта цифровых преобразователей для геофизических исследований. Уже во втором полугодии 1961 г. были подготовлены первые макеты аналого-цифрового (АЦП), цифро-аналогового (ЦАП) преобразователей и сейсмоусилительного канала. Разработка последнего из макетов вызвала много трудностей, так как полупроводниковые транзисторы и электронные лампы, выпускавшиеся в те годы отечественной промышленностью, не удовлетворяли требованию по уровню собственных шумов. Выход был найден применением фотоэлектронных усилителей типа Ф-117. Другая сложность возникла с регистрацией цифровой информации. В первое время пришлось использовать многоканальный аналоговый магнитофон, применявшийся в сейсморазведке, который при скорости протяжки магнитной ленты порядка 400 мм/сек позволял вести непрерывную регистрацию в течение примерно 18 - 20 мин. Внедрение цифровой регистрации в практику геофизических наблюдений проходило стремительно. По-видимому, это было связано с общей программой создания «ядерного щита», но рядовые исполнители могли догадываться об этом только по особой напряжённости работ.

Первое полевое испытание макета 10-тиканальной цифровой сейсмической аппаратуры прошло в октябре 1961 г. на подмосковной станции Института физики Земли (ИФЗ) «Михнево» (МНV,  $\varphi$ =54.960° с.ш.,  $\lambda$ =37.766° в.д.). Впервые в цифровом формате сейсмический сигнал был зарегистрирован от подземного ядерного взрыва, произведенного на Семипалатинском испытательном полигоне (площадка Дегелен, испытание B-1; 11 октября 1961 г., 07:39:59.9; 49.773°N, 77.995°E; <20 кт; [1, 2]). Второе полевое испытание цифровой аппаратуры – макета 25-тиканальной станции - проведено в декабре 1961 г. - феврале 1962 г. в районе сейсмической

станции «Или» (ILI,  $\varphi$ =43.933° с.ш.,  $\lambda$ =77.067° в.д.). На площади 2.5×2.5 км (координаты центральной точки  $\varphi$  = 43°56′,  $\lambda$  = 77°04′, H = 540 – 590 м) вблизи сейсмостанции «Или» (ныне находящейся на дне Капчагайского водохранилища) отряд под руководством Н.К. Плескача разместил группу из 25-ти вертикальных сейсмоприёмников типа УСФ-III-м (рисунок 1).



Сейсмограф: 1 – с высокоомной катушкой (включенной на кодовое устройство), 2 - с низкоомной катушкой (включенной на гальванометр ГК-IV), 3 – трехкомпонентной установки (включен на кодирующее устройство). К – канал, УС – усилитель

> Рисунок 1. Схема расстановки сейсмографов системы наблюдения в районе сейсмической станции "Или". 1961 – 1962 гг.

По-видимому, это был первый в СССР эксперимент по группированию сейсмоприемников для регистрации подземного ядерного взрыва. Условия работы были достаточно тяжёлыми: постоянный ветер, иногда со снегом, резкие колебания температуры, электропитание от переносной электростанции на бензине. После двухмесячного ожидания был зарегистрирован подземный ядерный взрыв на Семипалатинском испытательном полигоне (площадка Дегелен, испытание A-1; 2 февраля 1962 г., 08:00:00.2; 49.778°N, 78.002°E; <20 кт [1, 2]).

Следует отметить, что в цифровом формате сейсмограммы зарегистрированы не со всех пунктов системы. Для согласования с предварительными усилителями цифровой станции требовались сейсмоприёмники типа УСФ (универсальный сейсмограф Федосеенко) с высокоомными рабочими катушками, которые, по-видимому, не успели подготовить в достаточном количестве. Поэтому часть записей малоапертурной системы регистрировалась в фотооптическом виде. В центральном пункте (рисунок 1) в отличие от остальных пунктов, осуществлена регистрация трёх компонент (Z, NS, EW) по двум уровням чувствительности. Неизвестно, по каким расчётам была установлена чувствительность измерительных каналов, но сигнал оказался настолько сильным, что записи на всех вертикальных каналах "зашкалили". Нормальные записи получены только по загрубленным каналам центрального пункта.

Следующий полевой эксперимент проведен в октябре-ноябре 1962 г. в Северном Казахстане на территории сейсмической станции «Боровое» (BRVK, φ=53.058° с.ш., λ=70.263° в.д.), ныне - Геофизическая обсерватория «Боровое» Института геофизических исследований Национального ядерного центра Республики Казахстан. Задача состояла в регистрации возмущений электромагнитного поля Земли (ЭМПЗ) от космических и высотного ядерных взрывов. В состав аппаратуры входили станция регистрации естественных полей (СЕП), ранее разработанная в ИФЗ под руководством Н.П. Владимирова [3], и макет пятиканальной цифровой станции. Регистрировались пять компонент электромагнитного поля Земли: три - магнитного и две - электрического. Во время эксперимента зарегистрированы возмущения ЭМПЗ при проведении трех космических взрывов: 22 октября на высоте 290 км, 28 октября на высоте 150 км, 01 ноября на высоте 59 км, а также нескольких воздушных взрывов [2]. Особо запомнилось ярко красное полярное сияние на вечернем небосводе после первого космического испытания.

Последняя экспериментальная проверка макета цифровой аппаратуры проведена в ноябре-декабре 1963 г. на Кольском полуострове на станции земных токов «Ловозеро» ( $\varphi$ =67°58′ с.ш.,  $\lambda$ =35°05′ в.д.), в нескольких километрах от посёлка Ловозеро Мурманской области [4]. В этом эксперименте впервые в цифровом формате были зарегистрированы вариации ЭМПЗ типа «жемчужины» (Pc1). Результаты этих наблюдений были обработаны на ЭВМ, для этого типа вариаций ЭМПЗ вычислены спектральные плотности и автокорреляционные функции. К сожалению, вычислительная машина в Институте атомной энергии в тот период не позволяла одновременно вводить ин-

тервал записи более 40 сек (4000 чисел) и только по пяти старшим разрядам. Это ограничило возможность детального исследования структуры этого типа возмущений [5]. Геофизические результаты первых трёх экспериментов с цифровой аппаратурой в открытой печати не были опубликованы.

Первая станция цифровой регистрации геофизических процессов по результатам лабораторных и полевых испытаний макетов была сконструирована в Особом конструкторском бюро (ОКБ) ИФЗ и получила наименование «КОД» [6 - 8]. Три комплекта станций КОД были установлены и начали работать на сейсмических станциях Талгар (ААВ,  $\phi$ =43.267° с.ш.,  $\lambda$ =77.383° в.д., 1964 г.), Фрунзе (Бишкек, FRU, φ=42.833° с.ш., λ=74.617° в.д., 1965 г.) и Нарын (NRN, φ=41.433° с.ш., λ=76.000° в.д., 1965 г.). В штатном режиме по первому и второму каналам регистрировалась вертикальная составляющая (масштабы - основной и загрубленный), по третьему и четвёртому каналам - горизонтальные составляющие. Пятый канал использовался для контрольной записи эталонного пилообразного напряжения для контроля линейности аналого-цифрового преобразования во всём динамическом диапазоне АЦП. На базе Комплексной сейсмологической экспедиции (КСЭ) ИФЗ в г. Талгаре выполнялась перезапись зарегистрированных сейсмических событий на архивные ленты. Следует отметить, что в станциях КОД первоначально использовался необычный сейсмоусилительный канал, который совмещал два поддиапазона регистрации: короткопериодный (0.4 - 3.5 Гц) и длиннопериодный (0.025 – 0.07 Гц). Впоследствии от такого типа сейсмоусилительного канала отказались ввиду больших фазовых искажений амплитудно-частотной характеристики на границе поддиапазонов. В таблице 1 приведена нормаль цифровой записи 5-тиканальной станции КОД.

Признак 1-го канала записывается на двух крайних дорожках, что позволяет проверять выставление магнитной головки магнитофона (ЛМР – ленточный магнитный регистрир) воспроизведения непосредственно по магнитной ленте, полученной с сейсмостанции. Код времени записывался через каждые 30 сек замещением очередного кода числа по всем 5-ти каналам. Информационная часть кода времени не являлась чисто двоичной: код минут, начиная с 32ой минуты, увеличивался на 410, а код часов, начиная с 16-го часа, увеличивался на 810. При этом, код времени являлся кодом «системного времени», так как начало его счёта (время «сверки») могло не совпадать с 00 часов по Гринвичу на ровное число часов от 1 до 23-х. В штампе станции КОД не были предусмотрены ни номер станции, ни календарная дата. Поэтому к каждой магнитной ленте прилагался сопроводительный лист, в котором фиксировались пункт, дата регистрации и времена (начала и конца кадров) обнаруженных сбоев, «сверки» службы времени, а также поправки «системного времени» относительно мирового времени. В станциях КОД «нулевой» уровень сейсмического сигнала соответствовал коду числа порядка 1000 единиц. При этом положительное направление смещения почвы (вверх, на север, на восток) соответствовал уменьшению кода числа. Признак 15-ой секунды использовался для разметки времени на декодированных лентах. На рисунке 2 приведен пример сейсмограмм, зарегистрированных вертикальным каналом пониженной чувствительности станций КОД, установленных в Талгаре, Фрунзе (Бишкек) и Нарыне. Пример относится к подземному ядерному взрыву "Cannikin", произведенному на о. Амчитка (Алеутские о-ва), США, 6 ноября 1971 г., 22:00:00.06; 51.456° N, 179.102° Е, h=63 м; <5 Мт, m<sub>b</sub>=6.8 [9]. Аналогичная система КОД с 23 июля 1966 г. до 13 ноября 1973 г. работала в экспедиции № 4 Спецсектора ИФЗ (в дальнейшем ГО «Боровое» ИГИ НЯЦ РК). В отдельные интервалы времени, кроме сейсмических сигналов, регистрировались микровариации атмосферного давления и магнитного поля Земли. На рисунке 3 приведен пример сейсмограммы, зарегистрированной вертикальным загрубленным каналом станции КОД в Боровом. Пример относится к промышленному подземному ядерному взрыву, произведенному в Мангышлакской области Казахстана 12 декабря 1970 г., 07:00:59.83, скважина 6Т; 43.65° N, 54,80° Е, h=497 м; 80 кт, m<sub>b</sub>=6.0 [2, 10].

				Nº	Код числа		Код времени		
Часть записи	Признаки	№/№ каналов	№/№ каналов	доро-	Nº		Nº		
	признаки	5-1-2-3-4-5-1	5-1-2-3-4-5-1	жки	раз-	вес	раз-	вес	
				ЛМР	ряда		ряда		
Служебная	Канала №1	0-1-0-0-0-1	0-1-0-0-0-1	1					
	Канала №1	0-1-0-0-0-1	0-1-0-0-0-1	17					
	15-ой секунды	0-0-0-0-0-0	0-1-1-1-1-0	3					
	Кода времени	0-0-0-0-0-0	0-1-1-1-1-0	2					
	Синхроимпульса	1-1-1-1-1-1	1-1-1-1-1-1	9					
Информационная		Код числа	Код времени	10	11	1024	12	16 час	
		измерительного		8	10	512	11	8 час	
		канала		11	9	256	10	4 час	
				7	8	128	9	2 час	
				12	7	64	8	1 час	
				6	6	32	7	32 мин	
				13	5	16	6	16 мин	
				5	4	8	5	8 мин	
				14	3	4	4	4 мин	
				4	2	2	3	2 мин	
				15	1	1	2	1 мин	
				16	-	-	1	0.5 мин	





Рисунок 2. Пример сейсмограмм подземного ядерного взрыва на о. Амчитка (Алеутские о-ва, США), зарегистрированных аппаратурой КОД на станциях Талгар (ААВ), Фрунзе (FRU), Нарын (NRN)

Рисунок 3. Пример сейсмограммы промышленного ядерного взрыва в Мангышлакской области Казахстана, зарегистрированной аппаратурой КОД на станции Боровое (BRVK)

Спецсектор ИФЗ продолжал работы по созданию более совершенных систем цифровой регистрации. В конце 60-х – начале 70-х годов прошлого столетия был разработан и развёрнут в Боровом измерительный комплекс «Звезда-1» (рисунок 4).

Комплекс «Звезда-1» обеспечивал регистрацию сигналов 32-мя сейсмическими каналами, включая коротко- и длиннопериодные поддиапазоны, однооктавные типа ЧИСС (частотно-избирательный сейсмический сигнал), а также каналы малоапертурной системы группирования «Боровое – Бармашино – Жукей». Магнитная петля задержки позволяла сохранять 5-тиминутную информацию, которая по команде амплитудного анализатора переписывалась на архивную магнитную ленту [11 - 13]. Опытная эксплуатация комплекса «Звезда-1» позволила усовершенствовать многие узлы, а также собрать геофизи-



Рисунок 4. Аппаратурный комплекс «Звезда-1» в экспедиции № 4 Спецсектора ИФЗ

Главное отличие аппаратуры СЦР от аппаратуры КОД заключалось в более полном представлении информации штампа (в запись добавились номер станции, год), а также в возможности определения времени вступления сигнала по амплитудному признаку с точностью до 0.1 сек. Первый из комплексов СЦР (СЦР-М) начал работать в 1971 г. на сейсмической станции «Михнево» (МНV), магнитные цифровые записи которой хранятся в архиве ГО «Боровое». Аппаратура СЦР изготавливалась в различных модификациях: СЦР-М (Михнево), СЦР-СС (сейсмическая станция), СЦР-УН (универсального назначения), СЦР-ТСГ (типовая сейсмическая группа), СЦР-К (крест), СЦР-О (ожерелье), СЦР-КС (короткопериодная система), которые различались только количеством измерительных каналов, их коммуташией и периодичностью опросов. Признак нечётной секунды (на СЦР-СС – это канал № 23 до 03.06.75 г., затем канал № 27) использовался только для разметки времени на декодированных записях. Информационная часть этого слова принадлежит соответствующему измерительному каналу.

ческие данные для проверки эффективности специализированных программ идентификации и оценки параметров сейсмических событий.

Следующим этапом в автоматизации геофизических наблюдений стала разработка станция СЦР (станция цифровой регистрации). На рисунке 5 показана стойка и пульт СЦР, слева от которых находятся два пульта дистанционного контроля и управления всеми сейсмометрами типа КС (КСМ) и ДС (ДСМ), расположенными в шахте ГО «Боровое». С этих пультов, без спуска оператора в шахту, обеспечивалась регулировка нулевого положения, собственного периода и арретирование сейсмометров; импульсная калибровка и определение частотных и фазовых характеристик сейсмоусилительных каналов.

Обобщённая нормаль магнитной цифровой записи станции СЦР приведена в таблице 2.



Рисунок 5. Станция цифровой регистрации СЦР. Стойка и пульт

Аппаратура типа СЦР-СС в 70 - 80-ые годы прошлого столетия работала на сейсмических станциях Пулково, Плещеницы, Обнинск, Сочи, Тбилиси, Ленинакан, Ташкент, Медео. К сожалению, магнитные цифровые записи этих станций не были сохранены. В таблице 3 приведены варианты коммутации измерительных каналов аппаратуры СЦР (СЦР-М, СЦР-СС, СЦР-УН, СЦР-ТСГ, СЦР-К, СЦР-О, СЦР-КС) и ПЦС (передвижная цифровая станция), работавшей в ГО «Боровое» в различные периоды времени, начиная с 1971 г.

На рисунке 6 приведен пример записи цифровой аппаратурой СЦР-СС промышленного подземного ядерного взрыва в Целиноградской (Акмолинской) области Казахстана (28 августа 1973 г., 03:00:00.04, скважина МН - 1; 50.527° N, 68.323° E, h=395 м; 6.3 кт, m<sub>b</sub>=5.2, станция Боровое - BRVK) [2, 10]. Из всех подземных ядерных взрывов этот взрыв был произведен на наименьшем расстоянии от станции BRVK.

	№ дорожки ЛМР	Код № канала		Номера каналов										
записи		№ разрядов			ИЗІ	мери	тел	ьных		2-х сек.метки	штампа			
			вес	1	2	3		23	24	27	25	0	0	0
Слу-	1	1	1	1	0	1		1	0	1	1	0	0	0
жеб-	17	2	2	0	1	1		1	0	1	0	0	0	0
ная	16	3	4	0	0	0		1	0	0	0	0	0	0
	2	4	8	0	0	0		0	1	1	1	0	0	0
	3	5	16	0	0	0		1	1	1	1	0	0	0
	9	СИ		1	1	1		1	1	1	1	1	1	1
		Код чис	ла											
		№ разряда	вес											
Инфор-	10	11	1024			Кс	ды				Год - <b>64</b>	10 час - <b>2</b>	Час - 2	10 сек - <b>2</b>
мацион-	8	10	512			ЧИ	сел				Год - <b>32</b>	10 час - <b>1</b>	Час - 4	10 сек - <b>2</b>
ная	11	9	256		ИЗМ	иери	тел	ьных			Год - <b>16</b>	Месяц - 8	Час - <b>2</b>	10 сек - <b>1</b>
	7	8	128		каналов					Год - <b>8</b>	Месяц - <b>4</b>	Час - 1	1 сек - <b>2</b>	
	12	7	64								Год - <b>4</b>	Месяц - <b>2</b>	10 мин- <b>2</b>	1 сек - <b>4</b>
	6	6	32								Год - <b>2</b>	Месяц - <b>1</b>	10 мин- <b>2</b>	1 сек - <b>2</b>
	13	5	16								Год - <b>1</b>	Дата - <b>16</b>	10 мин- <b>1</b>	1 сек - <b>1</b>
	5	4	8								№ СЦР - <b>8</b>	Дата - <b>8</b>	Мин - <b>2</b>	0.1 сек - <b>2</b>
	14	3	4								№ СЦР- <b>4</b>	Дата - <b>4</b>	Мин - <b>4</b>	0.1 сек - <b>4</b>
	4	2	2								№ СЦР- <b>2</b>	Дата - <b>2</b>	Мин - <b>2</b>	0.1 сек - <b>2</b>
	15	1	1								№ СЦР- <b>1</b>	Дата - <b>1</b>	Мин - 1	0.1 сек - <b>1</b>

Таблица 2. Обобщённая нормаль магнитной цифровой записи станции СЦР

Таблица 3. Нормали коммутации измерительных каналов аппаратуры СЦР и ПЦС

Модификация	Период регистрации (д. м .г.)	Ν	Т <sub>си</sub> , мс	T₀ MC	Коммутация каналов одного цикла					
СЦР-М1	25.04.71 – 05.10.71	10	8	80	1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-1					
СЦР-М2	09.10.71 - 25.03.74	10	6	60	1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-1					
СЦР-МЗ	28.03.74 - 13.05.76	10	6	192	<b>4</b> -8-9-1-7- <b>5</b> -8-9-1-7- <b>6</b> -8-9-1-7- <b>10-</b> 8-9-1- <b>3-5</b> -7- <b>2</b> -8-9-1-7- <b>6</b> -8-9-1-7- <b>4</b>					
СЦР-М4	13.05.76 - 25.07.79	9	6	180	<b>2</b> -1-7-8-9- <b>3</b> -1-7-8-9- <b>4</b> -1-7-8-9- <b>5</b> -1-7-8-9- <b>6</b> -1-7-8-9- <b>4</b> -1-7-8-9- <b>2</b>					
СЦР-СС	07.03.73 - 20.07.81	10	6	192	<b>4</b> -8-9-1-7- <b>5</b> -8-9-1-7- <b>6</b> -8-9-1-7- <b>10-</b> 8-9-1- <b>3-5</b> -7- <b>2</b> -8-9-1-7- <b>6</b> -8-9-1-7- <b>4</b>					
СЦР-УН	01.08.81 –	10	6	192	<b>4</b> -7-8-9 <b>-1</b> -7-8-9 <b>-6</b> -7-8-9 <b>-10</b> -7-8-9 <b>-2</b> -7-8-9 <b>-5</b> -7-8-9 <b>-6</b> -7-8-9 <b>-3</b> -7-8-9 <b>-4</b>					
СЦР-ТСГ	18.07.74 –	24	2	312	<b>24</b> -1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12- <b>13</b> -1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12-					
	(кроме периодов:				<b>14</b> -1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12- <b>15</b> -1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12-					
	14.08.74 - 09.09.74				<b>16</b> -1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12- <b>17</b> -1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12-					
	30.09.74 – 21.11.74,				<b>18</b> -1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12- <b>19</b> -1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12-					
	приведенных ниже)				<b>20</b> -1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12- <b>21</b> -1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12-					
					<b>22</b> -1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12- <b>23</b> -1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12- <b>24</b>					
	14.08.74 - 09.09.74	4	2	8	<b>19-</b> 7-8-9- <b>19</b>					
	30.09.74 - 21.11.74	4	2	8	7-19-20-21-7					
СЦР-К	Октябрь 1975 –	24	2	48	<b>1</b> -2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12-13-14-15-16-17-18-19-20-21-22-23-24- <b>1</b>					
СЦР-О	Июнь 1979 –									
СЦР-КС	12.05.86 - 27.03.87	8	2	40	<b>4</b> -7-8-9-10- <b>1</b> -7-8-9-10- <b>2</b> -7-8-9-10- <b>3</b> -7-8-9-10- <b>4</b>					
СЦР-КС	28.03.87 –	2	1	2						
ПЦС-Зер	21.09.76 - 27.06.78	3	8	32	1-2-3-0-1					
ПЦС-Вос	27.07.76 - 28.10.78	3	8	32	1-2-3-0-1					
ПЦС-Чка	11.09.76 – 11.01.77	3	8	32	1-2-3-0-1					
	08.04.78 - 20.07.78									
ПЦС-Чка	12.01.77 – 18.01.77	7	8	64	1-4-5-6-7-8-9-0-1					
ПЦС-Чка	18.01.77 - 08.04.78	12	8	264	<b>10</b> -0-1-2-3-4-5-6-7-8-9- <b>11</b> -0-1-2-3-4-5-6-7-8-9- <b>12</b> -0-1-2-3-4-5-6-7-8-9- <b>10</b>					
Примечание: N – число измерительных каналов, T <sub>си</sub> – интервал дискретизации, T <sub>0</sub> – период основного цикла коммутации каналов.										



Рисунок 6. Пример сейсмограммы промышленного подземного ядерного взрыва в Целиноградской (Акмолинской) области Казахстана, зарегистрированной аппаратурой СЦР-СС на станции Боровое (BRVK)

Аппаратура СЦР-К и СЦР-О эксплуатировались в воинской части 22158 на системах «Крест» и «Ожерелье», некоторые записи этих форматов хранятся в архиве ГО «Боровое». Окончание работы отдельных комплексов СЦР происходило уже после передачи их в ИГИ НЯЦ РК. В станциях СЦР периодически использовалась магнитная петля задержки длительностью примерно в одну минуту. Перезапись сигнала на архивную ленту в этом случае обеспечивалась по команде анализатора сейсмических сигналов, работавшего по амплитудному признаку [14]. Определение амплитудно-частотных характеристик измерительных каналов аппаратуры проводилось с использованием специально разработанного устройства «Дельдар» и обработки данных на СЦВМ типа «Планета-3» [15, 16]. На рисунке 7 приведен пример записи цифровой аппаратурой СЦР-ТСГ промышленного подземного ядерного взрыва в Актюбинской области Казахстана (03 октября 1987 г., 15:15:00.03, скважина БТ-2; 47.60° N, 56.20° E, h=1002 м; 8.5 кт, m<sub>b</sub>=5.3, станция Боровое - BRVK) [2, 10].

Для повышения эффективности идентификации подземных ядерных взрывов потребовалось увеличить полосу пропускания короткопериодных каналов до 11 Гц, в связи с чем, была разработана и введена в эксплуатацию станция СЦР-КС. В дальнейшем (с 28.03.87 г.) станция СЦР-КС эпизодически использовалась для регистрации сигналов двух экспериментальных сейсмоусилительных каналов с полосой пропускания до 50 Гц и 100 Гц. При этом регистрация осуществлялась на двух высокоскоростных магнитофонах типа ЛМР-IV (таких же, как в системе перезаписи магнитных лент), включённых параллельно, с перекрытием в несколько минут. Следует отметить, что в ОКБ ИФЗ были разработаны магнитофоны типа



Рисунок 7. Пример сейсмограммы промышленного подземного ядерного взрыва в Актюбинской области Казахстана, зарегистрированной аппаратурой СЦР-ТСГ на станции Боровое (BRVK). Вверху - короткопериодный

канал (КС), внизу - длиннопериодный канал (ДС)

ЛМР специально для цифровых станций со скоростями записи от 15 мм/сек до 500 мм/сек.

Аппаратура ПЦС использовалась с июля 1976 г. по ноябрь1978 г. для регистрации сейсмических явлений на временных выносных пунктах (ВВП) «Зеренда» (Зер), «Восточный» (Вос), «Чкалово» (Чка) [17]. Обобщённая нормаль магнитной цифровой записи аппаратуры ПЦС приведена в таблице 4.

В отличие от аппаратуры СЦР штамп аппаратуры ПЦС состоит из двух слов с информацией только о часе и минуте. Первая строка штампа с  $\mathbb{N}$  13 записывается в очередной канал с  $\mathbb{N}$  0 после ровной минуты, а вторая строка штампа – в следующий канал с  $\mathbb{N}$  0. Таким образом, максимально возможная задержка записи кода времени равна периоду основного цикла коммутации всех каналов: при 3-х каналах – 32 мс, при 7 каналах – 64 мс и при 12 каналах – 88 мс. Двухсекундные метки канала с  $\mathbb{N}$  14 несут информацию секунд и записываются в каждую нечётную секунду вместо очередного канала с  $\mathbb{N}$  0, т.е. также с возможной задержкой на время цикла. Остальные каналы с  $\mathbb{N}$  0 никакой информации не несут.

В процессе эксплуатации цифровых комплексов совершенствовались методы регистрации и калибровки измерительных каналов. Так, в последние годы регистрация аппаратурой СЦР выполнялась на двух магнитофонах, переключавшихся последовательно автоматически без перерыва регистрации на время смены магнитной ленты. Также автоматически стала выполняться дважды в сутки импульсная калибровка сейсмоизмерительных каналов с контролем на СЦВМ "Планета-3", что позволяло оперативно устранять возникавшие неисправности.

	No	Код. № кан	Номера каналов									
Часть	дорожки ЛМР	№ разряда	вес			измер	ител	ьных		2-х сек. метки штамг		мпа
				1	2	3		11	12	14	13	0
	1	1	1	1	0	1		1	0	0	1	0
Служеб- ная	17	2	2	0	1	1		1	0	1	0	0
	16	3	4	0	0	0		0	1	1	1	0
	2	4	8	0	0	0		1	1	1	1 1	
	9	СИ		1	1	1		1 1		1	1	1
	3	свободна	ая									
		код числа										
		№ разряда	вес									
	10	11	1024		коды чисел			10 сек - <b>2</b>	10 час - <b>2</b>	час - <b>2</b>		
	8	10	512	измерительных			10 сек - <b>2</b>	10 час - <b>1</b>	час - 4			
	11	9	256		каналов			10В		10 сек - <b>1</b>		час - <b>2</b>
	7	8	128							1 сек - <b>2</b>		час - <b>1</b>
Ин-фор-	12	7	64							1 сек - <b>4</b>		10 мин - <b>2</b>
мацион-	6	6	32							1 сек - <b>2</b>		10 мин - <b>2</b>
ная	13	5	16							1 сек - <b>1</b>		10 мин - <b>1</b>
	5	4	8							0.1 сек - <b>2</b>		1 мин - <b>2</b>
	14	3	4							0.1 сек - 4		1 мин - <b>4</b>
	4	2	2							0.1 сек - <b>2</b>		1 мин - <b>2</b>
	15	1	1							0.1 сек - <b>1</b>		1 мин - <b>1</b>

Таблица 4. Обобщённая нормаль магнитной цифровой записи аппаратуры ПЦС

От использования магнитной петли задержки пришлось отказаться, так как в месте её склейки происходил сбой информации, устранение которого в процессе архивизации занимало много времени. Остался практически только один существенный недостаток режима непрерывной регистрации: поправки служб времени регистрирующих комплексов, определялись оператором дважды в сутки, заносились в специальные журналы и хранились в обсерватории. При передаче магнитных лент в другие организации приходилось дублировать эти записи. Отрабатывалась система автоматической записи поправок службы времени непосредственно на архивную магнитную ленту, но она так и не была осуществлена.

В настоящее время цифровые записи на магнитных лентах вышеописанных систем хранятся в архи-

ве ГО «Боровое». Параметры сейсмоизмерительных каналов, как и каналов регистрации вариаций атмосферного давления, температуры и электромагнитного поля Земли и их подключение к различным станциям цифровой регистрации приведены в отчётах «Сейсмическая аппаратура экспедиции № 4 Спецсектора ИФЗ» за 1965 - 1986, 1987, 1988 и 1989 гг., которые также хранятся в архиве ГО «Боровое» ИГИ НЯЦ РК.

*Благодарность*. Авторы выражают благодарность Д.Н. Краснощёкову, Т.В. Челюбеевой и Л.Д. Годуновой за консультации и помощь при подготовке данной статьи.

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1. Бочаров, В.С. Характеристики 96 подземных ядерных взрывов на Семипалатинском испытательном полигоне / В.С. Бочаров, С.А. Зеленцов, В.Н. Михайлов // Атомная энергия, 1989. Т. 67, вып. 3. С. 210 214.
- 2. Ядерные испытания СССР // Под ред. В.Н. Михайлова. М.: ИздАТ, 1997. 304 с.
- Ан, В.А. Станция для измерения вариаций естественного электромагнитного поля Земли в диапазоне 0.5-1000 Гц / В.А. Ан, Н.П. Владимиров, Ю.А. Ермоленко, Г.И. Рассомахин // Сб. Вопросы теории и практики электрометрии. ИФЗ АН СССР, 1961. – С. 56 - 68.
- 4. Барсуков, О.М. Советские станции земных токов / О.М. Барсуков, В.А. Троицкая // М.: 24 с.
- 5. Ан, В.А. Опыт применения аналого-цифрового преобразования для записи вариаций естественного электромагнитного поля Земли / В.А. Ан, Л.А. Геллер, Б.Н. Казак // Геомагнетизм и аэрономия, 1965. Т. V, № 5. С. 896 900.
- Ан, В.А. Многоканальный аналого-цифровой преобразователь / В.А. Ан, В.Л. Бакиновский, Э.И. Зеликман, Н.В. Кабыченко, А.П. Осадчий, О.Г. Сорохтин. // ГОСИНТИ. Преобразователи для электронных вычислительных машин, 1964. – № 5-64-677/20. – С. 3 - 12.
- 7. Ан, В.А. Десятиканальный цифро-аналоговый преобразователь / В.А. Ан, В.Л. Бакиновский, А.П. Осадчий, В.Н. Тихонова // ГОСИНТИ. Преобразователи для электронных вычислительных машин, 1964. № 5-64-677/20. С. 13 19.
- Осадчий, А.П. Аппаратура КОД для многоканальной цифровой регистрации сейсмических сигналов / А.П. Осадчий, С.К. Дараган // Машинная интерпретация сейсмических волн. Вычислительная сейсмология, 1966, вып. 2. – С. 183 - 195.
- 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.

- Sultanov, D.D. A Seismic Source Summary for Soviet Peaceful Nuclear Explosions / D.D. Sultanov, J.R. Murphy, Kh.D. Rubinstein // Bull. Seism. Soc. Am., 1999. – V. 89. No. 3. – P. 640 - 647.
- Кевлишвили, П.В. Система автоматической регистрации и обработки результатов геофизических наблюдений / П.В. Кевлишвили, В.А. Ан, И.П. Башилов, В.Н. Князев, Р.Р. Маркарян, В.Е. Морозов // Сейсмические приборы. М.: Наука, 1977, вып. 10. – С. 35 - 44.
- 12. Кевлишвили, П.В. О надёжности геофизической аппаратуры цифровой регистрации / П.В. Кевлишвили, В.А. Ан, И.П. Башилов, Р.Р. Маркарян, И.В. Савинова // Сейсмические приборы. М.: Наука, 1977, вып. 10. С. 167 170.
- Ан, В.А. Специализированный анализатор сейсмических сигналов / В.А. Ан, И.П. Башилов, А.А. Васильев, В.И. Ерофеев, В.А. Коновалов // Сейсмологические исследования в Узбекистане, Ташкент, ФАН, 1979. – С. 184 - 187.
- 14. Ан, В.А. Специализированный анализатор сейсмических волн от удалённых взрывов и землетрясений / В.А. Ан, И.П. Башилов, А.А. Васильев, В.И. Ерофеев, В.А. Коновалов // Методики измерения и аппаратура для исследований действия взрывов, М.: Недра, 1982. С. 158 161.
- 15. Ан, В.А. Устройство для калибровки электронных сейсмических каналов / В.А. Ан, С.К. Дараган, В.В. Мотичев, М.А. Шаболовский // Изобретение № 1241173 по заявке № 3831205 от 27.12.84, 1986. 5 с.
- Кевлишвили, П.В. Способ оперативной калибровки сейсмографа / П.В. Кевлишвили, В.А. Ан, С.К. Дараган // Изобретение № 1265671 по заявке № 3855854 от 27.12.84, 1986. – 3 с.
- 17. Адушкин, В.В. Структурные особенности внутреннего строения Земли по результатам сейсмических наблюдений за подземными ядерными взрывами / В.В. Адушкин, В.А. Ан, В.М. Овчинников // Физика Земли, 2000. № 12. С. 3 26.

## «БУРАБАЙ» ГЕОФИЗИКАЛЫҚ ОБСЕРВАТОРИЯСЫ МҰРАҒАТЫНЫҢ НОРМАЛЫ МАГНИТТІК ЦИФРЛІК ЖАЗБАЛАРЫ ТУРАЛЫ

## <sup>1)</sup>Ан В.А., <sup>2)</sup>Башилов И. П., <sup>1)</sup>Каазик П.Б., <sup>2)</sup>Коновалов В.А.

## <sup>1)</sup>РFA геосфер динамика институты, Мәскеу, Ресей <sup>2)</sup>РFA О.Ю.Шмидта ат. Жер физика институты , Мәскеу, Ресей

Мақалада, ядролық жарылыстарына бақылау үшін бұрынғы Кеңес одағы кезінде әзірленген аппаратурамен – КОД, Звезда-1, СЦР, ПЦС, 1966 жылдан бастап тіркелген сейсмограмма жазбаларымен «Бурабай» геофизикалық обсерваториясы мұрағаттарында сақталған нормалы цифрлік магниттік таспалары сипатталады. Цифрлік форматында сейсмикалық оқиғаларымен жасағы атмосфералық қысым мен басқа метеорологиялық параметрлерінің микровариациялауы, сондай-ақ электрлік және Жердің магниттік өрісін варияциялауы тіркелген.

## ABOUT NORMALS OF MAGNET DIGITAL RECORDS FROM GEOPHYSICAL OBSERVATORY BOROVOYE

<sup>1)</sup>V.A. An, <sup>2)</sup> I. P. Bashilov <sup>1)</sup> P.B. Kaazik, <sup>2)</sup> V.A. Konovalov

<sup>1)</sup>Institute of Dynamics of Geospheres RAS, Moscow, Russia <sup>2)</sup>Institute of Physics of the Earth after O.Yu. Shmidt RAS, Moscow, Russia

The article describes normals of digital magnet tapes stored in the archives of Geophysical Observatory Brovoye with seismogramms that have been recorded since 1966 with instruments designed in the former Soviet Union to control nuclear tests – KOD, Zvezda-1, SCR, PCS. Alongside with seismic events there were also microvariations of atmospheric pressure recorded in digital format and other meteorological parameters as well as variations of electric and magnetic fields of the Earth.

#### УДК 534.2

## СЕЗОННЫЕ ВАРИАЦИИ ИНФРАЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ ОТ ГАЗОВЫХ ФАКЕЛОВ: НАБЛЮДЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

<sup>1)</sup>Смирнов А.А., <sup>1)</sup>Кунаков В.Г., <sup>2)</sup>Ле Пишон А., <sup>2)</sup>Гильберт Ж., <sup>2)</sup>Понсо Д.

<sup>1)</sup>Институт геофизических исследований, Курчатов, Казахстан <sup>2)</sup>Комиссариат атомной энергии, Арпажон, Франция

Представлены результаты анализа сезонных изменений в значениях азимутов (на источник) и кажущейся скорости сигналов от газовых факелов месторождения Жанажол, регистрируемых станцией IS31-Актюбинск, на основе моделирования путей их распространения. Численное моделирование проведено с использованием адаптированного tau-р метода и цифровой модели строения атмосферы ARPEGE (Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle) метеорологического агентства Франции Meteo France. Установлено изменение трасс прохождения инфразвуковых сигналов в течение года в соответствии с изменениями в атмосфере. Подтверждена возможность учета влияние характеристик атмосферы на распространение инфразвуковых волн, что позволит повысить точность локализации источников инфразвуковых сигналов.

## Введние

Инфразвуковая станция IS31-Актюбинск, входящая в состав Международной системы мониторинга Организации Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний СТВТО, ведет систематические наблюдения, начиная с 2001 г., а с марта 2005 г. по ее данным в Центре данных Института геофизических исследований НЯЦ РК составляются автоматические бюллетени инфразвуковых событий с использованием детектора РМСС (Progressive Multichannel Correlation) [1]. Ежедневное изучение регистрируемых волновых форм и поиск когерентных сигналов позволили накопить бюллетени за достаточно большой период, что позволило проводить исследования по различным вопросам. В частности, изучено распределение регистрируемых сигналов в зависимости от азимута их прихода, от продолжительности периода времени их действия и др. Было установлено, что в течении всего года станция регистрирует большое количество сигналов, приходящих с юга. Для объяснения этого факта были изучены космические снимки территории к югу от станции. Примерно в 240 км южнее станции на снимках были обнаружены шлейфы дыма от факелов сжигания газа на нефтегазовом месторождении Жанажол [2]. Известно, что при больших пожарах генерируется инфразвук [3, 4]. В 2007 г. совместными усилиями НЯЦ РК и Комиссариата по атомной энергии Франции была установлена временная инфразвуковая группа Акбулак, работавшая в течение трех месяцев. По азимутам от IS31-Актюбинск и временной группы источник сигнала - газовые факелы месторождения Жанажол, был локализован [5].

#### 1. Инфразвуковые измерения

Инфразвуковая станция IS31-Актюбинск расположена на северо–западе Казахстана, (широта 50,41<sup>0</sup>, долгота 58,03<sup>0</sup>). Измерение инфразвука на станции производится в восьми точках, разнесенных в пространстве (рисунок 1), где установлены микробарометры MB2000, измеряющие инфразвуковые колебания в диапазоне частот от 0,003 до 27 Гц. Три микробарометра расположены в вершинах треугольника со стороной около 2 км, четвертый - в его геометрическом центре (элементы L1 – L4). Центральный элемент группы окружен еще четырьмя элементами H1 – H4, расположенными в вершинах квадрата со стороной около 200 м. Элементы группы оснащены системами подавления ветровых помех, представляющими собой розетки из труб. Диаметр розеток L элементов - 36 м, они имеют 144 входных порта. Диаметр розеток Н элементов - 18 м, у них 96 входных портов.





Для локализации источника инфразвука, детектирования которого превалируют в бюллетенях станции IS31-Актюбинск, осенью 2007 г. была установлена временная инфразвуковая сеть Акбулак. Геометрически станции IS31 – Актюбинск, Акбулак и изучаемый источник инфразвука располагались в вершинах почти правильного треугольника со сторонами длиной около 200 км (рисунок 1). Временная станция Акбулак состояла из четырех элементов, три из которых были расположены в вершинах треугольника со стороной около 800 м, а четвертый элемент - в геометрическом центре образованного треугольника. Элементы временной инфразвуковой группы были установлены около приборных сооружений сейсмической группы Акбулак [6], входящей в состав мониторинговой сети Национального ядерного центра Республики Казахстан. Такой выбор места установки позволил решить ряд технических проблем, таких как обеспечение электропитания аппаратуры, безопасности и др. В качестве инфразвуковых сенсоров использованы микробарометры МВ2005. Зарегистрированные сигналы оцифровывались и сохранялись на портативных станциях Nanometrics Taurus (Nanometrics, Канада). В качестве систем подавления ветровых помех были применены розетки из резиновых шлангов диаметром около 7 м, имеющие по 8 портов. Обработка записей временной инфразвуковой станции, проведенная с применением РМСС одновременно с полевыми наблюдениями, показала, что в бюллетенях этой станции также превалируют детектирования постоянно действующего источника, баказимуты которых соответствуют направлению на месторождение Жанажол [5]. Таким образом, обе станции, указав на один и тот же постоянно действующий источник инфразвука, подтвердили его природу.

Анализ пятилетнего объема инфразвуковых данных, полученных станцией IS31- Актюбинск, а так же объема данных, полученных временной сетью станций в 2007 г., показал, что вариации азимутов, кажущихся скоростей и других параметров детектирований факелов сжигания имеют четко выраженную сезонную закономерность изменений и повторяемость. На рисунке 2 показаны результаты расчетов с применением метода РМСС основных параметров детектирований сигналов от факела за все дни периода 2005 – 2008 гг.: амплитуды, обратного азимута (баказимута), частоты, кажущейся скорости.



Координаты: время (ось абсцисс), параметр сигнала (ось ординат)

Рисунок 2. Двумерные гистограммы распределения детектирований сигналов от факелов месторождения Жанажол по данным IS31-Актюбинск за 2005 – 2008 гг.

Видно, что в летние месяцы факелы детектируются реже, чем в зимние месяцы. Средний уровень амплитуды в семействах детектирований резко возрастает примерно в середине осени и резко падает весной. Значения баказимута плавно растут от минимальных ( $180^{\circ}$ ), наблюдаемых в середине зимы, до максимальных ( $192^{\circ}$ ), наблюдаемых летом. Значения частоты в целом выше в зимние месяцы. Кажущаяся скорость в зимние месяцы характеризуется наибольшим разбросом значений, достигающим примерно 50 м/с. В летние месяцы этот разброс существенно снижается - почти до 10 м/с.

## 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПУТЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН

Поскольку газовые факелы месторождения Жанажол являются неподвижными источниками инфразвука, девиации основных параметров детектируемых сигналов могут быть связаны с сезонными изменениями структуры атмосфер, такими как профиль температуры, скорость и направление ветра на различных высотах и др., определяющими путь распространения инфразвуковых волн. Для объяснения выявленных сезонных вариаций проведено численное моделирование возможных путей распространения инфразвуковых волн от месторождения до станции. Использован метод tau-р Буланда и Чепмэна [7], переформулированный Гарсиасом и др. [8] для звуковых волн, распространяющихся в слоистой атмосфере под действием переменного по высоте профиля ветра. Цифровая модель строения атмосферы - высотные профили температуры, зональных и меридиональных ветров, - взята из модели атмосферы ARPEGE (Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle) [9]. Эта модель разработана совместно метеорологическим агенстством Météo-France и Европейским центром среднесрочного прогноза погоды ECMWF (European Centre for Medium-range Weather Forecasts).

Моделирование путей распространения сигнала применительно к паре: «месторождение Жанажол – станция IS31-Актюбинск», проведено для 253 дней 2007 г. и 327 дней 2008 г, а применительно к паре: «месторождение Жанажол – временная инфразвуковая станция Акбулак», - для 80 дней 2007 г. Для каждого дня рассчитаны все возможные траектории распространения волновых фронтов в диапазоне расстояний до 300 км. Пример результатов расчета трасс для двух дней: летнего (27 июля 2008 г) и зимнего (21 января 2008 г) - приведен на рисунке 3.

Рисунок 3 показывает, что из-за различий в строении атмосферы возможные пути распространения инфразвука зимой и летом существенно различаются. Расчетом для летнего дня (рисунок 3а) предсказываются две инфразвуковых фазы – тропосферная и термосферная. Расчет для зимнего дня (рисунок 3б) показывает, что термосферные фазы должны возвращаться на землю на роасстоянии, большем, чем летом, и поэтому не могут быть зарегистрированы этой станцией. Возможна регистрация тропосферных фаз. И, самое главное, результаты моделирования для зимнего времени предсказывают очень благоприятные условия для распространения стратосферных фаз, не ожидаемых летом. На рисунке 4 приведена двумерная гистограмма распределения двух параметров детектирований: баказимута и кажущейся скорости, - по результатам наблюденных сигналов для той же пары (месторождение Жанажол - станция IS31-Актюбинск) за весь 2008 г., а также ожидаемые по результатам моделирования значения этих параметров для стратосферных, тропосферных и термосферных фаз.



Ось абсцисс – горизонтальное расстояние; ось ординат - параметр сигнала (сверху вниз): высота возвращения, быстрота, азимут. Цвет на графиках - значение лучевого параметра согласно шкале

Рисунок 3. Результаты моделирования траекторий распространения сигнала от факелов месторождения Жанажол до станции IS31-Актюбинск для: а - 27 июля 2008 г.; б - 21 января 2008 г.


**б** – кажущиеся скорости

Координаты: ось абсцисс – горизонтальное расстояние; ось ординат - параметр сигнала Треугольник: – расчетное значение: черный - для стратосферных фаз, красный – для тропосферных фаз; пурпурный – для термосферных фаз

Рисунок 4. Двумерная гистограмма распределения параметров детектирований по станции IS31-Актюбинск за 2008 г.

Рисунок 4а показывает, что по результатам моделирования следует ожидать детектирования в основном стратосферных фаз. Перерыв в их регистрации возможен только в летние месяцы, что подтверждается наблюдениями. Заметно, что точность совпадения ожидаемых и наблюденных данных не всегда одинакова. Моделирование показало, что тропосферные фазы должны детектироваться реже, что также соответствует наблюдениям. В целом наблюденные и ожидаемые (расчетные) картины по представленной гистограмме совпадают, часто это совпадение очень хорошее. Совпадение кажущихся скоростей наблюденных и ожидаемых фаз (рисунок 4б) такое же, как у баказимутов. Отдельно следует отметить результаты, полученные для января. Как следует из рисунка 4а, в начале этого месяца отмечено много детектирований, совпавших (по времени и значениям баказимутов) с расчетными термосферными фазами. Однако значения кажущейся скорости детектирований этой группы по результатам моделирования и наблюдения различаются почти на 0,06 км/с, что может свидетельствовать о том, что в это время станция не регистрировала термосферные фазы.

Таким образом, сравнение наблюденных данных и результатов моделирования показало, что использованные методы детектирования сигналов и моделирования параметров распространения инфразвуковых фаз достаточно хорошо объясняют результаты многолетних наблюдений. В летние месяцы факелы детектируются реже, чем в зимние месяцы, изза отсутствия условий для распространения стратосферных фаз. Значения баказимута плавно растут от минимальных значений  $180^{\circ}$ , достигаемых в середине зимы до максимальных величин в  $192^{\circ}$  летом, что объясняется тем, что зимой в наблюденном сигнале преобладают стратосферные фазы. Увеличение разброса значений кажущейся скорости в зимние месяцы (до ~50 м/с) объясняется тем, что зимой регистрируются две фазы – тропосферная и стратосферная, а летом – только тропосферная.

Поскольку моделирование хорошо объясняет сезонные девиации баказимутов, его результаты использованы для коррекции этих девиаций в задаче локализации источника. На рисунке 5 сравнены результаты локализации факелов месторождения Жанажол без и с учетом поправок за сезонную девиацию. Локализация источника выполнена способом крюйс-пеленга (cross bearing) - засечками по двум пеленгам: со станции IS31-Актюбинск и временной инфразвуковой группы Акбулак.



Рисунок 5. Сравнение результатов локализации факелов месторождения Жанажол без поправок и после внесения расчетных поправок (по азимутам со станции IS31-Актюбинск и с временной инфразвуковой группы Акбулак) Красными точками на рисунке 5 показаны результаты перекрестного пеленгования факелов по средним значениям азимутов, определенных в каждый день работы временной сети инфразвуковых станций Акбулак. Зелеными точками - по баказимутам после введения в них поправок, рассчитанных в результате моделирования. Как видно из рисунка 5, введение поправок приводит к значительному повышению точности локализации газовых факелов: средняя ошибка местоположения источника уменьшилась с 14,6 км до 2,7 км.

Таким образом, можно заключить, что установка временной инфразвуковой группы осенью 2007 г. и использование ее данных вместе с данными станции IS31-Актюбинск позволили доказать, что наиболее часто станция IS31-Актюбинск регистрирует инфразвук, генерируемый при сжигании попутного газа на месторождении Жанажол. Посредством моделирования методом tau-р удалось объяснить обнаруженные в результате многолетних наблюдений сезонные девиации таких параметров сигнала этого источника, как его баказимут и кажущаяся скорость. Эти девиации объяснены изменением в течение года преобладающих путей распространения инфразвука от месторождения до станции: с осени до весны станция регистрирует сигналы, распространяющиеся в стратосфере и тропосфере; летом стратосферные фазы практически не регистрируются. Зимой инфразвуковые волны поворачивают к земле в большем диапазоне высот, наибольшая высота поворота достигает 50 км, в отличии от первого десятка километров в летнее время. Скорости меридиональных и зональных ветров на большей высоте выше, чем определяется наибольший разброс значений баказимута и кажущейся скорости сигнала.

Хорошее совпадение результатов моделирования параметров сигнала с наблюдениями свидетельствует о реалистичности используемых моделей строения атмосферы. С другой стороны, использование рассчитанных в результате моделирования азимутальных поправок позволяет на порядок улучшить точность локализации источника сигналов.

# ЛИТЕРАТУРА

- 1. Cansi, Y. An automatic seismic event processing for detection and location: The PMCC method / Y. Cansi // Geophys. Res. Lett., 1995. 22. P. 1021 1024.
- Smirnov, A. A. Identification of the oil-well gas flare group as a unique infrasound source using I31KZ data, in Infrasound Technology Workshop, Wilson Infrasound Observatories, Geophysical Institute, University of Alaska Fairbanks, Fairbanks, USA, 2006.
- 3. Гостинцев, Ю.А. О механизме генерации инфразвуковых волн в атмосфере большими пожарами / Ю.А. Гостинцев [и др] // Доклады академии наук СССР, 1985. Том 283, № 3. С. 573 576.
- 4. Liszka, L. Long distance propagation of infrasound from artiacial sources/ L.Liszka, //J. Acoust. Soc. Am., 1974. 56. P. 1383 1388.
- Smirnov, A. Preliminary Results of Localization and Characterization of Steady Infrasound Source as detected by I31KZ, in Infrasound Technology Workshop / A. Smirnov, Guilbert [et al] // Japan Weather association, Tokyo, Japan, 2007.
- 6. http://www.kndc.kz/rus/index.php?p=1&f=is31.html (web-сайт ЦСОССИ).
- Buland, R. The computation of seismic traveltimes / R. Buland, & C. Chapman // Bull. seism. Soc. Am. 1983. 73. P. 1271 1302.
- Garcés M. A., Traveltimes for infrasonic waves propagating in a stratified atmosphere / M. A. Garcés, R. A. Hansen, and K. G. Lindquist / Geoph. J. Int., 1998. 135. 255 263.
- Déqué M., The ARPEGE/IFS atmosphere model: a contribution to the French community climate modelling / M. Déqué [et al] // Climate Dynamics, 10. -- 249 - 266.

# ГАЗ ШЫРАҚТАРЫНАН ИНФРАДЫБЫСТЫ СИГНАЛДАР ПАРАМЕТРЛЕРІНІҢ МАУСЫМДЫҚ ВАРИАЦИЯЛАРЫ: БАЙҚАУЛАР МЕН МОДЕЛЬДЕУ

# <sup>1)</sup>Смирнов А., <sup>2)</sup>Ле Пишон А., <sup>2)</sup> Гильберт Ж., <sup>2)</sup>Понсо Д.

<sup>1)</sup>КР ҰЯО Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатов, Қазақстан <sup>2)</sup>Атом энергиясы комиссариаты, Арпажон, Франция

IS31-Ақтөбе инфрадыбысты станциясымен тіркелетін Жанажол кенорнының газ шырақтарынан сигналдардың, олар таралу жолдарын модельдеу негізінде, азимуттары (сигнал көзіне) және көрінетін жылдамдықтар мәндерінде маусымдық өзгерістерін талдау нәтижелері келтірілген. Санды модельдеуі бейімделген tau-p әдісі мен Францияның Meteo France метеорологиялық агенттігінің атмосфера құрылысының цифрлық ARPEGE (Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle) моделін пайдалануымен жүргізілген. Атмосфередағы өзгерістеріне сәйкес инфрадыбысты сигналдар өту тарссалары жыл ағымында өзгеруі анықталған. Инфрадыбысты толқындар таралуына атмосфера сипаттамалары ықпал етуін есепке алу мүмкіндігі расталған, бұл, инфрадыбысты сигналдардың көздерін оқшаулау дәлдігін жоғарылатуына мүмкіндік береді.

# SEASONAL VARIATIONS OF INFRASOUND SIGNAL PARAMETERS FROM GAS FLARES: OBSERVATIONS AND MODELLING

<sup>1)</sup>A.A.Smirnov, <sup>2)</sup>A.Le Pishon, <sup>2)</sup>G.Gilbert, <sup>2)</sup>D. Ponso

<sup>1)</sup>Institute of Geophysical Research NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan <sup>2)</sup>Commissariat of Atomic Energy, Arpajon, France

The results of the analysis for seasonal changes in azimuth (to the source) and apparent velocity values of the signals from gas flares of Zhanazhol deposit recorded by IS-31 Aktyubinsk station have been presented in the report. Numerical modeling has been made by employing adaptive tau-p method and digital model of the atmosphere structure ARPEGE (Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle) of Meteorological Agency Meteo France. Deviations in way-paths of infrasound signals during the year corresponding to atmospheric changes were established. The possibility of accounting atmospheric influence on infrasound propagation has been proved, what allows to improve location accuracy of infrasound sources.

УДК 534.2

# ОБЪЯСНЕНИЕ ПРИРОДЫ ИСТОЧНИКОВ КОГЕРЕНТНЫХ НИЗКОЧАСТОТНЫХ СИГНАЛОВ, РЕГИСТРИРУЕМЫХ МОНИТОРИНГОВОЙ СЕТЬЮ НЯЦ РК

<sup>1)</sup>Смирнов А.А., <sup>1)</sup>Дубровин В.И., <sup>2)</sup>Эверс Л.

# <sup>1)</sup>Институт геофизических исследований, Курчатов, Казахстан <sup>2)</sup>Королевский метеорологический институт Нидерландов, Голландия

Приведены результаты исследования вторых по частоте встречаемости сигналов, регистрируемых инфразвуковой станцией IS31-Актюбинск. Анализ спектрального состава этих сигналов (не более 0,5 Гц), азимут от станции на источник (совпадающий с направлением на северную Атлантику), позволили предположить, что станция может регистрировать сигналы от штормов в Баренцевом море – микробаромы. Привлечение для комплексного анализа метеорологических и сейсмических данных подтвердило сделанное предположение.

Начиная с марта 2005 г., по записям казахстанской инфразвуковой станции IS31-Актюбинск в автоматическом режиме ведется поиск когерентных сигналов. Алгоритм поиска основан на методе прогрессивной многоканальной корреляции (РМСС -Progressive Multi-Chennel Correlation) [1]. Главное достоинство метода заключается в его способности посредством поиска взаимной корреляции между записями инфразвуковой или сейсмической групп выделять сигналы, регистрируемые не одним, а несколькими элементами этих групп. Кроме того, метод позволяет детектировать сигналы от постоянно действующих источников. Записи сигналов 8 элементов станции IS31-Актюбинск, обрабатываемые изо дня в день на основе РМСС, заносятся в автоматический бюллетень, представляющий набор строк, расположенных в хронологическом порядке и содержащих информацию об основных параметрах сигнала события - время, азимут, скорость, частота, амплитуда. На рисунке 1 показано азимутальное распределение событий, зарегистрированных станцией за период с 01 по 31 января 2008 г.

Как следует из рисунка 1, существуют направления, по которым когерентные сигналы приходят регулярно, т.е. имеется ряд постоянно действующих источники инфразвука, регистрируемых станцией IS31-Актюбинск. Некоторые результаты изучения этих источников отражены в [2]. Так, например, изучение наиболее представительных сигналов с азимутом прихода 180° - 195°, проведенное с использованием космоснимков и путем наблюдений временной инфразвуковой группой, установленной внутри сейсмической группы Акбулак, показало, что источником этих сигналов является группа газовых факелов месторождения Жанажол [2]. Из рисунка 1 также следует, что на северо-западе от станции находится источник, второй по представительности детектирований в бюллетенях. Анализ сигналов от этого источника показал (рисунок 2), что их преобладающие частоты существенно ниже, чем у сигналов от газовых факелов месторождения Жанажол.



Рисунок 1. К анализу азимутального распределения детектирований по станции IS31-Актюбинск за январь 2008 г.



Рисунок 2. Частотная характеристика детектирований с различными азимута прихода

Преобладающие частоты, как правило, не превышают 0,5 Гц, азимут от станции на источник сигналов совпадает с направлением на северную Атлантику, это позволило предположить, что станция могут регистрировать микробаромы - сигналы от штормов в этом регионе.

Впервые микробаромы были наблюдены Беньофом и Гутенбергом [3], предположившими, что эти сигналы генерируются областями низкого давления. В 1950 г. Лонгвэ-Хиггинс [4] впервые сформулировал основы современных представлений о механизме генерации микробаром. Он, в частности, предположил, что микросейсмы генерируются в результате колебаний давления на поверхности, образующихся в области встречи систем бегущих океанических волн одинаковой частоты [5]. В области такой встречи образуются стоячие водяные волны (СВВ). Область СВВ генерирует периодически изменяющееся давление на дно океана, не затухающее с глубиной [4, 6]. Под влиянием этого давления в земной коре возникают слабые колебания, так называемые штормовые микросейсмы. Стоячие волны образуются при столкновении двух противоположно направленных систем бегущих волн или взаимодействии встречного ветра с волнами зыби. Область стоячих водяных волн, располагающаяся в тыловой части циклона (тайфуна), составляет сотни квадратных километров. Такие колебания могут быть уподоблены поршню, совершающему возвратно-поступательные движения. Поднимаясь вверх, они образуют микробаромы, вниз микросейсмы на дне. Колебания, вызванные стоячими волнами, когерентны (синфазны). Этот комплекс явлений экспериментально подтвержден и подробно описан в работах специалистов Ламонтской геофизической обсерватории и др. [7, 8]. Микросейсмы, вызванные стоячими водяными волнами движущихся циклонов, распространяются на большие расстояния. Их записывают все сейсмические станции мира, работающие в непрерывном режиме. Например, микросейсмы от атлантических циклонов фиксируют не только станции, расположенные на европейском континенте, но и станции азиатские (в Ташкенте и Ашхабаде), сибирские (в Иркутске и Новосибирске) и многие другие [9].

Для выяснения того, регистрирует ли инфразвуковая станция IS31-Актюбинск именно микробаромы от океанических штормов, проведен комплексный анализ метеорологических, сейсмических и инфразвуковых данных. Учитывая, что в областях образования СВВ высокой энергии должны одновременно генерироваться микросейсмы и микробаромы, проведен анализ сейсмических и инфразвуковых данных за один и тот же период времени с 01 июля 2007 г. по 30 июня 2008 г. С использованием детектора РМСС в полосе частот от 0,07 Гц до 0,5 Гц проведен поиск когерентных сигналов, зарегистрированных четырьмя сейсмическими группами: Акбулак, Боровое, Каратау и Маканчи, - и инфразвуковой группой IS31- Актюбинск. На рисунке 3 в виде двумерной гистограммы количества детектирований за год наблюдения представлены результаты поиска.

Рисунок показывает, что в картинах распределения низкочастотных детектирований по азимутам, имеются как обшие черты для всех станций. так и индивидуальные особенности. Наиболее ясным является распределение событий для станции Акбулак. Эта сейсмическая группа, за редким исключением, регистрировала искомые сигналы с азимутами прихода 300<sup>0</sup> – 360<sup>0</sup>. На гистограмме для группы Боровое также отчетливо проявляются детектирования с азимутами в диапазоне 300° – 360°, однако в летние месяцы, наряду с более редким сигналами северо-западного направления, группой Боровое регистрировались сигналы с южного направления. Для группы Каратау картина распределения регистрируемых событий по азимутам в целом аналогична картине для станции Боровое, но в зимние месяцы группа Каратау дополнительно регистрировала еще один источник, находящийся к востоку от станции. Станция Маканчи почти весь год (кроме периода январь – апрель) регистрировала некий источник, находящийся к югу от станции. В январе – апреле станция Маканчи, как и все вышеназванные станции, регистрировала источник, находящийся к северо-западу от нее. Инфразвуковая группа IS31-Актюбинск, подобно сейсмической группе Акбулак, регистрировала сигналы, приходящие с северо-запада, а в летние месяцы, иногда - сигналы южного направления. Таким образом, хотя общая картина меняется от станции к станции, все сейсмические и инфразвуковая станции регистрировали сигналы от источника, находящегося от них в северо-западном направлении.

По метеорологическим данным, таким как карты высоты и периода водяных волн на всей площади мирового океана, были найдены области, где образовывались области СВВ и где, в свою очередь, могли генерироваться микробаромы и микросейсмы. Для расчета амплитуды микробаром или микросейсм в идеальном случае необходимо выполнить следующие процедуры: рассчитать спектр направленности водяных волн для каждого из значений, по которым построены карты; определить области, где волны бегут во встречных направлениях [10]. Поскольку реализация этого метода требует больших затрат машинного времени, применен более простой метод. С учетом того, что области СВВ находятся вблизи мест, где водяные волны имеют максимальную энергию [11], для каждого узла карты рассчитана величина, пропорциональная энергии водяной волны, - квадрат отношения амплитуды водяной волны к ее периоду.



Координаты: время (ось абсцисс), азимут прихода сигнала (ось ординат)

Рисунок 3. Двумерные гистограммы количества детектирований в полосе частот 0,07 – 0,5 Гц за период 01 июля 2007 г. -30 июня 2008 г по сейсмическим группам и инфразвуковой станции IS31-Актюбинск

В соответствии с принятой точкой зрения на образование микросейсм и микробаром, наряду с максимальной энергией водяной волны, должна быть максимальна и энергия самих микросейсм и микробаром. Исходные данные для расчетов - значения высоты и периода водяных волн, - взяты из архивов Европейского центра среднесрочного прогноза погоды (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) за январь 2008 г. Использованы материалы проекта расширенной переобработки архивных данных (ERA interim [12]), открытые для свободного доступа в сети интернет. Данные по высоте и периоду водяных волн для всего мирового океана представлены по равномерной прямоугольной сетке с шагом 1,5° по широте и долготе. Для каждого дня января месяца 2008 г. были отобраны по два значения параметров, для 0 и 12 час, по которым затем были рассчитаны значения квадратов отношения высоты водяной волны к ее периоду для каждого узла сетки. Затем из полученных наборов были выбраны 10 максимальных значений этих параметров для региона северной Атлантики. На рисунке 4 приведен пример результатов расчета пространственного распределения энергии водяных волн и 10 точек, где энергия микросейсм - микробаром должна быть, в соответствии с принятыми допущениями, максимальной. Приведенный пример описывает распределение энергии водяных волн для 0 часов 26 января 2008 г.

Такие места в мировом океане с максимальной энергией, где могли генерироваться микросейсмы и микробаромы, найдены для каждого дня января 2008 г. Как показано выше (рисунок 3), именно из этих мест на 4 сейсмические группы и инфразвуковую станцию регулярно приходили низкочастотные сигналы.



Стрелка - область максимальных значений энергии водяных волн для северной Атлантики, показанных черными точками

Рисунок 4. Распределение энергии микросейсм/микробаром в мировом океан, рассчитанное по данным проекта ERA Interim ECMWF 26 января 2008 г.

Перед использованием данных сейсмических групп для уточнения местоположения источников низкочастотных сигналов проведены специальные работы с целью снижения погрешности определения азимутов прихода сигналов. Известно, что эти погрешности вызваны геологическими неоднородностями различного масштаба в местах подхода и на пути распространения сейсмической энергии к группам, а величина погрешностей зависит от эпицентрального расстояния и азимута прихода волн [13]. Для определения поправок использован следующий метод. По данным Международного сейсмологического центра (International Seismological Center, ISC) были отобраны пять эталонных сильных землетрясений (с магнитудой более 5), произошедших в северной Атлантике [14], начиная с 2006 г. Из бюллетеней ISC были взяты координаты эпицентров этих землетрясений и затем рассчитаны азимуты от четырех сейсмических групп на эпицентры этих землетрясений (истинные азимуты). Затем по волновым формам записей сейсмических групп Акбулак, Боровое, Каратау, Маканчи, определены азимуты на эталонные землетрясения (экспериментальные азимуты). Разности между истинными и экспериментальными азимутами взяты как искомые поправки (таблица 1).

Как следует из таблицы 1, рассчитанные поправки существенно различаются для станций как по знаку, так и по абсолютной величине. Поправки использованы при детектировании низкочастотных когерентных колебаний, зарегистрированных четырьмя сейсмическими группами в течение одного месяца наблюдений. На рисунке 5 представлена двумерная гистограмма детектирований в полосе частот 0,07 – 0,5 Гц для всех четырех сейсмических групп и инфразвуковой станции за период с 01 по 31 января 2008 г. Для сравнения белыми линиями на гистограммы нанесены исправленные ожидаемые азимуты СВВ на области максимальной энергии.

			Акбулак		Боровое		Каратау		Маканчи		
Дата и время события (ч., мин., сек.)	Широта, с.ш. Долгота, в.д.	Магнитуда	Расстояние, км.	Поправка, град	Расстояние, км.	Поправка, град.	Расстояние, км.	Поправка, град.	Расстояние, км.	Поправка, град.	
29.11.2006 15:38:43	53,82 -35,41	5,3	6099	-6,8	6309	-5,4	7152	15,9	7382	4,4	
23.05.2007 4:41:47	52,37 -31,76	5,5	6001	-14,7	6254	-9,0	7059	27,5	7337	1,6	
06.05.2008 8:47:11	53,47 -35,2	5,2	6112	-3,9	6328	-14,2	7166	19,3	7403	-5,9	
29.05.2008 15:45:57	64,02 -21,11	6,2	4835	-5,8	4964	-9,3	5866	20,9	6021	10,8	
21.02.2009 16:53:25	55,09 -41,63	4,9	6325	-10,7	6476	-12,8	7366	18,8	7530	-1,4	
01.01.2010 9:37:10	42,39 -30,54	5,2	6622	-10,9	-	-	7680	29,4	8098	7,3	
Среднее значение	поправки, град.		-	8,8	-9	9,3	20	20,1		3,0	

Таблица 1. Параметры эталонных землетрясений и азимутальные поправки для сейсмических групп

Для трех сейсмических групп: Боровое, Каратау и Маканчи, - а также для инфразвуковой группы IS31-Актюбинск имеет место достаточно хорошее совпадение наблюденных и ожидаемых азимутов. Для группы Акбулак ожидаемые значение азимутов на источник совпадают с краем полосы наблюденных значений. Полученный результат доказывает природу источника постоянно регистрируемых станциями мониторинговой сети низкочастотных сигналов. Это – микросейсмы и микробаромы.

Таким образом, результаты комплексного анализа метеорологических, сейсмических и инфразвуковых данных позволили однозначно установить природу значительной части детектируемых когерентных низкочастотных сигналов - микросейсм и микробаром: большая часть микросейсм и микробаром, регистрируемых казахстанскими станциями, генерируется в северной Атлантике. Сейсмические группы Акбулак и Боровое, а также инфразвуковая группа IS31-Актюбинск установлены в северной части Казахстана. Согласно полученным результатам, североатлантические микросейсмы и микробаромы превалируют в составе низкочастотного шума этих станций. На станциях Маканчи и Каратау, расположенных южнее, низкочастотный шум включает в себя и другие компоненты с источниками в других районах. В [15] описан один из возможных источников сигналов, регистрируемых станциями Каратау и Маканчи в микросейсмической полосе частот. Это ледники Тянь-Шаня, постоянно генерирующие слабые землетрясения. Район Центрального Тянь-Шаня расположен к востоку от станции Каратау и к югу от станции Маканчи, направление на который хорошо согласуется с выявленными источниками сигналов. Однако проверка этой гипотезы, а также изучение природы других, более слабых источников микросейсмического шума требует дополнительных исследований. Остается открытым также вопрос по станции Акбулак о причинах незначительного (до 15°) несовпадения ожидаемого и наблюденного направлений на области СВВ с наибольшей энергией в северной Атлантике.



Белая линия – исправленные ожидаемые азимуты на области СВВ максимальной энергии

Рисунок 5. Двумерная гистограмма количества детектирований в полосе частот 0,07 – 0,5 Гц за период с 01 по 31 января 2008 г. по сейсмическим группами и инфразвуковой станции IS31-Актюбинск

# Литература

- 1. Cansi, Y. An automatic seismic event processing for detection and location: The P.M.C.C. method / Y.Cansi //
- Smirnov, A. Preliminary Results of Localization and Characterization of Steady Infrasound Source as Detected by I31KZ / A. Smirnov [et al] // Infrasound Technology Workshop Tokyo, Japan, 13 – 16 November, 2007.
- 3. Benioff, H. and B. Gutenberg, 1939: Waves and currents recorded by electromagnetic barographs. Bull. Am. Met. Soc., 20, 421.
- Longuet-Higgins, M. S. A theory of the origin of microseisms / M. S.Longuet-Higgins // Phil. Trans. R. Soc. A., 1950. 243. -P. 1 – 35.
- 5. Kedar, S. The origin of deep ocean microseisms in the North Atlantic Ocean / S Kedar [et al] // Proc. R. Soc. A, 464. P. 777 793.
- 6. Табулевич, В.Н. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана // В.Н. Табулевич, Е.А. Пономарев, А. Г. Сорокин, Н.Н. Дреннова, 2001. № 2. С. 235 244.
- 7. Табулевич, В.Н. Комплексные исследования микросейсмических колебаний / В.Н. Табулевич. Новосибирск, 1986.
- 8. Tabulevich, V. N. Microseismic and Infrasound Waves / V.N. Tabulevich // Heidelberg, 1992.
- 9. Табулевич, В. Н. Влияние штормовых вибраций на землетрясения / В.Н. Табулевич [и др.] // Природа М.:: Наука, 2002. №10. С. 12 16.
- Willis, Mark C.; Garces, M.; Hetzer, C.; Businger, S. (2004). "P2. 5 Source Modeling Of Microbaroms In The Pacific". AMS 2004 Annual Meeting. Retrieved 2007-11-22.
- 11. Evers, L. G. Infrasonic. 36, L23808, doi: 10.1029/2009GL041323.
- 12. http://data-portal.ecmwf.int/data/d/interim\_daily/
- 13. Синева, З. И. Об оценках азимутов и медленности для региональных фаз по данным сейсмической группы PS 23-Маканчи / З.И. Синева // Вестник НЯЦ РК, 2005. – Вып.2 (22) – С. 46 - 52.
- 14. http://www.isc.ac.uk/search/bulletin/rectang.html
- 15. Михайлова, Н. Н. Ледниковые землетрясения Центрального Тянь-Шаня / Н.Н. Михайлова, И.И Комаров // Вестник НЯЦ РК, 2009. Вып. 3. С. 120 126.

# БАҒАМДАҒАНДА МИКРОБАРОМДАР БОЛЫП ТАБЫЛАТЫН СИГНАЛДАРДЫ ЗЕРДЕЛЕУ

# <sup>1)</sup>Смирнов А.А., <sup>1)</sup>Дубровин В.И., <sup>2)</sup>Эверс Л.

### ҚР ҰЯО Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатов, Қазақстан

IS31-Ақтөбе инфрадыбысты станциясымен тіркелетін, ақпараттылығы бойынша екінші болып келетін сигналдарды зерттеу нәтижелері келтірілген. Бұл сигналдарды (0,5 Гц көп емес) талдауы, азимуты станциядан сигнал көзіне (солтүстік Атлантика бағытына тұра келетін), станция, Баренц теңізіндегі дауылдан сигналдарын – бикробаромдар – тіркейтінің болжауына мүмкіндік берген. Кешенді талдауына метеорологиялық және сейсмикалық деректерін тартуы осы болжамды растаған.

# EXPLANATION OF THE NATURE OF COHERENT LOW-FREQUENCY SIGNAL SOURCES RECORDED BY MONITORING STATION NETWORK OF THE NNC RK

# <sup>1)</sup>A.A. Smirnov, <sup>1)</sup>V.I. Dubrovin, <sup>2)</sup>L.G. Evers

### <sup>1)</sup>Institute of Geophysical Research, NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan <sup>2)</sup>Koninklijk nederlands meteorologish Instituut (KNMI), de Bilt, Niederlands

The results of secondary representative signals recorded by IS31-Aktyubinsk has been shown. Spectral analysis of these signals (not higher than 0.5 Hz), station-to-source azimuth (coinciding with the direction to the North Atlantic) let us suppose that the station may record storm signals from the Barents Sea – microbaroms. Meteorological and seismic data applied to the complex analysis proved this out.

УДК 550.34:621.039

# ИТЕРАТИВНЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ГЛУБИНЫ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ СПОСОБОМ КОМПЛЕКСНОГО КЕПСТРА

### Кемерайт Р.К.

#### Центр прикладных технологий воздушных сил, Флорида, США

Описан новый подход в применении спектрального метода при определении глубины поверхностного (неглубокого) сейсмического события. Предлагается итеративная процедура для метода гармонической деконволюции (комплексный кепструм), которая позволяет получать более точную оценку глубинной фазы. Работа направлена на улучшение отбора событий для специального изучения без риска возможного удаления из выборки ядерного взрыва.

#### Введение

Прошло около 50 лет с того времени, когда впервые была опубликована статья о кепстральной обработке [1]. С тех пор кепстральный метод значительно повлиял на обработку речевых данных и, в меньшей степени, - на обработку геофизических данных, таких как сейсмические и гидроакустические данные. Метод оказался полезным в определении пульсации газового пузыря при проведении подводных взрывов, а также в оценке глубины подземных взрывов. К сожалению, использование кепстральной оценочной функции глубины, особенно для региональных событий, было осложнено наличием других пиков, которые не были связаны напрямую с глубинными фазами. В последние годы появился новый многообещающий подход в связи с использованием данных сейсмических групп. В данной статье, повторно возвращаясь к достижениям в области кепстральной обработки 1960-х годов, исследуется возможность гомоморфной деконволюции (сложный/комплексный кепстр) с целью улучшения результатов оценки глубины подземного события.

### История

Сам метод деконволюции изучаемого составного сигнала был первоначально предложен двумя, на вид никак несвязанными и параллельно проводимыми, исследованиями. Одно из них имело дело с методом обнаружения эхо, названного кепстр мощности, в то время как другое было связано с практическим применением гомоморфных систем. Последний подход был впоследствии применен с целью обнаружении эхо-сигналов, и этот метод получил название комплексного кепстра. Если кепстр мощности, как указывалось выше, используется в сейсмологии и обработке речевых сигналов, то гомоморфная деконволюция имеет намного больший потенциал, например, в обработке речи и эхо-сигнала, фотографической обработке, в разделении функций плотности вероятности.

### Предпосылки

Кепстр мощности функции (обычно функции времени) – это спектр мощности логарифма спектра мощности данной функции. Аналогичным образом, комплексный кепстр функции определяется как обратное преобразование Фурье логарифма преобразования Фурье данной функции. Разложение достигается применением кепстра мощности для обнаружения эхосигналов и соответствующих им амплитуд, тогда как комплексный кепстр

используется для определения волновой формы сигнала. Если обрабатываемый сигнал является действительной временной функцией, то, как будет показано ниже, кепстр мощности будет вычисляться из фазового и амплитудного спектров. В этом особом случае амплитудный спектр и спектр мощности являются четными функциями частоты, в то время как фазовый спектр – нечетная функция частоты.

# Разложение неизвестных составных сигналов

#### Кепстр мощности

Для объяснения сути кепстра мощности, рассмотрим в качестве примера одиночный аддитивный эхо-сигнал, имеющий вид:

$$x(t) = s(t) + a_0 s(t - t_0)$$
(1)

Спектр мощности суммарного сигнала *x*(*t*) может быть представлен произведение двух переменных

$$\Phi_x(\omega) = \Phi_s(\omega) \left[ 1 + a_{02} + 2a_0 \cos \omega t_0 \right]$$
(2)

Применяя к (2) операцию логарифмирования, получаем сумму переменных:

$$\log \Phi_x(\omega) = \log \Phi_s(\omega) + \log(1 + a_{02} + 2a_0 \cos \omega t_0) \quad (3)$$

Второй член уравнения (3) может быть разложен в соответствующий сходящийся бесконечный ряд. Если  $a_0$  значительно меньше единицы, бесконечный ряд может быть аппроксимирован значением  $2a_0 \cos \omega t_0$ . Таким образом, логарифм спектра мощности аппроксимируется колебаниями с формой, близкой к косинусоидальной, параметры которой связаны с параметрами эхосигнала,  $a_0$  и  $t_0$ . В общем случае, когда  $a_0$  не намного меньше единицы, при разложении в ряд необходимо учитывать члены более высокого порядка. Колебания установленного типа обычно бывают затемнены неоднородностями самого логарифмического спектра. В этом случае можно применить различные известные методы, используемые при обнаружении периодических процессов, заглушаемых шумом, например, опре-

(4)

делить спектр мощности от уже полученной функции спектра мощности, получив, таким образом функцию *кепстра* мощности.

# Комплексный кепстр

Аналогичным образом, рассмотрим простой сигнал с одним эхо для объяснения процедуры комплексного спектра. Выражение для составного сигнала из вейлета, свернутого с последовательностью взвешенных сигналов, для дискретного случая имеет вид:

при

$$p(n) = \sum_{k=D}^{\infty} a_k \delta(n - n_k)$$

x(n) = s(n) \* p(n)

где s(n) – главный вейвлет, x(n) – составной сигнал. На этом этапе необходимо найти способ отделить импульсную последовательность сигналов от вейвлета s(n). Для этого вычисляется комплексный логарифм а-преобразования, затем применяется простая линейная операция, приводящая к разделению сигналов. В случае единичного эхо-сигнала импульсный ряд записывается в виде:

$$p(n) = \delta(n) + a_0 \delta(n - n_0). \tag{5}$$

Функция X(z), рассчитываемая в круге с единичным радиусом, есть:

$$X \ z \Big|_{z=e^{j\omega}} = X \ e^{j\omega} \ 1 + a_0 e^{j\omega n_0} \quad , \tag{6}$$

где вклад эхо-сигнала выражен периодической функцией  $\omega$  с периодом равным  $\frac{2\Pi}{n_0}$ . Логарифмический спектр равен

$$logX e^{j\omega} = logS e^{j\omega} + log 1 + a_0 e^{j\omega n_0}$$
(7)

Так как логарифм периодической функции остается периодичным с одним и тем же периодом, то эхосигнал в логарифмическом спектре представляется как дополнительная/добавочная компонента (т.е., использование комплексной логарифмической функции приводит к получению многозначной фазовой информации при вычислении комплексного логарифма). В данной работе поправка определяется путем развертывания фазовой составляющей, т.е. удалением модуля 2П, при условии, чтобы фаза оставалась непрерывной и нечетной функцией частоты.

### Линейная фильтрация

Линейный фильтр можно получить путем деконволюции в частотной области или умножением комплексного кепстра (временная область) на соответствующую функцию. Этот фильтр назван «гребенчатым» фильтром. Он получается умножением комплексного кепстра на функцию, которая равна единице в любой точке, за исключением тех, на которые воздействуют эхо-сигналы. В этих самых точках фильтр-функция равен нулю. Получаемый в результате фильтрации комплексный кепстр затем интерполируется на нулевых точках путем усреднения предшествующих и последующих значений комплексного кепстра.

### АЛГОРИТМ ВЫЧИСЛЕНИЙ И ДВА ПРИМЕРА

Блок-схема реализации метода показана на рисунке 1. В рассматриваемом процессе кепстр мощности и комплексный кепстр вычисляются параллельно по дискретным данным. Исторически, для получения данных о временах вступлений эхо-сигналов применялся кепстр мощности. В настоящее время, к вышеописанному комплексному кепстру применяются одна или несколько операций линейной фильтрации, а именно, "гребенчатый" фильтр, фильтр низких частот, фильтр высоких частот. После фильтрации, алгоритм. по сути, является лишь обратной операцией к той, которая использовалась для получения комплексного кепстра. Полученный результат - восстановление вейвлета или последовательности импульсов, в зависимости от типа примененного фильтра.



Рисунок 1. Блок-схема реализации метода гомоморфной деконволюции

Алгоритм метода включает процедуру, которая позволяет добавлять в исходные данные компоненты с линейной фазой (например, добавление нулей), а также положительный или отрицательный весовой коэффициент (смещающий значения исходных данных в сторону максимальной или минимальной фазовой последовательностью), наконец, - провести сглаживание мозаичной логарифмической магнитуды по методу Ханнинга. В полном объеме алгоритм предусматривает выполнение следующих этапов: (1) преобразовние дискретных исходных данных; (2) нахождение логарифма действительной части от абсолютного значения данного преобразования; (3) применение сглаживания Ханнинга, если это необходимо; (4) еще одно преобразование, абсолютное значение которого является кепстром мощности; (5) вычисление фазового спектра из значений, полученных на этапе (1); (6) использование результатов этапов (3) и (5) для вычисления обратного преобразования, результатом которого является комплексный кепстр; (7) применение линейного фильтра; (8) преобразование результатов; (9) нахождение экспоненциальной зависимости; и, наконец, (10) выполнение обратного преобразования для получения оценки вейвлета (или последовательности импульсов).

В проводимом исследовании использован комплексный кепстр для определения времени сейсмической глубинной фазы. Определение этого времени, позволило получить оценку глубины события, что является очень важным параметром при распознавании. Однако следует отметить, что применение кепстра мощности связано с серьезными проблемами (наличие множества ложных пиков), особенно при анализе записей по региональным событиям. Предлагаемая процедура обработки сигналов включает необходимость следующих действий:

1. Вычислить комплексный кепстр с соответствии с алгоритмом, приведенным на рисунке 1, и получить значения  $\hat{x}$ .

2. В предположении случая единичного эхо-сигнала, выбрать диапазон возможных времен для фильтрации комплексного кепстра (от  $n_1$  до  $n_2$ ,) в том диапазоне, где глубинная фаза не наблюдается. Для неглубоких событий типичная область оценки глубины будет варьировать в пределах 150 – 3000 м.

3. Для выбранного интервала глубин, начиная с наименьшей, рассчитать поочередно значения комплексного кепстра и инвертировать процесс во временную область путем построения восстановленной формы сигнала (для иллюстрации этой процедуры произвольно отобраны три точки фильтрации, на практике количество точек итерации значительно больше).

4. Выполнить итерацию для оставшихся точек до тех пор, пока не получится максимально возможная глубина события, изображающая восстановленную форму сигнала для каждой итерации.

5. Отобрать оптимальную волновую форму сигнала из серии восстановленных волновых форм, пользуясь следующими критериями:

 восстановленная волновая форма сигнала должна имитировать исходную волновую форму по параметрам до вступления составного сигнала (рисунки 2 – 9);

2) восстановленный сигнал должен очень походить на составной сигнал с момента вступления до точки во временном гребне профильтрованном в комплексном кепстре (можно сравнить рисунки 2, 6, 7, 8, 9);

3) обращение к вновь восстановленному сигналу должно показать существенное изменение после временной точки подвергшейся фильтрации (учетом конструктивной/деструктивной интерференции. Можно сравнить рисунки 2 и 9.

6. После отбора восстановленного сигнала, наилучшим образом отвечающего трем критериям из пункта 5, и используя типичную скорость коровых волн, вычислить глубину события, соответствующую найденному времени сигнала. На рисунках 7 -9 приведены примеры использования смоделированных данных.



Рисунок 2. Смоделированный составной сигнал



Рисунок 3. Логарифмический спектр (усеченный до 4 Гц) с гребенчатым эффектом



Рисунок 4. Развернутая фаза с удаленным линейным трендом (усеченная до 4 Гц) с эхо-эффектом



Рисунок 5. Биполярный кепстр мощности с квадратным корнем в качестве спектрального отбеливателя





Рисунок 6. Комплексный кепстр



Рисунок 7. Восстановленный вейвлет фильтрацией комплексного кепстра (сегмент А на рисунке 6)

Видна хорошая гребенчатая точка, а также плохая гребенчатая точка для случая с единичным эхосигналом. Рисунки 7 и 8 - это примеры с неправильными точками фильтрации, а рисунок 9 – пример с правильной точкой фильтрации (действительные точки фильтрации показаны на рисунке 6). Рисунок 10 демонстрирует результат вычитания восстановленного вейвлета (рисунок 9) из первоначального сигнала (рисунок 2). На рисунках 9, 10 следует обратить внимание на полярность вступления.



Рисунок 10. Результат вычитания восстановленного вейвлета (рисунок 9) из первоначального составного сигнала (рисунок 2)

Рисунок 8. Восстановленный вейвлет фильтрацией комплексного кепстра (сегмент В на рисунке 6)

Рисунок 9. Восстановленный вейвлет фильтрацией комплексного кепстра (сегмент С на рисунке 6)

Линейная фаза, которая была удалена в процессе получения комплексного кепстра, сохранена и вновь встроена перед процессом вычитания для правильной регистрации сигналов. По результатам анализа и многочисленных прогонов на компьютере смоделированных и реальных данных можно утверждать, что для единичного эхо-сигнала не представляет сложности определить его время вступления с помощью кепстра мощности, если эхо-сигнал слабее или мощнее эхосигнала основного вейвлета. Проблема возникает тогда, когда среди помех появляется множество эхо-сигналов, и надо выбрать правильный кепстральный максимум, указывающий на правильную глубину (математическая трактовка дана в [1 - 7]) Так как при вычислении комплексного кепстра не используются абсолютные значения, остается одна проблема - выборка из множества пиков, что проще, чем в случае с кепстром мощности. Как показано в приведенном выше реальном примере, эта проблема осложняется, когда в качестве исходных данных используются записи региональных, а не более традиционных телесейсмических событий. Эта ситуация связана со ставшей с недавних пор очень насущной проблемой – проблемой обнаружения и идентификации очень слабых событий. Основная цель данной исследовательской работы - содействие процессу скрининга событий, в результате чего значительно большее число событий будет автоматически отсеиваться. Это облегчит нагрузку на аналитика при обработке событий, поскольку оставит ему

только те события, которые не были отсеяны. Здесь рассматривается подмножество событий, которые не имеют явной глубинной фазы на сейсмограмме. Тем не менее, в некоторых случаях глубина этих событий может быть определена, и тогда не будет необходимости проводить дополнительный ресурсоемкий анализ.

В качестве одного из примеров выбрано землетрясение. произошелшее 26 января 2001 г. в Индии. Это событие выбрано по нескольким причинам: оно имеет гарвардскую глубину 15 км, использовалось при обработке в предыдущей работе [3]; событие, с подобной глубиной обычно не отсеивается по критериям, ис-Международным центром пользуемым данных (МЦД). Следовательно, если применение предлагаемого метода продемонстрирует его надежность, то соответственно это снизит нагрузку на аналитика. Конечно, любое усовершенствование в обработке данных не должно приводить к увеличению риска отсеивания событий, имеющих ядерное происхождение. В предыдущей работе автора [3], в которой был применен кепстр мощности, глубина данного события была оценена между 3 и 4 км, предполагаемая скорость сейсмических волн - 5,8 км/с. В данной работе уточнена глубина события и показано, что она не может быть меньше, чем 3,8 км. Таким образом, можно предположить, что это событие должно быть отсеяно, будучи слишком глубоким для типичного ядерного взрыва (или, по крайней мере, оно должно быть отнесено к категории событий, не требующих тщательной обработки аналитиком).

Это значение минимальной глубины находится в согласии и с другими надежными дискриминантами (Ms; mb), которые также указывают на естественную природу события.

Нижеследующие рисунки 11 - 22 иллюстрируют процедуру получения комплексного кепстра. Рисунки с использованием моделей (рисунки 2 - 10) также могут быть использованы для сравнения. На рисунке 11 приведен сигнал землетрясения, зарегистрированный 5-м элементом Буковинской сейсмической группы BURAR, размещенной в северной Румынии. К записи не применялось никакой фильтрации, за исключением фильтра, подавляющего помехи во время оцифровки сигнала. Частота оцифровки в данном случае составляла 40 отсчетов в секунду. На рисунке 12 приведен логарифмический спектр волновой формы сигнала (сейсмограммы, показанной на рисунке 11), который является неотъемлемой частью кепстрального процесса и четной функцией по отношению к частоте.

На рисунке 13 приведен развернутый фазовый спектр с удаленным компонентом линейной фазы. Спектр фазы является нечетной функцией частоты. На рисунке 14 показан кепстр мощности, вычисленный по сейсмограмме (рисунок 11), который иллюстрирует трудности выделения глубинной фазы по кепстральному пику.





Рисунок 11. Сейсмограмма записи землетрясения на 5-м



Рисунок 14. Кепстр мощности, усеченный до 5 с (для представления на графике)

Рисунок 12. Логарифм спектра мощности



Рисунок 13. Развернутый фазовый спектр с удаленным линейным фазовым трендом



Рисунок 15. Комплексный кепстр (усечен в отрицательном и положительном времени) сейсмограммы, приведенной на рисунке 11 (с применением 7 гребенчатых фильтров)

На рисунке 15 показан комплексный кепстр, вычисленный по той же сейсмограмме. Для получения более наглядного результата к комплексному кепстру были применены семь гребенчатых фильтров. В каждом случае, процесс был обратно инвертирован во временную область. На рисунке 16 демонстрируется временной ряд, полученный в результате применения гребенчатого фильтра к максимуму сегмента «А» комплексного кепстра.



Рисунок 16. Временной ряд, полученный в результате применения гребенчатого фильтра к максимуму в сегменте «А»



Рисунок 19. Временной ряд в результате применения гребенчатого фильтра к сегменту «D»



Рисунок 17. Временной ряд, полученный в результате применения гребенчатого фильтра к максимуму в сегменте «В»



Рисунок 20. Временной ряд в результате применения гребенчатого фильтра к сегменту «Е»



Рисунок 22. Временной ряд в результате применения гребенчатого фильтра к сегменту «G»

Как видно из рисунка, данная фильтрация не удалила глубинную фазу. На рисунках 17 - 21 показаны временные ряды, полученные в результате применения гребенчатого фильтра к сегментам «С», «D», «E», «F».

Во всех случаях применение гребенчатого фильтра не привело к удалению глубинной фазы в соответствующих сегментах. На рисунке 22 показаны результаты применения гребенчатого фильтра к сегменту «G».



Рисунок 18. Временной ряд в результате применения гребенчатого фильтра к сегменту «С»





Рисунок 21. Временной ряд в результате применения гребенчатого фильтра к сегменту «F»

Несмотря на то, что примененный гребенчатый фильтр не совершенен, на рисунке 22 наблюдается эффект от удаления глубинной фазы, соответствующей времени 1,4 сек.

# Заключение

В данной статье продемонстрированы возможности расчета комплексного кепстра с последующей его фильтрацией и итерационным инвертированием с целью отсева естественных событий, которые при существующей практике дискриминации не были бы отсеяны. Одной из основных задач МЦД после получения и архивации данных является отсев естественных событий с тем, чтобы можно было использовать ограниченное время и ресурсы только на исследование событий ядерного происхождения. На практике большинство глубинных событий легко исключается из дальнейшей обработки, так как глубинные фазы легко идентифицируются опытным аналитиком. Тем не менее, даже после исключения значительного числа таких событий, все еще остается большое их количество, для обработки которых требуются значительные ресурсы. Проведенные исследования направлены на дальнейшее снижение числа событий без риска возможного удаления ядерных испытаний. На приведенных примерах - смоделированных и реальных, - продемонстрировано действие новаторской процедуры. Эта стало возможно только недавно благодаря увеличению компьютерной мощности, которая требуется, чтобы провести все необходимые итерации.

# Будущие исследования

В статье показаны возможности гомоморфной деконволюции. Однако есть области применения этого метода, требующие дальнейшего изучения. Ниже перечислены лишь те, которые стали очевидными во время проведенных исследований:

1) улучшение алгоритма фазовой развертки. Анализ графиков фазовой развертки на многих реальных сейсмограммах показал, что улучшение развертывания модуля 2П улучшит вид комплексного спектра. С этой целью в будущей работе предполагается изучить возможность использования производной Триболета;

2) гребенчатая фильтрация, применяемая в процессе восстановления вейвлета. Применение гребенчатого фильтра было описано ранее. Предполагается, что нулевая часть сложного спектра должна быть заменена на восстановленные данные, причем способом, более оптимальным, чем просто усреднение двух значений;

3) интерпретация значимости восстановленного вейвлета, сделанная аналитиком, должна быть автоматизирована. Для начала, можно предложить рассчитывать корреляцию входной сейсмограммы с восстановленной сейсмограммой и делать выводы на основе полученного коэффициента корреляции.

Благодарность. Автор благодарен Стефании Фишер за оказание помощи при подготовке данной статьи, а также AFTAC за поддержку в проведении данных исследований.

# ЛИТЕРАТУРА

- Bogert, B. P. The quefrency alanysis of time series for echoes: Cepstrum, pseudo-autocovariance, cross-cepstrum, and saphe cracking / B. P. Bogert, M. J. R. Healey, and J. W. Tukey // Proc. Symp. Time Series Analysis, M. Rosenblatt, Ed. - New York: Wiley, 1963. - Chap. 15, pp. 209 - 243.
- Childers, D. G., D. P. Skinner, and R. C. Kemerait The Cepstrum: A Guide to Processing / D. G Childers, D. P. Skinner, and R. C. Kemerait // Proceedings of the IEEE. 1977. Vol. 65, No. 10, October.
- 3. Junek, W. N. Source depth estimation using array processing techniques / W. N Junek, R. C. Kemerait, M. T. Woods // Presented at V International Conference.
- 4. Kemerait., R. C. Signal detection and extraction by cepstrum techniques / R. C. Kemerait // Ph.D. Dissertation, University of Florida, 1971.
- 5. Kemerait, R. Childers Signal detection and extraction by cepstrum techniques / R. Kemerait, D. G. Childers // IEEE Trans. on Information Theory, 1972, Vol. IT-18, Issue 6. Pp. 745 759.
- Tribolet, J. M. A new phase unwrapping algorithm / J. M Tribolet // IEEE Trans. Acoust., Speech, and Signal Processing, 1977/ -Vol. ASSP – 26.- Pp. 170 - 177.

# ЖЕР БЕТІНЕ ЖАҚЫН СЕЙСМИКАЛЫҚ ОҚИҒАЛАРДЫҢ ТЕРЕНДІГІН БАҒАЛАУЫНА КЕШЕНДІ КЕПСТРУМ ӘДІСІМЕН ИТЕРАТИВТІ КӨЗҚАРАСЫ

# Кемерайт Р.К.

### Әуе күштерінің қолданбалы технологиялар орталығ, Флорида, АҚШ

Жер бетіне жақын (терең емес) сесмикалық оқиғаның терендігін анықтауында спектраль әдісін қолдануына жаңа көзқарасы сипатталған. Гармоникалық деконволюция (кешенді кепструм) әдісі үшін итеративті прцедурасы ұсынылады, бұл терендегі фазаны тым дәл бағадауына мүмкіндік береді. Жұмыс, ядролық жарылыстарын іріктеуінде жоюлу қауіп-қатерісіз оқиғаларды арнайы зерттеуіне іріктеуін жақсарту үшін бағытталған.

# AN ITERATIVE APPROACH IN ESTIMATING DEPTH OF A SHALLOW EVENT VIA THE COMPLEX CEPSTRUM

### **R.C. Kemerait**

# Air Force Technical Applications Center, Florida, USA

A new approach is described applying spectral method in depth estimation of shallow seismic events. Iterative procedure for homomorphic deconvolution (complex cepstrum) is offered, which lead to more accurate estimation of a depth phase. This work is done to improve event screening for special investigation without risking possible removal of a nuclear explosion from selection.

# УДК 550.3; 550.4

# СЕЙСМОРЕЗОНАНСНЫЙ МЕТОД ОБНАРУЖЕНИЯ ОЧАГОВ ПОДЗЕМНЫХ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ

### Кишкина С.Б., Лукишов Б.Г., Спивак А.А.

#### Институт динамики геосфер РАН, Москва, Россия

Обсуждаются возможности обнаружения подземных контрастных неоднородностей, вызванных разрушением среды в очаговой зоне подземного ядерного взрыва. Приводится теоретическая модель рассеяния слабых сейсмических волн на неоднородностях. На основе результатов инструментальных наблюдений показано, что спектральные характеристики местного микросейсмического фона имеют аномалии в эпицентральных зонах подземных ядерных взрывов, что позволяет использовать их для установления места проведения взрыва, а также оценивать степень нарушенности геологической среды и размер зоны разрушения.

#### Введение

Из существующих способов контроля подземных ядерных испытаний (космический мониторинг, радиационная разведка, регистрация электромагнитных и ионосферных эффектов и др.) наиболее разработаны и перспективны сейсмические методы контроля [1]. При этом сейсмические методы играют немаловажную роль также при проведении инспекции на месте [2]. Решение задач, связанных с обнаружением скрытых неоднородностей на приповерхностных участках земной коры, сформировавшихся в результате проведения подземных ядерных испытаний, представляет собой одну из наиболее важных составляющих системы контроля. Можно с уверенностью говорить о том, что на первом этапе инспекции на месте, когда стоит вопрос о сужении площади поиска радиационных, электромагнитных и других эффектов подземного ядерного взрыва, первостепенная роль отводится сейсмическим методам. Особое значение здесь имеют методы пассивной сейсмики, с помощью которых в ряде случаев удается не только сузить площадь поиска механических проявлений подземного ядерного взрыва (по анализу афтершоковых последовательностей), но и с достаточной для практических целей точностью указать эпицентр искусственно созданной подземной неоднородности.

В статье кратко рассмотрена теория и приведены примеры использования сейсморезонансных методов поиска контрастных неоднородностей на примере крупномасштабных взрывов, произведенных на Семипалатинском испытательном полигоне (СИП).

# МОДЕЛЬ РАССЕЯНИЯ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ НА ПОДЗЕМНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ

Взаимодействие сейсмических волн с неоднородностями рассматривается в простейшей постановке, а именно: неоднородность имеет сферическую форму и расположена в упругой однородной среде [3 - 6]. Для получения качественных соотношений, описывающих влияние подземной неоднородности на спектральные характеристики местного микросейсмического шума, изучена задача о рассеянии плоской сейсмической волны на сферической полости радиуса Rп, расположенной в упругом безграничном пространстве, в предположении, что вокруг полости имеется сферический слой с внешним радиусом R1, упругие свойства которого отличаются от аналогичных свойств безграничной среды (рисунок 1).



Рисунок 1. Схема взаимодействия плоской сейсмической волны со сферической неоднородностью

Вектор смещения в сейсмической волне может быть записан через скалярный  $\Psi$  и векторный  $\vec{A}$  потенциалы в виде:

$$\vec{u} = grad \Psi + rot A$$
.

Пусть на неоднородность падает плоская монохроматическая продольная волна, распространяющаяся вертикально вверх (рисунок 1), которая описывается потенциалом

$$\Psi = \exp\left\{i\omega\left(t + \frac{z}{C_P}\right)\right\}$$

где  $C_{\rm P}$  – скорость распространения продольных волн.

Поместим начало системы цилиндрических координат ( $r, \theta$ ) в центр полости (в качестве полярной оси выбрана ось z). Тогда падающая волна может быть разложена в ряд по полиномам Лежандра:

$$\Psi = e^{-i\omega t} \sum_{m=0} -i^m 2m + 1 j_m k r P_m(\cos \theta)$$

где:  $k = \omega/C_P$ ,  $j_m$  – сферическая функция Бесселя m – го порядка.

Потенциалы  $\Psi$  и A удовлетворяют уравнениям Гельмгольца и определяются из следующих уравнений [9]

I. B some 
$$R_n \le r < R_I$$
:  

$$\Psi = \Psi_1(r,\theta) = e^{-\omega t} \sum_{m=0} -i^m 2m + 1 \times b_m h_m^{(2)}(kr) + c_m h_m^{(1)}(kr) P_m(\cos\theta)$$

$$A = A_1(r,\theta) = e^{-\omega t} \sum_{m=1} -i^m 2m + 1 \times a_m h_m^{(2)}(qr) + e_m h_m^{(1)}(qr) P_m(\cos\theta)$$

II. В зоне  $r \ge R_1$ :

$$\Psi (r,\theta) = e^{-\omega t} \sum_{m=0}^{\infty} -i^m 2m + 1 \quad d_m h_m^{(2)}(kr) \ P_m(\cos\theta)$$

$$A(r,\theta) = e^{-\omega t} \sum_{m=1}^{\infty} -i^m 2m + 1 \quad f_m h_m^{(2)}(qr) \ P_m(\cos\theta) \,.$$

Здесь:  $h_m^{(1)}$  и  $h_m^{(2)}$  - функции Ганкеля соответственно первого и второго рода;  $n_m$  – функции Неймана;  $P_m(\cos\theta)$  – присоединенный полином Лежандра;  $q = kC_S/C_P$ ;  $C_S$  – скорость поперечных волн в среде;  $a_m$ ,  $b_m$ ,  $c_m$ ,  $d_m$ ,  $e_m$  и  $f_m$  – постоянные коэффициенты, определяемые из граничных условий:

$$P_m(\cos \theta) = \sin \theta \frac{dP_m(\cos \theta)}{d(\cos \theta)}$$
 при  $R_{\Pi} \le r < R$ 

и условий обращения напряжений, действующих в среде, в ноль на границе  $r = R_{\pi}$  и их непрерывности на границе зоны неоднородности:  $r = R_I$ .

Численным расчетом определяются неизвестные коэффициенты и относительная спектральная плотность  $F(z, \theta)$  – отношение спектра вертикальных перемещений:

$$U_z = U_r \cos\theta - U_\theta \cos\theta$$

к спектру вертикальных перемещений падающей волны:

$$U_z^0 = -k\exp -ikr\cos\theta + i\,\omega t$$

Величина  $F(z, \theta)$  характеризует изменчивость спектра исходной волны в результате ее взаимодействия с контрастной неоднородностью на некоторой условной поверхности, расположенной в безграничной однородной среде. Отметим, что такой подход позволяет получить качественную картину влияния неоднородности и не может быть использован для анализа экспериментов, когда все измерения выполняются на свободной от напряжений земной поверхности.

Пример численного расчета относительной спектральной плотности  $F(z, \theta)$  на поверхности, отстоящей на расстоянии H от центра полости и параллельной фронту падающей волны, в зависимости от относительного эпицентрального расстояния  $R_e = r/R_n$ . представлен на рисунке 2. Расчеты выполнены для следующих значений параметров:  $z = H = 9R_n$ ;  $v = v_1 = 0,33$ ;  $G_1/G = 0,5$ ;  $R_1 = 3R_n$ , где v- коэффициент Пуассона, G – модуль сдвига материала среды, индексом "1" обозначены значения для области  $R_n \le r < R_1$ .





Из рисунка 2 видно, что контрастная неоднородность, характеризующаяся жесткостью, меньшей по сравнению с окружающей средой, оказывает существенное влияние на амплитуду спектра сейсмического сигнала, причем это влияние не только зависит от угла  $\theta$ , но и имеет немонотонный характер с отчетливыми локальными экстремумами. Это означает для практики, что по пространственным аномалиям спектральных характеристик микросейсмических колебаний можно определять эпицентр подземной неоднородности, а также оценивать их масштаб.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

С целью экспериментальной проверки возможности оценки степени нарушенности среды на основе анализа спектральных характеристик местного микросейсмического фона выполнена регистрация и анализ сейсмических колебаний на земной поверхности при разных расстояниях от эпицентра подземных ядерных взрывов. В [7, 8] показано, что подземный взрыв мощностью 10 - 100 кТ ТNТ приводит к формированию значительной по размерам области разрушенных горных пород, центр которой расположен на глубине взрыва (около 500 м). При этом с достаточной достоверностью определена степень нарушенности среды (трещиноватость, уменьшение скорости продольных волн, проницаемость и т. п.) в ее зависимости от расстояния до центра взрыва. Это позволяет не только оценивать размер контрастной

области, расположенной на глубине, но также – получить целевую функцию для сопоставления амплитуды изменений спектральной плотности микросейсмических колебаний в зависимости от степени нарушенности среды.

Существует несколько характерных особенностей спектров микросейсмических колебаний, которые могут быть использованы для обнаружения и определения эффективных размеров подземной контрастной зоны.



Эпицентральное расстояние, м: 1-50; 2-250; 3-900

Рисунок 3. Спектр сейсмического шума на радиальном профиле, проходящем через эпицентр подземной неоднородности (H = 1000 м; R<sub>1</sub> ~ 30 м; R<sub>1</sub> ~ 100 м)

Из рисунка 3 видно, что в эпицентральной зоне взрыва наблюдается значительное увеличение спектральной плотности микросейсмических колебаний. С увеличением эпицентрального расстояния амплитуда спектральной плотности падает, что в полной мере соответствует результатам, полученным путем численных расчетов (рисунок 2). На рисунке 4 приведены результаты обработки данных, полученных в том же эксперименте, но при площадной регистрации микросейсмического фона. Рисунок подтверждает возможность обнаружения глубоко расположенных контрастных зон по пространственному распределению увеличения относительной спектральной плотности микросейсмических колебаний. На рисунке 5 приведены аналогичные результаты, полученные при изучении микросейсмического фона в эксперименте на участке Балапан СИП (скв.1336), где взрыв произведен в осадочных породах на глубине порядка 500 м.

Из рисунка 5 отчетливо видно, что с увеличением эпицентрального расстояния амплитуда спектральной плотности также как в предыдущем примере падает. Другой особенностью спектральной плотности мощности микросейсмического шума в эпицентральной зоне взрыва является наличие широких пиков в области частот 3 - 4 Гц и 7 - 8 Гц.

# I. Увеличение спектральной мощности в эпицентральной зоне подземной контрастной неоднородности

На рисунке 3 представлен спектр сейсмического шума (вертикальная компонента) вдоль радиального профиля, проходящего через эпицентр крупномасштабного взрыва, произведенного в толще соли на глубине 800 м.



Рисунок 4. Пространственное распределение относительной спектральной плотности микросейсмического шума F в эпицентральной зоне подземного взрыва



Эпицентральное расстояние, м: 1 – 200; 2 – 500; 3 – 1000

Рисунок 5. Спектральная плотность мощности микросейсмического шума в эксперименте. СИП, скв. 1336 (H = 500 м; R<sub>n</sub> ~ 30 м; R<sub>1</sub> ~100 м)

# II. Увеличение вклада высокочастотных составляющих микросейсмического фона в эпицентральной зоне контрастной неоднородности

Наличие подземной неоднородности вызывает увеличение вклада высокочастотных составляющих в общую энергию микросейсмических колебаний в эпицентральной зоне. В качестве иллюстрации на рисунке 6 приведено отношение энергии фоновых микроколебаний  $E_1$  и  $E_2$  в разных диапазонах частот -  $\Delta f_1$  и  $\Delta f_2$ , в зависимости от эпицентрального расстояния для эксперимента на СИП (скв.1366, H = 500 м). Следует отметить, что подобную зависимость может быть получена для других пар частот-



Рисунок 6. Отношение энергии фоновых микроколебаний E2 и E1 в диапазоне частот 12 - 22 Гц и 2 - 12 Гц для эпицентральной зоны в эксперименте. СИП, скв.1366 (H = 500 м; R<sub>1</sub> ~ 50 м; R<sub>1</sub> ~140 м)

# III. Увеличение значения отношения компонент колебаний - горизонтальной к вертикальной (метод Накамуры) над скрытой контрастной неоднородностью

Наиболее устойчивой характеристикой микросейсмических колебаний является отношение амплитуды горизонтальной компоненты  $A_{\rm r}$  к вертикальной  $A_{\rm B}$ . Разное соотношение между  $A_{\rm r}$  и  $A_{\rm B}$  для разных участков земной коры указывает на отличие структурных характеристиках приповерхностных участков. Применительно к выявлению подземной контрастной неоднородности выполняется площадная регистрация микросейсмического фона. На рисунке 8 приведен пример результатов анализа таких измерений для эксперимента на СИП (скв. 1366).

Отчетливо видно, что отношение  $A_{\rm r} / A_{\rm B}$  заметно выше в эпицентральной зоне неоднородности. Причем, в районе эпицентра это отношение максимально. ных диапазонов  $\Delta f_1$  и  $\Delta f_2$ . При этом для анализа следует выбирать величины  $\Delta f_1$  и  $\Delta f_2$ , при которых неоднородность проявляется на графике  $E_2/E_1(r)$  наилучшим образом. Частным случаем рассматриваемого метода выявления контрастной неоднородности является построение отношения амплитуд  $A_1$  и  $A_2$ спектральной плотности мощности микроколебаний для двух фиксированных частот  $f_1$  и  $f_2$ , значения которых также следует подобрать. Для иллюстрации на рисунке 7 приведено отношение  $A_2/A_1(r)$  для частот  $f_1 = 1,1$  Гц и  $f_2 = 4,0$  Гц в зависимости от эпицентрального расстояния, полученное в эксперименте на СИП, скв.1346, H = 600 м.



Рисунок 7. Отношение среднеквадратичных амплитуд микросейсмического фона (вертикальная компонента), полученных усреднением 20 реализаций на частотах f1 = 1,1 Гц и f2 = 4,0 Гц соответственно, в эксперименте. СИП, скв.1346 (H = 600 м; R<sub>п</sub> ~ 50 м; R<sub>1</sub> ~150 м)





Рисунок 8. Отношение горизонтальной компоненты микросейсмического фона к вертикальной – К, в эпицентральной зоне в эксперименте на СИП. Скв.1366 (H = 500 м; R<sub>1</sub> ~ 50 м; R<sub>1</sub> ~ 140 м)



Рисунок 9. Спектральная плотность мощности микросейсмических колебаний и в эксперименте на СИП. Скв.1352 (H = 500 м; R<sub>n</sub> ~ 35 м; R<sub>1</sub> ~100 м)

# IV. Увеличение либо возникновение монохроматических спектральных пиков, устанавливающее границы скрытой контрастной неоднородности

Анализ результатов микросейсмической регистрации в эпицентральной зоне скрытой подземной неоднородности показал, что наличие подземной контрастной области приводит в ряде случаев к изменению характеристик квазигармонических составляющих фона. Такие составляющие, проявляющиеся в виде узких спектральных пиков разной амплитуды, могут либо возникать в эпицентральной зоне контрастной области, либо значительно увеличивать свою амплитуду. В качестве примера на рисунке 9 представлена спектральная плотность микросейсмических колебаний для разных эпицентральных расстояний в одном из экспериментов на СИП (скв. 1352). Приведенные данные показывают, что квазигармонические колебания с частотой 11,8 Гц возникают по мере приближения к эпицентру неоднородности, причем относительная амплитуда пика весьма значительна. Пики с частотами 8,4 Гц и 16,7 Гц присутствуют на всех эпицентральных расстояниях, однако, характеризуются существенно боль-

# Литература

шей амплитудой в районе эпицентра. Детальный анализ изменения относительной амплитуды пика (отношение пикового значения спектральной плотности мощности  $A_{\rm n}$  к фоновому значению на этой частоте  $A_0$ ) позволяет получить зависимость  $A_{\rm n} / A_0$  (r), пример которой приведен на рисунке 10.



Центральная частота пика, Гц: 1 – 8,4; 2 – 11,8; 3 – 16,7

Рисунок 10. Относительная амплитуда спектральных пиков в зависимости от эпицентрального расстояния. Эксперимент на СИП, скв. 1352

#### Выводы

Проведенные исследования и приведенные данные свидетельствуют о высокой информативности местных микросейсмических колебаний для целей установления расположения, обобщенных границ и степени контрастности скрытых подземных неоднородностей, созданных подземными взрывами.

Применимость каждого из рассмотренных методов выявления скрытой подземной неоднородности определяется рядом факторов: строение участка земной коры, степень контрастности неоднородности, детальность микросейсмических наблюдений и т.д. По этой причине рассмотренные методы на практике необходимо использовать комплексно, выделяя наиболее действенные для каждого конкретного случая.

- 1. Адушкин, В.В. Подземные взрывы / В.В. Адушкин, А.А. Спивак // М.: Наука, 2007. 579 с.
- 2. Спивак, А.А. Сейсморезонансные методы обнаружения контрастных зон в земной коре / А.А. Спивак, Б.Г. Лукишов // Физические поля и динамика взаимодействующих геосфер // М.: ГЕОС, 2007. – С. 276 - 285.
- 3. Сивухин, Д.В. Дифракция плоской звуковой волны на сферической полости / Д.В. Сивухин // Акуст. журн., 1955. Т.1, вып.1. С. 78 88.
- Meyer, E. Pulsation oscillation of cavities in rubber / E. Meyer, K. Brendell, K. Tamm // J. Acoust. Soc. Amer. 1958. V. 30. No.12. – P. 1116 - 1124.
- 5. Gaunard, G.C. Theory of resonant scattering from spherical cavities in elastic and viscoelastic media / G.C. Gaunard, H. Uberall // J. Acoust. Soc. Amer. 1978. V.63, No.6. P. 1699 1712.

- 6. Дубровский, В.А. Рассеяние упругих волн на крупномасштабном сферическом слабоконтрастном включении / В.А. Дубровский, В.С. Морочник // Изв. АН СССР. Физика Земли, 1986. № 4. С. 32 41.
- 7. Адушкин, В.В. Изменение свойств горных пород и массивов при подземных ядерных взрывах / В.В. Адушкин, А.А. Спивак // Физика горения и взрыва, 2004. № 6. С. 15 26.
- Кочарян, Г.Г. Динамика деформирования блочных массивов горных пород / Г.Г. Кочарян, А.А. Спивак М. // Академкнига, 2003. – 423 с.
- 9. Фихтенгольц Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. Т.З. М.: Наука, 1966. 656 с.

# ЖЕРАСТЫ ЯДРОЛЫҚ ЖАРЫЛЫСТАРДЫҢ ОШАҚТАРЫН ТАБУЫНА СЕЙСМОРЕЗОНАНС ӘДІСІ

# Кишкина С.Б., Лукишов Б.Г., Спивак А.А.

# РҒА Геосфералар динамикасы институты, Мәскеу, Ресей

Жерасты ядролық жарылыстың ошақ белдемінде орта бұзылуынан пайда болған жерасты қарама-қарсы біртекті еместерін табу мүмкіндіктері талдануда. Біртекті еместеріне әлсіз сейсмикалық толқындар таралуының теоретикалық моделі келтірілген. Инструментальды байқау нәтижелері негізінде жерасты ядролық жарылыстардың эпиорталықтар белдемдерінде жергілікті микросейсмикалық аясының спектраль сипаттамаларының аномалиялары бар болуы көрсетілген, бұл, жарылыс жүргізілген жерін, сондай-ақ ортаның бұзылу дәрежесі мен бұзылу белдемнің мөлшерін анықтау үшін қолдануына мүмкіндік береді.

# SEISMIC RESONANCE METHOD TO DISCOVER UNDERGROUND NUCLEAR EXPLOSIONS

### S.B. Kishkinf., B.G. Lukishov, A.A. Spivak

### Institute of Geodynamics of Geospheres RAS, Moscow, Russia

A detection method of large-scale heterogeneities in the Earth crust is proposed. Theoretical model of dispersion of the weak seismic waves on the heterogeneities is considered. On the basis of the results of instrumental observations it is shown that spectral characteristics of the microseismic background characterized by anomalies, which could be use for determination of the epicenter of underground nuclear explosion, also to estimate the broken state extent and dimension of the damage zone.

# УДК 550.34:621.039.9

# ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УПРУГИХ ВОЛН В КАВЕРНОЗНЫХ СРЕДАХ

### Глинский Б.М., Караваев Д.А., Мартынов В.Н., Хайретдинов М.С.

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

Описан созданный инструментарий (параллельные программы, средства визуализации) для численного моделирования распространения упругих волн в 3D и 2D неоднородных упругих средах, содержащих кавернозные включения, применимый для задач по инспекции на месте. По результатам серии численных расчетов выделены группы волн и представлена интерпретация синтетических данных, отражающих влияние кавернозного включения на картину волнового поля. Успешным исследованиям способствовало использование кластерного суперкомпьютера НКС-30Т

#### Введение

В связи с решением задач, относящихся к проблеме инспекции на месте [3], важным является изучение особенностей распространения сейсмических волн в средах, содержащих включение в виде каверны. Ранее [1] предложен метод вибрационного зондирования Земли для обнаружения кавернозных включений в неоднородных средах. Метод основан на сопоставлении параметров сейсмических волновых полей, регистрируемых на выходе из кавернозной зоны и в прилегающей к ней областях. Один из ключевых вопросов методики связан с выбором отличительных информативных параметров сейсмических полей, характеризующих прилегающие (смежные) области. Ответ на этот вопрос может быть получен на основе численного моделирования. Очевидно, что полнота складывающейся картины поля будет зависеть от выбора модели рассматриваемой среды, от диапазона частот зондирующих вибросейсмических колебаний и некоторых других факторов, нуждающихся в исследовании. С учетом этого разработан комплекс программ для численного моделирования процессов распространения упругих волн в средах подобного типа.

Известен широкий спектр численных методов, применяемых для моделирования полных волновых полей в неоднородных упругих средах [5]. Наиболее гибкими для случая сложно построенных 3-хмерных неоднородных упругих сред являются разностный метод и метод конечных элементов. Применение таких методов численного моделирования требует больших вычислительных затрат даже в случае применении кластерных суперЭВМ. В зависимости от входных параметров и степени детальности расчетов моделирование сейсмических полей может потребовать значительных вычислительных ресурсов. Поэтому существует необходимость в ведении параллельных вычислений для ускорения работ, а также в обеспечении возможности проведения расчетов для «больших» моделей упругих сред и применения мелкой расчетной сетки с целью выявления необходимых эффектов.

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И СРЕДСТВА МОДЕЛИРОВАНИЯ

Численное моделирование распространения сейсмических волн в сложно построенных упругих неоднородных средах проведено на основе решения полной системы уравнений теории упругости, с соответствующими начальными и граничными условиями. Постановка задачи представлена в терминах вектора скоростей смещений и тензора напряжений, в которой для трехмерного случая предположено, что параметры Ламе  $\lambda = \lambda(x,y,z), \mu = \mu(x,y,z)$  и плотность упругой среды р=р(x,y,z). С использованием конечно-разностного метода разработана параллельная программа для численного моделирования распространения упругих волн в трехмерно неоднородной упругой среде. Программа включает в себя, во-первых, реализацию построения сложной трехмерной модели упругой среды с включением различных неоднородностей, характеризующихся различными упругими параметрами. Во-вторых, в ней реализована часть, непосредственно отвечающая за проведение численного моделирования по конечно-разностной схеме. Разработан построитель, с помощью которого можно создавать довольно сложные модели, близкие к реальным объектам исследования. Использованная конечно-разностная схема имеет второй порядок аппроксимации по времени и пространству. Реализованная схема построена с учетом удовлетворения интегральным законам сохранения. Для устранения отражений упругих волн от границ расчетной области реализованы поглощающие границы. Общий алгоритм построения конечно-разностной схемы для 3D задач численного моделирования, а также описание построителя упругих моделей и параллельная реализация более подробно представлены в [2, 4]. Созданная программа успешно применена для моделирования распространения сейсмических волн в 3D упругих средах, характерных для грязевулканических структур [4]. Опробованный алгоритм адаптирован для моделирования распространения упругих волн от сосредоточенного источника для более сложных случаев строения упругих сред. Под такими упругими средами следует понимать 3D упругие среды, которые могут содержать различные включения кавернозного типа, в частности области, образованные в результате проведения ядерных испытаний на испытательных полигонах. В статье рассмотрен случай двумерной модели упругих сред, но задача может быть обобщена и на трехмерный случай.

# ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ИЗУЧЕНИЮ СВОЙСТВ ВОЛНОВОГО ПОЛЯ НА РАЗЛИЧНЫХ МОДЕЛЯХ

Для исследования структуры волнового поля, которое может возникнуть при проведении полевых экспериментов на испытательных полигонах, проведены тестовые расчеты для различных моделей. Изучалось влияние геометрии модели на структуру волнового поля упругой среды, содержащей каверну, в первую очередь, с целью выделения отличительных свойств волнового поля, обусловленных ее присутствием. Все численные расчеты проведены с использованием разработанной параллельной программы на кластере НКС-30Т ССКЦ СО РАН (ИВМиМГ СО РАН).

На рисунке 1 показана исследованная 2 D модель неоднородной упругой среды с линейными размерами 3.4 км по оси Ох и 1.0 км по оси Оz, содержащая одну подобласть, являющуюся каверной (4). Каверна окружена двумя внешними кольцами: одно из них полностью однородно (3), второе (2), имитирующее зону трещиноватости, заполнено равномерно распределенными включениями. Размеры этих включений, выраженные в единичных ячейках (со стороной  $5.23*10^{-4}$  км): вдоль оси Ox – одна ячейка, вдоль оси Oz – две ячейки.



Цифра – номер элемента модели



Упругие параметры элементов, слагающих исследуемую модель, приведены в таблице.

Для моделирования распространения сейсмических волн использовался источник типа «центр давления» (все сторонняя сила), расположенный вблизи свободной поверхности (z=0), координаты источника по оси Ох 0.3 км.

Таблица. Упругие параметры 2D модели, представленной на рисунке 1

Объект	Vp (км/с)	Vs (км/с)	ρ(г/см³)	Радиус (км)				
Вмещающая среда (1)	2.2	1.1	2.65	-				
Кольцо (2), зона	5.0	3.0	2.8	0.089				
трещиноватости	5.0	5.0	2.0					
Кольцо (3)	5.0	3.0	2.8	0.054				
Каверна (4)	0.0	0.0	0.0	0.037				
Примечание: Vp – скорость распространения продольных волн, Vs – скорость распространения поперечных волн, $\rho$ – плотность упругой среды.								

Несущая частота в функции источника - 30 Гц. Упругие параметры модели и частота источника были подобраны таким образом, что размер каверны (4) составляет две минимальной длины волны. Система наблюдения из 290 сейсмоприемников расположена на дневной поверхности, расстояние между сейсмоприемниками - 0.01 км. Координаты первого сейсмоприемника по оси Ох - 0.4 км.

Результатами расчетов являются синтетические сейсмограммы и мгновенные снимки волнового поля. Рассмотрена в основном одна из компонент волнового поля, а именно Uz, соответствующая вертикальной составляющей сейсмического поля (Oz). Время расчета сейсмограмм для исследуемой модели составляет 3 с.

На рисунке 2 приведен пример синтетической сейсмограммы для компоненты Uz, в прямоугольной системе координат, при которой по горизонтали представлены координаты сейсмоприемников, по вертикали – время вступления различных волн.



Рисунок 2. Рассчитанная синтетическая сейсмограмма для компоненты Uz волнового поля. Горизонтальный линейный размер модели 3,4 км

На синтетической сейсмограмме рисунка 2 отчетливо видны несколько групп упругих волн, отмеченных цифрами 1 - 6. Судя по времени прихода волн к сейсмоприемникам, выделенные группы соответствуют следующим типам волн: 1 - прямая Р волна; 2 - поверхностная волна Рэлея; 3 - Р волна, отраженная от каверны; 4 - S волна, отраженная от каверны; 5 - SP волна, отраженная от каверны, 6 - SS волна, отраженная от каверны. Таким образом, группы волн, отмеченные цифрами 3 - 6, вызваны присутствием каверны. При этом волна (3) имеет значительную амплитуду и может являться предвестником присутствия каверны.

Процесс образования отраженных волн, приведенный на синтетической сейсмограмме (рисунок 2), иллюстрируют рассчитанные мгновенные снимки волнового поля для 12 временных промежутков (рисунок 3).



Рисунок 3. Рассчитанные мгновенные снимки компоненты Uz волнового поля для 12 различных промежутков времени

Снимок на рисунке 3 для момента t3 отражает группы волн 3, 4; в моменты t6 - t8 – группы волн 5, 6. Поверхностная волна 2 отчетливо видна на всех мгновенных снимках волнового поля. Следует отметить, что при падении Р и S волн от источника на каверну и при дальнейшем их прохождении через каверну видна ответная реакция каверны, а именно, видны отраженные волны на свободной (дневной) поверхности. При дальнейшем расхождении волн и их распространении во вмешающей среде никаких резонансных эффектов, связанных с присутствием каверны, не наблюдается. По мгновенным снимкам не отмечено также значимых изменений поля при падении упругих волн, отраженных от свободной поверхности, при их падении на каверну. Таким образом, основные изменения сейсмического поля, вызванные присутствием каверны, связаны с прохождением через нее основных упругих волн.

Проведены аналогичные расчеты и для однородной среды, что позволило выполнить сравнение ее волнового поля с вышеприведенными результатами и построить разностные синтетические сейсмограммы. На рисунке 4 приведена синтетическая сейсмограмма, которая отражает разницу между двумя сейсмограммами, рассчитанными: одна – для модели с каверной, другая – для модели однородной упругой среды. Эффект, вызванный присутствием в среде каверны, окруженной двумя внешними кольцами, включая зону трещиноватости, в виде волн Р (3), S (4), SP (5), SS (6), отраженных от каверны. Данные группы волн отдельно выделены и представлены на рисунке 4.



Рисунок 4. Разностная синтетическая сейсмограмма для Uz компоненты волнового поля

На следующем этапе исследования проведено моделирование распространения упругих волн в упругой среде, без кольцевой зоны трещиноватости (зона 2 на рисунке 1), которую можно считать аналогом анизотропной подобласти. На рисунке 5 приведены результаты численных расчетов в виде раз-

ностных синтетических сейсмограмм Uz компоненты волнового поля для двух пар моделей: среды А без кольцевой зоны трещиноватости и однородной среды (рисунок 5 а), а также полной модели A (рисунок 1) и аналогичной модели, но без кольцевой зоны трещиноватости 2.



Рисунок 5. Разностные синтетические сейсмограммы Uz компонеты: а – для модели A (рисунок 1) без кольцевой зоны трещиноватости и однородной модели среды; б - для полной модели A и модели без кольцевой зоны трещиноватости

Значительных отличий в волновом поле, которые обусловлены присутствием кольцевой зоны трещиноватости (2) в изучаемой модели с каверной, как таковых не наблюдается. Возможен фазовый сдвиг на основных волнах, вызванный присутствием аналога анизотропного тела. В основном картина волнового поля осталась той же.

Серия расчетов выполнена для модели, аналогичной основной исследуемой (рисунок 1), но с частично измененными геометрическими размерами. Протяженность модели в этом варианте по координате X составила 6.4 (вместо 3.4) км, количество сейсмоприемников – 590 (вместо 290). Расположение и размеры всех остальных параметров модели и схемы наблюдения относительно рисунка 1 не изменялись. Время расчета сейсмограмм составило 7 (вместо 3) с. Синтетическая сейсмограмма для Uz компоненты волнового поля по результатам расчета при данной модели представлены на рисунке 6.



Рисунок 6. Синтетическая сейсмограмма для Uz компоненты волнового поля. Горизонтальный линейный размер модели 6.4 км

Как и ранее было установлено, на данном рисунке видны те же группы волн, которые служат показателями присутствия каверны. Причем не все выделенные группы волн возможно отчетливо наблюдать на значительном удалении от центра каверны.

# Заключение

Разработан инструментарий (параллельные программы) для проведения численного моделирования распространения упругих волн в 3D и 2D неоднородных упругих средах, содержащих кавернозные включения. Созданы средства визуализации сейсмического волнового поля, которые позволяют изучать его динамику во времени и пространстве. Благодаря использованию кластерного суперкомпьютера НКС-30T, средств распараллеливания программ, выбору методов решения обеспечено сокращение времени вычислений и возможность расчета полей для «больших» моделей с повышенной детальностью.

С применением созданного инструментария проведена серия вычислительных экспериментов для различных моделей упругих сред, при различных системах наблюдения и геометрически разных моделях включений. Показано, что в волновом поле выделяются группы волн, связанные с кавернозным включением. Представлена интерпретация полученных синтетических результатов, отражающих влияние кавернозного включения на картину волнового поля. В дальнейшем предполагается провести серию вычислительных экспериментов для более сложных моделей сред, содержащих несколько каверн и перекрытых неоднородными слоями различной геометрии, что позволит приблизить численную модель к реальной ситуации, имеющей место на испытательных полигонах, и разработать методику обнаружения новых каверн на фоне уже существующих.

Вычислительные эксперименты для модели неоднородной упругой среды, содержащей каверну, актуальны для изучения особенностей сейсмических волновых полей в местах проведенных ядерных взрывов, а также для обоснования методики изучения очаговых зон подземных ядерных взрывов, поскольку позволяют определить наиболее подходящее место расположения системы наблюдения (сейсмоприемников) для обнаружения тех или иных аномальных эффектов, а также более точно локализовать и характеризовать каверны – очаговые зоны подземных ядерных взрывов.

# ЛИТЕРАТУРА

- Алексеев, А.С. Активная сейсмометрия с использованием вибрационных источников в проблеме инспекции на месте / А.С. Алексеев, Б.М. Глинский, М.С. Хайретдинов // Вестник НЯЦ РК, 2006. – Вып. 2. – С. 142 - 149.
- Глинский, Б.М. Численное моделирование и экспериментальные исследования грязевого вулкана «Гора Карабетова» вибросейсмическими методами / Б.М. Глинский, Д.А. Караваев, В.В. Ковалевский, В.Н. Мартынов // Вычислительные методы и программирование, 2010. – Т. 11 – С. 95 - 104.
- 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.
- 4. Караваев, Д.А. Параллельная реализация метода численного моделирования волновых полей в трехмерных моделях неоднородных сред / Д.А. Караваев // Информационные технологии. Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского, 2009. № 6 (1) С. 203 209.
- 5. Михайленко Б.Г. Сейсмические поля в сложно построенных средах. Новосибирск. 1988. С. 312.

### ҚҰЫСТЫ ОРТАЛАРДА СЕРПІМДІ ТОЛҚЫНДАР ТАРАЛУЫН САНДЫ МОДЕЛЬДЕУ

# Глинский Б.М., Караваев Д.А, Мартынов В.Н., Хайретдинов М.С.

### РҒА СБ Есептеу математика және математикалық геофизика институты, Новосибирск, Ресей

Куыстарды қосатын біртекті емес серпімді 3D және 2D орталарда серпімді толқындар таралуын санды модельдеу үшін, орнындағы инспекция міндеттері үшін қолдануға болатын, жасалған құралдары сипаталған (параллель программалары, көзбен шолуына аспаптары). Санды есептеу сериясы бойынша толқындар топтары бөлінген және, қуыстар толқындық сүретіне ықпал етуін көрсететін синтетикалық нәтижелерін пайымдауы келтірілген. Табысты зерттеулеріне HKC-30T суперкомпьютерін пайдалануы жәрдем еткен.

# NUMERICAL MODELING OF ELASTIC WAVES PROPAGATION IN CAVITY MEDIA

### B.M. Glinsky, D.A. Karavaev, V.N. Martynov, M.S. Khairetdinov

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

We describe the developed toolkit (parallel programs, visualizing tools) for numerical modeling of elastic waves propagation in the 3D and 2D inhomogeneous elastic media with cavity that is used for on-site inspection problems. On the bases of numerical computation results the wave groups are selected and the interpretation of synthetic seismograms showing the influence of cavity on the wave field is presented. The use of cluster supercomputer NKS-30T helps successful problem solving.

# ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ ТЕХНОГЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ В ЗОНАХ ПОДЗЕМНЫХ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ

<sup>1)</sup>Голубов Б.Н., <sup>2)</sup>Сапожников Ю.А.

<sup>1)</sup>Институт динамики геосфер РАН, Москва, Россия <sup>2)</sup>Химический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Обсуждаются методы и результаты оценки радиационной обстановки, а также закономерности миграции и фракционирования радиоактивных изотопов в зонах подземных ядерных взрывов (ПЯВ). Показана необходимость инвентаризации радионуклидов в этих зонах с обязательным учетом вновь выявленных особенностей вторичных поствзрывных процессов. Обращается особое внимание на социально-экономическую актуальность изучения радиационной обстановки на месторождениях полезных ископаемых, которые осваивались с применением ПЯВ-технологий.

# Введение

29 ноября 1951 г. на испытательном полигоне Невада в рыхлых грунтах, на глубине 5,2 м был проведен первый ПЯВ наружного действия, а 26 июля 1957 г. на том же полигоне в вулканических туфах в буровой скважине на глубине 499 футов произведен маломощный пробный ПЯВ "Паскаль-А". Это были первые в мире ПЯВ, предусмотренные военными операциями "Jungle" и "Plumbbob", соответственно. С тех пор, вплоть до 2010 г. в разных регионах нашей планеты для военных и промышленных целей было проведено 1650 ПЯВ. Подавляющее их число осуществлено в США (935) и СССР (496), а также во Франции (160), Великобритании (24), Китае (22), Индии (6), Пакистане (5) и Северной Корее (2). В эту сводку не включены так называемые субкритические ПЯВ, которые стали проводиться на полигонах США и России после подписания в 1996 г. Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (ДВЗЯИ).

Теоретические прогнозные оценки радиационных последствий ПЯВ были сделаны задолго до их проведения. Однако уже первые испытания показали, что картина ПЯВ и их радиационных эффектов более сложна, чем ожидалось. Поначалу была выявлена специфика собственно взрывных, практически мгновенных физико-химических процессов ПЯВ. Однако с годами было обнаружено, что последствия ПЯВ не ограничиваются совокупностью кратковременных процессов, возникающих в момент взрыва, а имеют свое продолжение в виде сложной последовательности релаксационных процессов, развивающихся в зонах ПЯВ и растянутых на большие интервалы времени, исчисляемые многими годами и десятилетиями. Таким образом, каждый ПЯВ предстал как уникальное техногенное геологическое явление.

На основании опыта первых ПЯВ, имевших сугубо военные, а порой и политические цели, к середине 1960-х годов укоренилось представление о том, что радиоактивные продукты ПЯВ, особенно при взрывах полного внутреннего действия, надежно локализованы в полости ПЯВ или её ближайшей окрестности. Донесения радиационной разведки, проводившейся в момент или вскоре после завершения взрывных работ, как правило, носили успокаивающий характер: в зонах ПЯВ не фиксировались сверхнормативные запредельно высокие уровни радиации, подобные тем, что возникали, например, в зоне Чернобыльской аварии. Исключение составили только приповерхностные ПЯВ, проведенные для выброса грунта. Их радиационную опасность стремились уменьшить посредством ряда технологических мероприятий, например, путем применения специальных ядерных зарядов, оболочек, футеровки зарядной камеры и т.д. По мере накопления данных полевых, лабораторных и промысловых исследований во множестве зон ПЯВ, в частности, примененных для промышленных целей, становилось ясно, что в этих зонах, спустя примерно 10 - 12 лет, формируются достаточно обширные очаги или ореолы радиоактивного загрязнения подземного пространства и нередко земной поверхности. Отсюда следовало, что радиационную обстановку в зонах ПЯВ определяют не только собственно взрывные, т.е. практически мгновенные процессы, но и гораздо более длительные своеобразные геологические процессы, индуцированные ПЯВ.

В мировой практике анализ радиационной опасности зон ПЯВ, как и других объектов ядерного комплекса, базируется обычно на оценке рисков для человека. Используемые при этом официальные, весьма условные, нормативные показатели служат для управленческих и зачастую вынужденных практических решений социально-экономического характера. Однако при таком подходе упускаются из виду особенности поведения радионуклидов ПЯВ в биосферном круговороте вещества и энергии в трех звеньях: абиотическом (литосфера, гидросфера, атмосфера), биотическом и социальном. Не случайно, что нормативные показатели до сих пор все ещё не соотнесены с кларками - константами распространенности того или иного радионуклида в природных геохимических системах земной коры, атмосферы и гидросферы, а также живого вещества, которое объединяет всю совокупность организмов нашей планеты, а не только человека. Исследователи, признав изначально чрезвычайную сложность процессов, сопровождающих деление ядерного топлива и фракционирования радионуклидов в зонах ПЯВ, как наиболее мощного способа разрушения горных пород, до сих пор расходятся в оценках отдаленных радиационных последствий ПЯВ. Однако от решения этого вопроса напрямую зависит развязка сложнейшего клубка практических социально-экономических, инженерно-геологических и природоохранных проблем, связанных с освоением ресурсного потенциала недр в зонах ПЯВ.

Показательно, что в последние годы на испытательном полигоне Невада в США развернуты планомерные исследования по инвентаризации радионуклидов в зонах ПЯВ. Первые попытки наладить такую работу в России были предприняты в конце 80х - середине 90-х годов минувшего века, когда Научный совет по проблемам биосферы при Президиуме РАН (НСПБ РАН), возглавляемый академиком А.Л. Яншиным, объединил усилия ряда научных и производственных организаций для реализации программы научных исследований "Экологические последствия ПЯВ". И хотя к концу 90-х годов, эта программа была свернута из-за финансовых затруднений, полученные результаты выявили многообразие поведения радионуклидов в зонах ПЯВ в зависимости от особенностей геологического строения, геодинамической активности и техногенной дестабилизации недр. Уже тогда стало очевидно, что механизмы формирования очагов радиоактивного загрязнения в зонах ПЯВ военных ядерных полигонов, приуроченных обычно к массивам древних кристаллических пород, не такие, как на других объектах, особенно на месторождениях нефти и газа, где заряды ПЯВ закладывались в отложениях осадочного чехла разного состава и возраста, насыщенных флюидами. Своеобразная радиационная обстановка установлена также на ряде других объектов в зависимости от того, в каких породах закладывались ядерные заряды: соленосных, карбонатных, угленосных, многолетнемерзлых или иных.

Цель настоящей работы – описать наиболее характерные особенности поведения техногенных радионуклидов в зонах ПЯВ в течение длительного времени после завершения взрывных работ. В этой связи рассмотрены две основные задачи: 1) обобщить результаты и методику оценки радиационных последствий ПЯВ; 2) выявить своеобразие миграции и фракционирования радионуклидов в условиях техногенной дестабилизации недр, индуцированной ПЯВ в соленосных, карбонатных и угленосных терригенных отложениях.

# РЕЗУЛЬТАТЫ И МЕТОДЫ ОЦЕНКИ РАДИАЦИОН-НОЙ ОБСТАНОВКИ В ЗОНАХ ПЯВ

В развитии методов оценки радиационной обстановки в зонах ПЯВ достаточно условно выделяются

три стадии, которые в целом были характерны для США и СССР: начальная (1957 – 1963), промежуточная (1964 - 1990) и поздняя (после 1990 г.).

Начальная стадия (1957 – 1963). В 1957 – 1958 гг. США провели серию из 20 ПЯВ, а к концу 1962 г. - уже 116 ПЯВ мощностью до 100 кт. 115 из них пришлось на Невадский полигон и только один ПЯВ - "Гном", проведен за его пределами в штате Нью-Мексико вблизи Карлсбада с целью создания энергетического "котла" и изучения пучков нейтронов для ряда научных задач и военного дела. Наиболее детально радиационная обстановка в этот период изучена в зонах ПЯВ "Паскаль-А" и ПЯВ "Рейниер" [42, 69, 81, 82]. ПЯВ "Паскаль-А" проведен в открытом стволе скважины в так называемом стиле "римской свечи". Шесть лет обследования зоны этого ПЯВ показали, что даже при таких условиях 90% продуктов деления ядерного заряда остается под землей. ПЯВ "Рейниер" мощностью 1,7 кт проведен 19 сентября 1957 г. на глубине 240 м с целью изучения надежности захоронения радиоактивных продуктов ПЯВ и его сейсмического эффекта. Специалисты Ливерморского испытательного дивизиона и группа ученых из Лос-Аламоса пришли к выводу, что зона радиоактивного материала ПЯВ "Рейниер" приобрела вид чаши, центр которой примерно совпадал с точкой заложения заряда, располагаясь несколько ниже её. Толщина слоя радиоактивных пород оценена в несколько метров. Спустя 146 дней после взрыва обнаружено, что радиоактивная область этой чаши разделена на две зоны: первую - на расстоянии от центра 22,8 - 18,2 м с мощностью дозы у-излучения 200 - 400 мр/ч и вторую, узкую зону, - на расстоянии 16,1 – 13 м с максимальной мощностью дозы 800 мр/ч. Из скважин, пройденных ниже уровня заложения заряда взяты отдельные пробы с очень высокой активностью 3,4.1014 деления/г (общее число делений при взрыве 2,5·10<sup>23</sup>) при мощности дозы 137 Р/ч. Часть радиоактивной пробы представляла собой стекловидную массу с пузырьками и множеством включений зернистого расплавленного туфа. Через 8 месяцев после взрыва мощность дозы на поверхности забоя скважины, вскрывшей радиоактивную зону, составляла 300 мр/ч, на расстоянии 1 м от забоя – 20 мр/ч, а над конусом обрушения не превышала естественного фона – 0,04 мр/ч. На основании этих и ряда других экспериментальных взрывов для урана-235 был составлен перечень 73 техногенных радионуклидов - продуктов деления ядерного заряда ПЯВ, с различными периодами полураспада (от 33 лет до 1,2 часа). Определена активность этих радионуклидов на одну килотонну заряда (Ки/кт) через различное время после его взрыва (от 1 до 100 часов) [81]. Распределение активности различных изотопов - продуктов деления <sup>235</sup>U, в зависимости от их массы имеет вид известной двугорбой кривой Ферми с двумя максимумами в области массовых чисел 95 и 139 (кривая распределения выхода продуктов деления). Следует отметить, что такие кривые уже известны не только для урана-235, но и для всех делящихся нуклидов, включая плутоний. Кроме того, был сделан вывод об экономической целесообразности и безопасности ПЯВ, как наиболее мощного способа разрушения горных пород, что, однако, вызвало резкие возражения со стороны отдельных исследователей, пытавшихся упредить опасные последствия ПЯВ [69].

В СССР подход к оценке радиационной обстановки в зонах ПЯВ в этот период был более осторожным и отличался рядом особенностей. В 1947 г. на основании Постановления СНК СССР за подписью И. В. Сталина Радиевый институт АН СССР начал разработку радиохимического метода определения КПД ядерных взрывов. С 1948 по 1960 г. здесь проведены исследования с целью определения кумулятивных выходов осколочных радионуклидов, образующихся при делении ядер <sup>235</sup>U, <sup>238</sup>U и <sup>239</sup>Pu нейтронами спектра деления и быстрыми нейтронами с энергией 14,6 МэВ следующих осколочных радионуклидов: <sup>89</sup>Sr, <sup>90</sup>Sr, <sup>95</sup>Zr, <sup>97</sup>Zr, <sup>99</sup>Mo,<sup>102</sup>Mo, <sup>103</sup>Ru, <sup>105</sup>Ru, <sup>106</sup>Ru, <sup>111</sup>Ag, <sup>112</sup>Ag,<sup>115</sup>Cd, <sup>131</sup>I, <sup>140</sup>Ba. 16 мая 1950 г. И.В. Сталин подписал Постановление Совета Министров СССР "О научно-исследовательских, проектных и экспериментальных работах по использованию атомной энергии в мирных целях". В связи с этим, в начале пятидесятых годов Г.Н. Флеров и Д.А. Франк-Каменецкий (Арзамас-16) предложили использовать ПЯВ для наработки одного из изотопов урана (<sup>233</sup>U), а очаг взрыва с разогретой им породой использовать как резервуар тепла. В 1954 г. Д.А. Франк-Каменецкий и Ю.А. Трутнев выполнили соответствующее расчетное обоснование, что соответствовало замыслу Эдварда Теллера создать энергетический котел с помощью "чистых" термоядерных зарядов и ПЯВ "Гном". Поскольку радиационная опасность ПЯВ не была очевидной, за этим последовала серия предварительных экспериментов с зарядами химических взрывчатых веществ (ВВ). В 1957 г. экспедиция "ПВ" АН СССР для имитации атомного взрыва использовала заряд в 1000 тонн аммонита, пропитанного 300 литрами радиоактивного раствора хлорного <sup>198</sup>Аи. Заряд был заложен в глине на глубине 40 м. Взрыв сформировал воронку глубиной 33 м и диаметром 150 м. На высоте 1 м над грунтом уровни радиации вблизи эпицентра взрыва достигли 3,5 мР/час, на удалении 800 м - до 0,15 мР/час. Было показано, что в случае реального ПЯВ только через 5 - 10 лет радиация в районе воронки взрыва достигнет уровня, допускающего возможность работы человека без специальной защиты. Участники экспедиции весьма осторожно оценили перспективы использования ПЯВ в горном деле. Не исключено, что этот вывод способствовал тому, что в 1958 г. в СССР в одностороннем порядке был введен временный мораторий на испытания ядерного оружия. В мае 1960 г. для проведения ПЯВ были

выбраны старые штольни в горном массиве на побережье озера Иссык-Куль. Однако затем по соображениям радиационной и инженерно-геологической безопасности от этого замысла пришлось отказаться, и осенью того же года было принято решение о переносе места для проведения ПЯВ в горный массив Дегелен на Семипалатинском полигоне. К тому времени в СССР уже были опубликованы труды. раскрывающие механизм образования и особенности распространения проникающих излучений ядерного взрыва на основе результатов первых натурных опытов [32, 62], а также начаты работы по изучению ударной сжимаемости различных горных пород и минералов [47, 59]. Только после проведенных исследований 10 октября 1961 г. на Семипалатинском полигоне в горном массиве Дегелен в штольне В-1 в военных целях был осуществлен первый в СССР ПЯВ мощностью 1 кт. 2 февраля 1962 г. последовал еще один ПЯВ (мощностью 0,001 - 20 кт) в штольне А-1. Затем, вплоть до марта 1964 г., наступил перерыв в проведении ПЯВ. Таким образом, к концу 1962 г. в СССР было проведено всего два ПЯВ по сравнению со 116 - в США. Поэтому изначально СССР, не обладая богатым опытом ПЯВ, вынужден был заимствовать американские идеи и результаты оценки реального воздействия ПЯВ на геологическую среду и опираться в основном на итоги отечественных лабораторных, теоретических исследований и модельных экспериментов. Характерно, что и в дальнейшем в СССР предпочтение отдавалось имитации ПЯВ химическими взрывами [74, 79]. Вероятно, поэтому основные выводы о радиационной безопасности и экономической эффективности ПЯВ почти безоговорочно были восприняты в СССР.

Промежуточная стадия (1964 - 1990). Специфика этой стадии развития методов оценки радиационной обстановки в зонах ПЯВ связана с тем, что в 1963 г. был заключен многосторонний Договор о запрещении испытаний в трех средах: в воздухе, в космическом пространстве и под водой. Это способствовало реализации советской и американской программ мирных ПЯВ. Начиная с 1970 г., МАГАТЭ на основании мандата Генеральной Ассамблеи ООН развернуло работу по использованию ПЯВ в мирных целях. В 1969 -1971 гг. прошли советско-американские переговоры экспертов по мирному использованию ПЯВ. Поэтому на промежуточной стадии, особенно в период с 1970 по 1975 гг., были проведены не только военные ПЯВ на полигонах США, СССР и других ядерных государств, но также мирные ПЯВ на территории США и СССР. Сведения об истории и статистике этих ПЯВ отражены в [12, 61, 82]. Важнейшее требование к мирным ПЯВ, определенное на советско-американских переговорах, состояло в том, что ПЯВ не должны наносить значимое побочное вредное воздействие на персонал, население и окружающую среду. Поэтому было предусмотрено создание сети наблюдательных скважин в

отдельных зонах ПЯВ, в основном на военных полигонах. Укреплению представления о герметичности полостей ПЯВ и высокой экономической эффективности применения ПЯВ для хозяйственных целей, помимо результатов наблюдательных сетей, способствовала IV Международная конференция ООН по использованию атомной энергии в мирных целях. На конференции было отмечено, что мирный атом находится под контролем и поэтому не представляет опасности. Заманчивые перспективы применения мирных ПЯВ завоевали место и в образовательных программах США [67], СССР (соответствующий учебный курс в МИФИ), были поддержаны в МАГАТЭ на технических совещаниях специалистов многих стран в 1970, 1971 и 1972 гг. На этом фоне несколько неожиданными стали два события: одно в СССР, а другое - в США. В СССР первый ПЯВ 15 января 1965 г., предназначенный для выброса грунта с целью создания водохранилища в русле реки Чаган на Семипалатинском испытательном полигоне, сопровождался формированием мощного следа радиоактивного загрязнения местности, накрывшего г. Семипалатинск и ряд других населенных пунктов [39]. Этот ПЯВ по ряду причин оказался по существу аварийным, его радиоактивные продукты были обнаружены за пределами СССР и поэтому США предъявили советской стороне соответствующие претензии. В США в 1972 г. после нескольких первых мирных ПЯВ программа "Plowshare" была свернута, американские специалисты расценили такие ПЯВ как бесполезные и опасные [13, 69]. В СССР, напротив, в этот период количество мирных (а также военных) ПЯВ значительно возросло. Программа мирных ПЯВ была остановлена в СССР незадолго до его распада в 1988 г. Если в США подавляющее число мирных ПЯВ было сосредоточено на полигоне Невада, то в СССР география таких ПЯВ оказалась более обширной. Соответственно, СССР обрел более богатый опыт проведения и изучения последствий ПЯВ, чем США, одновременно подкрепленный работами по изучению свойств и поведения материалов при ударных нагрузках [47, 59]. Полученные к 1990 г результаты изучения поведения радионуклидов в зонах ПЯВ, влияющего на загрязнение недр и других оболочек географической среды, отражены в многочисленных работах [3, 22, 23, 28, 39, 42, 58, 67, 70, 77, 81, 82]. В частности, выявлены особенности активации частиц в "огненном шаре" ядерного взрыва, фракционирования радиоактивных продуктов взрыва и получены количественные оценки таких явлений. Изучены теплофизические свойства радиоактивных продуктов ПЯВ, температурный режим недр вблизи точки заложения ядерного заряда. Подмечены различия в радиоактивности, связанной с осколками деления ядерного топлива, металлической конструкцией ядерного устройства и вмещающими горными породами; установлена зависимость состава смеси радиоактивных продуктов

ПЯВ от типа ядерного заряда. Получены данные об ударной сжимаемости различных горных пород и минералов, в частности, кварца, графита, галита и карналлита, а также водных растворов солей (галогенидов, сульфатов) и углеводородов [47, 59]. Однако все эти исследования, как правило, были направлены на изучение последствий ПЯВ в ближней его окрестности и в течение относительно небольшого периода времени.

Поздняя стадия (после 1990 г.). В этот период все более четкими становились два разных подхода к оценке радиационных последствий ПЯВ: традиционный и условно именуемый «геологический». Логика традиционного подхода сводилась к тому, что полости ПЯВ герметичны, поскольку выстилаются якобы непроницаемой коркой застывшего расплава горных пород, а потому ПЯВ безопасны и эффективны в экономическом отношении. Такой подход служил основанием к расширению применения ПЯВ в России для военных и промышленных целей, что отражено во множестве публикаций [1, 6, 12, 24, 25, 29, 30, 39, 41, 43, 46, 63]. О военной стороне дела свидетельствует то, что 4-го июля 1994 г. Министр атомной энергии РФ Виктор Михайлов, Министр обороны Павел Грачев и генерал Константин Кобец направили Президенту России Борису Ельцину письмо с предложением применения ПЯВ для уничтожения накопленных запасов ядерного топлива на Новоземельском полигоне [33]. Проект был разработан Центральным Физико-техническим институтом Министерства обороны РФ и Всероссийским институтом экспериментальной физики в г. Сарове (Арзамас-16). 24 октября 1994 г. последовал соответствующий указ Президента РФ о практической реализации этого проекта. 24 сентября 1996 г. был открыт для подписания ДВЗЯИ, который стал сдерживать реализацию проекта. Тем не менее, в 1998 г., на заседании Межведомственной комиссии Совета Безопасности РФ был представлен доклад о захоронении (уничтожении) высокоактивных отходов атомной энергетики, уничтожения химического оружия и высокотоксичных химических веществ с помощью ПЯВ [39].

«Геологический» подход к оценке последствий ПЯВ опирается на две группы фактов. Первая из них включает данные о 433 аварийных прорывах радиоактивных продуктов в атмосферу при проведении 824 ПЯВ, которые зафиксированы в период с 1961 по 1992 гг. и опубликованы Департаментом энергии США в 1996 г. в виде официальной сводки [78]. Примечательно, что в сводке не учтены ПЯВ, проведенные до 1961 г. в открытых стволах скважин (сродни атомным взрывам в атмосфере). Аналогичный перечень аварийных ситуаций при проведении ПЯВ в СССР пока не опубликован. Прорывы радиоактивных газов в атмосферу при камуфлетных ПЯВ неоднократно наблюдались на Новоземельском и Семипалатинском полигонах [2]. В [60] упомянуто 42 случая выхода радиоактивных продуктов на по-

верхность при проведении ПЯВ на полигоне Новая Земля. Известны аварийные выбросы радиоактивных газов при проведении ПЯВ "Кратон"-3 и "Кристалл" в Якутии [4, 39] и на других объектах. Неоспоримые факты радиоактивного загрязнения окружающей среды в зонах ранее проведенных ПЯВ признаны и самими специалистами, проводившими взрывы [5]. В [9] показана возможность идентификации следов радиоактивных выпадений от ядерных взрывов на Семипалатинском испытательном полигоне путем использования соотношений активностей осколочных и наведенных в породе радионуклидов в качестве "меток" следа. В современный период для идентификации следов наземных и подземных (с выбросом грунта) ядерных взрывов могут служить долгоживущие продукты нейтронной активации горных пород -  $^{152}$ Eu (период полураспада 13,3 лет),  $^{154}$ Eu (8,6 лет),  $^{60}$ Co (5,3 лет). Именно такие изотопы обнаружены в грунтах в окрестности зоны ПЯВ "Горизонт-4", проведенного в Якутии в 1975 г. в угленосных отложениях на глубине 485 м вблизи подошвы криолитозоны [16, 18, 19].

В методическом отношении факты первой группы важны тем, что подводят к ревизии исходных постулатов теории первичных, т.е. собственно взрывных, процессов при срабатывании заряда ПЯВ [12]. Это касается, в частности, излишне упрощенной схемы развития ядерных реакций, прикидочной оценки формы источника энерговыделения ПЯВ, игнорирования особенностей ударного метаморфизма горных пород и т.д. Не оправдало себя и безоговорочное перенесение схемы развития ПЯВ в горных массивах ядерных полигонов с преобладанием древних кристаллических пород, на ряд других геологических формаций, например, осадочный покров разновозрастных платформ. Ряд противоречий в понимании стадийности и сущности взрывных процессов обнажила недавняя публикация о результатах теоретических и экспериментальных работ 1950-х годов по изучению ПЯВ [7]. Результаты изучения структурных и фильтрационных характеристик массивов горных пород в зонах ПЯВ Семипалатинского полигона, приведенные в [2] убеждают в том, что, полости ПЯВ не могут быть герметичными, поскольку возмущения режима подземных вод под воздействием ПЯВ наблюдаются на расстоянии до 10 км от эпицентра взрыва. Наконец, в [58] военные специалисты взамен устаревшей модели сферического источника энерговыделения ПЯВ (издания до 1997 г.) предложили новую модель, в которой распределение трещин вокруг полости ПЯВ лучше согласуется с данными натурных наблюдений [2] и не обеспечивает целостность и герметичность так называемой остеклованной корки застывшего расплава горных пород, якобы выстилающей стенки полости ПЯВ.

Вторая группа фактов накоплена в результате полевых, промысловых и лабораторных исследований, проведенных в основном в США, России и в Казахстане в зонах ПЯВ, произведенных за пределами полигонов, в первую очередь, на месторождениях нефти и газа. Обобщение картин радиационной обстановки в зонах ПЯВ, полученных в результате исследований, проведенных спустя более 30 лет, позволило установить следующие особенности [12]: 1 - в окрестностях зон ПЯВ сформировались обширные очаги радиоактивного загрязнения недр. земной поверхности и технологического оборудования. На отдельных объектах, на расстояниях, исчисляемых несколькими километрами, эти очаги распространения техногенных радионуклидов, выносимых из полостей ПЯВ, имеют мерцающий во времени и пространстве характер; 2 - выявленная изменчивость этих очагов сопровождается резкими возмущениями режима подземных вод, нефтей и газов, а также криолитозоны; 3 - в окрестностях зон ПЯВ зафиксированы незатухающие с годами геодинамические подвижки недр в виде заметных преобразований рельефа местности, активизации склоновых процессов, микросейсм и землетрясений с магнитудой до 4 - 5, а также трансформации геофизических полей; 4 - аномальный характер геологических процессов в зонах ПЯВ ухудшил структуру запасов месторождений полезных ископаемых, осложнил их разработку, снизил качество добываемой продукции и обострил проблемы социально-экономического и экологического характера. Кроме того, на отдельных промыслах углеводородного сырья выявлены признаки связи опасных медико-биологических явлений с радиоактивным загрязнением зон ПЯВ, а также с другими видами геохимического загрязнения окружающей среды за счет разгрузки на земной поверхности высокоминерализованных подземных вод и газов, тяжелых металлов, ионов хлора, вредных бактерий.

С методической точки зрения вторая группа фактов подтвердила опасения сотрудников экспедиции "ПВ" АН СССР и вошла в противоречие с укоренившимся представлением о безопасности и экономической эффективности ПЯВ. Вновь полученные данные указывали на ошибочность понимания ПЯВ, как практически мгновенного одноактного явления и, главное, убеждали в том, что полости ПЯВ в принципе не могут оставаться герметичными. Вопрос о поведении техногенных радионуклидов за пределами полостей ПЯВ обретал новое звучание и особую актуальность. Возникла необходимость рассматривать каждый ПЯВ как природно-техногенное геологическое явление, которое возбуждается мгновенным выделением ядерной энергии в ограниченном пространстве земной коры и представляет собой сложную цепь событий, разделяемых на две основные стадии: а) первичную (собственно взрывную) - радиационных, плазменных, физико-механических, термических и химических процессов продолжительностью от долей секунд до нескольких минут; б) вторичную (поствзрывную) - релаксационных геолого-геофизических и геохимических процессов длительностью до многих десятилетий и сотен лет. Отсюда следует, что в каждой зоне ПЯВ целесообразно различать термодинамические и кинетические эффекты, соответствующие двум основным стадиям фракционирования радиоактивных изотопов: первичную - относительно детально изученную в предыдущие годы при проведении множества ПЯВ, и вторичную - практически ускользавшую от внимания исследователей.

Для геологической среды зон камуфлетных ПЯВ, в первом приближении, можно выделить три характерные области развития термодинамических и кинетических эффектов фракционирования радиоактивных изотопов, разделяющихся на ряд зон:

Первая - это область повышенной геодинамической активности массива горных пород, зональность которой определяется следующими основными процессами различной длительности: а) прохождение ударных волн ПЯВ, которые сменяет множество афтершоков ПЯВ, не затухающих на протяжении нескольких недель - первых месяцев и охватывают пространство в радиусе до 30 - 70 км. За этим следуют необратимые упруго-пластические, вязкоупруго-дилатансионные или квазиупругие деформации горных пород [2, 58], а также деформации рельефа местности.

Вторая - область парогидротермальной активности недр, разделяемая на зоны: а) чрезвычайно высоких температур, в несколько миллионов градусов в центре ПЯВ; б) испарения и плавления горных пород; в) вскипания подземных вод, а также генерации большого количества разных газов; г) прогрева горных пород. В зависимости от теплопроводности горных пород, их обводнения, климатических условий региона и других факторов парогидротермальная активность в окрестности гипоцентра ПЯВ может сохраняться на протяжении до десятков лет. В условиях сверхвысоких давлений газы находятся в состоянии сжатого флюида, свойства которого значительно ближе к свойствам жидкости, чем к свойствам газа.

Третья - область "промывки" горного массива в зонах ПЯВ подземными водами, нефтями и газами.

Следовательно, каждый ПЯВ приводит к обособлению своеобразной техногенной "живой" геодинамической структуры, которая с резким угловым и азимутальным несогласием наложена на тот или иной природный тектонический элемент земной коры. Поведение радиоактивных изотопов ПЯВ регулируется в таких условиях, с одной стороны, активностью вновь созданной "живой" техногенной структуры недр, а с другой, - динамикой природных эндогенных и экзогенных геологических процессов.

# О МИГРАЦИИ И ФРАКЦИОНИРОВАНИИ РАДИОАК-ТИВНЫХ ИЗОТОПОВ В ЗОНАХ ПЯВ

В данном разделе приводится обобщенная характеристика исходных радиоактивных продуктов ПЯВ, а затем рассматриваются особенности их формирования и поведения в зонах ПЯВ, заряды которых закладывались в соленосных, карбонатных и терригенных отложениях.

Радиоактивные продукты ПЯВ. Состав радиоактивных продуктов ПЯВ определяют материалы ядерного устройства, ядерные реакции взрыва и процессы активации геологической среды. Сложная совокупность динамических процессов взрыва длительностью от миллисекунд до нескольких часов после детонации задает начальный состав и пространственное распределение радионуклидов в зоне ПЯВ в условиях чрезвычайно высоких температур и давлений. Значительная часть образовавшихся радионуклидов в газообразной и парообразной форме остается в полости ПЯВ и её ближайшей окрестности, а затем подвергается изменениям и частично может покидать полость ПЯВ, вовлекаться в миграционные потоки подземных вод и газов, достигать порой земной поверхности и улетучиваться в атмосферу. По мере остывания полости ПЯВ тяжелые радионуклиды, находящиеся в виде соединений с повышенной точкой кипения (<sup>241</sup>Ат или <sup>239</sup>Ри), конденсируются первыми и захватываются расплавом горных пород и материалов ядерного устройства. Более легкие радионуклиды (например, тритий <sup>3</sup>Н) конденсируются позднее в основном во вмещающих породах в окрестности полости ПЯВ. Другие же радионуклиды, такие как РБГ (радиоактивные благородные газы, например, <sup>85</sup>Kr) могут существовать только в виде газов, не подвергающихся конденсации, и удаляться далеко за пределы полости ПЯВ [83]. В целом радиоактивные продукты ПЯВ принято разделять на три основных вида [22, 23, 28, 39, 42, 58, 67, 77, 80, 81]:

1. Остаточное ядерное топливо в виде изотопов <sup>235</sup>U, <sup>239</sup>Pu, <sup>3</sup>H, которые не прореагировали во взрывных устройствах. Коэффициент полезного действия любого ядерного взрыва весьма низок и в зависимости от типа заряда варьирует от долей процента до первых десятков процентов. Поэтому основная доля делящегося материала, представленного указанными изотопами или их смесью, не участвует в процессе деления, а рассеивается при взрыве. На каждую килотонну тротилового эквивалента мощности ПЯВ образуется примерно 37 г продуктов деления - высокоактивных осколков. Через 1 мин после взрыва их активность по гамма-излучению эквивалентна активности 30 тыс. т. радия. Взрыв ядерного заряда мощностью 1 кт образует 2,9·10<sup>23</sup> частиц деления, массовые числа которых находятся в пределах от 72 (цинк) до 166 (диспрозий), а их распределение, как уже отмечено, подчиняется двугорбой кривой Ферми. Большинство продуктов деления представляет собой радиоактивные изотопы более легких элементов. В частности, в образцах керна буровых скважин, вскрывших полости ПЯВ Невадского полигона, содержатся продукты деления <sup>106</sup>Rb, <sup>132</sup>Sb, <sup>137</sup>Cs,  $^{144}$ Се,  $^{155}$ Еu. Обнаружены также продукты активации  $^{54}$ Мп,  $^{60}$ Со,  $^{154}$ Еu [80]. 2. Радионуклиды, которые образуются в конструкционных материалах и горных породах при захвате избыточных нейтронов, освобождаемых при взрыве. При обследовании зон ПЯВ Невадского полигона не случайно удалось подметить связь состава осколков деления с исходным составом вмещающих вулканогенных пород [80].

3. Продукты ПЯВ. образующиеся в результате происходящего иногда при взрыве процесса расщепления легких ядер тепловыми нейтронами с вылетом альфа-частиц или протона. Сюда же могут быть отнесены описанные в [28] синтезированные изотопы, получаемые при ПЯВ в результате специально (n, $\gamma$ ):  ${}^{6}\text{Li}(n,\alpha){}^{3}\text{H};$  ${}^{238}\text{U}(n,\gamma){}^{239}\text{U} \rightarrow {}^{239}\text{Np} \rightarrow$ реакций осуществляемых  $^{232}$ Th(n, $\gamma$ )<sup>233</sup>Th $^{233}$ Pa $^{233}$ U;  $^{238}$ U(n, $\gamma$ )<sup>239</sup>U $^{239}$ Np $^{239}$ Pu;  $^{238}$ U+19n $^{257}$ U $^{-257}$ Fm. Детальная схема протонно-нейтронной системы нуклидов приведена в [51]. Особый интерес представляют результаты исследований специалистов Лос-Аламосской национальной лаборатории США [65], показавших, что при определенных условиях захороненные под землей при подкритических концентрациях плутоний и другие делящиеся материалы, могут достичь критичности, самовозрастание которой может породить так называемый автокаталитический ядерный взрыв.

**ПЯВ** в соленосных отложениях. В СССР и США ПЯВ в соленосных отложениях проводились для создания полостей-хранилищ углеводородов, промышленных стоков, для ликвидации аварийного газового фонтана, сооружения энергетических котлов, для научных и военных экспериментов. Общие закономерности возмущений состояния недр на таких объектах раскрыты в [12] на примерах двух типов ПЯВ: в ядрах соляных куполов Оренбургского, Астраханского нефтегазоконденсатных месторождений (НГКМ) и соляного купола Татум в США, а также в пластах каменной соли Средне-Ботуобинского НГКМ в Якутии и объекта "Гном" в США [73]. Особенности радиоактивного загрязнения почв, поверхностных вод и сельскохозяйственных угодий в зонах ПЯВ Оренбургского НГКМ детально раскрыты в [66]. Сведения о ПЯВ "Факел" мощностью 3,8 кт, который произведен в 1972 г. для ликвидации аварийного газового фонтана на Крестищенском месторождении на Украине, приведены в [39].

Своеобразие исходных радиоактивных продуктов ПЯВ в соленосных отложениях определяют породообразующие минералы этих отложений - галит, сильвин, карналлит (хлористые соединения натрия, калия, магния) и др. При срабатывании заряда ПЯВ основными цепочками формирования радионуклидных изотопов здесь могли оказаться: <sup>22</sup>Na  $\rightarrow$  2,6 лет  $\rightarrow$  <sup>22</sup>Ne (стабильный изотоп); <sup>39</sup>Cl $\rightarrow$ 55,6 мин $\rightarrow$  <sup>39</sup>Ar $\rightarrow$  269 лет $\rightarrow$  <sup>39</sup>K (стабильный изотоп) [51]. Присутствие сульфатов и карбонатов в соленосных породах могло обеспечить такие переходы как: <sup>35</sup>S $\rightarrow$ 

87,5 суток  $\rightarrow$  <sup>35</sup>Cl; <sup>42</sup>Ca  $\rightarrow$  100 тыс. лет  $\rightarrow$  <sup>41</sup>K; <sup>45</sup>Ca  $\rightarrow$  164 сут  $\rightarrow$  <sup>45</sup>Sc и привести к образованию множества радиоактивных частиц с хорошей растворимостью. Наличие оксидов железа и марганца во вмещающих породах и в конструкционных материалах при за-хвате ими тепловых нейтронов могло обусловить появление радиоактивных изотопов <sup>54</sup>Mn (312 суток), <sup>60</sup>Co (5,3 года), <sup>59</sup>Fe (44,5 сут.) и т.п.

В условиях повышенной геодинамической активности недр, возбужденной ПЯВ, особенно при прохождении ударных волн, минералы соленосной толщи в результате динамометаморфизма испытывают фазовые превращения, особенности которых наиболее полно изучены экспериментально на примере галита (NaCl) [56]. В кристаллической решетке этого минерала в нормальных условиях каждый ион Na+ окружен шестью ионами Cl-, а каждый Cl-, в свою очередь, - шестью ионами Na+. Таким образом, структура NaCl характеризуется шестерной координацией катионов и анионов, которые попеременно располагаются в вершинах кубов и образуют гранецентрированную кубическую решетку. Под воздействием ударной волны эта структура может переходить в новую фазу с координационным числом 8. приобретая плотность на 6%, превышающую плотность при исходной фазе. В статических условиях давление фазового перехода в NaCl составляет 29 ГПа. Этот переход при воздействии ударной волны ПЯВ фиксируется при несколько меньших давлениях (24 - 27 ГПа) и по мере нарастания скорости ударной волны может насчитывать пять фаз: I - исходная фаза; II - смесь исходной фазы и плотной фазы NaCl; III - область сосуществования высокоплотной фазы с координационным числом 8 (типа CsCl); IV - смесь жидкой и твердой фаз; V - жидкость. Превращение галита в жидкость происходит при скорости ударной волны более 10 км/с, что соответствует давлению 130 ГПа. С учетом процессов испарения, диссоциации и ионизации каменной соли расчетным путем показано, что ударная адиабата пересекает границы двухфазных состояний «кристаллическая фаза – расплав» в точках (5,3·10<sup>4</sup> МПа, 3480° К) и (7,8·10<sup>4</sup> МПа, 3700° К) [20].

Помимо ударных волн поведение радиоактивных продуктов ПЯВ в соленосных отложениях определяется также такими поствзрывными геодинамическими подвижками, как откольные явления, обрушения свода полости ПЯВ, афтершоки, необратимые деформации и сокращение объема полости ПЯВ, просадка земной поверхности. Такие подвижки отчетливо проявились в зонах 15 ПЯВ Астраханского НГКМ, а также на Оренбургском и Средне-Ботуобинском НГКМ [11, 12, 13]. Парогидротермальная активность рассматриваемых зон ПЯВ отличается тем, что соленосные отложения являются мощным источником паров летучих элементов. Эти отложения изначально насыщены природными газами - сероводородом, гелием, водородом, азотом и др., и, кроме того, легко испаряются в условиях чрезвычайно высоких температур, создаваемых ПЯВ. Процесс испарения каменной соли начинается при давлении 65 ГПа, а полное её испарение происходит при давлении 370 ГПа [20]. Наряду с этим активизируются тепловые эффекты возгонки соединений серы и перехода хлора, а возможно и ряда других элементов, в газообразное состояние. По ходу плавления и прогрева горных пород и минералов соленосных формаций (карналлита, гипса, ангидрита и др.) из микровключений на 1 кг породы в сумме выделяется от 25 до 115 см<sup>3</sup> газов в виде водорода, диоксида углерода, азота, метана и др. [34]. Пики выделения водорода приходятся на 500°С, а диоксида углерода и азота - на 800°С. Проведенные расчеты показывают, что объем газогенерации каменной соли в окрестностях полостей ПЯВ может варьировать от единиц до десятков и даже сотен млн. м<sup>3</sup> (что соизмеримо с работой на полную мощность скважины, добывающей газ на протяжении от суток до трех-четырех месяцев). В зависимости от цели взрывных работ полости ПЯВ могут оставаться нетронутыми или вскрываться скважинами через несколько дней или недель, когда произойдет распад короткоживущих радионуклидов. При подготовке этих полостей к эксплуатации в качестве подземных хранилищ углеводородного сырья такое вскрытие неизбежно и сопровождается стравливанием в атмосферу струй радиоактивных газов с более долгоживущими изотопами.

Таким образом, в соленосных толщах пород наряду с дроблением горных пород каждый ПЯВ является мощным источником радиоактивных газообразных флюидов, даже в том случае, если срабатывание ядерного устройства не сопровождалось аварийным прорывом струй радиоактивных газов в атмосферу. Так, в зонах безаварийных ПЯВ на объекте "Лира", который объединяет 6 зон ПЯВ в соляных куполах Карачаганакского НГКМ в Казахстане, геохимическая съемка выявила на поверхности и в почвах следы прорыва газообразного хлора [40] и возгонки ртути [48, 49]. На аварийном упомянутом выше ПЯВ "Гном" на поверхности и в грунтах выявлены значимые концентрации <sup>238</sup>Pu, <sup>239+240</sup>Pu, <sup>241</sup>Am и других радионуклидов [73].

На ряде примеров [11, 12, 13] показано, что возмущения режима подземных вод и газов, характерные для зон ПЯВ в соленосных отложениях, обеспечивают миграцию радиоактивных продуктов ПЯВ за относительно короткое время в обозримые несколько лет на довольно значительные расстояния, исчисляемые сотнями метров и километрами. Однако следует признать, что добротный мониторинг такой миграции все еще не налажен ни в России, ни в Казахстане, ни в США.

Вопрос об устойчивости и механизмах обводнения полостей ПЯВ в соленосных формациях важен в связи с тем, что напрямую затрагивает проблему захоронения радиоактивных отходов. Точка зрения, что такие формации наиболее надежны для захоронения радиоактивных отходов, была сформулирована Национальной Академией США в 1946 г. и затем получила всеобщее признание. Опыт создания и эксплуатации полостей ПЯВ в соленосных отложениях наиболее достоверно послужил проверке этой идеи и показал ее ошибочной по двум основным причинам. Первая из них. достаточно детально охарактеризованная в предыдущих работах авторов, связана с тем, что ряд созданных хранилищ подвергся интенсивным деформациям и обводнению. Наиболее показательна в этом отношении ситуация на Астраханском НГКМ на объекте "Вега". Здесь в 1986 г., всего через два года после завершения ПЯВ все 15 полостей практически одновременно сократились в объеме, обводнились, и из них под большим давлением стал отжиматься к дневной поверхности рассол, содержащий повышенные концентрации радионуклидов - остаточных продуктов ПЯВ. Аналогичная ситуация, хотя и меньшего масштаба, отмечена на Совхозном и Карачаганакском НГКМ [11, 12, 13].

Вторая причина связана с успехами в познании реологических свойств каменной соли в условиях нарастающих нагрузок и увлажнения. Эксперименты, проведенные на кафедре коллоидной химии Химического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова В.Ю. Траскиным и З.Н. Скворцовой, убеждают в том, что даже при незначительном увлажнении межзеренных прослоек толщиной не более десятых долей мкм, эффективная вязкость каменной соли снижается на девять-десять порядков [53, 55]. В связи с этим В.Ю. Траскиным и З.Н.Скворцовой при участии Б.Н. Голубова проведены эксперименты по изучению совместного воздействия радиационных повреждений и увлажнения на реологические свойства образцов каменной соли. Образцы подвергались облучению на рентгеновской установке, дозы поглощения составляли 180, 720 и 1440 Гр. Испытанию подвергались, во-первых, искусственные поликристаллы галита и сильвинита, во-вторых,- образцы каменной соли Оренбургского НГКМ из скважины 1П-1 (интервал отбора керна 914 - 917 м), поликристаллы галита и сильвинита Березниковского месторождения в Пермской области. Результаты экспериментов приведены на рисунках 1 - 4.

Как видно из рисунка 1, коэффициент поглощения радиационного облучения кристалла галита достигает максимума при длине волны, равной 460 -480 нм. В результате радиационных повреждений кристаллы галита приобретают неоднородное строение; в них возникают центры окраски (F-центры). При отжиге облученных кристаллов F-центры коагулируют с образованием частиц коллоидного натрия. Сравнение ползучести необлученных и облученных монокристаллов галита в контакте с рассолом приведено на рисунке 2.


Рисунок 1. Спектры поглощения окрашенных кристаллов NaCl



Рисунок 2. Ползучесть, определенная для монокристаллов NaCl в контакте с рассолом при нагрузке: а –285g; б -1440 g

Из рисунка 2 видно, что, при одной и той же нагрузке облученные кристаллы обладают гораздо большей ползучестью по сравнению с необлученными кристаллами, содержащими коллоидный натрий. Увеличение нагрузки приводит к росту ползучести всех без исключения кристаллов. Однако, скорость изменения ползучести более высокая у облученных кристаллов. На рисунке 3 показаны особенности деформации облученных поликристаллов в присутствии их собственных насыщенных водных растворов.

Видно, что деформация более интенсивна по мере нарастания дозы облучения, что отвечает снижению вязкости, рассчитанной на стадии установившейся ползучести кристалла. Резкие изменения реологических и прочностных свойств природных солей Оренбургского НГКМ под действием облучения показаны на рисунке 4.

Совместное воздействие радиационных повреждений и увлажнения приводит к неизбежному ускорению деформации соленосных пород и ослаблению их прочности. Аналогичный вывод дан в [52], где приведены результаты изучения радиационных дефектов в γ-облученном галите, проводившегося в связи с проблемой захоронения радиоактивных отходов в соленосных формациях.



Рисунок 3. Деформация искусственных поликристаллов NaCl и KCl при одноосном сжатии



Рисунок 4. Влияние облучения на ползучесть смоченных образцов каменной соли Оренбургского НГКМ (доза 180 Гр)

Являются ли герметичными полости ПЯВ, созданные в соленосных отложениях? До недавних пор ответ на этот вопрос был утвердительным и базировался на предположении о том, что каменная соль благодаря однородности, низкой проницаемости и повышенной текучести может заполнять поствзрывные трещины и разрывы, обеспечивая устойчивость и герметичность образовавшихся полостей. Вновь полученные данные позволяют утверждать, что это основное предположение является ошибочным. Так, в [66] приведено распределение <sup>137</sup>Сs в почвах, поверхностных водах и растительности двух зон ПЯВ на Оренбургскмо НГКМ, которое хорошо согласуется с картиной обводнения зон ПЯВ и всего Оренбургского НГКМ, динамика которого приведена [12]. Такое соответствие отражает взаимную обусловленность геодинамических подвижек и возмущений флюидодинамического режима массива горных пород в зонах ПЯВ из-за несовершенства боевых и соседних скважин, формирования путей миграции радионуклидов в обход этих скважин, индуцирующих вынос с напорными подземными водами и газами радиоактивных продуктов ПЯВ на поверхность.

**ПЯВ є карбонатных отложениях.** Такие ПЯВ применялись в СССР, во-первых, для стимуляции притоков нефти, как на месторождениях Грачевском в Башкирии (объект "Бутан", 5 ПЯВ в 1965 - 1980 гг. мощностью 2,5 – 7,6 кт), Осинском в Пермской области (объект "Грифон", 2 ПЯВ в 1969 г. мощностью по 7,6 кт), Гежском в Пермской области (объект "Грифон", 2 ПЯВ в 1969 г. мощностью по 7,6 кт), Гежском в Пермской области (объект "Гелий", 5 ПЯВ в 1981 - 1987 гг. мощностью по 3,2 кт); во-вторых, - для стимуляции притоков газа, как на Средне-Ботуобинском НГКМ в Якутии (объекты "Ока", "Вятка", "Ока", "Шексна", "Нева", 6 ПЯВ в 1976-1987 гг. мощностью по 15 кт); в-третьих, - для гидротехнических целей, как в связи с освоением алмазоносной кимберлитовой трубки "Удачная" в Якутии (термоядерный ПЯВ "Кристалл" в 1974 г. мощностью 1,7 кт).

Особенности применения ПЯВ-технологий при освоении карбонатных коллекторов месторождений углеводородов охарактеризованы в [39, 46]. Результаты обследования зон ПЯВ, проведенных, начиная с 90-х годов минувшего столетия, на всех этих месторождениях (кроме Грачевского) отражены в [12, 15, 38, 44, 45, 57, 72]. Результаты изучения последствий ПЯВ "Кристалл" раскрыты в [4, 26, 38, 16, 17, 18]. Карбонатные отложения всех этих объектов, хотя и относятся к разным генетическим типам, сложены одними и теми же важнейшими породообразующими минералами групп кальцита, арагонита и доломита и содержат обычно примесь глинистого, кремнистого материала, оксилов железа, органического вещества. Это минералы - кальцит (СаСОз), магнезит ((Mg, Fe)[CO3]), арагонит (CaCO3), стронцианит (Sr[CO3]), доломит (CaMg(CO3)2, анкерит (Ca(Mg, Fe [CO3]2) и др. В момент подрыва ядерного заряда вблизи места его заложения, карбонатные отложения превращаются в источник множества радиоактивных легко растворимых карбонатных частиц. Термическое разложение карбонатных пород ведет к генерации огромных объемов СО<sub>2</sub> и других газов. Чрезвычайно высокие температуры, возникающие в момент ПЯВ, могут превращать эти отложения в расплав, при остывании которого возникает порода, сходная по своему облику с карбонатитами магматического происхождения. Следует признать, что в керне единичных скважин, вскрывших полости ПЯВ (например, на Гежском месторождении), следы такого расплава не обнаружены, что могло быть связано с неточностью проходки скважин и недостатками технологии отбора керна. Не исключено, что расплав "карбонатитов" все же возникал. Более того, он мог порождать процессы контактового метаморфизма и метасоматоза, подобно тому, как это происходит при формировании скарнов на контакте карбонатных пород с интрузиями магматического расплава. В области воздействия ударных волн ПЯВ и активизации его афтершоков карбонатные породы на достаточно большом удалении от полости ПЯВ подвергаются дроблению и растрескиванию, что создает благоприятные предпосылки для проникновения в эту область подземных вод и активизации парогидротермальной деятельности. Это сопровождается созданием жил радиоактивного материала ПЯВ во вмещающих породах, а также развитием процессов окремнения, отложения оксидов железа, марганца и т.д., что, несомненно, отражается на химизме подземных вод и особенностях миграции радионуклидов. Особого внимания заслуживает тот факт, что все зоны ПЯВ в карбонатных отложениях подвержены обводнению. И хотя механизмы такого обводнения на разных объектах могут быть разными, итог оказывается общим: полости ПЯВ либо заполнены, либо вот-вот будут заполнены подземными водами. Так, на Осинском нефтяном месторождении, где заряды были расположены в водонасыщенном пласте, такое опасное явление возникло вскоре после проведения ПЯВ [15]. На Гежском месторождении фронт продвижения подземных вод медленно, на протяжении более десяти лет, но неизменно приближается к пяти полостям ПЯВ. На возможное их затопление указывают: а) повышенная

трещиноватость массива горных пород; б) падение пластовых давлений по мере срабатывания нефтяной залежи и подтягивание к ней подошвенных вод; в) отклонения в технологической схеме разработки залежи (отказ от закачки в залежь газа с соседнего промысла для поддержания в ней начального давления). Характерно, что в зонах ПЯВ двух обсуждаемых месторождений почвенный воздух почти целиком состоит из криптона-85 [57]. Это согласуется с фактом радиоактивного загрязнения местности, технологического оборудования и добываемой продукции на Осинском промысле изотопами <sup>137</sup>Cs, трития и др. [15, 72]. Не исключено, что и на Гежском месторождении радиоактивные продукты ПЯВ также неуклонно приближаются к дневной поверхности по затрубному пространству скважин, разломам и зонам повышенной трещиноватости не только со струями газов (как криптон-85), но и с восходящими потоками подземных вод. Разница во времени проявления радиоактивного загрязнении местности на двух этих промыслах, может быть обусловлена тем, что на Осинском месторождении ПЯВ проведены несколько раньше, в 1969 г., и на меньших глубинах (1208 – 1212 м) по сравнению с Гежским месторождением (1981 -1987 гг.; 2015 - 2075 м). Таким образом, в обозримой перспективе работники Гежского промысла и население соседнего города Красновишерска могут столкнуться с заметным ухудшением радиационной обстановки, что, несомненно, требует упреждающих защитных мер. Однако, добротный гидрогеологический и радиохимический мониторинг зон ПЯВ на этом промысле до сих не налажен.

На Средне-Ботуобинском НГКМ угрозу обводнения семи полостей ПЯВ создает нисходящий поток подземных вод, температура которых несколько лет тому назад повысилась на несколько градусов. Этот поток стал омывать разогретое пространство зон ПЯВ. Ниже полостей ПЯВ в геологическом разрезе залегает слой песчаников ботуобинского горизонта, к которому приурочена основная нефтяная залежь месторождения. Если нисходящий поток подземных вод окажется загрязненным радиоактивными продуктами ПЯВ, достигнет этого горизонта и загрязнит нефтяную залежь, то радиационная опасность промысла станет неизбежной.

Радионуклиды ПЯВ "Кристал" стали поступать в алмазодобывающий карьер "Удачный" по причине того, что дно карьера, по мере его разработки, начиная с 1983 г., оказалось намного ниже полости ПЯВ, которая к этому времени была уже обводнена. Поток подземных вод, движущийся со стороны зоны ПЯВ "Кристалл", устремился в карьер. Дренажные работы по осушению карьера привели к образованию обширной воронки депрессии, которая еще более усилила эффект поступления радионуклидов из полости ПЯВ. Радиоактивному загрязнению карьера, кроме того, способствуют ускоренная деградация криолитозоны в бортах карьера, а также интенсивные геодинамические подвижки массива горных пород.

Одним из факторов активизации подвижек в недрах с рассматриваемыми зонами ПЯВ может являться своеобразное поведение минералов карбонатных пород в условиях их нагрева и отжига. Так, эксперименты с использованием рентгеновского и нейтронного методов структурного анализа показали, что при нагреве кальцита от 20 до 500°С в некоторых его кристаллографических направлениях возникают внутренние напряжения, обусловленные анизотропией среды и тензорной природой коэффициента теплового расширения, величина которых сопоставима с пределом прочности материала [31]. Наряду с этим экспериментально установлено, что отжиг доломита при определенных температурах и времени отжига (рисунок 5), может приводить не к снятию напряжений, а напротив, сопровождаться увеличением остаточных внутренних напряжений кристаллической структуры [54].



Ось абсцисс - температура Т<sup>0</sup>С. Ось ординат: а - величина микронапряжений Δd/d; б - средний линейный размер субзерна в направлении нормали к отражающей плоскости, L

Рисунок 5. Температурная зависимость характеристик доломита

Представляется, что этот эффект является следствием анизотропии теплового расширения: каждый индивид, окруженный соседями, лишен возможности свободно изменять свои размеры в соответствующих кристаллографических направлениях. Относительное увеличение размеров субзерен доломита может быть ответной реакцией минерального агрегата на деформацию и изгиб кристаллической решетки. Результаты приведенных экспериментов убеждают, что и нагревание, и остывание карбонатных горных пород в зоне ПЯВ должно индуцировать геодинамические подвижки массива горных пород, что, в свою очередь, неизбежно влечет возмущения режима подземных вод и газов, а также условий миграции и фракционирования радионуклидов ПЯВ.

**ПЯВ в угленосных отложениях**. ПЯВ в угленосных породах проводились в СССР в донецкой шахте "Юнком" на глубине 903 м (ПЯВ "Кливаж", 16.09.1979 г., мощность 0,3 кт), в толще нижнемеловых угленосных отложений Кряжа Чекановского на севере Якутии (ПЯВ "Горизонт-4"; 12.08.1975 г.; 7,6 кт), а также в угленосных отложениях на Семипалатинском испытательном полигоне.

Угленосные формации, развитые в Донбассе, на Кряже Чекановского и в районе Семипалатинского полигона, несмотря на разный возраст и другие отличия, представлены сложным полифациальным набором осадочных пород, в котором пласты каменного угля переслаиваются с обломочными и карбонатными отложениями. Формации имеют ритмичное строение, связанное с чередованием условий осадконакопления (сменой ландшафтно-климатических обстановок, режима тектонических движений, активности проявлений вулканизма и др.). Сходность геологических разрезов в рассматриваемых районах в том, что породы дислоцированы, смяты в складки, осложнены разломами, множеством трещин и, что особо важно, обводнены. Подземные пластово-трещинные воды сосредоточены в водоносных горизонтах песчаников, в трещиноватых коллекторах каменного угля и карбонатных пород, а также, не исключено, в погребенных карстовых формах, которые при определенных условиях могли образоваться в известняках. На Кряже Чекановского, где в разрезе угленосных отложений преобладают терригенные породы, заряд ПЯВ "Горизонт-4" был заложен вблизи подошвы криолитозоны. Ископаемые угли обычно содержат десятки элементов, многие из которых имеют концентрации в 10 - 1000 раз превышающие фоновые. Поэтому в залежах угля и смежных неугленосных слоях зачастую наблюдаются разные виды оруденения. В частности, это - скопления или повышенные концентрации урана и тория, связанные с особенностями накопления в угленосных толщах органического вещества и Сорг [21]. Интересно, что сравнительно недавно в аморфном угле открыты зародыши кристаллического графита (кристаллиты), подчеркивающие сходство углей с полимерами [35].

Важнейшая особенность угленосных толщ - содержание в них повышенных объемов метана и других газов. Метан, находящийся в угле в разных состояниях: адсорбированном, абсорбированном и свободном, - может быть связан с магматической деятельностью, поступать из соседних залежей нефтегазовых и угольных месторождений или иметь бактериальную природу. Прецизионные исследования структуры углей показали, что при нагружении высокодисперсного угля в метановой среде протекает самопроизвольное "взрывное" его разрушение, которое возникает через 4 – 5 мин после снятия внешней нагрузки (200 МПа). В [35] показано, что супермилонитовый уголь выбросоопасных пластов способен быстро растворять метан практически всем объемом, при этом происходит персорбция - перенасыщение угля метаном. Здесь же дано описание газового коллапса в метаноносных углях, возникающего при нарастании механических нагрузок и разрушении углей: образование сети микротрещин, отделений, переориентировки и уплотнения микроблоков, образование их новых границ. Изменение конфигурации и объемов пор приводит в итоге к увеличению зон пластичности, зон скольжения, диффузии метана через уголь, его набуханию, формированию новых пустот и т.д. Таким образом, явление газового коллапса ведет к активизации геодинамических подвижек массива горных пород. Наконец, в пластах каменного угля нередко возникают подземные пожары, которые продолжаются до тех пор, пока не истощится тлеющий пласт (месяцы, годы, столетия и даже тысячелетия). Самый старый из пожаров наблюдается на Горящей горе в Австралии, где длительность горения угля оценивается в 6000 лет.

С позиций физики ПЯВ можно предвидеть, что каждый ПЯВ в угленосной толще газонасыщенных и обводненных пород должен порождать сложнейшую цепочку газодинамических, тепловых и геодинамических процессов, в которую неизбежно вовлекаются исходные радионуклиды ПЯВ. Цельная картина все этих процессов пока не изучена, отдельные её фрагменты просматриваются в трех перечисленных зонах ПЯВ.

Сведения об изменчивости и современном состоянии недр в зоне ПЯВ "Кливаж" на украинской шахте "Юнком" авторам пока недоступны. На основании официальной справки администрации шахты "Юнком" в г. Енакиево Донецкой области известно только, что основная цель ПЯВ "Кливаж" – предотвратить внезапные выбросы угля и газа, - не достигнута. В [39] утверждается, что Министерство угольной промышленности СССР положительно оценило в 1979 г. результаты опыта "Кливаж" и намечало второй подобный взрыв на шахте им. Румянцева вблизи г. Горловка Донецкой области. В конце 70-х годов проект применения ПЯВ-технологии для решения проблемы аварийности на угольных шахтах базировался на представлении о том, что с помощью ударной волны относительно слабого ПЯВ можно раскрыть зарождающиеся в породе трещины, уравнять напряжения и избежать внезапные выбросы угольной пыли и газа. Подтверждающим примером для избранной технологии тогда служили шахты Сахалина, где отсутствие выбросов связывалось с повышенной частотой землетрясений в этом регионе. Новое, более глубокое понимание структуры каменных углей и поведения в них метана [35] позволяет объяснить причину того, почему ПЯВ, "Кливаж" не достиг цели предотвращения внезапных выбросов угля и газа - скорее всего, он вызвал явление газового коллапса и другие опасные процессы, свойственные угленосным толщам.

В рамках новых сведений о каменном угле находит объяснение принципиальное сходство провалов земной поверхности в зоне ПЯВ "Горизонт-4" на Кряже Чекановского в Якутии и в зоне ПЯВ "Скважина "Глубокая"" на Семипалатинском полигоне, подмеченное в [16, 18, 19]. Несмотря на то, что эти ПЯВ имели разные характеристики и проводились в разных климатических условиях, их объединяет то, что оба ПЯВ могли обусловить подземное горение угольных пластов. Только в Якутии, в силу сурового северного климата, этот подземный пожар, скорее всего, уже прекратился, а на Семипалатинском полигоне есть вероятность того, что он еще продолжается. Кроме того, на Семипалатинском полигоне, судя по характеру периодически появляющейся здесь тепловой аномалии [8, 36], этот подземный пожар охватывает более обширные пространства по сравнению с тем, что происходило (а возможно, все еще продолжается) в зоне ПЯВ "Горизонт-4" в Якутии. ПЯВ "Горизонт-4" явился источником радиоактивного загрязнения местности техногенными долгоживущими гамма-излучающими радионуклидами двух типов: а) продуктов деления, нейтронной активации конструкции и заряда (возможно, и остатков плутониевого заряда); б) продуктов нейтронной активации горных пород и грунтов в эпицентре ПЯВ. Однако, механизм такого загрязнения до сих пор остается не вполне ясным. Связано ли это с аварийным выбросом радионуклидов в момент ПЯВ или же эти

радионуклиды были выброшены на земную поверхность гораздо позже, когда подземное горение угля набрало свою силу, - для решения этого вопроса требуются дополнительные исследования.

#### Заключение

Проблема оценки и устранения опасных последствий ПЯВ особо актуальна не только и не столько для военных испытательных ядерных полигонов, сколько для месторождений полезных ископаемых, которые осваивались с применением ПЯВ-технологий. С академической точки зрения, проблема влияния техногенной деятельности на радиационную обстановку недр нашей планеты, несомненно, наиболее отчетливо раскрывается на примере военных ядерных полигонов, которые стали объектом детальных разноплановых научных исследований. Однако, недооценка довольно своеобразных геолого-радиохимических явлений в ряде других зон ПЯВ за пределами ядерных испытательных полигонов, в условиях иного геологического строения и состояния недр привела к тому, что до сих пор в полной мере не раскрыта картина термодинамических и кинетических эффектов фракционирования радионуклидов ПЯВ. С этим связана явная беспомощность служб радиационной безопасности на таких объектах: службы все еще выступают в роли регистраторов свершившихся опасных событий и не обладают добротной методикой научного прогноза процессов миграции радиоактивных продуктов ПЯВ ни на месторождениях углеводородного сырья, ни на алмазодобывающем карьере "Удачный", ни в зонах других ПЯВ.

В данной статье также нет пока решения этой задачи. Авторами предпринята попытка наметить общую схему многообразия форм поведения радионуклидов в зонах ПЯВ в течение длительного времени в зависимости от сочетания природных и техногенных факторов геодинамической активности недр, а также разнообразия режима подземных вод, нефтей и газов. Как такое поведение отражается на термодинамических и кинетических эффектах фракционирования радионуклидов – неотложная задача дальнейших исследований.

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1. Адамский, В.Б. Еще раз о применимости ядерно-взрывных технологий. / В.Б. Адамский // Природа. 1993. № 4. С. 45-47.
- 2. Адушкин, В.В. Подземные взрывы / В.В. Адушкин, А.А. Спивак // М.: Наука, 2007. 579 с.
- 3. Атомные взрывы в мирных целях. Сб. статей. Ред. И.Д. Морохов. М.: Атомиздат, 1970. 124 с.
- Бурцев, И.С. Радиационная обстановка в алмазоносных районах Якутии / И.С. Бурцев, Е.Н. Колодезникова // Препринт. Якутск: ЯНЦ СО РАН, 1997. - 52 с.
- Бушуев, А.В. Исследование содержания плутония и 241Ат в почве районов проведения мирных ядерных взрывов γрентгенометрическим методом / А.В. Бушуев [и др.] // Атомная энергия, 2000. – Т. 88, вып. 1. – с.?.
- 6. Васильев, А.П. Подземные ядерные взрывы для улучшения экологической обстановки / А.П. Васильев, Н.К. Приходько, В.А. Симоненко // Природа, 1991. № 2 С. 36-42.
- Вахрамеев, Ю.С. Некоторые вопросы физики взрыва и кумуляции / Ю.С. Вахрамеев // Сборник статей. Снежинск, 1997. – 174 с.

- Великанов, А.Е. К вопросу о радиоактивной и газообразной сущности периодически появляющейся региональной тепловой аномалии в районе Семипалатинского испытательного полигона / А.Е. Великанов // Вестник НЯЦ РК, 2007. – Вып. 2. – С. 72–79.
- Ветров, В.А. Оценка выходов продуктов активации горных пород при реконструкции функций источника подземных ядерных взрывов / В.А. Ветров // Труды Междунар. конф. "Семипалатинский испытательный полигон. Радиационное наследие и проблемы нераспространения". 7 – 9 октября 2003 г. Курчатов. Компакт-диск.
- 10. Гарбер, Р.Н. Рост и растворение пор в кристаллах / Р.Н. Гарбер, В.С. Коган, Л.М. Поляков // Журнал экспериментальной и теоретической физики, 1958. Т. 35. Вып. 6(12) С. 1364–1368.
- Геворкян, С. Г. О деформациях полостей подземных ядерных взрывов в районе Астраханского газоконденсатного месторождения / С. Г. Геворкян Б.Н. Голубов // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология, 1998 – 2. – С. 17-37.
- 12. Голубов, Б.Н. Проблема ревизии Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний и возобновления мирных подземных ядерных взрывов / Б.Н. Голубов // Вестник НЯЦ РК, 2005. Вып. 2(22) С. 5–27.
- 13. Голубов, Б.Н. Однажды в Америке решили, что от ядерных взрывов в газодобыче вреда больше, чем пользы / Б.Н. Голубов // Нефть России, 2004. № 1, 2 С. 80–83, 84–87.
- 14. Голубов, Б.Н. Последствия техногенной дестабилизации недр Астраханского газоконденсатного месторождения в зоне подземных ядерных взрывов / Голубов Б.Н. // Геоэкология, 1994. № 4 С. 25-42.
- 15. Голубов, Б.Н. Проблема оценки и устранения опасных последствий подземных ядерных взрывов на нефтяных и газовых месторождениях России (на примере Осинского месторождения) Оценка воздействия на окружающую среду предприятий нефтегазового комплекса / Б.Н. Голубов / Научно-техническое обществонефтяников и газовиков им. Акад. И.М. Губкина. Сб. докладов и сообщений на конференции, Туапсе, 30 сентября -5 октября 2001 г. // М. 2002 С.62–93.
- 16. Голубов, Б.Н. Геодинамичекие факторы загрязнения алмазодобывающего карьера "Удачный" продуктами подземного термоядерного взрыва (ПЯВ) "Кристалл" / Б.Н. Голубов [и др.] / Междунар. Конф. "Радиоактивность после ядерных взрывов и аварий". Москва, 5-6 декабря 2005 г. Тезисы докладов // С-Пб. Гидрометеоиздат, 2005. – I-36.
- 17. Голубов, Б.Н. Миграция радионуклидов из полости подземного термоядерного взрыва "Кристалл" в алмазодобывающий карьер "Удачный" / Б.Н. Голубов, Ю.А. Сапожников, А.В. Горальчук / Материалы II Республиканской научно-практической конференции "Радиационная безопасность Республики Саха (Якутия)". Якутск 16-18 декабря 2003 г. // Изд-во СО РАН. Якутск, 2004. С. 182-193.
- 18. Голубов, Б.Н. Обследование радиоэкологической обстановки в месте проведения подземного ядерного взрыва (ПЯВ) "Горизонт-4" (Булунский улус) / Б.Н. Голубов, Ю.А. Сапожников, В.Е. Ушницкий // Отчет о результатах НИР по трудовому договору №6 от 15.06.2005 г. с ГУ "Республиканская агрохимическая проектно-изыскательская станция Министерства сельского хозяйства Республики Саха (Якутия)".
- Голубов, Б.Н. Новые данные о радиационных и длительных геодинамических последствиях подземного ядерного взрыва "Горизонт-4" (Кряж Чекановского, Якутия) / Б.Н. Голубов, В.Е. Ушницкий // Вестник НЯЦ РК, 2008. – Вып. 1. – С. 33–43.
- 20. Замышляев, Б.В. Модели динамического деформирования и разрушения грунтовых сред / Б.В. Замышляев, Л.С. Евтерев // М.: Наука, 1990. 215 с.
- 21. Иванов, В.В. Экологическая геохимия элементов: Справочник в 6 кн. Ред. Э.К. Буренкова / В.В. Иванов // М.: Экология, 1997. Книга 6: Редкие f-элементы. 607 с.
- 22. Израэль, Ю.А. Радиоактивные выпадения после ядерных взрывов и аварий / Ю.А. Израэль // С-Пб.: "Прогресс-погода", 1996. 356 с.
- 23. Израэль, Ю.А. Мирные ядерные взрывы и окружающая среда / Ю.А. Израэль // Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 135 с.
- Кедровский, О.Л. Применение камуфлетных ядерных взрывов для создания подземных емкостей и опыт их эксплуатации при хранении газового конденсата / О.Л. Кедровский [и др.] // Reprint from "Peaceful Nuclear Explosions 1V" International Atomic Energy Agency. Vienna, 1975. – IAEA-TC-1-4/13. – Р. 227-256.
- 25. Киреев, В.В. Групповой экскавационный ядерный взрыв в аллювиальных породах / В.В. Киреев [и др.] // Peaceful Nuclear Explosions IV. International Atomic Energy Agency. Vienna, 1975. Р. 399-419.
- 26. Киселев, В.В. Ликвидация последствий аварийных подземных ядерных взрыво в зоне многолетнее мерзлоты / . В.В. Киселев, И.С. Бурцев // Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 1999. –148 с.
- 27. Копухин, В.П. Ядерные технологии и экосфера / В.П. Копухин, В.Н. Комлев // Апатиты, 1995. 340 с.
- 28. Кривохатский, А.С. Радиохимия ядерных взрывов / А.С. Кривохатский // Радиохимия, 1982. Т.24. Вып. 3. С. 277 286.
- 29. Кривохатский, А.С. Проблема радиоактивных отходов / А.С. Кривохатский // Природа, 1989. № 5 С. 50–60.
- Кривохатский, А.С. Радиационная безопасность при технических ядерных взрывах / А.С. Кривохатский, В.И. Кацапов // М.: Атомиздат, 1971. – 48 с.
- 31. Левин, Д.М. Исследование физико-механических свойств поликристаллического кальцита при повышенных температурах и давлениях для выработки критериев риска хранения отходов на больших глубинах / Д.М. Левин Никитин А.Н. // Известия Тульского гос. ун-та. Серия Физика, 2006. – Вып. 6. – С. 88–95.
- 32. Лейпунский, О.И. Гамма-излучение атомного взрыва / О.И. Лейпунский // М.: Атомиздат, 1959. 154 с.
- 33. Литовкин, В. Ядерный взрыв под грифом "секретно" / В. Литовкин // Известия, 1997. № 83 (24936). с. 5.
- Мазина, Т.И. Выделение газов при нагревании горных пород / Т.И. Мазина, Ю.И. Силин А.Я. Крылов // Радиевый ин-т им. В. Г. Хлопина. Препринт РИ - 130. Л. 1980. – 13 с.
- 35. Малышев, Ю.Н. Фундаментально прикладные методы решения проблемы метана угольных пластов / Ю.Н. Малышев, К.Н. Трубецкой, А.Т. Айруни // М.: Изд-во Академии горных наук, 2000. 519 с.

- 36. Мелентьев, М.И. О природе региональной тепловой аномалии в районе Семипалатинского испытательного полигона, выявленной по данным дистанционного космического зондирования / М.И. Мелентьев, А.Е. Великанов // Геофизика и проблемы нераспространения. Вестник НЯЦ РК, 2003. – Вып. 2. – С. 89-93.
- Методика расчета загрязнения атмосферы аварийными выбросами нестабильного конденсата. РАО "Газпром". М.: 1993. - 70 с.
- Микуленко, К.И. Геолого-географические условия проведения и последствия подземных ядерных взрывов на территории Республики Саха (Якутия) / К.И. Микуленко, А.И. Чомчоев, С.П. Готовцев // Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2006. – 196 с.
- 39. Мирные ядерные взрывы: обеспечение общей и радиационной безопасности при их проведении./ Кол. авторов под рук. проф. В.А. Логачева М.: Изд.АТ, 2001. 519 с.
- Мурзадилов, Т.Д. Об одной методике расчета выделения газообразного хлора в сухих ядерных полостях под воздействием остаточного радиоактивного излучения продуктов взрыва / Т.Д. Мурзадилов [и др.] // Вестник НЯЦ РК, 2001. – Вып.2. Геофизика и проблемы нераспространения. – С. 137 – 143.
- 41. Мусинов, В.И. Добыча нефти и газа с помощью ядерных взрывов / В.И. Мусинов // Природа, 1991. № 11. С. 25 33.
- 42. Нифонтов, Б.И. Подземные ядерные взрывы / Б.И. Нифонтов [и др.] // М.: Атомиздат, 1965. 160 с.
- 43. Оруджев, С.А. Применение подземных ядерных взрывов для интенсификации разработки нефтяных месторождений / С.А. Оруджев [и др.] // Специальный доклад. Мировой нефтяной конгресс. 13-19 июня 1971 г. Москва, 19 с.
- Отчет о работе Научного Совета Российской Академии наук по проблемам биосферы в 1992 году. М.: Изд-во РАН, 1993, 72 с.
   Отчет о работе Научного Совета Российской Академии наук по проблемам биосферы в 1993 году. М.: Изд-во Моск. Горн. Ун-та., 1994, 24 с.
- 46. Применение подземных ядерных взрывов в нефтедобывающей промышленности. Ред. А.А. Бакиров, Э.А. Бакиров. М.: Недра, 1981, 198 с.
- Поведение веществ под воздействие сильных ударных волн. Сб. научн. статей. Т.3. Ред. Р.Ф. Трутнев. Саров ФГУП "РФЯЦ – ВНИИЭФ", 2007. – 477 с.
- 48. Политиков, М.И О дестабилизирующем влиянии теплового потока на геологическую среду при подземных ядерных взрывах / М.И. Политиков [и др.] // Вестник НЯЦ РК, 2001. – Вып. 2. – С. 132 – 136.
- 49. Политиков, М.И Ртутометрия при решении задач контроля за исполнением Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний / М.И. Политиков, Т.Д. Мурзадилов, И.М. Политиков // Вестник НЯЦ РК, 2003. Вып. 2. С. 123 129.
- 50. Сапожников, Ю.А. Радиоактивность окружающей среды. Теория и практика / Ю.А. Сапожников, Р.А. Алиев, С.Н. Калмыков // М.: Бином. Лаборатория знаний, 2006. 286 с.
- 51. Селинов, И.П. Строение и системв атомных ядер / И.П. Селинов // М.: Наука, 1990. 112 с.
- 52. Семка, В.В. Исследование радиационных дефектов в γ-облученном галите методом ЭПР / В.В. Семка, А.С. Литовченко, С.Б. Шехунова // Мінералогічний журнал. НАНУ. 2003-25, 3 2/3. С. 35-40.
- 53. Скворцова, З.Н. Закономерности и механика влияния жидкостей на прочность и пластичность ионных кристаллов / З.Н. Скворцова // Автореф. дисс. на соиск. доктора химич. наук. МГУ им. М.В. Ломоносова. Химич. ф-т. М. 2005. 44 с.
- 54. Терентьев, А.В. Влияние термического воздействия на размер блоков и внутреннюю микронапряженность доломита / А.В. Терентьев, Г.Н. Каблис // РАН. Ин-т геохимии и аналитич химии им. В.И. Вернадского. Ежегодный семинар по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии. ЕСЭМПГ-2004. – 20-21 апреля 2004 г. Тезисы докладов. М. 2004. – с. 74.
- 55. Траскин В.Ю. Прослойки жидкости на границах зерен горных пород и модельных материалов. Физико-химическая механика и лиофильность дисперсных систем / В.Ю. Траскин / АН УССР. Ин-т коллоидной химии и химии воды им. А.В.Думанского // Киев : Наукова Думка, 1981. Вып. 13. С. 81 90.
- 56. Трунин, Р.Ф. Фазовые превращения каменной соли в ударной волне подземного ядерного взрыва / Р.Ф. Трунин [и др.] // Теплофизика высоких температур. 1996. Т. 34, № 6. С. 877 881.
- 57. Уткин, В.И. Экологические последствия подземных ядерных взрывов на нефтяных месторождениях Пермской области / В.И. Уткин, Е.Н. Рыбаков, В.А. Щапов // Вестник НЯЦ РК, 2007. Вып. 2. С. 58 63.
- 58. Физика ядерного взрыва. Т.1. Развитие взрыва. Мин-во обороны РФ, Центральный физико-технический ин-т. М.: Издво физикомат. Литературы, 2009. – 832 с.
- 59. Цукерман, В.А. Люди и взрывы / В.А. Цукерман, З.М. Азарх // Арзамас-16, 1994. 157 с.
- 60. Ядерные взрывы в СССР. Вып. 1. Северный испытательный полигон. Справочная информация. Гл. ред. В.Н. Михайлов М., 1992. 194 с.
- 61. Ядерные испытания СССР. Кол. Авторов под ред. В.Н. Михайлова. М.: ИздАТ, 1997. 304 с.
- 62. Ямпольский, П.А. Нейтроны атомного взрыва / П.А. Ямпольский. М.: Госатомиздат, 1961. 132 с.
- 63. Borg, I. Y. The underground nuclear explosions at Astrakhan, USSR. Soviet Union special studies, 1980-1982 supplement; 8. Special studies series (University Publications of America, Inc. Aug 13, 1982. DOE Lawrence Livermore Lab. Contract W-7405-Eng-48. Microfilm 9117 reel 8 in the Library of the Florida State Univ.
- 64. Bowen, S. M. Nevada Test Site Radionuclide Inventory, 1951–1992 / S. Bowen [et. al] // Lawrence Livermore National Laboratory, 7000 East Ave., Livermore, CA 94550-9234. LA-13859-MS. Issued: September 2001. 28 p.
- Bowman, C.D. Underground Supercritically from Plutonium and Other Fissile Materials / C.D. Bowman, F. Venneri // Science & Global Security, 1994. – Vol. 5. – P. 279 - 302.
- 66. Underground Nuclear Explosion Sites in Orenburg Oblast: Current Radiation Situation Radiochemistry / Dubasov Yu. V. [et.al] Vol. 47, No. 6, 2005 P. 605 613.

- 67. Education for Peaceful Uses of Nuclear Explosives. Lynn E. Weaver, Editor. The University of Arizona Press Tucson, Arizona, 1970. 350 p.
- Fenstermacher, D.L. The Effects of Nuclear Test-ban Regimes on Third-generation-weapon Innovation. / D.L. Fenstermacher // Science and Global Security, 1990. – Volume 1, Nos. 3-4. – P. 187 - 223.
- 69. Findlay, T. Nuclear Dynamite. The Peaceful Nuclear Explosions Fiasco. Brassey's Australia / T. Findlay // A Division of Pergamon Press Australia. ISBN 0 08 034436 4 (год издания не указан).
- Ginsburg, T. The Peaceful Applications of Nuclear Explosions. / T. Ginsburg // A Report on the Plowshare Program. Munich, Karl Thiemig, 1965. – 239 p.
- 71. Hippel, F. Might Underground Waste Repositories Blow Up? / F. Hippel // Science & Global Security, 1994. Vol. 5. P. 273-278.
- 72. Kalmykov, St.N. Artificial radionuclides in oils from the underground nuclear test site (Perm' region, Russia) / St.N. Kalmykov, Yu.A. Sapozhnikov, B.N. Golubov // Czech J. of Phys, 1999. V. 49, Suppl. 1. P. 91-95.
- Kenney, J.W. Radionuclide Baselines in Soil Near Project Gnome and the Waste Isolation Pilot Plant / J.W. Kenney // Environmental Evaluation Group New Mexico. EEG-58. 1995. – 56 p.
- 74. Khalturin, V. I. Chemical Explosions during 1961-1988 on the Semipalatinsk Test Site, Kazakhstan / V. I. Khalturin, T. G. Rautian, P. G. Richards // http://www.ldeo.columbia.edu/res/div/sgt/vitaly/VIKh\_papers/chemex\_at\_STS2000.pdf.
- 75. Mark, S. Some aspects of 6Li as a nuclear fuel for aneutronic fusion / S. Mark, Y. Ronen // Annals of Nuclear Energy 30, 2003. P. 121–125.
- Michel, R.L. Bomb Tritium in the Pacific Ocean. / R.L. Michel, H.E. Suess // Journ. Of Geophys. Res. V. 80, 30, Oct. 20, 1975. P. 4139–4952.
- 77. Peaceful Uses of Nuclear Explosions. International Atomic Energy Agency, Vienna, 1970. Bibliographical Series 38. 468 p.
- 78. Radiological Effluents Released from U.S. Continental Tests 1961 through 1992. DOE/NV-317 (Rev.1) UC-702. 1996. 275 p.
- 79. Sultanov, J.J. Completion of data base of PNE and large-scale chemical blasts conducted inside the territory of FSU (1995) / J.J. Sultanov // Institute for Dynamics of Geospheres Report to IRIS, subcontract 201. 144 p.
- 80. Smith, D.K. Characterization on Nuclear Explosive Melt Debris / D.K. Smith // Radiochim. Acta V. 69, 3, 1995. P. 157-167.
- 81. Teller, E. The Constructive Use of Nuclear Explosives./ E.Teller, W.K., Talley G.H.Higgins, G.W. Johnson // Mc Graw-Hill Book Company. 1968. 320 p.
- The Containment of Underground Nuclear Explosions. U.S. Congress, Office of Technology Assessment, OTA-ISC-414 (Washington, DC: U.S. Government Printing Office, October, 1989). – 84 p.
- Thompson A.F.B., Bruton C.J., Bourcier W.L., Shumaker D.E., Kersting A.B., Smith D.K., Carle S.F., Pawloski G.A., Rard J.A. Simulation of Radionuclide Migration in Groundwater Away from an Underground Nuclear Test. Preprint UCRL-JC-136847. U.S. Department of Energy, LLNL. 1999. – 16 p.

## ЖЕРАСТЫ ЯДРОЛЫҚ ЖАРЫЛЫСТАР ЗОНАЛАРЫНДА ТЕХНОГЕНДІ РАДИОНУКЛИДТЕР БОЛУ ЕРЕКШЕЛІКТЕРІ

## <sup>1)</sup>Голубов Б.Н., <sup>2)</sup>Сапожников Ю.А.

## <sup>1)</sup>РҒА Геосфералар динамикасы институты,Мәскеу, Ресей <sup>2)</sup>М.В. Ломоносов атындағы ММУ Химиялық факультеті, Мәскеу, Ресей

Жерасты ядролық жарылыстар (ЖЯЖ) жүргізілген зоналарда радиациялық жағдайын бағалау әдістері мен нәтижелері, сондай-ақ радиоактивті изотоптар жылыстау мен фракциялану заңдылықтары талқылануда. Бұл зоналарда, жарылыстан кейінгі екінші реттік процесстердің жаңадан анықталған ерекшеліктерін есепке алып, радионуклидтерді түгендеу қажеттілігі көрсетілген. ЖЯЖ-технологияларын пайдаланып игерілген пайдалы қазбалар кенорындарында радиациялық жағдайын зерттеуінің әлеуметтік-экономикалық өзектілігіне ерекше назар аударылады.

## TECHNOGENIC RADIONUCLIDE BEHAVIOR IN UNES AREAS

# <sup>1)</sup>B.N. Golubyev, <sup>2)</sup>Yu.A. Sapozhnikov

<sup>1)</sup>Institute of Dynamics of geospheres, RAS, Moscow, Russia <sup>2)</sup>Department of Chemistry Moscow State University, Moscow, Russia

Methods and results of radiation environment estimation are discussed and migration and fractioning regularities of radioactive isotopes in UNEs areas as well. The necessity for inventory of radionuclides in these areas with indispensable record of newly revealed features of secondary post-explosion processes is described. Special attention turned to social-economic relevance of studying radiation environment at mineral deposits which were developed applying UNE technologies.

# МОНИТОРИНГ РАДИОНУКЛИДНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПРИЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЫ СЕМИПАЛАТИНСКОГО ПОЛИГОНА И ПРИЛЕГАЮЩЕГО РЕГИОНА

#### Артемьев О.И.

#### Институт радиационной безопасности и экологии НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

Обсуждаются результаты поэтапного изучения радиоактивного загрязнения атмосферы на территории СИП и в ближайших к нему населённых пунктах. Установлено, что за территорией полигона объемная активность техногенных радионуклидов в приземной атмосфере как по расчетным, так и по экспериментальным данным на порядки ниже нормируемых величин. Опасность для персонала и населения может представлять только атмосфера непосредственно на территории радиационно-опасных объектов и только при большом количестве пыли или гари воздухе (пыльная буря, техногенное пыление, пожар и т.п.).

Ядерные испытания, проводившиеся на Семипалатинском испытательном полигоне, стали источником радиоактивного загрязнения на территории полигона. Выпав в какой-либо форме на поверхность земли, радионуклиды могут перераспределяться и мигрировать в результате ветрового переноса. Сильные ветры, пыльные бури, степные пожары приводят к тому, что в воздух поднимается загрязнённая радионуклидами почва и зола от радиоактивно- загрязнённой растительности. Поэтому, необходим мониторинг радионуклидного загрязнения атмосферы после таких природных и техногенных катаклизмов.

Масштабы и уровни радиоактивных загрязнений после ядерных взрывов зависят от многих факторов: типа ядерных боеприпасов, вида взрывов, мощности, топографических и метеорологических условий. Среди основных продуктов деления ядерного горючего при взрыве - продукты деления <sup>235</sup>U и <sup>239</sup>Pu, образующиеся под действием тепловых нейтронов, и <sup>238</sup>U, образующиеся под действием быстрых нейтронов. Количество относительно радионуклидов сначала нарастает, а затем, достигнув максимума, несколько уменьшается. Это объясняется тем, что в момент взрыва первоначальная смесь продуктов деления содержит более 200 радионуклидов 35 элементов, но большинство первичных продуктов деления имеет очень малый период полураспада. Часть образовавшихся при наземном взрыве радиоактивных продуктов (деления и активации), поднятых с грунтом, оседает непосредственно на месте проведения взрыва. Некоторая часть, связанная со сравнительно небольшими частицами грунта или расплавленных пород, может быть отнесена ветром на значительные расстояния от места взрыва. В результате этого образуется радиоактивное загрязнение окружающей среды. По условиям образования и характеру загрязнения можно выделить следующие зоны загрязнения: 1) зона воронки (несколько десятков или сотен метров); 2) зона ближнего следа, образованного выпадением наиболее крупных частиц из облака (простирается на сотни километров). Условно ближнюю зону можно ограничить первыми сутками выпадений из радиоактивного облака.

Зона дальнего следа, простирающаяся за ближним следом и обусловленная радиоактивными выпадениями в течение 1 - 2 недель после взрыва (около 10 тыс.км.) [1]. Базовым источником информации о у -излучающих радионуклидах на территории СИП по прежнему является аэро-гамма-спектрометрическая съёмка 1990 - 1991 гг. На территории полигона аэросъёмка выполнена Российскими (Аэрогеология, Москва) и Казахстанскими (Аэромагнитная партия, ЮКГУ) организациями в 1990 - 1991 гг. Аэро-гаммаспектрометрическая съёмка проведена на основе сцинтилляционных кристаллов NaI(Tl) с общим объёмом детекторов не менее 36 л. Методика работ регламентирована инструктивными требованиями, в соответствии с которыми высота съёмочных полётов составляла 25 - 80 м, градуирование аппаратуры проводилось по стандартным моделям и на естественных (природных) градуировочных площадках. При этом Российскими организациями использованы градуировочные площадки на территориях России и Украины; Казахстанскими организациями использовались градуировочные площадки (аэро-полигоны) в Алматинской области (для природных радионуклидов) и на территории Семипалатинского полигона (для <sup>137</sup>Cs).

Съёмка проведена в масштабах 1:300000 (расстояние между профилями съёмки 3 км. Ширина поля регистрации детектором около 300 м) по всей территории полигона (18,5 тыс. км<sup>2</sup>); 1:25000 (расстояние между профилями 250 м) по площадке "Опытное поле" (120 км<sup>2</sup> а также в масштабе 1:10000 в восточной части полигона (участок "Юбилейный" 115 км<sup>2</sup>). В зоне "Опытного поля" проводилась также аэрогаммасъемка масштаба 1:50000 (1990 г.), но в Казахстане эти данные отсутствуют.

Результаты измерений обрабатывались на базе компьютерных систем обработки данных с построением карт загрязнения <sup>137</sup>Cs (рисунок 1). При анализе было определено, что площадь радиоактивных следов с плотностью более 1 Ки/км<sup>2</sup> составляет примерно 0,5 % территории СИП. Основная часть территории полигона имеет плотность загрязнения менее 0,3 Ки/км<sup>2</sup>.



Рисунок 1. Карта загрязнения территории СИП<sup>137</sup>Cs по результатам аэро-гамма-спектрометрической съёмки 1990-91 г.

Степень радиоактивного загрязнения атмосферы и местности при ядерных взрывах определяется главным образом: общим количеством образовавшейся при взрыве радиоактивности; степенью разбавления радиоактивных продуктов в атмосфере (метеорологической ситуацией при взрыве).

Общее количество радиоактивности, образующейся при взрыве, определяется полной мощностью заряда, величиной наведенной активности, образующейся в результате взаимодействия нейтронов взрыва с ядрами элементов, слагающих поверхность, на которой произведен взрыв. Относительная доля радиоактивных продуктов, связанная с наиболее мелкими частицами, обуславливающими дальние выпадения, составляет около 1% от всего количества радиоактивных продуктов, образовавшихся после взрыва.

При проведении наземных испытаний в огненном шаре (в последствии, и в облаке), кроме раскаленного воздуха и атмосферной влаги, содержатся испаренное (или расплавленное) вещество ядерного заряда и материал подстилающей поверхности. Материал подстилающей поверхности находится в раздробленном, до элементарных зерен или гранул, состоянии. При понижении температуры в огненном шаре и облаке испарившиеся радиоактивные продукты взрыва начинают конденсироваться, образуя радиоактивные частицы (при воздушных взрывах). При наземных и приземных взрывах в это время начинается активация расплавленных частиц грунта.

В различных литературных источниках [2 - 7] показано, что размер частиц, образующихся при воздушных взрывах, как правило, не превышает 10 - 25 мкм, а средний размер составляет доли микрометра (ингаляционная фракция радиоактивных частиц). Высокоактивные частицы размером более 1 - 2 мкм, образующиеся при воздушном взрыве, имеют почти исключительно шарообразную форму, характерную для затвердевших капель. Вещество частиц представляет собой смесь оксида железа (основная составляющая), алюминия, урана и плутония. А установленная зависимость активности частиц от их размера (для частиц больше 2 мкм) является степенной, с показателем около 3,0. Это указывает на то, что активность в частицах от воздушных взрывов распределена равномерно по их объему (при постоянной удельной активности). Показано, что частицы при наземных взрывах состоят из стеклообразного вещества, получающегося при плавлении силикатных материалов, если последние составляют основу грунта. При этом возникают два типа радиоактивных образований (гранул): шарообразные (или каплевидные) и неправильной формы (угловатые), образующиеся на периферии огненного шара в результате оплавления отдельных крупинок почвы или грунта, составленных из таких крупинок (оба типа частиц диаметром до 2 - 3 мм). В шарообразных частицах (рисунок 2) радиоактивные продукты распределяются более или менее равномерно по их объему или толстому объемному слою. «Неактивное» ядро в крупных частицах (гранулах диаметром 0,5 - 2 мм) составляет 10-30% объема. На больших угловатых частицах радиоактивные продукты распределяются в тонком поверхностном слое. Количество таких частип незначительно.



Рисунок 2. Радиоактивные образования (гранулы), отобранные из фракции грунта с размером частиц <200 мкм

Климатические условия региона СИП (пыльные бури, сильные ветры, а также степные пожары) способствуют формированию процессов дефляции, т.е. вторичному подъему и ветровому переносу с пылью выпавших на земную поверхность радиоакивных частиц, содержащих техногенные радионуклиды. Данному процессу способствуют распространенные на территории СИП легкие почвы, которые наиболее подвержены пылеобразованию. Особенности географического положения полигона обуславливают резкую континентальность и засушливость климата. Типичным для климата этого региона является материковый режим температуры воздуха, который характеризуется большой контрастностью, значительной суточной и годовой амплитудой. Для исследуемого района в летний период характерны пыльные бури. Интенсивность ветрового подъёма радионуклидов с подстилающей поверхности зависит от многих параметров. Кроме метеоусловий, большое влияние оказывают такие факторы, как физико-химические характеристики почвы и растительный покров, а также уровень радиоактивного загрязнения поверхностного слоя почвы. Подъём почвенных частиц происходит быстрее на сухой неровной поверхности с бедной растительностью в условиях, характерных для засушливых и полузасушливых районов, распаханных полей, выдуваемых склонов и т.д. Неровности поверхности почвы и разрушение почвенного покрова в результате хозяйственной деятельности человека усиливают ветровой подъём и перенос пыли. Растительный покров также оказывает большое влияние на эти процессы.

Для оценки концентраций искусственных радионуклидов в приземной атмосфере на основе прямых экспериментов Институтом проведен ряд целенаправленных исследований. В 2000 - 2001 гг. совместно с финскими исследователями в рамках проекта МАГАТЭ [8] в г. Курчатове в течение 1 года проводился мониторинг радиоактивного загрязнения воздуха с помощью двух фильтрующих установок (К1 и К2), изготовленных в Финляндии. Установки работали в автоматическом режиме с непрерывной прокачкой воздуха через фильтр с недельной экспозицией (рисунок 3).

Пробы из аликвотных частей фильтров были проанализированы методами гамма-спектрометрического и радиохимического анализа. По результатам анализов были рассчитаны объёмные активности радионуклидов. Данные по объёмным активностям плутония-239+240, полученные во время мониторинга, были на много порядков ниже нормируемых НРБ-99.

Изучение данной проблемы было продолжено совместно со специалистами НПО "Тайфун" во второй половине 2001 г. Были поставлены эксперименты по исследованию радиоактивного загрязнения атмосферы и подстилающей поверхности грунта биологически значимой фракцией радиоактивных частиц размером менее 50 микрон. Для этого проводилось искусственное пыление атмосферы вблизи территории испытательной площадки "Опытное поле" в районе юго-восточного следа радиоактивных выпадений на расстоянии примерно 20 км от эпицентра взрывов (рисунок 4). При этом проводился отбор проб воздуха для проведения лабораторных анализов фильтров на содержание радионуклидов.



Рисунок 3. Отбор проб воздуха в г. Курчатове



Рисунок 4. Отбор проб воздуха вблизи территории испытательной площадки "Опытное поле"

Пробоотбор проводился при двух условиях: 1) при штилевой погоде (скорость ветра не превышала 4 - 5 м/с) и высоком увлажнении почвы; 2) при сильном искусственном пылении. Полученные данные показывают, что при ветровом или искусственном пылеподъёме, содержание радионуклидов в прокачиваемом воздухе резко возрастают (таблица 1). Это означает, что пылерадиационный фактор вносит существенный вклад в радиоактивное загрязнение приземной атмосферы на полигоне и нельзя не учитывать его воздействие на радиационную обстановку в целом. В таблице 2 собраны данные по определению объёмной активности <sup>137</sup>Сs и <sup>239+240</sup>Pu в приземном воздухе, полученные ранее в 2000 - 2001 гг. на полигоне и в населённых пунктах региона СИП в сравнении с аналогичными данными для г. Алматы и г. Мюнхена (ФРГ). И хотя, только для ОА плутония на полигоне (на испытательной площадки "Опытное поле") превышен норматив (приблизительно в 6 раз) загрязнение радионуклидами приземной атмосферы на полигоне и в прилегающем регионе несравнимо выше, чем в благополучных в этом отношении городах.

Время прокачки	<sup>137</sup> Cs	<sup>238</sup> U	<sup>154</sup> Eu	<sup>155</sup> Eu	°⁰Co	<sup>241</sup> Am	Примечание
24 часа	2,9±1,9	1,1±1,06	-	-	1,1±0,5	5±3	
24 часа	1,3±1,2	1,2±0,5	-	1,1±0,7	0,27±0,2	-	Фон оез пыления
10 мин	14±2	4,5±1,6	13±2,5	21±4	1,2±0,6	28±6	
5 мин	7±2	4,2±1,3	10±2	11±3	-	24±5	Фон при пылении
3 мин	2,8±1,9	2,2±1,2	6,7±1,7	6,7±2,7	-	16±4	

Таблица 1. Результаты гамма-спектрометрического анализа фильтров, Бк

Радионуклид	Место отбора	Объемная активность, нБк/м <sup>3</sup>	Год исследований
<sup>239+240</sup> Pu	Вблизи "Опытного поля"	14 000 000	2001
<sup>137</sup> Cs	Вблизи "Опытного поля"	800 000	2001
<sup>239+240</sup> Pu	с. Саржал	7100	2000-2001
<sup>239+240</sup> Pu	г. Курчатов	100	2000-2001
<sup>137</sup> Cs	г. Курчатов	4 000	2000-2001
<sup>137</sup> Cs	г. Алматы	200	1995
<sup>239+240</sup> Pu	г. Мюнхен	2-6	1987-1991
НРБ-99: <sup>137</sup> Cs – 27	′ Бк/м <sup>3</sup> , <sup>239+240</sup> Pu – 2,5*10 <sup>-3</sup> Бк/м <sup>3</sup>		

Таблица 2. Объёмная активность <sup>137</sup>Cs и <sup>239+240</sup>Pu в приземном воздухе по данным 2000-2001 гг. на полигоне и в населённых пунктах региона СИП в сравнении с аналогичными данными для г. Алматы и г. Мюнхена (ФРГ)

В 2005 - 2007 гг. на территории бывшего СИП на площадках проведения гидроядерных экспериментов и испытаний боевых радиоактивных веществ были проведены комплексные исследования радиоактивного загрязнения системы "подстилающая поверхность – атмосфера". Исследования проводились на испытательной площадке "Опытное поле" и площадке "4А", где проводилось испытание боевых радиоактивных веществ. На указанных участках испытательных площадок выполнены полевые эксперименты, направленные на изучение радионуклидных составов и дисперсных характеристик аэрозолей, образованных вследствие техногенного пылеподъёма и пожаров (проект МНТЦ К-928). В результате получены данные, показывающие перспективность таких полевых экспериментов для уточнения параметров и совершенствования физико-математических моделей аэрального загрязнения окружающей среды радиоактивными аэровзвесями и аэрозолями от различных источников их интенсивного поступления в атмосферу. Модельные расчеты [9] позволили провести оценку среднегодовой и среднесуточной объемных активностей техногенных радионуклидов в приземном воздухе прилегающих к полигону населенных пунктов, обусловленных атмосферным переносом была проведена оценка среднегодовой интенсивности ветрового подъема  $\bar{\alpha}$  (c<sup>-1</sup>) радиоактивной примеси на основании экспериментальных данных о загрязнении исследованных участков территории СИП <sup>239+240</sup>Ри и среднегодовой концентрации <sup>239+240</sup>Ри в приземном воздухе г. Курчатова и пос. Саржал [10]. Получено среднее значение  $\bar{\alpha} = 10^{-10} \,\mathrm{c}^{-1}$ , которое характерно для больших площадей (сотни кв. километров) и длительных промежутков времени (год). На основании полученного значения  $\bar{\alpha}$  и данных о загрязнении площади СИП <sup>137</sup>Сs и <sup>239+240</sup>Ри были проведены модельные оценки загрязнения этими радионуклидами приземной атмосферы г. Курчатов и пос. Саржал при средней скорости ветра 4 м/с. Рассматривались направления ветрового переноса радиоактивной пыли, вызывающие радионуклидное загрязнение атмосферы отмеченных населенных пунктов. Для оценки радиоактивного загрязнения атмосферы принимались во внимание площади зон на территории СИП с наиболее высокими уровнями загрязнения указанными радионуклидами. Полученные результаты показывают, что расчетные данные среднегодовых объёмных активностей цезия-137 и плутония-239+240 в приземной атмосфере г. Курчатова на много порядков меньше нормируемых по НРБ-99. В таблице 3 представлены результаты расчётов среднегодовых объёмных активностей <sup>137</sup>Сs и <sup>239,240</sup>Ри в приземной атмосфере г. Курчатова и с.Саржал.

Необходимо подчеркнуть, приведенные оценки среднегодовой ОА <sup>137</sup>Сs и <sup>239+240</sup>Pu носят ориентировочный характер. Дополнительный вклад в формирование ОА <sup>137</sup>Сs и <sup>239,240</sup>Pu в приземной атмосфере г. Курчатов вносят глобальный фон и ветровой перенос от других площадных источников, расположенных на территории СИП. В то же время, нормируемая НРБ-99 среднегодовая ОА <sup>137</sup>Сs и <sup>239+240</sup>Pu на много порядков выше полученных в работе оценочных значений.

При выполнении работ использовали высокообъемную Российскую воздухофильтрующую установку Тайфун 4к и Американский пробоотборник импакторного типа РМ10. Тайфун 4к высокообъемная воздухофильтрующая установка производительностью около 500 м<sup>3</sup>/час, с использованием ткани Петрянова (ФПП-15-1,5) в качестве фильтрующего элемента. РМ10-устройство отбора проб аэрозолей, размером менее 10 мкм; фильтрующий элемент-Glass Fiber G810 (рисунок 5). Скорость воздуха при прокачке поддерживается в 1,3 м<sup>3</sup>/мин (±10%), что необходимо для "отсечки" частиц >10 мкм [10].

Таблица 3. Результаты расчётов среднегодовых объемных активностей <sup>137</sup>Cs и <sup>239+240</sup>Pu в приземной атмосфере города Курчатова и села Саржал, обусловленные ветровым переносом невесомой радиоактивной примеси от наиболее интенсивных площадных источников (цезиевых и плутониевых "пятен") на территории бывшего СИП

Среднегодовая ОА, Бк/м <sup>3</sup>	г. Курчатов	с. Саржал	НРБ-99
<sup>137</sup> Cs	2,6·10 <sup>-7</sup>	-	27 Бк/м <sup>3</sup>
<sup>239+240</sup> Pu	3,7·10 <sup>-7</sup>	7,1·10 <sup>-7</sup>	2,5·10 <sup>-3</sup> Бк/м <sup>3</sup>



Рисунок 5. Воздухозаборник и фильтр установки РМ-10 после пыления

В результате исследований получены эмпирические данные о радионуклидном загрязнении воздушной среды на территории бывшего Семипалатинского испытательного полигона [10]. Во время полевых экспериментов на площадке 4А импакторным методом (установка PM-10 с импактором щелевого типа) были отобраны пробы различных фракций частиц исследуемых аэровзвесей и аэрозолей, включая пробу биологически значимой фракции радиоактивных частиц с диаметрами d≤50 мкм.

Распределение радиоактивности аэрозолей по размерам при проведении экспериментального техногенного пылеподъема проиллюстрировано на рисунках (рисунок 6, рисунок 7).

Сравнение экспериментальных результатов, полученных с помощью интегрального и импакторного методов, продемонстрировало хорошее совпадение результатов в случае суммирования активностей, принадлежащих разным фракциям пыли.

В результате работ выявлено, что активность техногенных радионуклидов при интенсивном поступлении почвенной пыли в атмосферу становятся источником достаточно высоких уровней радиоактивного загрязнения атмосферного воздуха. Результат анализа распределения активности радионуклидов по фракциям показал, что большая часть активности <sup>239+240</sup>Pu находится в частицах, содержащихся во фракции d>50 мкм. Эти плутониевые частицы, вероятно, являются продуктами диспергирования использованного в гидроядерном эксперименте плутония.



Рисунок 6. Распределение объемной активности <sup>137</sup>Cs по размерам частиц



Рисунок 7. Распределение объемной активности <sup>90</sup>Sr по размерам частиц

Изучение биологически доступной фракции d<50 мкм показало, что 35% активности радионуклида  $^{137}$ Cs и 22%  $^{90}$ Sr сосредоточено в частицах диаметром d<10 мкм (ингаляционная фракция). В свою очередь, около половины активности обоих радионуклидов в данной фракции сосредоточено в частицах диаметром d<0,49 мкм, то есть в самой мелкой фракции из изучавшихся. Эти фракции радиоактивных частиц представляют наибольшую опасность внутреннего поступления в организм человека при ветровом подъёме и переносе радиоактивной пыли.

В 2009 году с мая по октябрь проводился регулярный мониторинг (отбор проб воздушных аэрозолей) на примыкающей к «Опытному полю» площадке «100» (реакторный комплекс ИГР). Откачка воздуха выполнялась с помощью пробоотборника АКЛ-2 с производительностью 300 куб. м. в час. Цикл откачки составлял 7 дней (смена фильтра -1 раз в неделю). Полученные данные показали, что в настоящее время уровень радиоактивного загрязнения воздушной среды на территории полигона практически не отличается от ранее полученных

Всё это позволило сделать вывод, что радиоактивное загрязнение атмосферы на СИП может быть опасно для персонала и населения только непосредственно на территории радиационно-опасных объектов и только в том случае, если в этот момент в возлухе содержится большое количество пыли или гари (при пыльных бурях, техногенном пылении, пожарах и т.п.). Трансграничный перенос радиоактивности за пределы этих объектов, а тем более за границы полигона несущественный и не представляет опасности. В целом, за территорией полигона объемная активность техногенных радионуклидов в приземной атмосфере и по расчетным, и по экспериментальным данным значительно (на порядки) ниже нормируемых величин, однако же, выше концентрации данных радионуклидов в воздухе городов значительно удаленных от полигона.

## ЛИТЕРАТУРА

- 1. Израэль, Ю.А. Радиоактивное загрязнение природных сред при подземных ядерных взрывах и методы его прогнозирования / Ю.А. Израэль [et al] // Л.: Гидрометеорологическое изд., 1970.
- 2. Stewart K. Trans. Farad / K. Stewart // Soc, 1956. v.52. p.161.
- 3. Freiling, E.C. Radioactive Fallout from Nuclear Weapon Tests / E.C. Freiling // Wash., 1962. v. I. TID-7632 p.47.
- 4. Freiling, E.C. Nature / E.C. Freiling, V.A Kay, 1966. v. 209 No. 5020. p. 236.
- 5. Бенсон, П. И Радиоактивные выпадения от ядерных взрывов / П. И. Бенсон [ et al] // М.: Мир, 1968. 82 с.
- 6. Crocker, G.R. Helth Phys. / G.R. Crocker [et al] 1966. v.12, No. 8. p. 1099.
- 7. Adams, C.E. Geochemica et Cosmochemica Acta / C.E. Adams [et. al] 1960. v.18, No. ½ p. 42.
- Лехто, Ю., Саллинен С., Яаккола Т. и др. Плутоний в воздухе г. Курчатова, Казахстан. / Ю.Лехто [и др.] // Доклад на Международной конференции "Семипалатинский испытательный полигон. Радиационное наследие и проблемы нераспространения", 7-9 октября 2003 г.
- Берлянд, М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы / М.Е. Берлянд // Л: Гидрометеоиздат, 1975. – 448 с.
- Артемьев, О.И. Комплексные исследования радиоактивного загрязнения системы «атмосфера подстилающая поверхность» и оценки радиационных рисков для населения Семипалатинского региона / О.И. Артемьев // Вестник НЯЦ РК, 2007. – вып.4 – С. 44 - 52.

# СЕМЕЙ ПОЛИГОНЫ МЕН ЖАНАСҚАН АУМАҚТЫҢ ЖЕР ЖАНЫНДАҒЫ АТМОСФЕРА РАДИОНУКЛИДТІ ЛАСТАНУ МОНИТОРИНГІ

## Артемьев О.И.

## ҚР ҰЯО Радиациялық қауіпсіздігі және экология институты, Курчато, Қазақстан

ССП мен оған жақын елді мекендер аумағында атмосфера радионуклидті ластануын кезендік зерделеу нәтижелері талқылануда. Полигон аумағынан тыс жерге жақын атмосферада техногенді радионуклидтердің көлемдік белсенділігі есептелген, сондай-ақ экспериментальды деректері бойынша нормаланған шамаларынан бір неше рет төмен болуы анықталған. Персонал мен халыққа тек қана радиациялық-қауіпті объектілердің тікелей аумағындағы атмосфера қауіпті болу мүмкін және ауада көп мөлшерінде шаң, немесе күйік (шаңды дауыл, техногенді шаңңдану, өрт ж.б.) болуында ғана.

## MONITORING OF RADIONUCLIDE CONTAMINATION IN NEAR-THE-GROUND ATMOSPHERE OF SEMIPALATINSK TEST SITE AND ADJACENT REGION

#### **O.I.** Artemyev

## Institute of Radiation Safety and Ecology NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

Nuclear tests at the Semipalatinsk Test Site have become a source of radioactive contamination at the test site territory. Radionuclide fallouts in some form on the surface of the earth can be redistributed and migrate as a result of wind-driven transport. Strong winds, dust storms, steppe fires lead to the fact that the contaminated soil and ash from the radioactively polluted vegetation spread in air. Therefore, there is need for monitoring of radionuclide contamination of the atmosphere after such natural and manmade disasters.

УДК 622.235.535.2

## ОЦЕНИВАНИЕ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ ОТ КАРЬЕРНЫХ ВЗРЫВОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИБРАЦИОННЫХ ИСТОЧНИКОВ

#### Глинский Б.М., Ковалевский В.В., Хайретдинов М.С.

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

Для исследований возможных геоэкологических последствий от действующих карьеров предлагается подход, основанный на использовании сейсмических вибраторов в качестве источников, имитирующих взрывы. В отличие от взрывов вибрационные источники обладают намного меньшей мощностью, высокими метрологическими силовыми и частотно-временными характеристиками, гарантирующими высокую повторяемость результатов исследований. Приводятся результаты экспериментов, проведенных в подтверждение эквивалентности взрывных и вибрационных сейсмограмм, получаемых при одних и тех же условиях наблюдений.

Основные геоэкологические эффекты воздействия короткозамедленных карьерных взрывов на окружающую среду связаны с сейсмическими и акустическими воздействиями, формированием и распространением пылевого облака, электрических импульсов, воздушной ударной волны. Наибольший интерес представляет изучение сейсмического и акустического эффектов массовых взрывов, от которых зависит сохранность промышленных и жилых объектов, ударное воздействие на биообъекты. При определенных условиях уровень акустических колебаний может значительно превышать уровень сейсмических колебаний. На рисунке 1 в качестве примера приведены результаты одновременной записи сейсмических и акустических волн от взрыва массой 200 г. на удалении 680 м от источника.



Рисунок 1. Пример записи сейсмических и акустических сигналов от взрыва (масса заряда – 200 г., удаление от взрыва - 680 м). Первые вступления: низкоамплитудные - сейсмические волны Р, высокоамплитудные - акустические волны

Записи получены при проведении экспериментов по регистрации тестовых взрывов, в которых использована расстановка трехкомпонентных сейсмических датчиков GS-3 в виде креста (рисунок 2). Как видно из рисунка 1, на всех сейсмограммах присутствуют два типа волн: низкоамплитудные сейсмические (скорость распространения около 2000 м/с) и высокоамплитудные акустические (скорость распространения около 330 м/с). Видно, что взрывы порождают мощную акустическую волну, которая является причиной того, что в районах на удалениях до 10 - 20 км от карьерных взрывов могут разбиваться стекла в окнах домов. Подобные эффекты возникают при особом сочетании условий дальнего распространения инфразвука, порожденного взрывами, определяемых такими метеопараметрами как направление и сила ветра, температурная инверсия, турбулентность атмосферы, рельеф местности. В связи с этим возникает необходимость решения проблемы прогнозирования геоэкологического риска от массовых взрывов и проведения соответствующих дополнительных исследований подобных физических эффектов.



Рисунок 2. Схема регистрации тестовых взрывов с применением сейсмических датчиков, расставленных в виде креста

Авторами разработан подход к решению данной проблемы, основанный на применении сейсмических вибраторов в качестве источников, имитирующих взрывы. В отличие от взрывов вибрационные источники обладают намного меньшей мощностью, высокими метрологическими силовыми и частотновременными характеристиками, гарантирующими высокую повторяемость результатов исследований. Протяженные зондирующие сигналы от вибраторов в пунктах приема могут быть свернуты в короткие корреляционные (вибрационные) сейсмограммы, являющиеся аналогами взрывных сейсмограмм [1].

Обоснованием предложенного подхода служат два важных обстоятельства:

1. Эквивалентность сейсмических волновых полей, порождаемых взрывами и вибраторами в одинаковых условиях, что доказано экспериментально с использованием принципа взаимности «источникприемник» [2].

2. Способность вибраторов порождать одновременно как сейсмические, так и акустические колебания, что доказано теоретически и экспериментально [3].

## Эквивалентность сейсмических волновых полей

Эквивалентность сейсмических волновых полей изучена в широком диапазоне дальностей «источник-приемник» путем обмена местами источника и приемника: колебания от вибратора регистрировались вблизи места проведения карьерного взрыва, а сами карьерные взрывы регистрировались в местах расположения вибратора. Возможность выделения основных типов волн на вибрационных сейсмограммах иллюстрируется рисунком 3, где представлен набор вибрационных сейсмограмм, полученных при регистрации сейсмических колебаний от вибратора типа ЦВ-40 по профилю на удалениях 0.6 - 4.8 км. Как следует из рисунка, на сейсмограммах хорошо выражены основные типы сейсмических волн - про-

Î	And the state of the	Mill And the Association of the	summ_all.vz4 12
			sunm_all.vz3_11
•			summ_all.vz210
	Hanna (Martin Barrista		summ_all.vz1_09
Ì	-		sunm_all.vy4 08
Ì	ann a statistick and a statistic statistic statistics and a statistic statistic statistic statistics and a statistic statistics and a statistic statistics and a statistic statistics and a statis		sunm_all.vy3_07
Ì			sunm_all.vy2_06
	it-beinen stand dem ben bille itelite		summ_all.vy1_05
			summ_all.ux404
			sunm_all.vx3, 03
Ì	in the second		sunm_all.vx2_02
Ì			summ_all.ux1 <sup></sup> 01
1	קיייין דייין א 40	₩ <sup>**</sup> 80 120	160 200

Рисунок 4. Сейсмограммы от вибратора ЦВ-100 при схеме регистрации «Быстровка – разрез Бачатский» (215 км)

дольные и поперечные, - отражающие структуру сейсмического поля.

Для иллюстрации явления эквивалентности волновых полей от взрывных и вибрационных источников на рисунках 4 и 5 приведены сейсмограммы, зарегистрированные от вибратора типа ЦВ-100 и карьерного взрыва. Записи от обоих источников получены в дальней зоне по схеме взаимного обмена местами источника и приемника, описанной выше [2]. Профильная расстановка на базе 0.6-4.8 км.

Как видно из рисунков 4 и 5, структура сейсмограмм обладает высокой эквивалентностью по отношению к основным типам волн. Таким образом, результаты экспериментов подтверждают выполнение принципа взаимности, определяющего правомочность использования предлагаемой технологии прогнозирования.



Рисунок 3. Сейсмограммы на удалении 0.6 - 4.8 км от вибрационного источника ЦВ-40



Рисунок 5. Сейсмограммы от карьерного взрыва при схеме регистрации «разрез Бачатский – Быстровка» (228 км. Сейсмостаниия ВИРС-М

# ИЗЛУЧЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ И АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН

Свойство вибраторов излучать одновременно сейсмические и акустические изучено как теоретически [1, 4], так и экспериментально [3]. Излучаемые волны могут совместно распространяться на десятки километров от источника. Для исследования такого распространения получено соотношение, количественно оценивающее долю энергии акустических волн, излучаемых сейсмическим вибратором применительно к двум граничащим средам: упругому нижнему полупространству и верхнему газообразному, - в предположении плоской границы между ними. Если принять амплитуду возбуждающей силы источника F, скорости волн в средах и их плотности соответственно  $V_1,\,V_2$  и  $\rho_1,\,\rho_2$  , то мощность акустического излучения при V<sub>1</sub>=  $\sqrt{3}$  V<sub>2</sub> может быть оценена соотношением [4]:

$$N_{a} = 3.16 \left( \rho_{2} / \rho_{1} \right) F^{2} \omega^{2} / \pi \rho_{1} V_{1}^{3}$$
(1)

Сравнение акустической мощности и мощности упругого излучения продольной волны Р показало, что мощность первой из них составляет около 2% от мощности второй. Тем не менее, в дальней зоне источника при определенных условиях мощность акустической волны может быть сопоставима с мощностью сейсмических волн. Это подтверждено данными ряда экспериментальных исследований. Рисунки 6 и 7 иллюстрируют возможность одновременной регистрации сейсмических и акустических волн на удалениях 20 км и 50 км, соответственно.

На рисунке 6 все коррелограммы содержат цуг колебаний со временами прихода 4 – 10 с. Первые вступления соответствуют преломленным Р-волнам с характерными скоростями 4 – 6 км/с, на 6 – 7 с наблюдается интенсивное вступление поперечных SV. SH и поверхностных волн. Во втором цуге колебаний доминирующими являются X, Z компоненты, Y компонента имеет амплитуды в 5 – 10 раз ниже. Поляризация в этом цуге колебаний является эллиптической, характерной для поверхностных волн. Особенностью второго цуга колебаний является значительное изменение (в 3 – 5 раз) амплитуды от сеанса к сеансу (при постоянных характеристиках первого цуга) вплоть до полного пропадания. Время прихода, групповая скорость и поляризация изменяются до 5 %. Вторые цуги колебаний соответствуют акустической волне, появление которой обязано явлению температурной инверсии [3].



Рисунок 6. Результаты регистрации сейсмических и акустических волн от вибратора ЦВ-100 на удалении 20 км

На рисунке 7 в качестве головных волн представлены сейсмические Р и S волны на временах прихода 7.8 с и 14.5 с, соответственно, и акустические волны - на временах вступления в районе 140 с. Справа от приведенных сейсмограмм указаны направление и силы ветра.

Анализ сейсмограмм с учетом этих данных показал, что акустические волны проявляются при совпадении направления фронта распространения волны с направлением ветра. Проанализированы эффекты излучения и распространения сейсмических и акустических волн от вибрационных источников в разных частотных диапазонах, что показало возможность использования этих зависимостей для оценивания зональности сейсмоакустического геоэкологического воздействия на социальную инфраструктуру путем пересчета результатов измерений обоих полей к мощности взрывов.



Рисунок 7. Результаты регистрации сейсмических и акустических волн от вибратора ЦВ-100 на удалении 50 км

Существующие на сегодня низко- и высокочастотные типы сейсмических вибраторов позволяют охватить диапазон частот от 5 Гц до 100 Гц, что позволяет с необходимой детальностью изучать особенности распространения сейсмических и акустических волн в районах карьеров в широком спектре частот и на разных азимутальных направлениях. Сушествующие автономные компактные сейсмические станции, например, типа «RFTek», «Байкалы» позволяют проводить одновременно пространственно распределенные сейсмические и акустические наблюдения при обеспечении высокоточной временной синхронизации записей по сигналам GPS. При этом может ставиться задача изучения распределения полей амплитуд колебательных скоростей сейсмических волн и давлений акустических волн, а также оценивания экологического риска в различных азимутальных направлениях с учетом внешних условий и параметров взрывной технологии.

## Выводы

1. Рассмотрена проблема воздействия короткозамедленных карьерных взрывов на окружающую среду, включая социальную инфраструктуру. Основные геоэкологические эффекты таких взрывов связаны с сейсмическими и акустическими воздействиями, формированием и распространением пылевого облака, электрических импульсов, воздушной ударной волны. Рассмотрены сейсмический и акустический эффекты массовых взрывов, которые определяют целостность промышленных и жилых объектов, ударное воздействие на биообъекты. 2. На основе экспериментальных данных показано, что при определенных условиях уровень акустических колебаний может значительно превышать уровень сейсмических колебаний, что подтверждено результатами одновременной записи сейсмических и акустических волн от тестовых взрывов. Это происходит при стечении «благоприятных» условий для дальнего распространения инфразвука, порождаемого взрывами. Такие условия определяются метеопараметрами - направлением и силой ветра и температурной инверсией, турбулентностью атмосферы, а также рельефом местности. С учетом влияния перечисленных факторов возникает необходимость решения *проблемы прогнозирования* геоэкологического риска от массовых взрывов.

3. Авторами предложен подход, основанный на применении сейсмических вибраторов в качестве источников, имитирующих взрывы, но обладающих намного меньшей мощностью в сравнении ними. Такие источники обладают высокими метрологическими силовыми и частотно-временными характеристиками, что гарантирует высокую повторяемость результатов исследований в отличие от взрывов. Возможность применения предлагаемого полхода обосновывается данными теоретических и экспериментальных исследований.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №10-07-00387-а

# Литература

- Алексеев, А.С., Активная сейсмология с мощными вибрационными источниками / А.С. Алексеев, Б.М. Глинский, А.Л. Собисевич, М.С. Хайретдинов [и др.]. Отв. ред. Г. М. Цибульчик.- Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН, Филиал "Гео" издательства СО РАН, 2004. – 38 с.
- 2. Отчет по проекту МНТЦ №1067, ИВМиМГ СО РАН, ГС СО РАН, НИИИТ Минатома. Новосибирск, 2001. 263 с.
- 3. Glinskii, B.M. Relationship of wave fields from powerful vibrators with atmospheric and geodynamic processes / B.M. Glinskii, V.V. Kovalevskii, M.S. Khairetdinov // Geology and Geophysics,1999. vol. 40, No. 3. Pp.422 431.
- 4. Заславский, Ю.М. Об оценке мощности звука, побочно излучаемого в атмосферу при вибрационном просвечивании Земли / Ю.М. Заславский // Физика Земли, 1982. № 9. С. 86 89.

# ВИБРАТОР КӨЗДЕРІН ПАЙДАЛАНЫП КАРЬЕРЛІК ЖАРЫЛЫСТАРДАН ГЕОЭКОЛОГИЯЛЫҚ ӘСЕРЛЕРІН БАҒАЛАУ

## Глинский Б.М., Ковалевский В.В., Хайретдинов М.С.

## РҒА СБ Есептеу математика және математикалық геофизика институты, Ресей, Новосибирск

Қолданыстағы каръерлердің жұмысынан мүмкін болатын геоэкологиялық салдарларын бағалау бойынша зерттеулерін жүргізу үшін, жарылыстарға ұқсайтын көздері ретінде сейсмикалық вибраторларын қолдануында негізделген көзқарасы ұсынылады. Жарылыстарға қарағанда вибраторлардың қуаты едәуір кіші, және зерттеулер нәтижелерінің жоғары қайталануына кепіл беретін жоғары метрологиялық күштілік және жиіліктікуақыттылық сипаттамалары бар. Бақылаудың сол бір жағдайларында алынатын жарылыстық және вибраторлық сейсмограммалардың баламалығын растауына жүргізілген эксперименттердің нәтижелері келтірілген.

## ESTIMATION OF GEOECOLOGICAL EFFECTS FROM QUARRY BLASTS USING VIBRATORY SOURCES

## B.M. Glinsky, B.B. Kovalevsky, M.S. Hairetdinov

## Institute of computational mathematics and mathematical geophysics of SB RAS

To perform investigation on estimation of possible effects from active quarries the proposed approach is based on applying seismic vibrators as the sources imitating explosions. Unlike explosions, vibrators have lower yield, higher metrological performance and frequency-time characteristics ensuring high level of repeatability of results. This paper gives the results of experiments conducted to witness equivalence of explosive and vibrational seismograms gained in the same observational conditions.

# О МЕХАНИЗМЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

#### Садиков Ф.С., Алимухамедов И.М., Адылов И.И., Саттаров А.

#### Институт сейсмологии АН РУз, Ташкент, Узбекистан

Рассмотрена последовательность возникновения сильных землетрясений в течение очень короткого периода времени, для объяснения которой использован эффект домино. Установлен источник образования дополнительной силы, порождающей каждое последующее сильное землетрясение

В статье сделана попытка дать ответы на ряд вопросов, связанных с проявлением последовательности сильных землетрясений. Наиболее актуальным среди них является вопрос о том, почему сильные землетрясения возникают последовательно в течение очень короткого периода времени, как это случилось, например, в первом квартале 2010 г.: 12 января 2010 г. – землетрясение в Гаити с магнитудой М=7,2; 26 февраля - в Японии с М=7,0; 27 февраля - в Чили с М=8,3; 8 марта - в Турции с М=6,0; 11 марта – снова в Чили с М=7,2. Как обстоит дело с решением проблемы прогноза землетрясений в таких случаях?

возникновения последовательности Вопросу сильных землетрясений в течение короткого периода времени посвящен целый ряд ранее проведенных исследований [1 - 6]. Так, в работах Вилькович Е.В. [1] и др. авторов рассмотрено два вида взаимосвязи землетрясений: локальной и нелокальной. Первая из них, обусловленная перераспределением напряжений в некоторой окрестности очага готовящегося или уже произошедшего землетрясения, проявляется в известных явлениях форшоков, афтершоков и роев землетрясений, в изменении соотношения сильных и слабых землетрясений, степени их группирования и скорости сейсмических волн в окрестности очага. Нелокальная взаимосвязь, вызываемая региональными или глобальными причинами, может проявляться в виде одновременного неслучайного возникновения удаленных землетрясений и распространения волн тектонических деформаций, проявляющихся в миграции сильных землетрясений. Региональные и глобальные силы, изменяющиеся в исторически короткие отрезки времени, подтверждаются также изменениями сейсмической активности, выходящими за рамки случайных флуктуаций, При этом, явления удаленных афтершоков, к сожалению, не получили физического истолкования. Нет также единой гипотезы, объясняющей всплески сейсмических событий, следующих друг за другом, и свободные от них временные периоды.

## Эффект домино

Сильное землетрясение происходит в результате хрупкого (разрывного) разрушения крупного очага, который сначала формируется, а, сформировавшись, в итоге хрупко разрушается. Происхождение сильного землетрясения в одном из районов земного шара может спровоцировать хрупкое разрушение сформировавшихся очагов в других его районах, по принципу «эффекта домино». Именно на основе «эффекта домино» в докладе объясняется последовательность проявлений сильных землетрясений. При этом крупные очаги землетрясений, сформировавшиеся в верхней хрупкой части земной коры под воздействием сил эндогенной природы, рассматриваются как «косточки домино». Для возникновения механизма последовательного проявления сильных землетрясений необходимо проявление следующих природных факторов:

- существование в земной коре сформировавшихся крупных очагов землетрясений;
- хрупкое естественное разрушение одного из крупных очагов, вызывающее сильное землетрясение в определенном районе земного шара;
- образование под влиянием сильного землетрясения дополнительной силы, передающейся во все стороны по всему объёму земной коры посредством поверхностных сейсмических волн;
- хрупкое разрушение крупного очага землетрясения в другом районе земного шара, под влиянием распространяющейся дополнительной силы, послужившей «спусковым крючком».

Возникновение второго и последующих сильных землетрясений в течение очень короткого периода времени после первого сильного землетрясения рассматривается как проявление «эффекта домино».

# Режимное изучение изменения уровня подземных вод

После произошедшего 26 апреля 1966 г. Ташкентского землетрясения с магнитудой M = 5,34 и глубиной очага h=8 км в его очаговой зоне была пробурена скважина глубиной h=0,5 км (на территории Института сейсмологии АН РУз.) с целью всестороннего исследования данной очаговой зоны. На глубине 300 м скважиной вскрыт напорный водоносный горизонт. На отводную трубу скважины (в её горизонтальной части) был приварен штуцер и установлен манометр для измерения давление воды в стволе скважины. Проведены наблюдения в течение периода времени как до, так и после консервации скважины, выполненной после завершения основной программы исследований. В 2004 г. обнаружен самоизлив воды через штуцер и начато изучение относительного изменения скорости истечения воды. В результате наблюдений, проведенных в 2004 - 2006 гг., было установлено, что скорость истечения воды изменяется со временем. Анализ данных позволил прийти к следующему выводу: гравитационное воздействие Луны и Солнца на Землю может служить триггером различных процессов в недрах Земли под действием внутриземных сил.

Наблюдения за подземными водами в районе исследовательской скважины продолжаются до настоящего времени. Поскольку в отдельные периоды времени самоизлив воды через штуцер прекращался (как это было, например, в первом квартале 2010 г.), измерения скорости истечения воды заменены с 2010 г. на измерения уровня воды в штуцере. Результаты наблюдений вначале были истолкованы с позиции гравитационного воздействия Луны и Солнца на Землю, а впоследствии от этой точки зрения пришлось отказаться, так как при анализе использованы измерений уровня воды, произведённые только в одно и то же время суток – в 13 часов дня. На рисунке приведены результаты наблюдений по скважине за период с 4 января по 12 марта 2010 года включительно. Представлены следующие данные: ежедневное изменение уровня воды внутри штуцера, наблюдённое в одно и тоже время, в 13 часов (кривая); даты землетрясений с М $\geq$ 6,5 (таблица 1), произошедшие на земном шаре, и землетрясений с М $\geq$ 5,0 (таблица 2), произошедшие в регионе с географическими координатами:  $\varphi = 34 \div 45$ ,  $\lambda = 54 \div 76$ (стрелки на оси времен).



Рисунок. Сопоставление изменения уровня воды в штуцере (изрезанная кривая) со временами возникновения землетрясений: а - с М≥6,5 на земном шаре (таблица 1); б - с М≥5,0 в регионе с географическими координатами: φ = 34÷45, λ = 54÷76 (таблица 2)

Таблица 1. События с магнитудой М≥6,5 за период с 04.01 по 12.03 2010 г. на земном шаре

№ п/п	Дата	Магнитуда, м	Район эпицентра землетрясения
1	3 Январь, 2010	7,1	SOLOMON ISLANDS
2	5 Январь, 2010	6,7	SOLOMON ISLANDS
3	10 Январь, 2010	6,5	NEAR COAST OF N. CALIFORNIA
4	12 Январь, 2010	7,2	HAITI REGION
5	18 Февраль, 2010	6,5	RUSSIA-CHINA BORDER REGION
6	26 Февраль, 2010	7,0	RYUKYU ISLANDS, JAPAN
7	27 Февраль, 2010	8,3	NEAR COAST OF CENTRAL CHILE
8	5 Март, 2010	6,5	SOUTHERN SUMATRA, INDONESIA
9	11 Март, 2010	7,2	NEAR COAST OF CENTRAL CHILE

Таблица 2. События с магнитудой М≥5,0 за период с 04.01 по 12.03 2010 г.в регионе

№ п/п	Дата	Магнитуда, м	Район эпицентра землетрясения
1	2 Январь, 2010	5,3	TAJIKISTAN
2	6 Январь, 2010	5,0	SOUTHERN IRAN
3	23 Январь, 2010	5,0	HINDU KUSH REGION, AFGHANISTAN
4	30 Январь, 2010	5,3	EASTERN SICHUAN, CHINA
4	30 Январь, 2010	5,0	HINDU KUSH REGION, AFGHANISTAN
5	8 Февраль, 2010	5,2	NORTHERN XINJIANG, CHINA
6	25 Февраль, 2010	5,0	YUNNAN, CHINA
7	26 Февраль, 2010	5,6	WESTERN XIZANG
8	27 Февраль, 2010	5,8	HINDU KUSH REGION, AFGHANISTAN
9	01 Март, 2010	5,0	SICHUAN-GANSU BORDER REG, CHINA

Как видно из рисунка, уровень воды, измеренный в период наблюдений, весьма изменчив, что говорит о постоянной и непрерывной деформации участка земной коры (в данном случае, в районе Института сейсмологии АН РУз,). При этом сжатию земной коры соответствует относительное повышение уровня воды, при растяжении – его относительное понижение. В соответствии с данными на рисунке земная кора с 04 по 08 января 2010 г. растягивалось, а с 08 по 14 января сжималась; с 14 по 18 января снова растягивалась, а с 18 по 22 января сжималась. С 22 по 26 января земная кора на общем фоне сжатия испытывала локальное растяжение. Затем, с 26 января по 04 февраля на общем фоне сжатия произошло среднее растяжение, а с 04 по 22 февраля большое растяжение. Земная кора с 22 февраля по 03 марта испытывала локальное растяжение на общем фоне сжатия, а с 03 по 12 марта 2010 г. - среднее растяжение на общем фоне сжатия. Современное сжатие земной коры Средней Азии, как известно, вызвано столкновением Индостана с Евразией. Режимное изучение изменения уровня воды в пробуренной скважине позволило сделать следующие выводы: сильные землетрясения, как на всем земном шаре, так и в конкретном регионе возникали в то время, когда земная кора в районе расположения исследовательской скважины, испытывала резкое относительное растяжение на общем фоне сжатия. Сейсмический шикл

Земная кора представляет собой жесткую среду, в определенном объёме которой – очаге землетрясения, под влиянием хрупкого разрушения образуется дополнительна сила, распространяющаяся во все стороны и по всему её объёму. Величина дополнительной силы зависит, в первую очередь, от объёма пород, испытующего хрупкое разрушение, и тем больше, чем больше этот объём пород. Вязкость верхней хрупкой части земной коры настолько высока, что напряжения (силы), высвобождающиеся при хрупком разрушении очага землетрясения, передаются на значительное расстояние в виде импульса различной природы. При этом импульсы электромагнитной природы распространяются, например, со скоростью от 3 до 8 км/с.

Дополнительная огромная сила, образующаяся при возникновении сильного землетрясения, играет роль «спускового крючка» для очередного сильного землетрясения, возникающего в течение очень короткого периода времени. При этом средством передачи этой силы служат поверхностные сейсмические волны, порождающиеся в земной коре в результате хрупкого разрушения очага данного землетрясения.

Множество сильных землетрясений, последовательно возникающих в течение короткого периода времени, в докладе объясняется на основе «эффекта домино»: сильное землетрясение, возникшее в результате хрупкого разрушения крупного очага, образует дополнительную огромную силу, которая, встречая при распространении на каком-либо участке земной коры сформировавшийся крупный очаг землетрясения, активно воздействует на него. При этом, если сила воздействия превысит величину, необходимую для хрупкого разрушения очага, возникает следующее сильное землетрясение. При наличии подготовленных условий по аналогичной схеме происходит ряд последующих сильных землетрясений. Если в это время отсутствует сформировавшийся крупный очаг землетрясения, то тогда активное воздействие дополнительной огромной силы на несформировавшиеся очаги не создает необходимого эффекта и последовательное возникновение сильных землетрясений автоматически прекращается.

Сильные землетрясения, возникшие последовательно по описанной схеме в течение очень короткого периода времени, составляют вместе один сейсмический цикл, после которого наблюдается сейсмическое затишье до последующего сейсмического цикла.

## Выводы

Установлено, что хрупкое разрушения крупного очага одновременно служит как источником возникновения сильного землетрясения, так и источником образования дополнительной огромной силы, средством передачи которой от разрушенного очага во все стороны по всему объёму земной коры служат поверхностные сейсмические волны. Проявление последовательности сильных землетрясений, возникающих в течение очень короткого периода времени, объяснено на основе применения эффекта домино.

Изменение уровня подземных вод на изучаемом участке может служить индикатором деформируемости земной коры.

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1. Вилькович, Е.В. О взаимосвязи землетрясений / Е.В. Вилькович, А.Г. Прозоров, Д.А. Хадсон // Поиски предвестников землетрясений. Ташкент: Фан, 1976.- С. 132 139.
- Мархина, Е.К. Эффекты, предваряющие сильные землетрясения в районе о. Сахалин и Курильских островов / Е.К. Мархина, Ф.И. Монахов, Л.С. Оскорбин, Г.Л. Червяков, Г.Г. Якушко // Поиски предвестников землетрясений. -Ташкент: Фан, 1976. - С. 219 - 220.
- 3. Гангнус, А. Тайна земных катастроф / А. Гангнус. М.: Мысль, 1977. С. 23 24.
- Чернобай, И.П. Анализ длиннопериодных колебаний от землетрясений 22 июня 1977 года южнее островов Тонга / И.П. Чернобай, Д.Ж. Бергер, К.З. Картвелишвили, О.Е. Старовой, Н.А. Чернобой // Сборник советско-американских работ по прогнозу землетрясений. - 1977. - Том 2, книга 1. - Душанбе-Москва: Дониш. - С. 162 - 177.
- Тёркот, Д. Геодинамика: Геологическое приложения физики сплошных сред, пер.с анг. / Д. Тёркот, Дж. Шуберт. 1985. -Часть І. – М.: Мир, С. 90-96.
- Садиков, Ф.С. Некоторые особенности в сейсмичности Средней Азии / Ф.С. Садиков, А. В. Расулов, И. И. Адылов //Сборник тезисов всесоюзной школы-семинара «Физические основы прогнозирования разрушения горных пород». -Иркутск, 1988. - С. 49 - 50.

# ҚАТТЫ ЖЕРСІЛКІНУЛЕР БІЛІНУ РЕТТІЛІГІНІҢ МЕХАНИЗМІ ТУРАЛЫ

## Садиков Ф.С., Алимухамедов И.М., Адылов И.И., Саттаров А.

# ӨзР ҒА Сейсмология институты, Ташкент, Өзбекстан

Уақыттың өте қысқа кезеңінде қатты жерсілкінулер пайда болу реттілігі қарастырылған, оны түсіндіру үшін домино эффекті қолданылған. Әр бір кейінгі қатты жерсілуінуін тудыратын қосымша күштің пайда болу көзі анықталған.

# ABOUT SEQUENCE MACHANISM OF STRONG EARTHQUAKES

## F.S. Sadikov, I.M. Alimuhamedov, I.I. Adylov, A. Sattarov

## Institute of Seismology Academy of Science of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan

In article the sequence of the occurrence of strong earthquakes during a very short time period is considered. The effect domino is offered for their explanation. The source of the additional power, generating a following strong earthquake, is determined.

# О РЕАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ПЛАНЕТЫ ЗЕМЛЯ

## Садиков Ф.С.

#### Институт сейсмологии АН РУз, Ташкент, Узбекистан

Описаны некоторые парадоксы Земли, которые не объяснимы на основе классической модели твердой Земли. Предложен вариант реальной модели планеты Земля.

Процесс развития науки случаен и хаотичен, и все таки, несмотря на это, медленно, но мир познается. Планета Земля представляет собой единое космическое тело. Однако на практике исследователи чаще всего рассматривают так называемую «твёрдую» Землю, вне её связей с гидросферой, атмосферой, ионосферой, магнитосферой и с космическим пространством. Различные сферы Земли исследовались и исследуются специалистами в отдельности. Вопрос о взаимосвязи различных сфер Земли с её ядром в публикациях не затрагивался и оставался открытым. В связи с развитием научных представлений о ближнем и дальнем космосе появились неожиданные и поразительные факты, идеи и теоретические построения, которые трудно объяснить с точки зрения классических гипотез.

Фриц Хоутерманс, специалист по ядерной физике из Данцига, и Роберт Аткинсон, английский астроном, в 1929 г. применили теорию искусственной радиоактивности, созданную Джорджем Гаммовым (американцем русского происхождения), к термоядерным реакциям, что позволило прийти к выводу, о том, что эти реакции могут быть источником энергии Солнца. Десятилетием позже физик Ганс Бете детально рассмотрел виды реакций, происходящих при чрезвычайно высоких температурах в ядрах звёзд, в основе которых лежит превращение четырех ядер водорода в одного ядра гелия, приводящее к высвобождению энергии в соответствии с соотношением  $E = mc^2$  [1].

В статье дан обзор некоторых парадоксов Земли, новое представление об образовании ядра и всех оболочек Земли, а также описание разработанной реальной модели планеты Земля.

#### Некоторые парадоксы Земли

«Твёрдая» Земля, гидросфера, атмосфера, ионосфера и магнитосфера Земли представляют неотъемлемые части целостной системы планета Земля.

Оболочки «твёрдой» Земли, тесно связанные с ядром, мало подвержены наружному истечению вещества, прочно удерживаемого гравитационным полем. Однако внешние жидкостно-газовые оболочки постоянно находятся в состоянии частичной отдачи разреженного вещества в ближний космос и получают встречные его потоки как бы в порядке взаимного обмена. Но и плотная часть планеты в ограниченных количествах отдает в атмосферу газы, в частности, водород, ранее выделявшийся обильно [2]. Плотность сферической оболочки неравномерно уменьшается от ядра к поверхности Земли [2]. Центральное ядро Земли развивалось циклически, оно пульсировало, то расширяясь, то сжимаясь, и, в конечном счете, испытало общее сжатие, сопровождавшееся уменьшением радиуса [2]. Внутреннее ядро оказывает существенное влияние на внешнее ядро, мантию и на планету в целом [2]. В нижней атмосфере до высоты 55 км активно развиты процессы турбулентности и перемешивания. Это неоднородные и неспокойные движения воздуха, в том числе, скоростные вихревые потоки разных масштабов [2]. Выше 55 - 100 км проявляется широкая диффузия: газы приобретают стремление распределяться поинтервально, при этом часть из них способна улетучиваться. В составе вместо азота и кислорода на первое место выходит гелий, далее гелий и водород вместе и, наконец, преобладает водород. Водород характерен для внешней плазмы, присутствие которой выше 100 км доказано методами физики. Самая удалённая часть атмосферы представлена водородом, свободно улетучивающимся в космос (водородная «корона»).

Теоретические разработки по земному магнетизму, проводимые геологами и геофизиками, пока не дают ответа на главный вопрос о возникновении магнитного поля Земли [2]. В геологическом прошлом происходили обращения полярности магнитного поля Земли [3]. Обломки пород, заполняющие океанические рифты, обнаруженные советскими исследовательскими судами, содержат мало кремнезёма и много железа, имеют темный цвет и обладают повышенной плотностью [4]. На поверхности Вихерта-Гутенберга, разделяющей ядро и мантию на глубинах порядка 2900 км, имеются источники крупных магнитных аномалий, которые наиболее четко фиксируются с искусственных спутников [4]. Средняя плотность Земли, равная 5,52 г/см<sup>3</sup>, значительно превосходит плотность земной коры, которая составляет всего 2.8 г/см<sup>3</sup>. Внутренние части твёрдой Земли имеют гораздо более высокую плотность, чем её поверхностный слой, но существуют лишь предложения относительно состава мантии и ядра [4].

#### Солнце и его характеристики

Солнце в основном водородная звезда с ресурсами ядерного горения на несколько миллиардов лет. Путём термоядерной реакции водород с выделением больших энергий превращается в ионизованный гелий (возможно, <sup>3</sup>Не), который стекает к центру, где электронов и атомов нет, и оголённые ядра плотно спрессованы друг с другом. Оба они являются топливными элементами Солнца, вся плазма которого перегрета, высоко возбуждена и подготовлена к быстрым реакциям [2].

Солнце от центра вдоль его радиуса имеет следующее строение (рис): зона энерговыделения или ядро, конвективная или конвекционная зона, фотосфера, хромосфера, и далее корона, границы которой очень расплывчатые. Среди образований короны обращают на себя внимание сравнительно охлаждённые облака – протуберанцы, обусловленные выбросами солнечного вещества, и корональные лучи – более крупных заострённые выбросы сильно разреженного вещества [2].



Рисунок. Строение Солнца вдоль его радиуса [2]

Некоторые характеристики Солнца по каждой из указанных зон приведены в таблице 1 [2].

Габлица	1.	Физические	na	раметры	і Солнца
,					,

Зона	Плотность (р), г/см <sup>3</sup>	Температура (Т), К	Давление (р), атм
Энерговыделения (ядро)	$1,6 \times 10^2$	16 × 10 <sup>6</sup>	$4 \times 10^{11}$
Конвективная	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>6</sup>	10 <sup>6</sup>
Фотосфера	2 × 10 <sup>-7</sup>	6000	0,1
Хромосфера	3 × 10 <sup>-12</sup>	10000	10 <sup>-6</sup>
Внутренняя корона	10 <sup>-15</sup>	1,5 × 10 <sup>6</sup>	6 × 10 <sup>-8</sup>

При радиусе Солнца 696 тыс. км оболочки имеют следующую толщину: зона энерговыделения – 400 – 500 тыс. км, зона конвекции – 150 – 200 тыс. км, фотосфера – 350 км (!), хромосфера – 8 - 10 тыс. км; протяженность короны изменчива и может достигать нескольких радиусов [2]. Температура внутренних зон (таблица 1) достигает  $16 \times 10^6$  К, а температура короны –  $(1,5-2,5) \times 10^6$  К. Между ними располагается «холодная» зона (фотосфера с хромосферой), где температура резко снижена [2].

#### Некоторые новые данные о Земле и Солнце

Считается, что Земля образовалась в результате вихревого сжатия гигантского холодного водородного облака, произошедшего под воздействием электромагнитных сил. Солнце, согласно результатам комплексных научных исследований, проведенных учёными мира за более 40 последних лет, также считается планетой. При этом исходят из того, что звезда, как космическое тело, непосредственно испускает радиальное колоссальное термоядерное излучение, постепенно приобретает конвективную оболочку и со временем превращается в планету, т.е. планета - гаснущая звезда [5 - 7]. Следовательно, каждая планета характеризуется разной степенью угасания термоядерного излучения, и планеты различаются по степени угасания термоядерного излучения. Биологическая жизнь на планете образуется лишь тогда, когда степень угасания её термоядерного излучения становится нормальной и постепенно создаётся атмосфера, состав которой благоприятствует образованию вначале микроорганизмов, а затем флоры и фауны и, наконец, человека, как например, у Земли, где эта степень угасания в современный период делает её «живой» планетой.

Внутреннее ядро слагается из сверхуплотненных нейтральных атомов первичного водорода, внешнее ядро - из ядер сравнительно легких элементов, а мантия - из ядер всех элементов. В земной коре ядра всех элементов, приобретая электронные оболочки, становятся атомами соответствующих химических элементов. При этом в подошве земной коры образуются атомы сравнительно легких элементов, в её кровле - атомы самых тяжелых элементов, а в средней части земной коры (снизу вверх при наличии соответствующих Р,Т- условий) - атомы средних элементов. В приповерхностной части земной коры атомы тяжелых элементов под активным воздействием экзогенных сил расщепляются сначала на атомы средних элементов, которые, в свою очередь, расщепляются на атомы сравнительно легких элементов. Атомы сравнительно легких элементов расщепляются до атомов легких элементов, которые в атмосфере Земли, расщепляются на атомы гелия и водорода. Последние в ионосфере Земли под активным воздействием космических лучей распадаются на ионы.

Таким образом, химические элементы, слагающие «твёрдую» Землю, образовались и непрерывно образуются из нейтральных атомов первичного водорода под активным воздействием термоядерных сил. Все химические элементы, располагающиеся в приповерхностной части земной коры и в её атмосфере, под активным воздействием экзогенных сил постепенно и непрерывно превращаются в атомы вторичного водорода. Следовательно, источником всех химических элементов «твёрдой» Земли является нейтральные атомы первичного водорода, располагающиеся во внутреннем ядре Земли.

#### РЕАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ПЛАНЕТЫ ЗЕМЛЯ

Планета Земля от её центра вдоль его радиуса имеет следующее строение: внутреннее ядро, радиальная зона (внешнее ядро), конвективная зона (мантия), земная кора, гидросфера, атмосфера, ионосфера и магнитосфера.

Внутреннее ядро сложено из сверхуплотненных нейтральных атомов первичного водорода; внешнее ядро - из ядер сравнительно легких элементов; мантия - из ядер всех элементов; земная кора (снизу вверх) - атомами сравнительно легких элементов, атомами средних элементов и, наконец, атомами тяжелых элементов.

Атомы всех элементов присутствуют в приповерхностной части «твёрдой» Земли, а под активным воздействием экзогенных сил постоянно и непрерывно расщепляются на атомы более легких элементов. В атмосфере Земли атомы легких элементов под активным воздействием экзогенных сил (космических лучей) постоянно и непрерывно превращаются в атомы вторичного водорода. В ионосфере Земли атомы вторичного водорода распадаются на ионы. В космических условиях вышеописанная последовательность образования оболочек планеты Земля не может произойти в обратном порядке, так как планета Земля есть открытая система.

#### Выводы

В докладе предлагается реальная модель планеты Земля, в которой источником всех химических элементов «твёрдой» Земли является термоядерное горение атомов первичного водорода, располагающихся в приповерхностной части внутреннего ядра Земли. В недрах «твёрдой» Земли происходит в основном образование вещества из первичных атомов водорода, а в приповерхностной части коры Земли, гидросфере и атмосфере Земли - в основном распад образованного вещества до вторичных атомов водорода.

Автор считает, что на основе предлагаемой модели можно научно объяснить парадоксы Земли, источники передвижения плит и особенности образования и развития всех оболочек Земли.

## ЛИТЕРАТУРА

- 1. Фишер, Д. Рождение Земли. Пер. с англ./ Д. Фишер М: Мир, 1990. 264 с.
- 2. Израилев, В.М. Земля планета парадоксов / В.М. Израилев. М: Наука, 1991. 90 с.
- 3. Рикитаке, Т. Предсказание землетрясений. Пер. с англ. / Т. Рикитаке. М: Мир, 1979. 388 с.
- Темко, С. В. Физика раскрывает тайны Земли / С.В. Темко, Г.А Соловьев, В.П. Милантьев. М.: Просвещение, 1976. 127 с.
   Садиков, Ф. С. Некоторые объяснения актуальных вопросов современных движений земной коры с точки зрения нового
- Садиков, Ф. С. пекоторые объяснения актуальных вопросов современных движений земной коры с точки зрения нового взгляда на происхождение и эволюцию Земли / Ф.С. Садиков // Сборник тезисов докладов «XIII Междуведомственное совещание по изучению современных движений земной коры на геодинамических полигонах». - Ташкент, 1991. - С. 29.
- Садиков, Ф.С. Вихревая модель образования Солнечной планетной системы / Ф. С. Садиков, И. И. Адылов // Сборник докладов научной конференции «Зилзилаларни олдиндан айтиш муаммолари». – Тошкент, 1999. - С. 99 - 101.
- Садиков, Ф.С. Новый взгляд на возникновение Тунгусского природного явления / Ф.С. Садиков, И.И. Адылов // Проблемы сейсмологии в Узбекистане. - Ташкент, 2008. - № 5. – С. 79 - 81.

## ЖЕР ПЛАНЕТАСЫНЫҢ НАҚТЫ МОДЕЛІ ТУРАЛЫ

#### Садиков Ф.С.

### ӨзР ҒА Сейсмология институты, Ташкент, Өзбекстан

Қатты Жердің классикалық моделі негізінде түсіндіруге жатпайтын Жердің кейбір парадокстары сипатталған. Жер планетасының нақты моделінің нұсқасы ұсынылған.

# ABOUT REAL MODEL OF THE PLANET EARTH

## F.S. Sadikov

#### Institute of Seismology Academy of Science of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan

Some paradoxes of the Earth planet have been described which are unexplainable by classic model of Terra firma. The variant of Earth real model has been suggested.

УДК 550.34

## ОБ ОСНОВНОЙ ПРИЧИНЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ СИЛЬНОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ И ЕГО ПРЕДВЕСТНИКОВ

Садиков Ф.С., Алимухамедов И.М., Адылов И.И., Саттаров А.

Институт сейсмологии АН РУз, Ташкент, Узбекистан

Предложено описание процесса интенсивного деформирования земной коры как основы возниковения сильного землетрясения и его предвестников. Приведен обзор ряда явлений и методов, позволяющих изучать деформированное состояние горных пород.

С началом инструментального изучения землетрясений сейсмологов мира занимает проблема их предсказания. Со времени землетрясения в Сан-Франциско в 1906 г. принято считать, что землетрясение вызывается внезапной резкой подвижкой крыльев активного разлома друг относительно друга. Однако с тех пор взгляды на причины возникновения землетрясений претерпели значительные изменения. Решение проблемы прогноза землетрясений ведется учёными по нескольким направлениям [1]. Одно из них - использование предвестников землетрясений. Сторонники этого направления полагают, что, даже не имея достаточно ясной физической картины грозных сейсмических событий, можно научиться предсказывать землетрясения по тем или иным стабильным признакам, проявляющимся накануне (свечение неба, пересыхание колодцев, странное поведение животных и др.). Во всех этих явлениях - предвестниках пытались обнаружить смысл, систему, необходимую информацию [1]. Однако стало ясно, что обнаружение предвестников (всего их известно более трехсот) не может служить надежным прогнозом землетрясения, во-первых, потому, что в каждом случае могут быть свои, особые предвестники, во-вторых, потому, что землетрясение может произойти и без видимых предвестников [1]. Более плодотворное современное направление связано с исследованием физической сущности землетрясения и его главной причины.

Исследованиями установлено, что асейсмичные регионы отличаются сравнительно низкими, а сейсмичные - очень высокими темпами деформированности земной коры. В областях с высокими темпами деформированности, происходит более интенсивное накопление энергии, образуются мощные электрические токи, которые могут свободно увеличиваться в течение длительного времени в процессе непрерывной деформации земной коры. В блоке земной коры, подвергшемся наибольшей деформации, под воздействием внешних сил различной природы формируется очаг землетрясения, представляющий собой единый сильно деформированный и напряженный объём пород. Такой блок, подвергшийся наибольшей деформации, в конечном счете, должен претерпеть разрыв. В момент разрыва возникает упругая отдача и перемещение разорванных частей

блока друг относительно друга. Таким образом, землетрясение — индикатор хрупкого разрушения сплошности определённого объёма пород, слагающего верхнюю твёрдую часть земной коры.

Исходя из механизма возникновения землетрясения и учитывая многообразие предвестников, авторы выбрали тот, периодическое изучение которого приведет к однозначному решению проблемы прогноза землетрясений. Это - деформационный предвестник. Предвестники землетрясения и само землетрясение являются следствием процессов неупругих (хрупких) деформаций земной коры, поэтому изучение этой особенности должно служить основой при прогнозировании землетрясений. Известен ряд явлений и методов, позволяющих изучать деформированное состояние горных пород. Например, акустическое излучение при деформировании образцов горных пород отражает процесс трещинообразования и может рассматриваться при некотором допущении как аналог сейсмического процесса Земли. Для случая динамического распространения отрывных трещин установлена зависимость энергии излучаемого упругого импульса от параметров трещины [2].

$$E = \frac{\mathbf{A}^2 \cdot G}{2\sqrt{2\pi} \cdot \mathbf{v} \cdot T},$$

где А — амплитуда смещения в волне, v — её скорость, G — модуль упругости и 2T — время действия источника. Приближенные количественные оценки энергии акустического сигнала могут быть сделаны на основании зависимости

$$\tilde{E} = K \cdot \tilde{A}^2 \cdot \tau,$$

где  $\tilde{A}$  — амплитуда,  $\tau$ - длительность огибающей на пороге дискриминации сигнала, К- постоянная аппаратуры. Частота излучаемых волн в первом приближении для круговой дислокации радиуса *r* описывается формулой

$$2\pi f_0 = \frac{3,64 \ V_P / V_S \ \cdot V_d}{r \ 1,7+ \ V_d / V_S \ \sin\theta}$$

где  $f_{o}$ - угловая частота спектра упругой волны;  $V_{p}$ ,  $V_{s}$ ,  $V_{d}$  — скорости продольных, поперечных волн и распространения дислокации, соответственно;  $\theta$  —

угол между точкой наблюдения и плоскостью дислокации.

Оценки и прямые измерения показывают, что при лабораторных экспериментах с горными породами трещины миллиметровой длины излучают упругие волны в частотном диапазоне в первые сотни к Гц, сантиметровой длины — в десятки кГц [2]. Неоднородность строения и напряженного состояния горных пород проявляются в пространственном распределении источников акустической эмиссии (АЭ), что подтверждено опытами по крупномасштабному моделированию землетрясений.

На рисунке 1 приведены результаты эксперимента по деформированию и разрушению большого блока гранита. Блок имел форму куба с размером ребра 700 мм. Петрографическое исследование выявило следующий состав породы: кварц — 40, альбит — 40, биотит — до 20% и акцессорные примеси пирита, мусковита, корунда. Размеры зерен кварца достигали 2 мм, остальных компонент — до 1 мм [2].



циклам

Рисунок 1. Изменение числа акустических событий N по различным зонам (1 - 5) блока гранита перед его макроразрушением. [2]

Блок подвергался циклическому нагружению с постепенно увеличивающимися предельными нагрузками: 15, 22, 23, 32.5, 45, 75, 86 и 139 МПа. Для приема акустических сигналов использовались пьезокерамические датчики PZT-5А диаметром 12 мм и толщиной 1 мм, имевшие собственную частоту 1 МГц. На гранях блока было установлено восемь датчиков, соединенных с каналами цифровых осциллографов Nicolet-2090. Аппаратура обеспечивала приём и локацию сигналов от возникавших в блоке трещин. Определено местоположение 3500 источников сигналов, распределенных по объему блока в 5 основных зонах. Последовательность их появления относительно графика нагружения (рисунок 1), показала, что динамика АЭ существенно различается в различных зонах блока. В наиболее активной зоне 1 отмечено постепенное нарастание числа акустических сигналов, усилившееся перед разрушением. В то ж активизация е время, зона 3 и, особенно, зона 5, характеризуются тремя стадиями акустического режима: в циклах (IV - VI) активизация, в цикле VII - затишье, в цикле VIII - вторичная активизация. Более детальное исследование местоположения источников сигналов совместно с визуальным контролем за трещинообразованием показало, что дисперсное накопление трещин в блоке в первых циклах нагружения переходит в кластеризованное - по отдельным зонам, совпадающим с развитием макротрещин [2].

В процессе лабораторных экспериментов с образцами горных пород исследователи наблюдали локализацию АЭ. До последнего времени ограниченные возможности быстродействия систем локации акустических сигналов, помноженные на кратковременность последней стадии образования макротрещины, не позволяли детально проследить кинетику этого процесса. Однако Д. Локнер, В. Куксенко и А.Пономарев [3] предложили новый метод проведения эксперимента. Одновременное осевое нагружение и всестороннее сжатие изменялись таким образом, чтобы скорость АЭ, генерируемой при деформировании образца, оставалась примерно постоянной. Это позволило растянуть во времени фазу формирования и развития очага разрушения. Для экспериментов изготавливались цилиндрические образцы из гранита Вестерли и песчаника Берга в форме правильных цилиндров высотой 190 мм и диаметром 76 мм. Образцы помещали в плотно прилегающий кожух из меди или полиуретана. К образцу прикрепляли 6 пьезоэлектрических датчиков с резонансной частотой 0,5 МГц, которые использовались для мониторинга сигналов АЭ. Эксперименты проведены в условиях постоянного гидростатического давления 50 ± 0,2 МПа и одноосного осевого нагружения. Организация обратной связи счетчика импульсов АЭ и осевой нагрузки позволила поддерживать примерно постоянную скорость АЭ в процессе всего эксперимента.

С возрастанием напряжения и, следовательно, с возрастанием активности АЭ система контроля уменьшала скорость осевой деформации. Таким образом, появилась возможность осуществить мониторинг роста поверхности разрушения при квазистатических условиях, т.е. растянуть во времени фазы формирования и развития повреждения от минут до часов, что невозможно в стандартных экспериментах. Для локации источников АЭ использован традиционный для сейсмологии метод определения координат гипоцентров по разности времен прихода АЭ сигнала на датчик. Дифференциальное напряжение ( $\Delta \sigma = \sigma 1$ -р) в функции сокращении размера D для гранитного образца представлено на рисунке 2.

Во всех образцах зарождение разрушения сопровождалось резким изменением наклона кривой Δσ-D вскоре после пика напряжения. Анализ координат источников АЭ показал, что уменьшение прочности после максимума ("кривая ослабления") соответствует распространению поверхности макроскопического разрушения [2]. Местоположение (координаты) событий АЭ представлены на рисунке 3. Как и в других экспериментах, нагружение до пика напряжения  $\Delta \sigma$  вызывало дисперсно-распределенное образование микротрещин (рисунок 3а, б).

Начиная со стадии «в», представленной на рисунке 3, можно проследить постепенное стягивание источников акустических сигналов в небольшую область в центральной части образца, которая четко сформировалась к стадии «д». Дальнейшее её развитие привело к поверхности окончательного разрушения, условно показанной пунктиром (стадия «а»). Проведенные эксперименты позволили уверенно установить три стадии процесса разрушения: 1) распределенное (дисперсное) повреждение во время нагружения образца до пика напряжения; 2) зарождение разрушения; 3) распространение разрушения. Установлено также, что локализация разрушения может происходить даже при уменьшении среднего напряжения на запредельной стадии деформирования в тех случаях, когда концентрация трещин достигает некоторого критического значения [2]. Подход к пониманию физической природы предельной концентрации делокализованного разрушения даёт



Рисунок 2. Зависимость «напряжение – перемещение» (Δσ-D) для образца гранита в условиях трехосного сжатия при скорости нагружения, контролировавшейся скоростью акустической эмиссии [2]

кинетическая концепция прочности твёрдых тел [4]. Согласно этой концепции, деформирование и разрушение твёрдых тел являются термоактивационными процессами, развивающимися во времени.

Таким образом, основной причиной возникновения сильного землетрясения и его предвестников является интенсивное деформирование участков земной коры. Главная причина, вызывающая землетрясение, - хрупкое разрушение его очага, обусловленное очень интенсивным деформированием земной коры под воздействием внешних сил различной природы. Землетрясение не повторяется из-за невосстановляемости прежней монолитности очага после его хрупкого разрушения.

Для того чтобы реально осуществить прогноз предстоящего сильного землетрясения в изучаемом районе необходимо периодически проводить глобальные навигационные спутниковые наблюдения во всех пунктах измерений одновременно. При этом могут быть использованы системы типа GPS или ГЛОНАСС.



Рисунок 3. Стадии развитие процесса локализации акустической эмиссии в образце гранита. Стадии а - д отвечают стадиям нагружения, показанным на рисунке 2

# Литература

- 1. Садиков, Ф.С. Барометр подземных бурь / Ф.С. Садиков, А.В. Расулов, И.И. Адылов // Воспоминание о Г.А. Мавлянове. Ташкент, 1990. С. 23 25.
- 2. Соболев, Г.А. Основы прогноза землетрясений / Г.А. Соболев. М.: Наука, 1993. 313 с.
- Построение альтернативных моделей развития сейсмического процесса и предвестников: отчет о НИР / Институт физики Земли Российской академии Наук (ИФЗ РАН). – М., 1991. – 250 с.
- 4. Журков, С.Н. Кинетическая концепция прочности / С.Н Журков // Вестник АН СССР, 1968. Вып. 3. С. 46 52.

## ҚАТТЫ ЖЕРСІЛКІНУІ МЕН ОНЫҢ АЛДЫН АЛА БІЛДІРУШІЛЕРІ ПАЙДА БОЛУЫНЫҢ НЕГІЗГІ СЕБЕБІ ТУРАЛЫ

## Садиков Ф.С., Алимухамедов И.М., Адылов И.И., Саттаров А.

## ӨзР ҒА Сейсмология институты, Ташкент, Өзбекстан

Қатты жерсілкіну мен оның алдын ала білірушілері пайда болу негізі ретінде жер қыртысы белсенді деформациялану процессін сипаттауы ұсынылған. Бір қатар оқиғалар мен таужыныстардың деформацияланған күйін зерделеуіне мумкіндік беретін әдістердің шолуы келтірілген.

# PRIMARY CAUSE OF A STRONG EARTHQUAKE AND ITS FORERUNNERS

## F.S. Sadikov, I.M. Alimuhamedov, I.I. Adylov, A. Sattarov

## Institute of Seismology Academy of Science of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan

The description of the Earth crust intensive deformation as the base for a strong earthquake and its fore runners is suggested. A series of phenomena and methods has been reviewed which allow to investigate state of rock deformation.

УДК 550.343

## ЗАМЕТКИ О ПРОГНОЗЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Уткин В.И., Юрков А.К., Козлова И.А.

#### Институт геофизики Уральского отделения РАН, Екатеринбур, Россия

Показано, что наиболее важной фазой в процессе подготовки землетрясения является накопление в массиве горных пород напряжения упругой изгибовой деформации. Поэтому первым шагом в прогнозе землетрясений должно быть выявление зон критического состояния среды и только затем необходимо анализировать возможные факторы триггирования. Возможен «детерминированный» прогноз тектонических землетрясений, но он требует иного, более высокого уровня мониторинга, особенно на поверхности Земли.

В [17] опубликована статья авторов «Прогноз землетрясений. Есть ли выход из тупика?», в которой рассмотрен ряд актуальных вопросов прогноза землетрясений, исходя из гипотезы накопления упругой энергии за счет деформации изгиба (или кручения) горных пород. В данной публикации развиваются и дополняются рассмотренные ранее [15 - 17] темы моделей сейсмических событий, форшоковых и афтершоковых событий, кратковременных предвестников и тактики прогноза землетрясений.

## ОБОБЩЕННЫЕ МОДЕЛИ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ

Анализ выделенных сейсмоактивных поясов показал, что все разрушительные землетрясения связаны или с движениями литосферных плит, или с движение крупных литосферных блоков внутри этих плит. Изучение движения литосферных блоков в сейсмогенных поясах позволило свести все многообразие наблюдаемых ситуаций всего к трем моделям [7], связанным с подготовкой тектонического землетрясения и отражающим основные процессы движения литосферных блоков (плит) - рисунок 1.



Рисунок 1. Модели основных движений литосферных блоков, предшествующих землетрясению: а – надвиг-взброс; б – трансферный сдвиг; в – сброс-рифт [9]

Каждый из этих процессов при снятии напряжения характеризуется определенной поляризацией генерируемых сейсмических волн. Более сложные движения соответственно вызывают изменения в поляризационной картине волн. В моделях, представленных на рисунке 1, за счет внутреннего трения по зонам сочленения литосферных плит, возникают изгибовые деформации массивов, обладающие двумя важными особенностями: а) за счет внутреннего сцепления отдельные блоки могут испытывать пространственное смещение, аналогичное деформациям изгиба, накапливая при этом упругую энергию; б) в случае, когда макроскопическо разрушение блока не происходит, возникающие микроскопические нарушения обеспечивают накопление упругой энергии. Поскольку подавляющее большинство землетрясений находится в пределах тектонических швов, то очевидно, что источником накапливающейся энергии служит движение литосферных плит, которое в свою очередь является следствием процессов, происходящих во внутренних частях Земли. Возможные варианты наблюдаемых деформаций, возникающих при описанных процессах, представлены на рисунке 2.

Первая модель (рисунок 2а), наиболее распространенная, соответствует зонам надвига и зонам субдукции: Тянь-Шань, Южная Америка, Индонезия, Япония, Камчатка и т.д. Характерным примером является поведение выхода радона перед землетрясением на Северном Тянь-Шане 31 декабря 2003 г., представленное на рисунках 3 и 4 [15,16].



а - надвиг-взброс (типично для Тянь-Шаня, Аляски); б - зоны субдукции (Курильские острова, Камчатка, Чили и др.);
 в - скольжение с трением (разломы Сан-Андреас, Северо-Анатолийский); г - сброс (зоны грабенов: Байкальский, Восточно-Африканский);
 1- зоны сжатия; 2 – нейтральные зоны; 3 – зоны растяжения; 4 – зоны дилатансии; 5 - направление действующих сил





1 – объемная активность радона (ОАР); 2 – объемная активность торона (ОАТ); 3 – влажность. Сейсмические события: 4 – K = 9,5; R = 303 км (W- в западном направлении); 5 – K = 8,2; R = 301 км (W); 6 – K = 8,5; R = 93 км (NE – направление на северо-восток); 7 – K = 8,1; R = 169 км (WSW); 8 – K = 10,5; R = 32 км (N);
9 – K = 8,5; R = 117 км (WNW); 10 – K = 8,4; R = 8,1 (S); 11 – K = 8,5; R = 103 км (W); 12 - K = 8,4; R = 223 км (W) [15]

Рисунок 3. Поведение объемной активности радона и торона перед событием 31 декабря 2003 г.



нии Север - Юг; 4 – деформации в направлении Запад - Восток. Прерывистая линия - момент землетрясения [16].

Рисунок 4. Сопоставление вариаций объемной активности радона и торона с деформациями верхней части земной коры при событии 31 декабря 2003 г.

На тех же рисунках 3, 4 показаны вариации объемной активности торона, как газа родственного радону, и влажности, как одного из главных мешающих факторов при регистрации радона и торона. Полученные данные свидетельствуют о наличии в точке измерения деформации растяжения повышения объемной активности радона и торона, а также о практическом отсутствии влияния влажности на показания радиометров радона и торона. Мониторинг радона, проведенный в Северном Тянь-Шане, показал еще одну особенность использования естественных радиоактивных газов для изучения деформаций горных массивов, а именно, высокую тензочувствительность газовых методов оценки деформации массива. Сопоставление данных радонового монитора и деформографа, расположенных в одной и той же точке измерений, представленных на рисунке 4, показывает, что при подготовке тектонического землетрясения относительная деформации массива составляет n·10<sup>-8</sup>, а выход радона из массива может изменяться при этом на 200 - 250% [3].

Модель на рисунке 2в характерна для сдвиговых движений: разломы Сан-Андреас (США) и Северо-Анатолийский (Турция). Наиболее полные данные по радоновому мониторингу даны в [18], где описаны результаты уникального эксперимента, проведенного Геологической службой США. Регистрация радона проведена в 60-ти точках вдоль известной системы разломов Сан-Андреас-Калаверас-Хайворд. Разница в горизонтальных скоростях движения литосферных плит в этом районе достигает 38 мм/год: Тихоокеанская плита двигается на северо-запад со скоростью 49 мм/год; Северо-американская в том же направлении, но со скоростью 11 мм/год (рисунок 5). Эти движения соответствуют модели, приведенной на рисунке 26 или, точнее, - на рисунке 2в. Очевидно, что при этом Тихоокеанская плита за счет внутреннего трения должна испытывать при торможении сильнейшие изгибовые деформации, которые неминуемо будут отражены в поле эксхаляции радона.



1 – эпицентр землетрясения; 2 – станции радонового мониторинга; 3 – станции, зарегистрировавшие землетрясение; 4 –интерпретационный профиль; 5, 6 – зоны понижения и повышения выхода радона перед землетрясением, соответственно; 7 – «нейтральные» зоны; 8 – границы зон; 9, 10 – относительное повышение и понижение выхода радона по отдельным станциям (проекция на профиль), соответственно; 11 – усредненная кривая изменения эксхаляции радона перед землетрясением

Рисунок 5. Результаты обработки данных регистрации события 5 августа 1979 г. [18]

В нижней части рисунка 5 по одному из интерпретационных профилей вынесено относительное изменение выхода радона по данным отдельных станций и показаны зоны изменения выхода радона перед землетрясением. Видно, что наблюдаются явно выраженные зоны сжатия и растяжения, связанные с изгибовой деформацией верхней части литосферной плиты. Всего в [18] исследовано 25 событий, и во всех случаях наблюдалась аналогичная картина, причем эпицентры всех событий всегда находились в пределах зоны сжатия (т.е. в зоне уменьшения выхода радона). В соответствии с усредненным графиком (условный знак 11 на рисунке 5) четко выделяются зоны как повышенного, так и пониженного выхода радона, которые возникают *одновременно* перед землетрясением. Следовательно, в зависимости от взаимного расположения будущего эпицентра землетрясения и точки регистрации объемной активности радона наблюдаются различные эффекты – повышение или понижение ОАР. Эта особенность, отражающая сложную деформационную картину массива перед землетрясением, является одной из причин неудачных прогнозов при попытках использования вариаций ОАР.

Общим процессом для всех моделей является торможение движения блоков за счет трения, что неминуемо вызывает деформацию блоков. Особенностью этого деформационного процесса является то, что блоки горной породы не разрушаются, поскольку их прочностные свойства существенно выше, чем у зон скольжения, но испытывают изгибовые деформации. Особенностью деформации такого вида является, вопервых, то, что этот вид деформации является единственным, который может накопить упругую энергию без разрушения трещиновато-пористой среды, каковой являются литосферные блоки. Во-вторых, накопление упругой энергии будет происходить практически без видимых перемещений блока, накапливающего энергию. Это сразу же исключает из рассмотрения такой широко используемый предвестник, как регистрация расстояния между базовыми точками сейсмогенного массива. Например, анализ данных GPS-мониторинга, проведенного на Северном Тянь-Шане, показал, что все крупнейшие землетрясения Северного Тянь-Шаня находятся в зонах наименьших «вековых» движений по данным GPS [14 - 17]. Геофизическими параметрами, которые также могут регистрировать деформацию изгиба, являются электрическое сопротивление массива деформирующихся пород, изменение состояния подземных вод (изменение уровня, наличие аномальных перетоков воды по водоносным пластам и т.п.). Однако, как показывает опыт различных исследователей, наиболее чувствительным параметром к изменению напряженно-деформированного состояния массива является изменение выхода (эксхаляция) естественного радиоактивного газа радона из поверхностных частей массива горных пород [15 - 17, 22].

## ФОРШОКОВЫЕ И АФТЕРШОКОВЫЕ СОБЫТИЯ

Если принять модель двигающегося массива, что в большинстве случаев и имеет место, то форшоковые и афтершоковые явления хорошо объясняются неустойчивым трением при движении литосферных блоков [21]. Исследование процесса такого трения, выявило некоторые важные следствия его особенностей. Вопервых, трение стимулирует деформационные процессы, которые могут привести к накоплению упругой энергии за счет изгибовых деформаций. Во-вторых, в реальных условиях может наблюдаться неустойчивость сил трения, вызванных различными внешними причинами, и возникать достаточно сложные процессы замедления или ускорения движения литосферных плит (крип - процесс). Этот вывод хорошо объясняет возникновение нескольких последовательных землетрясений, эпицентры которых расположены практически в одной точке. Согласно теории неустойчивого трения возможны три процесса: 1 - плавное скольжение по поверхности трения (SLIP - процесс), порождающее сейсмические события мелкого масштаба; 2 прерывистое скольжение (CRIP-процесс), порождающее сейсмические события более крупного масштаба, которые сейсмологами описываются как форшоковые и афтершоковые явления; 3 - отсутствие скольжения, накопление упругой энергии с последующей разрядкой в виде сейсмического события с большой энергией (землетрясение). При этом очевидно, что в такой модели, форшоковые и афтершоковые явления отражают только степень подвижности массива и к прогнозным признакам не имеют никакого отношения. В действительности форшоки могут иногда иметь отношение к надвигающемуся землетрясению, но это скорее исключение, чем закономерность.

# О КРАТКОВРЕМЕННЫХ ПРЕДВЕСТНИКАХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Важной является проблема триггирования (принудительного сброса) упругой энергии, накопленной в процессе подготовки землетрясения. Если принять предложенную модель подготовки землетрясения, то можно утверждать, что на всех стадиях подготовки землетрясения, независимо от условий образования изгибовой деформации массива, возможен сброс упругой энергии под действием внешних сил. Известно около 200 предвестников землетрясений различной природы - от геодезических до космических. Общим для всех предвестников является то, что, во-первых, они в принципе могут воздействовать на процесс разрядки упругого напряжения; во-вторых, действие их сугубо избирательное, то есть они могут работать только в определенных ситуациях и не работать в других. Эти качества позволяют сделать вывод, что предвестников - некоторых событий, предшествующих землетрясениям, - в принципе не существует. Все явления, которые обычно характеризуются как «предвестники», являются фактически источниками «спусковых механизмов» различного уровня воздействия. Они могут вызывать событие, то есть быть настоящими предвестниками, только в том случае, когда они воздействуют на земную кору, которая при своем движении и деформации оказалась в критическом («предсбросовом») состоянии. Например, можно утверждать, что не существует так называемых «ионосферных» предвестников землетрясения [2, 4], а существуют быстро перемещающиеся возмущения ионосферы, которые, в свою очередь, вызывают появление атмосферных циркуляций, энергии которых вполне достаточно для триггирования землетрясения при прохождении атмосферного фронта через сейсмогенную зону. Многочисленные исследования [1] показали, что прохождение атмосферных фронтов через сейсмоактивные зоны вызывает землетрясения в
70% случаев. Оставшиеся 30% случаев соответствует прохождению фронтов через «неподготовленные» сейсмогенные зоны, то есть, не находящиеся в предсбросовом состоянии. Следовательно, необходимым условием возникновения землетрясения является тектоническая подготовка разломной зоны, то есть, накопление в этом регион достаточно высоких тектонических напряжений (рисунок 6). Сброс напряжений осуществляется, например, быстро проходящими атмосферными фронтами, что равносильно мощному удару по поверхности Земли. В приведенной схеме процесса подготовки и развития землетрясения работают два мощных энергетических источника: 1 - движение литосферных плит, которое создает необходимые условия для накопления упругой энергии в системе блоков трещиновато-пористой среды; 2 - энергия атмосферных циркуляций, которые могут возникать как при динамических процессах в атмосфере, так и при возбуждении ионосферы при вспышках на солнце. Главным условием «триггирования» землетрясения любыми процессами следует считать «подготовку» литосферы, то есть накопление в блоках значительной упругой энергии.

К исключительным случаям можно отнести обнаруженное недавно явление возникновения пакетов синусоидальных колебаний электромагнитного поля в области сверхнизких частот (периоды от 18 до 300 с), предшествующих крупным цунамогенным землетрясениям [11]. Эти колебания наблюдаются за несколько часов до главного события. Возможно, они отражают начало процесса разрядки напряжений, который может иметь достаточную длительность во времени. Природа этих событий пока вызывает дискуссии, например, эти колебания могут сопутствовать явлениям «триггирования» землетрясений, и обнаруженная связь их с сейсмическими событиями требует дальнейшего изучения. В данной модели находит объяснение факт практически одновременного возникновения землетрясений в различных регионах земного шара, когда наблюдается до 5 землетрясений с промежутком между ними от минут до часа. Спусковым механизмом в этом случае может служить только глобальный фактор, например, неравномерность вращения Земли. Ускорение или замедление вращения Земли вызывает достаточно мощный механический импульс, который одновременно воздействует на всю земную кору и вызывает сброс (землетрясение) во всех «критических» регионах планеты. В пользу этой гипотезы свидетельствует неоднократно отмечаемая корреляция сейсмической активности с неравномерностью вращения Земли [Кисилев, Сидоренков].

На рисунке 7 схематически представлена такая ситуация, когда неравномерность вращения Земли вызывает почти одновременное возникновение землетрясений в различных районах земного шара.



 1 – литосферные блоки; 2 – направление движения литосферных блоков; 3 – зона сжатия; 4 – зона растяжения; 5 – зона дилатансии и выделения радона; 6 – внешнее воздействие; 7 – землетрясение; 8 – остаточные колебания и деформации.

Рисунок 6. Модель подготовки тектонического землетрясения для отдельного блока массива в предположении о пробладании процесов упругого сжатия перед процессами разрушения массива и сброса этого напряжения под воздействием внешней силы



сейсмогенные пояса планеты; 2 – направление вращения планеты; 3 - неоднородность вращения; 4 – направление воздействия возникающего при этом механического импульса; 5 – землетрясения, возникающие при сбросе напряжения горных пород; 6 – условное обозначение оси вращения Земли

Рисунок 7. Схема одновременного возникновения «роя» землетрясений в различных частях планеты

При этом следует учитывать, что возникновение землетрясения возможно только при соответствующих (необходимых) условиях – земная кора должна находиться в напряженном состоянии, из которого ее может вывести достаточно мощное механическое воздействие. Кратковременное изменение вращения Земли является достаточным условием для возникновения землетрясения.

Предлагаемая модель позволяет объяснить так же эффект возникновения часто наблюдаемого в сейсмогенных регионах последовательного ряда землетрясений на больших площадях. В этом случае сброс напряженного состояния может возникать при движении атмосферных циркуляций (атмосферных фронтов, ионосферных возмущений) через находящиеся в критическом (предсбросовом) состоянии массивы сейсмогенных поясов, что вызывает последовательную серию землетрясений. Пространственное положение эпицентров этих событий соответствует точкам пересечения траектории движения атмосферных циркуляций (атмосферных фронтов) с сейсмогенными поясами Земли с горными массивами, находящимися в критически напряженном состоянии. Схема возникновения серии землетрясений представлена на рисунке 5. Последовательность взаимодействия ионосферных возмущений с земной корой может быть следующей (рисунок 8).



1 – возбуждение ионосферы, например, под действием солнечных вспышек; 2 – очаги землетрясений, возникших при сбросе напряженного состояния проходившим возмущением; 3 – траектория прохождения возмущения

Рисунок 8. Модель возникновения серии последовательных землетрясений под воздействием движущихся атмосферных фронтов Возникающее под действием, например, мощных солнечных вспышек ионосферное возмущение вызывает появление атмосферных циркуляций (атмосферных фронтов), движущихся вслед ионосферному возмущению. Прохождение атмосферных циркуляций через сейсмогенные зоны литосферы вызывает сброс накопленной упругой энергии, если система находится в «критическом» состоянии (необходимое условие). Условия накопления энергии и ее триггирования могут быть существенно различны, поэтому и сброс энергии при землетрясении может создать как форшоки (афтершоки), так и катастрофические события.

В рассмотренной модели получают объяснение и так называемые «периоды затишья» перед событием. Такие «окна» затишья наблюдаются в пределах отдельного блока, который остается неподвижным, в то время как вся система блоков продолжает движение. Выявление таких блоков возможно при регистрации малоамплитудных сейсмических шумов. На это обстоятельство неоднократно обращали внимание сейсмологи [19], хотя детальные исследования не проводились ввиду высоких требований к обработке больших объемов информации и технических требований к аппаратуре: необходимо достаточно большое количество сейсмических датчиков, регистрирующих события малой энергии.

Из всего вышесказанного следует один важный вывод. Лействительным и физически обоснованным, единственным объективным предвестником тектонического землетрясения может служить только возникновение аномальных значений напряженного состояния отдельного горного массива. Для получения надежной информации о напряженном состоянии массива (сжатие или растяжение) необходим обоснованный выбор пространственного расположения точек измерения этого состояния, что предполагает проведение предварительного изучения геодинамических условий региона. Наиболее эффективным методом регистрации напряженного состояния массива, по мнению авторов, является мониторинг объемной активности радона, преимущества которого подробно описано ранее [15].

# О ТАКТИКЕ ПРОГНОЗЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Как показывает рассмотрение различных аспектов подготовки и возникновения землетрясения, последнее, как физическое явление, представляет собой многофакторный процесс с наличием многих точек бифуркации. Тем не менее, возможно предложить алгоритм прогноза тектонического землетрясения. Схема этого процесса представлена на рисунке 9.



Рисунок 9. Алгоритм процессов подготовки землетрясения и сброса упругой энергии

Локальное движение литосферных плит (блоков) определяется глобальными движениями в литосфере. При неустойчивом торможении локальных блоков (массивов) возникает накопление упругой энергии за счет изгибовой деформации. Возникающая деформация приводит к изменению напряженного состояния среды. Одновременно возникают характерные для такой деформации зоны: сжатия, нейтральная, растяжения. Высокие механические напряжения (сжатие или растяжение массива) наиболее надежно фиксируются по выходу (эксхаляции) радона, который легко регистрируется и не имеет эффекта «последействия» ввиду малого периода полураспада. При этом может наблюдаться и «сейсмическая брешь»: торможение локального литосферного блока. В этих условиях существует вероятность разрядки напряжения. сброс относительно малой накопленной энергии и выделение ее путем серии мелких землетрясений (форшоков). Дальнейшая деформация массива в условиях его торможения приводит к возникновению критического состояния среды, которое может, как самостоятельно привести к сбросу энергии, так и под воздействием различных внешних спусковых механизмов. Таким образом, процесс движения литосферных плит непрерывно порождает землетрясения различной энергии, в исключительных случаях - катастрофические землетрясения-Большую роль в данном процессе имеет внешнее воздействие. Оно может проявляться в различном виде. Самым сильным воздействием следует считать

прохождение через сейсмогенную зону аномальных атмосферных фронтом или аномальных атмосферных циркуляций [1]. Последние, в свою очередь, часто являются следствием ионосферных возмущений, вызванных солнечной активностью [13]. В итоге получается, что землетрясения зарождаются в земной коре, но некоторые из них могут быть спровоцированы солнечной активностью.

Из вышесказанного следует, что наиболее важной фазой в указанном процессе является подготовка землетрясения, а именно, накопление в массиве напряжения упругой изгибовой деформации. Поэтому при прогнозе землетрясений этот процесс необходимо изучать в первую очередь. Первым шагом в прогнозе должно быть выявление зон критического состояния среды, а затем необходимо анализировать возможные факторы триггирования. Только такой многофакторный алгоритм прогнозных исследований может привести к успеху в организации прогноза землетрясений. В заключение следует добавить, что, вероятно, необходимо сокращать работы по детальному изучению предвестников землетрясений (тем более, что это - различные триггирующие факторы), а сосредоточить усилия на изучении процессов подготовки критического состояния среды, находящейся в напряженном состоянии.

Работа выполнена при поддержке Программы 16 Президиума РАН.

#### Литература

- Боков, В.Н. Изменение атмосферной циркуляции инициатор сильных землетрясений / В.Н. Боков// СПб. Известий РГО РАН. – 2003. – Т. 135, вып. 6. – С. 54 – 65.
- 2. Бондур, В. Г. // Доклады РАН, 2005. Т. 402.,№ 1. С. 98 102.
- 3. Булашевич, Ю.П. Динамика выделения радона из массива горных пород как краткосрочный предвестник землетрясений / Ю.П. Булашевич, В.И. Уткин, А.К. Юрков // Доклады РАН № 2, 1998 Т. 358, № 5 С. 675 680.
- 4. Дода, Л.Н. Геосейсмическое эхо солнечных бурь или землетрясения рождаются на Солнце / Л.Н. Дода // Новости космонавтики, 2003. № 6. С. 55 59.
- 5. Завьялов, А.Д. Средесрочный прогноз землетрясений: основы, методика, реализация / А.Д. Завьялов. Ин-т физики Земли им. О.Ю.Шмидта.- М.: Наука, 2006. 254 с.

- Кейлис-Борок, В.И. Землетрясения и предупреждение стихийных бедствий / В.И. Кейлис-Борок, В.Г. Кособоков // XXVII Междунар. геол. конгр. (Москва, 1-4 авг. 1984). - М.: Наука, 1984. - Т. 6. - С. 56 - 66.
- 7. Певнев, А.К. Пути к практическому прогнозу землетрясений / А.К. Певнев. М.: ГЕОС, 2003. 153 с.
- 8. Мячкин, В.И. Процесс подготовки землетрясений / В.И. Мячкин. М.: Наука, 1978. 232 с.
- 9. Рикитаке, Т. Предсказание землетрясений / Т. Рикитаке. М.: МИР. 390 с.
- 10. Рихтер, Ч.Ф. Элементарная сейсмология / Ч.Ф. Рихтер. М.: Изд-во иностр. лит., 1963. 670 с.
- 11. Собисевич, Л.Е. Ультранизкочастотные электромагнитные возмущения, возникающие перед сильными сейсмическими событиями / Л.Е. Собисевич, К. Х. Канониди, А. Л. Собисевич // Доклады РАН, 2009. Т. 429, № 5 С. 668 672.
- 12. Соболев, Г. А. Основы прогноза землетрясений / Г. А. Соболев. М.: Наука, 1993 314 с.
- 13. Сытирский, А. Д. Связь сейсмичности Земли с солнечной активностью / А. Д. Сытирский. Л.: Гидрометиздат, 1987. 99 с.
- 14. Уломов, В.И. О предвестнике сильного тектонического землетрясения / В.И. Уломов, Б.З. Мавшанов // Докл. АН СССР, 1967. Т. 176, № 2. С. 35 37.
- 15. Уткин, В.И. Мониторинг радона при изучении процесса подготовки тектонического землетрясения на Северном Тянь-Шане / В.И. Уткин [и др.] // Физика Земли. – 2006. – № 9 – С. 145 – 155.
- 16. 16. Уткин, В.И. / В.И. Уткин, А.К. Юрков // Доклады РАН, 2009. Т. 631, № 6. С. 23 27.
- 17. Уткин, В.И. Прогноз землетрясений. Есть ли выход из тупика? / В.И. Уткин, А.К. Юрков // Вестник НЯЦ РК. Курчатов: НЯЦ РК, 2009. Вып. 3. С. 61 66.
- King, Chi-Yu Field studies of radon in rocks, soil and water / Chi-Yu King, C. Walkingstick, D. Basler. Gunderson L.and Wanty R. editors / U.S.Geological survay bulletin, 1991. - Pp. 77 - 133.
- Korneev, V.A. Seismicity precursors of M6.0 2004 Parkfield and M7.0 1989 Loma Prieta earthquakes, Eos Trans. / V.A. Korneev // AGU, 86 (52), Fall Meet. Suppl., Abstract S53B-1097, 2005.
- 20. Reid, H.F. The elastic-rebound theory of earthquakes / H.F. Reid // Bull. Department Geol. Univ.Clif. Pabl., 1911. Vol. 6, N 19. Pp. 413 444.
- 21. Scholz, Christopher H. Earthquakes and friction laws / Christopher H. Scholz. Nature. 391, 1998. P. 37 42.
- 22. Woith H.; Pekdeger A. Soil radon and non-tectonic effects: a contribution to the joint German-Turkish project on earthquake
- prediction research / H. Woith, A. Pekdeger // Gas Geochemistry. Science Reviews, 1995. Pp. 135 146.

# ЖЕРСІЛКІНУЛЕРІН БОЛЖАУ ТУРАЛЫ МАҚАЛАЛАР

#### Уткин В.И., Юрков А.К., Козлова И.А.

#### РҒА ОрБ Геофизика институты, Екатеринбург

Жерсілкінуі дайындалу процессінде таужыныстар массивінде серпінді иілімдік деформациясы жиналуы ең маңызды фазасы болып табылатыны көрсетілген. Сондықтан, жерсілкінулеррді болжауында ортаның критикалық жағдайындағы зоналарын анықтауы бірінші қадамы болу тиіс, тек содан кейін триггирлеуінің мүмкін болатын факторларын талдау қажет. Тектоникалық жерсілкінулерін «детерминделген» болжауы мүмкін, бірақ та ол мониторингтің басқа, одан жоғары деңгейін талап етеді, әсіресе жер бетінде.

## NOTES OF EARTHQUAKE PREDICTION

## V.I. Outkin, A.K. Yurkov, I.A. Kozlova

## Institute of Geophysics Ural branch RAS, Yekaterinburg

It is shown that the most important phase in preparation process of an earthquake is accumulation of stress of elastic, flexural deformation in a rock mass. Thus the first step to take in predicting earthquake should be determination of critical zones in a medium, and only then to analyze possible triggering factors. "Deterministic" prediction of tectonic earthquakes might be possible, but it would require a different, a higher level monitoring, especially, on the earths surface.

#### STUDIES OF REPEATING EARTHQUAKES IN CHINA

#### D.P. Schaff, P.G. Richards

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

The data on repeating earthquakes occurred in and near China and revealed by studying local and regional events using Annual Bulletin of Chinese Earthquakes (ABCE) for the period from 1985 to 2005 has been provided. Repeating earthquakes may be used in studying earthquakes physics and in qualitative estimation in locating events.

Seismograms from moderate earthquakes with magnitudes about 6 and smaller are typically quite complicated when recorded at distances of several hundred km or more. But yet it is found that such waveforms are sometimes repeated, in detail, in the signals from other earthquakes recorded at the same stations (e.g. Kaufman and Burdick, 1980). In this paper we report on thousands of examples of such repeating seismic events occurring in mainland East Asia, with a focus on data from stations in and near China. These events represent a significant fraction of all recorded seismicity in the region, and it is accepted that repeating events must have occurred close to each other, within a distance that depends upon the details of similarity of the seismic waveforms they generate, as documented by stations that recorded both events.

Repeating seismic events are studied for what they can tell us about earthquake source physics, since the data from such events may contain information about their proximity. For example, there is interest in whether the rupture zones of repeating earthquakes overlap (or not) and interest too in the patterns of changing stress, inferred from event sizes and the rate of event repetition. To the extent that waveforms may be highly similar but not exactly repeated, repeating events are studied also for what they may reveal about slight changes in the medium through which the signals propagate. And a third broad reason for studying repeating events, is to evaluate the precision of traditional methods for estimating locations and amplitudes of seismic events. It is this last reason, which is of particular interest to organizations engaged in monitoring for nuclear explosions using seismological methods.

But before any of these uses of repeating earthquakes can be explored, repeating events have to be found. We need to get a sense of how common they are at different magnitude levels, and a sense too, of how their frequency of occurrence changes over time. Does the occurrence rate depend significantly upon magnitude level, and does it rise or fall or stay the same when we search for repeat events over longer and longer time periods?

We report on the occurrence of repeat earthquakes, as discovered by application of cross-correlation methods to waveform archives. Such work is different from uses of cross-correlation to measure specific features such as relative arrival times of pairs of events, for example for purposes of event location see Schaff and Waldhauser (2005). It is different too from using cross-correlation to detect events. In both those cases, useful values of the cross-correlation coefficient can be quite low. Our focus in this paper, is on sets of events that turn out to have very high waveform similarity.

Below, we describe our data and basic technique for finding repeat events. We then use the many repeat events found in mainland East Asia over a 21-year period to assess mislocation of seismic events as reported in bulletins that use traditional methods.

# DATA AND METHOD OF ANALYSIS

This project is a follow-up to the search for repeating events, in and near China, reported in Schaff and Richards (2004), which covered the years from 1985 to the beginning of 2000. We have updated it with six additional years using the Annual Bulletin of Chinese Earthquakes (ABCE) so that it now covers the 21 years up through 2005. The catalog contained 22,513 events in and near China for this time period of which 17,898 events had usable waveforms recorded at 363 stations archived at Data Management Center of the IRIS Consortium, amounting to 110 Gb of data. The same criteria was used as in Schaff and Richards (2004) to define a repeating event pair: windows including the entire seismogram starting 5 s before the P-wave and ending 40 s after the Lg-wave were filtered from 0.5 to 5 Hz. A threshold for the cross-correlation coefficient (CC) of 0.8 or greater was used to identify the repeats. All event pairs with separation distances less than 150 km were searched, amounting to 24 million correlation measurements. To speed up the computations, events were read in all at once in 200 km intervals of distance from the station. The ending cut-time, 40 s after the Lg-wave, is based on the group velocity of 3.5 km/s and these 200 km intervals, not for each individual pair.

Figure 1 displays the results. 2379 events out of the 17,898 or 13% were classified as repeats. This contrasts to the earlier work, which found 1301 repeat events or 9% for the earlier time period. The old events are plotted as blue circles. The newly discovered repeats are in red. Both are well-distributed throughout China. The stations used are shown as green triangles.



Events from an earlier study (Schaff and Richards, 2004) are in blue. New events are in red. Green triangles are stations that recorded waveforms

# Figure 1. Map of 2379 repeating seismic events in and near China

Figure 2 shows how the cumulative number of repeats, which increased in both the prior and current studies as a function of calendar time. Closer examination of early years revealed that data glitches that were not caught caused some repeats to mistakenly be identified in the prior study. But even with the removal of these events, the percentage of the total number of repeats is still higher because of the steeper slope for later years, presumably due to the increased station coverage.

Schaff and Richards (2004) showed that the separation distances of events that met the above criteria was no more than 1 km. This feature allows an independent determination of relative location error for various catalogs, which is of prime interest for many purposes in seismic monitoring. Table 1 summarizes the statistics of our repeating events as reported for three bulletins: the ABCE; the bulletin of the International Seismological Centre; and the Reviewed Event Bulletin of the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty. The number of unreported events is recorded for the time periods where the bulletins are available: ISC (1985 through 2005, which is the whole time period), REB (1995 through 2005---noting that until February 2000 the REB was produced in the USA by a prototype of the CTBT Organization's data centre). The mislocation statistics are an average for the whole time period studied. In practice we have found that mislocation values for the REB have tended to reduce over time. When the primary network of International Monitoring System stations is complete in East Asia, location accuracy can be expected to improve.



Figure 2. Cumulative number of repeating events vs. calendar time. Year label is at the beginning of the year

## **RECURRENCE INTERVALS**

The very definition of a repeating event is a similar earthquake, which occurs in almost the same spot at a later time. This is a concept leading naturally to an interest in measurements of recurrence intervals. We find that the median interval between repeating events is about 8 days in the present case. Table 2 breaks this down further in terms of different intervals. We find that 22% of the doublets occur within a day of each other.

	Table	1. Statistic	es for 23	379 1	repeating	seismic	events,	in and	near	China,	1985	to 20	05
--	-------	--------------	-----------	-------	-----------	---------	---------	--------	------	--------	------	-------	----

	ABCE	ISC	REB
Median (km)	16	16	18
Mean (km)	23	22	31
Max (km)	142	234	281
Number of doublet pairs	2178	671	492
Number of observations	6326	2297	1768
Number of events	2379	1168	912
Number of unreported events	0	1211	1248
Percentage of unreported events	0	51	58
Number of M2 events	151	missed 149	missed 149
Number of M3 events	1444	missed 990	missed 1001
Number of M4 events	725	missed 68	missed 97
Number of M 5 events	41	missed 0	missed 1
Number of M 6 events	2	missed 0	missed 0

	1 day or less	1 day to 1 week	1 week to 1 month	1 month to 1 year	1 to 2 years	2 to 5 years	5 to 11 years
Number	487	407	297	572	180	186	49
% of doublets	22	19	14	26	8	9	2
Cumulative %	22	41	55	81	89	98	100

Table 2. Recurrence interval statistics for 2178 doublet pairs

With general seismicity there is a magnitudedependence to recurrence interval. In a given area, a Gutenberg-Richter magnitude frequency distribution requires that for a certain time period there will be a much greater number of smaller events compared to the number of bigger events. The underlying reason is that it takes more time for stress to reload a fault so that larger events occur.

## CONCLUSION

Doublet events provide a means to evaluate the quality of event location estimates. For the 2178 doublets we have identified in the Annual Bulletin of Chinese Earth-

# REFERENCES

- Kaufman, K. The reproducing earthquakes of the Galapagos Islands / K. Kaufman, L. J. Burdick // Bull. Seism. Soc. Amer. 70. - P. 1759 - 1770.
- 2. Schaff, D.P. Repeating seismic events in China / D.P. Schaff, P.G. Richards // Science, 303. P. 1176 1178.
- Schaff, D.P., Waldhauser F. Waveform cross-correlation-based differential travel-time measurements at the Northern California Seismic Network / D.P. Schaff, F. Waldhauser // Bull. Seism. Soc. Amer., 95. – P. 2446 – 2461.

# ҚЫТАЙДАҒЫ ҚАЙТАЛАНАТЫН ЖЕРСІЛКІНУЛЕРІН ЗЕРДЕЛЕУ

#### Шафф Д.П., Ричардс П.Г.

# Колумбия Университета Ламонт-Дохерт жер обсерваториясы, Нью-Йорк, АҚШ

1985 - 2005 ж.ж. үшін Жыл сайынғы қытайлық жерсілкінулер бюллетеньдері бойынша жергілікті және аумақтық оқиғаларын зерделеу негізінде Қытай мен оның шеқарасына жақын аумақтарда анықталған қайталанатын жерсілкінулер туралы деректері келтіріледі. Қайталанатын жерсілкінулері жерсілкінулердің физикасын зерделу, сондай-ақ оқиғаларды оқшаулау сапасын бағалауына құралы болу мүмкін.

# ИЗУЧЕНИЕ ПОВТОРЯЮЩИХСЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В КИТАЕ

#### Шафф Д.П., Ричардс П.Г.

#### Ламонт -Дохертская земная обсерватория Колумбийского Университета, Нью-Йорк, США

Приводятся данные о выявленных повторяющихся землетрясениях на территории Китая и вблизи его границ на основе изучения локальных и региональных событий по Ежегодным бюллетеням китайских землетрясений за 1985 – 2005 гг. Повторяющиеся землетрясения могут служить средством изучения физики землетрясений, а также для оценки качества локализации событий.

imum separation distances are 16 km, 23 km, and 142 km respectively. 1168 of these doublets in and near China are also reported by the International Seismological Centre, and for these ISC doublets the corresponding separation distances (median, mean, maximum) are 16, 22, and 234 km. The Reviewed Event Bulletin of the Comprehensive Test Ban Treaty Organization includes 912 of these doublets in and near China, and the corresponding separation distances for the REB are 18, 31, and 281 km.

quakes from 1985 to 2005, the medium, mean, and max-

# СПИСОК АВТОРОВ

Richards P.G., 150 Schaff D.P., 150 Абдрахматов К.Е., 17 Адылов И.И., 131, 138 Алимухамедов И.М., 23, 131, 138 Ан В.А., 62 Артемьев О.И., 118 Башилов И.П., 62 Берёзина А.В., 17 Васильев А.П., 53 Воскобойникова Г.М., 32 Габсатарова И.П., 45 Гильберт Ж., 70 Глинский Б.М., 97, 126 Голубов Б.Н., 102 Дубровин В.И., 76

Знаменщиков Б.П., 40 Ибрагимов А.Х., 23, 26 Каазик П.Б., 62 Караваев Д.А., 97 Кемерайт Р.К., 83 Кишкина С.Б., 91 Ковалевский В.В., 126 Козлова И.А., 142 Коломиец М.В., 45 Коновалов В.А., 62 Кунаков В.Г., 70 Ле Пишон А., 70 Лукишов Б.Г., 91 Маловичко А.А., 45 Мартынов В.Н., 97 Михайлова Н.Н., 5

Московенко В.М., 40 Орешин В.П., 40 Понсо Д., 70 Поплавский А.С., 53 Садиков Ф.С., 23, 131, 135, 138 Сапожников Ю.А., 102 Саттаров А., 131, 138 Седухина Г.Ф., 32 Смирнов А.А., 70, 76 Спивак А.А., 91 Сухбаатар У., 11 Уткин В.И., 142 Хайретдинов М.С., 32, 97, 126 Эверс Л., 76 Юрков А.К., 142

# 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 A4 (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 подрисуночных 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, \*.pcx, \*.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, б. 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. Тәуелсіздік, 6.

