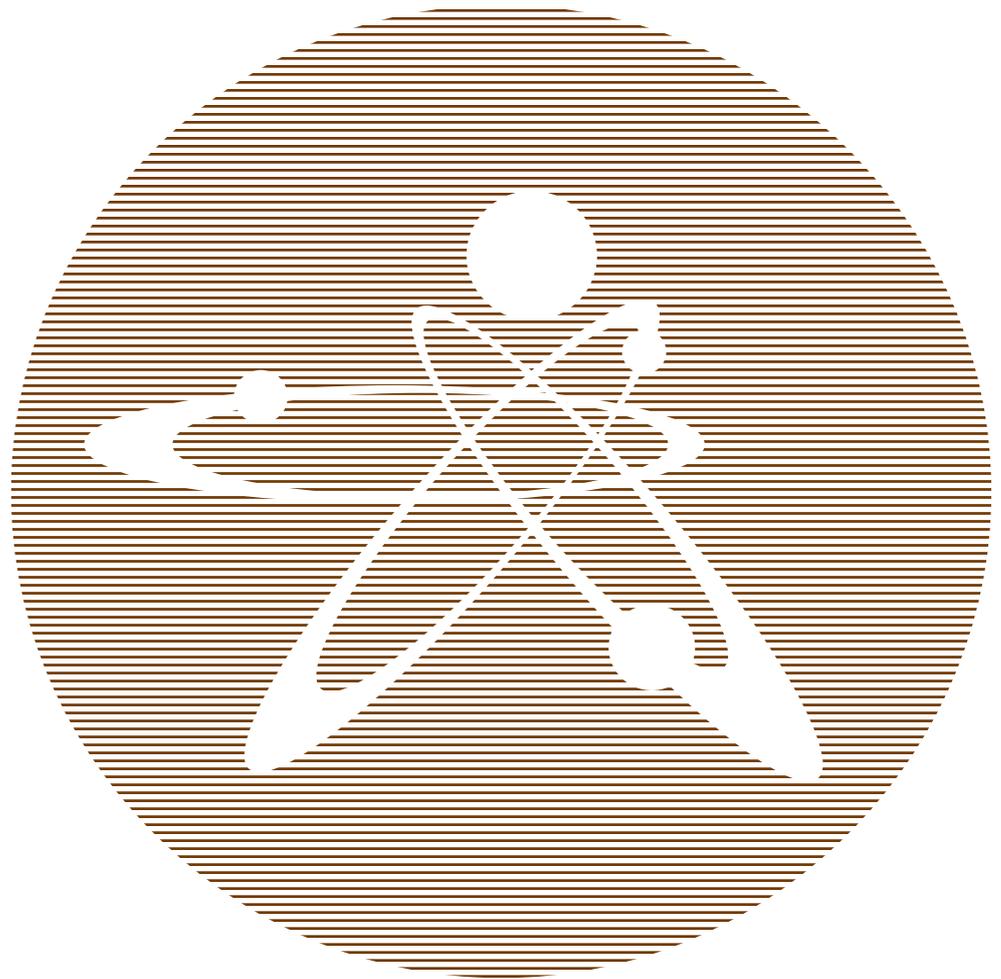


2014  
ВЫПУСК 4

ISSN 1729-7516

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ  
ВЕСТНИК

ПЕРИОДИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ  
НАЦИОНАЛЬНОГО ЯДЕРНОГО ЦЕНТРА  
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН



# **Вестник НЯЦ РК**

ПЕРИОДИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ  
НАЦИОНАЛЬНОГО ЯДЕРНОГО ЦЕНТРА РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

ВЫПУСК 4(60), ДЕКАБРЬ 2014

*Издается с января 2000 г.*

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

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:** д.ф.-м.н. СКАКОВ М.К. – заместитель главного редактора,  
д.т.н. БАТЫРБЕКОВ Г.А., д.ф.-м.н. БУРТЕБАЕВ Н.Т., доктор инженерии ВИЕЛЕБА В.К. (Польша),  
к.ф.-м.н. ВОЛКОВА Т.В., к.ф.-м.н. ВУРИМ А.Д., д.т.н. ГРАДОБОВЕВ А.В. (Россия), к.ф.-м.н. КОЗТАЕВА У.П.,  
ЛУКАШЕНКО С.Н., д.ф.-м.н. МАКСИМКИН О.П., д.ф.-м.н. МИХАЙЛОВА Н.Н., к.г.-м.н. ПОДГОРНАЯ Л.Е.,  
д.ф.-м.н. СОЛОДУХИН В.П., д.ф.-м.н. ТАЖИБАЕВА И.Л., профессор ФУДЖИ-Е (Япония)

## **ҚР ҰЯО Жаршысы**

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҰЛТТЫҚ ЯДРОЛЫҚ ОРТАЛЫҒЫНЫҢ  
МЕРЗІМДІК ҒЫЛЫМИ-ТЕХНИКАЛЫҚ ЖУРНАЛЫ

4(60) ШЫҒАРЫМ, ЖЕЛТОҚСАН, 2014 ЖЫЛ

## **NNC RK Bulletin**

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

ISSUE 4(60), DECEMBER 2014

**Периодический научно-технический журнал «Вестник НЯЦ РК», решением Комитета по контролю в сфере образования и науки включен в перечень изданий, рекомендованных для публикации материалов:**

- по физико-математическим наукам,
- по специальности 25.00.00 – науки о Земле.

В журнале представлены доклады XIII ежегодной конференции-конкурса НИОКР молодых ученых и специалистов НЯЦ РК (14 – 16 мая 2014 г., Курчатов, Казахстан), стр. 54-119.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ПЕРВЫЙ ЭТАП МОДЕРНИЗАЦИИ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО РЕАКТОРА ИВГ.1М</b> Коровиков А.Г., Ольховик Д.А. ....	5
<b>МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИФФУЗИИ В БИНАРНЫХ СПЛАВАХ ПРИ РАДИАЦИОННОМ ОБЛУЧЕНИИ</b> Колосков В.М., Короткий А.И., Субботин Ю.Н., Цепелев И.А., Черных Н.И. ....	13
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДИЧЕСКИХ АСПЕКТОВ И ПРИМЕНЕНИЕ ЭПР-ДОЗИМЕТРИИ ПО ЗУБНОЙ ЭМАЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДОЗОВЫХ НАГРУЗОК НАСЕЛЕНИЯ РЕГИОНОВ КАЗАХСТАНА</b> Середавина Т.А., Рухин А.Б., Стахов О.В., Сушкова Н.С. ....	21
<b>МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ТОКОВ ОБМОТОК ПОЛОИДАЛЬНОГО ПОЛЯ С УЧЕТОМ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ НА ВАКУМНОЙ КАМЕРЕ ТОКАМАКА КТМ</b> Шаповалов Г.В. ....	28
<b>СПЕКТРАЛЬНЫЙ СОСТАВ ЗАПИСЕЙ ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В РАЙОНЕ БАЧАТСКОГО УГОЛЬНОГО РАЗРЕЗА 9 ФЕВРАЛЯ 2012 ГОДА И 18 ИЮНЯ 2013 ГОДА</b> Габсатарова И.П., Бабкова Е.А. ....	33
<b>О СВЯЗИ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В РАЙОНАХ МАКРАНА И ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ: ВОЗМОЖНАЯ ПОДГОТОВКА СИЛЬНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ В РАЙОНЕ ЦЕНТРАЛЬНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ</b> Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. ....	39
<b>НЕОДНОРОДНОСТИ ПОЛЯ ПОГЛОЩЕНИЯ КОРОТКОПЕРИОДНЫХ S-ВОЛН В РАЙОНАХ КУРИЛ И КАМЧАТКИ И ИХ СВЯЗЬ С СЕЙСМИЧНОСТЬЮ</b> Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. ....	46
<b>ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ФАКТОРОВ СТРЕСС-СИГНАЛИЗАЦИИ, ВЫДЕЛЕННЫХ ИЗ ПЛАЗМЫ КРОВИ ЛЮДЕЙ, ПОДВЕРГАЮЩИХСЯ ВОЗДЕЙСТВИЮ РАДИАЦИИ</b> Чередниченко О.Г., Губицкая Е.Г., Пилюгина А.Л. ....	54
<b>ПОИСК ИСТОЧНИКОВ ИНФРАЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ ПО ДАННЫМ СТАНЦИЙ ИНСТИТУТА ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ</b> Дубровин В.И., Смирнов А.А. ....	60
<b>ВЗАИМОСВЯЗЬ СОДЕРЖАНИЙ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ТВЕРДОЙ И ЖИДКОЙ ФАЗАХ ЛИТОСФЕРЫ</b> Зеленский К.Л., Романов А.М. ....	65
<b>ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ В ВОДОТОКАХ НА БЫВШЕМ СИП</b> Кириллов А.В., Романов А.М. ....	72
<b>РЕЗУЛЬТАТЫ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ПО ХИМИЧЕСКОМУ СОСТАВУ ПРИРОДНЫХ ВОД НА ТЕРРИТОРИИ БЫВШЕГО СИП</b> Комлев А.В., Романов А.М., Мельничук М.А. ....	77
<b>РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ НЕОДНОРОДНОСТИ МАГНИТУД В РАБОТАХ ПО СЕЙСМИЧЕСКОМУ ЗОНИРОВАНИЮ ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН</b> Мукамбаев А.С., Михайлова Н.Н. ....	86

**ГИДРОХИМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ УЧАСТКА ПРОВЕДЕНИЯ ПЯВ  
(НА ПРИМЕРЕ ОБЪЕКТА 1315)**

Резяпова-Атаханова В.А., Горбунова Э.М. .... 93

**О ПРИЧИНАХ РАСХОЖДЕНИЙ ОЦЕНОК ЭНЕРГИТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
РАЗНЫХ ЦЕНТРОВ ОБРАБОТКИ**

Михайлова Н.Н., Рябенко О.В. .... 102

**ИЗУЧЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРУНТОВ  
НА ПРОМЫШЛЕННОЙ ПЛОЩАДКЕ АО «УМЗ»**

Рябенко П.В., Михайлова Н.Н. .... 112

**СПИСОК АВТОРОВ..... 120**

УДК 658.012.011.56:658.512

## ПЕРВЫЙ ЭТАП МОДЕРНИЗАЦИИ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО РЕАКТОРА ИВГ.1М

Коровиков А.Г., Ольховик Д.А.

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

В рамках работ по модернизации информационно-измерительной системы исследовательского реактора ИВГ.1М разработаны алгоритмы обработки данных от первичных преобразователей и экраны представления информации операторам пультов, в результате чего будет усовершенствован процесс контроля, регистрации, отображения экспериментальной информации систем автоматического управления, управления и защиты и контрольно-измерительных приборов.

### ВВЕДЕНИЕ

Целью работы является увеличение показателей надежности исследовательского реактора ИВГ.1М путем модернизации информационно-измерительной системы (ИИС).

Актуальность определяется важностью ИИС для реализации функций обеспечения безопасности любого ядерного реактора, включая реактор ИВГ.1М. Наличие точной оперативной информации о работе реактора является одним из важнейших условий разумной и адекватной реакции операторов и систем автоматического регулирования на любые ситуации, возникающие как в условиях нормальной эксплуатации, так и в аварийных ситуациях.

В рамках первого этапа работ были выполнены следующие задачи:

- проведен анализ существующих информационно-измерительных и управляющих систем РУ ИВГ.1М, ИГР, РА, ВВР-К с точки зрения аппаратных решений и используемого оборудования;
- проведен анализ структуры каналов измерения, контроля и формирования сигналов автоматической защиты и произведен расчет показателей надежности, отражающих надежность ИИС ИВГ.1М в целом;
- разработан проект модернизации ИИС ИВГ.1М, охватывающий систему автоматического управления (САУ), систему управления и защиты (СУЗ), систему контрольно-измерительных приборов и автоматики (КИПиА), систему контроля герметичности оболочек (КГО), систему дозиметрического контроля (ДК). Проект прошел государственную экспертизу и согласование в Комитете по атомной энергии;
- приобретено оборудование и программное обеспечение;
- разработана структура базы данных регистрации экспериментальных данных;
- разработаны алгоритмы обработки значений первичных преобразователей и агрегатов стендовой автоматики, в также интерфейсы экранов операторов пультов.

В настоящее время ведется монтаж оборудования, и проводятся пуско-наладочные работы.

В соответствии с планами работ на 2014–2015 годы будет осуществлена модернизация систем автоматического управления (САУ), системы управления и защиты (СУЗ) и проведена частичная модернизации системы контрольно-измерительных приборов и автоматики (КИПиА).

### АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ

В настоящее время в РК эксплуатируется три реакторных установки с исследовательскими реакторами, и одна находится в режиме длительного останова. В качестве технических средств вычислительных комплексов информационно-измерительных систем (ИИС) реакторных установок используются физически и морально изношенные аппаратные комплексы, системно организованные с использованием не менее морально устаревшего программного обеспечения. В частности, информационно-измерительная и управляющая система реактора ИВГ.1М построена с использованием терминалов на базе 16-разрядных машин: диалоговый вычислительный комплекс (ДВК), агрегатная система средств вычислительной техники (АСВТ-М), терминал вычислительной связи с объектом (СМ-1634) – семейство советских персональных компьютеров середины 80-х – начала 90-х годов XX века. В качестве операционной системы применяется агрегатная система программного обеспечения (АСПО). Данное оборудование представляет собой набор конструктивов высотой 2 м и занимающих площадь порядка 450 м<sup>2</sup>. Объем оперативной памяти каждой вычислительной машины составляет всего 128 кбайт, регистрация информации осуществляется на накопители на магнитных лентах. Основным методом вывода информации на экраны операторов является монохромный буквенно-цифровой метод без графического режима. С течением времени остро встает вопрос дальнейшей эксплуатации данного оборудования, так как сокращается количество запасных частей для восстановления работоспособности основного оборудования и сокращается количество обслуживающего персонала, способного устранить возникшие проблемы.

Анализ существующих информационно-измерительных и информационно-управляющих систем реакторных установок показал, что находящимся в эксплуатации техническим средствам присущи следующие основные недостатки:

- отсутствие унификации технических средств. Каждая из систем КИП, САУ, СУЗ, ДК, КГО реализуется на своей элементно-конструктивной базе, что приводит к аппаратурной избыточности, увеличению количества обслуживающего персонала, увеличению времени обслуживания и, как следствие, к снижению надежности системы;

- программно-технические средства ИИС не позволяют производить опрос первичных преобразователей (ПП) чаще одного раза в секунду;

- методы отображения информации отличаются низкими эргономическими показателями, сложностью восприятия и, как следствие, низкой скоростью реакции персонала на характерные события. Подсистемы отображения не соответствуют требованиям ГОСТ Р 50923-96 [1];

- жесткая конфигурация подсистемы цифровой регистрации, нет возможности расширения или изменения;

- отсутствуют программные средства анализа и обработки экспериментальной информации;

- отсутствуют средства визуализации и отображения контролируемых параметров для оператора в удобном и информативном виде;

- вычислительные комплексы, на базе которых реализованы системы, морально и технически устарели (срок эксплуатации компонентов системы составляет 15 лет и больше, что превышает назначенный ресурс работы в два и более раз), требуют значительных усилий по поддержанию их в работоспособном состоянии, подвержены частым отказам и, фактически, исчерпали свой ресурс.

### КОМПЛЕКС ТЕХНИЧЕСКИХ И ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ

Проектное решение ИИС ИВГ.1М (рисунок 1) реализовано на основе вычислительной сети радиальной топологии и включает в свой состав четырнадцать автоматизированных рабочих мест операторов (АРМ), шесть контроллеров сбора и обработки информации, два сервера базы данных (БД) и экран коллективного пользования.

ИИС ИВГ является территориально-распределенной, унифицированной по интерфейсам и протоколам системой с тремя уровнями иерархии (рисунок 1):

- *нижний уровень ИИС (уровень I)* – осуществляет функции измерения в реальном масштабе времени по заданным параметрам, сбор, регистрацию, первичную обработку измерительной информации о контролируемых технологических параметрах по всем подсистемам ИИС, формирование и выдачу сигналов предупредительной сигнализации и ава-

рийной защиты из подсистемы КИПиА в подсистему САУ;

- *средний уровень ИИС (уровень II)* – осуществляет прием данных от контроллеров подсистем нижнего уровня и регистрацию текущих значений измеряемых параметров, обработку и отображение текущего состояния подсистем нижнего уровня, передачу команд для переключения режимов контроллеров нижнего уровня;

- *верхний уровень ИИС (уровень III)* – осуществляет функции управления режимами работы ИИС ИВГ в целом; обеспечивает централизованное хранение измерительной информации за любой заданный интервал времени; координацию работы уровней ИИС между собой; информационную поддержку рабочих мест операторов (АРМ) в центральной пультовой, отображение заданных групп текущих значений измерительной и служебной информации в виде таблиц, графиков, гистограмм, мнемосхем и других визуальных фрагментов на экране коллективного пользования.

В качестве оборудования нижнего уровня системы было выбрано оборудование компании Allen-Bradley, так как оно занесено в реестр государственной системы обеспечения единства измерений Республики Казахстан и обладает высокими эксплуатационными и техническими характеристиками, в том числе по таким показателям как коэффициент готовности, средняя наработка на отказ, время восстановления, назначенный ресурс работы.

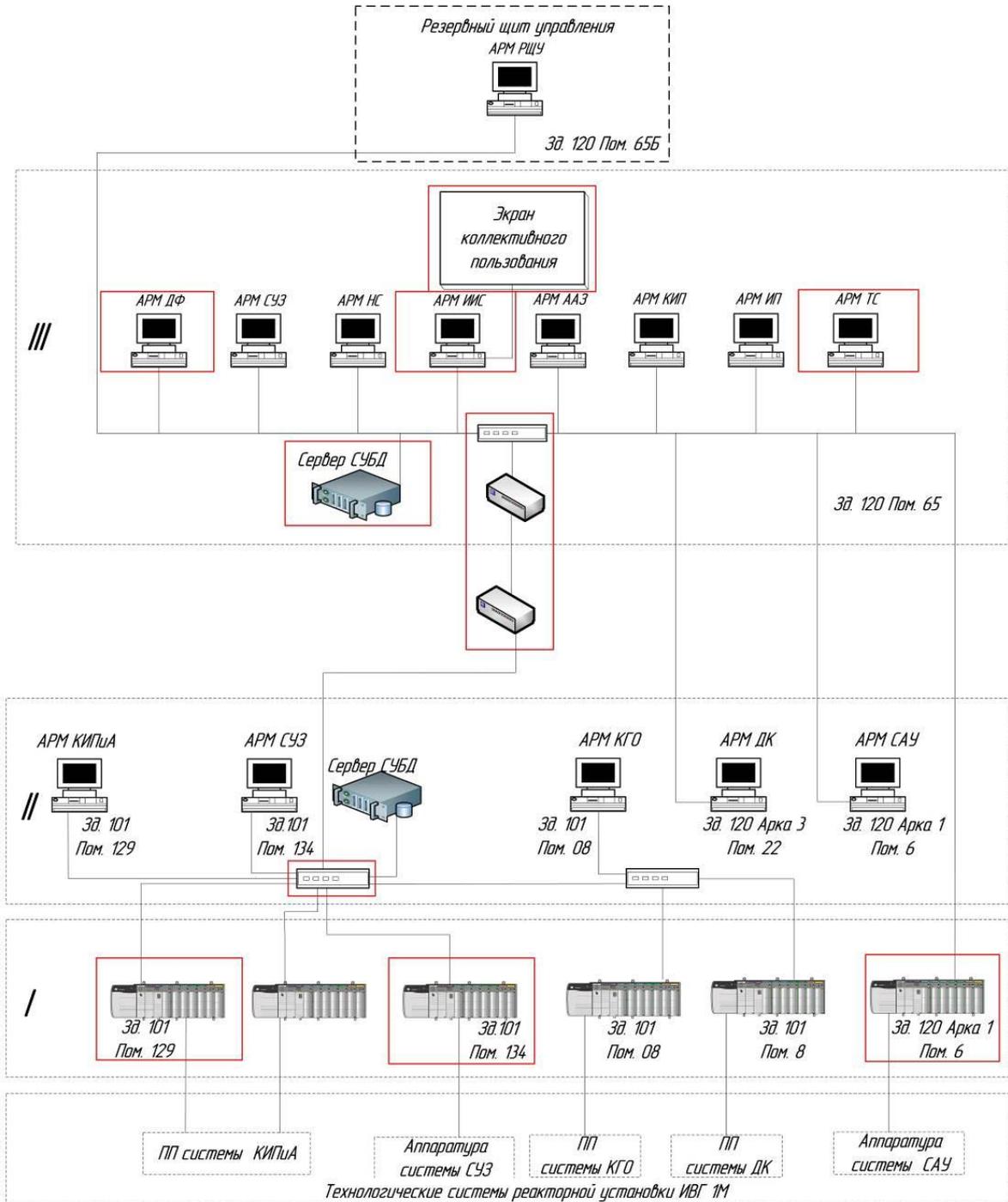
Для разработки информационно-измерительной системы реактора ИВГ.1М был выбран комплекс программного обеспечения компании Rockwell Automation: RSView32 Works, RSView32 Runtime, RSLogix 5000, RSLinx, а также база данных Microsoft SQL Server 2008.

В качестве средства программирования контроллера выбран программный продукт RSLogix 5000. Выбор обусловлен тем, что RSLogix 5000 поддерживает архитектуру ControlLogix и позволяет провести программирование контроллера ControlLogix серии 1756. В качестве программного обеспечения АРМ выбрано программное обеспечение – SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition System) система RSView32. Система RSView32 представляет собой пакет программного обеспечения на основе операционной системы MS Windows, предназначенный для разработки и выполнения прикладных программ по сбору технологических данных, оперативному контролю и управлению технологическими процессами. RSView32 включает инструменты для создания человеко-машинного интерфейса, включая анимированные графические дисплеи реального времени, тренды, а также сводки по сигналам тревоги и событиям системы, методы регистрации технологических данных. Для интеграции с другими программными продуктами и расширения функциональных возможностей разрабатываемых проектов,

**ПЕРВЫЙ ЭТАП МОДЕРНИЗАЦИИ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО РЕАКТОРА ИВГ.1М**

в RSView32 встроена поддержка таких технологий как ActiveX, VBA, OLE, ODBC, OPC и DDE. Средства настройки сетевого взаимодействия между контроллером и АРМ оператора используют драйвер прямых связей RSLinx, который позволяет использовать связи на основе наиболее распространенной технологии OPC. Технология OPC определяет 2

класса программ: OPC-сервер (OPC контроллера), непосредственно взаимодействующий с контроллером, и OPC-клиент (OPC АРМ оператора), получающий данные от OPC-сервера для дальнейшей обработки и передающий в OPC-сервер команды управления.



— оборудование первой очереди модернизации;  
ДФ – дежурный физик; ТС – технологические системы; ИП – инженер-программист;  
НС – начальник смены; ААЗ – аварийная автоматическая защита;

Рисунок 1. Структурная схема ИИС ИВГ.1М

В ИИС будет использован: «дисплейный» способ контроля и управления, «дисплейное» задание режимов работы оборудования и регуляторов, экран коллективного пользования, микропроцессорные средства нижнего уровня, высокий уровень автоматизации.

Согласно проекту технические средства ИИС ИВГ.1М обеспечат:

- 1) сбор и регистрацию измерительной информации с периодом опроса каналов 0,1; 1; 10 с;
- 2) вывод дискретных сигналов (на аппаратуру СКГО и САУ);
- 3) автономную регистрацию текущих значений измеряемых параметров по всем аналоговым и дискретным каналам с периодом регистрации на контроллерах 0,1; 1; 60 с. Общее время регистрации не менее 10 ч;

- 4) дублирование каналов опроса и регистрации системы КИПиА;
  - 5) два сервера регистрации данных;
  - 6) рассогласование во временных отсчетах между двумя серверами регистрации не более 100 мс;
  - 7) функциональную независимость всех АРМ операторов и местных пультов друг от друга;
  - 8) время готовности ИИС при включении не более 30 мин;
  - 9) вывод информации на экран коллективного пользования;
  - 10) печать отчетов;
  - 11) архивирование измерительной информации.
- Структура программного обеспечения системы приведена на рисунке 2.

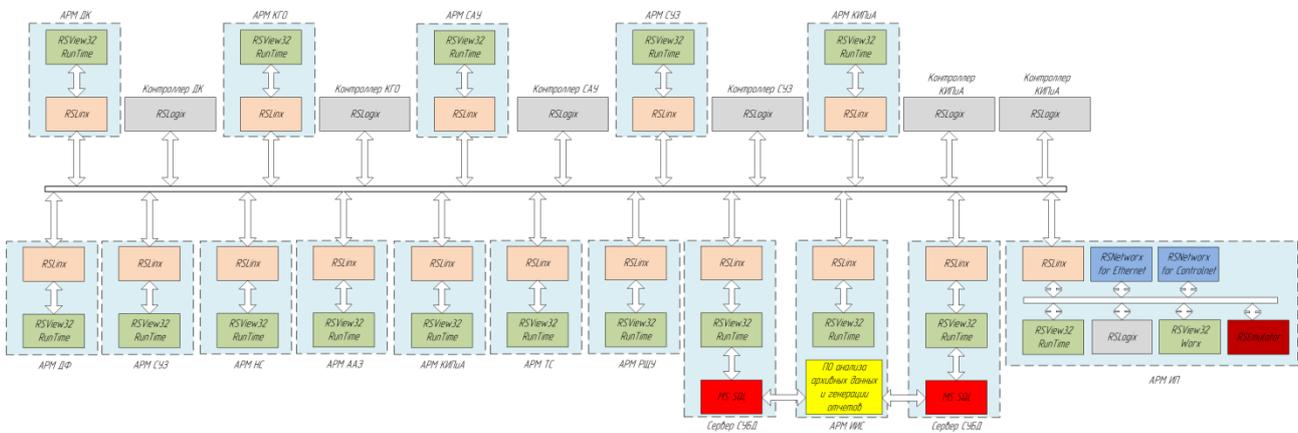


Рисунок 2. Структура программного обеспечения

Проект ИИС ИВГ.1М выполнен в соответствии с требованиями:

- ОПБ ИР-94 ПНАЭ Г-16-34-94 Общие положения обеспечения безопасности реакторов [2];
- ПБЯ-03-75 Правила ядерной безопасности исследовательских реакторов [3];
- ПНАЭ Г-7-013-89 Правила устройства и безопасной эксплуатации исполнительных механизмов органов воздействия на реактивность [4];
- ОТТ-08042462 Приборы и средства автоматизации для атомных станций. Общие технические требования [5].

### МОНТАЖ И НАЛАДКА СИСТЕМЫ

В настоящее время произведен монтаж оборудования системы САУ, автоматизированных рабочих мест операторов, экрана коллективного пользования и, ведутся работы по монтажу оборудования системы СУЗ. На рисунках 3–6 показано смонтированное оборудование.

В процессе наладки и исследования ИИС определены ее технические характеристики.

Проведена оценка объема данных, генерируемого в ИИС ИВГ.1М, максимальная частота опроса ИК, которая оставила 50 раз/с, а также максимальная частота регистрации результатов измерения на сервер – 10 раз/с.

Расчётное время эксперимента не более 6 часов, следовательно, максимальный объем данных, который будет производить макет ИИС за один эксперимент, составляет 700 МБ (таблица 1).

Таким образом, можно сделать вывод, что жесткого диска объемом 1 Тб, установленного на сервер ИИС, достаточно для сохранения данных более чем 500 экспериментов.

В процессе исследования системы представления информации (СПИ) макета ИИС проведена оценка показателей эффективности: быстродействие, точность воспроизведения информации, информационная ёмкость, разрешающая способность, актуальность отображаемой информации, произведено сравнение с существующими СПИ ИВГ.1М.



Рисунок 3. Шкаф с контроллером системы САУ



Рисунок 5. Сервер ИИС ИВГ.1М



Рисунок 4. Рабочее место оператора САУ

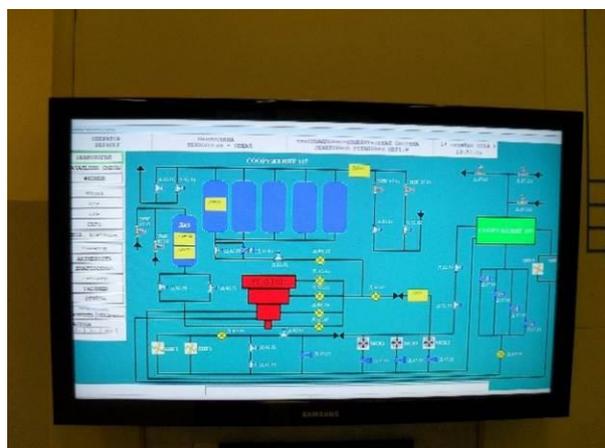


Рисунок 6. Экран коллективного пользования

Таблица 1. Максимальные потоки данных макета ИИС

№ п.п.	Система	Кол-во каналов, шт.	Частота оцифровки, раз/с	Объем данных в выборке, байт	Поток данных, кб/с	Объем данных, собранных за эксперимент, Мб	Объем данных, регистрируемых за эксперимент, Мб	
1	САУ	77	50	2	7,5	158,2	32	
2	СУЗ	Каналы аналогового ввода	32	20	4	2,5	53	27
		Каналы дискретного ввода	235	50	2	23	485	97
<b>ИТОГО, Мб</b>						<b>696</b>	<b>156</b>	

Исследование эффективности показало, что СПИ обладает:

- высоким быстродействием (современные мониторы и телевизоры имеют время отклика около 5 мс);
- высокой точностью воспроизведения информации и разрешающей способностью (отображение информации на мониторах операторов пультов осуществляется с разрешением Full HD – 1920×1080 px);
- экраны обладают высокой информационной емкостью (одновременное отображение на экране до 80 значений аналоговых каналов с точностью 0,001);

– применение SCADA-системы позволило создать несколько мнемосхем для каждого пульта оператора с возможностью их динамической смены во время эксперимента, что в свою очередь повысило показатель «актуальность отображаемой информации».

Сравнение эффективности СПИ ИИС и существующей системы ИВГ.1М показала, что разработанная ИИС значительно превосходит существующую систему по всем показателям эффективности (рисунки 7–12).

**ПЕРВЫЙ ЭТАП МОДЕРНИЗАЦИИ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО РЕАКТОРА ИВГ.1М**

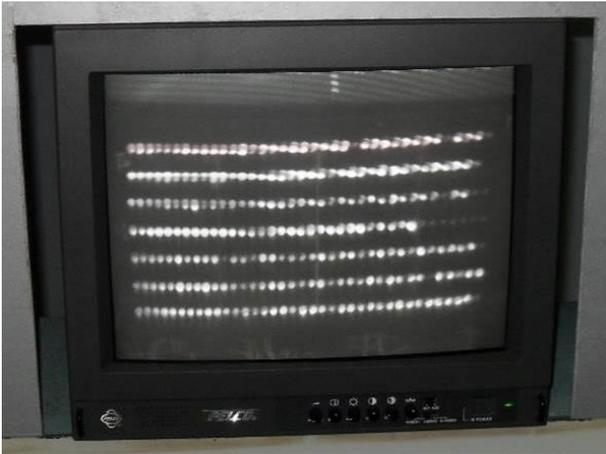


Рисунок 7. Существующая СПИ САУ ИВГ.1М



Рисунок 9. Существующая СПИ КИПиА ИВГ.1М

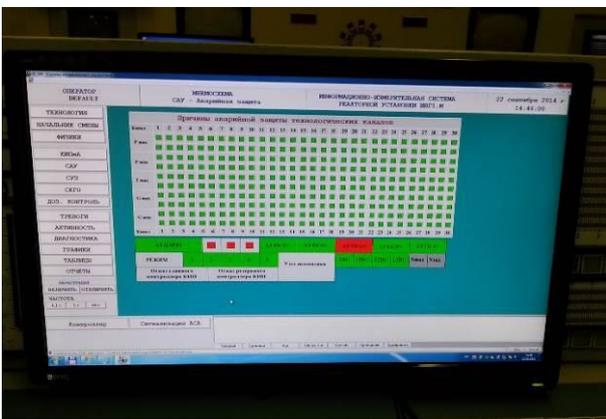


Рисунок 8. СПИ САУ ИИС

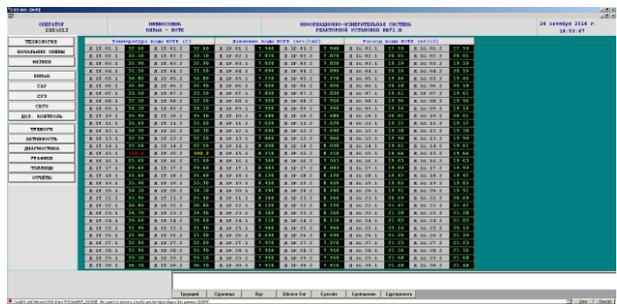


Рисунок 10. СПИ КИПиА ИИС

Время распечатки результатов эксперимента на ИИС составляет от 30 мин до 1 часа после окончания эксперимента. Распечатка проводится на лазерном принтере, в отличие от существующей системы, где распечатка производится с помощью матричного печатающего устройства. В результате сократилось время обработки экспериментальных данных, количество задействованного персонала, и как следствие – снизились трудозатраты, улучшилось качество печати и удобство обработки информации вследствие применения современных программных продуктов работы с массивами данных.

ИИС создана с учетом возможного наращивания системы в дальнейшем, а именно: контроллеры системы имеют свободные слоты для установки модулей аналогового или дискретного ввода/вывода, возможно увеличение пультов операторов, местных пультов, мониторов экрана коллективного пользования.

Проводя оценку показателей надежности ИИС, получены следующие значения (таблица 2).



Рисунок 11. Существующая СПИ СУЗ ИВГ.1М

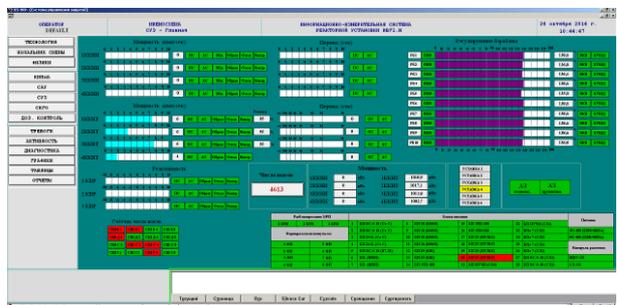


Рисунок 12. СПИ СУЗ ИИС

*Таблица 2. Показатели надежности макета ИИС*

Причина отказа компонента системы	Время восстановления ( $t_{в}$ ), ч	Наработка компонента на отказ ( $t_{ср}$ ), ч	Коэффициент готовности
Замена контроллера 1756-L61	3	815822	0,99999
Замена модуля аналогового ввода 1756-IF16	1	2094159	0,99999
Замена модуля дискретного ввода 1756-IB32	1	2468448	0,99999
Замена модуля дискретного вывода 1756-OB32	1	1278125	0,99999
Замена блока питания контроллера	1	5884430	0,99999
Замена блока питания нормирующего преобразователя	1	239000	0,99999

Показатель «время восстановления» действующей системы получен на основе хронометража действий во время проведения пуско-наладочных работ перед экспериментом и действий персонала при отказе системы во время проведения эксперимента.

Показатель «Наработка на отказ» отражает среднюю продолжительность работы устройства между ремонтами (величину наработки в среднем на один отказ). Значения показателя «Наработка на отказ» получено из технических паспортов [6, 7] компонентов систем.

Анализ данных показывает, что применяемые основные компоненты макета соответствуют современным требованиям [5], предъявляемым к системам контроля и управления реакторных установок.

Расчет свидетельствует о том, что вероятность того, что системы САУ и СУЗ окажутся в работоспособном состоянии более 99,99% и соответствует ГОСТ [5].

Кроме того, имеется возможность увеличения надежности системы в целом, за счет установки дополнительного сервера регистрации данных, установки дополнительных резервных контроллеров наиболее ответственных подсистем (СУЗ, КИПиА), создания закольцованного сегмента передачи данных между зданиями 120 и 101.

Экспериментально полученные оценки погрешности для вторичной части измерительного канала не превышают расчетных значений допускаемой погрешности измерительного канала (приведенная погрешность не более 1,25%). Прохождение сигналов аналоговых и дискретных каналов соответствует заданию на проектирование «Информационно-измерительная система исследовательского реактора ИВГ.1М. Техническое переоснащение и реконструкция в целях повышения эксплуатационной надежности» инв. № 155 от 09.10.2008 г. Алгоритмы преобразования датчиков соответствуют номинальным статическим характеристикам первичных преобразователей.

Результаты исследования показали, что макет ИИС обладает высокими техническими и эксплуатационными показателями:

– *Быстродействие.* За счет применения современного оборудования и программного обеспечения, производства компании Allen Bradley, достигнута частота опроса всех ИК системы 50 Гц и скорость

регистрации данных на сервер – 10 Гц. Данный показатель более чем в 10 раз превышает показатели существующих ИИС исследовательских реакторных установок РК;

– *Масштабируемость.* Предложенная многоуровневая структура системы позволяет увеличивать количество контроллеров, модулей в контроллерах, местных пультов, станций операторов. Новые контроллеры могут располагаться практически в любом помещении реакторной установки, для включения в систему, необходимо лишь привести интерфейс Ethernet в это помещение. При современном развитии сетевых технологий это не составляет труда (медный или оптический кабель, Wi-Fi и т.д.);

– *Надежность.* Разработанный макет системы обладает высокой надежностью, за счет применения основного оборудования, обладающего высокими показателями наработки на отказ (MTBF), например, показатель MTBF контроллера системы составляет 815822 часов или средняя продолжительность работы устройства между ремонтами около 93 лет. Расчет свидетельствует о том, что вероятность того, что системы САУ и СУЗ окажутся в работоспособном состоянии более 99,99% и соответствует ГОСТ;

– *Удобство использования.* Предложенные методы отображения информации (SCADA-система, станции операторов, местные пульта, экран коллективного пользования на базе жидкокристаллического телевизора), за счёт более гибкой структуры и централизации источника информации для локальных пультов операторов и экрана коллективного пользования, предоставляет функциональный инструмент организации экспериментальной информации в различных режимах эксплуатации реакторной установки и позволяет наращивать и модернизировать систему с сохранением базовых принципов эффективности;

– *Автоматическая диагностика и метрологическая аттестация.* В макете ИИС применено оборудование и первичные преобразователи, входящие в реестр государственной системы обеспечения единства измерений Республики Казахстан. Разработанное ПО позволяет проводить статическую и динамическую диагностику оборудования, включающую в себя программный и аппаратный Watchdog контроллеров системы.

## ВЫВОДЫ

Актуальность разработки проекта определяется важностью ИИС для реализации функций обеспечения безопасности любого ядерного реактора, включая реактор ИВГ.1М. Наличие точной оперативной информации о работе реактора является одним из важнейших условий разумной и адекватной реакции операторов и систем автоматического регулирования на любые ситуации, возникающие как в условиях нормальной эксплуатации, так и в аварийных ситуациях. Поэтому разработка и реализация проекта способствует становлению современной культуры безопасной и надежной эксплуатации не только исследовательского ядерного реактора ИВГ.1М, но и других исследовательских реакторов в Республике Казахстан.

В разработанной ИИС реактора ИВГ.1М применены эргономические оформленные рабочие места операторов управления реакторной установки, экран коллективного пользования, разработана система аварийной защиты и предупредительной сигнализации, организована регистрация данных на сервер СУБД. Предложенные решения лежат в основе соз-

дания надёжной ИИС реакторной установки с высокими техническими и эксплуатационными характеристиками.

Данная работа уникальна, так как подобные работы и исследования ранее не проводились применительно к ИИС исследовательских реакторов Республики Казахстан. Таким образом, разработанная ИИС ИВГ.1М демонстрирует возможность создания, исследования и внедрения современных систем измерения и контроля на сложных и опасных объектах.

Работы по созданию ИИС находятся на заключительной стадии первого этапа, оформление эксплуатационной документации и ввода в эксплуатацию. ИИС используется как дублирующая система регистрации ИК СУЗ и САУ при реальных пусках реакторной установки ИВГ.1М. Планируется дальнейшее расширение системы (создание систем КИПиА, контроля герметичности оболочек, дозиметрического контроля).

*Работа выполнена в рамках проекта грантового финансирования Комитета науки МОН РК.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р 50923-96. Дисплей. Рабочее место оператора. Общие эргономические требования и требования к производственной среде. Методы измерения. – М.: Изд-во стандартов, 1988.
2. ОПБ ИР-94 ПНАЭ Г-16-34-94. Общие положения обеспечения безопасности реакторов. – М.: Изд-во стандартов, 1994.
3. ПБЯ-03-75. Правила ядерной безопасности исследовательских реакторов. – М.: Изд-во стандартов, 1975.
4. ПНАЭ Г-7-013-89. Правила устройства и безопасной эксплуатации исполнительных механизмов органов воздействия на реактивность. – М.: Изд-во стандартов, 1989.
5. ОТТ-08042462. Приборы и средства автоматизации для атомных станций. Общие технические требования. – М.: Изд-во стандартов, 2000.
6. Rockwell Automation. Using ControlLogix in SIL2 applications. 1756 Series: safety reference manual. – 2006.
7. TDK-Lambda. DPP Series: Datasheet. – 2013.

## ИВГ.1М ЗЕРТТЕУЛІК РЕАКТОРЫНЫҢ АҚПАРАТТЫҚ-ӨЛШЕУ ЖҮЙЕСІН ЖАҢАРТУДЫҢ БІРІНШІ КЕЗЕҢІ

Коровиков А.Г., Ольховик Д.А.

*Қазақстан, Курчатов қ., ҚР ҰАО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы*

ИВГ.1М зерттеу реакторының ақпараттық-өлшеу жүйесін жаңғырту жұмыстарының шеңберінде бірінші түрлендіргіштерден келіп түскен деректерді өңдеу алгоритмдері және пульт операторларына ақпарат ұсыну экрандары әзірленді, нәтижесінде автоматты басқару, басқару және қорғау жүйелерінің, бақылау-өлшеу аспаптарының эксперименттік ақпаратын бақылау, тіркеу, көрсету процесі жетілдірілетін болады.

## FIRST STAGE OF THE UPDATING THE INFORMATION AND MEASURING SYSTEM OF IVG.1M RESEARCH REACTOR

A.G. Korovikov, D.A. Olkhovik

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

As a part of modernization of the information and measuring system of the IVG.1M research reactor, data processing algorithms from primary transducers and displays representing information to console operator are developed. The process of control, logging, displaying experimental data of automatic control systems, control and protection of instrumentation and measuring devices will be upgraded as a result of this work..

УДК 539.16.04

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИФФУЗИИ В БИНАРНЫХ СПЛАВАХ  
ПРИ РАДИАЦИОННОМ ОБЛУЧЕНИИ**<sup>1)</sup> Колосков В.М., <sup>2)</sup> Короткий А.И., <sup>2)</sup> Субботин Ю.Н., <sup>2)</sup> Цепелев И.А., <sup>2)</sup> Черных Н.И.<sup>1)</sup> Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, Россия<sup>2)</sup> Институт математики и механики им. Н.Н. Красовского УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

На модели диффузии в бинарных сплавах исследуется влияние интенсивного радиационного облучения на материал оболочек твэлов. В условиях квазистационарного приближения по вакансиям найдены установившиеся (стационарные) распределения концентраций компонент сплава внутри зерен и оценено время выхода распределений на стационарный режим. Проведено численное моделирование процесса перераспределения концентраций и исследовано влияние диффузионных подвижностей компонент сплава на этот процесс.

**ВВЕДЕНИЕ**

Радиационная стойкость материала оболочек твэлов быстрого реактора (БР) определяет условия безопасной эксплуатации активной зоны реактора и уровень предельного выгорания топлива. Степень выгорания ядерного топлива — основной показатель экономической эффективности атомных электростанций. Уже в ближайшей перспективе для конкурентного развития направления БР требуется обеспечить выгорание по делящимся атомам ~14%. Для материала оболочек твэлов БР этому пределу соответствует дозовый интервал  $\sim(110\div 120)$  сна. При этом материал должен сохранить приемлемые для эксплуатации механические свойства и формоизменение твэла не должно превосходить заданных пределов.

Достижение этого предела дозы требует развития новых подходов для разработки конструктивных материалов. Существующие принципы разработки материалов оболочек твэлов оказались не эффективными для дозового интервала более 90 сна [1, 2]. Представляется, что имеет место системный кризис: физические принципы описания эволюции материалов при облучении исторически сформированы на основе экспериментов при малых дозах облучения и перенесены на описание больших доз [1, 3, 4]. Корректность этого переноса спорна. Но и опытно-промышленный путь решения данной проблемы на примере реактора БН-600 экономически не оправдан. Было предпринято несколько попыток создания моделей структурной и фазовой эволюции материала при радиационном воздействии на основе описания баланса точечных дефектов в материале [4–6]. К сожалению, эти модели содержат такие параметры рекомбинации и диффузионные константы, которые не имеют надежной методики определения. Стимулированные радиационным облучением концентрационные, фазовые и структурные изменения материала в процессе облучения снижают ценность таких расчетов, т.к. предугадать значения и характер изменений констант рекомбинации и параметров стоков представляет собой весьма трудную задачу. Кроме того, при описании, как правило, фиксируют

ся диффузионные параметры среды, а это еще более отдаляет полученные результаты от реальных условий. Тем не менее, проделанная работа крайне полезна с точки зрения развития физических представлений, определения соотношений между параметрами и влияния диффузионных и структурных характеристик материала на скорость протекания процессов [3, 5].

Создание модельного описания эволюции свойств и оценки ресурсных возможностей материала оболочек твэлов БР вновь актуальная задача атомной энергетики. Принимая во внимание значительное время эксплуатации тепловыделяющей сборки и различие температурных режимов, приходим к необходимости особой аккуратности при выборе принципов описания. Введение в основу модели приближенных выражений, или исключение из внимания пространственной структуры диффузионной среды, может привести к значительному отклонению стационарных решений от реального поведения материала при длительном радиационном воздействии. Именно стационарные решения могут служить основой для оценки ресурсных возможностей материала [7, 8]. Первичным кластером для построения модели необходимо брать зерно поликристаллического материала оболочки твэла. Модели, использующие представление об однородной бесконечной среде или регулярной решетке микрокластеров [3, 5], как думается, не могут дать приемлемого описания концентрационной и структурной эволюции материала на больших временах. Тем не менее, в рамках этих моделей был выявлен ряд новых физических аспектов [3, 5].

Общепринятое представление о случайном характере распределения стоков неравновесных точечных дефектов и их равнозначности при эволюции материала при интенсивном облучении ошибочно. На инкубационной стадии преимущественно работают внутренние дислокационные стоки в объеме зерен, а уже на линейной стадии распухания основным стоком становятся границы зерен (ГЗ) и характер диффузионных потоков становится направлен-

ным. На развитой стадии набухания структура вакансионных пор становится упорядоченной и ГЗ приобретает свойства преференсного стока для неравновесных собственных межузельных атомов, а поры в объеме зерна – для вакансий. Фактически происходит разделение потоков неравновесных вакансий и межузельных атомов, которые оседают на различных стоках. Этот этап эволюции сопровождается микроструктурными изменениями в ГЗ, которые усиливают неравновесные вакансионные потоки к развитым порам за счет взаимодействия дисклинационных дефектов. Этот «экстра» поток вакансий существенно увеличивает скорость роста пор в объеме зерен, что и приводит к значительному возрастанию скорости набухания.

Основными по длительности являются инкубационный и линейный этапы набухания и основным механизмом на этих этапах, приводящим к деградации сопротивляемости материала к радиационному воздействию, является концентрационное изменение в кристалле вследствие направленного потока неравновесных точечных дефектов к структурным стокам и различия в диффузионной подвижности атомов базовых компонент сплава. Концентрационное перераспределение, вызванное направленным диффузионным потоком неравновесных точечных дефектов к стокам, удаляет концентрационный состав части объема зерна от состава с минимумом набухания, который определен в данном классе сталей. Базовая концентрационная композиция материала будет более устойчива к радиационному воздействию, если влияние обратного эффекта Киркендалла будет минимизировано. Представляется, что для повышения предела радиационной стойкости материалов оболочек твэлов выше дозовой нагрузки 110 сна необходимо, прежде всего, подавление обратного эффекта Киркендалла. Эти соображения и роль уменьшения разницы в подвижностях компонент материала твэла иллюстрируются проведенным в работе численным моделированием.

#### ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Рассмотрим обобщенную одномерную модель эволюции концентрационного состава внутри зерна для бинарного сплава с базовыми компонентами А и В (рис.1). На левой границе (центр зерна) примем отсутствие градиентов по концентрации неравновесных точечных дефектов и базовых атомов материала и считаем справедливым условие сохранения вещества в диффузионном континууме. На правой границе (сток бесконечной мощности) введем ограничение по скорости рекомбинации неравновесных точечных дефектов вакансий и межузельных атомов.

Уравнения диффузии для компонент сплава и вакансий можно записать в виде

$$\frac{\partial C_\alpha}{\partial t} = -\frac{\partial J_\alpha}{\partial x}, \quad t \geq 0, \quad 0 \leq x \leq L, \quad \alpha = A, B, V.$$

Описание эволюции концентрационного состава построим на основе модели дырочного газа, предложенной К.П. Гуровым [9]. Опираясь на формализм введения конвективной скорости течения материала при направленных потоках точечных дефектов можно получить следующие общие выражения для потоков компонент бинарного сплава и вакансий, используя систему отсчета, связанную с кристаллической решеткой [7, 8, 9] (для краткости обозначаем  $\omega'_A = \omega_A, \omega'_B = \omega_B$ ):

$$J_A = -a^2(1 + \eta C_A(1 - C_A))C_V \frac{\partial C_A}{\partial x} - b^2 C_A(1 - C_A),$$

$$J_B = -a^2(1 + \eta C_B(1 - C_B))C_V \frac{\partial C_B}{\partial x} + b^2 C_B(1 - C_B),$$

$$J_V = -D_V \frac{\partial C_V}{\partial x} + \left[ \omega_A \left( 1 + C_A \frac{g_A}{RT} \right) - \omega_B \left( 1 + C_B \frac{g_B}{RT} \right) \right] C_V \frac{\partial C_A}{\partial x},$$

где  $a^2 = \frac{\omega_A \omega_B}{D_V}$ ,  $b^2 = \frac{(\omega_A - \omega_B)J_V}{D_V}$ ,  $D_V = C_A \omega_A + C_B \omega_B$ ;

$C_A, C_B$  – концентрации компонент А и В в диффузионной зоне;

$\omega_A = \exp[-Q_A^m / (RT)]$ ,  $\omega_B = \exp[-Q_B^m / (RT)]$  – диффузионная подвижность атомов сорта А и В при самодиффузии (для определенности примем  $\omega_A > \omega_B$ );

$C_V$  и  $D_V$  – концентрация и коэффициент диффузии вакансий;

$$\eta = \frac{1}{RT} \left( \frac{\partial Q_B^m}{\partial C_A} - \frac{\partial Q_A^m}{\partial C_A} \right) - \text{параметр термодинамической активности атомов сорта А};$$

$Q_A^m, Q_B^m$  – энергии активации миграции атомов сорта А и В при самодиффузии;

$R$  – универсальная газовая постоянная;

$T$  – абсолютная температура;

$$g_A = RT \frac{\partial \omega_A}{\partial C_A} \omega_A^{-1}, \quad g_B = RT \frac{\partial \omega_B}{\partial C_B} \omega_B^{-1}.$$

В объеме зерна концентрационные перераспределения базовых примесей формирует преимущественно поток вакансий. Потоки межузельных атомов практически не вносят вклада в перераспределение концентраций в объеме зерен, но изменяют концентрационный состав у границ зерен. Для концентраций и потока вакансий справедливы соотношения

$$J_A + J_B + J_V = 0, \quad C_A + C_B + C_V = 1, \quad C_V \ll 1,$$

$$\int_0^L C_A(t, x) dx = L C_{A0}, \quad t \geq 0,$$

где  $C_{A0}$  – начальное (в момент  $t = 0$ ) равномерное и постоянное распределение концентрации элемента А по длине зерна.

Как отмечалось выше, основным механизмом перераспределения атомов в объеме зерен является обратный эффект Киркендалла. Проведем анализ концентрационных изменений, приняв поток вакансий стационарным.

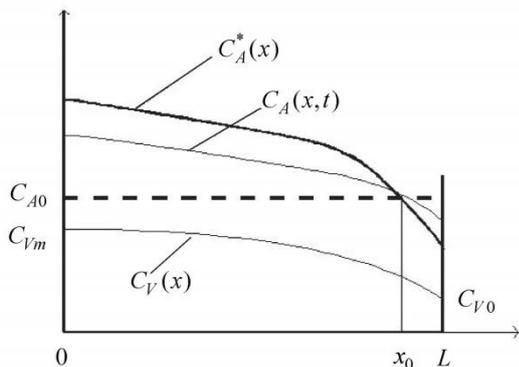


Рисунок 1. Модельная схема «однородно распределенный источник – диффузионный континуум – сток»

#### СТАЦИОНАРНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИЙ

Уравнение диффузии для вакансий можно записать в виде

$$\frac{\partial C_V}{\partial t} = D_V \frac{\partial^2 C_V}{\partial x^2} + g, \quad t \geq 0, \quad 0 \leq x \leq L, \quad (1)$$

где  $g$  — постоянный источниковый член.

Примем условие квазистационарности профиля концентраций вакансий  $C_V = C_V(x)$  и постоянства коэффициента диффузии вакансий  $D_V$ . Для стока ( $x = L$ ) запишем граничные условия для потока и концентрации

$$-D_V \frac{\partial C_V(L)}{\partial x} = gL, \quad D_V C_V(L) (k_V)^2 = gL, \quad (2)$$

где  $k_V$  — константа рекомбинации [10].

Из (1) и (2) находим стационарное распределение вакансий [8]

$$C_V(x) = -\frac{g}{2D_V} (x^2 - V^2), \quad 0 \leq x \leq L, \quad (3)$$

$$V^2 = L^2 + \frac{2L}{(k_V)^2},$$

причем  $C_{Vm} = C_V(0) = \frac{gV^2}{2D_V}$ ,  $C_{V0} = C_V(L) = \frac{gL}{D_V(k_V)^2}$ ,

$$C_{V0} \leq C_V(x) \leq C_{Vm}, \quad 0 \leq x \leq L.$$

Начально-краевую задачу для определения концентрации элемента А можно записать в виде

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = -\frac{\partial J_A}{\partial x}, \quad t \geq 0, \quad 0 \leq x \leq L, \quad (4)$$

$$C_A(0, x) = C_{A0}, \quad 0 \leq x \leq L, \quad (5)$$

$$J_A(t, 0) = 0 = J_A(t, L), \quad t \geq 0. \quad (6)$$

Для установившегося (стационарного) распределения концентрации  $C_A^* = C_A^*(x)$ ,  $0 \leq x \leq L$ , элемента А получаем обыкновенное дифференциальное уравнение первого порядка

$$J_A \Big|_{C_A=C_A^*} = 0, \quad 0 \leq x \leq L, \quad \int_0^L C_A^*(x) dx = LC_{A0}.$$

Для стационарного распределения профиля концентраций компоненты А на отрезке  $[0, L]$  (оно получено разложением аналитически строгого решения в ряд Тейлора в точке  $C_A = 0.5$ , при постоянных  $D_V$  и  $\eta$ ) находим [8]

$$C_A^*(x) = C_{A0} - \frac{(\omega_A - \omega_B)}{\eta a^2} \times \left\{ \ln \left[ \frac{x^2 + V^2}{2V^2} \right] - 2 \left[ \frac{V}{L} \operatorname{arctg} \left( \frac{L}{V} \right) - 1 \right] \right\}.$$

Условие сохранения исходного состава  $C_{A0}$  (и тем самым исходных свойств) определяется равенством диффузионных подвижностей атомов  $\omega_A = \omega_B$  компонент сплава. При построении модели принимались во внимание константы самодиффузии. Из этого можно сделать вывод, что стабильность сплава достигается при одинаковых энергиях миграции компонент. Это и есть условие подавления обратного эффекта Киркендалла. Этот вывод находит и практическое подтверждение [12, 13].

#### ОЦЕНКА ВРЕМЕНИ ДОСТИЖЕНИЯ СТАЦИОНАРНОГО СОСТОЯНИЯ

Введем в рассмотрение параметр  $\varepsilon \in (0, 1)$  (степень достижения стационарного состояния) и параметр  $t_\varepsilon \geq 0$  (время достижения стационарного состояния при заданной степени достижения  $\varepsilon$ ), характеризующие условиями

$$\|z(t, \cdot)\|^2 \leq \varepsilon \|z(0, \cdot)\|^2 \quad \text{при } t \geq t_\varepsilon,$$

где  $\|z(t, \cdot)\|^2 = \int_0^L z(t, x)^2 dx$ ,  $z(t, x) = C_A(t, x) - C_A^*(x)$ .

Достижение стационарного состояния по концентрационным распределениям означает отсутствие дальнейших перестроек в решетке в объеме зерна. Генерируемые точечные дефекты усваиваются в этом случае преимущественно на ближайших собственных кластерах (вакансии) или границах зерен (межузельные атомы). Это приводит к неконсервативному движению границ зерен и появлению в ансамбле зерен дисклинационных диполей, способных

к генерации неравновесных вакансий и формированию трансграничных диффузионных потоков [12]. Определение времени достижения стационарного состояния – важный параметр модели и количественно, по нашему мнению [7], может быть использован для оценки ресурса материала. Определение этого параметра выполним, исследуя сходимость среднеквадратичной нормы к нулю, полученной из нестационарной задачи.

Вычитая из краевой задачи (4)–(6) для  $C_A$  аналогичную краевую задачу для  $C_A^*$ , получим краевую задачу для  $z = C_A - C_A^*$ . В этой задаче первое основное уравнение умножим на  $z$  и проинтегрируем получившееся равенство по  $x$  от 0 до  $L$ . После несложных преобразований [14; гл. 3, § 3] получим неравенство

$$\frac{d\|z(t, \cdot)\|^2}{dt} \leq \left[ -2a^2 C_{V\min} + b^2 \left( \frac{\eta C_{V\max}}{2C_{V\min}} + 2 \right) \frac{L}{2} \right] \left\| \frac{\partial z(t, \cdot)}{\partial x} \right\|^2.$$

Исходя из оценки членов в квадратных скобках (в частности, при достаточно малом  $b$ ) и неравенства Пуанкаре [14; с. 62, 64], получим

$$\frac{d\|z(t, \cdot)\|^2}{dt} \leq -a^2 C_{V\min} \frac{2}{L^2} \|z(t, \cdot)\|^2.$$

Из неравенства Гронуолла [14; с. 152] вытекает оценка

$$\|z(t, \cdot)\|^2 \leq \|z(0, \cdot)\|^2 \exp(-\gamma t), \quad \gamma = a^2 C_{V\min} \frac{2}{L^2}.$$

Введя в рассмотрение степень достижения стационарного состояния  $\varepsilon$ , получим неравенство

$$\|z(t, \cdot)\|^2 \leq \|z(0, \cdot)\|^2 \exp(-\gamma t) \leq \varepsilon \|z(0, \cdot)\|^2,$$

из которого вытекает значение времени достижения

$$t^* = \frac{-\ln \varepsilon}{\gamma} = \frac{L D_V k_V^2}{2a^2 g} \ln \varepsilon.$$

Из полученной формулы, в частности, следует, что продлению ресурса способствует повышение константы рекомбинации стока, уменьшение диффузионной миграционной подвижности базовых атомов сплава и увеличение размера зерен.

#### ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИФФУЗИИ

Рассмотрим нестационарный диффузионный процесс перераспределения концентрации элементов бинарного (А,В) сплава в объеме зерна (4)–(6) при направленном потоке вакансий к стоку в условиях квазистационарности профиля концентраций вакансий, когда  $C_V = C_V(x)$  (3).

Учитывая выражения для  $J_A$  и  $J_V$ , уравнение (4) можно записать в виде

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \kappa(x, C_A) \frac{\partial C_A}{\partial x} \right) - \frac{\partial f(x, C_A)}{\partial x}, \quad (7)$$

$$t \geq 0, \quad 0 \leq x \leq L,$$

где

$$\begin{aligned} \kappa(x, C_A) &= \frac{\omega_A \omega_B}{D_V} \left[ 1 + C_A(1 - C_A) \frac{\eta}{RT} \right] C_V + (\omega_A - \omega_B) \times \\ &\times C_A(1 - C_A) \left[ \omega_A \left( 1 + C_A \frac{g_A}{RT} \right) - \omega_B \left( 1 + C_A \frac{g_B}{RT} \right) \right] \frac{C_V}{D_V} + \\ &+ C_A(1 - C_A) g \frac{(\omega_A - \omega_B)^2}{D_V^2} \left( -\frac{x^2}{2} + \frac{L^2}{2} + \frac{L}{(k_V)^2} \right), \\ f(x, C_A) &= -(\omega_A - \omega_B) C_A(1 - C_A) g \frac{x}{D_V}. \end{aligned}$$

Опишем схему численных расчетов. Аппроксимируем производную по времени методом Эйлера и выпишем двухслойную неявную разностную схему для решения задачи (7)

$$\frac{C_A^{n+1} - C_A^n}{\tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \kappa(x, C_A^n) \frac{\partial C_A^{n+1}}{\partial x} \right) - \frac{\partial f(x, C_A^n)}{\partial x}, \quad (8)$$

$$0 \leq x \leq L,$$

где  $C_A^n = C_A(t_n, x)$ ,  $0 \leq x \leq L$ ,  $\tau$  – шаг сетки по времени. В момент времени  $t_{n+1}$  получаем уравнение Пуассона для нахождения искомой функции  $C_A^{n+1}$ .

Аппроксимируем граничные условия следующим образом

$$J_A(t_{n+1}, 0) = \kappa(0, C_A^{n+1}(0)) \frac{\partial C_A^{n+1}(0)}{\partial x} - f(0, C_A^{n+1}(0)) = 0,$$

откуда находим

$$\frac{\partial C_A^{n+1}(0)}{\partial x} = \frac{f(0, C_A^{n+1}(0))}{\kappa(0, C_A^{n+1}(0))} = \frac{f(0, C_A^n(0))}{\kappa(0, C_A^n(0))} = 0,$$

поскольку при  $x=0$  имеем  $f(0, C_A) = 0$ . Условие

$$\frac{\partial C_A^{n+1}(x=0)}{\partial x} = 0 \quad \text{равносильно условию} \quad J_A(t, 0) = 0.$$

На правом конце отрезка имеем

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_A^{n+1}(x=L)}{\partial x} &= \frac{f(L, C_A^{n+1}(L))}{\kappa(L, C_A^{n+1}(L))} = \frac{f(L, C_A^n(L))}{\kappa(L, C_A^n(L))} + o(h) = \\ &= \frac{f(L, C_A^n(L-h))}{\kappa(L, C_A^n(L-h))} + o(h) = \frac{f(L-h, C_A^n(L-h))}{\kappa(L-h, C_A^n(L-h))} + o(h), \end{aligned}$$

где  $h = L/N$  – шаг разбиения отрезка  $[0, L]$ . Условие

$$\frac{\partial C_A^{n+1}(x=L)}{\partial x} = 0 \quad \text{не равносильно условию}$$

$$J_A(t, L) = 0.$$

Расчет решения  $C_A^{n+1} = C_A^{n+1}(x)$ ,  $0 \leq x \leq L$ , предлагается вести итерационным алгоритмом с уточнением граничного условия. В качестве начального приближения возьмем функцию  $U^{(0)} = C_A^n(x)$ ,  $0 \leq x \leq L$ . Следующие приближения находятся решением краевой задачи

$$\frac{U^{(k+1)} - U^{(k)}}{\tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \kappa(x, U^{(k)}) \frac{\partial U^{(k+1)}}{\partial x} \right) - \frac{\partial f(x, U^{(k)})}{\partial x},$$

$$0 \leq x \leq L,$$

$$\frac{\partial U^{(k+1)}(0)}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial U^{(k+1)}(L)}{\partial x} = \beta_L^{k+1},$$

где либо  $\beta_L^{k+1} = \frac{f(L, U^{(k)}(L))}{\kappa(L, U^{(k)}(L))}$ ,

либо  $\beta_L^{k+1} = \frac{f(L, U^{(k)}(L-h))}{\kappa(L, U^{(k)}(L-h))}$ ,

либо  $\beta_L^{k+1} = \frac{f(L-h, U^{(k)}(L-h))}{\kappa(L-h, U^{(k)}(L-h))}$ .

Итерационный процесс заканчивается на шаге с номером  $k = M$ , и  $U^{(M)}$  принимается за аппроксимацию  $C_A^{n+1} = C_A^{n+1}(x)$ ,  $0 \leq x \leq L$ . Для нахождения решения  $C_A^{n+1} = C_A^{n+1}(x)$ ,  $0 \leq x \leq L$ , можно было бы вместе с уравнением (8) использовать граничные условия

$$\frac{\partial C_A(t, 0)}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial C_A(t, L)}{\partial x} = \frac{dC_A^*(L)}{dx},$$

где  $C_A^*$  — установившееся решение задачи.

Для нахождения стационарного решения требуется решить задачу Коши для обыкновенного дифференциального уравнения

$$\kappa(x, C_A^*) \frac{dC_A^*}{dx} = f(x, C_A^*), \quad 0 \leq x \leq L.$$

Начальное условие (при  $x = 0$ ) можно определить из

$$\int_0^L C_A^*(x) dx = LC_{A0}.$$

Ясно, что  $\frac{dC_A^*(x=0)}{dx} = 0$ , поскольку

$$f(0, C_A^*) = 0.$$

Приведем характерные значения и диапазоны значений используемых величин:

$$t > 0 \text{ (с)}, \quad 0 \leq x \leq L \text{ (м)}, \quad 0.1 \leq C_{A0} \leq 0.5 \text{ (безразм.)},$$

$$Q_A = 152 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}, \quad Q_B = 158 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}, \quad R = 8.314 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}},$$

$$(k_v)^{-2} = 10^{-6} \text{ м}, \quad g = 10^{-6} \frac{1}{\text{с}}, \quad \eta = 0.21 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}, \quad L = 10^{-5} \text{ м},$$

$$g_A = 0.203 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}, \quad g_B = 0.416 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}, \quad T = 750 \text{ К}.$$

При численном моделировании задача предварительно приводилась к безразмерному виду, масштаб времени равнялся одному месяцу, масштаб длины равнялся  $L$ .

Приведем сначала результаты расчетов некоторых вариантов задачи.

**Вариант 1.** Численное моделирование решения начально-краевой задачи

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \kappa(x, C_A) \frac{\partial C_A}{\partial x} \right) - \frac{\partial f(x, C_A)}{\partial x}, \quad t \geq 0, \quad 0 \leq x \leq L,$$

$$\frac{\partial C_A(t, x=0)}{\partial x} = 0 = \frac{\partial C_A(t, x=L)}{\partial x}, \quad t \geq 0,$$

$$C_A(t=0, x) = 0.4, \quad 0 \leq x \leq L.$$

Для численных расчетов использовалась консервативная схема аппроксимации дифференциальных операторов [15, с. 141]. Схема имеет второй порядок точности по  $x$  и первый по  $t$ . Установившееся решение изображено черной пунктирной линией на рис. 2.

**Вариант 2.** Численное моделирование решения обыкновенного дифференциального уравнения, описывающего стационарное (установившееся) решение

$$\kappa(x, C_A^*) \frac{dC_A^*}{dx} = f(x, C_A^*), \quad 0 \leq x \leq L,$$

$$C_A^*(x=0) = 0.475, \quad (\text{при этом } \int_0^L C_A^*(x) dx \approx 0.4L).$$

Для численных расчетов использовался метод Рунге-Кутты 4 порядка [16, с. 363]. Решение изображено точками на рис. 2.

**Вариант 3.** Численное моделирование решения начально-краевой задачи

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \kappa(x, C_A) \frac{\partial C_A}{\partial x} \right) - \frac{\partial f(x, C_A)}{\partial x}, \quad t \geq 0, \quad 0 \leq x \leq L,$$

$$C_A(t=0, x) = 0.4,$$

$$\frac{\partial C_A(t, x=0)}{\partial x} = 0,$$

$$\frac{\partial C_A(t, x=L)}{\partial x} = \frac{dC_A^*(x=L)}{dx} = -9.96 \cdot 10^4.$$

Для численных расчетов использовался разностный метод второго порядка точности по  $x$  и первого по  $t$ . Установившееся решение изображено сплошной линией на рис. 2.

**Вариант 4.** Численное моделирование решения краевой задачи

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \kappa(x, C_A) \frac{\partial C_A}{\partial x} \right) - \frac{\partial f(x, C_A)}{\partial x}, \quad t \geq 0, \quad 0 \leq x \leq L,$$

$$C_A(t=0, x) = 0.4, \quad 0 \leq x \leq L,$$

$$\frac{\partial C_A(x=0)}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial C_A(t, L)}{\partial x} = \frac{f(L, C_A(t, L))}{\kappa(L, C_A(t, L))}.$$

Для численных расчетов использовался разностный метод второго порядка точности по  $x$  и первого по  $t$  [15, с. 378]. Установившееся решение изображено сплошной линией. Расчеты по вариантам 3 и 4 практически совпадают.

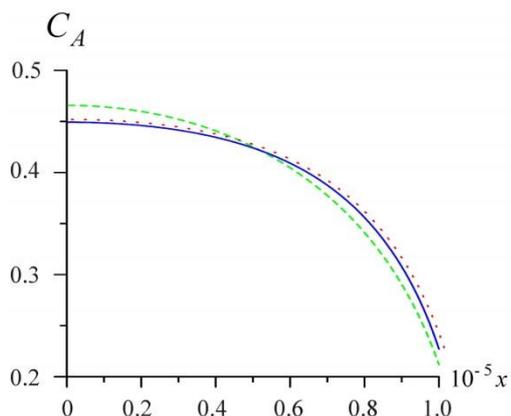


Рисунок 2. Расчеты задач в вариантах 1–4

В следующих расчетах фиксируется «типичное» значение  $\delta = \omega_A - \omega_B > 0$ , например, то, которое вычисляется по соответствующим формулам и значениям параметров, указанных в таблице (это значение обозначим символом  $\delta_0$ ). При этом  $\delta$  рисуются графики некоторых функций. При  $\delta = 0$  имеем:  $C_A = C_A(t, x) \equiv C_{A0}$ ,  $C_A^* = C_A^*(x) \equiv C_{A0}$ ,  $t \geq 0$ ,  $0 \leq x \leq L$ .

1) На рис. 3 представлены график стационарного решения  $C_A^* = C_A^*(x)$ ,  $0 \leq x \leq L$ , и на этом же рисунке графики функций  $C_A = C_A(t, x)$ ,  $0 \leq x \leq L$ , при  $t = 0$ ,  $t = t_1 = 0.01$ ,  $t = t_2 = 0.03$ ,  $t = t_3 = 0.1$ ,  $t = t_{stab} = 0.3$ , где  $t_{stab}$  – момент времени, при котором можно считать процесс установившимся. Графики  $C_A^* = C_A^*(x)$ ,  $0 \leq x \leq L$ , и  $C_A = C_A(t_{stab}, x)$ ,  $0 \leq x \leq L$ , практически совпадают (пунктирная линия).

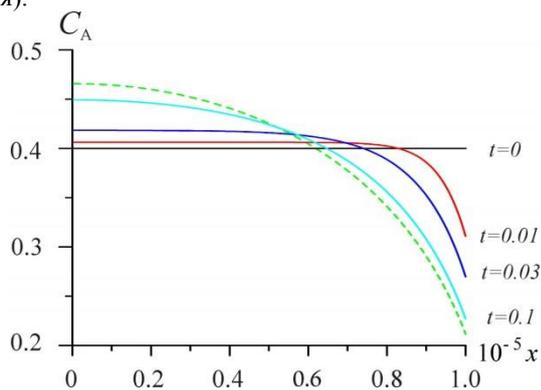


Рисунок 3. Эволюция концентраций во времени

2) На рис. 4 представлена поверхность нестационарного решения  $C_A = C_A(t, x)$ ,  $t \geq 0$ ,  $0 \leq x \leq L$ .

3) На рис. 5 изображено рассогласование в среднеквадратичной метрике между нестационарным и установившимся распределениями концентраций, как график функции  $z(t) = \|C_A(t, \cdot) - C_A^*(\cdot)\|$ ,  $t \geq 0$ .

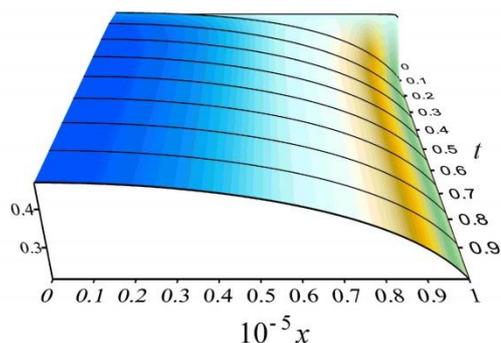


Рисунок 4. Распределение концентраций во времени

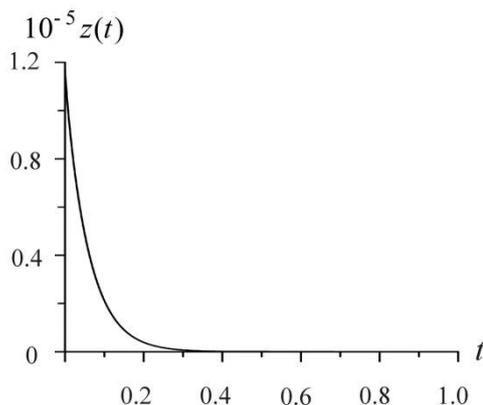


Рисунок 5. Отклонение нестационарного решения от стационарного

Следующая серия рисунков посвящена исследованию зависимости решения и его характеристик от  $\delta \in [0, 1]$  при  $\delta \rightarrow 0$ . Обозначим через  $C_{A\delta}^*$  и  $C_{A\delta}$  соответственно стационарное и нестационарное решения исходной задачи при каком-либо фиксированном  $\delta \in [0, 1]$ . Примем  $z_\delta(t) = \|C_{A\delta}(t, \cdot) - C_{A\delta}^*(\cdot)\|$ ,  $t \geq 0$ .

4) На рис. 6 изображены стационарные решения  $C_{A\delta}^*(\cdot)$  при нескольких  $\delta$ . Показано изменение стационарного решения при  $\delta \rightarrow 0$ ,  $\delta = \delta_0(1-d)$ ,  $d=0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9$ .

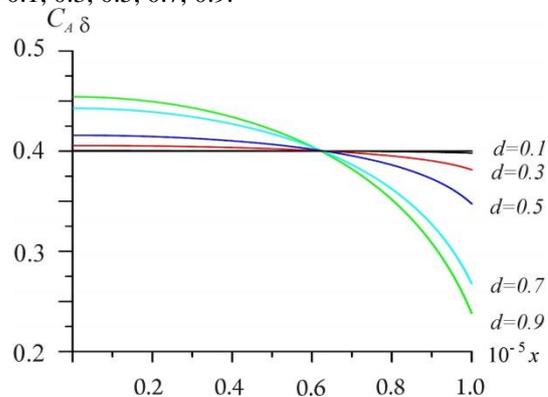


Рисунок 6. Стационарное решение при различных  $\delta$

5) На рис. 7 изображено отклонение стационарного решения  $C_{A\delta}^*(\cdot)$  от исходного равномерного при различных  $\delta \in [0,1]$ . Изображены графики функций  $r_C(\delta) = \|C_{A\delta}^*(\cdot) - C_{A0}\|_{C[0,L]}$  (сплошная линия) и  $r_L(\delta) = \|C_{A\delta}^*(\cdot) - C_{A0}\|$  (пунктирная линия).

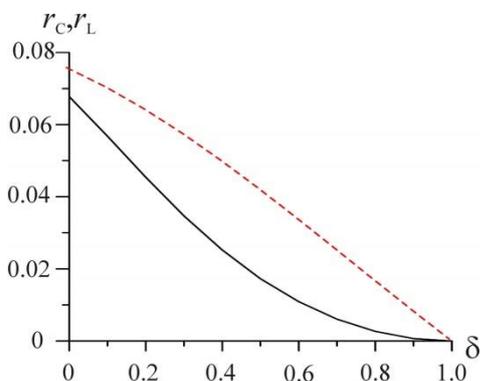


Рисунок 7. Отклонение стационарного решения от исходного равномерного при различных  $\delta$

6) На рис. 8 изображена поверхность  $C_{A\delta}^* = C_{A\delta}^*(x, \delta)$ , как график переменных  $x \in [0, L]$  и  $\delta \in [0,1]$ .

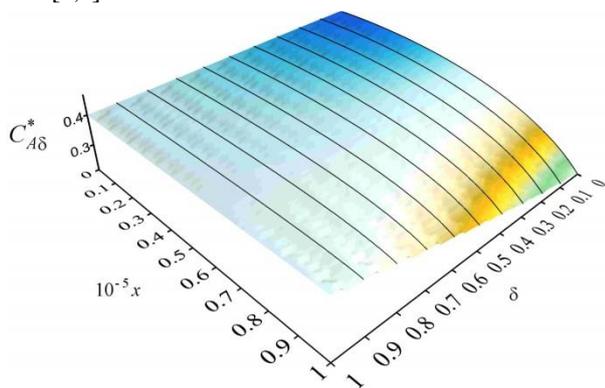


Рисунок 8. Распределение стационарного решения при различных  $\delta$

7) На рис. 9 изображена функция  $z_\delta = z_\delta(t)$ ,  $t \geq 0$ , при  $\delta = 0$  (сплошная линия), 0.5 (пунктирная линия), 0.9 (точечная линия). Показано изменение скорости стабилизации нестационарного решения к стационарному при  $\delta \rightarrow 0$ .

8) На рис. 10 изображена поверхность  $z = z_\delta(t)$ , как функция двух переменных  $t \in [0,1]$  и  $\delta \in [0,1]$ .

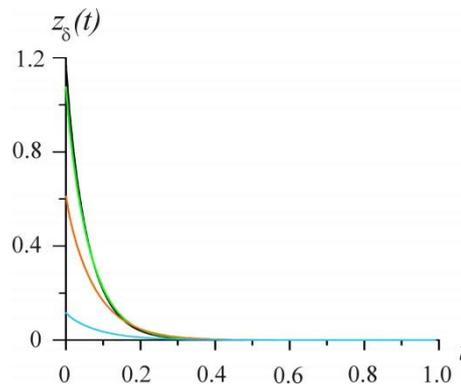


Рисунок 9. Стабилизация нестационарного решения к стационарному при  $\delta \rightarrow 0$

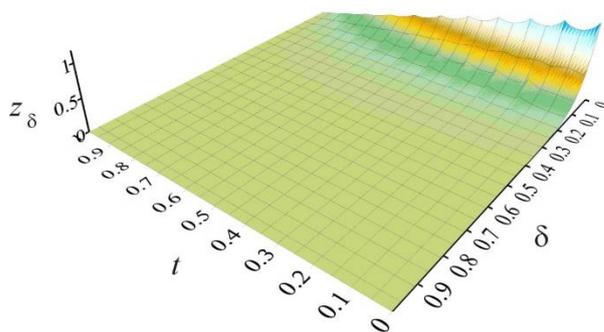


Рисунок 10. Погрешность отклонения нестационарного решения от стационарного при различных  $\delta$

В предложенной модели сознательно заложены характеристики самодиффузии, которые для перспективных композиций можно определить, следуя методическому плану [13]. В 70-х годах вопрос корреляции диффузионных характеристик материала и распухания обсуждался в [12]. В этой работе для анализа экспериментальных результатов были использованы значения парциальных коэффициентов диффузии Ni и Fe в композиции  $Fe_{0.81-x}Cr_{0.19}Ni_x$ , а не зависимости энергий активации диффузии базовых компонент от концентрации никеля. Поэтому заключение [12], на первый взгляд, противоречит нашей концепции. Однако в сплаве PE-16 энергии активации самодиффузии Ni и Cr близки [13]. Введение молибдена в PE-16 приводит энергию активации самодиффузии Fe к тем же значениям. Следовательно, миграционные подвижности базовых примесей выравниваются.

Работа выполнена в рамках целевой программы УрО РАН «Современные проблемы теоретической математики» (проект 12-T-1-1003/5).

ЛИТЕРАТУРА

1. Зеленский, В.Ф. Радиационные дефекты и набухание металлов / В.Ф. Зеленский, И.М. Неклюдов, Т.П. Черняева. – Киев: «Наукова думка», 1988. – 294 с.
2. Радиационная повреждаемость и свойства сплавов / Под ред. А.М. Паршина и А.Н. Тихонова. – С.-Петербург: «Политехника», 1995. – 301 с.
3. Слезов, В.В. Эволюция микроструктуры в облучаемых материалах / В.В. Слезов, А.В. Субботин, О.А. Осмаев // Физика твердого тела – 2005. – Т. 47, Вып. 3. – С. 463–468.
4. Субботин, А.В. Кинетика вакансионной пористости металлов при высоких дозах облучения быстрыми нейтронами / А.В. Субботин // Атомная энергия – 1977. – Т.43, Вып. 2. – С. 104–105.
5. Орлов, А.Н. Физические аспекты ослабления радиационного набухания конструкционных сплавов / А.Н. Орлов, А.М. Паршин, Ю.В. Трушин // Журнал технической физики – 1983. – Т.53, Вып.12. – С. 2367–2372.
6. Слезов, В.В. Диффузионная скорость роста макродефектов в ансамблях / В.В. Слезов // Физика твердого тела – 1989. – Т. 31, Вып. 8. – С. 20–30.
7. Временная эволюция поля концентраций и структуры материала оболочки твэла быстрого реактора на инкубационной стадии / А.И. Короткий [и др.] // Труды седьмой международной конференции «Ядерная и радиационная физика», 8–11 сентября 2009 г., г. Алматы, Казахстан. – С. 172–176.
8. Концепция повышения ресурсных характеристик материала оболочек твэлов быстрого реактора на основе диффузионных критериев / А.И. Короткий [и др.] // Труды восьмой международной конференции «Ядерная и радиационная физика», 20–23 сентября 2011 г., г. Алматы, Казахстан. – С. 80–84.
9. Гуров, К.П. К теории диффузионной подвижности и электропереноса в металлах и металлических твердых растворах / К.П. Гуров // Физика металлов и металловедение. – 1961. – Т. 11, Вып. 4. – С. 496–506.
10. Трушин, Ю.В. Радиационные процессы в многокомпонентных системах. Теория и компьютерное моделирование / Ю.В. Трушин – С.-Петербург: 2002. – 383 с.
11. Концентрационные и структурные превращения в аустенитных и хромоникелевых сплавах на основе железа при интенсивной пластической деформации / В.М. Колосков [и др.] // Физическая мезомеханика. – 2006. – Т. 9, №5. – С. 97–105.
12. Venker, H. Relation between partial diffusion coefficients in alloys and their swelling behaviour under fast neutron irradiation / H. Venker, K. Ehrlich // J. Nucl. Mater. – 1976. – Vol. 60. – P. 347–349.
13. Rothman, S.J. Self-diffusion in austenitic Fe-Cr-Ni alloys / S.J. Rothman, L.J. Nowicki, G.E. Murch // J. Phys. F: Metal Phys. – 1980. – Vol. 10. – P. 383–398.
14. Ладыженская, О.А. Краевые задачи математической физики / О.А. Ладыженская – М.: Наука, 1973. – 408 с.
15. Самарский, А.А. Теория разностных схем / А.А. Самарский – М.: Наука, 1989. – 616 с.
16. Бахвалов, Н.С. Численные методы / Н.С. Бахвалов, Н.П. Жидков, Г.М. Кобельков – М.: Бинком, 2001. – 630 с.

РАДИАЦИЯЛЫҚ СӘУЛЕЛЕНУ КЕЗІНДЕГІ БИНАРЛЫҚ ҚОСПАДАҒЫ ДИФфуЗИЯНЫ ҮЛГІЛЕУ

<sup>1)</sup> **Колосков В.М.**, <sup>2)</sup> **Короткий А.И.**, <sup>2)</sup> **Субботин Ю.Н.**, <sup>2)</sup> **Цепелев И.А.**, <sup>2)</sup> **Черных Н.И.**

<sup>1)</sup> *Ресей, Екатеринбург қ., Орал федералдық университеті*

<sup>2)</sup> *Ресей, Екатеринбург қ., РҒА ОФУ Н.Н. Красовский атындағы математика және механика институты*

Бинарлық қоспадағы диффузия үлгісінде твэл қабықшасы материалына қарқынды радиациялық сәулелену әсері зерттеледі. Квазистационарлық жақындату жағдайларында бос орындар бойынша дәндер ішінде қоспа құрамдасы концентрацияларының анықталған (стационарлық) таралуы табылды және таратылудың стационарлық режимге шығу уақыты бағаланды. Концентрацияны қайта тарату процесін сандық үлгілеу орындалып, қоспа құрамдасы диффузиялық қозғалысының осы процеске әсері зерттелді.

SIMULATION OF DIFFUSION IN BINARY ALLOYS BY RADIATION EXPOSURE

<sup>1)</sup> **V.M. Koloskov**, <sup>2)</sup> **A.I. Korotkii**, <sup>2)</sup> **Yu.N. Subbotin**, <sup>2)</sup> **I.A. Tsepelev**, <sup>2)</sup> **N.I. Chernykh**

<sup>1)</sup> *Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia*

<sup>2)</sup> *Institute of mathematics and mechanics named N.N. Krasovskii UrB RAS, Yekaterinburg, Russia*

On the model of diffusion in binary alloys the influence of intense radiation exposure on fuel cladding material was studied. Under conditions of quasi-stationary approximation for vacancies steady state concentration distribution within the grains of the alloy components was found and the time taken to a steady state mode of distributions was estimated. The numerical modeling of the process of redistribution of concentrations was carried out and the influence of the diffusion mobility of the alloy components on this process was investigated.

УДК 539.28: 539.12

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДИЧЕСКИХ АСПЕКТОВ И ПРИМЕНЕНИЕ ЭПР-ДОЗИМЕТРИИ ПО ЗУБНОЙ ЭМАЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДОЗОВЫХ НАГРУЗОК НАСЕЛЕНИЯ РЕГИОНОВ КАЗАХСТАНА

Середавина Т.А., Рухин А.Б., Стахов О.В., Сушкова Н.С.

*Институт ядерной физики, г. Алматы, Казахстан*

Влияние некоторых факторов на сигналы ЭПР (электронного парамагнитного резонанса) и дозиметрические характеристики зубной эмали (ЗЭ) изучено в экспериментах на твердых тканях животных; оптимизированы методические процедуры ЭПР-дозиметрии по ЗЭ и выявлены некоторые источники погрешностей. Обсуждены новые данные по ретроспективным оценкам доз для жителей регионов РК.

### ВВЕДЕНИЕ

Метод ЭПР эффективно использовался для дозиметрии при исследовании последствий применения атомного оружия в Японии, аварии на АЭС в Чернобыле и в других подобных ситуациях. Актуальность применения ЭПР-дозиметрии для Республики Казахстан подтверждена исследованиями дозовых нагрузок населения Семипалатинского региона в рамках Международных проектов.

Развитие ЭПР-дозиметрии в Институте ядерной физики началось полтора десятилетия назад под руководством проф. Пивоварова С.П. На основе полученной в 1997 г. в составе гранта Японии аппаратуры ЭПР выполнены Международные проекты МНТЦ, НАТО, в том числе по ЭПР-дозиметрии по зубной эмали (ЗЭ), проводились работы в сотрудничестве с Институтами и научными центрами Казахстана, России и дальнего зарубежья (Япония, Германия, США). Для дальнейшего развития метода ЭПР-дозиметрии по зубной эмали в направлении повышения точности ретроспективных оценок дозовых нагрузок жителей регионов Казахстана, подверженных влиянию РОО, проведен комплекс работ по совершенствованию методических процедур.

### ДОЗИМЕТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЗЭ

Метод ЭПР-дозиметрии по зубной эмали основан на регистрации спектров электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) от радиационных парамагнитных центров (пмц), индуцируемых облучением в структуре эмалевой ткани зубов. Дозиметрические свойства эмали зубов не связаны с основным компонентом зубной эмали – фосфатами кальция. При облучении в структуре природного карбонизированного гидроксиапатита (ГА) эмали образуются парамагнитные центры – радикалы  $\text{CO}_2^-$ . Зубная эмаль характеризуется высокой радиационной чувствительностью, стабильностью индуцированных радиацией радикалов  $\text{CO}_2^-$ , дающих специфический ЭПР-сигнал, рост которого пропорционален поглощенной дозе. Поэтому эмаль зубов человека является эффективным чувствительным универсальным детектором ионизирующего излучения.

Радиационный дозиметрический сигнал радикалов  $\text{CO}_2^-$  в ЗЭ анизотропен вследствие осевой сим-

метрии [1-4]. Как показано на образцах пластинок ЗЭ [3], главные значения g-тензора  $g_{\perp} = 2,00250 \pm 0,00025$  и  $g_{\parallel} = 1,99730 \pm 0,00025$ . Пространственная ориентация радикалов  $\text{CO}_2^-$  в структуре гидроксиапатита ЗЭ соответствует направлению оси O–O в радикале. Для оценки и калибровки радиационного сигнала его выделяют из суммарного спектра ЗЭ путем вычитания сигнала от органической компоненты тканей зуба, содержащегося в спектрах исходной, то есть необлученной ЗЭ и именуемого «нативным».

В методике регистрации и обработки спектров ЭПР для ретроспективного определения дозовых нагрузок населения региона СИП по ЗЭ использованы разработки, позволившие реализовать потенциально высокую чувствительность ЭПР-дозиметрии при работе с малыми навесками эмали, что становится со временем все актуальней по мере увеличения возраста «свидетелей» испытаний. Методические наработки ЭПР-дозиметрии по ЗЭ были проверены путем участия в экспериментах по Международному сравнению [5-6].

ЭПР-дозиметрия по ЗЭ использует два метода, в основе обоих лежит радиационная чувствительность как *нормированная эффективность образования парамагнитных центров* с дозой облучения. В одном – эмаль подвергается дополнительному гамма-облучению. Дозу определяют по радиационному отклику методом обратной экстраполяции; при этом информация о начальной дозе теряется.

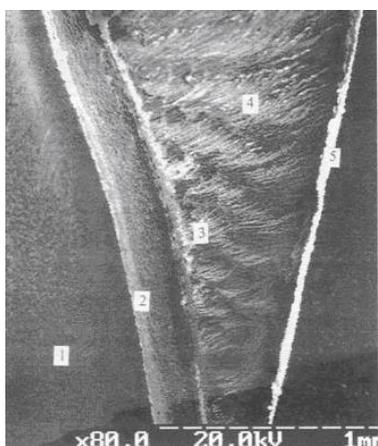
В ИЯФ применяется метод, основанный на радиационной чувствительности усредненной ЗЭ, – он предпочтителен с точки зрения сохранения исходной информации о дозе для возможной проверки результатов.

Однако природа радиационной чувствительности не полностью выяснена. В ряде работ предполагается присутствие более, чем двух радиационных сигналов и несколько источников образования  $\text{CO}_2^-$ -радикалов [7, 8], что, в конечном счете, может также оказывать влияние на точность оценок доз по ЭПР эмали зубов. Обнаружен также новый центр в гидроксиапатите, он состоит из 4-х протонов молекул воды, локализованных в вершинах параллелограм-

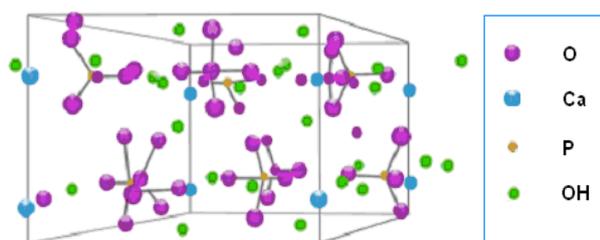
ма, и свободного электрона, образованного гамма-излучением, термически стабилен до 300 °С, когда вода удаляется из кристаллической решетки гидроксиапатита.

Ячейка карбонизированного гидроксиапатита  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ , содержащегося в ЗЭ и других твердых тканях человека и животных, включает по 2 иона  $\text{Ca}^{2+}$  на гранях и тетраэдры  $(\text{PO}_4)_3$ , как показано на рисунке 1; кроме ионов  $\text{CO}_3^{2-}$  (75%) и ион-радикалов  $\text{OH}^\bullet$ , ЗЭ содержит ионы  $\text{F}^-$  (19%) и  $\text{Cl}^-$  (5,06%) [1, 9].

Качество эмали зуба в значительной мере зависит от содержания кальция; соотношение кальция и фосфора Ca/P во взрослом организме, по литературным данным, меняется от 1,33 до 2,0 [9]. В формировании радиационной чувствительности ЗЭ кальций, по-видимому, тоже играет важную роль.



а)



б)

Рисунок 1. Состав тканей зуба и структура эмали:  
 (а) – срез зуба с взаимным расположением ЗЭ и других тканей (дентин, цемент, пульпа);  
 (б) – состав и структура природного гидроксиапатита ЗЭ

Зубную эмаль выделяют механо-химическим способом, с помощью технических бормашинок и стоматологических боров с алмазным покрытием, промывают и измельчают. Задачей подготовки эмали является предотвращение разрушения информативных центров.

С целью оптимизации используемых режимов подготовки эмали были поставлены эксперименты на модельных облученных образцах зубов, в основном, животных, а также на костной ткани животных по выявлению эффектов возможного деструктивного воздействия факторов химико-механической обработки – концентрации и вида реагентов и условий обработки ультразвуком.

Регистрация спектров ЭПР модельных образцов ЗЭ и костной ткани выполнялась на спектрометре ESP300E с цилиндрическим резонатором с последующей обработкой в фирменных программах ESP300E и WINEPR, а также на спектрометре ESR70-03XD/2, Минск.

Удаление органических тканей зуба и посторонних включений проводится в ряде методик после ультразвуковой (УЗ) обработки коронок зубов в растворах щелочи, затем для подавления механически индуцированных центров коронки выдерживают в УЗ-ванне в кислой среде.

При изучении воздействия уксусной, молочной, и других кислот на радиационную чувствительность ЗЭ было показано, что более чем получасовая обработка органическими кислотами [10] может занижать радиационный сигнал в ЗЭ на (20÷30)%, а также влиять на радиационную чувствительность. Схематически этот эффект представлен на рисунке 2. Сократив время кислотной обработки до 10 минут, удалось повысить точность реконструкции дозы.

По данным измерений нами выявлена тенденция к снижению нормированных величин дозиметрического сигнала (ДС) в среднем до 20% при более высокой мощности ультразвукового действия, исходя из этого, были определены оптимальные параметры УЗ-обработки.

Поскольку УЗ-волны достигают сотен атмосфер локального мгновенного давления, можно было предположить при больших мощностях УЗ-воздействия в некачественной эмали ухудшение механических свойств и частичную деструкцию. За счет этого могла расти доля поверхностных центров ЗЭ, которые становятся ненаблюдаемыми. Сравнение неоднократных экспериментов потребовалось для учета влияния индивидуальных вариаций как механической прочности реальных образцов, так и радиационной чувствительности дозиметрического материала.

Проведены рентгенографические исследования порошков эмали, полученных из серии зубов разными способами, то есть половина коронки зуба была очищена от дентина и других включений механически, другую половину обрабатывали ультразвуком высокой мощности, затем удаляли оставшийся дентин.

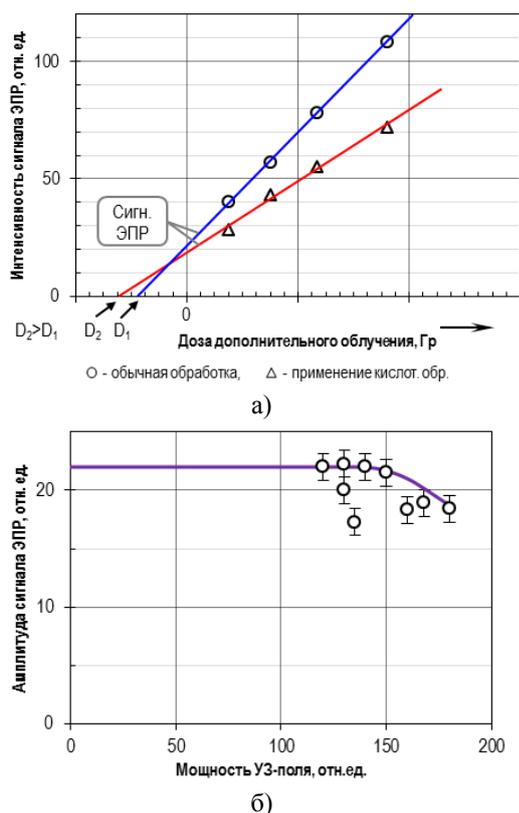


Рисунок 2. Влияние внешних факторов на радиационный сигнал и чувствительность эмали к облучению:  
 (а) – влияние кислотной среды на дозиметрические свойства ЗЭ;  
 (б) – влияние мощности УЗ-воздействия на дозиметрический сигнал в ЗЭ

По данным рентгеноструктурного анализа, оба вида образцов содержали, в основном, монофазу гидроксипатита  $Ca_5(PO_4)_3(OH)$ , однако в рентгенограммах второго вида образцов отражалось возросшее присутствие аморфной фазы. Действительно, более высокая мощность УЗВ приводила к частичному разрушению микрокристаллов. Рентгенометрические данные указывали на присутствие также  $Ca_9HPO_4(PO_4)_5OH$ , в обработанных разными способами образцах соотношение  $Ca/P$  могло меняться в пределах от 1,8 к 1,66.

Таблица 1. Данные по ретроспективным ЭПР-оценкам доз жителей региона СИП

Ид. №	Пол	Год рождения	Место рождения	Место проживания	Дата рентген. обслед.	Положение зуба	Навеска, мг	Доза, Гр
01	ж	1938	Майск	Майск	2010	лв5	52,9	0,2
02	ж	1958	Майск	Майск	2010	лв2, лв4, лв6, лв7	100,9	0,2
05	ж	1955	Майск	Майск	2010	лв2	59,8	0,07
09	ж	1963	Майск	Майск	2010	пн5, лн5	38,2	0,15
10	м	1963	Саржал	Саржал	2011	пн8	46,7	0,27
11	ж	1947	Саржал	Саржал	2010	пн3	22,2	0,18
13	ж	1950	Саржал	Саржал	2010	лв2	20,5	0,60
14	ж	1955	Саржал	Саржал	2011	пв5	42,2	0,33
18	ж	1975	Саржал	Саржал	2010	лв6, 7	50,4	0,44
19	ж	1956	Семеновка	Семеновка		лв5	82	0,28

### ЭПР-ДОЗИМЕТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

После выяснения этих методических вопросов работы по исследованию дозовых нагрузок для жителей сел региона Семипалатинского испытательного полигона и других регионов были продолжены. Регистрация спектров ЭПР образцов ЗЭ выполнялась на спектрометре ESP300E, обработка в одноименной программе ESP300E. Измерения концентрации пмц проводили по величине сигнала ЭПР, выделенного путем вычитания фонового спектра и модели нативного сигнала, характеристики сигналов ЭПР измеряли по методике [11, 12]. Получены многочисленные данные, свидетельствующие об относительно небольших дозах даже для «свидетелей» испытаний, родившихся в 1940-х – 1950-х гг.

Сравнительные данные по селам региона СИП и Азгир и средние значения ЭПР-оценок доз для некоторых жителей – доноров зубов приведены в таблицах 1 и 2.

По оценкам, средняя доза для выбранных доноров зубов с. Саржал составляет  $(0,42 \pm 0,18)$  Гр. Средняя доза доноров с. Майское составляет  $(0,26 \pm 0,28)$  Гр. Сравнение данных показало, что разница в облучении жителей сел Майское и Саржал стала более очевидно обусловлена их статусом, так как Майское, в связи с удаленностью от следов испытаний, считается «чистым» и в смысле радиоактивной загрязненности, тогда как Саржал, как известно, находится по следу испытания 1953 года.

Обнаруженные отдельные более высокие значения ЭПР-доз не всегда могли быть объяснены проживанием в период надземных испытаний или участием в работах, сопряженных с возможностью облучения. Естественно было предположить, что дозы, превышающие значения, получаемые от природного фона и глобальных выпадений, могут быть получены из-за несанкционированной хозяйственной деятельности на территориях, загрязненных искусственными радионуклидами [13]. Тем не менее, эти факты нуждались в подтверждении и объяснении, потому были проведены дополнительные исследования.

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДИЧЕСКИХ АСПЕКТОВ И ПРИМЕНЕНИЕ ЭПР-ДОЗИМЕТРИИ ПО ЗУБНОЙ ЭМАЛИ  
ДЛЯ ОЦЕНКИ ДОЗОВЫХ НАГРУЗОК НАСЕЛЕНИЯ РЕГИОНОВ КАЗАХСТАНА**

*Таблица 2. Данные по ретроспективным ЭПР-оценкам доз жителей Азгир и Балкудык*

Ид. №	Пол	Год рождения	Место проживания	Положение зуба	Навеска, мг	Рад. сигнал $\bar{A}$ , отн. ед.	Доза, Гр
98	ж	1981	Балкудык	лв6, лн7, пн7	110	1780	0,11
100	м	1984	Балкудык	лв8	110	1690	0,10
116	ж	1972	Балкудык	лв6	120	1520	0,09
117	м	1994	Азгир	лн6, лв6	30	620	0,04
118	ж	1957	Балкудык	пв7	108	2590	0,16
120	м	1964	Балкудык	пв8	100	3760	0,23
120	м	1964	Балкудык	пн7	110	5290	0,32
157	м	1994	Азгир	пн7	24	1180	0,07
158	ж	1966	Азгир	лн1, лн3	20	560	0,03
159	ж	1978	Балкудык	пв1, пв3, лв3	66	2380	0,14
161	ж	1989	Азгир	лн7	92	2060	0,12
164	м	1974	Азгир	лв4	100	1155	0,07
165	м	1946	Балкудык	лн4	78	1430	0,09
167	м	1957	Балкудык	пн2	58	3000	0,18
172	м	1954	Азгир	лв8	59	400	0,02
172	м	1954	Азгир	лн4	100	830	0,05
172	м	1954	Азгир	лн2, пн2	100	4820	0,29
175	ж	1957	Азгир	лн4	56	0	0,30
176	м	1985	Балкудык	пв6	100	590	0,04

**ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ЭПР-ОЦЕНКИ ДОЗ**

Как свидетельствуют многочисленные данные, зубная эмаль чувствительна и к более низкоэнергетичному ультрафиолетовому (УФ) излучению, что приводит к присутствию значительных по величине сигналов ЭПР во фронтальной части передних зубов [14, 15].

В них могут накапливаться дефекты, аналогичные тем, которые используются для ретроспективной ЭПР-дозиметрии по зубной эмали, по этой причине МАГАТЭ рекомендовало не использовать передние зубы для дозиметрии [1].

В этой связи было проверено предположение о возможности вклада медицинского УФ-излучения и солнечного спектра в высокие оценки доз. Солнечное излучение, как известно, имеет 3 УФ-диапазона – длинноволновой диапазон А – это UVA (400–315) нм; средневолновой UVB от 315 нм до 280 нм и UVC (280–100) нм. Около 95% ультрафиолета, достигающего поверхности Земли, составляют UVA-лучи. Биологические эффекты УФ различны в зависимости от спектрального участка. Чувствительность карбонизированного ГА к УФ-излучению высока, в биологической ткани также возможны эффекты в виде возникновения радикалов, вследствие химических изменений биополимеров [16]. ЭПР-сигнал в ЗЭ, индуцированный УФ-излучением, зависит от его интенсивности в данной местности, определяемой глобальным УФ индексом (УФИ) – международным стандартом для количественной оценки УФ, разработанным ВОЗ, Программой ООН по окружающей среде и Всемирной метеорологической организацией [17].

В поставленных экспериментах по изучению влияния прямого солнечного облучения на ЗЭ получено достаточно большое значение возможного вклада в сигнал ЭПР, оно близко к 40 мГр/ч, причем, с учетом только максимальной освещенности на нашей широте. Для сравнения – экспозиция зубной эмали солнечным светом может индуцировать в ЗЭ сигнал ЭПР, эквивалентный  $\gamma$ - и  $x$ -облучению, соответствующий от 15 мГр/ч в северных широтах, и по данным [14], до ~ 23 мГр/ч – в средних, учитывая среднесуточное освещение, параметры УФ-сигнала близки к дозиметрическому [18-19]. Однако эти данные не позволяли разумно объяснить завышенные ЭПР-оценки дозы, полученные на коренных зубах.

В результате измерений эффектов УФ-излучения разной природы, применяемых в медицине, было показано, что экспозиции некоторыми медицинскими УФ-источниками в исключительных случаях при неправильном применении могут дать локальный эффект на ЗЭ, близкий к 2-3 Гр, не связанный с дозой, полученной организмом. Таким образом, было получено частичное объяснение отдельных случаев высоких доз при ЭПР-дозиметрии.

Был исследован вопрос о вкладе облучения инкорпорированными радионуклидами в суммарную дозу, полученную организмом человека, который имеет под собой довольно существенную основу, и о возможном расхождении с измеряемыми методом ЭПР дозами.

В ходе решения этого вопроса проведен анализ вариаций состава твердых тканей животных и человека. Соотношение ионов кальция, с которым могут быть связаны информативные предцентры в струк-

туре как эмали, так и дентина, и фосфора, содержание которого тоже варьирует в составе тканей зубов и костей, видимо, может влиять на чувствительность к облучению твердых тканей, содержащих гидроксипатит.

Для модельных экспериментов по измерениям радиационной чувствительности твердых тканей брали зубы жителей региона СИП – села Мостик и Майск; зубы и кости животных, также из региона СИП – коровы, лошади (села Мостик, Долонь, зимовка Тулпар); свиные зубы (Алматы), кости барана и курицы с фермы СИП.

Радиационная чувствительность костной ткани (КТ) животных ( $R_{SB}$ ), зависящая от структурированности и доли гидроксипатита, определена при измерениях на спектрометре ESP300E как  $\sim 560$  отн.ед./Гр, тогда как для  $R_{STE}$  свиной ЗЭ достигает 9400 отн.ед. на 1 Гр, то есть  $R_{STE}=R_{SB} \cdot k$  (значение  $k$  в соотношении  $R_{SB} \cdot k$  приблизительно равно 17).

Радиационная чувствительность КТ для разных видов животных при регистрации на ESR70-03XD/2 варьировала в пределах (14–28) отн.ед./100 мг, 1 Гр, чувствительность ЗЭ к облучению ( $R_{STE}$ ) определена как  $R_{SB} \cdot k$  (здесь  $k \approx 20$ ). Значения  $g$ -фактора костной ткани  $\approx 2,0017$ , для свиной зубной эмали  $g$ -фактор  $\approx 2,0018$ . Расхождения в численных оценках на разных спектрометрах связаны с разницей в калибровке сигналов в разных программах и отчасти с чувствительностью аппаратуры.

Для расчета суммарной эффективной дозы необходимо учитывать биологическую эффективность излучения, а также – чувствительность тканей. При расчетах дозы от гамма-излучения эффект определяется плотностью ткани. Если облучается эмаль зубов, надо учитывать значение плотности в интервале  $2,7 \div 3,0$  г/см<sup>3</sup>. Если принять, что при  $\gamma$ -облучении <sup>60</sup>Co ( $E \sim 1,2$  МэВ) для создания электронного и дырочного центров затрачивается  $\sim 20$  эВ, то радионуклид за 10–20 лет может дать в 1 см<sup>3</sup> ЗЭ значительную дозу.

В случае попадания радионуклидов внутрь организма ситуация усложняется. Во-первых, пути попадания различны, во-вторых, «критические» органы отличаются. Для расчета ожидаемой эффективной дозы от радионуклидов желательно знать, содержание каких радионуклидов в организме выше предельно допустимого, а также время, прошедшее после поступления их в организм [20-21]. Суммарная доза будет включать эффекты от внутреннего облучения гамма-, бета- и альфа-активными изотопами.

При практическом использовании ЭПР-дозиметрии измеряют результат действия радиационных полей, при этом, как правило, спектры энергий фото-

нов чаще всего неизвестны, как неизвестно и содержание радионуклидов. Учитывая зависимость радиационных эффектов от энергии фотонов, в области доз, опасных для человека, рекомендуют вносить эмпирические поправки на нелинейность.

Также важно знать наличие Sr-90, который депонируется в костях, отчасти в дентине зубов и меньше в эмали [21, 22] и теоретически может давать вклад в дозу по ЗЭ за счет локального облучения. Содержание искусственных радионуклидов в организме на проблемных территориях в значительной мере зависит от загрязнения окружающей среды – почв, воды и продуктов питания.

В работе Ш. Тойода и др. [23] было показано, что в зубах животных с Южного Урала отмечены повышенные концентрации радиоактивного стронция, которые коррелировали с содержанием радионуклида Sr-90 в почвах данной территории.

Аналогичные выводы сделаны при анализе зубов животных из региона СИП, который показал [24], что содержание стронция-90 в зубах коррелировало с соответствующими площадными загрязнениями радионуклидами <sup>90</sup>Sr и его дочерним изотопом <sup>90</sup>Y, который имеет бета – излучение с пробегом 4,1 мм в зубной эмали. По современным данным, «следы» от испытаний содержат повышенные концентрации <sup>90</sup>Sr, наряду с другими долгоживущими изотопами, в основном, <sup>137</sup>Cs, <sup>239,240</sup>Pu, <sup>60</sup>Co, <sup>152</sup>Eu, <sup>155</sup>Eu.

В пробах почвы в районе зимовки Сартай-Кора и на площадке 4 СИП концентрация <sup>137</sup>Cs достигала 100 Бк/кг, то есть превышала фон глобальных выпадений, составляющий приблизительно 30 Бк/кг (65 мКи/км<sup>2</sup>) [25]. Удельная активность <sup>90</sup>Sr в пробах тех же почв до 235 Бк/кг, при погрешности измерения (50–70)%; в большей части проб содержались также радионуклиды <sup>239,240</sup>Pu, <sup>60</sup>Co и <sup>137</sup>Cs. Учитывая миграцию животных, можно предполагать возможность попадания радионуклидов в организм человека через мясо, молоко, т.е. сельскохозяйственные продукты питания, поэтому интегральные дозы могут превышать дозу в ЗЭ.

### Выводы

В результате проведенных исследований и постановки модельных экспериментов выявлены отдельные источники погрешностей при ретроспективных оценках доз методом ЭПР-дозиметрии.

Подтверждены ранее полученные средние оценки доз для жителей региона СИП.

Для дальнейшего развития и корректного применения метода ЭПР-дозиметрии по ЗЭ желательно продолжение экспериментальных и теоретических исследований, полезных для повышения точности и достоверности дозовых оценок.

## ЛИТЕРАТУРА

1. IAEA - TECDOC-1331. Use of electron paramagnetic resonance dosimetry with tooth enamel for retrospective dose assessment. Report of a co-ordinated research project. International Atomic Energy Agency. December 2002.
2. Ikeya M. "New Applications of Electron Spin Resonance: Dating, Dosimetry and Microscopy". – Singapore. – 1992. – 520 P.
3. Brik A., Haskell E., Brik V., et al. Anisotropy effects of EPR-signals and mechanisms of mass transfer in tooth enamel and bones. // Applied Radiation and Isotopes. – 2000. – V. 52, №1. – PP. 1077–1081.
4. A.A. Romanyukha and D.A. Schauer, EPR Dose Reconstruction in Teeth: Applications, problems and Perspectives. In book – "EPR in the 21 Century. Basics and Applications to materials, life and Earth Sciences": Elsevier, 2002. – PP. 603–611.
5. Wieser A., Pivovarov S. et al. The 3<sup>rd</sup> International Intercomparison on EPR Tooth Dosimetry. Part 1, Final Analysis //Applied Rad. and Isotopes. – 2007. – V. 62, – PP. 163–171.
6. M. Hoshi, S. Toyoda, S. Pivovarov, A. Romanyukha, A. Rukhin, T. Seredavina, S. Sholom, V. Skvortsov, A. Wieser et al. Interlaboratory comparison of tooth enamel dosimetry on Semipalatinsk region: Part 1, General view. //Radiation Measurements.– 2007. – V. 42, No 6–7 (special issue). PP. 1005–1014.
7. M. Zdravkova, G. Vanhaelewyn, F. Callens, B. Gallez, R. Debuyst Multi-frequency electron paramagnetic resonance study of irradiated human finger phalanges. //Spectrochimica Acta. Part A. 2005. – V. 61. – PP. 3131–3138.
8. F. Callens, P. Moens, R. Verbeeck. An EPR study of intact and powdered human tooth enamel dried at 400°C. // Calsif. Tissue Int. – 1995. – V. 56. – PP. 543–548.
9. Боровский Е.В. и др. //Терапевтическая стоматология. Москва. – 1973, 160 с.
10. S. Pivovarov, A. Rukhin, T. Seredavina. Influence of tooth enamel processing methods on accuracy of dose reconstruction by EPR. Proc. 31<sup>th</sup> CONGRESS AMPERE, Poland, 14-19 July 2002. P. 226.
11. Методические указания по ЭПР-дозиметрическим измерениям по эмали зубов, проводимым в ИЯФ НЯЦ РК МУ - 03 – 13.02. - 01 – 2009. – 8 стр.
12. Государственный стандарт РФ ГОСТ Р 22.3.04-96. Разрешен к прим. на терр. РК, пер. № 116/114 от 10.06.98.
13. Pivovarov S., Rukhin A., Seredavina T., Sushkova N., Hill P., Peterson L. Exposure subpopulations and peculiarities of individual dose distribution among inhabitants of the Semipalatinsk region. Radiat. Measurements. – 2007. – V.42. – P.1033–1036.
14. Nilsson J., Lund E., Lund A. The effects of UV-irradiation on the ESR-dosimetry of tooth enamel. // Applied Radiation and Isotopes . – 2001. – V. 54, №1. – PP. 131–139.
15. Sholom S.V., Haskell E. H., Hayes R.B., Chumak V.V. and Kenner G.H. Properties of light induced EPR signals in enamel and their possible interference with gamma-induced signals. //Radiation Measurements. – 1998. – V.29. – PP. 113–118.
16. Самойлова К.А., Действие ультрафиолетовой радиации на клетку. – Л. – 1967. Мейер А., Зейтц Э., Ультрафиолетовое излучение, пер. с нем., Л. – 1967.
17. "Global Solar UV Index. A Practical Guide". «Глобальный солнечный УФ-индекс. Практическое руководство», ВОЗ. – 2002.
18. Haskell E.H., Hayes R.B., Kenner G.H., Sholom S.V. and Chumak V.I. Electron Paramagnetic Resonance Technique and Space Biodosimetry. //Rad. Research. - 1997. - V. 148. – PP. 51–59.
19. Борышева Н.Б. Расчётное обоснование метода оценки тканевых доз фотонного облучения по результатам ЭПР дозиметрии эмали зубов человека. Дисс. канд. ф.-м. н. – Обнинск, 2004. – 107 с.
20. СЭТОРБ 2010.
21. НСП/ ОРБ. – 1976–87.
22. Wieser A., Romanyukha A.A., Degteva M.O., Kozheurov V.P. and Petzoldt G. (1996a) Tooth Enamel as a Natural Beta Dosimeter for Bone Seeking Radionuclides. Radiat. Prot. Dosim., 65, 413–416.
23. K. Zhumadilov, Sh. Toyoda, and et. al. ESR dosimetry study of population in the vicinity of the Semipalatinsk Nuclear Test Site.// J Radiat Res. – 2013. – V.54 (4). – PP.775–779.
24. Toyoda S., Pivovarov S., Hoshi M., Seredavina T. <sup>90</sup>Sr in mammal teeth taken in the Semipalatinsk Test Site measured by imaging plates. // English Research Report Series No.28. Proc. 17<sup>th</sup> Hiroshima International Symposium. – 2012. – Hiroshima University. – PP. 119–122.
25. Логачев В. Радиоэкологические последствия испытаний БРВ на Семипалатинском полигоне // Бюллетень по атомной энергии, № 12, – 2002. – С. 62–67.

## ҚАЗАҚСТАН АЙМАҚТАРЫНДАҒЫ ТҮРҒЫНДАРДЫҢ ДОЗАЛЫҚ МӨЛШЕРІН БАҒАЛАУ ҮШІН ТІС ЭМАЛИНЕ ЭПР-ДОЗИМЕТРИЯНЫ ҚОЛДАНУ ЖӘНЕ ӘДІСТЕМЕЛІК АСПЕКТІЛЕРІН ЗЕРТТЕУ

Середавина Т.А., Рухин А.Б., Стахов О.В., Сушкова Н.С.

*Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан*

ЭПР сигналдарына (электронды парамагниттік резонанс) әсер ететін бірқатар факторлар және тіс эмалінің (ТЭ) дозиметриялық сипаттамалары жануарлардың қатты ұлпаларына жүргізілген эксперименттерде көрсетілді; кателік көздерін жою мен ТЭ-нің ЭПР-дозиметриялық әдістемелік шараларын оңтайландыру жүйелері анықталды. ҚР тұрғындарының дозалық мөлшерін ретроспективті ЭПР әдісімен бағалау бойынша жаңа мәліметтер алынды.

**STUDY OF METHODOLOGICAL ASPECTS OF EPR-DOSIMETRY IN TOOTH ENAMEL AND APPLICATION  
OF THE METHOD FOR A DOSE ASSESSMENT FOR THE POPULATION OF KAZAKHSTAN REGIONS**

**T.A. Seredavina, A.B. Rukhin, O.V. Stakhov, N.S. Sushkova**

*Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan*

Influence of some factors on signals of EPR (electron paramagnetic resonance) in tooth enamel (TE) and on dosimetric characteristics has been shown in experiments on solid tissues of animals; were optimized methodical procedures of EPR-dosimetry on TE and revealed some sources of errors. New data on retrospective estimates of doses for inhabitants of RK regions are discussed.

УДК 533.9.08, 621.039.6

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ТОКОВ ОБМОТОК ПОЛОИДАЛЬНОГО ПОЛЯ С УЧЕТОМ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ НА ВАКУУМНОЙ КАМЕРЕ ТОКАМАКА КТМ

Шаповалов Г.В.

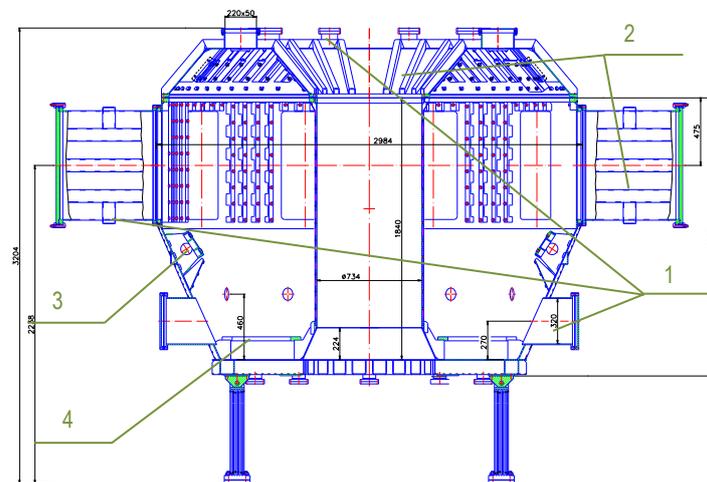
Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, г. Курчатов, Казахстан

В работе получена математическая модель динамики токов в обмотках полоидального поля с обобщенными параметрами с учетом наведенных вихревых токов на вакуумной камере токамака. Показана однозначная связь обобщенных параметров полученных уравнений динамики токов с параметрами исходной модели. В рабочем варианте для токамака КТМ модель динамики токов в обмотках полоидального поля с учетом вихревых токов на вакуумной камере представлена 18 дифференциальными уравнениями первого порядка с обобщенными параметрами, которую можно использовать при подготовке к физическому пуску токамака КТМ.

### ВВЕДЕНИЕ

В Республике Казахстан завершается создание плазменной материаловедческой установки токамак КТМ и проводятся работы по подготовке к ее запуску. На начальной стадии запуска токамака КТМ в период пробоя и роста тока плазмы возникают значительные вихревые токи на проводящих конструктивных элементах вакуумной камеры (ВК). Вихревые токи возникают от динамических токов в обмотках полоидального поля (ОПП) и существенно влияют на получение этих токов в ОПП по сценарию плазменного разряда. Поэтому на стадии реализации плазменного разряда необходимо иметь адекватную математическую модель взаимного влияния токов ОПП и наводимых на вакуумную камеру вихревых токов. В настоящее время в расчетах динамики то-

ков в токамаке используют 2D и 3D численные схемы моделирования [1]. Существующие модели для токамака КТМ, используемые в расчетных кодах [2], не учитывают всех проводящих ток элементов его вакуумной камеры, которая имеет достаточно сложную конструкцию проводящих ток элементов, рисунок 1, которая включает оболочку вакуумной камеры, много патрубков, дивертор с опорной конструкцией, внешние ребра жесткости оболочки вакуумной камеры, внутрикамерные элементы, включая витки пассивной стабилизации и дивертор. Известна трехмерная конечно-разностная модель магнитной системы токамака ИТЭР [1], разработанная в НИИЭФА, которая учитывает все проводящие ток элементы сложной конструкции токамака, однако такой код для токамака КТМ не был разработан.



1 – патрубки, 2 – внешние ребра жесткости оболочки ВК, 3 – внутрикамерные витки пассивной стабилизации, 4 – внутрикамерный дивертор с опорной конструкцией

Рисунок 1. Вид вакуумной камеры токамака КТМ

В настоящей работе предлагается математическая модель динамики токов в обмотках полоидального поля с обобщенными параметрами, которая в полной мере описывает динамику токов в ОПП с учетом взаимного магнитного влияния вихревых токов на ВК токамака и токов в ОПП. Кроме того, в обобщенных параметрах содержится информация

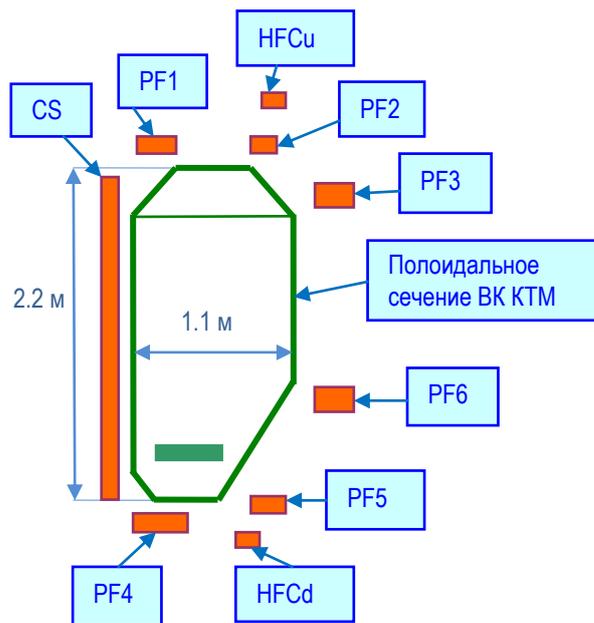
обо всех конструктивных элементах вакуумной камеры, если они оценены по экспериментальным данным, полученным в динамических режимах токов магнитной системы токамака КТМ. Предлагаемая модель в полной мере обеспечивает учет вихревых токов на ВК на стадии реализации сценария плаз-

менного разряда на физическом пуске и в штатных режимах плазменного разряда токамака КТМ.

### 1. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ ВАРИАНТ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ТОКОВ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ТОКАМАКА

Для перехода к модели динамики токов магнитной системы токамака КТМ с обобщенными параметрами сначала рассмотрим вариант модели, использующей набор тонких проводящих многосвязных магнитных оболочек, произвольным образом локализованных на вакуумной камере [1]. Каждая из таких оболочек имеет свои параметры (активное сопротивление и индуктивность) и магнитные связи (взаимные индуктивности) с другими оболочками и обмотками полоидального поля. Эти параметры можно считать независимыми от времени и других параметров для интервала времени, на котором нет резко выраженного поверхностного эффекта вихревых токов. Такой эффект существует в начале переходных процессов при ступенчатом изменении наведенных на ВК напряжений от действия токов в полоидальных обмотках [1]. Данный эффект не будем учитывать в рассматриваемой модели. Можно предположить, что при достаточном количестве и малой толщине оболочек система дифференциальных уравнений, записанная для этих оболочек и ОПП токамака, будет адекватно описывать динамику токов в катушках магнитной системы токамака КТМ с учетом вихревых токов на вакуумной камере токамака и сложности ее конструкции на интервале времени, в котором нет резко выраженного поверхностного эффекта вихревых токов. Кроме того, для начала преобразований предположим, что для каждой ОПП вакуумная камера представляется одним и тем же набором оболочек. Это предположение можно отнести к предварительному варианту представления модели динамики токов в ОПП. В действительности из-за больших размеров ВК по отношению к ОПП, а также их близкого расположения ОПП с разных сторон к ВК (рисунок 2), предварительная модель потребует уточнения, так как каждая ОПП будет наводить свой набор токов на ВК, имеющих различные пути распределения токов по ВК и ее элементам и, следовательно, уравнения динамики для них будут иметь различные наборы параметров. Поэтому будем считать предварительное представление модели приемом для получения выражений для ее обобщенных параметров, которые будут использованы для обоснования рабочего варианта модели.

В предварительном варианте модели для каждой оболочки ВК и для каждой ОПП можно записать уравнения Кирхгофа для электрической цепи [3] с постоянными параметрами, в результате чего получается система дифференциальных уравнений первого порядка из  $n+m$  уравнений, где  $n$  – достаточно большой набор магнитных оболочек условного разбиения ВК, а  $m$  – число ОПП токамака (для токамака КТМ  $m=9$ ).



PF1, PF2, PF3, PF4, PF5, PF6, HFCu, HFCd, CS – обмотки полоидального поля

Рисунок 2. Схема размещения обмоток полоидального поля относительно ВК токамака КТМ

Для уменьшения объема представления начальную систему  $n+m$  уравнений можно записать только для  $i$ -й ОПП и  $j$ -го элемента (магнитной проводящей оболочки) ВК в виде следующих уравнений:

$$L_{pfi} \cdot \frac{dI_{pfi}(t)}{dt} + R_{pfi} \cdot I_{pfi}(t) - \sum_{j=1}^n \left( M_{pfi \ vcj} \cdot \frac{dI_{vcj}(t)}{dt} \right) + \sum_{k=1, k \neq i}^{m-1} \left( M_{pfi \ pfk} \cdot \frac{dI_{pfk}(t)}{dt} \right) = E_{pfi}(t), \quad (1)$$

$$L_{vcj} \cdot \frac{dI_{vcj}(t)}{dt} + R_{vcj} \cdot I_{vcj}(t) - \sum_{i=1}^m \left( M_{vcj \ pfi} \cdot \frac{dI_{pfi}(t)}{dt} \right) + \sum_{l=1, l \neq j}^n \left( M_{vcj \ vcl} \cdot \frac{dI_{vcl}(t)}{dt} \right) = 0. \quad (2)$$

В уравнении (1) приняты следующие обозначения:  $L_{pfi}$ ,  $R_{pfi}$ ,  $M_{pfi \ vcj}$ ,  $M_{pfi \ pfk}$  – собственная индуктивность и активное сопротивление  $i$ -й ОПП, взаимная индуктивность между  $j$ -м элементом ВК и  $i$ -й ОПП, взаимная индуктивность между  $k$ -й и  $i$ -й ОПП, соответственно.

В уравнении (2) приняты следующие обозначения:  $L_{vcj}$ ,  $R_{vcj}$ ,  $M_{vcj \ pfi}$ ,  $M_{vcj \ vcl}$  – собственная индуктивность и активное сопротивление  $j$ -го элемента ВК, взаимная индуктивность между  $j$ -м элементом ВК и  $i$ -й ОПП, взаимная индуктивность между  $j$ -м и  $l$ -м элементами ВК, соответственно.

Преобразуем систему уравнений динамики токов магнитной системы токамака КТМ на основе уравнений (1), (2) к новому виду, в котором параметры преобразованных дифференциальных уравнений (обобщенные параметры) связаны с параметрами уравнений (1), (2) однозначными выражениями.

Для преобразования уравнений (1), (2) используем обобщенную теорему о среднем значении функции, входящей в определенный интеграл произведения двух функций [4] и 1-й закон Кирхгофа о равенстве нулю суммы токов в узле токовых контуров [3]. Обобщенная теорема о среднем значении предполагает выполнение следующих условий: интегрируемость двух функций  $f(x)$  и  $g(x)$  в промежутке интегрирования, существование конечных ограничений для функции  $f(x)$  и функция  $g(x)$  не меняет знак во всем промежутке интегрирования. При этих условиях выполняется равенство

$$\bar{f} = \frac{\int_a^b f(x)g(x)dx}{\int_a^b g(x)dx}. \quad (3.0)$$

Интегралы в выражении (3.0) при достаточно большом разбиении интервала интегрирования можно заменить суммами, в которых функции  $f(x)$  и  $g(x)$  заменены их значениями в интервалах дискретизации, а значение постоянного интервала дискретизации выносится из-под сумм и сокращается. Поэтому можно записать результат обобщенной теоремы о среднем в следующем виде.

$$\sum_{i=1}^n (A_j \cdot B_j) = \bar{A} \cdot \sum_{j=1}^n B_j, \quad (3.1)$$

где  $A_j$  и  $B_j$  – ряды чисел, для которых существуют суммы,  $v \leq A_j \leq V$ , где  $v$ ,  $V$  – наименьшее и наибольшее значение ряда в рассматриваемом интервале чисел, соответственно,  $B_j$  – не меняет знак в данном интервале чисел, а  $\bar{A}$  – среднее значение ряда чисел  $A_j$ , полученное из выражения (3.1). Условия обобщенной теоремы о среднем соблюдаются для параметров уравнений динамики, поэтому выражение (3.1) может быть использовано в дальнейших преобразованиях.

Выразим ток в  $j$ -м элементе из уравнения (2) и просуммируем все  $n$  токов  $j$ -х оболочек условного разбиения ВК. Так как ток, наведенный на ВК, равен сумме токов составляющих оболочек условного разбиения ВК, то получим следующее выражение для суммарного тока, наведенного на ВК током в  $i$ -й ОПП. Все токи и напряжения здесь и в дальнейших выражениях являются функциями времени, однако для уменьшения объемов выражений в дальнейшем записываем эти переменные без представления зависимости от времени:

$$I_{vc} = \sum_{j=1}^n I_{vcj} = \sum_{j=1}^n \left( \frac{M_{vcj \text{ pfi}}}{R_{vcj}} \cdot \frac{dI_{\text{pfi}}}{dt} \right) - \sum_{j=1}^n \sum_{l=1, l \neq j}^{n-1} \left( \frac{M_{vcj \text{ vcl}}}{R_{vcj}} \cdot \frac{dI_{\text{vcl}}}{dt} \right) - \sum_{j=1}^n \left( \frac{L_{vcj}}{R_{vcj}} \cdot \frac{dI_{vcj}}{dt} \right). \quad (4)$$

Запишем первый член правой части выражения (4) с учетом преобразования (3) в следующем виде:

$$\sum_{j=1}^n \left( \frac{M_{vcj \text{ pfi}}}{R_{vcj}} \cdot \frac{dI_{\text{pfi}}}{dt} \right) = \frac{dI_{\text{pfi}}}{dt} \cdot \bar{M}_{vc \text{ pfi}} \cdot \sum_{j=1}^n \frac{1}{R_{vcj}} = \frac{\bar{M}_{vc \text{ pfi}}}{R_{vc}} \cdot \frac{dI_{\text{pfi}}}{dt}, \quad (5)$$

где  $R_{vc}$  – общее сопротивление ВК.

Представим второй член выражения (4) двумя членами в следующем виде:

$$\sum_{j=1}^n \sum_{l=1, l \neq j}^{n-1} \left( \frac{M_{vcj \text{ vcl}}}{R_{vcj}} \cdot \frac{dI_{\text{vcl}}}{dt} \right) = \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^n \left( \frac{M_{vcj \text{ vcl}}}{R_{vcj}} \cdot \frac{dI_{\text{vcl}}}{dt} \right) - \sum_{j=1}^n \left( \frac{M_{vcj \text{ vcj}}}{R_{vcj}} \cdot \frac{dI_{vcj}}{dt} \right), \quad (6)$$

где  $M_{vcj \text{ vcj}} \equiv L_{vcj}$  по определению.

Так как после подстановки выражения (6) в (4) третий член выражения (4) сокращается, то осталось преобразовать первый член выражения (6), который принимает следующий вид с учетом выражения (3):

$$\sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^n \left( \frac{M_{vcj \text{ vcl}}}{R_{vcj}} \cdot \frac{dI_{\text{vcl}}}{dt} \right) = \sum_{j=1}^n \frac{1}{R_{vcj}} \left( \bar{M}_{vcj \text{ vc}} \cdot \frac{dI_{vc}}{dt} \right) = \bar{M}_{vc \text{ vc}} \cdot \frac{dI_{vc}}{dt} \cdot \frac{1}{R_{vc}}, \quad (7)$$

где  $\bar{M}_{vc \text{ vc}} = L_{\text{eff} \text{ vc}}$  – эффективная собственная индуктивность вакуумной камеры с учетом всех особенностей ее геометрии и взаимного влияния наведенных токов на ее оболочках друг на друга.

Для уравнения (1) третий член слева можно преобразовать к следующему виду с учетом выражения (3):

$$\sum_{j=1}^n \left( M_{\text{pfi} \text{ vcj}} \cdot \frac{dI_{vcj}}{dt} \right) = \bar{M}_{\text{pfi} \text{ vc}} \cdot \sum_{j=1}^n \frac{dI_{vcj}}{dt} = \bar{M}_{\text{pfi} \text{ vc}} \cdot \frac{dI_{vc}}{dt}. \quad (8)$$

Преобразованные уравнения (1), (2) с учетом выражений (4), (5), (6), (7), (8) принимают следующий вид:

$$L_{\text{pfi}} \cdot \frac{dI_{\text{pfi}}}{dt} + R_{\text{pfi}} \cdot I_{\text{pfi}} - \bar{M}_{\text{pfi} \text{ vc}} \cdot \frac{dI_{vc}}{dt} + \sum_{k=1, k \neq i}^{m-1} \left( M_{\text{pfi} \text{ pfk}} \cdot \frac{dI_{\text{pfk}}}{dt} \right) = E_{\text{pfi}}, \quad (9)$$

$$L_{\text{eff} \text{ vc}} \cdot \frac{dI_{vc}}{dt} + R_{vc} \cdot I_{vc} - \sum_{i=1}^m \left( \bar{M}_{vc \text{ pfi}} \cdot \frac{dI_{\text{pfi}}}{dt} \right) = 0. \quad (10)$$

В уравнениях (9) и (10) введены полученные обобщенные параметры:  $\bar{M}_{\text{pfi} \text{ vc}}$ ,  $L_{\text{eff} \text{ vc}}$ ,  $R_{vc}$ ,  $\bar{M}_{vc \text{ pfi}}$ , которые связаны с исходными параметрами магнитных оболочек однозначными выражениями, следующего вида:

$$\bar{M}_{pfi\ vc} = \frac{\sum_{j=1}^n \left( M_{pfi\ vci} \cdot \frac{dI_{vcj}}{dt} \right)}{\sum_{j=1}^n \frac{dI_{vcj}}{dt}} = \bar{M}_{vc\ pfi}, \quad (11)$$

где  $\bar{M}_{pfi\ vc}$  – средняя взаимная индуктивность между ВК и  $i$ -й КПП;

$$L_{eff\ vc} = \bar{\bar{M}}_{vc\ vc} = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^n \left( \frac{M_{vcj\ vcl}}{R_{vcj}} \cdot \frac{dI_{vcl}}{dt} \right)}{\sum_{j=1}^n \left( \frac{\sum_{l=1}^n \left( \frac{M_{vcj\ vcl}}{R_j} \cdot \frac{dI_{vcl}}{dt} \right)}{R_j \cdot \sum_{l=1}^n \frac{dI_{vcl}}{dt}} \right)}, \quad (12)$$

где  $L_{eff\ vc}$  – эффективная индуктивность ВК;

$$R_{vc} = \frac{1}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{R_{vcj}}}, \quad (13)$$

где  $R_{vc}$  – общее сопротивление ВК.

## 2. РАБОЧИЙ ВАРИАНТ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ТОКОВ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ТОКАМАКА КТМ

Рабочий вариант модели динамики токов в ОПП и на ВК отличается от предварительного варианта выделением для каждой ОПП своего участка ВК, который предлагается представить в виде группы магнитных проводящих оболочек и соответствующего им эффективного витка ВК с вихревым током, наведенным данной ОПП, а также имеющего свои обобщенные параметры и магнитные связи с другими ОПП и эффективными витками. Тогда можно применить новые обобщенные параметры, которые связаны с магнитными проводящими оболочками начальной системы уравнений (1), (2) такими же выражениями (11), (12), (13), но учитывающими разделение ВК на группы оболочек, каждая связанная со своим ОПП. В результате в рабочем варианте модели токов для токамака КТМ вместо ВК с точки зрения наведенных вихревых токов вводится 9 эффективных витков, которые имеют свои параметры и магнитные связи с другими ОПП и эффективными витками.

Запишем дифференциальные уравнения для тока  $i$ -й ОПП и  $i$ -го суммарного вихревого тока на эффективном витке ВК, наведенного током  $i$ -й ОПП, в обобщенных параметрах с учетом полученных выражений (9), (10), (11), (12), (13):

$$L_{pfi} \cdot \frac{dI_{pfi}}{dt} + R_{pfi} \cdot I_{pfi} - \sum_{j=1}^m \left( \bar{M}_{pfi\ vcpfi} \cdot \frac{dI_{vcpfi}}{dt} \right) + \sum_{k=1, k \neq i}^{m-1} \left( M_{pfi\ pjfk} \cdot \frac{dI_{pjfk}}{dt} \right) = E_{pfi} \quad (14)$$

$$L_{eff\ vcpfi} \cdot \frac{dI_{vcpfi}}{dt} + R_{vcpfi} \cdot I_{vcpfi} - \sum_{j=1}^m \left( \bar{M}_{vcpfi\ pj} \cdot \frac{dI_{pj}}{dt} \right) + \sum_{j=1}^m \left( \bar{M}_{vcpfi\ vcpfi} \cdot \frac{dI_{vcpfi}}{dt} \right) = 0 \quad (15)$$

В уравнениях (14) и (15) введены следующие обозначения:  $\bar{M}_{pfi\ vcpfi}$  – средняя взаимная индуктивность между  $i$ -й ОПП и  $j$ -м эффективным витком на ВК;  $L_{eff\ vcpfi}$  – эффективная собственная индуктивность группы токовых оболочек на ВК, наведенных током  $i$ -й ОПП;  $R_{vcpfi}$  – суммарное активное сопротивление группы токовых оболочек, наведенных током  $i$ -й ОПП;  $I_{vcpfi}$  – суммарный ток группы оболочек, наведенных током  $i$ -й ОПП;  $\bar{M}_{vcpfi\ pj}$  – средняя взаимная индуктивность между  $i$ -м эффективным витком и  $j$ -й ОПП;  $\bar{M}_{vcpfi\ vcpfi}$  – средняя взаимная индуктивность между  $i$ -м и  $j$ -м эффективными витками.

Так как на токамаке КТМ используется 9 ОПП и введены 9 эффективных витков вместо ВК, соответствующих 9 ОПП, то модель динамики токов в ОПП токамака КТМ с учетом вихревых токов на ВК можно представить системой 18 дифференциальных уравнений первого порядка.

Можно показать, что выражения для обобщенных параметров уравнений (14) и (15) связаны с токовыми оболочками начальной модели и их параметрами выражениями, подобными (11), (12), (13), с учетом введенных обозначений для уравнений (14) и (15):

$$\bar{M}_{pfi\ vcpfi} = \frac{\sum_{j=1}^n \left( M_{pfi\ vci} \cdot \frac{dI_{vcj}}{dt} \right)}{\sum_{j=1}^n \frac{dI_{vcj}}{dt}} = \bar{M}_{vcpfi\ pfi}, \quad (16)$$

где  $\bar{M}_{pfi\ vcpfi}$  – средняя взаимная индуктивность между  $i$ -й ОПП и  $i$ -м эффективным витком ВК,  $n$  – количество токовых оболочек на ВК от  $i$ -й ОПП;

$$L_{eff\ vcpfi} = \bar{\bar{M}}_{vcpfi\ vcpfi} = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^n \left( \frac{M_{vcj\ vcl}}{R_{vcj}} \cdot \frac{dI_{vcl}}{dt} \right)}{\sum_{j=1}^n \left( \frac{\sum_{l=1}^n \left( \frac{M_{vcj\ vcl}}{R_j} \cdot \frac{dI_{vcl}}{dt} \right)}{R_j \cdot \sum_{l=1}^n \frac{dI_{vcl}}{dt}} \right)}, \quad (17)$$

где  $L_{eff\ vcpfi}$  – эффективная собственная индуктивность  $i$ -го эффективного витка, наведенного током  $i$ -й ОПП;

$$R_{vcpfi} = \frac{1}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{R_{vcj}}}, \quad (18)$$

где  $R_{\text{ср}i}$  – активное сопротивление  $i$ -го эффективного витка, наведенного током  $i$ -й ОПП.

Можно отметить, что уравнение для вихревых токов (15) рабочего варианта отличается от уравнения (10) дополнительным 4-м членом, учитывающим взаимное магнитное влияние эффективных витков, что отвечает уравнениям Кирхгофа для электрических цепей [3].

Таким образом, в результате представленных преобразований получена рабочая модель динамики тока в ОПП токамака КТМ с учетом вихревых токов на ВК.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложена математическая модель динамики токов в обмотках полоидального поля токамака КТМ с учетом наведенных вихревых токов на ВК в виде системы 18 дифференциальных уравнений первого порядка с обобщенными параметрами.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Разработка глобальных пространственных вычислительных моделей для анализа переходных электромагнитных процессов и оптимизации конструкции международного термоядерного реактора ИТЭР. / Д.А. Арсланова, А.В. Белов, В.А. Беляков [и др.]. – ВАНТ, сер. Термоядерный синтез, вып. 3 (2011), стр. 3 – 26.
2. Садыков А.Д., Шаповалов Г.В., Чектыбаев Б.Ж. и др. Расчетный код «TokScen» моделирования сценария разряда в токамаке (модуль библиотеки «Виртуальный Токамак»). – ВАНТ, сер. Термоядерный синтез, 2013, том 36. вып. 4, с. 94-101.
3. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники. – Изд. «Высшая школа», 1973.
4. Фихтенгольц, Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. Том 2. – Изд. «Физматлит», 2001.

### КТМ ТОКАМАГІНІҢ ВК ҚҰЙЫНДЫ ТОКТАРДЫ ЕСЕПКЕ АЛУМЕН ПОЛОИДАЛЬДЫ ӨРІСТІҢ ОРАМДАР ТОКЫНЫҢ ДИНАМИКАСЫНЫҢ МАТЕМАТИКАЛЫҚ МОДЕЛІ

Шаповалов Г.В.

*Қазақстан, Курчатова қ., ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы*

Жұмыста токамақтың вакуумдық камерасында кезелген құйынды токтарды есепке алумен байытылған параметрларымен полоидальдық өрістің орамдарында токтар динамигінің математикалық моделі алынды. Бастапқы модельдің параметрларымен токтар динамикасының алынған теңдеулердің байытылған параметрлардың бірқатарлы байланысы көрсетілді. Жұмыс нұсқасында КТМ токамагі үшін ВК-да құйынды токтарды есепке алумен ПӨО токтар динамикасының моделі, КТМ токамагін физикалық іске қосуға дайындауда пайдалануға мүмкін болатын, байытылған параметрларымен бірінші қатарлы 18 дифференциалдық теңдеулермен ұсынылды.

### MATHEMATICAL MODEL OF DYNAMICS OF POLOIDAL FIELD CURRENT WINDINGS WITH ACCOUNT OF EDDY CURRENTS ON KTM TOKAMAK VACUUM CHAMBER

G.V. Shapovalov

*Branch “Institute of Atomic Energy” RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan*

This paper describes the obtained mathematical model of current dynamics in poloidal field coils with generalized parameters with account of induced eddy currents on a Tokamak vacuum chamber (VC). It also shows a well-defined relationship of generalized parameters of obtained equations of the current dynamics with the parameters of a reference model. In a routine work a current dynamics model in PFC (poloidal field coils), which can be used in preparation for KTM Tokamak physical start-up, is represented with 18 first-order differential equations with generalized parameters taking into account eddy currents in VC.

УДК 550.34

## СПЕКТРАЛЬНЫЙ СОСТАВ ЗАПИСЕЙ ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В РАЙОНЕ БАЧАТСКОГО УГОЛЬНОГО РАЗРЕЗА 9 ФЕВРАЛЯ 2012 ГОДА И 18 ИЮНЯ 2013 ГОДА

Габсатарова И.П., Бабкова Е.А.

*Геофизическая служба РАН, г. Обнинск, Россия*

Представлены результаты регистрации природно-техногенных землетрясений в районе Бачатского угольного разреза 9 февраля 2012 г. и 18 июня 2013 г., анализа записей волновых форм, зарегистрированных станциями Геофизической службы РАН, и уточнения параметров землетрясений. Оценена возможность использования спектральных дискриминантов по записям станций, удаленных от событий на расстояния от 200 до 650 км.

9 февраля 2012 г. в 13ч 24м в районе Бачатского угольного разреза в Кемеровской области (рисунок 1) произошло заметное сейсмическое событие. Оно было зарегистрировано станциями Геофизической службы РАН, казахстанскими станциями, находящимися под управление РГП ИГИ, станциями Международной системы мониторинга ОДВЗЯИ. Однако событие не вошло ни в каталог ССД (Служба срочных донесений), ни в Сейсмологический каталог ГС РАН, хотя имело магнитуду  $m_b=4.2$  (по данным ССД) и  $m_b=4.4$  (по данным NEIC – National Event Information Center (каталог Геологической службы США), соответствующую уровню публикуемых событий в названных изданиях. В сообщении, поступившем в оперативном режиме из Алтае-Саянского филиала ГС СО РАН, тип события определялся, как «взрыв», и это означало, что дальнейшая обработка в режиме ССД в Обнинске прекращалась, рассылка сообщений по событию не производилась. Событие не было включено и в Сейсмологический бюллетень ГС РАН.

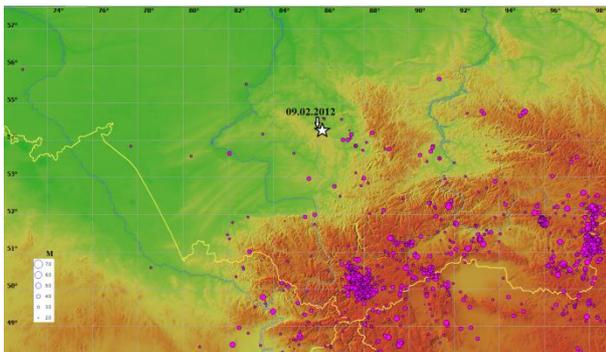


Рисунок 1. Положение эпицентра сейсмического события 9 февраля 2012 г. Бачатского угольного разреза на фоне сейсмичности региона по данным Алтае-Саянского филиала за 2003 – 2012 гг. [«Землетрясения России», 2006–2013 гг.]

Однако почти сразу же в Обнинск поступил запрос из Администрации Кемеровской области и Главного управления МЧС России по Кемеровской области на выявление причин сейсмической активности. «...Поступали многочисленные обращения от жителей, с жалобами на сильные толчки и страх за свою безопасность при нахождении в помещении.

Ситуация усугублялась тем, что территория подработана горными выработками. По информации представителей угольных компаний, в указанное время взрывные работы не проводились. Непредсказуемость возможного дальнейшего развития событий создавала социальную напряженность в районе...». Запросы послужили основанием для организации в Алтае-Саянском филиале ГС СО РАН локального мониторинга событий в этом районе. Впервые была изучена в Кузбассе наведенная сейсмичность в окрестности открытой горной выработки, представляющая землетрясения на глубинах до четырех километров под разрезом Бачатский в виде непрерывного процесса с событиями малых энергий и кратковременных мощных активизаций (три за последние два года). В том числе локальной сетью было зарегистрировано Бачатское землетрясение 18 июня 2013 г. ( $T_0=23:02:09$ ,  $\varphi=54.29^\circ N$ ,  $\lambda=86.16^\circ E$ ,  $h=4$  км,  $M_L=6.1$ ,  $m_b=5.5$ ,  $m_B=5.9$ ) и последующий после него афтершоковый процесс [1].

Цель настоящего исследования – установить возможность в оперативном режиме получить дополнительную информацию о природе события после полученного в ССД решения, в процессе последующего дополнительного анализа волновых форм (Post – analysis processing) с применением некоторых дискриминантов. В рутинном технологическом процессе такие действия в настоящее время не проводятся.

Международный центр данных (МЦД) ОДВЗЯИ не оставил без внимания событие 9 февраля 2012 г. в 13 ч 24м, включив его во все информационные продукты SEL (Standard Event Lists) и REB (Reviewed event bulletin). Попало оно и в список SSEB (Standard Screened Event Bulletin). Напомним, что процедура «отбора» событий (screening) в Международном центре данных с определением их возможной природы, присвоения им категории, с оценкой в числовых баллах основаны на использовании следующих критериев [2]: 1) соотношение магнитуд объемной и поверхностной волн ( $M_s:m_b$ ); 2) глубины явления (Depth); 3) соотношение высокочастотных региональных амплитуд P/S (Reg); 3) синергетика сейсмического местоположения и анализ гидроакустического сигнала (Hydro). Пороговое значение фильтрации события по критерию  $M_s:m_b$  –

SCOREM, определяют исходя из следующего выражения:

$$SCOREM = \frac{2.20 - (1.25 \cdot \overline{mb} - \overline{Ms})}{2\sigma_M} - 1,$$

где: Ms – магнитуда по поверхностным волнам - амплитуде и периоду; mb- объемная магнитуда по P-волне, зарегистрированной короткопериодными приборами.

Критерий применяется ко всем событиям с  $mb \geq 3.5$ , представленным в REB, для которых имеется, по крайней мере, 2 значения Ms. Если SCOREM > 0, событие отфильтровывается как имеющее природное происхождение, если SCOREM ≤ 0, то событие отбирается для бюллетеня SEB (Standard Event

Bulletin) и подвергается дальнейшему изучению с использованием других дискриминантов: по критерию глубины явления (DSRORE) и по критерию соотношения амплитуд региональных фаз (RSCORE).

Из информационного блока по рассматриваемому событию (рисунок 2) видно, что оно не было «отсеяно» как природное и было отобрано (категория NS) для SEB (Standard Event Bulletin) на основании соотношения магнитуд объемной и поверхностной волн – SCOREM оказалось отрицательным (-1.78). Для сравнения для взрыва в Северной Корее 12.02.2013 с  $mb=3.9$  значение SCOREM=-3.79, а для промышленного взрыва в Хакасии 23.04.2012 в 09ч 21м с  $mb=3.5$  – SCOREM=-1.1. Другие дискриминанты для бачатского события не определялись.

EVENT 8357990 SOUTHWESTERN SIBERIA, RUSSIA											
Date:	2012/02/09 13:24:02.380	Err:	0.58	RMS:	0.82	Latitude:	54.3463	Longitude:	86.2157		
Smaj:	12.6	Smin:	7.0	Az:	135	Depth:	0.0	Err:			
Ndef:	27	Nsta:	20	Gap:	79	mdist:	0.91	Mdist:	87.83		
Qual:	miuk	Author:	IDC_SEB	OrigID:	8379666						

EVENT SUMMARY BLOCK											
Category	Score	Dscore	mscore	Rscore	Hscore	Smaj_sc	Smin_sc	Depth	Sdep	mbms	Sml
NS/Onsh	-1.78	0.0	-1.78	0.0	0.0	12.6	7.0	0.0	0.0	0.86	0.2

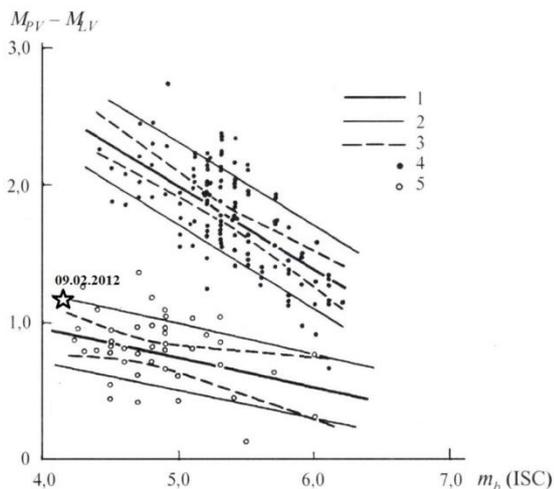
Рисунок 2. Фрагмент информационный блок по сейсмическому событию 9.02.2012 г. в 13ч 24 м [Web-сайт ОДВЗЯИ]

Практика показывает, что для слабых сейсмических событий с  $mb=3.5 - 4.0$  магнитудный дискриминант работает неустойчиво. Это связано, в первую очередь, с необходимостью определять магнитуду по поверхностной волне на записях станций, удаленных на региональные расстояния, которые имеют свои особенности, связанные с геологическими условиями, по затуханию энергии поверхностной волны и специфический диапазон периодов для волны Релея. Это вызывает разброс значений магнитуд и влияет на получение статистически устойчивого значения среднесетевой магнитуды. Поэтому были изучены спектральные особенности записей сейсмических фаз для получения дополнительных критериев.

Среднесетевое значение магнитуды по поверхностной волне Ms было определено по данным бюллетеня REB МЦД для четырех станций: MKAR ( $\Delta=7.96^\circ$ ,  $Az=200^\circ$ ,  $Ms=2.9$ ), ААК ( $\Delta=14.03^\circ$ ,  $Az=218^\circ$ ,  $Ms=3.1$ ), АКТО ( $\Delta=17.59^\circ$ ,  $Az=269^\circ$ ,  $Ms=3.1$ ), KSRS ( $\Delta=32.98^\circ$ ,  $Az=104^\circ$ ,  $Ms=3.2$ ). Магнитуда по поверхностной волне определена в основном по записям станций, удаленных на региональные расстояния, так как событие было несильным. Среднесетевое значение магнитуды по объемной P-волне  $mb=3.9$  определено по 14 станциям. Могло бы быть определено в ССД значение  $M_{LV}$  для некоторых

станций, и на какое время это увеличило бы процесс получения параметров события? Например, через 6.5 минуты со времени возникновения или через 4 минуты после первого вступления на станции регистрируется отчетливый цуг волн и максимум волны Релея на станции Талая, TLY ( $\Delta=10.8^\circ$ ,  $Az=97^\circ$ , магнитуда  $M_{LV}=3.0$ ). Хорошо обнаруживается волна Релея на станции BRVK – Боровое ( $\Delta=9.5^\circ$ ,  $Az=267^\circ$ , магнитуда  $M_{LV}=3.1$ ), и на станции ULN – Улан-Батор ( $\Delta=14.6^\circ$ ,  $Az=108^\circ$ , магнитуда  $M_{LV}=3.0$ ). Определение этих трех значений магнитуды могло быть проведено в 10-ти минутный интервал после возникновения землетрясения. А разница  $mb-Ms=1.2$  ложится на верхнюю границу «коридора» значений для землетрясений в соответствии с рисунком 3 из [3].

Безусловно уверенного ответа о природе события только по магнитудному дискриминанту дать нельзя. Вопрос о глубине события также неоднозначен. По виду волновой картины, зарегистрированной на станции Залесово и регистрации поверхностной волны регионального типа Rg можно сказать, что событие произошло на небольшой глубине. Вероятно, это и послужило причиной отнесения этого события к взрывам специалистами Алтае-Саянского филиала ГС СО РАН.



1 - оценки прямых регрессий; 2 - границы среднего квадратичного разброса данных; 3 - доверительные границы для прямых регрессий на уровне доверия 0.9; 4 - ПЯВ; 5 - землетрясения

Рисунок 3. Эффективность дискриминанта  $D(MPV - MLV)$  в региональной зоне для Евразии по записям ПЯВ и землетрясений, полученные для станции BRVK [3]

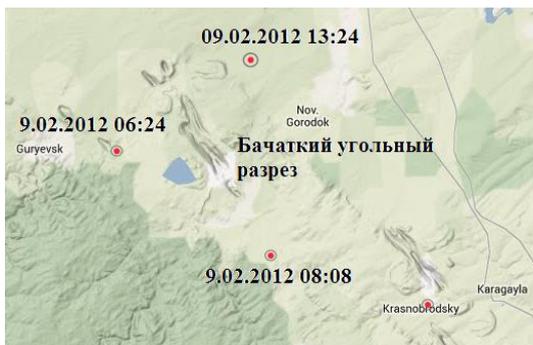


Рисунок 4. Положение эпицентров техногенных событий вблизи Бачатского разреза по данным МЦД [Web-сайт МЦД ОДВЗЯИ]

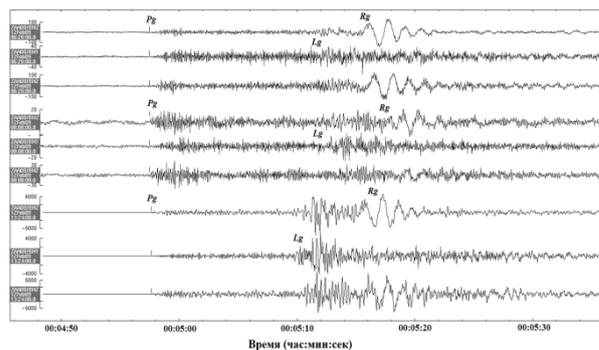
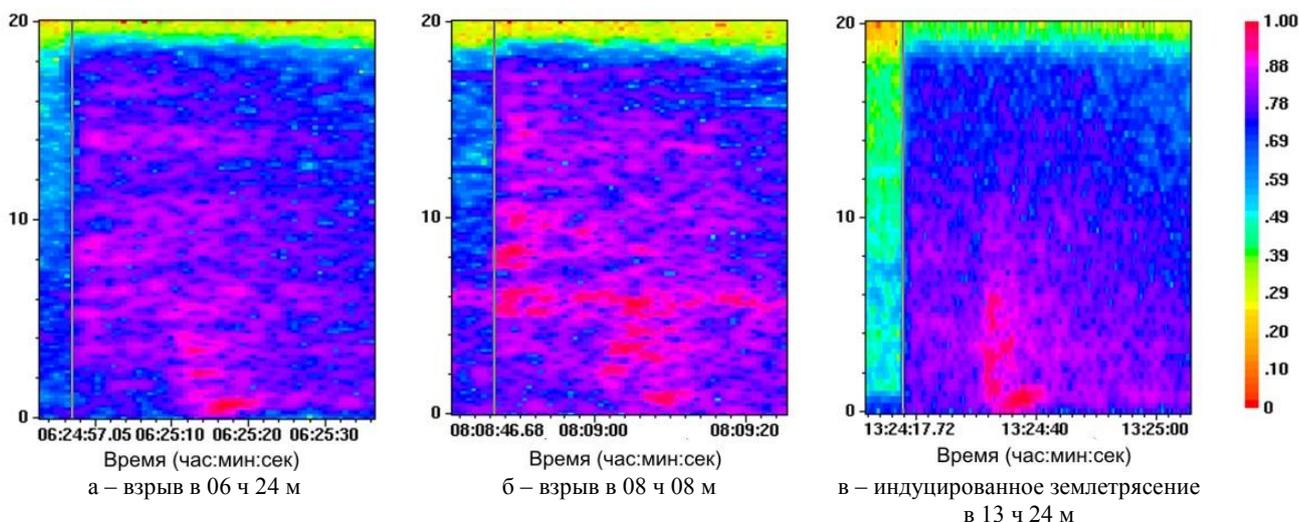


Рисунок 5. Трехкомпонентные записи трех сейсмических событий, зафиксированных 9 февраля 2012 г. станцией Залесово, отфильтрованные в полосе 0.5–16 Г (сверху вниз): промышленных взрывов в 06 ч 24 м, 08 ч 08 м и индуцированного землетрясения в 13 ч 24 м

Для дальнейшего анализа записи станции Залесово, входящей в сеть МСМ, были запрошены из МЦД. Станция Залесово удалена от изучаемого события на расстояние  $0.86^\circ$ . Кроме записи события 9 февраля 2012 г. в 13 ч 24 м рассмотрены записи двух ближайших к Бачатскому разрезу промышленных взрывов, произведенных в этот же день в 06 ч 24 м и в 08 ч 08 м. Положение их эпицентров (рисунок 4) по данным SEB показано на карте (заимствовано с сайта МЦД ОДВЗЯИ). Сравнение записей взрывов и предположительно индуцированного землетрясения (рисунки 4, 5) показывает на явные их отличия: более интенсивны по амплитуде и более высокочастотны колебания в Rg-волне в пределах первых 4–5 сек, слабые колебания в группе Lg-волн и практическое их отсутствие на вертикальной компоненте. Что касается записи события в 13 ч 24 м, то Rg-волна выражена слабо, наиболее мощные колебания фиксируются в группах поперечных и поверхностных волн.



Вертикальная ось – частота в Гц, горизонтальная ось – время (час:мин:сек), спектральная мощность колебаний (нормированная на максимальное значение) показана цветом в соответствии с легендой справа

Рисунок 6. Спектрограммы трех сейсмических событий, зафиксированных 9 февраля 2012 г. станцией Залесово (вертикальная компонента), построенные с использованием программы Geotool [4]

Особенно хорошо различия видны на частотно-временных диаграммах (спектрограммах) – рисунок 6, построенных с помощью программы Geotool [4]. Для спектрограмм двух взрывов (рисунок 6 – а, б) заметна некоторая горизонтальная «полосатость», возможно связанная с временными задержками при производстве групповых взрывов. Такого эффекта нет на спектрограмме сейсмического события в 13 ч 24 м (рисунок 6–в). Кроме того, для взрывов характерна большая мощность в P<sub>g</sub>-волне, сопоставимая со спектральной мощностью L<sub>g</sub> и R<sub>g</sub>-волн и более высокочастотный состав. Преобладание в спектре мощности сейсмического события в 13 ч 24 м поперечных L<sub>g</sub>-волн, относительно P<sub>g</sub>-волны, может объясняться сдвиговой природой события.

Различия видны и в спектральном дискриминанте Log (P<sub>g</sub>/L<sub>g</sub>), частотное распределение значений которого для событий 9 февраля 2012 г. в 06 ч 24 м, 08 ч 08 м и 13 ч 24 м показано на рисунке 7. Особенно значимые различия в полосе от 3 до 10 Гц. Значения Log (P<sub>g</sub>/L<sub>g</sub>) для события в 13 ч 24 м значительно меньше, нежели для взрывов в 06 ч 24 м и 08 ч 08 м.

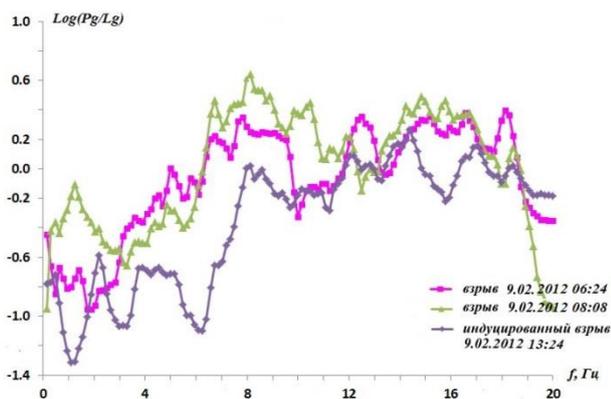
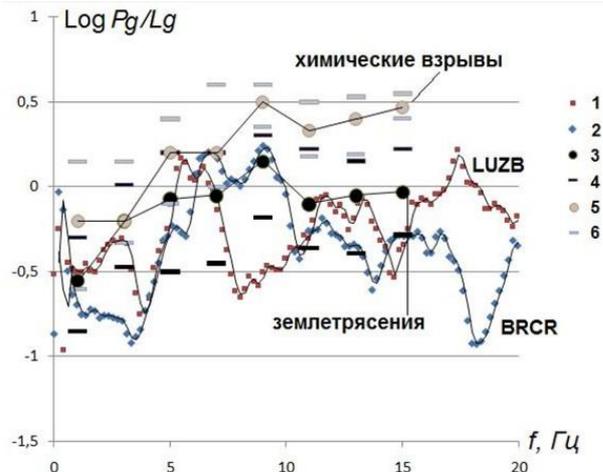


Рисунок 7. Зависимость значений логарифма спектрального отношения P<sub>g</sub>/L<sub>g</sub> от частоты по записям станции Залесово (ZAL) для трех сейсмических событий, зафиксированных 9 февраля 2012 г.

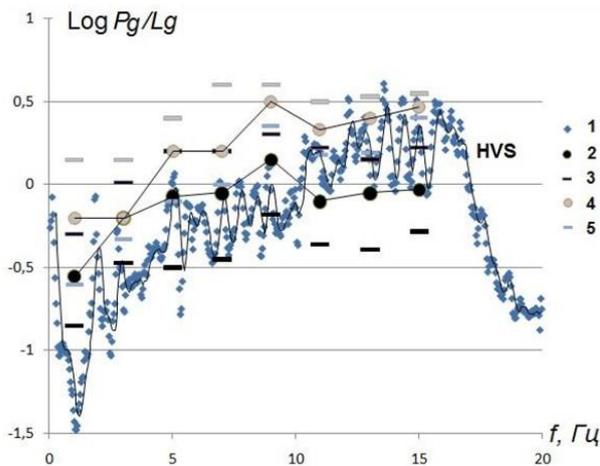
Для получения значений дискриминанта Log (P<sub>g</sub>/L<sub>g</sub>) на записях более удаленных станций были проанализированы имеющиеся в наличии записи волновых форм станций Лужба (LUZB), Берчикуль (BRCR) и Хову-Аксы (HVS), расположенных на расстоянии Δ=1.62°, 1.76° и 5.5° от эпицентра и, поступающих в ИОЦ ГС РАН в Обнинск из Алтае-Саянского филиала ГС СО РАН в режиме, близком к реальному времени.

Спектральные построения выполнены по записям вертикальной компоненты. Для двух более близких станций было выбрано окно в 5 с (Лужба и Берчикуль), для Хову-Аксы – 15 с. Графики зависимости от частоты Log P<sub>g</sub>/L<sub>g</sub> также сопоставлялись со значениями, полученными P.G. Richards, W.-Y.Kim [5] (рисунки 8 и 9).



1 - значения log P<sub>g</sub>/L<sub>g</sub> станции Лужба; 2 - значения log P<sub>g</sub>/L<sub>g</sub> станции Берчикуль; 3 - средние значения логарифма спектрального отношения P<sub>g</sub>/L<sub>g</sub> по P.G. Richards, W.-Y.Kim; 4 - отметки максимальных и минимальных значений логарифма спектрального отношения P<sub>g</sub>/L<sub>g</sub> для землетрясения по P.G. Richards, W.-Y.Kim; 5 и 6 - то же для химических взрывов

Рисунок 8. Зависимость значений логарифма спектрального отношения P<sub>g</sub>/L<sub>g</sub> от частоты по записям станций Лужба (LUZB) и Берчикуль (BRCR)



1 - значения log P<sub>g</sub>/L<sub>g</sub> станции Хову-Аксы; остальные обозначения – на рисунке 8

Рисунок 9. Зависимость значений логарифма спектрального отношения P<sub>g</sub>/L<sub>g</sub> от частоты по записи станции Хову-Аксы (HVS)

Полученные значения логарифма спектральных отношений P<sub>g</sub>/L<sub>g</sub> по записям станций Лужба и Берчикуль лежат ниже диапазона значений, установленных для промышленных взрывов и в основном находятся в области отрицательных значений, что типично для землетрясений согласно зависимости P.G. Richards, W.-Y.Kim [5] (рисунок 8). Зависимость значений логарифма спектрального отношения P<sub>g</sub>/L<sub>g</sub> от частоты по записи станции Хову-Аксы (рисунок 9) может быть использована в исследовании только в полосе частот от 0.5 до 7 Гц, как показывает график спектров шума и сейсмических фаз на этой станции (рисунок 10). В указанной частот-

ной полосе он также не подтверждает взрывную природу события 9 февраля 2012 г., так как значения  $\text{Log Pg/Lg}$  также хорошо сопоставимы с  $\text{Log Pg/Lg}$  для землетрясений по P.G. Richards, W.-Y.Kim.

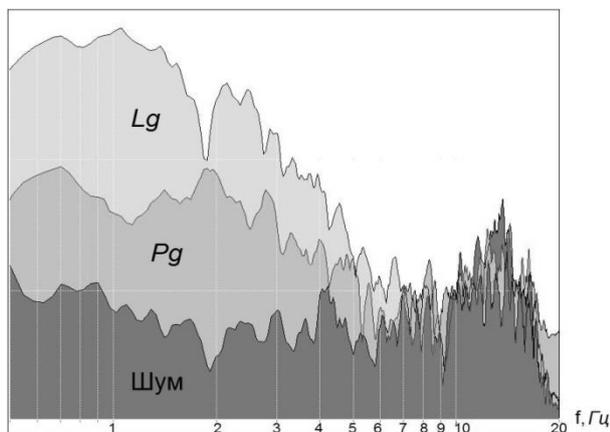


Рисунок 10. Соотношение спектров шума и сигнала Pg и Sg-волн в 15 с временном окне от вступления фаз. Станция Хову-Аксы. Вертикальная компонента

Можно предположить, что сейсмическое событие 9 февраля 2012 г. в 13 ч 24 м на Бачатском угольном разрезе Кемеровской области явилось «спусковым» моментом для последующей тектонической реализации накопившихся здесь напряжений за длительный период эксплуатации угольного месторождения и, вероятно, имело природу индуцированного землетрясения. Разрядка в виде слабых землетрясений, продолжалась в период с марта по май 2012 г., а затем в 2013 г.

Как отмечалось в [1] «...Кузнецкая котловина, где происходили исследуемые события, по геотектоническим представлениям является напряженным блоком, более прочным, чем горные хребты, окружающие впадину. За счет мощного техногенного воздействия на земную кору в районе разреза Бачатский создана ослабленная зона, в которой инициируется процесс наведенной сейсмичности...». Как представляется, сильнейшее в этом районе землетрясение 18 июня 2013 г. ( $T_0=23:02:09$ ,  $\varphi=54.29^\circ\text{N}$ ,  $\lambda=86.16^\circ\text{E}$ ,  $h=4$  км,  $M_L=6.1$ ,  $m_b=5.5$ ,  $m_B=5.9$  по данным [1]) правильнее рассматривать как тектоническое, спровоцированное техногенными явлениями в районе Бачатского угольного разреза. В этом районе, в пределах точности определения координат ( $\pm 1.0^\circ$ ), известны сильные землетрясения: шестибалльное 1.03.1881 с  $M=4.3$  и 5–6-ти балльное 25.04.1914 г. с  $M=4.9$  [6].

К сожалению, недостаточный динамический диапазон большинства региональных станций, записи которых использованы в исследовании, не позволил

качественно (без «зашкала») зарегистрировать данное землетрясение. Это относится и к записям станции Залесово. Ниже (рисунок 11) приведен пример записи и спектрограммы по станции Берчикуль ( $\Delta=1.76^\circ$ ). Они типичны для тектонического землетрясения с гипоцентром в верхней части разреза земной коры: частотный состав колебаний в P и S-волнах близок между собой, амплитуда S-волны существенно больше P-волны, P и S-волны имеют нормальное затухание с характерной кодовой частью.

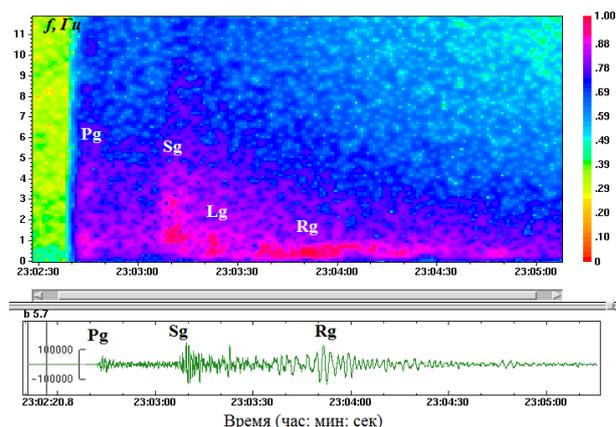


Рисунок 11. Спектрограмма и запись на вертикальной компоненте землетрясения 18 июня 2013 г. Станция Берчикуль Алтае-Саянского филиала ГС СО РАН

Детальное исследование характера реализации афтершокового процесса и его затухания может дать дополнительную информацию о природе этого явления.

#### Выводы

Дополнительный анализ записей и их спектров позволил сделать вывод о неверной идентификации сейсмического события 9 февраля 2012 г. в районе Бачатского угольного разреза как «взрыв», его следует отнести к индуцированному землетрясению.

Необходимо ввести в практику ССД для событий сомнительной природы вычисление магнитудного и спектрального дискриминантов. В качестве эталонного графика зависимости значений логарифма спектрального отношения  $\text{Pg/Lg}$  от частоты можно применять установленную P.G. Richards, W.-Y.Kim зависимость для землетрясений и мелких химических взрывов для территории Китая [5] с последующим уточнением такой зависимости для исследуемого района (в данном случае – района Кемерово).

Сильное землетрясение в районе Бачатского угольного разреза 18 июня 2013 г., вероятно, является тектоническим, спровоцированным длительным техногенным воздействием на среду.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Еманов, А.Ф. Техногенная сейсмичность разрезов Кузбасса / А.Ф. Еманов [ и др.] / Землетрясения России в 2012 году // Обнинск: ГС РАН. – 2014. – С. 104–108.
2. Бобров, Д.И. Существующая система отбора событий в Международном Центре Данных // Д.И. Бобров, Дж.М. Койн / Вестник НЯЦ РК. - 2009. – №3 – С. 11–16.
3. Кедров, О.К. Сейсмические методы контроля ядерных испытаний [отв. ред.: В.Н. Михайлов, А.О. Глико]. – М.: Саранск: Тип. «Крас. Окт.», 2005. – 420 с.
4. Coyne, John IDC Documentations Geotool Software User Tutorial / John Coyne, Karen Clark, Stephen Lloyd // 16 July 2003. – P 59.
5. 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.
6. Жалковский, Н.Д. IV. Алтай и Саяны // Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. / Н.Д. Желковский . – М.: Наука, 1977. – С. 297–314.

#### 2012 ЖЫЛҒЫ АҚПАНЫҢ 09-ЫНДА ЖӘНЕ 2013 ЖЫЛҒЫ МАУСЫМНЫҢ 18-ІНДЕ БАЧАТСК КӨМІР РАЗРЕЗІНІҢ АУДАНЫНДАҒЫ ТАБИҒИ-ТЕХНОГЕНДІ ЖЕР СІЛКІНУ ЖАЗБАЛАРЫНЫҢ СПЕКТРЛІ ҚҰРАМЫ

Габсатарова И.П. Бабкова Е.А.

*Ресей, Обнинск қ., РҒА геофизикалық қызметі*

2012 жылғы ақпанның 09-ында және 2013 жылғы маусымның 18-інде Бачатск көмір разрезінің ауданындағы табиғи-техногенді жер сілкінуінің, РҒА геофизикалық қызмет станциясымен тіркелген, толқын пішінді жазбаларының анализі, және жер сілкіну параметрлерінің нақты тіркеу нәтижесі ұсынылды. Оқиғадан алшақтау 200-ден 650 км-ге дейінгі ара қашықтағы, станция жазбалары бойынша спектрлі дискриминанттарды пайдалану мүмкіншілігі бағаланды.

#### SPECTRAL COMPOSITION RECORDS NATURAL-TECHNOGENIC EARTHQUAKES NEAR BACHATSK COAL MINE OF 9 FEBRUARY 2012 AND 18 JUNE 2013

I.P. Gabsatarova, E.A. Babkova

*Geophysical Survey RAS, Obninsk, Russia*

The report presents the results of registration of natural-technogenic earthquakes near Bachatsk coal mine of February 9, 2012 and June 18, 2013. Record analysis waveforms stations GS RAS and accuracy of the earthquakes parameters are conducted. The possibility of the use of spectral discriminant records by stations at a distance of 200 to 650 km are shown.

УДК 550.34

## О СВЯЗИ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В РАЙОНАХ МАКРАНА И ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ: ВОЗМОЖНАЯ ПОДГОТОВКА СИЛЬНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ В РАЙОНЕ ЦЕНТРАЛЬНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ

<sup>1)</sup> Копничев Ю.Ф., <sup>2)</sup> Соколова И.Н.

<sup>1)</sup> *Институт физики Земли РАН, г. Москва, Россия*

<sup>2)</sup> *Институт геофизических исследований, г. Курчатов, Казахстан*

Рассмотрены некоторые характеристики сейсмичности в регионе Центральной и Южной Азии. Показано, что после сильнейшего Макранского землетрясения 1945 г. ( $M_w=8.1$ ) в течение 11 лет резко активизировалась сейсмичность в районах Гиндукуша и Центрального Тянь-Шаня, где произошло 4 землетрясения с  $M_w=7.1 - 7.6$ . В 2013 г. произошли два очень сильных землетрясения в области Макрана ( $M_w=7.7$ ). По аналогии с серединой XX-го века после них можно предполагать существенное увеличение сейсмичности в районе Центрального Тянь-Шаня, где не было сильных землетрясений с  $M_w \geq 7.0$  после 1992 г. Установлено, что после Макранского землетрясения 24.09.2013 г., очаг которого находился на южном окончании Чаманского сдвига, в течение одного года проявились две полосы сейсмичности (события с  $M \geq 4.8$ ), одна из которых имеет субмеридиональное, а вторая – северо-северо-западное направление. Здесь после 24.09.2013 г. произошло несколько землетрясений в слабосейсмичных зонах. Кроме того, эти полосы пересекаются в области Центрального Казахстана, где 21.06.2014 г. произошло единственное более чем за 200 лет землетрясение с  $M > \sim 4.0$ . Полученные данные свидетельствуют о росте субгоризонтальных напряжений в рассматриваемом регионе, что должно привести к ускорению возможной подготовки серии сильных землетрясений, в первую очередь, в области Центрального Тянь-Шаня, между  $70$  и  $76^\circ$  Е.

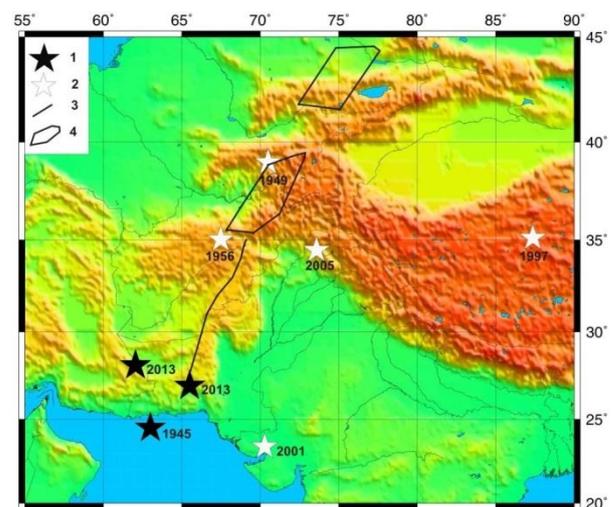
### ВВЕДЕНИЕ

Разными авторами продемонстрировано существование связи между характеристиками сейсмичности в некоторых районах, расположенных на значительных расстояниях друг от друга. Так, в [1] показано, что количество событий с  $M \geq 7.0$  во всем регионе Азии резко уменьшилось после Великого Ассамского землетрясения 1950 г. ( $M_w=8.6$ ). Установлено, что после сильнейших глубокофокусных гиндукушских землетрясений в течение 4.5 месяцев нередко происходят сильные коровые события с  $M \geq 7.0$  в регионе Центральной и Южной Азии [2]. Кроме того, после пар сейсмических событий, состоящих из сильного глубокофокусного гиндукушского и сильнейшего землетрясения в районе Алтая, обычно в течение 1.5 лет регистрируется землетрясение умеренной силы ( $M \geq 6.0$ ) в районе Северного Тянь-Шаня [3]. Ниже рассматривается возможная связь между сильнейшими землетрясениями в области Макрана (Южный Иран и Южный Пакистан) и сильными событиями в районе Центральной Азии. Это представляет особый интерес в связи с тем, что в 2013 г. в области Макрана произошли два очень сильных землетрясения с  $M_w=7.7$ .

### КРАТКАЯ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Рассматривались характеристики сейсмичности в большом регионе Центральной и Южной Азии, ограниченном координатами  $20^\circ - 50^\circ$  N,  $55^\circ - 90^\circ$  E. Тектоника и сейсмичность данного региона определяется, главным образом, движением Индийской плиты на север, а также субдукцией плиты Аравий-

ского моря под Южную Азию [5]. Западной границей Индийской плиты служит крупнейший левосторонний Чаманский сдвиг (рисунок 1).



Эпицентры сильнейших землетрясений (начиная с 1940 г.):  
1 –  $M_w=7.7 \div 8.1$ ; 2 –  $M_w=7.5 \div 7.6$  (указаны годы этих событий);  
3 – Чаманский сдвиг (здесь и на рисунке 3-а); 4 – зона сильного поглощения поперечных волн

Рисунок 1. Район исследований

В результате столкновения Индийской и Евразийской плит сформировались грандиозные горные системы Центральной и Южной Азии: Памиро-Гиндукуш, Тянь-Шань, Кунь-Лунь, Каракорум, Гималаи, а также крупнейшее на планете поднятие Тибета. Регион характеризуется очень высокой сейсмичностью. Начиная с 1945 г. здесь произошло 7 сильных неглубоких землетрясений с  $M_w \geq 7.5$  и одно от-

носителем глубоко (Макранское 16.04.2013 г.,  $M_w=7.7$ ,  $h=82$  км (таблица 1, рисунок 1). При этом сильнейшим из них было Макранское землетрясение 27.11.1945 г. ( $M_w=8.1$ ) [5, 6]. Это событие имело механизм типа надвига, типичный для зон субдукции.

*Таблица 1. Регион Центральной и Южной Азии. Сильнейшие землетрясения, начиная с 1940 г.*

Дата	Широта, с.ш.	Долгота, в.д.	h, км	$M_w$
27.11.1945	24.50	63.00	15	8.1
10.07.1949	39.00	70.50	16	7.6
09.06.1956	35.03	67.48	35	7.6
08.11.1997	35.11	87.37	24	7.5
26.01.2001	23.40	70.28	16	7.6
08.10.2005	34.46	73.58	19	7.6
16.04.2013	28.11	62.05	82	7.7
24.09.2013	26.95	65.50	15	7.7

Большинство сильнейших землетрясений, в том числе Хаитское 1949 г. ( $M_w=7.6$ ), Бхуджское 2001 г. ( $M_w=7.6$ ) и Кашмирское 2005 г. ( $M_w=7.6$ ) имели механизмы типа взброса или взбросо-сдвига. На этом фоне выделяются Макранские землетрясения 16.04.2013 г. ( $M_w=7.7$ ,  $h=82$  км) и 24.09.2013 г. ( $M_w=7.7$ ). Первое из них имело механизм очага типа сброса, а второе – левостороннего сдвига. Характерно, что событие 24.09.2013 г. произошло на южном окончании Чаманского сдвига (рисунок 1).

В [7, 8] выделены области высокого поглощения поперечных волн в районах Гиндукуша, Памира и Центрального Тянь-Шаня. Эти области связаны с присутствием заметной доли флюидов в литосфере. Из рисунка 1 следует, что указанные области формируют полосы северо-восточного простирания, находящиеся на продолжении Чаманского сдвига.

### МАТЕРИАЛЫ

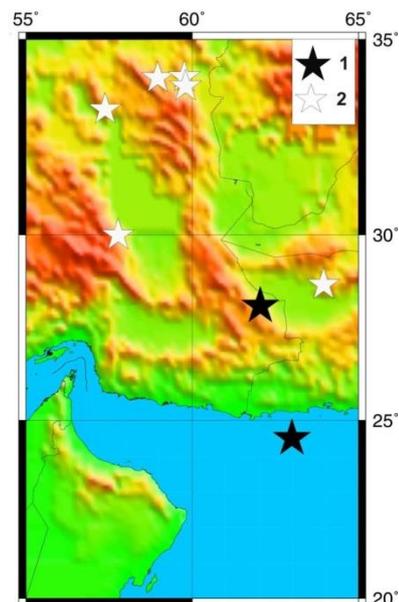
Проведен анализ данных о сейсмичности из каталогов [9, 10], а также каталогов NEIC (Геологическая служба США) начиная с 1940 г. Мы рассматривали характеристики сильных землетрясений ( $M_w \geq 7.0$ ) с глубинами очагов менее 90 км в районе Центральной и Южной Азии, ограниченном координатами  $20^\circ - 45^\circ N$ ,  $55^\circ - 85^\circ E$ . Кроме того, анализировались данные о более слабых событиях ( $M=4.8 - 6.9$ ,  $h=0-33$  км), произошедших в районе Центральной и Южной Азии в 1973-2014 гг.

### АНАЛИЗ ДАННЫХ

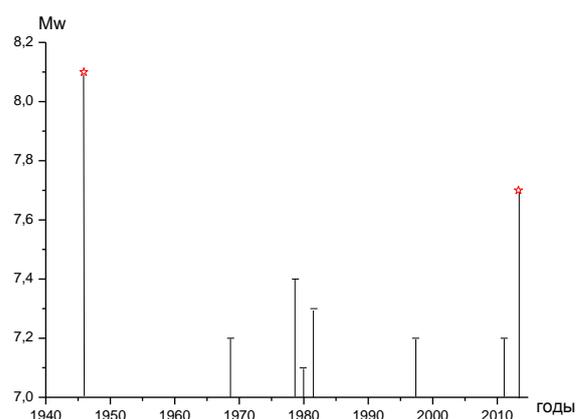
**Сильные землетрясения.** Для анализа данные о сильных землетрясениях, произошедших в рассматриваемом регионе, были разбиты на четыре группы, соответствующие областям, ограниченными координатами: 1)  $20^\circ - 35^\circ N$ ,  $55^\circ - 65^\circ E$ ; 2)  $20^\circ - 35^\circ N$ ,  $65^\circ - 75^\circ E$ ; 3)  $35^\circ - 45^\circ N$ ,  $65^\circ - 75^\circ E$  и 4)  $35^\circ - 45^\circ N$ ,  $75^\circ - 85^\circ E$ . Во вторую группу попали землетрясения, произошедшие в зоне Чаманского сдвига и к востоку от него, в районе Индийской плиты, а в третью – собы-

тия в районах Памиро-Гиндукуша и Центрального Тянь-Шаня. На рисунках 2 - 5 показаны эпицентры землетрясений и зависимость их магнитуд от времени в четырех рассматриваемых областях.

Из рисунков 2-а, б и таблицы 2 следует, что в первой области произошло два сильнейших Макранских землетрясения: 27.11.1945 г. ( $M_w=8.1$ ) и 16.04.2013 г. ( $M_w=7.7$ ). После события 1945 г. до 1968 г. здесь не было землетрясений с  $M_w \geq 7.0$ . С 1968 по 1997 гг. произошла серия событий с  $M_w=7.1 - 7.4$  в сравнительно небольшой области Ирана, ограниченной координатами  $29.5^\circ - 34.5^\circ N$ ,  $57^\circ - 60^\circ E$ . И наконец, в 2011 и 2013 гг. здесь произошли два глубоких землетрясения на сравнительно небольших удалениях от Чаманского сдвига.



Макранские землетрясения: 1 -  $M_w=7.7 \div 8.1$ , 2 -  $M_w=7.1 \div 7.4$   
а – эпицентры сильных землетрясений



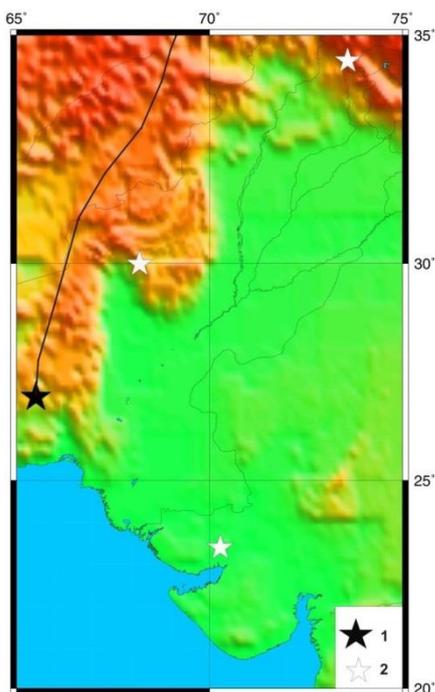
\* – Макранские землетрясения 1945 и 2013 гг., (здесь и ниже)  
б – зависимость магнитуды землетрясений от времени

*Рисунок 2. Первая область ( $20^\circ - 35^\circ N$ ,  $55^\circ - 65^\circ E$ ). Эпицентры сильных землетрясений и зависимость их магнитуд от времени*

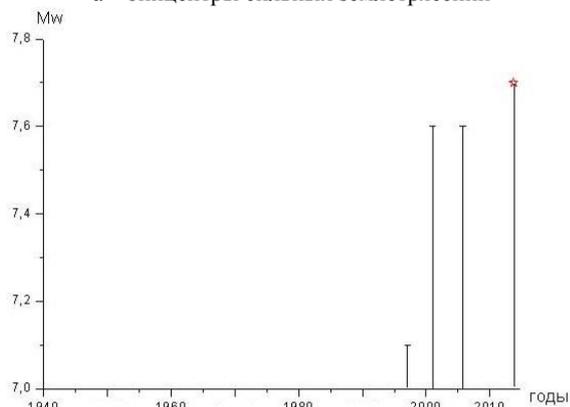
**О СВЯЗИ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В РАЙОНАХ МАКРАНА И ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ: ВОЗМОЖНАЯ ПОДГОТОВКА СИЛЬНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ В РАЙОНЕ ЦЕНТРАЛЬНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ**

Таблица 2. Первая область (20°- 35°N, 55°- 65°E).  
Сильные землетрясения

Дата	Широта, с.ш.	Долгота, в.д.	h, км	Mw
27.11.1945	24.50	63.00	15	8.1
31.08.1968	34.04	58.96	12	7.2
16.09.1978	33.24	57.38	3	7.4
27.11.1979	34.06	59.76	7	7.1
28.07.1981	29.99	57.77	14	7.3
10.05.1997	33.83	59.80	12	7.2
19.01.2011	28.68	63.95	68	7.2
16.04.2013	28.11	62.05	82	7.7



Макранские землетрясения: 1 – 2013 г. (Mw=7.7), 2 – Mw=7.1÷7.6.  
а – эпицентры сильных землетрясений



б – зависимость магнитуды землетрясений от времени

Рисунок 3. Вторая область (20°- 35°N, 65°- 75°E).  
Эпицентры сильных землетрясений и зависимость их магнитуд от времени

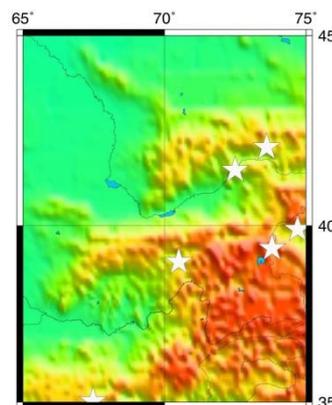
Во второй области все четыре землетрясения с Mw>7.0 зарегистрированы начиная с 1997, в том числе Бхуджское 2001 г. (Mw=7.6) и Кашмирское 2005

г. (Mw=7.6) – рисунки 3-а, б; таблица 3). Три из четырех событий произошли в районе Индийской плиты, на значительном удалении от Чаманского сдвига. В то же время очаг Макранского землетрясения 24.09.2013 г. (Mw=7.7) приурочен непосредственно к Чаманскому сдвигу и его продолжению на юге.

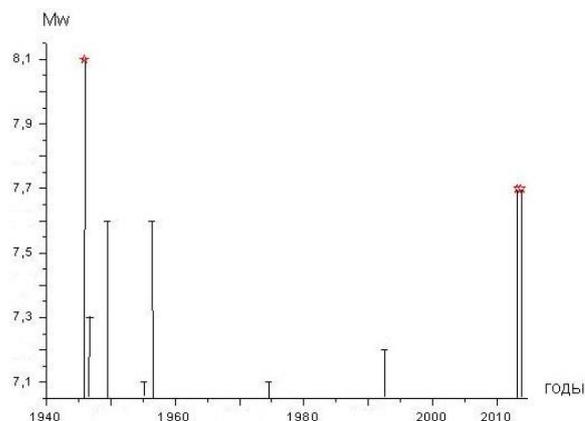
Таблица 3. Вторая область (20°- 35°N, 65°- 75°E).  
Сильные землетрясения

Дата	Широта, с.ш.	Долгота, в.д.	h, км	Mw
27.02.1997	29.99	68.19	24	7.1
26.01.2001	23.40	70.28	16	7.6
08.10.2005	34.46	73.58	19	7.6
24.09.2013	26.95	65.50	15	7.7

В третью область попали шесть эпицентров сильных землетрясений (рисунки 4-а, б, таблица 4). Важно отметить, что четыре из них, в том числе два с Mw=7.6, близки по времени к Макранскому землетрясению 1945 г. (они зарегистрированы в 1946 - 1956 гг.), и только два произошли значительно позже – в 1974 г. (Маркансуйское) и 1992 г. (Сусамырское). Интересно, что четыре очага тяготеют к полосам высокого поглощения S-волн в литосфере Гиндукуша, Памира и Центрального Тянь-Шаня.



а – эпицентры сильных землетрясений



б – зависимость магнитуды землетрясений от времени

Рисунок 4. Третья область (35°- 45°N, 65°- 75°E).  
Эпицентры сильных землетрясений и зависимость их магнитуд от времени

Таблица 4. Третья область (35°- 45°N, 65°- 75°E).  
Сильные землетрясения

Дата	Широта, с.ш.	Долгота, в.д.	h, км	Mw
02.11.1946	41.50	72.50		7.3
10.07.1949	39.00	70.50	16	7.6
15.04.1955	39.90	74.70		7.1
09.06.1956	35.03	67.48	35	7.6
11.08.1974	39.38	73.80	3	7.1
19.08.1992	42.11	73.61	13	7.2

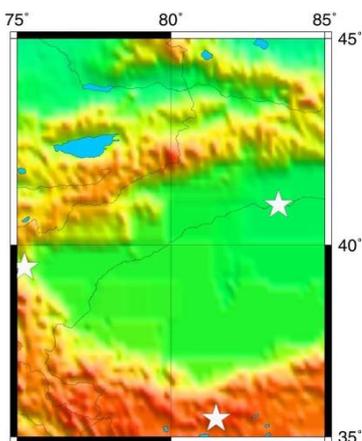
Для третьей области проведена оценка вероятность случайного попадания 4 из 6 сильных событий в 11-летний интервал времени после Макранского землетрясения 1945 г. Она выражается формулой:

$$P_{4,6} = C_6^4 (11/69)^4 (58/69)^2 \sim 7 \times 10^{-3}. \quad (1)$$

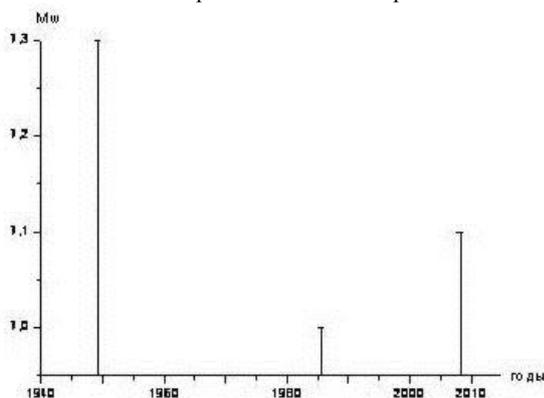
В четвертой области произошло всего 3 события с  $M_w \geq 7.0$  (рисунки 5-а, б, таблица 5).

Таблица 5. Четвертая область (35°- 45°N, 75°- 85°E).  
Сильные землетрясения

Дата	Широта, с.ш.	Долгота, в.д.	h, км	Mw
23.02.1949	41.00	83.50		7.3
23.08.1985	39.44	75.24	20	7.0
21.03.2008	35.49	81.47	10	7.1



а – эпицентры сильных землетрясений



б – зависимость магнитуды землетрясений от времени

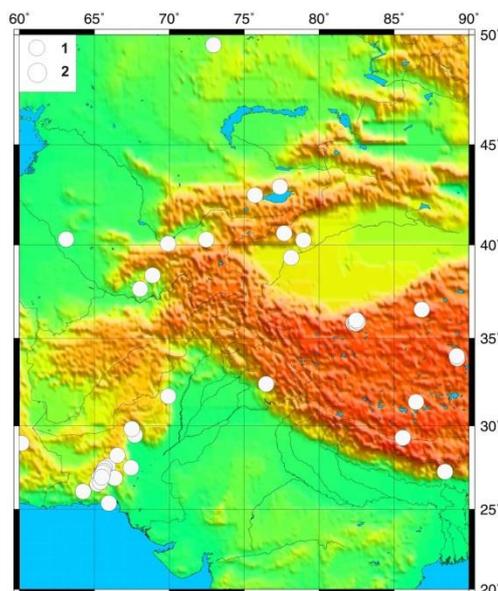
Рисунок 5. Четвертая область (35°- 45°N, 75°- 85°E).  
Эпицентры сильных землетрясений и зависимость их магнитуд от времени

Одно из землетрясений (Сычуаньское 1949 г.) попало в течение 4-летнего интервала после Макранского землетрясения 1945 г. Вероятность случайного попадания его в этот интервал равна

$$P_{1,3} = C_3^1 (4/69) (65/69)^2 \sim 0.15. \quad (2)$$

Отсюда следует, что эта вероятность примерно в 20 раз выше, чем для серии землетрясений в третьей области.

Сейсмичность после Макранского землетрясения 24.09.2013 г. Рассмотрены характеристики неглубоких ( $h=0 - 33$  км) событий с  $M \geq 4.8$ , которые произошли в районе, ограниченном координатами 20°- 50°N 60°- 90°E за период с 24.09.2013 г. по 01.09.2014 г. (рисунок 6).



1 –  $M=4.8-6.0$ , 2 –  $M_w \geq 6.5$

Рисунок 6. Сейсмичность после Макранского землетрясения 24.09.2013 г. (до 01.09.2014 г.)

На рисунке 6 выделяется афтершоковая область Макранского землетрясения, где зарегистрированы 16 событий. Кроме того, прослеживаются две полосы сейсмичности (с большими пробелами в слабосейсмичных областях). Первая полоса северо-северо-восточного простирания проходит от побережья Аравийского моря, через очаг Макранского землетрясения и Западный Тянь-Шань к Центральному Казахстану. Вторая, ориентированная в северо-северо-западном направлении, пересекает Восточные Гималаи, Тибет, Кунь-Лунь, север Тарима и Северный Тянь-Шань. В нее попадает очаговая зона довольно сильного землетрясения 12.02.2014 г. ( $M_w=6.9$ ) в районе Кунь-Луна. Можно считать, что обе полосы, в пределах которых находится почти 90% эпицентров событий (от общего их количества на карте), пересекаются в районе Центрального Казахстана.

Ниже рассмотрены более детально некоторые элементы этих полос. На рисунке 7 показаны характеристики сейсмичности (для событий с  $M \geq 4.9$ ) в центральной части первой полосы (шириной  $\sim 120$  км) за период 01.01.1973 - 01.09.2014. Видно, что здесь произошло всего десять таких событий ( $M_{\max}=5.6$ ), из которых три ( $M=4.9 - 5.2$ ) – с 24.09.2013 по 06.12.2013 гг. Оценим вероятность случайного появления 3-х из 10 событий в течение 2.5 месяцев после Макранского землетрясения:

$$P_{3,10} \sim C_{10}^3 (2.5/500)^3 (497.5/500)^7 \sim 1.5 \times 10^{-5}. \quad (3)$$

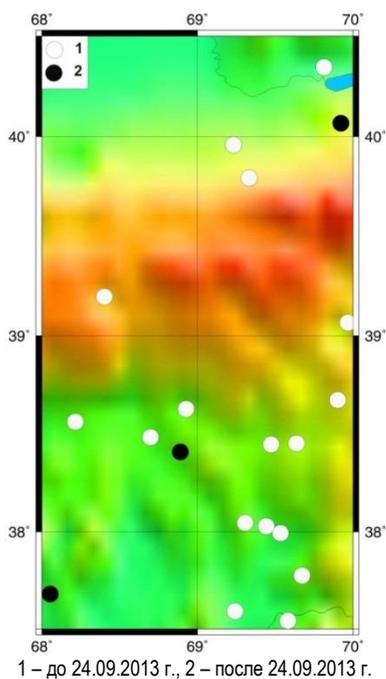


Рисунок 7. Тянь-Шань и Таджикская депрессия. Сейсмичность с 01.01.1973 г. ( $M \geq 4.9$ )

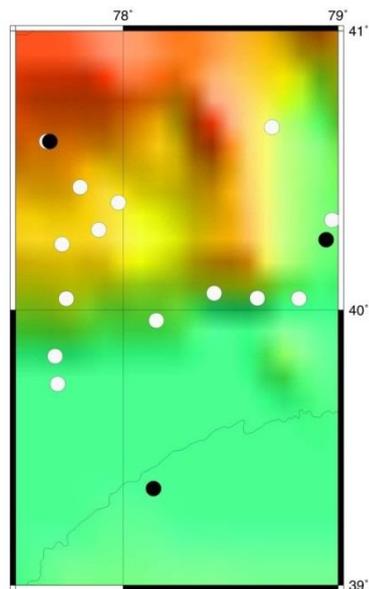
Рисунок 8 иллюстрирует данные о сейсмичности в области северо-западного Тарима. В данном случае, начиная с 01.01.1973 г., здесь произошло 17 землетрясений с  $M \geq 5.0$  ( $M_{\max}=5.9$ ), из них 3 ( $M=5.0 - 5.4$ ) – с 24.09.2013 до 09.07.2014 гг. Вероятность их случайного появления в течение 10 месяцев равна

$$P_{3,17} \sim C_{17}^3 (10/500)^3 (490/500)^{14} \sim 4 \times 10^{-3}. \quad (4)$$

И наконец, согласно инструментальным и историческим данным, в слабосейсмичной области Центрального Казахстана с координатами  $49^\circ - 52^\circ N$ ,  $70^\circ - 75^\circ E$ , по меньшей мере, за 200 лет [10] произошло единственное событие с  $M > 4.0$  (21.06.2014 г.  $M=4.8$ ), и вероятность его случайного появления составляет

$$P_{1,1} < \sim 0.75/200 \sim 4 \times 10^{-3}. \quad (5)$$

Из оценок (3) - (5) следует, что полная вероятность случайного появления 7 событий в трех указанных областях в течение 10 месяцев после Макранского землетрясения ничтожно мала.



Условные обозначения – на рисунке 7

Рисунок 8. Южный Тянь-Шань и Тарим Сейсмичность в с 01.01.1973 г. ( $M \geq 5.0$ )

#### ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные данные свидетельствуют о том, что после сильнейшего Макранского землетрясения 1945 г. в течение 11 лет резко активизировалась сейсмичность только в полосе северо-восточного простираения, протягивающейся от Гиндукуша до Центрального Тянь-Шаня. Оценка (1) показывает, что случайная реализация в этот период четырех сильных землетрясений с  $M_w=7.1 - 7.6$  очень маловероятна. Таким образом, существует пространственно-временная связь Макранского землетрясения 1945 г. и сильных событий в указанном районе (в отличие от других рассмотренных районов).

Обсудим возможный механизм такой связи. Из рисунка 1 следует, что полоса, в которую попадают очаги сильных землетрясений, произошедших в 1946 - 1956 гг., находится на продолжении Чаманского сдвига. Можно полагать, что подвижка при Макранском землетрясении субдукционного типа привела к ускорению медленных криповых смещений по Чаманскому разлому [11], в результате чего увеличились сдвиговые напряжения к северо-востоку от разлома.

Кроме того, очаги описанных событий тяготеют к зонам высокого поглощения S-волн в нижней коре и верхах мантии [7, 8]. Эти зоны в указанном районе связаны с присутствием заметной доли флюидов, которые обеспечивают меньшую вязкость нижней части литосферы. Пониженная вязкость, в свою очередь, обуславливает относительно высокую скорость деформации и дополнительное возрастание сдвиговых напряжений. Известно, что под действием сдвиговых напряжений формируется связанная сеть из пор и трещин, заполненная флюидом [12]. Это приводит к постепенному образованию двухфазного

слоя значительной вертикальной протяженности в нижней коре и верхах мантии, что, в свою очередь, обеспечивает концентрацию напряжений на его кровле [13]. При достаточной мощности такого слоя напряжения превышают предел прочности горных пород, что и вызывает подвижку при сильном землетрясении.

Можно полагать, что аналогичный механизм может быть реализован после двух сильнейших Макранских землетрясений 2013 г. Об этом свидетельствует появление серии событий умеренной силы в слабосейсмичных областях после 24.09.2013 г., а также реализация относительно сильного землетрясения в районе Кунь-Луны ( $M_w=6.9$ ). По нашему мнению, это служит отражением эффекта перераспределения напряжений в верхней части земной коры, связанного с ускорением смещения Индийской плиты относительно Евразии. Наибольшее увеличение напряжений должно наблюдаться в области

сближения двух полос сейсмичности в районе Центрального Тянь-Шаня (между  $70^\circ$  и  $76^\circ$  E).

Вместе с тем необходимо отметить, что Макранские землетрясения служат только триггером, ускоряющим подготовку сильных сейсмических событий. Медленный подъем флюидов в литосфере происходит в течение длительного времени, и тектонические структуры должны быть подготовлены к тому, чтобы отреагировать на изменение поля напряжений. В этом отношении существенно то, что еще по [14] в районе Центрального Тянь-Шаня выделены зоны высокого поглощения поперечных волн, а в последние годы - также кольцевые структуры сейсмичности [15], которые обычно проявляются перед сильными коровыми землетрясениями. Полученные данные показывают, что здесь необходимо проводить постоянный мониторинг различных геофизических и геохимических полей с целью среднесрочного прогноза сильных землетрясений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Triep, E. Frequency of occurrence of moderate to great earthquakes in intracontinental regions / E. Triep, L. Sykes // *J. Geophys. Res.* - 1997. - V. 102. - P. 9923 - 9948.
2. Копничев, Ю.Ф. Пары сильных землетрясений и геодинамические процессы в районе Центральной и Южной Азии / Ю.Ф. Копничев, И. Баскутас, И.Н. Соколова // *Вулканология и сейсмология.* - 2002. - № 5. - С. 49 - 58.
3. Копничев, Ю.Ф. Группирование сильных землетрясений в районе Центральной Азии: новые возможности среднесрочного прогноза сейсмических событий на Северном Тянь-Шане / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // *Докл. РАН.* - 2006. - Т. 411. - № 2. - С. 246 - 249.
4. Molnar, P. Cenozoic tectonics of Asia: effects of a continental collision / P. Molnar, P. Tapponnier // *Science.* - 1975. - V. 8. - P. 419 - 426.
5. Rajendran, C. Hazard implications of the late arrival of the 1945 Makran tsunami / C. Rajendran, M. Ramanamurthy, N. Reddy, K. Rajendran // *Current Science.* - 2008. - V. 95, N 12. - P. 1739 - 1743.
6. Quittmeyer, R. Historical and modern seismicity of Pakistan, Afghanistan, northwestern India and southwestern Iran / R. Quittmeyer, K. Jacob // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 1979. - V. 69, N 3. - P. 773 - 823.
7. Копничев, Ю.Ф. Неоднородности поля поглощения короткопериодных S-волн в литосфере Тянь-Шаня и Джунгарии и их связь с сейсмичностью / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // *ДАН.* - 2010. - Т. 433, № 6. - С. 808 - 812.
8. Копничев, Ю.Ф. Неоднородности поля поглощения короткопериодных поперечных волн в литосфере Центральной Азии и их связь с сейсмичностью / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // *ДАН.* - 2010. - Т. 437, № 1.
9. Engdahl, E. Global seismicity: 1990-1999. In: *Earthquake & engineering seismology. Part A.* / E. Engdahl, A. Villasenor // Academic Press. An imprint of Elsevier Science. - 2002. - P. 665 - 690.
10. Кондорская, Н.В. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР / Н.В. Кондорская, Н.В. Шебалин. - М.: Наука, 1977. - 535 с.
11. Furuya, M. Slow earthquake in Afghanistan detected by InSAR / M. Furuya, S. Satyabala // *Geophys. Res. Lett.* 2008. - V. 35. L06309. doi: 10.1029/2007GL033049.
12. Hier-Majumder, S. Role of dynamic grain boundary wetting in fluid circulation beneath volcanic arcs / S. Hier-Majumder, D. Kohlstedt // *Geophys. Res. Lett.*, 2006. - V. 33. L08305.
13. Gold, T. Fluid ascent through the solid lithosphere and its relation to earthquakes / T. Gold, S. Soter // *Pure Appl. Geophys.* - 1984/1985. - V. 122. - P. 492 - 530.
14. Копничев, Ю.Ф. Неоднородности поля поглощения короткопериодных сейсмических волн в литосфере Центрального Тянь-Шаня / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // *Вулканология и сейсмология.* - 2007. - № 4. - С. 54 - 70.
15. Копничев, Ю.Ф. Кольцевые структуры сейсмичности в районе Центрального Тянь-Шаня: возможная подготовка сильных землетрясений / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // *Вестник НЯЦ РК.* - 2012. - Вып. 2. - С. 157.

**МАКРАН ЖӘНЕ ОРТАЛЫҚ АЗИЯ АУДАНАРЫНДАҒЫ ҚАТТЫ ЖЕРСІЛКІНУЛЕРДІҢ БАЙЛАНЫСЫ ТУРАЛЫ: ОРТАЛЫҚ ТЯНЬ-ШАНЬ АУДАНЫНДА ҚАТТЫ СЕЙСМИКАЛЫҚ ОҚИҒАЛАРДЫҢ ЫҚТИМАЛ ДАЙЫНДАЛУЫ**

<sup>1)</sup> Копничев Ю.Ф., <sup>2)</sup> Соколова И.Н.

<sup>1)</sup> *Ресей, Мәскеу қ., РҒА Жер физикасы институты*

<sup>2)</sup> *Қазақстан, Курчатов қ., Геофизикалық зерттеулер институты*

Орталық және Оңтүстік Азия аймағында сейсмикалықтың кейбір сипаттамалары қарастырылған. 1954 ж. өте қатты Мақран жерсілкінуінен ( $M_w=8.1$ ) кейін 11 жыл ағымында Гиндукуш және Орталық Тянь-Шань аудандарында сейсмикалық оқыс көтерілген, онда  $M_w=7.1-7.6$  төрт жерсілкінуі болған. 2013 ж. Мақран ауданында екі өте қатты жерсілкінуі болған ( $M_w=7.7$ ). XX ғасырдың ортасы ұқсастығына қарай олардан кейін Орталық Тянь-Шань ауданында, онда 1992 ж. бері  $M_w \geq 7.0$  қатты жерсілкінулер болмаған, сейсмикалық елеулі көтерілуін күтуіне болады. Ошағы Чаман ығыспасының оңтүстік аяғында орналасқан 2013 ж. 09.24-індегі Мақран жерсілкінуінен кейін бір жыл ағымында сейсмикалықтың екі жолағы ( $M \geq 4.8$  оқиғалар) пайда болғаны анықталған, олардың біреуі субмеридиональ бағытында, екіншісі – солтүстік-солтүстік-батыс бағытында. Мұнда 2013 ж. 09.24-інен кейін әлсізсейсмикалық зоналарда бірнеше жерсілкінуі болған. Одан басқа, бұл екі жағы Орталық Қазақстан ауданында қиылысады, мұнда 2014 ж. 06.21-інде 200 астам жыл ішінде жалғыз бір жерсілкінуі болған ( $M > \sim 4.0$ ). Алынған деректер, қарастырылудағы ауданда субгоризонталды кернеулер өсу туралы куәланырады, бұл қатты жерсілкінулер сериясы ықтимал дайындалуын жеделдетуге келтіруіне тиіс, бірінші кезегінде Орталық Тянь-Шань облысында, 70 және 76° E арасында.

**ON A CONNECTION OF LARGE EARTHQUAKES IN THE REGIONS OF MAKRAN AND CENTRAL ASIA: POSSIBLE PREPARATION FOR STRONG SEISMIC EVENTS IN THE REGION OF CENTRAL TIEN SHAN**

<sup>1)</sup> Yu.F. Kopnichev, <sup>2)</sup> I.N. Sokolova

<sup>1)</sup> *Institute of the Earth Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>2)</sup> *Institute of Geophysical Research Kurchatov, Kazakhstan*

Some characteristics of seismicity in Central and Southern Asia regions have been studied. It has been shown that after the strongest Makran earthquake in 1945 ( $M_w=8.1$ ) over the period of 11 years the seismicity has sharply activated in Hinduksha and Central Tien-Shan regions, where 4 earthquakes with  $M_w=7.1-7.6$  occurred. In 2013, two very strong earthquakes occurred in Makran region ( $M_w=7.7$ ). Similarly with the mid-20th century a significant increase of seismicity in Central Tien-Shan region, where there were no earthquakes with  $M_w \geq 7.0$  after 1992, can be presumed to occur after them. It has been established that after Makran earthquake on 24.09.2013, the epicenter of which was located at the southern edge of Chaman shift, over a year two seismicity bands occurred (events with  $M \geq 4.8$ ), one of which has sub-meridional and the other one – north-north-west direction. Here, after 24.09.2013 several earthquakes occurred in seismically quiet areas. Besides, these bands cross in Central Kazakhstan region, where on 21.06.2014 the only earthquake with  $M > \sim 4.0$  over more than 200 years occurred. Obtained data indicated the growth of sub-horizontal pressures in the region under study, which should lead to the increase of a possible preparation of a series of strong earthquakes, first of all, in Central Tien-Shan region, between 70 and 76° E.

УДК 550.334 + 550.34

**НЕОДНОРОДНОСТИ ПОЛЯ ПОГЛОЩЕНИЯ КОРОТКОПЕРИОДНЫХ S-ВОЛН  
В РАЙОНАХ КУРИЛ И КАМЧАТКИ И ИХ СВЯЗЬ С СЕЙСМИЧНОСТЬЮ**<sup>1)</sup> Копничев Ю.Ф., <sup>2)</sup> Соколова И.Н.<sup>1)</sup> *Институт физики Земли РАН, г. Москва, Россия*<sup>2)</sup> *Институт геофизических исследований, г. Курчатов, Казахстан*

По аналогии с последствиями Боливийского землетрясения 09.06.1994 г. ( $M_w=8.2$ ,  $h=635$  км) в регионе Южной Америки, можно ожидать существенного повышения уровня сейсмической активности в районе Курило-Камчатской дуги после сильнейшего на Земле с начала XX-го века глубокофокусного землетрясения в Охотском море 24.05.2013 г. ( $M_w=8.3$ ,  $h=609$  км). Для выделения областей, в которых могут готовиться сильные неглубокие землетрясения, рассмотрены характеристики поля поглощения короткопериодных поперечных волн в литосфере. Обработано более 350 записей землетрясений с глубинами 0 - 33 км, полученных станцией Петропавловск (PET) из двух районов, ограниченных координатами соответственно  $45.0^\circ - 50.5^\circ N$  и  $54.0^\circ - 56.5^\circ N$ , а также землетрясений, зарегистрированных станцией Крутоберегово (KGB) из района между  $52^\circ$  и  $54^\circ N$ . Использован метод, основанный на анализе отношения максимальных амплитуд волн  $S_p$  и  $P_n$ . Выделены зоны сильного поглощения, где достаточно давно не было сильных землетрясений с  $M_w \geq 7.7$ . Сделано предположение, что в этих зонах (в первую очередь, в области Авачинского залива и к востоку от него) идут активные процессы подготовки сильных землетрясений.

**ВВЕДЕНИЕ**

Поглощение короткопериодных поперечных волн – есть важная характеристика среды, которая несет информацию о содержании жидкой фазы – флюидов или расплавленных пород [1 - 3]. В [4 - 7] показано, что перед сильными неглубокими землетрясениями формируются области относительно высокого поглощения S-волн в литосфере. Имеющиеся данные свидетельствуют о том, что эти области соответствуют повышенному содержанию глубинных флюидов. В то же время после сильных сейсмических событий поглощение в верхах мантии постепенно уменьшается в течение нескольких десятков лет, что свидетельствует о подъеме мантийных флюидов [8, 9, 4]. В связи с этим данные о характеристиках поля поглощения S-волн могут быть использованы для выделения очаговых зон будущих сильных землетрясений [10, 11, 7]. В данной статье приводятся результаты картирования поля поглощения поперечных волн в литосфере Курил и Камчатки, проведенного с этой же целью.

**ИСТОРИЧЕСКАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ**

Характеристики поля поглощения рассматривались в районе, ограниченном координатами  $45^\circ$  и  $56.5^\circ N$ . Здесь, начиная с 1900 г., произошел ряд сильных землетрясений (таблица 1, рисунок 1), включая сильнейшие события 1923 г. ( $M_w=8.5$ ), 1952 г. ( $M_w=9.0$ ), 1963 г. ( $M_w=8.6$ ) и 2006 г. ( $M_w=8.3$ ). Кроме того, в 1841 г. в районе Камчатки произошло землетрясение с  $M \sim 8.4$ .

Великое Камчатское землетрясение 4 ноября 1952 г. было третьим по силе сейсмическим событием XX-го века с очагом, имевшим размер  $\sim 600$  км. Землетрясение генерировало цунами, распространившееся по всему Тихому океану. По данным [12]

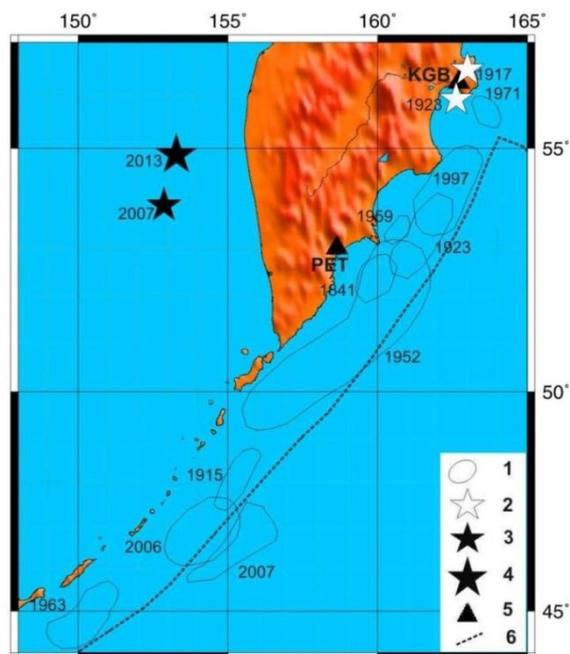
средний период повторяемости событий с  $M \geq 7.7$  в районе Курило-Камчатской дуги составляет  $140 \pm 60$  лет. В течение последних 55 лет в районах северных Курил и Камчатки событий с  $M_w > 7.8$  не зарегистрировано, в то время как в районах южных и центральных Курил в 1963 - 2007 гг. произошло 5 землетрясений с  $M_w > 8.0$ .

Необходимо отметить, что 24.05.2013 г. в районе Охотского моря произошло сильнейшее зарегистрированное на Земле с 1900 г. глубокофокусное землетрясение ( $h=609$  км,  $M_w=8.3$ ). Кроме того, южнее очага этого события 05.07.2007 г. было зарегистрировано еще одно достаточно сильное землетрясение ( $M_w=7.7$ ) с глубиной очага 633 км (таблица 1, рисунок 1). Интересно, что до события 24.05.2013 г. самым сильным глубокофокусным землетрясением на земном шаре было Боливийское 09.06.1994 г. ( $h=635$  км,  $M_w=8.2$ ). Проведенный анализ показывает, что после этого события резко активизировалась неглубокая сейсмичность в обширном регионе Южной Америки. Если с 1900 по 1994 гг. здесь было зарегистрировано только 9 землетрясений с  $M_w \geq 8.0$  (с глубинами гипоцентров до 45 км), то, всего лишь за 19 лет, с 1995 по 2013 гг. – 4 таких события, причем первое из них (землетрясение в Антофагасте 30.07.1995 г. с  $M_w=8.0$ ) произошло через год после Боливийского. Эти данные показывают, что сильнейшие глубокофокусные землетрясения могут быть триггером, активизирующим неглубокую сейсмичность, и после землетрясения 24.05.2013 г. существует большая вероятность значительного повышения уровня сейсмической активности в районе Курило-Камчатской дуги в ближайшие годы, в первую очередь, в северной ее части, где не было сильных землетрясений с  $M_w > 7.8$  более 50 лет (таблица 1).

## НЕОДНОРОДНОСТИ ПОЛЯ ПОГЛОЩЕНИЯ КРОТКОПЕРИОДНЫХ S-ВОЛН В РАЙОНАХ КУРИЛ И КАМЧАТКИ И ИХ СВЯЗЬ С СЕЙСМИЧНОСТЬЮ

Таблица 1. Сильные землетрясения в районе Курило-Камчатской дуги (к северу от 44°N) с начала XX-го века

Дата	φ° N	λ° E	h, км	Mw
05.01.1915	47.50	154.50	35	7.9
30.01.1917	56.50	163.00	-	7.7
03.02.1923	53.85	160.76	35	8.5
24.02.1923	55.94	162.62	35	7.2
04.11.1952	52.75	159.50	-	9.0
04.05.1959	53.37	159.66	35	8.0
16.10.1963	44.76	149.80	26	8.6
22.11.1969	57.71	163.60	9	7.8
15.12.1971	56.02	163.17	22	7.8
05.12.1997	54.80	162.00	37	7.8
15.11.2006	46.58	153.27	10	8.3
11.01.2007	46.23	154.55	10	8.1
05.07.2007	53.88	152.87	633	7.7
24.05.2013	54.87	153.28	609	8.3



1 – очаговая зона сильнейшего неглубокого землетрясения ( $M_w \geq 7.8$ ); 2 – эпицентр сильного землетрясения ( $M_w = 7.2-7.7$ ); 3, 4 – эпицентры сильнейших глубоких ( $h > 70$  км) землетрясений (указан год каждого события); 5 – сейсмическая станция; 6 – глубоководный желоб

Рисунок 1. Район исследований

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Картирование поля поглощения проводилось по записям землетрясений, полученных главным образом станцией Петропавловск (PET) на эпицентральных расстояниях  $\Delta \sim 250 - 1050$  км (рисунок 1). Были отобраны записи событий с глубинами 0 - 33 км из двух районов, ограниченных координатами 45.0° - 50.5°N, 150° - 160°E и 54.0° - 56.5°N, 161° - 165°E (для простоты далее будем называть их соответственно южным и северным районами). В общей сложности обработано около 350 сейсмограмм, полу-

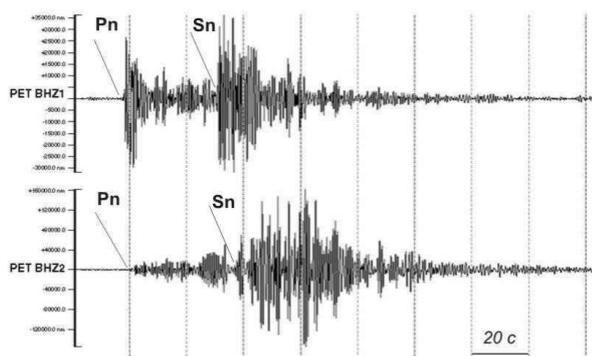
ченных в 1993 - 2012 гг. Кроме того, для сравнения рассмотрены 12 записей неглубоких землетрясений из области 52° - 54°N, 159° - 163°E, полученных станцией Крутоберегово (KGB) в 1999 г.

Использован метод картирования поля поглощения в литосфере по отношению максимальных амплитуд волн Sn и Pn - параметр  $\lg(ASn/APn)$ , который для краткости обозначен как Sn/Pn [1, 3, 11, 7]. В подавляющем большинстве случаев максимальные значения амплитуды в группе волн Sn достигаются заметно позже, чем по годографу (рисунок 2), а также по [3, 13]), поэтому они не могут соответствовать головной волне, распространяющейся вдоль границы Мохоровичича (M). Совокупность имеющихся данных, а также результаты численного моделирования позволили сделать вывод, что максимальные значения амплитуды в группе Sn связаны с поперечными волнами, отраженными от многочисленных субгоризонтальных границ в верхней мантии [3, 13, 14]. В этом случае при использовании записей одной станции уровень группы Sn служит мерой поглощения S-волн в нижней коре и верхах мантии в области эпицентра [1, 3]. Параметр Sn/Pn используется для нормировки, поскольку волны Sn и Pn распространяются близкими трассами. Данные о характеристиках поля поглощения, а также данные, полученные методом магнитотеллурического зондирования (МТЗ), показали, что наибольшее содержание флюидов в литосфере сейсмоактивных районов имеет место в нижней коре и верхах мантии [15 - 18]. При этом длина отрезков трасс, проходимых волнами Sn в нижней коре в изучаемом районе, составляет не более 10 - 15 км [19] и почти не зависит от эпицентрального расстояния ( $\Delta$ ), поэтому изменение параметра Sn/Pn с расстоянием происходит в основном вследствие вариаций поглощения в верхах мантии. В связи с тем, что поглощение существенно зависит от частоты колебаний, предварительно проводилась фильтрация вертикальных компонент записей (использовался фильтр с центральной частотой 1.25 Гц и полосой пропускания 2/3 октавы [2]).

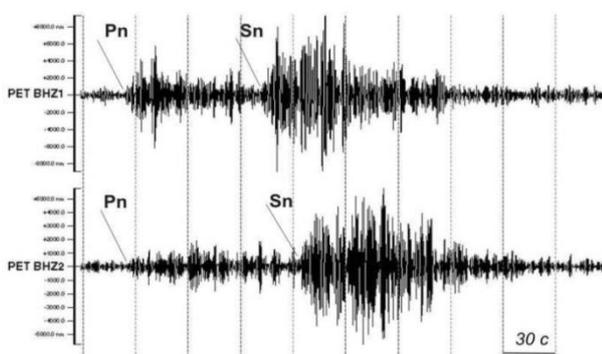
### АНАЛИЗ ДАННЫХ

На рисунке 2 показаны примеры сейсмограмм землетрясений, полученных станцией PET. Видно, что для эпицентров в области северных Курил, расположенных в очаговой зоне Великого Камчатского землетрясения на эпицентральных расстояниях  $\sim 330 - 380$  км, наблюдается очень высокий уровень амплитуд группы Sn-волн относительно Pn-волн. В тоже время для эпицентров в области центральной Камчатки на сопоставимых расстояниях ( $\sim 310 - 380$  км) амплитуды волн Sn и Pn близки по уровню. При этом, трасса от эпицентра события 03.02.2004 г. (рисунок 2-б) пересекает очаговую зону сильного Кроноцкого землетрясения 05.12.1997 г. ( $M_w = 7.8$ ), а трасса от эпицентра события 13.11.1995 г. (рисунок 2-а) проходит рядом с этой зоной.

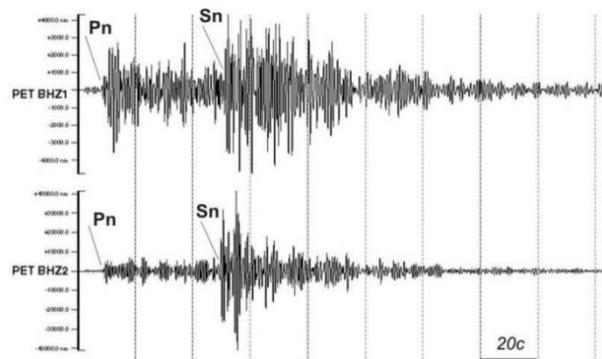
**НЕОДНОРОДНОСТИ ПОЛЯ ПОГЛОЩЕНИЯ КОРОТКОПЕРИОДНЫХ S-ВОЛН  
В РАЙОНАХ КУРИЛ И КАМЧАТКИ И ИХ СВЯЗЬ С СЕЙСМИЧНОСТЬЮ**



а – верхняя трасса – событие из очаговой зоны землетрясения 1997 г. 13.11.1995, 55.03°N, 161.94° E, h = 33 км, Δ=311 км; нижняя трасса – событие из очаговой зоны землетрясения 1952 г. 22.04.2013, 50.06°N, 157.51° E, h = 18 км, Δ=339 км



б – верхняя трасса – событие из очаговой зоны землетрясения 1997 г. 03.02.2004, 55.35°N, 162.96° E, h = 4 км, Δ=382 км; нижняя трасса – событие из очаговой зоны землетрясения 1952 г. 11.12.1993, 49.73°N, 157.25°E, h = 31 км, Δ=379 км



в – верхняя трасса – афтершок землетрясения 2006 г. 15.11.2006, 46.72°N, 153.30° E, h = 10 км, Δ=800 км; нижняя трасса – событие из очаговой зоны землетрясения 1963 г. 11.09.2001, 45.45°N, 150.68° E, h = 33 км, Δ=1022 км

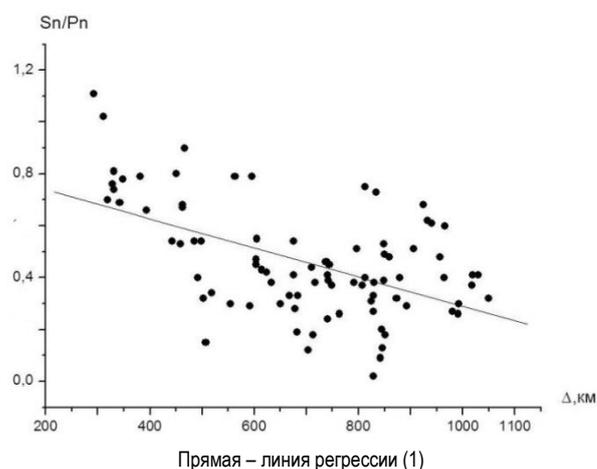
*Рисунок 2. Станция PET. Примеры сейсмограмм землетрясений (на записях указаны моменты вступления волн Pn и Sn)*

На рисунке 2-в представлены сейсмограммы двух событий, произошедших соответственно в очаговых зонах двух сильнейших землетрясений: Урупского 16.10.1963 г. (Mw=8.6) и Средне-Курильского

15.11.2006 г. (Mw=8.3). Для первого события, произошедшего почти через 40 лет после Урупского землетрясения, относительный уровень амплитуд группы Sn значительно выше, чем для афтершока Средне-Курильского землетрясения, несмотря на существенно большее эпицентральное расстояние.

Ниже рассмотрены характеристики полей поглощения отдельно для южного и северного районов.

**Южный район.** Рисунок 3 иллюстрирует зависимость параметра Sn/Pn от расстояния для трасс к югу от станции PET, пересекающих центральные, северные Курилы и южную Камчатку. Подавляющее большинство точек представляют средние значения, полученные для областей с линейными размерами, как правило, несколько десятков километров. Осреднение данных позволило уменьшить роль эффекта азимутальной направленности излучения P и S-волн.



Прямая – линия регрессии (1)

*Рисунок 3. Южный район. Корреляционная зависимость параметра Sn/Pn от эпицентрального расстояния*

Из рисунка 3 следует, что в среднем значения Sn/Pn уменьшаются с расстоянием в интервале Δ~300 - 1050 км. Уравнение линейной регрессии описывается выражением:

$$Sn/Pn \sim 0.85 - 0.00056\Delta \text{ (км)}, \quad (1)$$

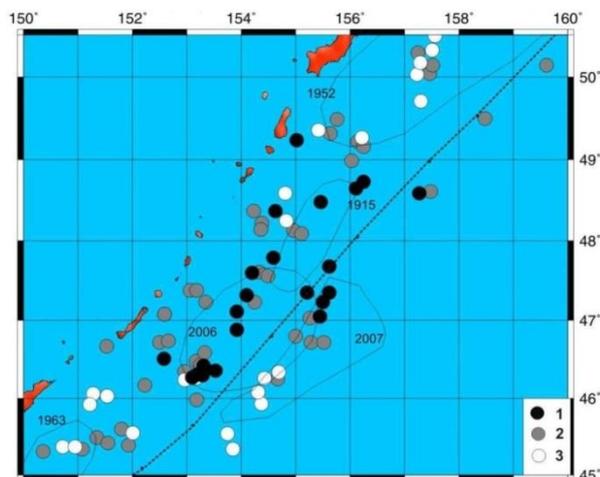
коэффициент корреляции  $r = -0.54$ .

Следует отметить, что на фоне общего уменьшения параметра Sn/Pn выделяются участки очень высоких средних его значений (при Δ~300 - 450 и 850 - 1050 км), а также anomalously низких значений (при Δ~450 - 850 км).

На рисунке 4 показано распределение значений поглощений S-волн для южного района. Рассматривались отклонения величин Sn/Pn от корреляционной зависимости (1). Значениям  $\Delta Sn/Pn < -0.10$  соответствует повышенное, значениям  $0.10 \leq \Delta Sn/Pn \leq 0.10$  – промежуточное и значениям  $\Delta Sn/Pn > 0.10$  – пониженное поглощение. На рисунке 4 видно, что поле поглощения в южном районе характеризуется большой неоднородностью. В целом относительно пони-

## НЕОДНОРОДНОСТИ ПОЛЯ ПОГЛОЩЕНИЯ КОРТКОПЕРИОДНЫХ S-ВОЛН В РАЙОНАХ КУРИЛ И КАМЧАТКИ И ИХ СВЯЗЬ С СЕЙСМИЧНОСТЬЮ

женное поглощение соответствует северной и южной окраинам района, а повышенное – его центральной части (приблизительно между 46° и 49°N). Основная часть низких значений  $\Delta Sn/Pn$  сконцентрирована в узкой полосе, простирающейся параллельно вулканическому фронту и расположенной на расстояниях ~90 - 130 км от него. При удалении от этой полосы по направлениям к вулканическому фронту и глубоководному желобу поглощение в целом существенно уменьшается. В то же время в области желоба, между 47° и 47.7°N выделяется еще один район сильного поглощения.



Поглощение: 1 – высокое, 2 – промежуточное, 3 – низкое.  
Остальные обозначения – на рисунке 1

Рисунок 4. Южный район. Карта поля поглощения короткопериодных S-волн

Сопоставление с сейсмичностью района показало, что очаговым зонам сильнейших землетрясений 1952 и 1963 гг. соответствует относительно пониженное, а зоне очага 2006 г. – повышенное поглощение. В то же время на большей части очаговой зоны землетрясения 2007 г. наблюдается пониженное поглощение и только на крайнем северном участке – повышенное. Следует отметить, что между очаговыми зонами сильных землетрясений 1952 и 2006-2007 гг. проходит узкая субширотная полоса низких величин  $\Delta Sn/Pn$ , частично пересекающая очаг землетрясения 1915 г. ( $M_w=7.9$ ).

**Северный район.** На рисунке 5 представлена зависимость параметра  $Sn/Pn$  от эпицентрального расстояния для северного района. В данном случае величины  $Sn/Pn$  в интервале расстояний  $\Delta \sim 250-500$  км убывают с расстоянием быстрее, чем для южного района; уравнение линейной регрессии имеет вид:

$$Sn/Pn \sim 0.72 - 0.00084\Delta \text{ (км)}, \quad (2)$$

коэффициент корреляции  $r = -0.40$ .

Из сопоставления рисунков 3 и 5 следует также, что, несмотря на большой разброс данных, в северном районе уровень значений параметра  $Sn/Pn$  в среднем значительно ниже, чем в южном (на 0.21 - 0.27 ед. лог. при  $\Delta \sim 300 - 500$  км).

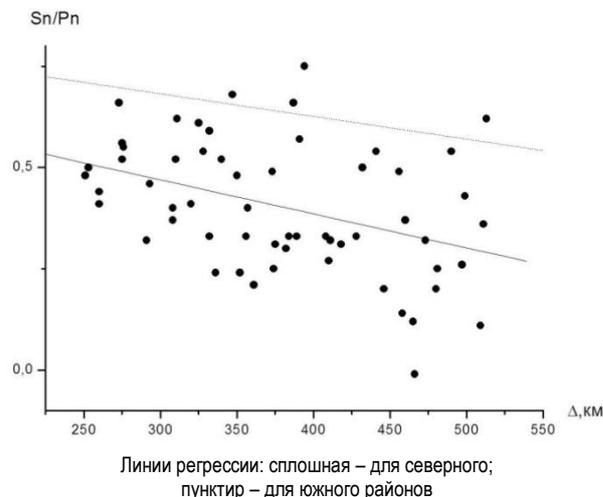
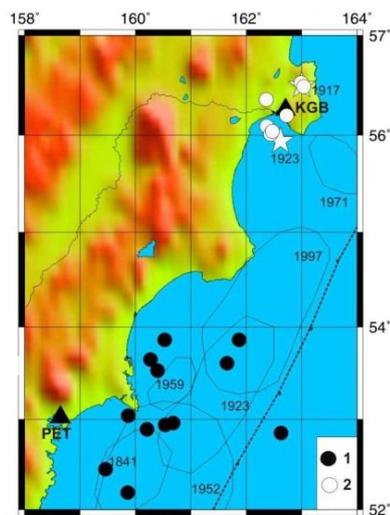


Рисунок 5. Корреляционная зависимость параметра  $Sn/Pn$  от эпицентрального расстояния для северного района

Для сравнения были рассмотрены также характеристики волновых полей по записям, полученным станцией KGB из области, ограниченной координатами 52° - 54°N (в диапазоне расстояний ~270 - 500 км (рисунки 6, 7)).

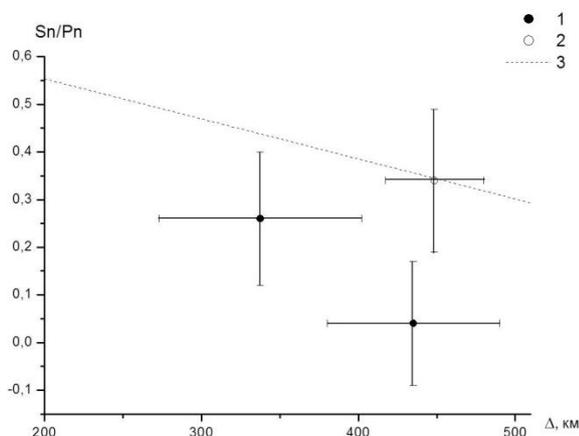


Эпицентры событий, зарегистрированных станциями:  
1 – KGB; 2 – PET (вблизи от станции KGB).  
Остальные обозначения – на рисунке 1

Рисунок 6. Эпицентры землетрясений, зарегистрированных станциями KGB и PET

Из рисунков 6, 7 видно, что в рассматриваемом случае величины  $Sn/Pn$  в целом значительно ниже, чем по данным станции PET. При этом для эпицентров, расположенных между 52.2° и 53.0°, среднее значение параметра  $Sn/Pn$  уменьшается на 0.22 лог. ед. по сравнению с более северными эпицентрами – при увеличении среднего эпицентрального расстояния приблизительно на 100 км. На этом отрезке скорость затухания параметра  $Sn/Pn$  гораздо выше, чем в среднем для северного и южного районов – формулы (1) и (2)). Следует отметить, что почти все

эпицентры землетрясений, расположенные к югу от  $53^{\circ}\text{N}$ , попадают в северную часть очаговой зоны землетрясения 1952 г., и половина из них – одновременно в зону очага 1841 г.



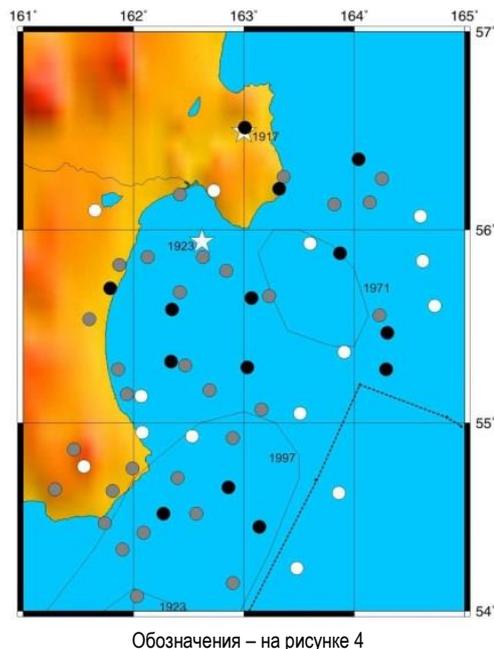
Значение параметра Sn/Pn по данным станций:  
1 – KGB; 2 – PET (для эпицентров близких к станции KGB).  
3 – линия регрессии. Отрезки – средние значения, стандартные отклонения и интервалы осреднения данных

Рисунок 7. Зависимость параметра Sn/Pn от эпицентрального расстояния по данным станции KGB

На рисунке 7 показано также, что среднее значение параметра Sn/Pn по записям событий с эпицентрами в близких окрестностях станции KGB, но полученных станцией PET, практически попадает на линию регрессии, полученную для северного района, однако они на 0.30 лог. ед. больше среднего значения по данным станции KGB. Отсюда следует, что поглощение короткопериодных S-волн значительно выше для трасс, идущих к станции KGB от эпицентров событий, расположенных в области Авачинского залива и к востоку от него, по сравнению с трассами, идущими вдоль окраины п-ова Камчатка, несмотря на то, что в последнем случае сейсмические волны частично пересекают вулканическую область.

На рисунке 8 представлено распределение поглощения короткопериодных S-волн на территории северного района. Как и на рисунке 4, промежуточное поглощение соответствует отклонениям от линии регрессии (2) до  $\pm 0.10$ .

На территории северного района могут быть выделены три области повышенного и промежуточного поглощения короткопериодных S-волн: к югу от  $54.7^{\circ}\text{N}$ , между  $55.2^{\circ}$  и  $55.9^{\circ}\text{N}$ , а также между  $56.2^{\circ}$  и  $56.5^{\circ}\text{N}$ . Эти области разделены субширотными полосами относительно высоких величин Sn/Pn. Самая южная область соответствует северной части очаговой зоны Кроноцкого землетрясения 1997 г. Наиболее яркая аномалия повышенного поглощения выделяется в центральной области, в которую попадает зона очага землетрясения 24.02.1923 г.



Обозначения – на рисунке 4

Рисунок 8. Северный район. Карта поля поглощения короткопериодных S-волн

Северная область расположена на стыке Курило-Камчатской и Алеутской дуг; она соответствует положению сейсмической брешки, находящейся между очагами землетрясений 1969 ( $M_w=7.1$ , к северу от  $57^{\circ}\text{N}$ ) и 1971 г. ( $M_w=7.8$ ). После события 1917 г. ( $M_w=7.7$ ) здесь не было землетрясений с  $M_w>7.1$ . Следует отметить, что площади каждой из этих областей значительно меньше площади области высокого поглощения, соответствующей очагу сильного землетрясения 2006 г. (рисунок 4).

#### ОБСУЖДЕНИЕ

В южном районе Курило-Камчатской дуги выделена протяженная полоса высокого поглощения короткопериодных поперечных волн, расположенная между желобом и вулканическим фронтом, и идущая параллельно островной дуге. Следует отметить, что аналогичные данные ранее были получены для очаговой зоны Суматра-Андаманского землетрясения 24.12.2004 г. ( $M_w=9.0$ ) [5]. Можно полагать, что эта полоса соответствует области наиболее активной дегидратации пород погружающейся океанической плиты, в результате которой резко увеличивается содержание свободных флюидов в мантийном клине [20, 21].

Полученные данные свидетельствуют о том, что в целом поглощение короткопериодных поперечных волн в литосфере гораздо сильнее для северного района, чем для южного. При этом за последние 65 лет в южном районе произошло 4 землетрясения с  $M_w=8.1 - 9.0$ , в то время как в северном – два самых сильных события имели магнитуду  $M_w=7.8$ . Анализ структуры поля поглощения показывает, что относительно пониженное поглощение соответствует

очаговым зонам сильнейших землетрясений 1952 и 1963 гг., произошедших более 50 лет назад, и в то же время повышенное - зонам недавних событий 1997 и 2006 гг. Эти данные согласуются со сделанными ранее [4, 5, 6] выводами о том, что сильные землетрясения в зонах субдукции происходят в областях, характеризующихся повышенным содержанием флюидов в верхах мантии. В случае, если флюиды формируют связную сеть, на кровле двухфазного слоя имеет место концентрация напряжений, которая, в конечном счете, и может приводить к подвижке при сильном землетрясении [22]. После сильного сейсмического события в течение нескольких десятков лет происходит подъем флюидов в земную кору, что обеспечивает "осушение" верхов мантии [4, 8, 9].

Относительно слабое поглощение в зоне очага землетрясения 2007 г., по-видимому, обусловлено его положением к востоку от желоба, где подкоровая литосфера характеризуется низким содержанием свободных флюидов. Скорее всего, это событие с нетипичным для зон субдукции механизмом типа сброса было инициировано изменением поля напряжений после сильнейшего землетрясения 2006 г. [23].

Особый интерес представляют области повышенного поглощения, в которых не было достаточно сильных землетрясений относительно длительное время. На юге такая область расположена между  $48.2^\circ$  и  $49.2^\circ\text{N}$ . Здесь после Онекотанского землетрясения 1915 г. ( $M_w=7.9$ ) не происходили события с  $M \sim > 7.5$ . На севере одна подобная область находится между  $55.2^\circ$  и  $55.9^\circ\text{N}$ ; в ней после землетрясения 24.02.1923 г. ( $M_w=7.2$ ) не зарегистрировано более сильных событий. В самой северной области после 1917 г. наиболее сильным, по-видимому, было землетрясение 13.11.1936 г. ( $M_s=7.1$ ).

Сопоставление данных, полученных станциями PЕТ и KGB, показывает, что зона аномально высокого поглощения находится в области, ограниченной координатами  $52.2^\circ - 53.0^\circ\text{N}$ ,  $159.4^\circ - 162.6^\circ\text{E}$

(рисунки 6, 7). Эта область включает крайнюю северную часть очаговой зоны Великого Камчатского землетрясения 1952 г. Вместе с тем, согласно данным, полученным в [24], на нее приходится малая доля сейсмического момента, выделенного при этом событии - к югу от  $52^\circ\text{N}$  средняя величина подвижки была гораздо выше, чем к северу. Это позволяет предположить, что накопленная здесь к 1952 г. деформация не была выделена полностью. Кроме того, по данным GPS [25], в настоящее время наблюдается очень высокая скорость деформации в области, ограниченной координатами  $\sim 52^\circ - 53^\circ\text{N}$ ,  $160^\circ - 162^\circ\text{E}$ . В этом случае продолжающееся после 1952 г. накопление деформации может вести к подготовке нового сильного землетрясения (например, аналога события 1841 г.). Высокая скорость деформации может ускорить концентрацию глубинных флюидов в мантийном клине [26], которая обеспечивает сильное поглощение S-волн. В то же время в области между  $\sim 49.0^\circ$  и  $50.5^\circ\text{N}$  (к востоку от Курильской дуги) имеет место очень низкая скорость деформации [25], что не противоречит нашим данным о слабом поглощении, связанном с малым содержанием флюидов.

Возможно, что подготовка сильных землетрясений идет также и в других областях повышенного поглощения S-волн в литосфере (в первую очередь, к северу от  $55^\circ\text{N}$ ). Отметим, что такое предположение не противоречит оценке среднего времени сейсмического цикла для землетрясений с  $M \geq 7.7$  в районе Курило-Камчатской дуги [12].

По нашему мнению, в выделенных областях высокого поглощения необходимо проводить постоянный мониторинг различных геофизических и геохимических параметров с целью среднесрочного прогноза землетрясений. Такими параметрами могут быть, в частности, кольцевые структуры сейсмичности, формирующиеся перед сильными и сильнейшими землетрясениями в зонах субдукции [5, 7].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Molnar, P. Lateral variations of attenuation in the upper mantle and discontinuities in the lithosphere / P.Molnar, J.Oliver // J. Geophys. Res.. - 1969. - V.74. - P. 2648 - 2682.
2. Копничев, Ю.Ф. Короткопериодные сейсмические волновые поля. - 1985. - М.: Наука. - 176 с.
3. Копничев, Ю.Ф. О природе короткопериодных сейсмических полей на расстояниях до 3000 км / Ю.Ф.Копничев, А.Р. Аракелян // Вулканология и сейсмология. - 1988. - № 4. - С. 77 - 92.
4. Копничев, Ю.Ф. Пространственно-временные вариации поля поглощения поперечных волн в верхней мантии сейсмически активных и слабосейсмичных районов / Ю.Ф.Копничев, Гордиенко Д.Д., Соколова И.Н. // Вулканология и сейсмология. - 2009. - N 1. - С. 49 - 64.
5. Копничев, Ю.Ф. О корреляции характеристик сейсмичности и поля поглощения S-волн в районах кольцевых структур, формирующихся перед сильными землетрясениями / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Вулканология и сейсмология. - 2010. - № 6. - С. 4 - 51.
6. Копничев, Ю.Ф. Неоднородности поля поглощения короткопериодных поперечных волн в литосфере Центральной Азии и их связь с сейсмичностью / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Докл. РАН. - 2011. - Т.437, N 1. - С. 97 - 101.
7. Копничев, Ю.Ф. Неоднородности поля поглощения короткопериодных S-волн в районе очага землетрясения Мауле (Чили, 27.02.2010,  $M_w=8.8$ ) и их связь с сейсмичностью и вулканизмом / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Геофизические исследования. - 2011. - Т. 12., № 3. - С. 22 - 32.

8. Husen, S. Postseismic fluid flow after the large subduction earthquake of Antofagasta, Chile / S. Husen, E. Kissling // *Geology*. - 2001. - V.29, N 9. - P. 847 - 850.
9. Копничев, Ю.Ф. Пространственно-временные вариации поля поглощения S-волн в очаговых зонах сильных землетрясений Тянь-Шаня / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // *Физика Земли*. - 2003. - № 5. - С. 73 - 86.
10. Копничев, Ю.Ф. Неоднородности поля поглощения короткопериодных сейсмических волн в литосфере Центрального Тянь-Шаня / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // *Вулканология и сейсмология*. - 2007. - № 5. - С.54 - 70.
11. Копничев, Ю.Ф. Неоднородности поля поглощения короткопериодных S-волн в литосфере Тянь-Шаня и Джунгарии и. - их связь с сейсмичностью / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // *Докл. РАН*. - 2010. - Т 433, № 6 - С. 808 - 812.
12. Федотов, С.А. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на 2006-2011 гг. и успешный прогноз Средне-Курильского землетрясения / С.А. Федотов, А.В. Соломатин, С.Д. Чернышев // *Вулканология и сейсмология*. - 2007. - № 3. - С. 3 - 25.
13. Каазик, П.Б. Численное моделирование группы Sn и коды в неоднородной по скорости и поглощению среде / П.Б. Каазик, Ю.Ф. Копничев // *Вулканология и сейсмология*. - 1990. - № 6. - С. 74 - 87.
14. Каазик, П.Б. Анализ тонкой структуры короткопериодных сейсмических полей по группе станций / П.Б. Каазик, Ю.Ф. Копничев, И.Л. Нерсесов, М.Х. Рахматуллин // *Физика Земли*. - 1990. - № 4. - С. 38 - 49.
15. Бакиров, А.Б. (ред). Земная кора и верхняя мантия Тянь-Шаня в связи с геодинамикой и сейсмичностью // Бишкек: Илим, 2006. - 115 с.
16. Ваньян, Л.Л. О природе электропроводности консолидированной коры / Л.Л. Ваньян, Р.Д. Хайндман // *Физика Земли, Физика Земли*. - 1996. - № 4. - С. 5 - 11.
17. Бердичевский, М.Н. Опыт интерпретации МТ-зондирований в горах Малого Кавказа / М.Н. Бердичевский, В.П. Борисова, Н.С. Голубцова и др. // *Физика Земли*. - 1996. - № 4. - С. 99 - 117.
18. Bielinski, R. Lithospheric heterogeneity in the Kyrgyz Tien Shan imaged by magnetotelluric studies / R. Bielinski, S. Park, A. Rybin, V. Batalev, S. Jun, C. Sears // *Geophys. Res. Lett.* - 2003. - V.30., N 15. - doi: 10.1029/2003GL017455.
19. Апродов, В.А. Вулканы / В.А. Апродов. - М.: Мысль, 1982. - 468 с.
20. Yamasaki, T. Double seismic zone and dehydration embrittlement of the subducting slab / T. Yamasaki, T. Seno // *J. Geophys. Res.* - 2003. - V. 108., N B4. - doi: 10.1029/2002JB001918.
21. Wada, I. Weakening of the subducting interface and its effects on surface heat flow, slab dehydration and mantle wedge serpentinization / I. Wada, K. Wang, J. He, R. Hyndman // *J. Geophys. Res.* - 2008. - V. 113. - B04402, doi:10.1029/2007JN005190.
22. Gold, T. Fluid ascent through the solid lithosphere and its relation to earthquakes / T. Gold, S. Soter // *Pure Appl. Geophys.* - 1984/1985. - V. 122. - P. 492 - 530.
23. Steblou, G. Spatially linked asperities of the 2006-2007 great Kuril earthquakes revealed by GPS / G. Steblou, M. Kogan, B. Levin, N. Vasilenko, A. Prytkov, D. Frolov // *Geophys. Res. Lett.* - 2008. - V. 35. - L22306. doi:10.1029/2008GL035572.
24. MacInnes, B. Slip distribution of the 1952 Kamchatka great earthquake based on near-field tsunami deposits and historical record / B. MacInnes, R. Weiss, J. Bourgeois, T. Pinagina // *Bull. Seismol. Soc. Amer.* - 2010. - V. 100., N 4. - P. 1695 - 1709.
25. Burgmann, R. Interseismic coupling and asperity distribution along the Kamchatka subduction zone / R. Burgmann, M. Kogan, M. Steblou, G. Hilley, V. Levin, E. Apel // *J. Geophys. Res.* - 2005. - V. 110. - B07405.
26. Hier-Majumder, S. Role of dynamic grain boundary wetting in fluid circulation beneath volcanic arcs / S. Hier-Majumder, D. Kohlstedt // *Geophys. Res. Lett.* - 2006. - V.33. - L08305.

## КУРИЛ ЖӘНЕ КАМЧАТКА АУДАНЫНДАРЫНДА ҚЫСҚАПЕРИОДТЫ S-ТОЛҚЫНДАР ЖҰТЫЛУ ӨРІСІНІҢ БІРТЕКТИЕМЕСТІГІ ЖӘНЕ ОЛАРДЫҢ СЕЙСМИКАЛЫҚПЕН БАЙЛАНЫСЫ

<sup>1)</sup> Копничев Ю.Ф., <sup>2)</sup> Соколова И.Н.

<sup>1)</sup> *Ресей, Мәскеу қ., РҒА Жер физикасы институты*

<sup>2)</sup> *Қазақстан, Курчатов қ., Геофизикалық зерттеулер институты*

Оңтүстік Америка аймағындағы 1994 ж. 06.09-ындағы Боливия жерсілкінуінің ( $M_w=8.2$ ,  $h=635$  км) зардаптарымен ұқсастығына қарай, ХХ ғасырдан бастап Жердегі өте қатты Охотск теңізіндегі 2013 ж. 05.24-індегі терентоғысты жерсілкінуінен ( $M_w=8.3$ ,  $h=609$  км) кейін Курил-Камчатка доғасы ауданында сейсмикалық белсенділік деңгейінің елеулі көтерілуін күтуіне болады. Теренемес қатты жерсілкінулер дайындалуы мүмкін облыстарды бөлу үшін литосферада қысқапериодты көлденең толқындар жұтылу өрісінің сипаттамалары қарастырылған.  $45.0^\circ-50.5^\circ N$  және  $54.0^\circ-56.5^\circ N$  координаттарымен шектелген екі ауданнан Петропавловск (РЕТ) станциясымен алынған тереңдігі 0-33 км. жерсілкінулердің, сондай-ақ  $52^\circ$  және  $54^\circ N$  арасындағы ауданынан Крутоберегово (КГВ) станциясымен тіркелген жерсілкінулердің 350 астам жазбалары өңделген. Sn және Pn толқындардың максималь амплитудалары қатынасын талдауында негізделген әдісі қолданылған.  $M_w \geq 7.7$  магнитудасымен қатты жерсілкінулер жеткілікті көп уақыттан бері болмаған қатты жұтылу зоналары бөлінген. Бұл зоналарда (бірінші кезегінде Авачин шығынағы облысы және одан шығысқа қарай) қатты жерсілкінулер дайындалу процесстері жүруі жорамалдануда.

**HETEROGENEITIES OF SHORT-PERIOD SHEAR WAVE ATTENUATION FIELD  
IN THE REGIONS OF KURIL AND KAMCHATKA AND ITS RELATION TO SEISMICITY**

<sup>1)</sup> Yu.F. Kopnichev, <sup>2)</sup> I.N. Sokolova

<sup>1)</sup> *Institute of the Earth Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>2)</sup> *Institute of Geophysical Research, Kurchatov, Kazakhstan*

Similarly with the consequences of Bolivian earthquake on 09.06.1994 ( $M_w=8.2$ ,  $h=635$  km) in the South America region, a significant increase of the seismic activity level can be expected in the region of Kuril-Kamchatka arch after the strongest deep-focused earthquake on Earth since the beginning of the 20th century in Okhotskoe Sea on 24.05.2013 ( $M_w=8.3$ ,  $h=609$  km). For the purposes of detecting the regions where strong shallow earthquakes may take place, the characteristics of short-period S-waves attenuation field in the lithosphere have been studied. More than 350 records of earthquakes with the depths of 0 – 33 km that were obtained by Petropavlovsk (PET) station from two regions, limited by coordinates  $45.0^\circ$ - $50.5^\circ$ N and  $54.0^\circ$ - $56.5^\circ$ N as well as earthquakes that were recorded by Krutoberegovo (KGB) station from the region between  $52^\circ$  and  $54^\circ$ N, have been processed. The authors used a method based on the analysis of  $S_n$  and  $P_n$  maximum amplitude ratio. The zones of strong attenuation were detected, in which there were no strong earthquakes with the  $M_w \geq 7.7$  for a long enough time. It is assumed that in these zones (first of all, in the region of Avachinskiy Gulf and to the east from it) active processes of preparation of strong earthquakes take place.

575:599:539.1.047

**ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ФАКТОРОВ СТРЕСС-СИГНАЛИЗАЦИИ, ВЫДЕЛЕННЫХ ИЗ ПЛАЗМЫ КРОВИ ЛЮДЕЙ, ПОДВЕРГАЮЩИХСЯ ВОЗДЕЙСТВИЮ РАДИАЦИИ**

Чердниченко О.Г., Губицкая Е.Г., Пилюгина А.Л.

*Институт общей генетики и цитологии МОН РК, г. Алматы, Казахстан*

Представлены результаты изучения генетических эффектов факторов стресс-сигналикации, выделенных из плазмы облученной *in vitro* крови, крови людей, профессионально подвергающихся воздействию радиации и ликвидаторов ЧАЭС. Показано, что факторы стресс-сигналикации не передаются при прямом контакте между клетками, а выделяются ими в плазму или культуральную среду. При этом факторами обуславливающими эффект свидетеля могут выступать фрагменты вДНК, выделенные из облученной крови. Это продемонстрировано введением в культуральную среду интактных лимфоцитов, внеклеточной ДНК, выделенной из образцов плазмы облученной *in vitro* крови. При этом в лимфоцитах-свидетелях наблюдалось развитие тех же реакций, что и в облученных клетках, т.е. увеличение частоты хромосомных aberrаций. Более того, добавление к интактным лимфоцитам вДНК, выделенной из плазмы крови людей облученных *in vivo* в силу своей профессиональной деятельности или ликвидаторов ЧАЭС также увеличивает в них частоту хромосомных aberrаций, что свидетельствует о наличии в их плазме «байстендер» факторов (факторов стресс-сигналикации), которые сохраняются в крови длительное время после облучения.

Как известно, ионизирующее излучение изменяет состояние клеточных защитных механизмов: систем антиоксидантной защиты, репарации ДНК, регуляции клеточного цикла, апоптоза и др. Исследование молекулярных и клеточных механизмов, лежащих в основе эффектов облучения, является одной из ключевых и наиболее актуальных задач радиационной биологии.

Среди прямых повреждений ДНК, вызываемых ионизирующим излучением, особое внимание заслуживают двуниевые разрывы (ДР) ДНК, не устранение которых в ходе репарации ДНК, приводит к цитогенетическим нарушениям и гибели клеток. Возможно, что именно они являются основным триггером, запускающим процессы клеточного отклика на воздействие ионизирующего излучения. При этом индуцированные радиацией события могут наблюдаться как в облученных, так и в соседних клетках, избежавших попадания ионизирующих частиц. Это явление – показанное и для агентов разной природы – получило название эффекта «свидетеля», при котором происходит передача сигнала (стресс-сигналикация) между облученными и интактными клетками. Таким образом, могут передаваться, например, сигналы индукции хромосомных aberrаций, инициации апоптоза или адаптивного ответа. Однако, открытие этих клеточных реакций, ставит вопрос о природе и происхождении в среде облученных клеток факторов стресс-сигналикации. Несмотря на активные исследования в этом направлении природа всех факторов сигнальной системы при радиорезистентности и эффекте свидетеля до конца не ясна.

На роль факторов стресс-сигналикации предложено много кандидатов. Основное внимание сосредоточено на факторах белковой природы, которые могут экскретироваться облученными клетками и при взаимодействии с клеточными рецепторами кле-

ток свидетелей активировать сигнальные пути. Вместе с тем в последние годы появляются данные о том, что фрагменты ДНК с определенными последовательностями при взаимодействии с соответствующими рецепторами клеток активируют белки семейства стресс-ассоциированных протеинкиназ. Возможными источниками таких факторов, отвечающих за индукцию радиорезистентности и возникновение эффекта свидетеля, могут быть ДНК разного происхождения. Либо это ДНК являющиеся результатом повышения экспрессии некоторых генов в ответ на радиационное воздействие, либо радиочувствительные клетки, гибнущие под действием радиации, т.е. фрагменты внеклеточной ДНК, переходящие в среду культивирования из апоптотических клеток. Таким образом, механизмы индукции радиорезистентности могут включать участие процессов репарации ДНК, апоптоза, всевозможных каскадов сигнальных реакций, конформационных изменений ДНК, и др.

**МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ**

*Радиационная обработка ( $\gamma$ -излучение)* – Цельную кровь в пластиковых флаконах облучали  $\gamma$ -квантами на аппарате дистанционной лучевой терапии с кобальтовым зарядом «Террагам» с номинальной энергией ускоренных электронов 1,5 МэВ с мощностью доз 0,1 Гр/мин. Использовали дозы 0,05 Гр; 2 Гр.

*Культивирование лимфоцитов и приготовление препаратов.* 0,5 мл периферической крови добавляли к 4,5 мл среды культивирования, состоящей из 80% среды HAMs с глутамином (2мМ), 20% сыворотки КРС, пенициллина 100 ед/мл, стрептомицина 100 ед/мл. Деление лимфоцитов стимулировали 2% ФГА. Клетки инкубировали при 37°C. Для накопления метафазных пластинок, в культуральную среду за 2 часа до фиксации вводили колхицин в конечной

концентрации 0,8 мкг/мл. Для получения цитогенетических препаратов клетки гипотонизировали 0,075М КС1 при 37°C 15 минут, фиксировали смесью метиловый спирт/ледяная уксусная кислота (3/1) и окрашивали 4% раствором красителя Гимза [90]. При анализе метафазных пластинок определяли число клеток со стабильными аберрациями, а также их число и тип на 100 проанализированных метафаз. Полученные данные обрабатывали статистическими методами [91].

*Определение природы передачи фактора стресс-сигнализации.* Цельную кровь от доноров мужчин облучали в дозе 0,05 Гр. Затем в эксперименте выделяли 3 варианта: 1) цельная кровь; 2) отмытые лимфоциты (отбирали плазму, центрифугировали при 3000 об/мин. 10 минут, через 4 часа после облучения. Для отмывания к осажденным лимфоцитам добавляли 5 мл среды RPMI-1640, центрифугировали в том же режиме); 3) плазма (облученную цельную кровь центрифугировали при 3000 об/мин. 10 минут, через 4 часа после облучения и отбирали плазму). К каждому варианту добавляли цельную кровь от доноров женщин (совместимых по группе крови и резус-фактору). Далее смесь облучали дозой 2 Гр через 4 часа после воздействия малой дозой. Культивирование и хромосомный анализ проводили по описанной выше методике.

*Культивирование клеток для выявления эффекта свидетеля.* Лимфоциты переводили в среду, содержащую из питательной среды RPMI-1640 ("Sigma") и 10% эмбриональной телячьей сыворотки (ПанЭко, Россия). Суспензии лимфоцитов инкубировали 2 ч при 37°C, затем клетки осаждали центрифугированием, подвергали гипотонии и фиксировали, супернатанты замораживали. В дальнейших экспериментах из размороженных препаратов выделяли фрагменты вДНК с целью изучения их в качестве факторов стресс-сигнализации для клеток - свидетелей. Для этого суспензии лимфоцитов из крови других доноров инкубировали по стандартной методике описанной выше. Затем к каждой из них добавляли фрагменты вДНК, выделенные из среды инкубации лимфоцитов или плазмы крови предыдущих опытов. По истечении 48 ч инкубации (37°C) готовили цитогенетические препараты для анализа хромосомных аберраций.

*Выделение фрагментов ДНК из среды инкубации лимфоцитов.* Клетки осаждали центрифугированием, выделяли 3 мл среды культивирования и к ней добавляли в конечной концентрации: 1%-ный лаурилсаркозинат натрия, 0.02 моль/л ЭДТА и 75 мкг/мл РНКазы А ("Sigma"). Полученную суспензию инкубировали при 37°C 45 мин., затем после прибавления протеиназы К (200 мк/мл) еще 24 ч. Далее насыщенным раствором фенола проводили экстракцию вДНК и осаждали ее этанолом в присутствии 2 моль/л раствора ацетата аммония (или с помощью китов фирмы Fermentas). Осадок промы-

вали 75%-ным этанолом, высушивали и растворяли в воде. Концентрацию ДНК определяли методом флуоресценции красителя Hoechst 33528, связанного с ДНК.

*Выделение внеклеточной ДНК из плазмы периферической крови.* Образцы крови центрифугировали 5 мин при 1000 об/мин. и отбирали плазму. К 0,5 мл плазмы крови прибавляли 0,1 мл лизирующего буфера (10%-ный лаурилсаркозилат натрия, 0.1 моль/л ЭДТА) и РНКазу А (75 мкг/мл), смесь инкубировали при 37°C 1ч, затем гидролизовали протеиназой К (200 мкг/мл, 37°C, 24 ч). Экстракцию ДНК из инкубационной смеси проводили насыщенным фенолом (2 раза), к фенольному экстракту затем прибавляли ацетат аммония (2 моль/л) и ДНК осаждали 0,8 объемами изопропанола (при -20°C). Осадок ДНК отделяли центрифугированием, промывали 75%-ным водным этанолом и растворяли в 30 мкл воды.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

К настоящему времени на разных объектах получены не только доказательства существования эффекта свидетеля в различных типах клеток и при различных сочетаниях ионизирующих облучений, но сделаны также попытки проследить механизм его формирования в плане изучения последовательных процессов на пути его реализации. В ходе обсуждений возник вопрос о возможности передачи фактора стресс-сигнализации. Ответ на этот вопрос требовал проведения ряда экспериментов *in vitro*.

«Эффект свидетеля» может быть обусловлен по крайней мере двумя механизмами: Межклеточными контактами («gap junction»), включающими Gr53-опосредуемый путь проведения сигнала повреждения. Другой механизм, не обусловленный непосредственными межклеточными контактами, может быть связан с секрецией биологически активных факторов в культуральную среду или плазму крови.

Исследование индукции эффекта свидетеля начато с решения вопроса выделяется ли он предоблученными клетками в плазму или передается при прямом контакте между клетками. Результаты представлены в таблице 1.

При совместном культивировании клеток крови разнополых доноров (цитогенетический маркер – Y-хромосома) обнаружено, что предоблучение мужских лимфоцитов в дозе 0,05 Гр с последующим облучением смеси 2 Гр  $\gamma$ -излучения снижает частоту хромосомных аберраций в женских лимфоцитах (12% по сравнению с 26% без предварительного облучения). Данный эффект наблюдается только в вариантах с предварительно облученной цельной кровью, но не с отмытыми лимфоцитами (21%).

Таким образом, можно предполагать, что фактор стресс-сигнализации вырабатывается предоблученными лимфоцитами и выделяется в плазму, а не передается при прямом контакте между клетками.

Для исключения возможного влияния чужеродной плазмы при индукции эффекта свидетеля прове-

**ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ФАКТОРОВ СТРЕСС-СИГНАЛИЗАЦИИ, ВЫДЕЛЕННЫХ ИЗ ПЛАЗМЫ КРОВИ ЛЮДЕЙ,  
ПОДВЕРГАЮЩИХСЯ ВОЗДЕЙСТВИЮ РАДИАЦИИ**

ден эксперимент с использованием крови одного индивидуума. Цельную кровь облучали дозой 2 Гр  $\gamma$ -излучения, через 4 ч. после экспозиции кровь центрифугировали при 1000 об/мин, 10 мин. для того, чтобы изолировать плазму. Сразу же после центрифугирования плазму смешивали с необлученной кровью.

Анализ результатов показал (таблица 2), что добавление облученной *in vitro* плазмы к необлученной крови увеличивает частоту хромосомных aberrаций в не облученных клетках крови в 3 раза, т.е. наблюдается эффект свидетеля (bystander effect). Т.е. повышение хромосомных aberrаций в необлученных клетках при их контакте с облученной плазмой свидетельствует о наличии определенного перемещающегося фактора стресс-сигнализации.

Для проверки этого предположения также были проведены эксперименты с использованием больших и малых доз облучения, а также плазмы и среды культивирования облученных клеток: 1) из облученной (0,05 Гр и 2 Гр) крови выделяли плазму; 2) облученные клетки переносили в культуральную среду без митогенной стимуляции ФГА. Через 4 ч. выделенную плазму из облученной крови и культуральную среду добавляли к интактным клеткам и их облучали дозой 2 Гр (таблица 3).

В результате обнаружено, что частота хромосомных aberrаций в интактных клетках составила 7,56% и 13,6% соответственно по сравнению с 26% при облучении клеток 2 Гр без предварительных манипуляций. Как видно из результатов эксперимента добавление облученной плазмы приводит к более существенному снижению хромосомных aberrаций при воздействии повреждающей дозы. Таким образом, показано, что фактор стресс-сигнализации выделяется клетками в плазму или культуральную среду, который, с одной стороны, вызывает повышение хромосомных нарушений в интактных клетках (эффект свидетеля), с другой стороны, они же воспринимают его как защитный сигнал от повреждающей дозы облучения (адаптивный ответ), причем он не зависит от величины предварительного облучения.

Одной из важнейших характеристик гомеостаза является поддержание определенного соотношения между пролиферацией и гибелью клеток – фундаментальными характеристиками высших организмов, необходимыми для нормального развития и функционирования. При мутагенных воздействиях, как правило, увеличивается количество гибнущих клеток организма. К настоящему времени уже установлено, что небольшие количества ДНК обнаруживаются и вне клеток, прежде всего в плазме крови.

*Таблица 1. Определение фракции крови, содержащей фактор стресс-сигнализации*

Вариант	Клетки с aberrациями	Всего aberrаций	Структурные aberrации	
			Хромосомного типа	Хроматидного типа
мужская цельная кровь + женская цельная кровь	12,0±1,4*	15,0±1,59*	4,0±0,88	11,0±1,3
мужские отмытые лимфоциты + женская цельная кровь	21,0±1,35**	26,0±1,38**	6,0±1,06	20,0±1,34
мужская плазма + женская цельная кровь	12,7±1,5*	12,0±1,4*	3,0±0,76	9,0±1,28
2 Гр	26,0±1,38	30,0±1,45	7,0±0,8	23,0±1,33
0,05/2 Гр	17,0±0,20	18,0±0,21	8,0±0,86	10,0±0,9

Примечание: \*  $p \leq 0,01$ ; \*\*  $p \geq 0,01$

*Таблица 2. Изучение эффекта добавления облученной *in vitro* плазмы к необлученной крови*

Доза облучения плазмы (Гр)	Клетки с aberrациями	Всего aberrаций	Хромосомного типа	Хроматидного типа
0	1,0±0,44*	1,0±0,44	0	1,0±0,44
2	3±0,54	3±0,54	1±0,31	2,0±0,44

Примечание: \*  $p \leq 0,05$

*Таблица 3. Изучение формирования адаптивного ответа по механизму эффекта свидетеля*

Вариант	Клеток с aberrациями	Всего aberrаций	Хромосомного типа	Хроматидного типа
(среда 2 Гр + интактн. кл) 2 Гр	11,4±1,4	13,6±1,48	9,1±1,2	4,5±0,9
(плазма 2 Гр + интактн. кл) 2 Гр	7,56±1,18	7,56±1,18	6,72±1,1	0,84±0,41
(среда 0,05 Гр + интактн. кл) 2 Гр	12,0±1,4	15,0±1,59	10,0±1,3	5,0±0,97
(плазма 0,05 Гр + интактн. кл) 2 Гр	8,0±1,1	9,0±1,2	6,0±1,0	3,0±0,7
Интактные клетки	1,0±0,44*	1,0±0,44	0	1,0±0,44
2 Гр	26,0±1,38	30,0±1,45	23,0±1,33	7,0±0,8

Примечание: \*  $p \leq 0,01$

Циркулирующая ДНК может появляться в кровотоке в результате гибели ядродержащих клеточных элементов, созревания эритроцитов и тромбоцитов путем некроза или апоптоза, а также активной секреции нуклеиновых кислот во внеклеточное пространство. Интерес к внеклеточной ДНК плазмы крови в настоящее время все более возрастает, что связано с прогностической и диагностической значимостью этого показателя при лучевом облучении, онкологических, аутоиммунных заболеваниях и др. До определенного времени считалось, что ДНК находится только в клеточных структурах: преимущественно в ядрах клеток и митохондриях, где она исполняет роль носителя генетической информации. К настоящему времени уже установлено, что небольшие количества ДНК обнаруживаются и вне клеток, прежде всего в плазме крови. Интерес к внеклеточной ДНК плазмы крови в настоящее время все более возрастает, что связано с прогностической и диагностической значимостью этого показателя при лучевом облучении, онкологических, аутоиммунных заболеваниях и др. Эта ДНК получила название внеклеточной ДНК (внДНК). Свойства и биологические функции фрагментов внДНК в норме и при патологии остаются малоизученными. Большинство авторов полагают, что состав внДНК идентичен составу ядерной ДНК (ядДНК), которая не способна воздействовать на клетки организма. Немногочисленные исследования свойств внДНК, в частности обнаружение накопления CpG-динуклеотидов, позволяют, однако, предположить, что фрагменты внДНК, циркулирующие в крови, небезразличны для организма. Доказано появление фракции внДНК в плазме крови при лучевой патологии уже через несколько часов после воздействия ионизирующих излучений [1, 2]. На роль факторов стресс-сигнализации претендуют кроме обнаруженных ранее стрессорных белков [3], также внДНК, содержащиеся в плазме крови или среде культивирования лимфоцитов.

В связи этим следующим этапом стало изучение генетических эффектов внДНК и частоты хромосомных aberrаций у людей подвергавшихся воздействию радиации и их возможная взаимосвязь. Чтобы определить, может ли внеклеточная ДНК быть фактором стресс-сигнализации при эффекте свидетеля в среду культивирования интактных лимфоцитов были добавлены внДНК, выделенные из плазмы крови здоровых людей, облученной *in vitro* 0,05 Гр дозой радиации и необлученной (Таблица 4).

Цитогенетический анализ показал, что в результате введения в культуральную среду, к интактным лимфоцитам, внеклеточной ДНК, выделенной из плазмы крови, облученной дозой 0,05 Гр  $\gamma$ -излучения в лимфоцитах-свидетелях (интактных лимфоцитах) эти фрагменты стимулируют развитие тех же реакций, что и в облученных клетках, т.е. наблюдается увеличение частоты хромосомных aberrаций, причем вне зависимости от концентрации внДНК в образце.

Для подтверждения этих результатов нами были проведены эксперименты по выделению внДНК из плазмы крови людей, профессионально контактирующих пробами различной интенсивности излучения и ликвидаторов ЧАЭС и изучению их влияния на интактные лимфоциты. Первым этапом этой серии экспериментов стало изучение спонтанной частоты хромосомных aberrаций в лимфоцитах крови облученных людей (таблица 5).

Анализ результатов цитогенетического обследования людей, подвергавшихся воздействию радиации в силу своей профессиональной деятельности, показал значительное увеличение частоты хромосомных aberrаций ( $4,94 \pm 0,28\%$ ) по сравнению с контролем ( $0,87 \pm 0,1\%$ ). При этом aberrации хромосомного типа составили  $1,95 \pm 0,22\%$  – маркеры радиационного воздействия и были представлены двойными разрывами и фрагментами, дицентриками и транслокациями.

Таблица 4. Изучение эффекта добавления внДНК из плазмы *in vitro* облученной крови к интактным лимфоцитам

Вариант	Клетки с aberrациями	Всего aberrаций	Хромосомного типа	Хроматидного типа
внДНК (контроль) + интактные лимфоциты	1,28±0,42	1,28±0,42	0,14±0,14	1,14±0,40
Интактные лимфоциты	1,0±0,44	1,0±0,44	0	1,0±0,44
внДНК (0,05Гр) + интактные лимфоциты	2,9±0,75	2,9±0,75	1±0,44	1,9±0,63
Интактные лимфоциты 0,05 Гр	4,4±0,92	4,4±0,92	2,0±0,63	2,4±0,63

Примечание: \*  $p \leq 0,05$

Таблица 5. Изучение эффекта добавления внДНК из плазмы *in vivo* облученной крови к интактным лимфоцитам

Вариант	Клеток с aberrациями	Всего aberrаций	Хромосомного типа	Хроматидного типа
Среднее ликвидаторы ЧАЭС	4,4±0,62	4,46±0,62	3,83±0,58	0,73±0,25
внДНК ликвидаторов ЧАЭС + интактные лимфоциты	2,09±0,42	2,91±0,51	2,73±2,46	0,18±0,13
Среднее персонал, контактирующий с ИИР	4,68±0,27	4,94±0,28	1,95±0,22	3,26±0,23
внДНК персонала, контактир. с ИИР + интактные лимфоциты	2,88±0,32	3,02±0,32	1,13±0,2	1,89±0,26
Интактные лимфоциты	0,9±0,1	0,9±0,1	0,2±0,05	0,7±0,09

Хроматидные нарушения –  $3,26 \pm 0,23\%$ , составляли одиночные разрывы и фрагменты. Цитогенетический анализ ликвидаторов ЧАЭС, подвергшихся более 25 лет назад воздействию радиации, также выявил у них значительное увеличение частоты хромосомных aberrаций  $4,46 \pm 0,62\%$  по сравнению с контролем. Aberrации хромосомного типа составили  $3,83 \pm 0,58\%$ , хроматидного типа –  $0,73 \pm 0,25\%$ . Спектр хромосомных нарушений был аналогичным (таблица 5).

Добавление вДНК, выделенной из плазмы их крови в среду культивирования интактных лимфоцитов, вызвало в них увеличение частоты хромосомных aberrаций ( $p \leq 0,01$ ), что показывает, во-первых, наличие в их плазме «байстендер» факторов (факторов стресс-сигнализации), которые сохраняются в крови длительное время после облучения, так как ликвидаторы ЧАЭС подверглись воздействию радиации более 25 лет назад. Во-вторых, что одной из составляющих факторов стресс-сигнализации является вДНК.

Полученные нами результаты согласуются с литературными данными, показывающими, что у лик-

видаторов аварии на ЧАЭС повреждающие факторы в крови сохраняются в крови даже спустя более 20 лет после аварии [4]. Возможной причиной этого явления является то, что, как было показано нами, облучение крови *in vitro*, способствует значительному повышению кластогенной активности, и облученные клетки, проинкубированные в необлученной культуральной среде, продолжают выделять факторы стресс-сигнализации.

Увеличение частоты хромосомных aberrаций в интактных лимфоцитах не было связано ни с концентрацией вДНК ни с длиной выделенных фрагментов вДНК (одинаковая при выделении из облученной и не облученной крови). Но, тем не менее, они оказывали стимулирующее воздействие на интактные лимфоциты. Все эти факты свидетельствуют, что, фрагменты вДНК высвобождаемые, вероятно, из апоптотически гибнущих радиочувствительных клеток, претерпевают определенную модификацию по сравнению с фрагментами ДНК гибнущих необлученных клеток, что позволяет им быть факторами стресс-сигнализации и индуцировать в интактных клетках хромосомные aberrации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Костюк С.В., Алексеева А.Ю., Конькова М.С., Смирнова Т.Д., Ермаков А.В., Ефремова Л.В., Конорова И.Л., Вейко Н.Н. Внеклеточная ДНК влияет на функциональную активность клеток эндотелия. // Медицинская генетика. -2010.- №1.- С. 38-46.
2. Конькова М.С. Внеклеточная ДНК фактор сигнализации при радиационном эффекте свидетеля: автореф. ... канд.биол.наук.- М., 2011.- 21 с.
3. Чередниченко О.Г. Индукция белков в плазме крови человека при формировании адаптивного ответа //Известия НАН РК. Серия биологическая. -2006. - № 4.
4. Морозник П.М., Моссе И.Б., Мельнов С.Б., Морозик М.С., Сеймур К.Б., Мазерсилл К.Е. Генетические эффекты «Байстэндер» факторов из сыворотки крови людей, облученных в результате аварии на ЧАЭС // Радиационная биология. Радиозэкология.- 2011.- Т. 51, № 1.- С. 76-80.

#### РАДИАЦИЯ ӘСЕРІНЕ ҰШЫРАҒАН АДАМДАРДЫҢ ҚАНЫНЫҢ ПЛАЗМАСЫНАН БӨЛІНГЕН СТРЕСС-ДАБЫЛҚАҚҚЫШ ФАКТОРЛАРЫНЫҢ ГЕНЕТИКАЛЫҚ ӘСЕРЛЕРІ

Чередниченко О.Г., Губицкая Е.Г., Пилюгина А.Л.

*Қазақстан, Алматы қ., ҚР БҒМ Жалпы генетика және цитология институты*

ЧАЭС ликвидаторлары мен радиацияның кәсіби сәулелену әсеріне ұшыраған адамдардың қанындағы, *in vitro* қанының сәулеленген плазмасынан бөлінген стресс-дабылқакқыш факторларының генетикалық әсерін зерттеу нәтижелері келтірілді. Стресс-дабылқакқыш факторлары жасушалар арасындағы тура байланыс барысында берілмейтіні, оны плазмаға немесе дақылды ортаға бөлетіні байқалды. Сонымен бірге, сәулеленген қаннан бөлінген вДНК бөлшектері куәгер әсерін шарттайтын фактор ретінде алынуы мүмкін. Бұл *in vitro* қанының сәулеленген плазмасындағы үлгілерден бөлінген жасушадан тыс ДНК, интактылы лимфоциттердің дақылды ортасына енгізу арқылы көрсетілген. Оның ішінде, лимфоцит-куәгерлерде хромосомды aberrациялардың жиілігін ұлғаюы, сәулеленген жасушаларда реакциялардың дамуы бақыланды. Одан басқа, АЭС ликвидаторларының немесе кәсіби қызметі барысында *in vivo* сәулеленген адамдардың қанындағы плазмадан бөлінген вДНК интактылы лимфоциттеріне қосылуы хромосомды aberrация жиіліктерін ұлғайтады, бұл сәулеленуден кейін ұзақ уақыт бойында қанда сақталатын «байстендер» факторлардың (стресс-дабылқакқыш факторлары) плазмасында оның орын алуын көрсетеді.

**GENETIC EFFECTS OF STRESS FACTORS SIGNALING, ISOLATED FROM BLOOD PLASMA  
OF PEOPLE EXPOSED TO RADIATION EXPOSURE**

**O.G. Cherednichenko, E.G. Gubitskaya, A.L. Pilyugina**

*Institute of General Genetics and Cytology, Almaty, Kazakhstan*

The paper provides the results of study of the genetic effects of factors of stress signalization isolated from plasma of in vitro irradiated blood and blood of people occupationally exposed to radiation and the liquidators of the Chernobyl NPP. It is shown that the stress-signaling factors are not transmitted by direct contact between the cells, and they are introduced by them in the plasma or the culture medium. At the same time the extracellular DNA fragments extracted from irradiated blood may act as factors determining the abscopal effect. This is demonstrated by administration to the culture medium of intact lymphocytes of extracellular DNA isolated from plasma samples of the blood irradiated in vitro. In this case, in bystander lymphocytes development of the same reaction as in irradiated cells, i.e. increased frequency of chromosomal aberrations was observed. Moreover, the addition of extracellular DNA extracted from the blood plasma of people irradiated in vivo by virtue of their professional activities or Chernobyl liquidators to intact lymphocytes also increases their frequency of chromosomal aberrations in them, indicating the presence of “bystander” factors (stress-signaling) that persist in the blood for a long time after exposure in their plasma.

УДК 550.344

## ПОИСК ИСТОЧНИКОВ ИНФРАЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ ПО ДАННЫМ СТАНЦИЙ ИНСТИТУТА ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубровин В.И., Смирнов А.А.

*Институт геофизических исследований, г. Курчатов, Казахстан*

Приведены результаты использования нового программного обеспечения «Locinfra» в Центре сбора и обработки специальной сейсмической информации в г. Алматы, для совместной обработки данных трех инфразвуковых станций – Актюбинск IS31, Курчатов, Залесово-146.

### ВВЕДЕНИЕ

С марта 2005 года в ЦСОССИ на постоянной основе, ежедневно рассчитываются бюллетени инфразвуковых детектирований. Для составления бюллетеней используется информация станции IS31 Актюбинск. Эта станция установлена на северо-западе Казахстана, она была введена в эксплуатацию в 2001 г.

В декабре 2010 года была начата эксплуатация новой инфразвуковой группы в г. Курчатов на северо-востоке Казахстана. С мая 2011 года на постоянной основе составляются бюллетени инфразвуковых детектирований сигналов по всем поступающим от этой станции данным. Тем самым, уже в течение более двух лет данные двух казахстанских инфразвуковых групп обрабатываются независимо, но совместной обработки их нет. Наличие инфразвуковых бюллетеней детектирований по двум пунктам регистрации создает условия для локализации источников инфразвука, детектируемых казахстанскими группами IS31 и Курчатов.

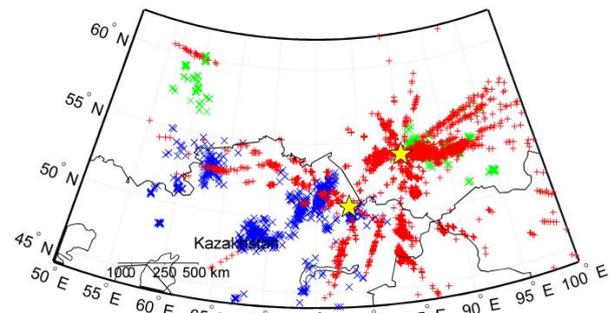
Отметим, что с марта 2012 года на постоянной основе в ЦСОССИ составляются бюллетени инфразвуковых детектирований по данным российской инфразвуковой станции IS46 Залесово, расположенной вблизи границы с Казахстаном на юге Западной Сибири. Данные этой инфразвуковой группы поступают в ЦСОССИ в режиме реального времени. Таким образом, имеются бюллетени по трем пунктам регистрации инфразвуковых событий. Резонно предположить, что в этих бюллетенях имеют место сигналы от единых событий, зарегистрированных двумя или тремя станциями. Задачей являлась разработка методов локализации таких источников по данным сети станций.

У инфразвуковых групп есть одно важное отличие от сейсмических. По данным одиночной сейсмической группы можно локализовать источник сигнала, определив азимут на источник по разности времен вступления на различных элементах группы и эпицентрального расстояние, например, по разности времен прихода различных фаз. По данным одиночной инфразвуковой группы также можно детектировать сигналы и определять их азимуты прихода. Однако, в силу сильной, быстрой и практически непредсказуемой изменчивости скоростной структуры

атмосферы по данным одиночной инфразвуковой группы нельзя определить эпицентрального расстояние. Для локализации эпицентра инфразвуковых сигналов необходимо как минимум две группы. При наличии двух и более групп азимут определяется по перекрестному пеленгу.

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПМО ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СЕТЕВОЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ ИСТОЧНИКОВ ИНФРАЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ И СОСТАВЛЕНИЯ ИНФРАЗВУКОВЫХ БЮЛЛЕТЕНЕЙ СОБЫТИЙ

Уже первые опыты перекрестного пеленга по бюллетеням станций IS46 и Курчатов показали, что решение задачи локализации эпицентров осложнено большим количеством ложных решений. Даже при соблюдении условия физической реализуемости эпицентра количество решений слишком велико (рисунок 1).



Эпицентры событий, локализованных по данным сейсмической сети, показаны синими крестиками, по данным российской сейсмической сети – зелеными крестиками, по данным инфразвуковых групп – красными крестиками. Желтыми звездами показаны инфразвуковые группы. Приведены только физически реализуемые эпицентры. Очевидно наличие большого количества ложных решений.

*Рисунок 1. Результаты перекрестного пеленга по бюллетеням станций IS46 и Курчатов*

О возможности локализации инфразвуковых источников, появившейся после пуска инфразвуковой группы Курчатов, было доложено на Конгрессе по инфразвуковым технологиям 2012 г. в Корее [1]. Национальный центр данных (НЦД) Франции предложил оказать помощь в решении задачи локализации в рамках Договора о научном сотрудничестве между Комиссариатом по атомной энергии Франции и Национальным ядерным центром Казахстана. После

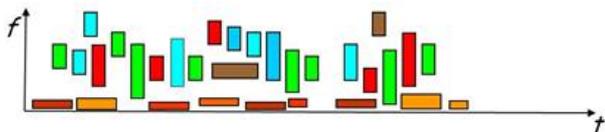
длительной подготовительной работы, прохождения стажировки специалистом из Казахстанского центра данных во Франции в конце 2013 г. в ЦСОССИ была передана адаптированная версия ПМО «Locinfra», используемого для локализации инфразвуковых событий во французском НЦД.

Методология обработки данных сети инфразвуковых станций описана в [2]. Весь процесс можно условно разделить на два основных этапа:

- 1) очистка бюллетеней детектирований от ложных решений;
- 2) прелокализация и перекрестный пеленг.

Целью первого этапа является уменьшение количества ложных решений. Задача решается последовательно в несколько этапов [3]. Первым делом, удаляются детектирования от местных источников. Затем объединяются в кластеры детектирования от одних и тех же источников и удаляются кластеры, соответствующие длительно действующим источникам.

Графически процесс представлен на рисунках 2 – 7. На рисунке 2 представлен бюллетень детектирований до процесса очистки.



По оси X отложено время прихода сигналов на станцию, по оси Y – средняя частота в семействах детектирований. Цветом на рисунке показана кажущаяся скорость детектирований от низкой – темно красной до высокой – фиолетовой

Рисунок 2. Бюллетень детектирований до процесса очистки.

На рисунке 3 показан тот же бюллетень, но после удаления всех детектирований, чья частота выше 1,5 Гц и кажущаяся скорость находится вне диапазона 0,32 км/с – 0,45 км/с. Таким образом, из бюллетеня удаляются детектирования от местных источников, которые не могут детектироваться другими станциями сети.

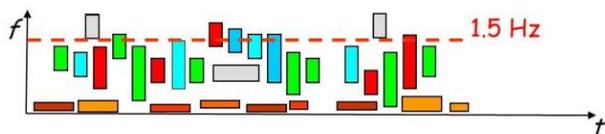


Рисунок 3. Бюллетень детектирований после удаления детектирований местных источников, чья частота выше 1,5 Гц и кажущаяся скорость находится вне диапазона 0,32 км/с – 0,45 км/с

Затем производится объединение в кластеры событий от одних и тех же источников. Сначала объединяются детектирования, имеющие близкие азимуты прихода. На рисунке 4 показан бюллетень после удаления всех детектирований, чей азимут прихода

отличается от среднего азимута в кластере более чем на  $10^\circ$ .

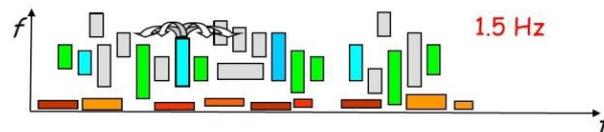


Рисунок 4. Бюллетень детектирований после удаления всех детектирований, чей азимут прихода отличается от среднего азимута в кластере более чем на  $10^\circ$

Затем удаляются детектирования, имеющие существенно отличающуюся частоту. На рисунке 5 показан бюллетень после удаления всех детектирований, чья частота отличается от средней в кластере более чем на 1 Гц.

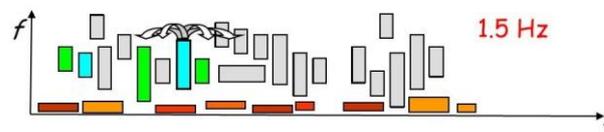


Рисунок 5. Бюллетень детектирований после удаления всех детектирований, чья частота отличается от средней в кластере более чем на 1 Гц

На рисунке 6 лиловыми рамками обведены детектирования двух кластеров, выделенных в результате вышеописанной фильтрации.

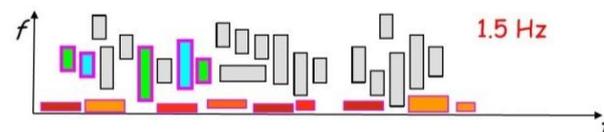
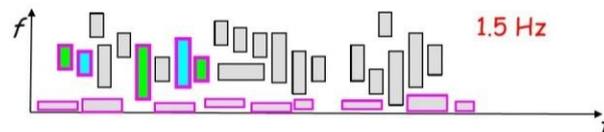


Рисунок 6. Результат объединения детектирований в кластеры. Детектирования двух кластеров обведены лиловыми рамками

На последнем этапе проверяется общая длительность полученных кластеров. Если она превышает 1800 с, такие кластеры исключаются, т.к. они соответствуют длительно действующим источникам. На рисунке 7 показан один оставшийся кластер из двух ранее выделенных. Удаленный кластер имел большую длительность, это детектирования микробаром.



Удалены детектирования микробаром. Детектирования кластера, который будет использован в локализации, выделены цветной заливкой

Рисунок 7. Результат удаления кластера, имеющего большую длительность

### РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА СИГНАЛОВ С ПОМОЩЬЮ ПМО «LOCINFRA»

Ниже приведен пример применения процедуры очистки бюллетеней на данных станции IS31 Актюбинск. На рисунке 8 показан недельный бюллетень детектирования станции. Всего сделано 4744 детектирования, в среднем 28 в час.

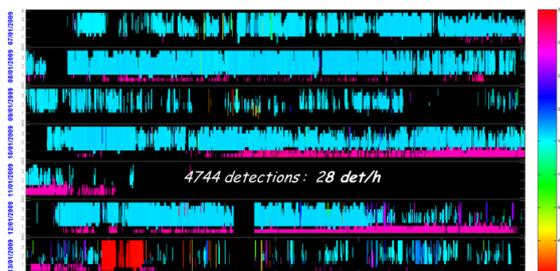


Рисунок 8. Типичный недельный бюллетень детектирования станции IS31 Актюбинск. Всего сделано 4744 детектирования, в среднем 28 в час

На рисунке 9 показаны два кластера детектирования, отсеянных процедурой очистки из-за высокой частоты и превышения пороговой длительности. Это детектирование сигналов от факелов месторождения Жанажол. Всего отфильтровано 2663 таких детектирования, что составляет 56% от общего количества.

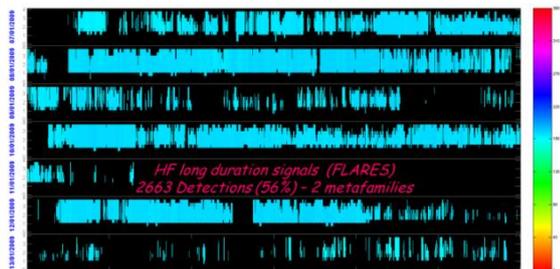


Рисунок 9. Детектирование сигналов от факелов месторождения Жанажол

На рисунке 10 показаны 10 кластеров детектирования, отсеянных процедурой очистки из-за превышения пороговой длительности. Это детектирование микробаром. Всего отфильтровано 1761 таких детектирования, что составляет 37% от общего количества.

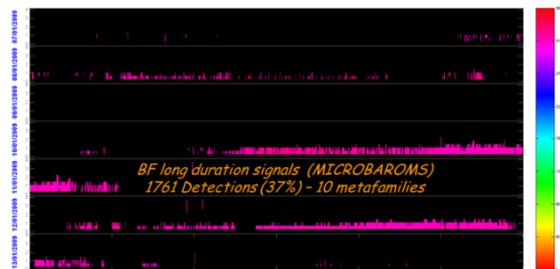


Рисунок 10. Детектирование микробаром. Детектирование отсеяно процедурой очистки из-за превышения пороговой длительности

В итоге в дальнейшую обработку поступает гораздо меньшее количество детектирования. На рисунке 11 показаны 68 кластеров детектирования (метасемейств), прошедших процедуру очистки бюллетеней. В результате осталось менее одного метасемейства в час.

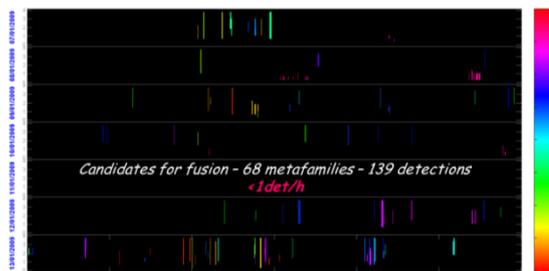


Рисунок 11. 168 метасемейств прошедших процедуру очистки бюллетеней. Итоговая плотность детектирования менее 1 кластера в час

Следующим этапом обработки являются прелокализация и перекрестный пеленг. На этом этапе принимаются некоторые допущения: точечный источник может генерировать только одно метасемейство для каждой станции, атмосфера однородна, фазовая скорость в ней равна 0,3 км/с и отклонений азимута нет. Сначала производится перекрестный пеленг для всех возможных пар баказимутов (рисунок 12).

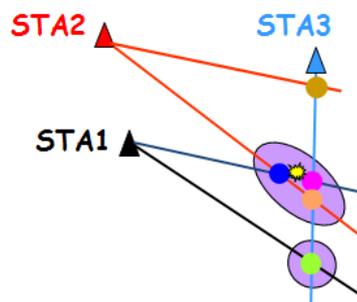


Рисунок 12. Схема перекрестного пеленга и прелокализации

Затем для каждого полученного решения рассчитываются оценочные показатели  $S_{geo}(t_i, \beta_i)$  и  $S_{sig}(f, Arms)$  по формулам (1) и (2): соответственно. После этого оставляются только те решения, оценочные показатели для которых не превышают некоторого порогового значения  $S_{thresold}$ . Затем группируются «соседние решения». Затем производится выбор оптимального решения. Основными критериями выбора являются количество станций, использованных для решения и оба оценочных показателя  $S_{geo}(t_i, \beta_i)$  и  $S_{sig}(f, Arms)$ .

$$S_{geo} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left| \frac{dk_j - CEL}{f_j - t_0} \right| \quad (1)$$

$$S_{sig} = \sqrt{(\sigma_{frq} \cdot \alpha_{frq})^2 + (\sigma_{rms} \cdot \alpha_{rms})^2} \quad (2)$$

Прелокализация выполняется методом итеративной среднеквадратичной инверсии, для инверсии используются те же допущения – фазовая скорость равна 0,3 км/с и отклонений азимута нет.

Начиная с середины марта 2014 г. бюллетени инфразвуковых событий рассчитываются на регулярной основе. Данные инфразвуковых групп IS31 Актюбинск и Курчатова в режиме реального времени поступают в КИЦД. Расчет бюллетеней детектированных для двух станций производится в автоматическом режиме. Затем в интерактивном режиме рассчитываются бюллетени инфразвуковых событий. В ближайшее время эта стадия процесса также будет автоматизирована.

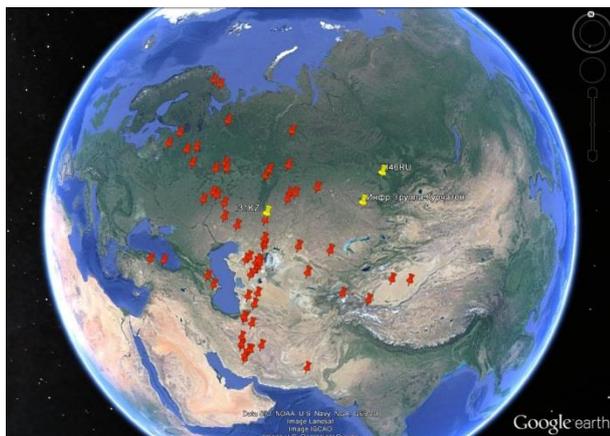
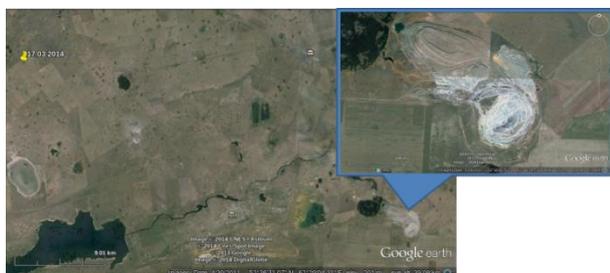


Рисунок 13. Карта размещения эпицентров источников инфразвука, локализованных по данным станций ИГИ за месяц наблюдений. Желтыми значками указаны инфразвуковые группы, красными – локализованные эпицентры

За период с 15 марта по 8 апреля были локализованы 29 эпицентров источников инфразвука. Карта размещения эпицентров представлена на рисунке 13. Желтыми значками указаны инфразвуковые группы, красными – локализованные эпицентры. Размер области, «видимой станциями» очень велик, от Кольского полуострова на севере до Ирана на юге.



Эпицентр показан желтым значком. На выноске увеличенная спутниковая фотография карьера.

Рисунок 14. Эпицентр карьерного взрыва 17 марта 2014 г. на снимках GoogleEarth



Сигналы детектированы 20 и 21 марта 2014 г. Эпицентры показаны желтыми значками. На выноске увеличенная спутниковая фотография факелов сжигания попутного газа.

Рисунок 15. Результаты локализации источников инфразвука на месторождении Жанажол

Природу некоторых событий из числа локализованных можно легко определить, например, это карьерные взрывы (рисунок 14), землетрясения, эпицентры событий 29 и 30 марта, 1 и 2 апреля на территории Ирана и газовые факелы (рисунок 15). Для ряда других событий природа будет определена в ходе будущих исследований.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, поступившее в распоряжение ЦСОССИ ПМО «Locinfra» отвечает требованиям задачи и может использоваться для локализации источников инфразвуковых событий по данным сети инфразвуковых станций. Процедура очистки бюллетеней позволяет отфильтровать детектирования сигналов от таких источников, которые априори не могут быть зарегистрированы более чем одной станцией. Это позволяет успешно решать задачу локализации по данным сети инфразвуковых станций. Более того, очищенные бюллетени можно использовать при локализации посредством двух технологий – сейсмической и инфразвуковой. Входными данными для ПМО являются РМСС бюллетени, расчет таких бюллетеней уже налажен в ЦСОССИ. Организован расчет на постоянной основе бюллетеня инфразвуковых событий по данным станций IS31 Актюбинск и Курчатова. Уже первый месяц наблюдений показал, что по данным казахстанских инфразвуковых станций можно регистрировать источники инфразвука от севера до юга Евразии. Природу некоторых источников можно легко определить. Для ряда других событий природа является объектом будущих исследований.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Smirnov A., Dubrovin V. First results of detection and location of infrasound events in Central Eurasia using data of IS46 Zalesovo station along with data from the new Kurchatov infrasound array in the northeast Kazakhstan in Infrasound Technology Workshop 2012, KIGAM, Yuseong-gu, Dajeon, Republic of Korea.
2. Le Pichon A., Vergoz J., Blanc E., Guilbert J., Ceranna L., Evers L., and Brachet N. (2009), Assessing the performance of the International Monitoring System's infrasound network: Geographical coverage and temporal variabilities, J. Geophys. Res., 114, D08112, doi:10.1029/2008JD010907.
3. Nicolas Brachet, Pierrick Mialle, David Brown and John Coyne, Preparing the Return of Infrasound Data Processing into IDC Operations, in Infrasound Technology Workshop 2006, in Bermuda 3-7 November 2008.

#### ГЕОФИЗИКАЛЫҚ ЗЕРТТЕУЛЕР ИНСТИТУТЫ СТАНЦИЯЛАРЫНЫҢ ДЕРЕКТЕРІ БОЙЫНША ИНФРАДЫБЫСТЫҚ СИГНАЛДАРДЫҢ КӨЗДЕРІН ІЗДЕУ

Дубровин В.И., Смирнов А.А.

*Қазақстан, Курчатов қ., Геофизикалық зерттеулер институты*

Үш инфрадыбстық станциялардың – Ақтөбе IS31, Курчатов, Залесово-I46 – деректерін бірлесітіріп өңдеу үшін Арнаулы сейсмикалық апаратын жинау және өңдеу орталығында (Алматы қ.) жаңа “Locinfra” программалық жасауын пайдалану нәтижелері келтірілген.

#### SEARCH FOR INFRASOUND SIGNAL SOURCES BASED ON THE INSTITUTE OF GEOPHYSICAL RESEARCH STATIONS DATA

V.I. Dubrovin, A.A. Smirnov

*Institute of Geophysical Research, Kurchatov, Kazakhstan*

The paper presents the results of a new “Locinfra” software use in the Center for Acquisition and Processing of Special and Seismic Information in Almaty city for a joint data processing of three infrasound arrays – Aktyubinsk IS31, Kurchatov, Zalesovo-I46.

УДК 556.3:621.039.9

**ВЗАИМОСВЯЗЬ СОДЕРЖАНИЙ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ  
В ТВЕРДОЙ И ЖИДКОЙ ФАЗАХ ЛИТОСФЕРЫ**

Зеленский К.Л., Романов А.М.

*Институт геофизических исследований, г. Курчатов, Казахстан*

Приведены результаты оценки соответствия соотношений содержаний химических элементов в твердой и жидкой фазах по материалам исследований на территории СИП. Установлено отсутствие зависимости нахождения химических соединений в природных водах от произведения растворимости на содержания химических элементов в горных породах, что указывает на отсутствие связи межфазного перехода веществ с растворимостью, а также на наличие другого физического фактора, перераспределяющего вещества между горными породами и потоками вод.

**ВВЕДЕНИЕ**

Вода, присутствующая в твердой фазе (горных породах), воздействует на слагающие их минералы. При этом происходит межфазный переход веществ.

Литосфера состоит из трех фаз: твердой, жидкой, газообразной. В процессе геологического развития они взаимодействуют друг с другом. В данной работе основное внимание уделяется взаимодействию твердой и жидкой фаз.

Твердая фаза (горные породы) представлена минеральными агрегатами, имеющими кристаллическую или аморфную структуру. Жидкая фаза представлена водой и содержащимися в ней растворенными и диспергированными веществами.

Перераспределение химических элементов между твердой и жидкой фазами геологической среды зависит от совместного действия множества факторов. Многообразие факторов, а также неизвестность их сравнительной значимости в ряде случаев, осложняет представление о реальном взаимодействии твердой и жидкой фаз. Поэтому ставится задача – выделение фактора, оказывающего определяющее влияние на перераспределение веществ между твердой и жидкой фазами в геологических средах.

**ВЗАИМОСВЯЗЬ СОДЕРЖАНИЙ ХИМИЧЕСКИХ  
ЭЛЕМЕНТОВ КОНТАКТИРУЮЩИХ ТВЕРДОЙ И  
ЖИДКОЙ ФАЗ**

Обычно принимается, что факторами, оказывающими преимущественное влияние на межфазное перераспределение веществ, являются:

- растворимость химических соединений твердой и жидкой фаз;
- различие содержаний химических элементов и их соединений в твердой и в жидкой фазах.

Оба фактора однонаправлены – при отсутствии внешних воздействий способствуют рассеиванию химических элементов.

В ряде случаев отмечается явное соответствие содержаний химических компонентов твердой и жидкой фаз. Так, например:

- воды, омывающие месторождения галита, характеризуются высокими содержаниями  $\text{Na}^+$  и  $\text{Cl}^-$ ;

- воды в массивах известняков содержат повышенные количества  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{HCO}_3^-$ ;

- в пределах рудных зон сульфидных месторождений воды часто характеризуются повышенными и высокими содержаниями  $\text{SO}_4^{2-}$  и катионов рудных минералов.

Но в подавляющем большинстве случаев это соответствие нарушается. Так, например:

А) Согласно А.П. Виноградову базальты содержат 6.72%  $\text{Ca}^{2+}$ , диориты и андезиты – 4.65 %, граниты и гранодиориты – 1.58%, осадочные породы – 2.53% [3]. По данным гидрогеохимических исследований подземным водам, омывающим эти породы, свойственны обратные соотношения распределения содержаний кальция [12]. Для натрия и калия связь между их содержаниями в минералах горных пород и водах не проявлена.

Б) Непосредственным сопоставлением содержания натрия с хлором в горных породах и в подземных водах (за исключением участков месторождений солей) установлено:

- в горных породах содержания  $\text{Na}^+$  малы по сравнению с содержаниями кремния, железа и ряда других элементов [3]. Также малы содержания  $\text{Cl}^-$  относительно таких элементов-анионов как фтор, сера;

- в природных водах наоборот –  $\text{Na}^+$  и  $\text{Cl}^-$  преобладают на фоне других элементов.

Преобладание содержаний  $\text{Na}^+$  и  $\text{Cl}^-$  на фоне других элементов в природных водах, при относительно низких содержаниях этих элементов в горных породах, является наиболее часто встречающейся особенностью геосферы.

Оба примера (А и Б) характерны для всей зоны гипергенеза. Предположение о случайности несоответствий содержаний химических элементов в горных породах и омывающих их водах, отрицается глобальностью проявления.

Таким образом, в общем случае связь содержания химических компонентов горных пород и концентрации соответствующих ионов в подземных водах не проявлена.

Таблица 1. Кинетика перехода в водный раствор калий- и натрийсодержащих полевых шпатов различных горных пород [5]

Порода	Минералы	Содержание минералов в породе	Скорость растворения г/(см <sup>3</sup> ·с)
Гранит	Плагиоклазы (Na)	35,3	$0.64 \cdot 10^{-12}$
	Микроклин (K)	26,8	$0.48 \cdot 10^{-12}$
Порфирит	Плагиоклазы (Na)	49,0	$1.32 \cdot 10^{-12}$
	Микроклин (K)	2,0	$1.28 \cdot 10^{-12}$

В) Различие содержаний натрия и калия в природных водах.

Известно, что соединения калия и натрия с хлором характеризуются близкими свойствами, в том числе растворимостью. Также близки средние содержания калия и натрия в горных породах. В зоне выветривания разрушаются и калиевые и натриевые минералы. Интенсивности разрушения главных породообразующих натрий- и калий- содержащих минералов (плагиоклазов и микроклина, соответственно) – практически одинаковы (таблица 1).

Несмотря на это, содержание калия в подземных водах на порядок меньше, чем натрия [3].

Данная особенность в зоне гипергенеза проявляется практически повсеместно. Т.е. близкие по химическим и физическим свойствам элементы, а также их соединения в реальных геологических условиях ведут себя существенно различно при переходе из твердой фазы в жидкую.

#### **ВЛИЯНИЕ РАСТВОРИМОСТИ ХИМИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ ЖИДКОЙ ФАЗЫ НА ИХ КОНЦЕНТРАЦИИ В ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ**

Проверено предположение о том, что элементы, образующие наиболее растворимые соединения, должны характеризоваться наибольшими концентрациями в водах. Непосредственное сопоставление средних содержаний различных компонентов природных вод с данными по их растворимости показывает, что предположение об определяющем влиянии растворимости соединений, на содержания элементов, находящихся в природных водах, не отвечает действительности. Так, например:

– NaCl является одним из самых распространенных соединений в природных водах;

– в подавляющем большинстве случаев концентрация NaCl наибольшая среди остальных компонентов природных вод;

– в то же время растворимость NaCl заметно меньше растворимости других соединений, содержащихся в природных водах.

Известно, что в подавляющем большинстве случаев взаимодействие горных пород и вод не приводит к непосредственному переходу многокомпонентных породообразующих минералов в раствор. В результате воздействия воды часть компонентов остается в твердой фазе (формируя при этом новые минералы) и только небольшая часть переходит в раствор. Примером этого служат реакции гиббситизации полевых шпатов.

Главной причиной частичного перехода веществ в раствор является низкая вероятность прохождения химических реакций одновременно между тремя (а тем более четырьмя, пятью и более) химическими элементами по сравнению с вероятностью прохождения реакции между двумя элементами [2].

Подобное селективное извлечение части химических компонентов определяется как выщелачивание и не может относиться к общей характеристике – растворению веществ.

Таким образом, растворимость и концентрация соединений по отдельности не являются факторами, определяющими в общем случае взаимное перераспределение химических элементов между горными породами и подземными водами.

Тем не менее, зависимость минерализации вод от контакта с горными породами существует:

– наименьшими концентрациями растворенных веществ среди природных вод характеризуются атмосферные осадки [3, 6, 12];

– в водах поверхностных водоемов, образованных за счет выпадения осадков, количество растворенных веществ повышено;

– еще больше растворенных веществ в грунтовых водах;

– повышенные и высокие содержания растворенных веществ характерны для вод глубоких горизонтов массивов изверженных и метаморфических пород.

#### **СОВМЕСТНОЕ ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИЙ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ТВЕРДОЙ ФАЗЫ И РАСТВОРИМОСТИ ИХ СОЕДИНЕНИЙ НА СОДЕРЖАНИЕ КОМПОНЕНТОВ В ЖИДКОЙ ФАЗЕ**

В предыдущих разделах показано, что растворимость и концентрация соединений по отдельности не являются факторами, определяющими в общем случае взаимное перераспределение химических элементов между горными породами и подземными водами.

На основе данных по распространенности элементов в земной коре (в т.ч. по каждому виду пород отдельно), а также растворимости их соединений, составлена комплексная характеристика возможности нахождения этих соединений в подземных водах. Она представлена произведением средних процентных содержаний элементов в горных породах (или вероятностей нахождения в твердой фазе) на растворимость соединений этих элементов в воде

(или сравнительная возможность накопления в жидкой фазе).

Результаты определения комплексной характеристики сортированы по убыванию значений и сведены в таблицу 2.

Общим для таблицы 2, независимо от вида пород, является наибольшая вероятность нахождения в растворах силикатов калия и натрия, а наименьшая – иодида серебра. Вероятность нахождения NaCl в природных растворах – примерно на 50 месте.

**Резкое отличие распределений комплексной характеристики от распределений химических соединений в природных водах свидетельствует о том, что совместное влияние растворимости и содержаний химических элементов в горных породах также нельзя использовать в качестве основного фактора для объяснения перераспределения химических элементов между горными породами и подземными водами.**

Таблица 2. Сопоставление возможностей нахождения соединений химических элементов в растворах для различных пород (фрагмент таблицы)

В осадочных породах		В кислых породах	
Соединение	Произведение растворимости на распространенность	Соединение	Произведение растворимости на распространенность
K <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	5.0·10 <sup>-1</sup>	K <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	5.9·10 <sup>-1</sup>
Fe(SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> ·9H <sub>2</sub> O	2.3·10 <sup>-2</sup>	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	8.5·10 <sup>-2</sup>
Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	2.1·10 <sup>-2</sup>	CrO <sub>3</sub>	6.5·10 <sup>-3</sup>
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	1.5·10 <sup>-2</sup>	Fe(SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> ·9H <sub>2</sub> O	4.5·10 <sup>-3</sup>
CrO <sub>3</sub>	9.0·10 <sup>-3</sup>	CaCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	2.7·10 <sup>-3</sup>
K <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> ·2H <sub>2</sub> O	4.8·10 <sup>-3</sup>	Ca(OH) <sub>2</sub>	2.3·10 <sup>-3</sup>
KHCO <sub>3</sub>	2.7·10 <sup>-3</sup>	KF	1.6·10 <sup>-3</sup>
Ba(OH) <sub>2</sub> ·8H <sub>2</sub> O	2.4·10 <sup>-3</sup>	FeCl <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	1.2·10 <sup>-3</sup>
CsOH	2.4·10 <sup>-3</sup>	NaH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	1.2·10 <sup>-3</sup>
CaCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	2.2·10 <sup>-3</sup>	NaMnO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	1.0·10 <sup>-3</sup>
KNO <sub>2</sub>	2.2·10 <sup>-3</sup>	FeCl <sub>3</sub> ·6H <sub>2</sub> O	7.2·10 <sup>-4</sup>
Ca(OH) <sub>2</sub>	2.1·10 <sup>-3</sup>	K <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> ·2H <sub>2</sub> O	7.0·10 <sup>-4</sup>
KHSO <sub>4</sub>	1.9·10 <sup>-3</sup>	CsOH	6.7·10 <sup>-4</sup>
NaNO <sub>2</sub>	1.8·10 <sup>-3</sup>	MgCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	5.5·10 <sup>-4</sup>
NaNO <sub>3</sub>	1.8·10 <sup>-3</sup>	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·5H <sub>2</sub> O	4.4·10 <sup>-4</sup>
K <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1.6·10 <sup>-3</sup>	NaClO <sub>3</sub>	4.2·10 <sup>-4</sup>
MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	1.5·10 <sup>-3</sup>	NaSiF <sub>6</sub>	3.1·10 <sup>-4</sup>
FeSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	1.4·10 <sup>-3</sup>	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	3.0·10 <sup>-4</sup>
KF	1.1·10 <sup>-3</sup>	MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	3.0·10 <sup>-4</sup>
Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	1.0·10 <sup>-3</sup>	KHSO <sub>4</sub>	2.8·10 <sup>-4</sup>
Mn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	9.2·10 <sup>-4</sup>	Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> ·12H <sub>2</sub> O	2.8·10 <sup>-4</sup>
Fe(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> ·9H <sub>2</sub> O	8.7·10 <sup>-4</sup>	FeSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	2.7·10 <sup>-4</sup>
FeCl <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	8.4·10 <sup>-4</sup>	KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	2.7·10 <sup>-4</sup>
Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·5H <sub>2</sub> O	8.3·10 <sup>-4</sup>	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2.5·10 <sup>-4</sup>
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	7.7·10 <sup>-4</sup>	K <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2.4·10 <sup>-4</sup>
FeCl <sub>3</sub> ·6H <sub>2</sub> O	4.8·10 <sup>-4</sup>	Na <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> ·2H <sub>2</sub> O	2.3·10 <sup>-4</sup>
Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	4.8·10 <sup>-4</sup>	NaPO <sub>3</sub>	2.3·10 <sup>-4</sup>
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	4.0·10 <sup>-4</sup>	Na <sub>2</sub> S	2.2·10 <sup>-4</sup>
Na <sub>2</sub> S	3.8·10 <sup>-4</sup>	Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> ·7H <sub>2</sub> O	1.8·10 <sup>-4</sup>
MgCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	3.5·10 <sup>-4</sup>	Ba(OH) <sub>2</sub> ·8H <sub>2</sub> O	1.7·10 <sup>-4</sup>
Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> ·7H <sub>2</sub> O	3.5·10 <sup>-4</sup>	Mg(ClO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	1.6·10 <sup>-4</sup>
NaHCO <sub>3</sub>	3.4·10 <sup>-4</sup>	NaHSO <sub>4</sub>	1.6·10 <sup>-4</sup>
NaHSO <sub>4</sub>	3.0·10 <sup>-4</sup>	NaCl	1.5·10 <sup>-4</sup>
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	2.9·10 <sup>-4</sup>	KCl	1.4·10 <sup>-4</sup>
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	2.3·10 <sup>-4</sup>	KNO <sub>2</sub>	9.7·10 <sup>-5</sup>
KNO <sub>3</sub>	2.3·10 <sup>-4</sup>	Na <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub> ·10H <sub>2</sub> O	8.6·10 <sup>-5</sup>
As <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2.1·10 <sup>-4</sup>	KmnO <sub>4</sub>	7.5·10 <sup>-5</sup>
NaMnO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	2.0·10 <sup>-4</sup>	NaF	6.9·10 <sup>-5</sup>
K <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>8</sub>	1.9·10 <sup>-4</sup>	Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> ·12H <sub>2</sub> O	6.9·10 <sup>-5</sup>
MnSO <sub>4</sub> ·5H <sub>2</sub> O	1.3·10 <sup>-4</sup>	Na <sub>4</sub> P <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	6.8·10 <sup>-5</sup>
KCl	1.2·10 <sup>-4</sup>	K <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub>	6.1·10 <sup>-5</sup>
Na <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> ·2H <sub>2</sub> O	8.3·10 <sup>-5</sup>	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	6.1·10 <sup>-5</sup>
K <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub>	7.6·10 <sup>-5</sup>	KHCO <sub>3</sub>	5.9·10 <sup>-5</sup>
Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> ·12H <sub>2</sub> O	7.0·10 <sup>-5</sup>	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	5.9·10 <sup>-5</sup>
NaPO <sub>3</sub>	5.6·10 <sup>-5</sup>	As <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	4.7·10 <sup>-5</sup>
KmnO <sub>4</sub>	5.2·10 <sup>-5</sup>	Zr(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	4.1·10 <sup>-5</sup>
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ·10H <sub>2</sub> O	5.2·10 <sup>-5</sup>	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ·10H <sub>2</sub> O	2.8·10 <sup>-5</sup>
NaCl	3.8·10 <sup>-5</sup>	MnSO <sub>4</sub> ·5H <sub>2</sub> O	2.7·10 <sup>-5</sup>
Zr(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	3.5·10 <sup>-5</sup>	NaHCO <sub>3</sub>	2.6·10 <sup>-5</sup>
И т.д.		И т.д.	



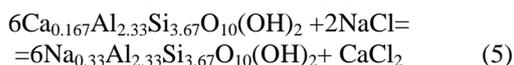
Концентрации анионов характеризуются резким увеличением значений – 50% ( $\text{SO}_4^{2-}$ ). То есть, наблюдается явное несоответствие распределений химических элементов в горных породах и водах.

Отсюда следует вывод о селективности извлечения части химических компонентов горных пород. Она определяет процесс выщелачивания и не может относиться к общей характеристике – растворению веществ.

#### ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОРОД С ФИЛЬТРУЮЩИМИСЯ ВОДАМИ

Одним из наиболее интересных примеров является результат лабораторного опыта, приведенный Перельманом А.И. [9]: «Если промывать водой на воронке незасоленную глину раствором NaCl, то количество хлора в фильтрате почти не изменится, а содержание натрия уменьшится, появятся кальций и магний в количестве, эквивалентном исчезнувшему натрию. Следовательно, глина поглотила натрий и взамен выделила в раствор эквивалентное количество кальция и магния».

Реакция обмена представляется формулой:



Свободная энергия данной реакции составляет:

$$6 \cdot 1279.24 + 2 \cdot 91.89 - 6 \cdot 1277.76 - 179.30 = +13.36 \text{ (ккал/моль)}.$$

Значение свободной энергии указывает на невозможность самопроизвольного протекания приведенной реакции. Тем не менее, согласно эксперименту, данный процесс все же происходит.

Обращается внимание на общую черту реакций 1, 2 и 5: согласно значениям свободной энергии Гиббса они не должны происходить.

Единственным объяснением может быть наличие фактора, влияющего на энергетический баланс реакции и обуславливающего их протекание.

Наличие такого фактора проявлено и в эксперименте, выполненном на отдельных образцах горных пород [10]. Согласно его результатам породы, промытые дистиллированной водой, при прочих равных условиях характеризуются следующим образом:

- свободные воды имеют  $\text{pH}=7$ ;
- связанные –  $\text{pH}=3.6$ .

Т.е. по мере перехода от зоны свободного движения к неподвижной части раствора происходит понижение  $\text{pH}$ .

Данное изменение  $\text{pH}$  воды по мере перехода от свободного состояния к связанному, не обусловлено ни химическим составом промывочной воды (дистиллят) – ни химическим составом твердой фазы (породообразующие минералы при растворении не дают кислот, обеспечивающих понижение  $\text{pH}$  до 3.6).

Тем самым устанавливается возможность существования фактора, влияющего на характеристики растворов и не связанного непосредственно с глав-

ными химическими компонентами природных вод и пород.

Ранее было показано, что растворимость твердой фазы не играет определяющей роли в распределении концентраций химических элементов в водах, омывающих горные породы. Давление и температура воды, гравитационное и магнитное поля, радиационное излучение в рассматриваемых объектах существенно не различаются. Следовательно, они также не могут быть использованы при установлении искомого фактора.

Зато в случаях 1, 2 и 5 обязательным агентом является вода. Причем вода движущаяся. Общеизвестен факт резкого ускорения перехода веществ из твердой фазы в жидкую при перемешивании растворов. Поэтому, в результате перебора возможных факторов основное внимание сосредоточено на скорости движения вод относительно твердой фазы.

#### УСТАНОВЛЕНИЕ СПОСОБА ВОЗДЕЙСТВИЯ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ВОД НА ИХ ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ

Скорость движения является механической характеристикой перемещения сред относительно друг друга. Сама по себе она не может влиять на протекание химических реакций. Зато проникновение вод в твердую фазу обуславливает наличие двойного электрического слоя на контакте твердой и жидкой фаз [1].

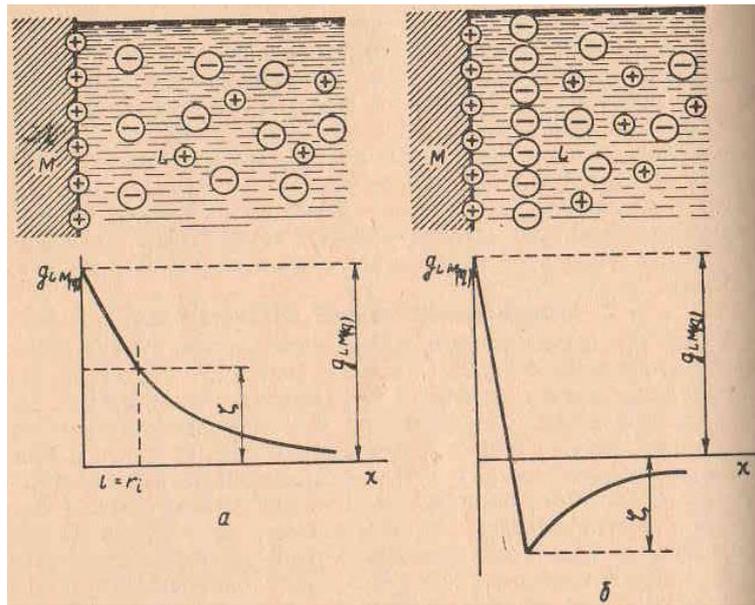
При движении вод происходит деформация двойного электрического слоя на границе раздела твердой и жидкой фаз горных пород. Чем больше скорость движения жидкой фазы относительно твердой, тем больше деформация.

Величина деформации выражается в напряженности электрического поля ( $E$ ), возникающего при фильтрации раствора с удельной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$  и удельным электрическим сопротивлением  $\rho$  через капилляр радиусом  $r_0$ , выражается известной формулой согласно Фридрихсбергу Д.А. [11]:

$$E = \frac{2 \cdot \epsilon \cdot \rho v}{\pi \cdot r_0} \cdot \xi$$

где  $\xi$  – дзета-потенциал двойного электрического слоя,  $v$  – скорость движения раствора,  $E$  – напряженность электрического поля,  $r_0$  – радиус капилляра,  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление жидкости,  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость раствора.

Данная формула определяет образование электрического поля, как следствие движения жидкой фазы относительно твердой. Она устанавливает прямую зависимость уровня электрического поля от скорости движения вод и обратную от мощности слоя воды. Напряженность также определяется значением дзета-потенциала двойного электрического слоя – характеристики, не имеющей должного физического обоснования.



Молекулярная картина (наверху) и изменение потенциала с расстоянием (внизу) для растворов поверхностно-инактивных веществ (а) и растворов, содержащих поверхностно-активные анионы (б)

Рисунок 3. Схема двойного электрического слоя

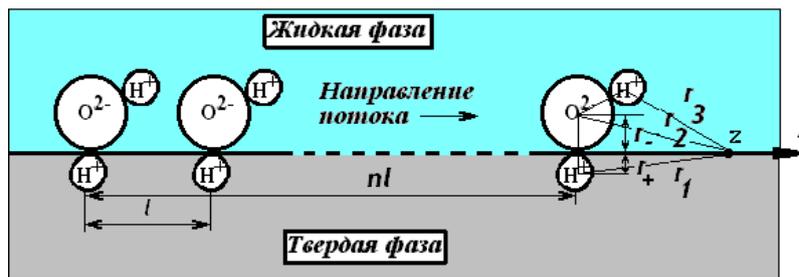


Рисунок 4. Схема двойного электрического слоя согласно Романову А.М.

Причина отсутствия обоснования рассмотрена на схемах двойного электрического слоя (Гюи-Чапмена и Штерна на рисунке 3).

Схемы совершенно не объясняют причины перераспределения ионов между твердой и жидкой фазами. Объяснение поступления ионов в твердую фазу за счет воздействия сил некулоновского происхождения. Утверждение о концентрации отрицательных ионов в жидкой фазе двойного слоя, имеющего мощность на несколько порядков превышающую размеры ионов, противоречит закону электронейтральности. Математические представления этих моделей – сомнительны.

Модель, использованная в данной работе (рисунок 4), представляет взаимодействие твердой и жидкой фаз в численном выражении и строго соблюдает закон электронейтральности.

Уравнение схемы (7) определяет значение потенциала двойного электрического слоя на краю плоскости с гидроксил ионами, ориентированными в одном направлении [11]. Причина ориентировки – течение вод относительно твердой фазы.

Единая ориентировка диполей гидроксил-ионов приводит к формированию тангенциальной составляющей электрического поля

$$\begin{aligned}
 U = q / 4\pi\epsilon\epsilon_0 \left\{ 2 \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ 1 / \sqrt{(nl)^2 + (ml)^2 + r_{H^+}^2} + \right. \right. \\
 \left. \left. + 1 / \sqrt{[nl - (r_{H^+} + r) \cdot \cos 14,3^\circ]^2 + (ml)^2 + [(r_{H^+} + r) \cdot \sin 14,3^\circ]^2} - 2 / \sqrt{(nl)^2 + (ml)^2 + r^2} \right\} + \right. \\
 \left. + \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ 1 / \sqrt{(nl)^2 + r_{H^+}^2} + 1 / \sqrt{[nl - (r_{H^+} + r) \cdot \cos 14,3^\circ]^2 + [(r_{H^+} + r) \cdot \sin 14,3^\circ]^2} - 2 / \sqrt{(nl)^2 + r^2} \right\} \right\}. \quad (7)
 \end{aligned}$$

При этом значения поля потенциала течения, определенные расчетным и экспериментальным способами, достигает нескольких сотен милливольт. Такой уровень оказывает существенное воздействие на протекание химических реакций. Именно на основе воздействия электрического поля возможно непротиворечивое объяснение селективности межфазного перехода веществ. Только с его помощью можно последовательно объяснить особенности в содержаниях химических компонентов вод на территории СИП.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Растворимость не играет определяющей роли в межфазном перераспределении химических элемен-

тов в горных породах. Обязательным агентом перераспределения веществ является движущая вода. Она формирует электрическое поле при движении относительно горных пород и представляет одну из главных причин межфазного перехода веществ в геологических средах.

Предполагается данную особенность использовать при интерпретации гидрогеохимических и радиогидрогеохимических исследованиях на территории Семипалатинского испытательного полигона. При этом целью исследований будет выявление участков выщелачивания, миграции и осаждения на основе геофизических методов – преимущественно метода естественного электрического поля.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Антропов, Л.И. Теоретическая электрохимия / Л.И. Антропов // М.: «Высшая школа», 1969. – 509 с.
2. Бокий, Г.Б. Кристаллохимия / Г.Б. Бокий // М.: Наука, 1971. – 400 с.
3. Войткевич, Г.В. Краткий справочник по геохимии / Г.В. Войткевич, А.Е., Мирошников, А.С. Поваренных, В.Г. Прохоров // М.: Недра, 1970. – 278 с.
4. Глинка, Н.Л. Общая химия / Н.Л. Глинка // Л.: изд. Химия, 1981. – 719 с.
5. Загузин, В.П. Временные колебания содержаний W, Mo, Au в водных потоках рассеяния / В.П. Загузин, А.М. Плюснин, Е.Ф. Погребняк // Геохимия, 1981. – № 9 – С. 107-114.
6. Зверев, В.П. Гидрогеохимия осадочного процесса / В.П. Зверев // М.: Наука, 1993. – 171 с.
7. Киргинцев, А.Н. Растворимость неорганических веществ в воде / А.Н. Киргинцев, Л.И. Трушникова, В.Г. Лаврентьева // Л.: Химия, 1972. – 244 с.
8. Киреев, В.А. Методы практических расчетов в термодинамике химических реакций / В.А. Киреев // М.: Химия, 1975. – 535 с.
9. Перельман, А.И. Геохимия / А.И. Перельман // М.: Высшая школа, 1979. – 422 с.
10. Ржевский, В.В. Основы физики пород / В.В. Ржевский, Г.Я. Новик // М.: Недра, 1973. – 286 с.
11. Романов, А.М. Взаимодействие вод с горными породами / А.М. Романов // Алматы, 2003. – С. 7 – 51.
12. Шварцев, С.Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза / С.Л. Шварцев // М.: Недра, 1978. – 422 с.

### ЛИТОСФЕРАНЫҢ ҚАТТЫ ЖӘНЕ СҰЙЫҚ ФАЗАЛАРЫНДА ХИМИЯЛЫҚ ЭЛЕМЕНТТЕР МӨЛШЕРЛЕРІНІҢ ӨЗАРА БАЙЛАНЫСЫ

Зеленский К.Л., Романов А.М.

*Қазақстан, Курчатов қ., Геофизикалық зерттеулер институты*

ССП аумағындағы зерттеулердің материалдары бойынша қатты және сұйық фазада химиялық элементтер мөлшерлерінің қатынастары сәйкестігін бағалау нәтижелері келтірілген. Ерігіштіктің таужыныстардағы химиялық элементтердің мөлшеріне көбейтіндісінен табиғи сулардағы химиялық қосылыстардың бар болуының байланысы жоқ болуы анықталған, бұл, заттектердің фазааралық ауысудың ерігіштікпен байланысы жоқ болуын, сондай-ақ, таужыныстар мен су ағымдары арасында заттектерді қайта тарататын басқа бір физикалық фактор бар болуын көрсетеді.

### CHEMICAL ELEMENTS CONTENT RELATIONSHIP IN SOLID AND LIQUID PHASES OF LITHOSPHERE

K.L. Zelenskiy, A.M. Romanov

*Institute of Geophysical Research, Kurchatov, Kazakhstan*

The paper presents the results of the estimate of chemical elements content relationship compliance in solid and liquid phases based on the research materials on the territory of STS (Semipalatinsk Test Site). It has been established that there was no dependence of chemical compounds occurrence in the natural water on the solubility product in the chemical elements content in the rock formations, which indicates the absence of connection of interphase transfer of substances with solubility as well as the occurrence of another physical solution that re-distributes the substances between rock formations and water flows.

УДК 556.3:621.039.9

## ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ В ВОДОТОКАХ НА БЫВШЕМ СИП

Кириллов А.В., Романов А.М.

*Институт геофизических исследований, г. Курчатов, Казахстан*

На основании анализа значительного объема накопленных фактических данных о перераспределении естественных и искусственных радионуклидов, а также попутных рудных веществ в геосфере, выделены особенности, не имеющие должного объяснения. Обсуждается новое объяснение образования таких особенностей под воздействием электрического поля, формирующегося при течении потока вод. Выполнен расчет воздействия электрического поля на ионы различных размеров и зарядов. Доказано соответствие нового представления природным и техногенным распределениям веществ. Определена необходимость оценки загрязнения водотоков радионуклидами на значительно большем расстоянии от участков подземных ядерных взрывов, чем это выполняется обычно.

Начиная с сороковых годов прошлого века, велись интенсивные поиски урана и изучались результаты ядерных взрывов. Особое внимание при этом уделялось природным и техногенным распределениям радионуклидов в литосфере. По огромным массивам данных устанавливались эмпирические закономерности поведения радионуклидов в литосфере.

Из практики геологических работ известны специфические особенности распределения веществ в литосфере – наличие ореолов элементов спутников вокруг рудных тел метасоматических месторождений. Ореолам свойственна зональность: скопления химических элементов имеют различные размеры и пространственно разобщены. Т.е. различные химические элементы различаются по миграционной способности в литосфере [1]. Характерной особенностью является отсутствие значимых повышений концентраций ореолообразующих и рудных веществ в рудоподводящих каналах, между источником и месторождением. Ореолы, окружающие рудные тела зачастую удалены и/или «оторваны» от источников рудных веществ.

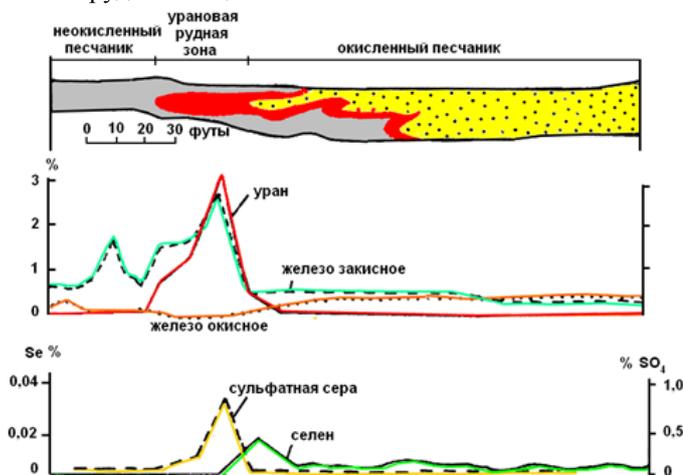


Рисунок 1. Природное распределение урана и сопутствующих элементов в поперечном разрезе рудного рола месторождения Шерли-Бейсин, Вайоминг [2]

Рисунок 1 показывает типичное распределение в твердой фазе природных рудных веществ (катионов) на участке экзогенного месторождения урана. Установлена повышенная концентрация селена перед урановорудной зоной (по направлению потока подземных вод). Железо закисное характеризуется повышенными концентрациями от урановорудной зоны и далее по направлению потока. Концентрации железа окисного повышены на участке до подхода к рудному телу. Непосредственно на интервале уранового оруденения окисное железо отсутствует.

Исследования техногенных распределений химических элементов в окружающей среде не обеспечиваются средствами, аналогичными затратам на поиск и разведку полезных ископаемых. Поэтому изучение распространения загрязнений производится более дешевым способом – на основе информации, полученной при исследованиях на поверхности земли.

Рассмотрены распределения радионуклидов, мигрирующих из боевых штолен Семипалатинского испытательного полигона (СИП). На расстоянии 20-100 м от порталов отсутствуют значимые повышения гамма и бета активности донных отложений ручьев, вытекающих из штолен. Далее отмечаются резкие увеличения активности донных отложений (рисунок 2).

Распределения гамма и бета активности заметно различаются (рисунок 3). Это обусловлено неодинаковой миграционной способностью гамма и бета излучающих нуклидов. Т.е. взаимодействие горных пород и вод различно сказывается на межфазном перераспределении радионуклидов. Необходимо объяснение причин, вызывающих указанные особенности отложения этих радионуклидов из потоков вод.

И для природных и для техногенных скоплений радионуклидов корректное обоснование причин пространственного и селективного перераспределения веществ – отсутствует. Причина: основным фактором различия миграционной способности веществ полагаются различие их растворимости, а также тер-

модинамических свойств – произведений растворимости химических соединений.

Согласно Коржинскому Д.С. растворимость не определяет межфазный переход веществ в горных породах. Переход частичен и относится к процессам выщелачивания, но не растворения. Использование произведений растворимости также недостаточно корректно. В реальных геологических средах потоки вод выносят часть реагентов из места реакции и привносят новые вещества. Т.е. геологические структуры относятся к открытым системам, что нарушает определяющее условие применимости термодинамики.

Эти представления относятся к химическим. Они не зависят от структурных параметров среды, в частности – от геометрии объема, в котором происходят химические реакции. Объяснение накопления веществ в т.н. «структурных ловушках» невозможно без дополнительных условий [2].

Необходимо новое физическое представление пространственного и селективного перераспределения веществ. Применение его представлено ниже.

Главным фактором представления является движение вод в горных породах. Следствие его – электрическое поле потенциалов течения. Напряженность поля (рисунок 4) оказывает силовое воздействие на ионы твердой и жидкой фаз горных пород, определяя тем самым направленность химических процессов [2].

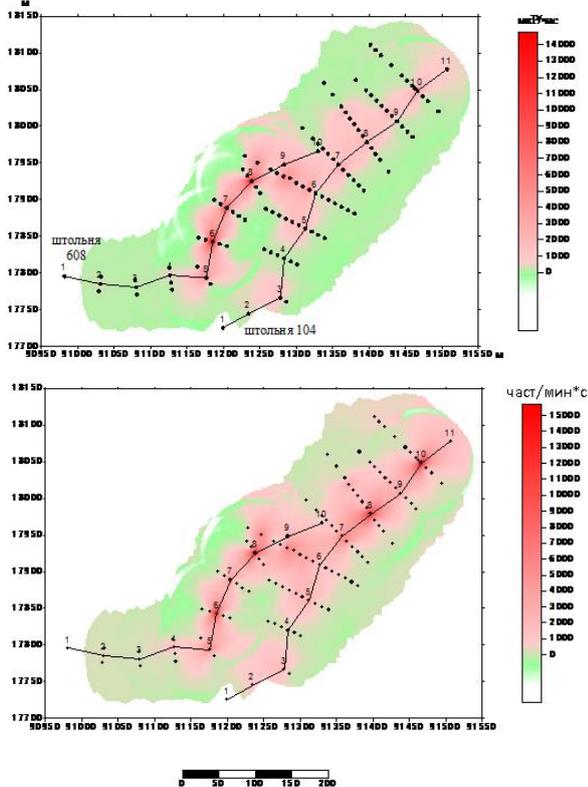
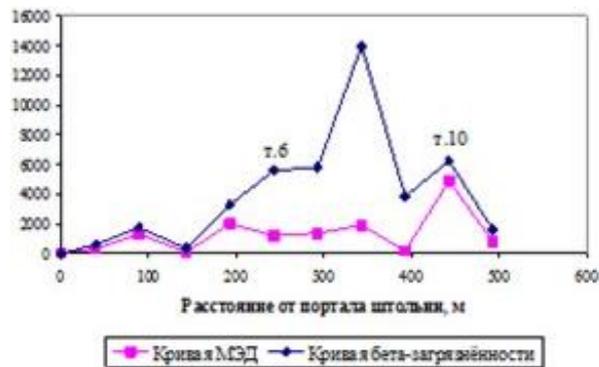
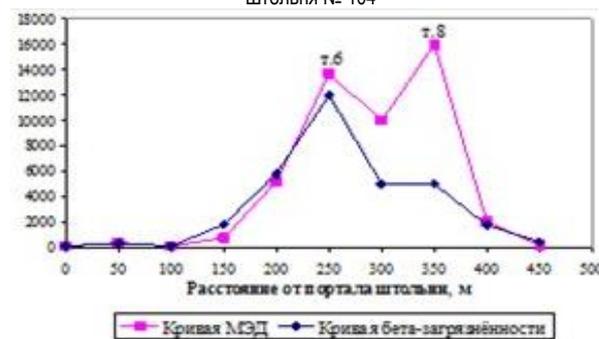


Рисунок 2. Распределения гамма (слева) и бета (справа) активности донных отложений ручьев, вытекающих из боевых штолен (данные ИРБЭ)



Штольня № 104



Штольня № 608

Рисунок 3. Графики гамма и бета активности донных отложений ручьев, вытекающих из боевых штолен. (Данные ИРБЭ) [3]

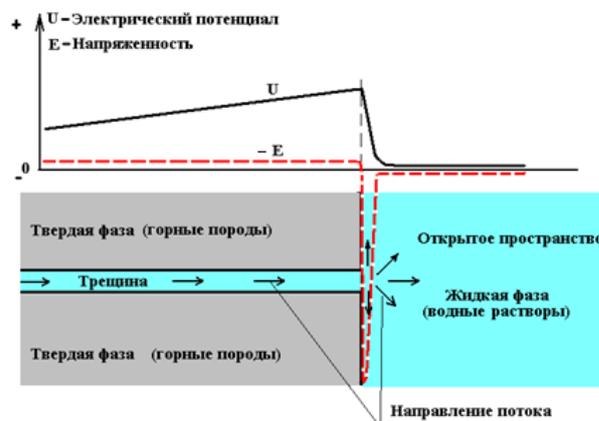


Рисунок 4. Схема распределения характеристик электрического поля в месте выхода потока вод из трещин в открытое пространство

Сравнение расчетных значений энергии электрического поля некоторых катионов приведено в таблице 1. На основе ее представлен сокращенный ряд зональности применительно к гидрогеохимической обстановке СИП:  $Cz^+$  -  $Sr^{2+}$  -  $Pb^{2+}$  -  $Mn^{2+}$  -  $Zn^{2+}$  -  $Fe^{2+}$  -  $Pu^{3+}$  -  $Am^{3+}$  -  $T^+$  -  $Fe^{3+}$  -  $Mn^{3+}$  -  $Mn^{4+}$  -  $Se^{4+}$  -  $Mn^{8+}$ .

В зависимости от знака потенциала растворов относительно твердой фазы катионы растворов либо стремятся к выходу из потока или к удерживанию в потоке. Направление движения катионов определяется знаком потенциала течения. Отрицательный потенциал удерживает катионы в потоке, а положительный – удаляет.

Таблица 1. Расчетные значения энергий электрического поля катионов

Ион	Валентность	Ионный радиус	Энергия ( $\times 10^{-26} \text{к}^2/\text{м}$ )
Cs+	1	1,86	0,83
Au+	1	1,37	1,12
Li+	1	0,68	2,26
Sr2+	2	1,32	4,65
Pb2+	2	1,26	4,88
Cd2+	2	0,99	6,21
Mn2+	2	0,91	6,75
Zn2+	2	0,83	7,40
Fe2+	2	0,75	8,19
Co2+	2	0,72	8,53
Pu3+	3	1	13,82
Am3+	3	0,96	14,40
H+	1	0,1	15,36
Fe3+	3	0,73	18,94
Mn3+	3	0,67	20,63
Co3+	3	0,64	21,60
Th4+	4	0,99	24,82
U4+	4	0,95	25,87
Am4+	4	0,89	27,61
Pu4+	4	0,86	28,58
Pb4+	4	0,76	32,34
Mn4+	4	0,52	47,26
U6+	6	0,83	66,62
Se4+	4	0,35	70,22
Mn8+	7	0,46	163,62

Данные таблицы 1 отвечают природным распределениям веществ на урановых месторождениях (рисунок 1). Для техногенных распределений веществ использованы более детальные сведения.

Применительно к техногенным распределениям рассматриваются результаты радиогидрогеохимического опробования реки Шаган. Участок детального исследования находится в месте пересечения рекой Жананской зоны смятия (рисунок 5).

Результаты определений искусственного радионуклида трития и сопутствующих микроэлементов (свинца, цинка и т.д.) в водном потоке от боевых скважин Жананской зоны смятия, впадающем в реку Шаган представлены на рисунке 6.

Обращается внимание на различие распределений концентраций микроэлементов вокруг пика содержания трития. Сопоставление рисунка 6 и данных таблицы 1 указывает на их однозначное соответствие. Максимальное повышение концентрации свинца по направлению потока вод проявляется до пика трития. Концентрации цинка повышены до пика трития, а также непосредственно на участке его проявления. Повышенные концентрации марганца частыми пиками проявлены на интервале максимальной концентрации трития и, далее – по направлению потока (от трех до восьмивалентного марганца). Пиковые концентрации железа проявлены как до максимума трития (двухвалентное железо), так и после него (трехвалентное железо).

Представляется неслучайной видимая связь частоты пиков повышенной концентрации с количеством ионов различной валентности для каждого химического элемента:

- малая частота пиков для ионов одной валентности;
- повышенная частота для ионов двух валентностей;
- высокая частота для ионов трех-пяти валентностей.

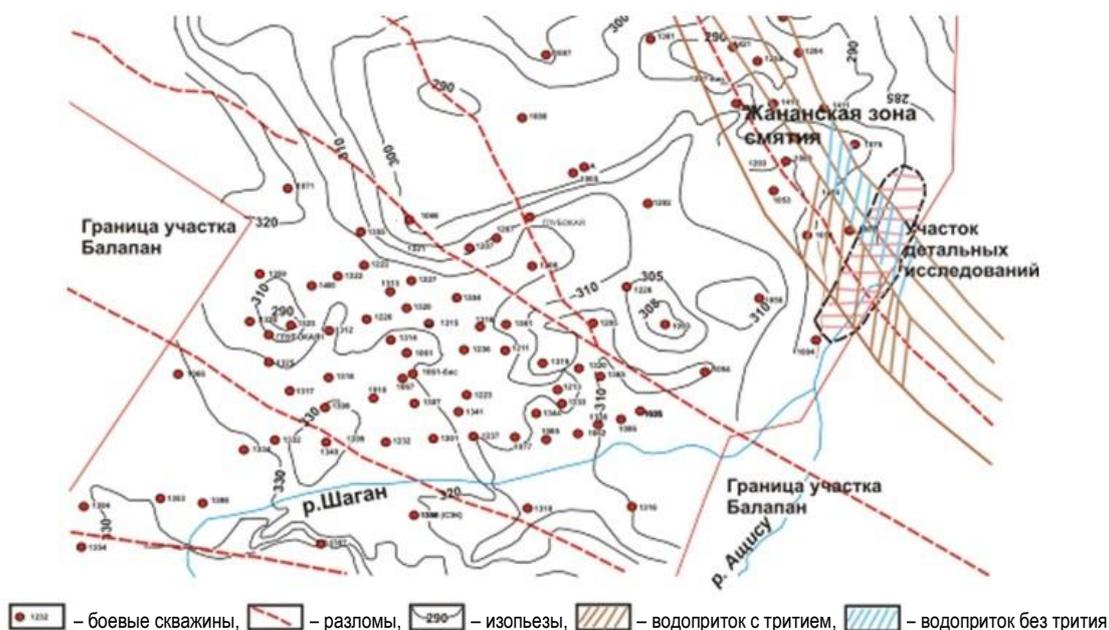


Рисунок 5. Структурная схема участка радиогидрогеохимических исследований реки Шаган

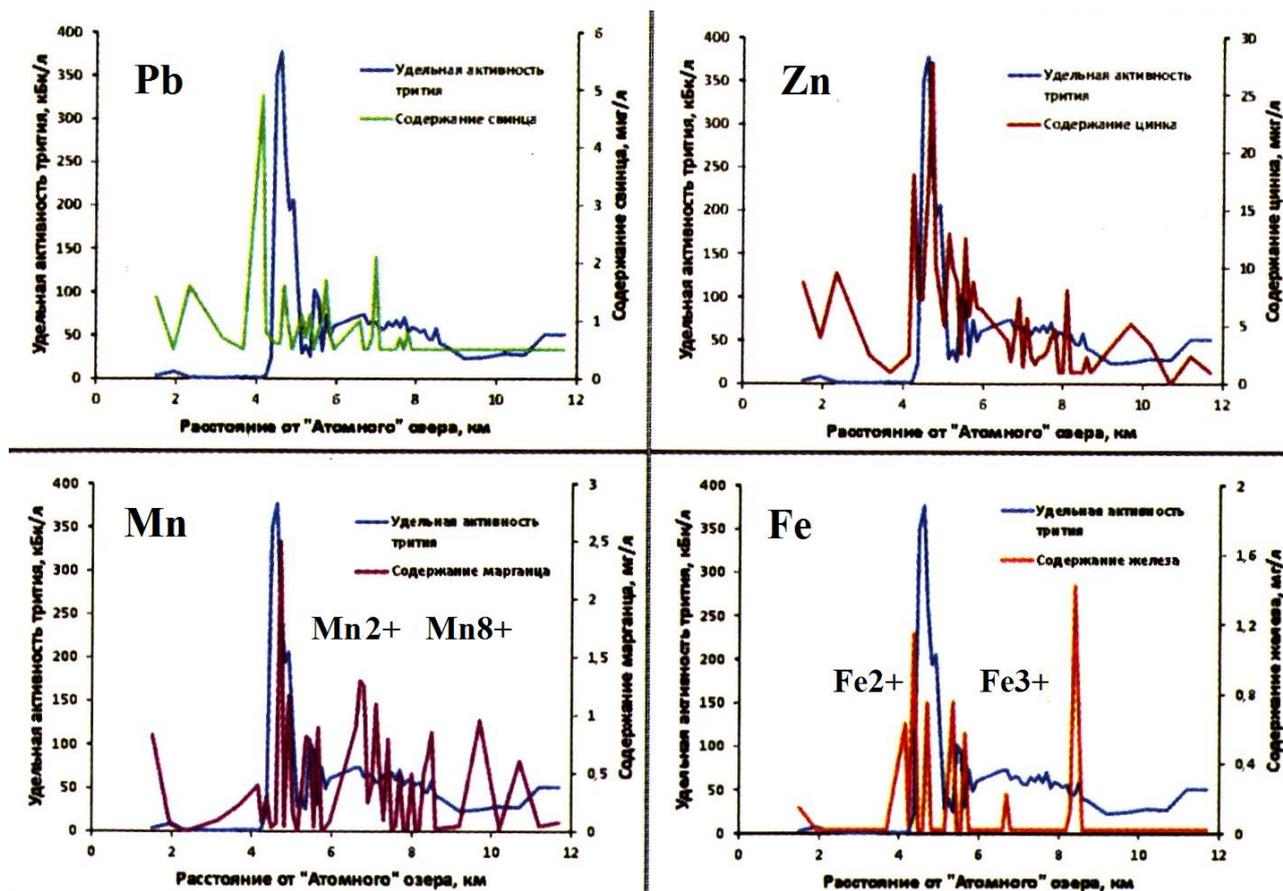


Рисунок 6. Взаимное распределение трития и микроэлементов на участке притока подземных вод из участка Балапан в реку Шаган. (Данные ИРБЭ)[3]

Чем больше воздействие электрического поля на катионы, тем сильнее они удерживаются в потоке вод на его начале (истоке). В данном случае истоком является приток вод из Жананской зоны смятия в реку Шаган. При этом свинец слабее удерживается в водах истока и ранее остальных катионов переходит в общий поток вод реки. Аналогично характеризуются остальные катионы.

Вещественные и структурные особенности, определяющие формирование электрических полей потенциала течения на поверхности земли и в недрах, – одинаковы. Поэтому закономерности, полученные для распределения веществ с поверхностными водотоками, можно распространить на распределения веществ с подземными водотоками.

Согласно приведенным примерам, независимо от природы происхождения, селективное распределение природных и техногенных радионуклидов и микроэлементов отвечает ряду зональности таблицы 1. Это доказывает закономерность связи повышенных концентраций радионуклидов с воздействием электрического поля потенциала течения. Т.е. геологический фактор – течение вод, характеризуемое скоростью, – значимо влияет на пространственное перераспределение веществ в литосфере.

Чем больше напряженность электрического поля, тем больше его силовое воздействие на ионы веществ потоков вод и вмещающих горных пород. Напряженность электрического поля зависит от вещественных и структурных особенностей литосферы. Они могут существенно и многократно изменяться по руслу водотока. Этим объясняется формирование многократных скоплений радионуклидов по направлению потоков вод.

Таким образом, радионуклиды с потоками поверхностных и подземных вод могут распространяться далеко за пределы санитарно-защитных зон и зон наблюдений. Отсюда следует необходимость детального изучения миграции радионуклидов по руслам водотоков на существенно большем расстоянии, чем это предполагалось ранее. В противном случае возможно неконтролируемое избыточное облучение населения и окружающей среды.

#### ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Теоретическими и непосредственными определениями доказана закономерность селективной локализации радионуклидов в результате воздействия потока вод на горные породы через средство электрического поля потенциала течения;

2. Непротиворечиво объяснены особенности распределения радионуклидов по руслам водотоков. В частности: низкий уровень активности в местах выхода потоков вод из боевых штолен и формирование локальных максимумов активности в руслах ручьев на удалении от порталов штолен.

3. Доказана возможности многократных повышений активности в потоках загрязненных вод на удалении от первых максимумов концентрации радионуклидов.

4. Обоснована необходимость модификации методики мониторинга миграции радиоактивных загрязнений в литосфере.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Овчинников, Л.Н. Закономерности состава и строения первичных геохимических ореолов сульфидных месторождений / Л.Н. Овчинников // М., Недра, 1970.
2. Романов, А.М. Взаимодействие вод с горными породами. / А.М. Романов // Алматы, 2003, С. 7 – 51
3. Сборник трудов Института радиационной безопасности и экологии за 2007-2009: сб. ст. / Тех. ред. О.В. Тоневицкая, О.В. Серая.- Павлодар 2010. – 34-35с.

### БҰРЫНҒЫ ССП СУ АҒЫНДАРЫНДА РАДИОНУКЛИДТЕРДІҢ ҚАЙТА ТАРАЛУ ЕРЕКШЕЛІКТЕРІ

Кириллов А.В., Романов А.М.

*Қазақстан, Курчатов қ., Геофизикалық зерттеулер институты*

Геосферада табиғи және жасанды радионуклидтер, сондай-ақ олармен жалғасқан кен заттері қайта таралу туралы жиналған нақты деректердің едәуір көлемін талдау негізінде тиісті түсінігі жоқ ерекшеліктер айқындалған. Сондай ерекшеліктер су ағындарында қалыптастырылатын электрлік өрістің әсерінен пайда болудың жаңа түсіндірмесі талқылануда. Әр түрлі мөлшері және зарядымен иондарға электрлік өрістің әсерін есептеуі орындалған. Жаңа түсініктің зеттектер табиғи және техногенді таралуына сәйкестігі дәлелденген. Су ағындар радионуклидтермен ластануын жерасты ядролық жарылыстар учаскелерінен әдетте орындалатыннан едәуір алыс қашықтықта бағалау қажеттілігі белгіленген.

### RADIONUCLIDES REDISTRIBUTION IN WATER FLOWS AT THE FORMER STS

A.V. Kirillov, A.M. Romanov

*Institute of Geophysical Research, Kurchatov, Kazakhstan*

Features that have no proper explanation have been detected based on the analysis of a significant volume of accumulated actual data on re-propagation of natural and artificial radionuclides as well as incidental mining substances in the geosphere. The paper discusses new explanation of formation of such features under the influence of electrical field, which is formed during the water flows. Impact of electrical field on the ions of different sizes and charges has been calculated. The correspondence of new presentation to the natural and technogenic propagation of the substances has been proved. The necessity of the estimate of water flows' contamination by radionuclides at a significantly greater distance from the sites of underground nuclear explosions than when it is usually done has been detected.

УДК 621.039.9

## РЕЗУЛЬТАТЫ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ПО ХИМИЧЕСКОМУ СОСТАВУ ПРИРОДНЫХ ВОД НА ТЕРРИТОРИИ БЫВШЕГО СИП

Комлев А.В., Романов А.М., Мельничук М.А.

*Институт геофизических исследований, г. Курчатов, Казахстан*

Использовано статистическое представление (парные корреляции, корреляционные матрицы и графики взаимосвязей) для установления закономерности связей химических элементов в поверхностных и подземных водах. Установлены значимые, практически функциональные взаимосвязи химических компонентов природных вод и общей минерализации для Семипалатинского испытательного полигона. Исключением являются содержания гидроксил-иона, а также значения рН, характеризующиеся преимущественным отсутствием связи с остальными компонентами. Эти исключения представляют практический интерес: на основе рассмотрения их пространственных распределений возможно выявление зон истока и накопления грунтовых вод. Выполнено сопоставление гидрогеохимических характеристик участков Дегелен, Косшаки и Акбота с СИП в целом. Установлено слабое понижение рН грунтовых вод на ненарушенных участках по сравнению с местами проведения ядерных испытаний, что может быть одним из оснований перспективности участков для размещения радиоактивных отходов.

### ВВЕДЕНИЕ

Распространение радионуклидов из мест подземных ядерных взрывов происходит в природной среде (литосфере), в результате естественных геологических процессов. Главным агентом переноса радионуклидов в литосфере являются потоки вод. Соответственно первичными должны быть гидрогеологические и гидрогеохимические исследования участков взрывов, определяющие закономерные особенности процессов миграции веществ в литосфере.

В предлагаемой работе главное внимание уделено особенностям, проявленным в химическом составе как поверхностных, так и подземных вод Семипалатинского испытательного полигона. Особенности

и закономерность их проявления определены на основе статистически обработанных данных химического анализа.

### ПРОВЕРКА ДОСТОВЕРНОСТИ И ПОЛНОТЫ ХИМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

В результате 47 контрольных измерений установлена 98% сходимость данных. Это свидетельствует о достаточной достоверности лабораторных исследований.

Полнота анализа определена по различию расчетных и фактических значений общей минерализации растворов. На рисунке 1 представлены гistogramмы, графики и значения коэффициентов парной корреляции вышеуказанных значений.

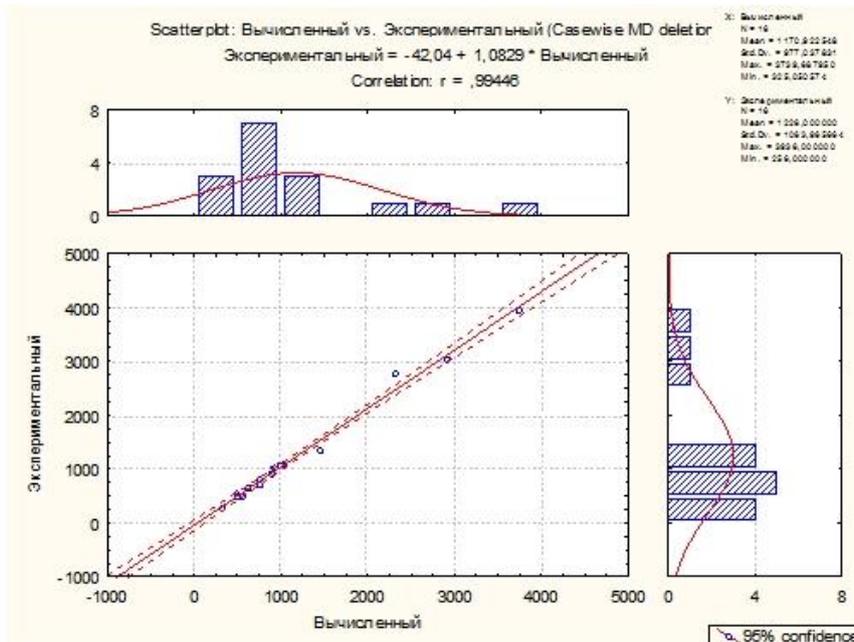


Рисунок 1. Статистическое сопоставление расчетных и фактических определений общей минерализации природных вод на примере участка Косшаки

**РЕЗУЛЬТАТЫ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ПО ХИМИЧЕСКОМУ СОСТАВУ  
ПРИРОДНЫХ ВОД НА ТЕРРИТОРИИ БЫВШЕГО СИП**

Гистограммы отвечают преимущественно нормальному распределению. Их вид практически идентичен. График соответствия вычисленных и экспериментальных значений – линейный. Характеризуется очень узким коридором разброса. Коэффициент корреляции 0,99. С вероятностью 95% он значим. Зависимость значений - линейная, практически функциональная.

Наиболее значимым результатом является наличие свободного члена (-42,04) в уравнении регрессии. Он указывает на наличие систематического различия фактических и расчетных значений общей минерализации. Единственно возможным объяснением этого является недостаточное количество определяемых химических элементов. Одной из возможных причин является отсутствие анализов на кремний.

Сопоставление выполнено на примере участка Косшоки, находящегося на территории СИП. Аналогичные результаты получены по участкам Дегелен и Акбота, также относящимся к СИП.

Результаты этапа свидетельствуют о достоверности, но не полном объеме определений химических

элементов при гидрогеохимических исследованиях СИП.

**ХАРАКТЕРИСТИКА СРЕДНИХ ЗНАЧЕНИЙ ДАННЫХ ХИМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА**

Данные химического анализа вод по СИП объединены в две генеральные выборки:

1. Поверхностные и приповерхностные (грунтовые) воды;
2. Воды наблюдательных скважин.

Генеральные выборки подразделялись на частные. Первая – по типам водного накопителя, вторая – по участкам. Осредненные данные химического анализа и краткие характеристики особенностей выборок приведены в таблице 1.

Отмечено:

- значимое различие генеральных выборок по осредненным данным химического анализа;
- уменьшение pH по мере увеличения глубины нахождения вод;
- максимальное значение pH по родникам и рекам (местам перехода от подземных условий к поверхностным).

*Таблица 1. Средние значения данных химического анализа по выборкам СИП*

	Генеральные выборки	
	Поверхностные и приповерхностные воды СИП	Скважины СИП
Количество определений	49	72
Жесткость	41,782	11,419
pH	7,741	6,792
Na+K+	2822,090	338,387
Ca <sup>2+</sup>	218,663	92,877
Mg <sup>2+</sup>	375,086	54,276
Cl-	4027,318	356,751
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	291,102	261,947
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	2196,986	453,548
Минерализация	9976,347	1521,250
Характерные особенности выборок	Существенное различие генеральных выборок по концентрациям элементов и минерализации. Концентрации элементов поверхностных и приповерхностных вод почти на порядок превышают соответствующие концентрации вод скважин. Исключение – практически одинаковые концентрации HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> pH поверхностных вод значимо превышает pH подземных	

	Частные выборки				
	Реки, родники	Озера	Скважины Косшоки	Скважины Акбота	Скважины Дегелен
Количество определений	7	7	16	11	14
Жесткость	31,771	193,43	7,006	7,336	10,371
pH	8,014	7,37	6,125	5,945	6,336
Na+K+	1430,000	14900,00	277,66	318,59	319,23
Ca <sup>2+</sup>	214,286	718,57	84,293	64,310	91,325
Mg <sup>2+</sup>	246,857	1921,14	34,048	50,188	70,702
Cl-	1774,286	23642,86	166,17	457,62	332,34
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	617,143	184,71	287,08	212,39	242,25
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	1574,571	8191,43	465,20	230,44	523,78
Минерализация	5557,143	50942,86	1226,000	1533,818	1609,857
Характерные особенности выборок	Существенное различие по концентрациям элементов и минерализации. pH рек и родников значимо превышает pH озер. Содержания HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> в реках и родниках втрое больше, чем в озерах и скважинах.		Различия слабые, незначимые.		

**РЕЗУЛЬТАТЫ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ПО ХИМИЧЕСКОМУ СОСТАВУ  
ПРИРОДНЫХ ВОД НА ТЕРРИТОРИИ БЫВШЕГО СИП**

**ХАРАКТЕРИСТИКА ВЗАИМОСВЯЗЕЙ ДАННЫХ ХИМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА**

На основе вышеприведенных выборок проведен статистический анализ взаимосвязей данных химического анализа с составлением корреляционных матриц (таблицы 2-8).

Таблица 2. Значения коэффициентов парной корреляции данных химического анализа поверхностных и подземных вод СИП

	Жесткость	pH	Na <sup>+</sup> K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Минерализация
Жесткость	1,00	-0,21	0,98	0,53	0,99	0,98	-0,04	0,88	0,99
pH	-0,21	1,00	-0,17	-0,12	-0,21	-0,22	0,46	0,02	-0,18
Na <sup>+</sup> K <sup>+</sup>	0,98	-0,17	1,00	0,38	0,995	0,99	0,01	0,87	0,999
Ca <sup>2+</sup>	0,53	-0,12	0,38	1,00	0,41	0,37	-0,22	0,54	0,41
Mg <sup>2+</sup>	0,99	-0,21	0,995	0,41	1,00	0,99	-0,01	0,87	0,997
Cl <sup>-</sup>	0,98	-0,22	0,99	0,37	0,99	1,00	0,02	0,82	0,99
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-0,04	0,46	0,01	-0,22	-0,01	0,02	1,00	-0,10	-0,00
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0,88	0,02	0,87	0,54	0,87	0,82	-0,10	1,00	0,88
Минерализация	0,99	-0,18	0,999	0,41	0,997	0,99	-0,00	0,88	1,00
Характеристика	<p>Красной заливкой выделены значимые коэффициенты корреляции, голубой – незначимые.                      Существенно различными коэффициентами корреляции характеризуются две независимые группы:                      Жесткость, Na<sup>+</sup>K<sup>+</sup>; Ca<sup>2+</sup>; Mg<sup>2+</sup>; Cl<sup>-</sup>; SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>; Минерализация (1 группа) – значимые коэффициенты корреляции;                      pH; HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (2 группа) – незначимые коэффициенты корреляции.                      Отмечаются взаимные высокие, практически функциональные зависимости:                      Жесткость, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>K<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>; SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Минерализация (группа 1).                      Заметно слабее связь Ca<sup>2+</sup> с Жесткостью, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>K<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (группа 1 а).                      Обособленно стоит группа 2 связи pH и HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> с другими компонентами. Слабая, но превышающая критический уровень значимости связь проявлена непосредственно для пары pH и HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>.                      Количество значимых коэффициентов парной корреляции – 22.</p>								

Таблица 3. Значения коэффициентов парной корреляции данных химического анализа вод по скважинам СИП

	Жесткость	pH	Na <sup>+</sup> K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Минерализация
Жесткость	1,00	-0,06	0,72	0,81	0,86	0,83	-0,12	0,70	0,83
pH	-0,06	1,00	0,12	0,03	0,06	0,08	0,29	0,05	0,06
Na <sup>+</sup> K <sup>+</sup>	0,72	0,12	1,00	0,55	0,88	0,92	-0,01	0,86	0,97
Ca <sup>2+</sup>	0,81	0,03	0,55	1,00	0,76	0,72	-0,09	0,63	0,71
Mg <sup>2+</sup>	0,86	0,06	0,88	0,76	1,00	0,92	-0,10	0,86	0,95
Cl <sup>-</sup>	0,83	0,08	0,92	0,72	0,92	1,00	-0,09	0,73	0,95
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-0,12	0,299	-0,019	-0,09	-0,10	-0,09	1,00	-0,14	-0,06
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0,70	0,05	0,86	0,63	0,86	0,73	-0,14	1,00	0,88
Минерализация	0,83	0,06	0,97	0,71	0,95	0,95	-0,06	0,88	1,00
Характеристика	<p>Красной заливкой выделены значимые коэффициенты корреляции, голубой – незначимые.                      Существенно различными коэффициентами корреляции характеризуются две независимые группы:                      Жесткость, Na<sup>+</sup>K<sup>+</sup>; Ca<sup>2+</sup>; Mg<sup>2+</sup>; Cl<sup>-</sup>; SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>; Минерализация (1 группа) – значимые коэффициенты корреляции;                      pH; HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (2 группа) – незначимые коэффициенты корреляции.                      Отмечаются взаимные высокие, практически функциональные зависимости: Жесткость, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>K<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>; Минерализация (группа 1).                      Заметно слабее связь Ca<sup>2+</sup> с Жесткостью, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>K<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (группа 1 а).                      Обособленно стоит группа 2 связи pH и HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, которые не связаны с другими компонентами. Очень слабая, но значимая, возможно случайная, связь самих pH и HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>.                      Количество значимых коэффициентов парной корреляции – 22.</p>								

Таблица 4. Значения коэффициентов парной корреляции данных химического анализа вод по озерам СИП

	Жесткость	pH	Na <sup>+</sup> K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Минерализация
Жесткость	1,00	-0,37	0,99	0,11	0,995	0,99	0,91	0,96	0,996
pH	-0,37	1,00	-0,33	0,13	-0,38	-0,35	-0,36	-0,26	-0,34
Na <sup>+</sup> K <sup>+</sup>	0,99	-0,33	1,00	0,016	0,998	0,999	0,93	0,96	0,9997
Ca <sup>2+</sup>	0,11	0,13	0,02	1,00	0,02	0,03	-0,24	0,04	0,03
Mg <sup>2+</sup>	0,995	-0,38	0,998	0,02	1,00	0,997	0,93	0,96	0,998
Cl <sup>-</sup>	0,99	-0,35	0,999	0,03	0,997	1,00	0,93	0,95	0,999
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,91	-0,36	0,93	-0,24	0,93	0,93	1,00	0,88	0,92
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0,96	-0,26	0,96	0,04	0,96	0,95	0,88	1,00	0,96
Минерализация	0,996	-0,34	0,9997	0,03	0,998	0,999	0,92	0,96	1,00
Характеристика	<p>Красной заливкой выделены значимые коэффициенты корреляции, голубой – незначимые.                      Существенно различными коэффициентами корреляции характеризуются две независимые группы:                      Na<sup>+</sup>K<sup>+</sup>; Mg<sup>2+</sup>; HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>; Cl<sup>-</sup>; SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>; Минерализация (1 группа) – значимые коэффициенты корреляции;                      pH; Ca<sup>2+</sup> (2 группа) – незначимые коэффициенты корреляции.                      Отмечаются взаимные высокие, практически функциональные зависимости: Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>K<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>; SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>; Минерализация (группа 1).                      Обособленно стоит группа 2 связи pH и Ca<sup>2+</sup>, которые не связаны между собой и с другими компонентами.                      Количество значимых коэффициентов парной корреляции – 21.</p>								

**РЕЗУЛЬТАТЫ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ПО ХИМИЧЕСКОМУ СОСТАВУ  
ПРИРОДНЫХ ВОД НА ТЕРРИТОРИИ БЫВШЕГО СИП**

Таблица 5. Значения коэффициентов парной корреляции данных химического анализа вод по рекам и родникам СИП

	Жесткость	pH	Na <sup>+</sup> K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Минерализация
<b>Жесткость</b>	1,00	-0,82	0,96	0,77	0,98	0,97	-0,52	0,95	0,98
<b>pH</b>	-0,82	1,00	-0,66	-0,86	-0,74	-0,73	0,75	-0,74	-0,73
<b>Na<sup>+</sup>K<sup>+</sup></b>	0,96	-0,66	1,00	0,56	0,99	0,99	-0,43	0,92	0,99
<b>Ca<sup>2+</sup></b>	0,77	-0,86	0,56	1,00	0,63	0,60	-0,55	0,76	0,65
<b>Mg<sup>2+</sup></b>	0,98	-0,74	0,99	0,63	1,00	0,997	-0,47	0,93	0,998
<b>Cl<sup>-</sup></b>	0,97	-0,73	0,99	0,60	0,998	1,00	-0,47	0,90	0,99
<b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	-0,52	0,75	-0,43	-0,55	-0,47	-0,47	1,00	-0,56	-0,48
<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	0,95	-0,74	0,92	0,76	0,93	0,90	-0,56	1,00	0,95
<b>Минерализация</b>	0,98	-0,73	0,994	0,65	0,998	0,992	-0,48	0,95	1,00
<b>Характеристика</b>	<p>Красной заливкой выделены значимые коэффициенты корреляции, голубой – незначимые. Существенно различными коэффициентами корреляции характеризуются две независимые группы: Жесткость, Na<sup>+</sup>K<sup>+</sup>; Ca<sup>2+</sup>; Mg<sup>2+</sup>; Cl<sup>-</sup>; SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>; Минерализация (1 группа) – значимые коэффициенты корреляции; pH; HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (2 группа) – незначимые коэффициенты корреляции. Отмечаются взаимные высокие, практически функциональные зависимости: Жесткость, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>K<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>; SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Минерализация (группа 1). Заметно слабее связь Ca<sup>2+</sup> с Жесткостью, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>K<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (группа 1 а). Обособленно стоит группа 2 связи pH и HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> с другими компонентами. Слабая, но превышающая критический уровень значимости связь проявлена для pH с Жесткостью (отрицательная) и с Ca<sup>2+</sup> (положительная). Количество значимых коэффициентов парной корреляции – 18.</p>								

Таблица 6. Значения коэффициентов парной корреляции данных химического анализа вод по скважинам участка Косшоки

	Жесткость	pH	Na <sup>+</sup> K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub>	Минерализация
<b>Жесткость</b>	1,00	-0,31	0,77	0,99	0,98	0,71	0,97	-0,15	0,93
<b>pH</b>	-0,31	1,00	-0,05	-0,35	-0,25	-0,04	-0,28	0,31	-0,22
<b>Na<sup>+</sup>K<sup>+</sup></b>	0,77	-0,05	1,00	0,71	0,84	0,90	0,85	0,18	0,94
<b>Ca<sup>2+</sup></b>	0,99	-0,35	0,71	1,00	0,96	0,65	0,96	-0,20	0,90
<b>Mg<sup>2+</sup></b>	0,98	-0,25	0,84	0,96	1,00	0,79	0,96	-0,06	0,96
<b>Cl<sup>-</sup></b>	0,71	-0,04	0,90	0,65	0,79	1,00	0,74	-0,02	0,85
<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	0,97	-0,28	0,85	0,96	0,96	0,74	1,00	-0,15	0,97
<b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	-0,15	0,31	0,18	-0,20	-0,06	-0,02	-0,15	1,00	-0,01
<b>Минерализация</b>	0,93	-0,22	0,94	0,90	0,96	0,85	0,97	-0,01	1,00
<b>Характеристика</b>	<p>Красной заливкой выделены значимые коэффициенты корреляции, голубой – незначимые. Существенно различными коэффициентами корреляции характеризуются две независимые группы: Жесткость, Na<sup>+</sup>K<sup>+</sup>; Ca<sup>2+</sup>; Mg<sup>2+</sup>; Cl<sup>-</sup>; SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>; Минерализация (1 группа) – значимые коэффициенты корреляции; pH; HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (2 группа) – незначимые коэффициенты корреляции между ними, а также с другими данными. Отмечаются взаимные высокие, практически функциональные зависимости: Жесткость, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>K<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>; SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Минерализация (группа 1). Количество значимых коэффициентов парной корреляции – 21.</p>								

Таблица 7. Значения коэффициентов парной корреляции данных химического анализа вод по скважинам участка Акбота

	Жесткость	pH	Na <sup>+</sup> K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Минерализация
<b>Жесткость</b>	1,00	-0,21	0,90	0,998	0,999	0,98	0,73	-0,09	0,98
<b>pH</b>	-0,21	1,00	-0,14	-0,20	-0,23	-0,13	-0,38	-0,19	-0,18
<b>Na<sup>+</sup>K<sup>+</sup></b>	0,90	-0,14	1,00	0,89	0,91	0,95	0,82	0,24	0,97
<b>Ca<sup>2+</sup></b>	0,998	-0,20	0,89	1,00	0,994	0,98	0,70	-0,13	0,97
<b>Mg<sup>2+</sup></b>	0,999	-0,23	0,91	0,994	1,00	0,98	0,75	-0,05	0,98
<b>Cl<sup>-</sup></b>	0,98	-0,13	0,95	0,97	0,98	1,00	0,69	-0,06	0,98
<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	0,73	-0,38	0,82	0,70	0,75	0,69	1,00	0,57	0,81
<b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	-0,09	-0,19	0,24	-0,13	-0,05	-0,06	0,57	1,00	0,09
<b>Минерализация</b>	0,98	-0,18	0,97	0,97	0,98	0,98	0,81	0,09	1,00
<b>Характеристика</b>	<p>Красной заливкой выделены значимые коэффициенты корреляции, голубой – незначимые. Существенно различными коэффициентами корреляции характеризуются две независимые группы: Жесткость, Na<sup>+</sup>K<sup>+</sup>; Ca<sup>2+</sup>; Mg<sup>2+</sup>; Cl<sup>-</sup>; SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>; Минерализация (1 группа) – значимые коэффициенты корреляции; pH; HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (2 группа) – незначимые коэффициенты корреляции между ними, а также с другими данными. Отмечаются взаимные высокие, практически функциональные зависимости: Жесткость, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>K<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>; SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Минерализация (группа 1). Количество значимых коэффициентов парной корреляции – 21.</p>								

**РЕЗУЛЬТАТЫ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ПО ХИМИЧЕСКОМУ СОСТАВУ  
ПРИРОДНЫХ ВОД НА ТЕРРИТОРИИ БЫВШЕГО СИП**

Таблица 8. Значения коэффициентов парной корреляции данных химического анализа вод по скважинам участка Дегелен

	Жесткость	pH	Na+K+	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl-	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Минерализация
<b>Жесткость</b>	1,00	0,08	0,81	0,991	0,994	0,99	0,93	-0,10	0,92
<b>pH</b>	0,08	1,00	0,41	0,02	0,13	0,14	0,21	0,64	0,25
<b>Na+K+</b>	0,81	0,41	1,00	0,75	0,85	0,86	0,94	0,28	0,95
<b>Ca<sup>2+</sup></b>	0,99	0,02	0,75	1,00	0,97	0,97	0,90	-0,15	0,87
<b>Mg<sup>2+</sup></b>	0,995	0,13	0,85	0,97	1,00	0,996	0,94	-0,06	0,96
<b>Cl-</b>	0,99	0,14	0,86	0,97	0,996	1,00	0,94	-0,07	0,95
<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	0,93	0,21	0,94	0,90	0,94	0,94	1,00	0,05	0,97
<b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	-0,10	0,64	0,28	-0,15	-0,06	-0,07	0,05	1,00	0,09
<b>Минерализация</b>	0,92	0,25	0,95	0,87	0,96	0,95	0,97	0,09	1,00

**Характеристика**  
 Красной заливкой выделены значимые коэффициенты корреляции, голубой – незначимые.  
 Существенно различными коэффициентами корреляции характеризуются две независимые группы:  
 Жесткость, Na+K+; Ca<sup>2+</sup>; Mg<sup>2+</sup>; Cl-; SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>; Минерализация (1 группа) – значимые коэффициенты корреляции;  
 pH; HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (2 группа) – незначимые коэффициенты корреляции между ними, а также с другими данными.  
 Отмечаются взаимные высокие, практически функциональные зависимости: Жесткость, Mg<sup>2+</sup>, Na+K+, Cl-, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Минерализация (группа 1).  
 Количество значимых коэффициентов парной корреляции – 21.

Типичные графики парных зависимостей гидрогеохимических данных по СИП при высокой корреляции и ее отсутствии представлены на рисунке 2.

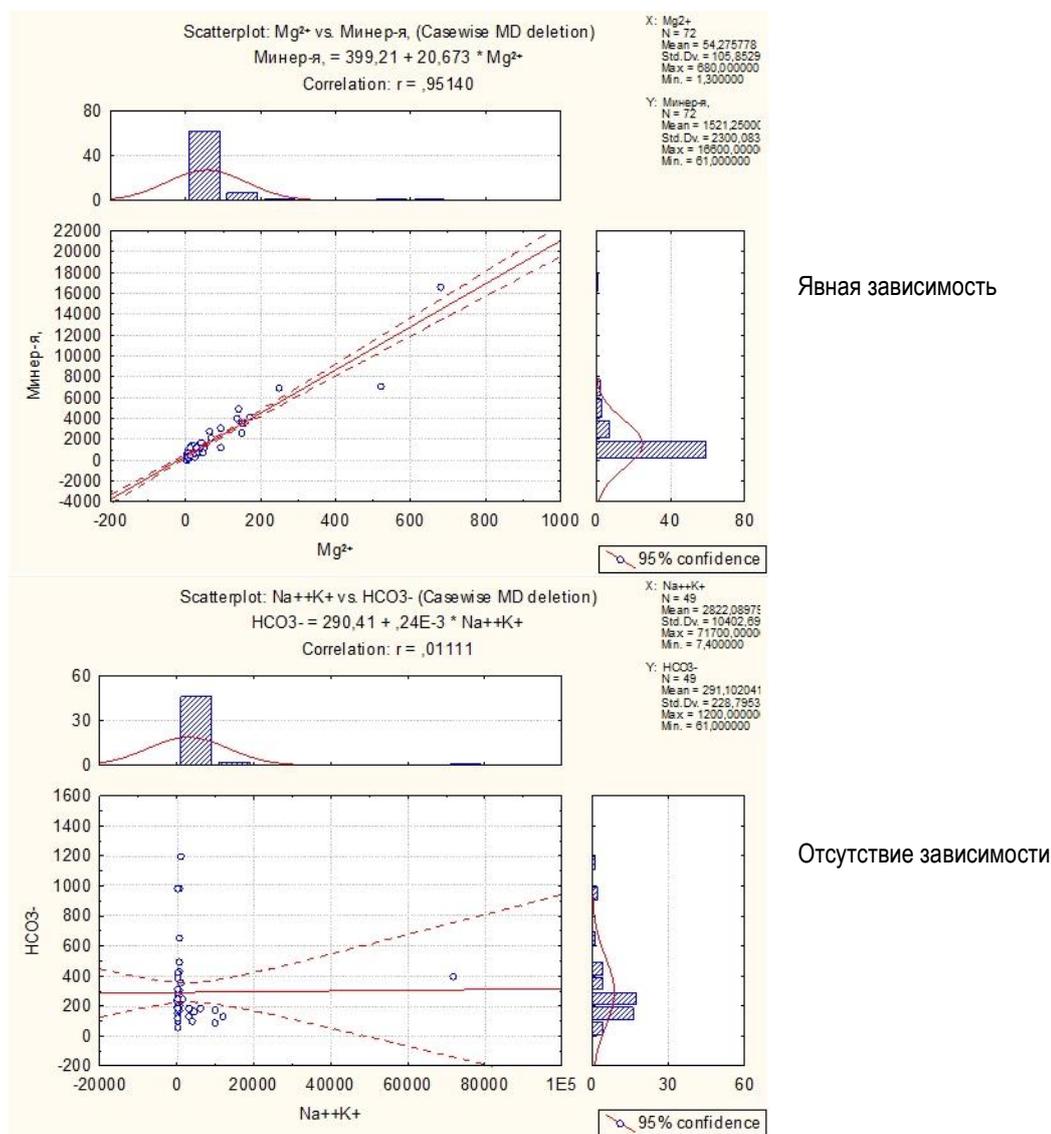


Рисунок 2. Типичные виды графиков парных зависимостей гидрогеохимических данных по СИП

**РЕЗУЛЬТАТЫ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ПО ХИМИЧЕСКОМУ СОСТАВУ  
ПРИРОДНЫХ ВОД НА ТЕРРИТОРИИ БЫВШЕГО СИП**

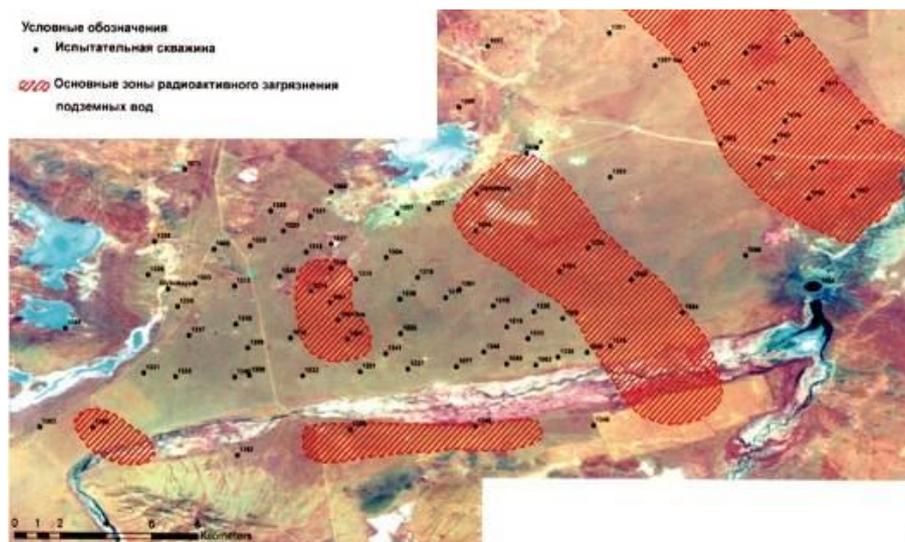
**ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПОЛУЧЕННЫХ СТАТИСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ**

Основные особенности статистических характеристик и причин их возникновения сведены в таблицу 9.

*Таблица 9. Причины особенностей статистических данных*

Объект	Особенность	Причина образования особенности
Средние значения по выборкам	Поверхностные и приповерхностные воды имеют большее значение pH, чем подземные	Поверхностные воды являются источником по отношению к накопителю – подземным водам. При одинаковом химическом составе, за счет воздействия электрического поля потенциала течения pH истока больше pH накопителя [2].
	pH вод рек и родников превышает pH вод озер.	Воды рек и ручьев являются источником по отношению к накопителю – озерным водам. При одинаковом химическом составе, за счет воздействия электрического поля потенциала течения pH истока больше pH накопителя [2].
	pH вод рек, ручьев и озер превышает pH вод скважин	Поверхностные воды являются источником по отношению к накопителю – подземным водам. При одинаковом химическом составе, за счет воздействия электрического поля потенциала течения pH истока больше pH накопителя [2].
	Содержания HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> в реках и ручьях втрое больше, чем в озерах	Отражение прямой зависимости образования HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> от скорости течения вод относительно горных пород [2].
Взаимосвязи по корреляционным матрицам	Большое количество значимых коэффициентов корреляции данных по выборкам	Отражение высокой скорости движения потоков поверхностных и подземных вод на территории СИП [2].
	Наличие двух групп, резко различающихся по корреляционным связям	pH и HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , в отличие от других параметров, изменяются в зависимости от локальных гидродинамических условий [2].
	Резкое отличие вод озер по взаимосвязям HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> и Ca <sup>2+</sup> от других параметров вод	Выпадение Ca <sup>2+</sup> в осадок из поверхностных вод (подтверждено сравнением относительных концентраций в озерных и других водах СИП)

**ПРИМЕНЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ ДЛЯ ИНТЕРПРЕТАЦИИ  
ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИХ ДАННЫХ НА ЛОКАЛЬНОМ УЧАСТКЕ**



*Рисунок 3. Притоки подземных вод, с повышенной активностью трития в реку Шаган (на основе данных ИРБЭ)*

Использование статистических исследований в сложных случаях интерпретации продемонстрировано на примере изучения распределений трития и минерализации вод. Объект исследования – юго-восток участка Балапан, примыкание зоны взрывов, загрязненной тритием, к реке Шаган (рисунок 3).

На основе структурно-тектонической схемы участка с рельефом дневной поверхности (рисунок 4) устанавливается наибольшая вероятность поступления слабоминерализованных вод из Жананской зоны смятия в минерализованные воды реки Шаган.

Левая ветвь графика рядовой съемки распределений трития по реке Шаган свидетельствует об отсутствии поступления трития в поверхностные воды ре-

ки из боевой скважины № 1004 (рисунок 5). При этом общая минерализация речных вод составляет около 25 г/л. На интервале от 4 до 5 км проявлено интенсивное повышение активности трития при одновременном снижении общей минерализации речных вод. От 5 до 11 км и далее, активность трития преимущественно снижается. Минерализация 25 г/л свойственна общему притоку грунтовых вод, подпитывающему реку на всем ее протяжении. Локальное понижение минерализации свидетельствует о наличии сравнительно узкого притока в реку слабоминерализованных вод. Наиболее вероятная причина – поступление вод из Жананской зоны смятия.

РЕЗУЛЬТАТЫ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ПО ХИМИЧЕСКОМУ СОСТАВУ ПРИРОДНЫХ ВОД НА ТЕРРИТОРИИ БЫВШЕГО СИП



Рисунок 4. Структурно-тектоническая схема участка с рельефом дневной поверхности

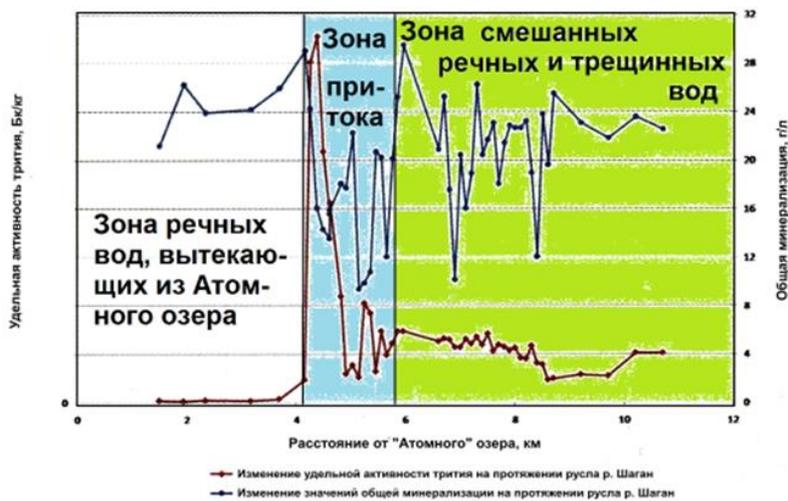


Рисунок 5. Сопоставление графиков удельной активности трития и общей минерализации в водах р. Шаган (на основе данных ИРБЭ)

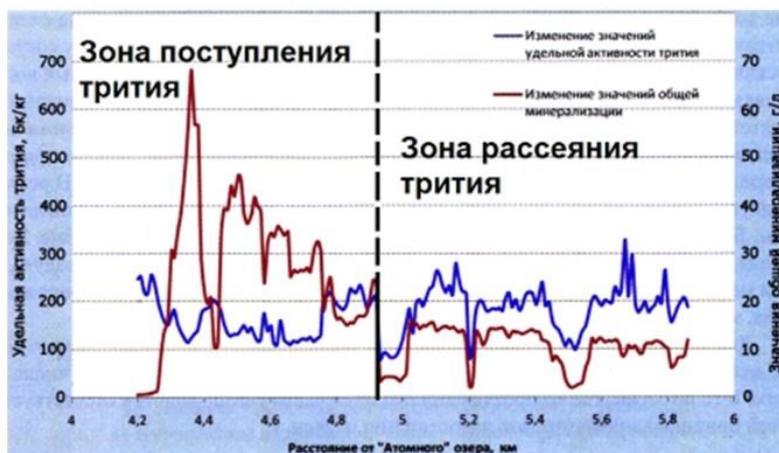
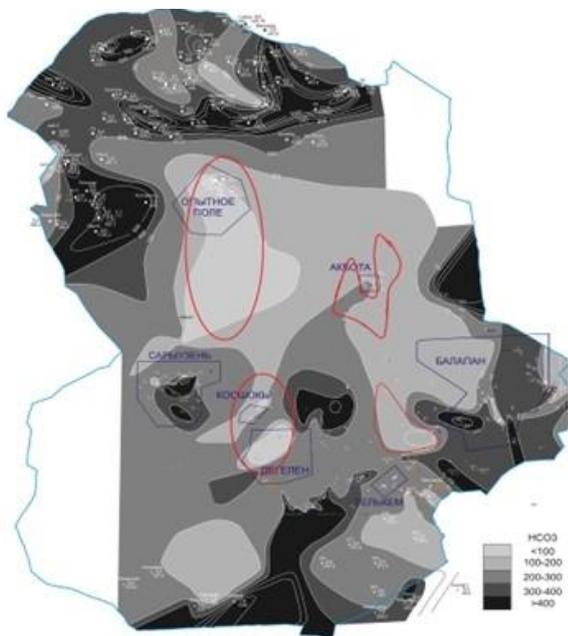
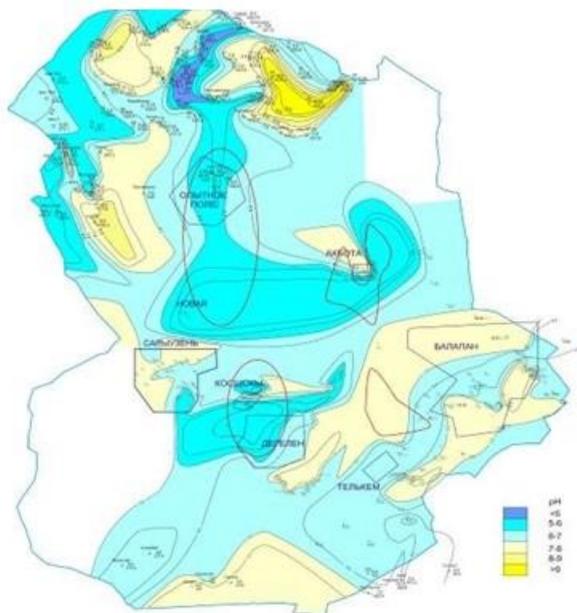


Рисунок 6. Изменение концентрации  $^3\text{H}$  и общей минерализации на участке 4-6 км от Атомного озера, по р. Шаган (на основе данных ИРБЭ)

По характерным особенностям графиков детального гидрогеохимического опробования интервал 4 - 6 км разделяется на две зоны по границе 5 км (рисунок 6). Закономерность разделения определена статистически. Коэффициенты корреляции и тренды этих выборок существенно различны.



а – распределение значений гидрокарбонат-иона.  
Красными контурами показаны зоны, благоприятные по гидрогеохимическим признакам для размещения РАО



б – распределение значений pH

Рисунок 7. Гидрогеохимическая обстановка на территории СИП

Наиболее вероятной причиной повышения активности трития при снижении общей минерализа-

ции речных вод является приток трещинных вод из участков загрязненных продуктами ядерных взрывов. Примыкающий приток слабоминерализованных вод с низкими содержаниями трития, также связан с водопритоком из Жананской зоны смятия, но проходящим без контакта с участками взрывов.

Такое различие свидетельствует об отсутствии смешивания даже при непосредственном контакте чистых и загрязненных вод, отходящих из зоны смятия. Это может быть только в том случае, если на участке водопритока явно выражена линейность потоков подземных вод.

Этот вывод получен на основе статистического исследования имеющихся данных без привлечения дополнительных дорогостоящих буровых и аналитических работ.

Одним из наиболее значимых практических применений данной работы является обоснование районирования территории СИП для выбора участков захоронения радиоактивных отходов (рисунок 7). На карте распределения значений содержания гидрокарбоната-иона и pH выделены наиболее приемлемые зоны для захоронения радиоактивных отходов.

Районирование производится на основе выделения зон:

- низких средних значений pH (зоны застоя потоков вод);
- низких значений  $HCO_3^-$  (зоны минимального выщелачивания радионуклидов);
- минимальной связи pH и  $HCO_3^-$  с другими химическими компонентами.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

– Статистическая обработка гидрогеохимических данных позволяет получить дополнительные сведения по гидрогеохимической обстановке на территории СИП и доказать их закономерность и необходимость расширения количества определяемых химических элементов. В частности, необходимо дополнение анализов на кремний.

– Установлено явное отсутствие взаимосвязей pH и  $HCO_3^-$  с другими гидрогеохимическими данными. По значениям pH и  $HCO_3^-$  а также их связи с другими параметрами, территория СИП разделена на зоны движущихся и застойных вод.

– Предложено использование статистических особенностей гидрогеохимических данных с целью районирования территории СИП при выборе участков захоронения радиоактивных отходов.

– На основе статистического анализа гидрогеохимических данных, установлена обособленность притоков тритиевых и чистых вод из Жананской зоны смятия в реку Шаган.

– Согласно приведенным данным рекомендуется применение статистических методов при обработке данных гидрогеохимических анализов на территории СИП.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Романов, А.М. Взаимодействие вод с горными породами / А.М. Романов – Алматы, 2003. – С. 128-133.
2. Сборник трудов Института Радиационной безопасности и экологии за 2007-2009: сб. ст. / Тех. ред. О.В. Тоневицкая, О.В. Серая // Павлодар, 2010. – С. 34-35.

### БҰРЫНҒЫ ССП АУМАҒЫНДАҒЫ ТАБИҒИ СУЛАРДЫҢ ХИМИЯЛЫҚ ҚҰРАМЫ БОЙЫНША ДЕРЕКТЕРДІ СТАТИСТИКАЛЫҚ ӨНДЕУ НӘТИЖЕЛЕРІ

Комлев А.В., Романов А.М., Мельничук М.А

*Қазақстан, Курчатов қ., Геофизикалық зерттеулер институты*

Жер бетіндегі және жерасты суларда химиялық элементтер байланысынң заңдылықтарын анықтау үшін статистикалық түсінік пайдаланылған (қос корреляция, корреляциялық матрицалар және байланыстар кестелері). Табиғи сулардың химиялық компоненттері мен жалпы минералдаудың Семей сынау полигоны үшін елеулі, іс жүзінде функционалды байланыстары анықталған. Гидроксил-ионның мөлшерін, сондай-ақ рН мәнін қоспағанда, олар басқа компоненттермен артықшылығында байланысы жоқ болумен сипатталады. Бұл ерекшеліктер назар тартады: олардың кеңістік таралуын қарау негізінде грунт сулардың көзі мен жиналу зоналарын анықтау мүмкін. Дегелең, Қосшоқы және Ақбота учаскелердің гидрогеохимиялық сипаттамаларын ССП-мен тұтасында салыстыруы орындалған. Ядролық сынаулары жүргізілген жерлермен салыстырғанда бұзылмаған учаскелерде грунт сулардың рН шамалы төмендеуі анықталған, бұл радиоактивті қалдықтарды орналастыру үшін учаскенің перспективтігі негіздерінің біреуі болу мүмкін.

### RESULTS OF STATISTICAL DATA PROCESSING ON CHEMICAL COMPOSITION OF NATURAL WATER AT THE FORMER STS

A.V. Komlev, A.M. Romanov, M.A. Melnichuk

*Institute of Geophysical Research, Kurchatov, Kazakhstan*

Statistical representation (pair correlations, correlation matrices and interrelation charts) was used for the establishment of regularities of chemical elements' connection in surface and underground water. Significant, practically functional relations of chemical components of natural water and general mineralization for Semipalatinsk Test Site were established. The exception is the concentration of hydroxyl ion as well as pH value, which is predominantly absent in the context of the rest of the components. These exceptions are of practical interest: based on the study of their spatial distribution, it is possible to detect source zones and ground water accumulations. Comparison of hydro-geo-chemical parameters of Degelen, Kosshaky and Akbota sites with STS in general has been conducted. A slight decrease of pH ground water has been established at undisturbed sites in comparison with the testing areas, which may be one of the foundations of areas prospects for radioactive waste disposal.

УДК 550.344

## РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ НЕОДНОРОДНОСТИ МАГНИТУД В РАБОТАХ ПО СЕЙСМИЧЕСКОМУ ЗОНИРОВАНИЮ ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Мукамбаев А.С., Михайлова Н.Н.

*Институт геофизических исследований, г. Курчатов, Казахстан*

Приводится описание разработанной методики перехода от различных типов магнитуд и энергетического класса сейсмических событий к единой магнитуде, коррелированной с моментной магнитудой  $M_w$ . На этой основе рассчитана магнитуда  $M_{wnew}$ , а также  $MLH_{new}$  для всех сейсмических событий, включенных в каталог землетрясений территории Республики Казахстан и прилегающих регионов с древнейших времен по 2009 г. Это позволяет анализировать совместно данные каталогов за различные периоды времени при изучении сейсмичности и сейсмической опасности территории Казахстана.

### ВВЕДЕНИЕ

Вопрос создания новой карты сейсмического зонирования территорий Казахстана очень актуален. Действующая карта (ОСР 2003 г.) устарела и не отвечает новым данным и современным требованиям. Сейсмологической основой составления карты является каталог землетрясений за длительный период времени.

Созданный каталог землетрясений с древнейших времен по 2009 г. характеризуется большой неоднородностью данных с точки зрения оценки «размера» землетрясений. За почти столетний инструментальный период наблюдений менялись методические подходы к параметризации силы землетрясений, разрабатывались и применялись различные шкалы. В первую очередь это относится к магнитудным шкалам, позволяющим ранжировать землетрясения с помощью безразмерной величины – магнитуды. Понятие магнитуды было введено Ч. Рихтером в 1935 г. [1]. За разные годы в практике рутинных сейсмических наблюдений применялись разные магнитудные шкалы по типу используемых сейсмических волн (по объемным и поверхностным волнам), по типу аппаратуры (по короткопериодным и среднепериодным приборам), по типу используемых калибровочных кривых. В последние годы в мировой практике применяется моментная магнитуда, рассчитываемая через сейсмический момент.

Кроме магнитудных шкал, широко использовалась шкала энергетических классов. Энергетический класс был введен в практику наблюдений Т.Г. Раутиан [56] и получил распространение на всей территории СССР. Энергетический класс имеет прямое отношение к высвобожденной в очаге сейсмической энергии.

Для одного события в каталоге можно найти одно или несколько различных параметров, характеризующих его величину. Но как использовать совместно данные каталога за разные периоды для построения различных карт, расчетов сейсмической опасности, если у разных событий имеются разные характеристики энергии? Встает задача приведения различных типов магнитуд и энергетического класса к

одной наиболее удобной характеристике. Именно этой задаче посвящена данная работа.

### АНАЛИЗ ИМЕЮЩИХСЯ МАГНИТУДНЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК В КАТАЛОГЕ ЗА РАЗНЫЕ ПЕРИОДЫ ВРЕМЕНИ

В каталоге ISC-GEM, в каталоге Центральной Азии, как и в каталоге Казахстана можно увидеть целый набор энергетических и магнитудных характеристик землетрясений, для определения которых используются различные шкалы. Чаще всего на разных этапах определялись значения для следующих различных типов магнитуд –  $M_l$ ,  $mB$ ,  $mb$ ,  $MPVA$ ,  $MLH$ ,  $MLV$ ,  $M_s$ ,  $M_w$  и энергетического класса  $K$ . Для землетрясений доинструментального периода имелись также магнитуды, полученные расчетным путем из анализа макросейсмических данных, которые определяются по картам изосейст [3]. Эти макросейсмические магнитуды были откалиброваны по значениям магнитуды по поверхностным волнам. Такое большое количество вариантов магнитуд связано с использованием различных шкал, типов волн, аппаратурными особенностями мировых и региональных сетей, использованием той или иной стандартной калибровочной кривой.

$M_l$  – локальная магнитуда, введенная Рихтером [1]. Определяется по короткопериодным приборам на основе измерения амплитуд смещений объемных волн. В практике Казахстана практически не используется, но широко используется в других национальных и мировых центрах данных.

$mB$  – объемная магнитуда по Р-волне, зарегистрированной широкополосными приборами [1]. Определяется по значениям амплитуды и периода смещений с помощью калибровочной кривой для расстояний более 20 градусов. В практике Казахстана использовалась редко, ее значения имеются в бюллетенях ГС РАН и мировых центров.

$mb$  – объемная магнитуда, определяемая по Р-волне, зарегистрированной короткопериодными приборами. Определяется по значениям амплитуды и периода смещений с помощью калибровочной кривой Вейта-Клауссона [4] для всего диапазона рас-

стояний. Используется в практике работ Центра данных ИГИ НЯЦ РК и других центров.

*MPVA* – региональная магнитуда по объемным волнам, определяемая по *P*-волне, зарегистрированной короткопериодными приборами. Определяется по значениям амплитуды и периода смещений с помощью региональной калибровочной кривой для Северного Тянь-Шаня [5] для расстояний до 1000 км. Используется в практике работ СОМЭ МОН РК и Центра данных ИГИ.

*MLH* и *MLV* – магнитуда по поверхностным волнам, определяемая по амплитудам и периодам в максимальной фазе поверхностных волн (фаза Эйри), зарегистрированных широкополосными приборами. Различие между ними состоит только в том, на какой компоненте записи производятся измерения: по модулю полного горизонтального вектора и периоду (*MLH*) или по амплитуде и периоду на вертикальной компоненте (*MLV*) [6]. Используются в практике работ СОМЭ и Центра данных ИГИ для эпицентральных расстояний  $2^\circ < \Delta < 160^\circ$  и глубины источника  $h < 50$  км.

*Ms* – магнитуда по поверхностным волнам, определяемая по амплитудам и периодам поверхностных волн для эпицентральных расстояний  $2^\circ < \Delta < 160^\circ$  и глубины источника  $h < 50$ -км по формуле:

$$Ms = \log (A/T)_{max} + 1.66 \log \Delta + 3.3 \quad (1)$$

*Mw* – моментная магнитуда, рассчитываемая через значения сейсмического момента. Введена в 1977 г. Т. Ханксом и Х. Канамори [7]. Сейчас определяется в Международных центрах, данных практически для всех землетрясений с магнитудой  $M > 4,5$ .

*K* – энергетический класс, введенный Т.Г. Раутиан в 1964 г. [2], связан с высвобожденной сейсмической энергией формулой

$$K = \lg E \text{ (Дж)}. \quad (2)$$

Энергетический класс определяется по сумме амплитуд объемных *P*- и *S*-волн, зарегистрированных короткопериодной аппаратурой. Определяется практически для всех региональных событий в СОМЭ и Центре данных ИГИ.

#### ВЫБОР И РАСЧЕТ ОДНОРОДНОЙ МАГНИТУДЫ ДЛЯ КАТАЛОГА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КАЗАХСТАНА

Итак, необходимо было решить два вопроса: 1) какой тип магнитуд следует выбрать в качестве опорного, чтобы его значения были рассчитаны для всех абсолютно событий каталога, т.е. для получения каталога однородного по магнитуде, 2) как получить эти значения? Для решения этих вопросов проведен анализ литературных данных по соотношениям различных типов магнитуд в мире. В работе [7] представлен следующий график (рисунок 1).

Как видно, магнитуды, определяемые на основе измерения амплитуд сейсмических волн, имеют свойство насыщения при высоких значениях магни-

туд, т.е. при самых сильных землетрясениях они не отражают их истинную величину. Только магнитуда *Mw* не испытывает насыщения. Эта магнитуда в отличие от других типов связана с сейсмическим моментом, который имеет четкий физический смысл. Сейчас все больше наблюдается тенденция описания землетрясений именно с помощью магнитуды *Mw*. Отметим, что на большом диапазоне магнитуд (практически до магнитуды 8) к магнитуде *Mw* близка магнитуда по поверхностным волнам *Ms*, которая в свою очередь близка по значениям с магнитудами *MLH* и *MLV*. Поэтому с разных точек зрения резонно было выбрать в качестве однородной характеристики магнитуду *Mw*. Но, соблюдая преемственность в работах по сейсмическому режиму и опасности, где многие характеристики так или иначе связаны и вычислялись по магнитуде *MLH*, решено вычислить для всех событий и магнитуду *MLH*.

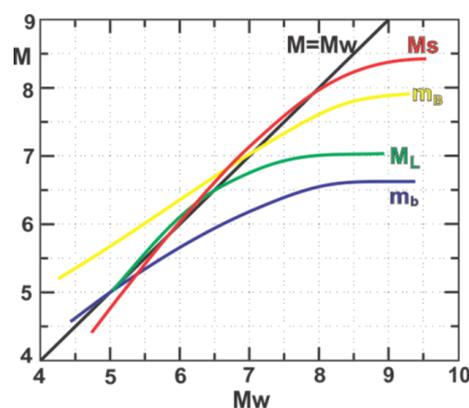


Рисунок 1. Соотношение различных типов магнитуд в диапазоне от 4 до 10

Для ответа на второй вопрос – как получить магнитуду *Mw* для всех событий – был проведен детальный анализ имеющихся в каталоге Казахстана и прилегающих территорий значений магнитуд. Для каждого события каталога имеется хотя бы одно значение магнитуды или класса, большая часть значений магнитуд получена по инструментальным данным. Для первой части каталога до 1990 года можно увидеть, что имелись значения расчетной магнитуды *Mr*(*Y-K*), она взята из специализированного каталога [8], представленного нам из ИФЗ РАН, который являлся основой при создании карт сейсмического районирования территории России и Северной Евразии [9]. Магнитуда *Mr* – это полученная расчетным путем магнитуда, скоррелированная с *MLH* из других магнитуд с помощью корреляционных соотношений. Она рассчитывалась для тех событий, у которых *MLH* отсутствовала. Имеющиеся инструментально определенные значения *MLH* оставлены и перешли в *M* (*Y-K*). На рисунке 2 показаны гистограммы по годам и количеству событий, у которых имеется значение той или иной рассматриваемой магнитуды или энергетического класса. Как видно из рисунка 2а, большинст-

во событий имеют значения энергетического класса  $K$  (после 1960 г.) и  $MPVA$  (после 1980 г.). Из магнитудных характеристик самой представительной является магнитуда  $MPVA$  (рисунок 2б). Безусловно, количество значений магнитуд или классов связано с общим количеством событий. Но не для всех событий в данный год на всей территории Центральной Азии имелся тот или иной параметр.

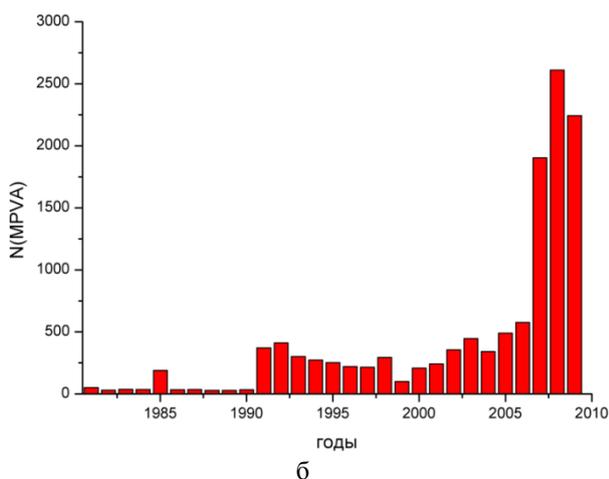
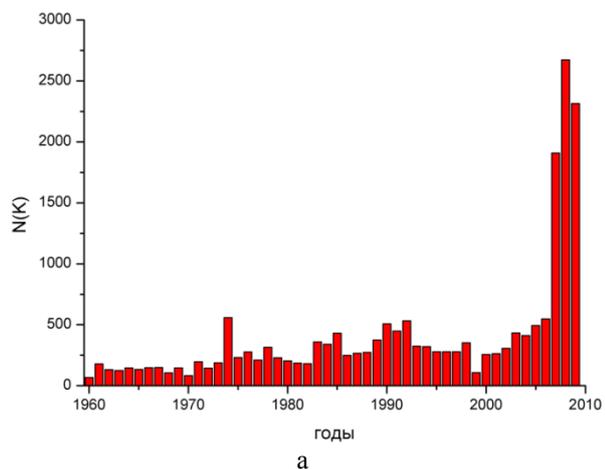


Рисунок 2. Гистограммы распределения энергетических характеристик по годам: а – для  $K$ , б – для  $MPVA$

На рисунке 3 показаны гистограммы количества событий в каталоге по годам и количество событий, у которых имеется значение энергетического класса  $K$  (рисунок 3а) и магнитуды  $MPVA$  (рисунок 3б). Не во всех национальных центрах обработки определялись одинаковые параметры, в ряде случаев события или их магнитуды были взяты из мировых каталогов.

При составлении унифицированного каталога данные по магнитудам брались из разных мировых каталогов, таких как ISC (International Seismological Centre), Гарвардский каталог [10], NEIC (National Earthquake Information Centre в США) и MOS (Опытно-методической экспедиции ИФЗ РАН в Обнинске) [11], каталог GFZ [12] и другие. Каждый из

мировых каталогов дает определения магнитуд по объемным и поверхностным волнам, т.е.  $mb$  или  $mB$ ,  $MLH$  или  $M_s$ , а также значения моментной магнитуды  $M_w$ . Определяемая в отечественной практике магнитуда по поверхностным волнам на горизонтальной составляющей  $MLH$  – третья по количеству значений в нашем каталоге, важно, что ей соответствует магнитуда  $M_s$ .

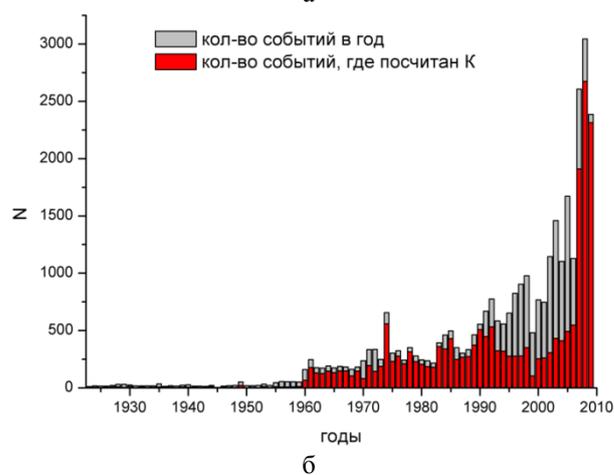
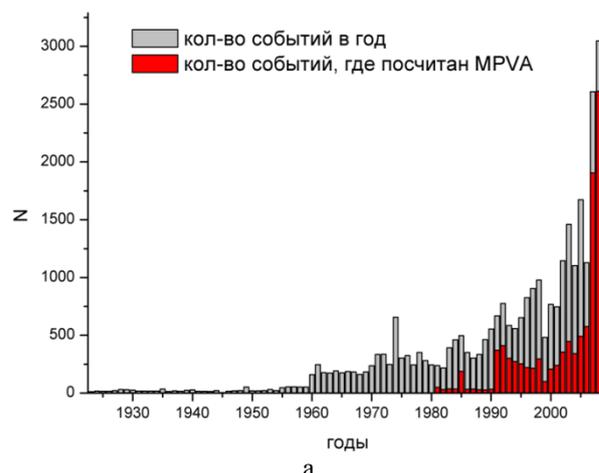


Рисунок 3. Гистограммы распределения по годам общего количества событий в каталоге и количества наиболее представительных энергетических характеристик: а – для  $K$ , б – для  $MPVA$

В результате анализа имеющихся в каталоге измеренных на основе инструментальных данных характеристик, была выбрана схема перехода к однородной магнитуде, соответствующей  $M_w$ , для всего каталога:

1. Значения  $M_w$  из каталога ISC-GEM для всех наиболее сильных землетрясений Центральной Азии были перенесены в каталог Центральной Азии в качестве однородной магнитуды.

2. Значения  $M_w$  для других событий Центральной Азии, которых не было в каталоге ISC-GEM, но вошедших в Гарвардский каталог, либо имеющихся в каталоге ISC или GFZ, были внесены в каталог

Центральной Азии в качестве однородной магнитуды.

3. Имеющиеся инструментальные определения магнитуды по поверхностным волнам  $M_s$ ,  $MLH$ ,  $MLV$  для тех землетрясений, у которых нет  $M_w$ , были пересчитаны в  $M_w$  по зависимостям, полученным в Международном центре данных.

4. Для оставшейся части землетрясений, у которых не было определений  $M_w$ ,  $M_s$ ,  $MLH$ ,  $MLV$ , необходимо было получить надежные соотношения для расчета однородной магнитуды из значений по объемным волнам  $K$  и  $MPVA$  или  $mb$ .

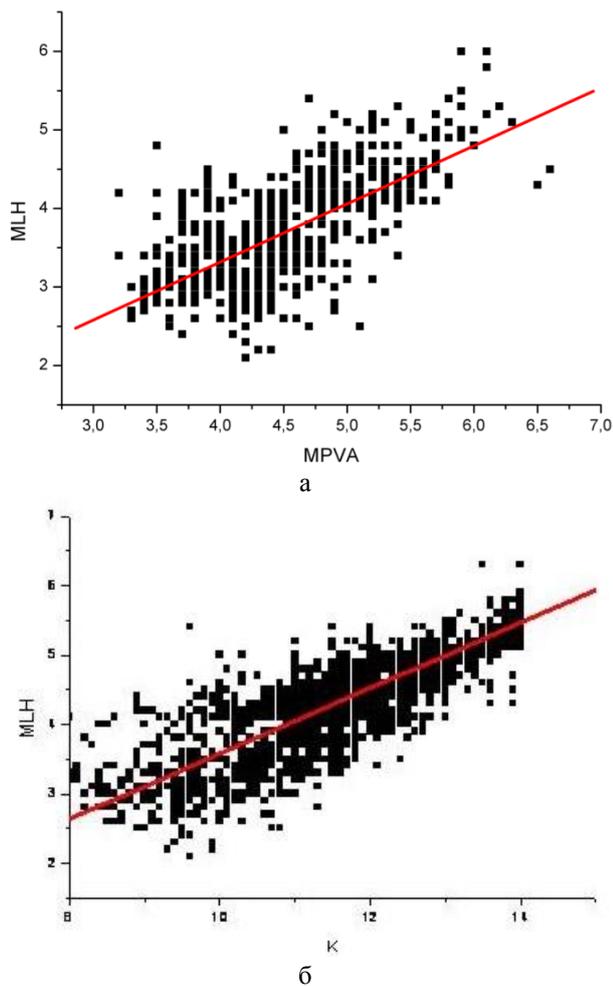


Рисунок 4. Графики зависимостей между магнитудой  $MLH$  и  $MPVA$  и  $MLH$  и  $K$ , полученные методом линейной регрессии

Для решения поставленной задачи были рассчитаны уравнения линейной и ортогональной регрессии между значениями магнитуды  $MLH$  и другими магнитудами и энергетическим классом. В процессе оценки магнитуды при помощи различных шкал неизбежно возникают ошибки измерений. Использование стандартной линейной регрессии (ЛР) предполагает, что независимая переменная определяется без-

ошибочно, либо имеет совсем незначительную погрешность по сравнению с ошибками измерения зависимой переменной. Использование ЛР не должно полностью удовлетворять преобразованию магнитуд, так как обе оценки магнитуд, между которыми рассчитывается уравнение регрессии, содержат ошибки. При применении общей ортогональной регрессии (ОР) принимаются во внимание ошибки по обоим типам магнитуд [13]. ОР получается при помощи минимизации квадратов ортогональных расстояний к линии максимального линейного соответствия, в то время как ЛР выводится путем минимизации квадратов вертикальных смещений. На рисунке 4 представлены результаты расчетов линейной регрессии между  $MLH$ – $MPVA$ ,  $MLH$ – $K$ .

Кроме того, исследованы соотношения между различными определениями поверхностных магнитуд. В таблице 1 приведены уравнения линейной регрессии, рассчитанные коэффициенты корреляции и среднеквадратичные отклонения.

Таблица 1. Уравнения линейной регрессии, коэффициенты корреляции и среднеквадратичные отклонения

Зависимость	R	SD
$MLH = 0,36 + 0,74 \cdot MPVA$	0,68	0,51
$MLH = 0,34 + 0,79 \cdot mb$	0,68	0,45
$MLH = -0,82 + 0,45 \cdot K$	0,86	0,36
$MLH = -1,99 + 1,31 \cdot Mw$	0,95	0,27
$MLH = 0,83 + 0,84 \cdot Ms$	0,75	0,24

Как видно из таблицы 1, коэффициенты корреляции для всех вариантов расчетов достаточно высокие. Затем были рассчитаны уравнения ортогональной регрессии. Графики ортогональной регрессии приведены на рисунке 5. В таблице 2 представлены уравнения ортогональной регрессии.

Таблица 2. Уравнения ортогональной регрессии между  $MLH$  и другими типами магнитуд и энергетическим классом

Зависимость
$MLH = 0,47 K - 1,15$
$MLH = 1,34 \cdot mb - 1,89$
$MLH = 1,14 \cdot MPVA - 1,45$
$MLH = 0,9972 \cdot Ms - 0,0057$
$MLH = 1,37 \cdot Mw - 2,28$

Для магнитуды  $MLH$  и  $M_s$  мы получили уравнение ортогональной регрессии  $MLH = 0,997 \cdot M_s - 0,005$ , из которого видно, что достаточно обоснованно можно считать  $MLH \approx M_s$ .

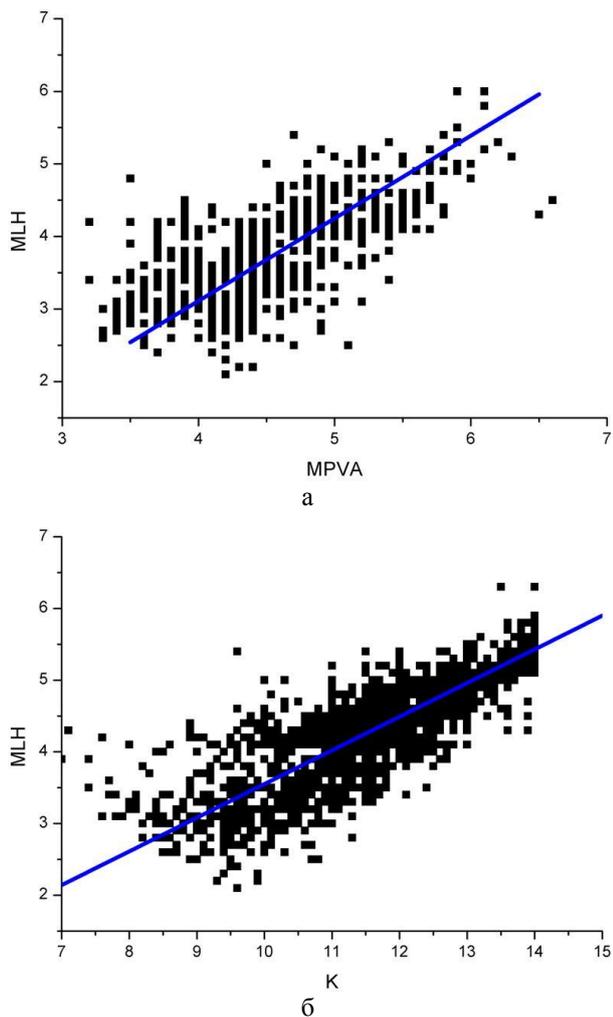


Рисунок 5. Графики зависимостей между магнитудой  $MLH$  и  $MPVA$  и энергетическим классом, полученные методом ортогональной регрессии

На рисунке 6 приведены примеры сравнения корреляционных зависимостей  $MPVA$ ,  $K$  и  $MLH$ , полученных разными способами.

Для того, чтобы выяснить, какая из полученных формул более оптимальна и должна быть приоритетной для пересчета магнитуд, были выбраны такие события из каталога, у которых имеются инструментально определенные для каждого события значения  $MLH$  и  $K$ , и  $MLH$  и  $MPVA$ , т.к. эти выборки наиболее представительные. Для всех событий, где есть  $MLH$  и  $K$ , из значений  $K$  рассчитывалась магнитуда  $MLH_{11}$  – по формуле линейной регрессии и  $MLH_{12}$  – по формуле ортогональной регрессии. Для всех выбранных событий, где есть  $MLH$  и  $MPVA$ , из значений  $MPVA$  рассчитывались  $MLH_{21}$  – по формуле линейной регрессии и  $MLH_{22}$  – по формуле ортогональной регрессии. Затем анализировались значения невязок  $\delta M$ , которые были получены путем вычитания из полученных значений  $MLH_{11}$ ,  $MLH_{12}$ ,  $MLH_{21}$ ,  $MLH_{22}$  истинного значения  $MLH$  для данного события. На рисунке 7а показано кумулятивное распре-

деление этих невязок. Аналогичные процедуры проделаны с невязками магнитуд, рассчитанных через энергетический класс. На рисунке 7б показано кумулятивное распределение этих невязок. Из рисунков 7а и 7б видно, что разброс значений для невязок  $\delta M_{12}$ , а также  $\delta M_{22}$ , рассчитанных по формуле ортогональной регрессии, хоть и незначительно, но меньше, чем у рассчитанных по линейной регрессии значений  $\delta M_{11}$  и  $\delta M_{21}$ . Далее расчет однородной магнитуды производился по формулам ортогональной регрессии.

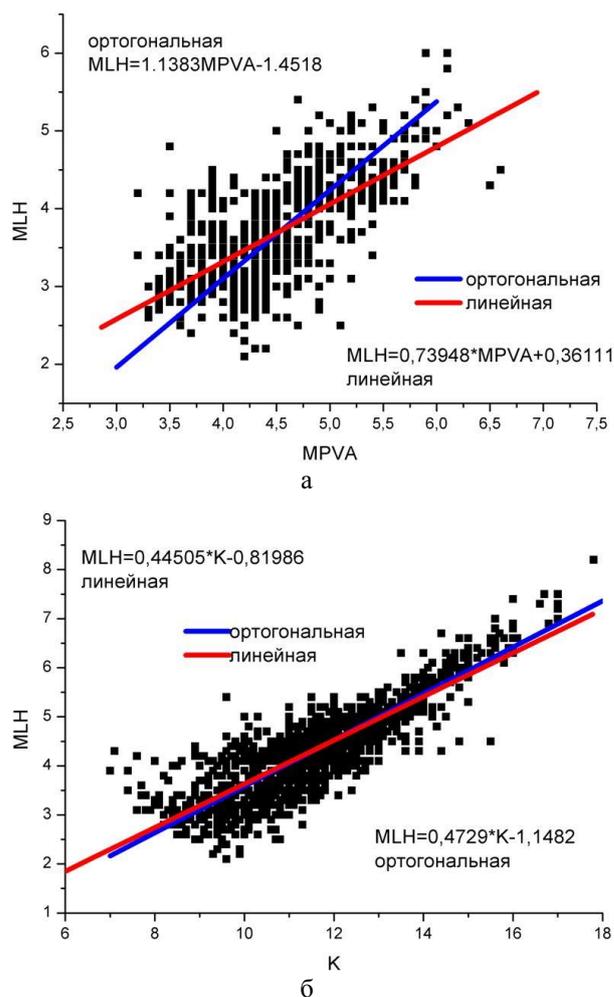


Рисунок 6. Корреляционная зависимость между  $MLH$  и  $MPVA$  – а,  $MLH$  и  $K$  – б

Необходимо было решить вопрос, каким путем идти к  $MLH$ , если имеются для данного события и значение  $MPVA$ , и  $K$ ? Была создана выборка таких событий и оценены параметры распределения отклонений  $\delta M_{12}$  и  $\delta M_{22}$ , рассчитанных способом ортогональной регрессии (рисунок 8). Из рисунка 8 видно, что распределение, полученное по энергетическим классам, характеризуется меньшим разбросом, чем рассчитанное по объемным магнитудам. Был сделан вывод, что при наличии нескольких характеристик – магнитуд по объемным волнам и  $K$  – расчет следует проводить от  $K$ .

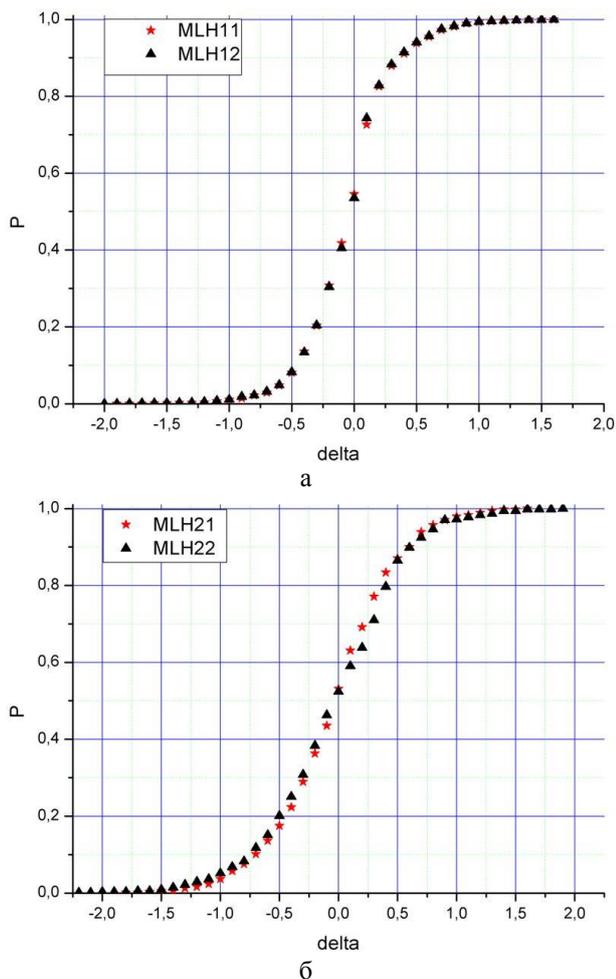


Рисунок 7. Кумулятивные распределения значений  
а)  $\delta M_{11}$  и  $\delta M_{12}$ , б)  $\delta M_{21}$  и  $\delta M_{22}$

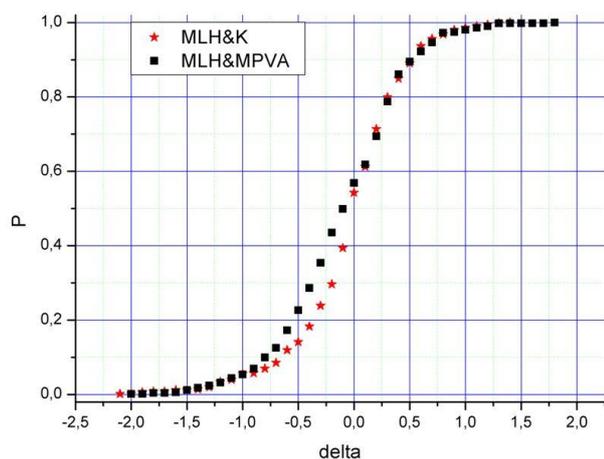


Рисунок 8. Кумулятивные распределения значений  
 $\delta MLH_{12}$  и  $\delta MLH_{22}$

Для перехода от  $MLH$  и  $M_s$  к величине  $M_w$  было решено использовать соотношение, полученное на представительном материале в Международном центре данных при составлении каталога ISC-GEM. Это соотношение показано на рисунке 9.

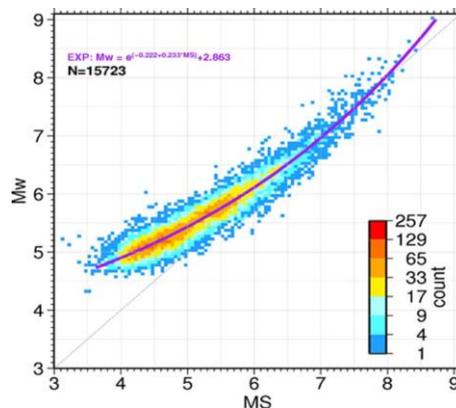


Рисунок 9. Соотношение значений магнитуды по поверхностным волнам  $M_s$  с моментной магнитудой  $M_w$  [14]

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований для всех событий каталога территории Казахстана и прилегающих регионов рассчитана магнитуда  $M_{w_{new}}$  (таблица 3), которая стандартна для всего периода времени и скоррелирована с  $M_w$ , а также  $MLH_{new}$ , что позволяет анализировать совместно все данные каталога и проводить различные научные исследования при построении карты сейсмического зонирования территории Казахстана и прилегающих территорий, а также при изучении и картировании сейсмической опасности.

Таблица 3. Формулы для расчета однородной магнитуды

$MLH = 0,47 \cdot K - 1,15$ ( $K < 14$ )
$MLH = 1,34 \cdot mb - 1,89$
$MLH = 1,14 \cdot MPVA - 1,45$
$MLH = Mp \cdot (U - K)$
$MLH = M_s$
$M_w = e^{(-0,222+0,223 \cdot M_s)} + 2,863$

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Bormann, Ed. P. IASPEI New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP-2). / Ed. P. Bormann // 2002. Vol.1. P.16-57: GeoForschungsZentrum, Potsdam.
2. Раутиан, Т.Г. Об определении энергии землетрясений на расстояниях до 3000 км. / Т.Г. Раутиан // Труды ИФЗ АН СССР, 1964 – №32 (199). – С. 72-98.
3. Уразаев, Б.М. Сейсмическое районирование Казахстана / Б.М. Уразаев {и др} // Алма-Ата: Наука, 1979 – 119 с.
4. Veith, K.F. Magnitude from short-period P-wavedata / K.F. Veith, G.E. Clawson // Bull. Seism. Soc. Am., 1972. – Vol 62. – P. 435 – 452.
5. Михайлова, Н.Н. Калибровочная функция  $s(d)$  для определения  $M_{PVA}$  землетрясений Северного Тянь-Шаня / Н.Н. Михайлова, Н.П. Неверова // Комплексные исследования на Алма-Атинском прогностическом полигоне. – Алма-Ата: Наука, 1986. – С. 41 – 47.
6. Инструкция о порядке производства и обработки наблюдений на сейсмических станциях ЕССН СССР / Отв. сост.: Н.В. Кондорская, З.И. Аранович и др. М.: Наука, 1981. – С. 110-159.
7. Kanamori, H. Magnitude scale and quantification of earthquakes. In: S.J. Duda and K. Aki (Editors), Quantification of Earthquakes. // Tectonophysics, 1993. – С. 185-199.
8. Кондорская Н.В. Специализированный каталог землетрясений для сейсмического районирования Северной Евразии / Н.В. Кондорская, В.И. Уломов // Основные достижения Объединенного института физики Земли им. О.Ю. Шмидта за 1992-1996 гг. Т. 1. – М.ОИФЗ. – 1996. – С. 108-109.
9. Уломов, В.И. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации - ОСР-97. Масштаб 1:8000000. Объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах. / В.И. Уломов, Л.С. Шумилина // Карта на 4-х листах. М.: ОИФЗ, 1999-2000. 57 с. М.: ОИФЗ-РОСКАРТОГРАФИЯ, 2000.
10. Бюллетень Международного сейсмологического центра (ISC) [Электронный ресурс] <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/catalogue/>
11. Бюллетень опытно-методической экспедиции ИФЗ РАН в Обнинске [Электронный ресурс] <http://www.ceme.gsras.ru/about.htm>
12. Каталог GFZ [Электронный ресурс] <http://geofon.gfz-potsdam.de/>
13. Overview of the ISC-GEM Catalogue [Электронный ресурс] <http://www.isc.ac.uk/iscgem/overview.php>
14. Ranjit, D. General Orthogonal Regression Relations between Body Wave and Moment Magnitudes / D. Ranjit, H.R. Wason, M.L. Sharma // Seismological Research Letters, 2013. – Vol.84 (2). – P. 219-224.

### **ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ АУМАҒЫН СЕЙСМИКАЛЫҚ ЗОНАЛАУ БОЙЫНША ЖҰМЫСТАРДА МАГНИТУДАЛАРДЫҢ БІРТЕКТІ ЕМЕСТІГІ ПРОБЛЕМАЛАРЫН ШЕШУ**

**Мукамбаев А.С., Михайлова Н.Н.**

*Қазақстан, Курчатов қ., Геофизикалық зерттеулер институты*

Сейсмикалық оқиғалардың магнитудалары мен энергетикалық класстарының әр түрлерінен  $M_w$  мезетті магнитудалармен корреляцияланған бірыңғай магнитудаға ауысудың әзірленген әдістемесін сипаттауы келтіріледі. Осы негізінде Қазақстан аумағы мен жанасқан аймақтарындағы ежелгі заманнан 2009 ж. дейінгі жерсілкінулердің каталогына енгізілген барлық сейсмикалық оқиғалардың  $M_{wnew}$  магнитудасы, сондай-ақ  $MLH_{new}$  есептелген. Бұл Қазақстан аумағының сейсмикалығын және сейсмикалық қауіптілігін зерделеуде уақыттың әр кезеңдері үшін каталогтардың деректерін бірлестіріп талдауына мүмкіншілік береді.

### **SOLUTION TO A PROBLEM OF HETEROGENEITY OF MAGNITUDES IN THE WORKS ON SEISMIC ZONING ON THE TERRITORY OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN**

**A.S. Mukambayev, N.N. Mikhailova**

*Institute of Geophysical Research, Kurchatov, Kazakhstan*

The paper describes a developed methodology of transfer from various types of magnitude and energy class of seismic events to a single magnitude that is correlated with a  $M_w$  moment magnitude. On this basis the  $M_{wnew}$  as well as  $MLH_{new}$  magnitudes were calculated for all seismic events included into the catalog of earthquakes on the territory of the Republic of Kazakhstan and its adjacent regions from ancient times until 2009. This allows to jointly analyze the catalog data for various periods of time when studying the seismicity and seismic hazard on the territory of Kazakhstan.

УДК 556.3:621.039.9

## ГИДРОХИМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ УЧАСТКА ПРОВЕДЕНИЯ ПЯВ (НА ПРИМЕРЕ ОБЪЕКТА 1315)

<sup>1)</sup> Резяпова-Атаханова В.А., <sup>2)</sup> Горбунова Э.М.

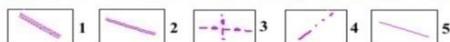
<sup>1)</sup> *Институт геофизических исследований, г. Курчатов, Казахстан*

<sup>2)</sup> *Институт динамики геосфер Российской академии наук, г. Москва, Россия*

Приведены результаты предварительного анализа гидрогеохимической обстановки на участке (размером 4×4 км) проведения подземного ядерного взрыва (ПЯВ), расположенном в центральной части площадки Балапан Семипалатинского испытательного полигона. В работе использованы фондовые данные, полученные в период проведения ПЯВ с 1985 г. по 1987 г. и полевых изысканий, выполненных в 2004–2008 гг. по проекту МНТЦ К-893. На примере скважины 1315 показана зависимость химического состава подземных вод от структурно-геологических условий и гидрогеодинамической обстановки участка.

### ВВЕДЕНИЕ

В рамках научно-исследовательских работ, проводимых коллективом сотрудников Института геофизических исследований, выполнен предварительный анализ гидрогеохимической обстановки участка размером 4×4 км, расположенного в центральной части площадки Балапан Семипалатинского полигона (рисунок 1).



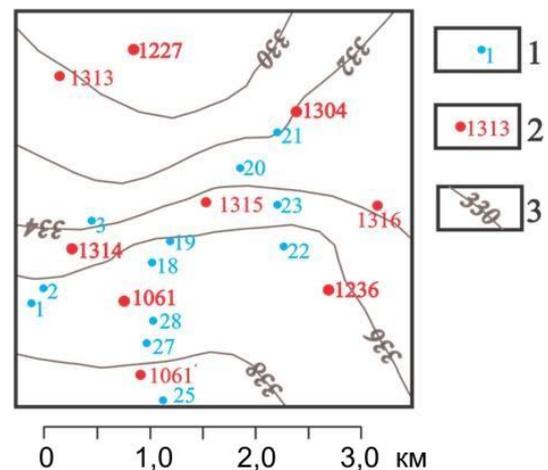
разломы: 1 – региональные; 2-4 – северо-западного, субширотного и северо-восточного направлений; 5 – второстепенные

Рисунок 1. Обзорная карта площадки Балапан

В пределах рассматриваемой территории в период с 1982 г. по 1985 г. пройдено 12 скважин глубиной от 68 до 100 м на расстояниях от 0,3 до 3 км от боевых скважин (рисунок 2). В качестве объекта наблюдений выбран водоносный горизонт, приуроченный к зоне экзогенной трещиноватости скальных пород, характеризующийся региональным развитием на полигоне.

Основная направленность гидрогеологических исследований на I этапе исследований заключалась в изучении реакции подземных вод на взрывное воздействие. После закрытия полигона работы II этапа

направлены на мониторинг состояния массива горных пород, подверженного техногенным изменениям на локальных участках, сопряженных с проведением подземных ядерных взрывов (ПЯВ).



здесь и далее скважины: 1 – наблюдательные, 2 – экспериментальные; 3 – изогипсы рельефа

Рисунок 2. Схема участка работ

До начала комплексных геолого-геофизических и гидрогеологических исследований на выбранном участке с 1972 г. по 1984 г. было выполнено 5 ПЯВ, в том числе и самое мощное испытание на СИП в скважине 1061. В период мониторинга подземных вод проведено 2 ПЯВ: 15 мая 1985 г. в скважинах 1061 бис-1341 и 12 марта 1983 г. в скважине 1315 (рисунок 2). Данные изменения режима подземных вод при ПЯВ на выбранном участке использованы при анализе гидрогеохимической обстановки [1].

По данным геологической изученности территория Балапана откартирована в масштабе 1:50000. В отчетах и на гидрогеологических картах показан солевой состав разновозрастных водоносных горизонтов, но не уделено должного внимания закономерностям распространения различных типов подземных вод с учетом гидрогеологической ситуации и особенностей геологического строения [2, 3].

В данной работе на примере одного из участков площадки Балапан выполнен предварительный анализ распределения основных макрокомпонентов по площади и в разрезе на фоне изменения гидрогеодинамической обстановки по состоянию на 1985–1987 гг. и 2004–2008 гг. В работе использованы фондовые данные, полученные в период проведения ПЯВ с 1985 г. по 1987 г., и полевых изысканий, выполненных в 2004–2008 гг. по проекту МНТЦ К-893. Установлено, что химический состав подземных вод зависит от структурно-геологических условий и гидрогеодинамической обстановки участка.

#### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Методический подход к изучению гидрогеохимической обстановки участка работ заключался в сборе имеющихся фондовых данных по техническим параметрам наблюдательных скважин (датам бурения, конструкции, контрольным замерам глубин, прочисткам), видам геофизических исследований и гидрогеологических опробований с составлением сводных таблиц. Отдельно проводилась выборка и систематизация результатов химического анализа проб воды, отобранных из скважин в период проведения ПЯВ и мониторинга подземных вод, которые использовались для построения графиков и диаграмм. Соотношение концентраций основных макрокомпонент солевого состава рассматривалось как для каждой скважины, так и по годам для характеристики гидрогеохимических условий участка.

Необходимо отметить, что химические анализы проб воды в 1985–1987 гг. выполнялись в лаборатории полевого подразделения – партии 27 экспедиции 16-го района ПГО «Гидроспецгеология», в 2004–2008 гг. – на базе Института геофизических исследований по общепринятым методикам [4, 5, 6, 7, 8]. Сопоставление полученных данных свидетельствует об относительно высокой сходимости результатов и укладывается в допустимые погрешности метода определения солевого состава.

Для учета влияния инфильтрационного питания на режим опорного водоносного горизонта были привлечены метеосведения (количество атмосферных осадков, среднемесячная температура воздуха) за 1985–2013 гг., собранные по метеорологическому посту, расположенному в г. Курчатов.

Составленные для выбранного участка схемы изолиний уровня подземных вод по данным режимных наблюдений использовались в качестве основы для построения схем распределения основных макрокомпонент (анионов хлора и сульфатов) и минерализации. Особенности геологического строения, палеорельефа и гидрогеодинамической обстановки учитывались при анализе гидрогеохимических условий территории исследований.

#### ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ УЧАСТКА

Рассматриваемый участок расположен в пределах аллювиально-пролювиальной равнины, пологонаклоненной на северо-восток с уклоном до 0,003. Дневная поверхность в эпицентральных зонах ПЯВ подвержена техногенной перепланировке, связанной с образованием воронок проседаний, бугров пучений и протяженных трещин. На остальной территории поверхность слабоволнистая, задернованная.

Геологическое строение участка изучено в разрезе на глубину до 600 м. Преимущественное развитие получают осадочно-эффузивные отложения кояндинской свиты нижнего карбона, представленные сланцами, песчаниками, туфопесчаниками. Породы неравномерно трещиноватые, участками окремененные, пронизанные кварц-карбонатными прожилками и дайками порфириров. Мощность зоны экзогенного выветривания пород в среднем составляет 60 м.

Геологические образования имеют сложный стратиграфический разрез, в строении которого принимают участие различные по литологическому и петрографическому составу породы. Большая роль в геологическом строении принадлежит магматическим породам. Вулканическая и интрузивная деятельность характеризуется многообразием форм проявления. Разрывные нарушения являются важным структурным элементом в тектоническом строении региона. Основными глубинными разрывными структурами являются Калба-Чингизский, Сиректаский и Чинрауский разломы (рисунок 1).

Вдоль северо-западной и восточной границ участка коренные породы вскрыты на глубинах 7–15 м, залегают непосредственно под чехлом рыхлых четвертичных отложений (скв.1236) и элювиальных мезозойских образований (скв.1313, 1227 и 1316). На остальной территории плащеобразно перекрыты глинами неогена мощностью до 30 м.

Поверхность кровли коренных пород неравномерно изрезана и характеризуется значительным перепадом высот (рисунок 3).

Палеодолина, протягивающаяся в северо-восточном направлении, контролирует параметры подземного потока, приуроченного к зоне экзогенного выветривания пород. Наиболее возвышенные и относительно плоские водораздельные поверхности, характеризующиеся отсутствием регионального водопора, выступают в качестве локальных областей питания подземных вод. Вдоль южного борта палеодолины по данным режимных наблюдений (по состоянию на 15.12.1984 г. в естественных условиях при отсутствии ПЯВ) зарегистрированы максимальные значения уклонов подземного потока до 0,005 (рисунок 4). По днищу палеодолины изолинии уровня подземных вод разрежены, уклон подземного потока уменьшается до 0,004.

**ГИДРОХИМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ УЧАСТКА ПРОВЕДЕНИЯ ПЯВ  
(НА ПРИМЕРЕ ОБЪЕКТА 1315)**

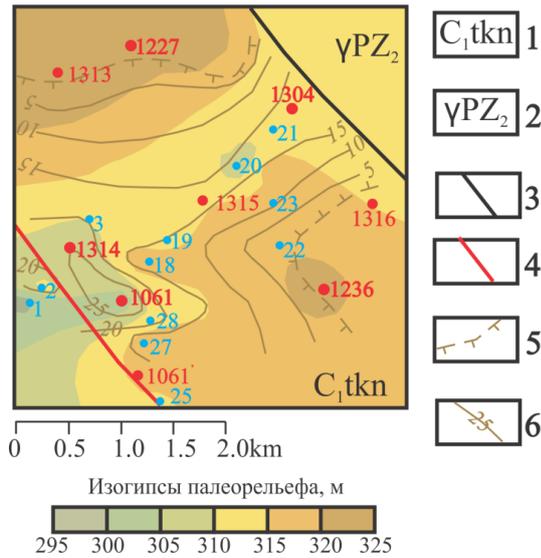


Рисунок 3. Схема палеорельефа участка

Данные наблюдений за уровнем подземных вод по наблюдательным скважинам 4022 и 4023, приближенным к области выклинивания регионального водоупора свидетельствуют о наличии ежегодных сезонных вариаций, связанных с дополнительным инфильтрационным питанием через эрозионные окна, выделенные на участке (рисунок 4). За трехлетний период наблюдений с октября 1984 г. по ноябрь 1987г. выделяются 3 участка с максимальным увеличением амплитуд уровня относительно меженного периода, несмотря на осложнение временной зависимости проведением серии ПЯВ в 1985 г. и 1987 г. (рисунок 5).

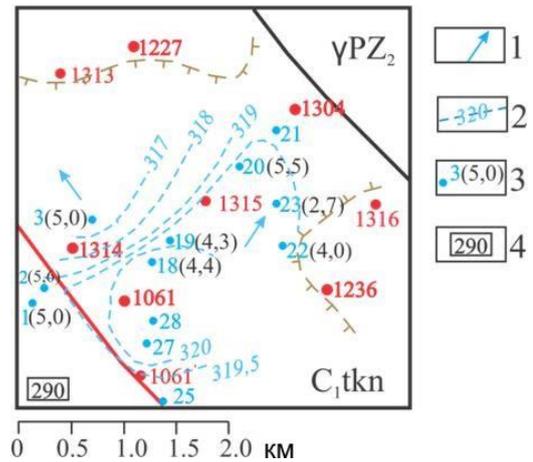


Рисунок 4. Схема изолиний уровня подземных вод по состоянию на 04.12.1985 г.

Амплитуда вариаций уровней за 1985-1986 гг. составила 1,6 м, в 1986-1987 гг. – 0,8 м, 1987 г. – до 1,2 м. Для безнапорного водоносного горизонта при коэффициенте упругой водоотдачи  $\mu = 0,05$  питание подземных вод соответственно составило 0,21 мм/сут, 0,11 мм/сут и 0,16 мм/сут, толщина слоя воды, поступающего в водоносный горизонт, достигает 8 см, 4 см и 6 см, модуль подземного стока – 2,5 л/с/км<sup>2</sup>, 1,2 л/с/км<sup>2</sup> и 1,9 л/с/км<sup>2</sup>. Полученные значения коррелируют с годовым количеством выпавших атмосферных осадков, зарегистрированных в 1985-1987 гг. – 290 мм, 194 и 278 мм, и подтверждают наличие устойчивого вклада атмосферного питания в формирование естественных ресурсов подземных вод на территории полигона.

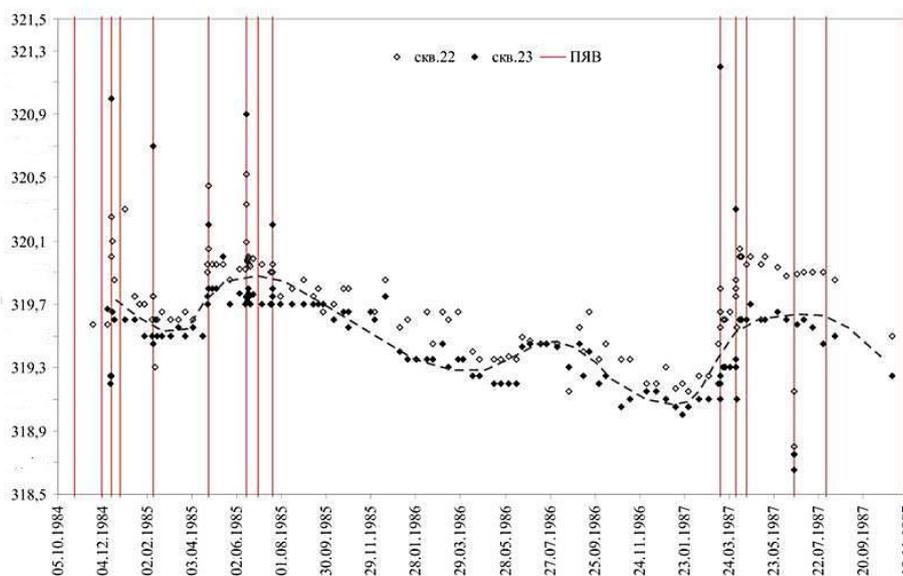
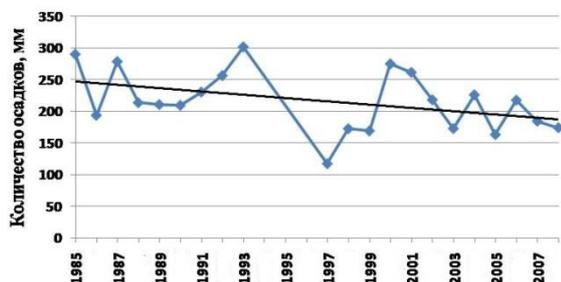
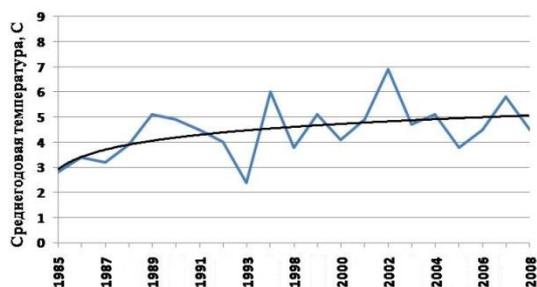


Рисунок 5. Диаграмма уровня подземных вод

Амплитуда вариаций уровней за 1985–1986 гг. составила 1,6 м, в 1986–1987 гг. – 0,8 м, 1987 г. – до 1,2 м. Для безнапорного водоносного горизонта при коэффициенте упругой водоотдачи  $\mu = 0,05$  питание подземных вод соответственно составило 0,21 мм/сут, 0,11 мм/сут и 0,16 мм/сут, толщина слоя воды, поступающего в водоносный горизонт, достигает 8 см, 4 см и 6 см, модуль подземного стока – 2,5 л/с/км<sup>2</sup>, 1,2 л/с/км<sup>2</sup> и 1,9 л/с/км<sup>2</sup>. Полученные значения коррелируют с годовым количеством выпавших атмосферных осадков, зарегистрированных в 1985–1987 гг. – 290 мм, 194 и 278 мм, и подтверждают наличие устойчивого вклада атмосферного питания в формирование естественных ресурсов подземных вод на территории полигона.



а)



б)

Рисунок 6. Графики по данным метеостанции г. Курчатова: а – количество атмосферных осадков, б – среднегодовая температура

Собранные метеоданные за период наблюдений 1985–2013 гг. свидетельствуют об устойчивом тренде уменьшения количества выпадающих атмосферных осадков и увеличении значений среднемесячной температуры воздуха на территории Семипалатинского испытательного полигона (рисунок 6 а, б).

#### ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКАЯ ОБСТАНОВКА

В пределах рассматриваемого участка в связи со значительным изменением глубины залегания кровли водовмещающих пород прослеживается вертикальная гидрогеохимическая зональность. На водоразделе по состоянию на 1985 г. до проведения серии ПЯВ локально распространены слабосолоноватые воды хлоридно-сульфатные кальциево-натриевого типа с минерализацией 2,7 г/л (скв.4023) (рисунок 4). Вниз по склону палеодолины преимущественное развитие получают сильносолоноватые воды с минерализацией до 5,5 г/л хлоридно-сульфатные кальциево-натриевого типа. По направлению к перуглубленной части днища палеодолины солевой состав подземных вод изменяется, преобладают подземные воды сульфатно-хлоридные кальциево-натриевого типа (скв.4001-4003). Выявленная вертикальная гидрогеохимическая зональность сохраняется на протяжении всего ряда наблюдений.

Данные гидрогеохимического мониторинга указывают на наличие зависимости между минерализацией и параметрами подземного потока, которые выдерживаются как при локальных изменениях структуры подземного потока, связанных с проведением ПЯВ, так и при установленном региональном снижении уровня поверхности. В частности, при проведении ПЯВ 15.06.1985 г. в скважинах 1061бис-1341 на юге участка в наблюдательных скважинах зарегистрирован подъем уровня с амплитудой от 0,6 м (скв.4003) до 2 м (скв.4002, 4019) (рисунок 7).

В солевом составе подземных вод прослежено снижение содержания основных макрокомпонент и минерализации (таблица 1).

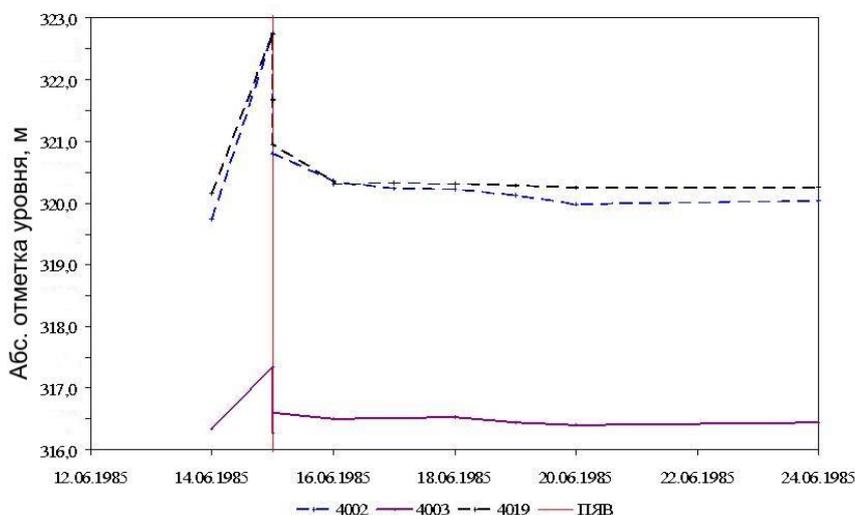


Рисунок 7. Диаграмма изменения уровня при ПЯВ 1061 бис-1341

**ГИДРОХИМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ УЧАСТКА ПРОВЕДЕНИЯ ПЯВ  
(НА ПРИМЕРЕ ОБЪЕКТА 1315)**

*Таблица 1. Результаты сокращенного химического анализа*

Номер пробы	Дата анализа	pH	CO <sub>2</sub>	Размерность	Содержание катионов				Содержание анионов				M
					Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	ΣK	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	ΣA	
4002	13.06.1985	7,3	7,0	Мг/дм <sup>3</sup>	1027,00	519,00	266,00	1820,00	1951,00	1794,00	31,00	3776,00	5581,00
	25.06.1985	6,7	9,0	Мг/дм <sup>3</sup>	1035,00	471,00	214,00	1727,00	1887,00	1577,00	24,00	3488,00	5203,00
	X <sub>1</sub> -X <sub>2</sub>	0,6	-2,0	Мг/дм <sup>3</sup>	-8,00	48,00	52,00	93,00	64,00	217,00	7,00	288,00	378,0
	(X <sub>1</sub> -X <sub>2</sub> )·100/X <sub>1</sub> , %	8,2	-28,6	%	-0,78	9,25	19,55	5,11	3,28	12,10	22,58	7,63	6,8
4003	13.06.1985	6,7	13,0	Мг/дм <sup>3</sup>	1155,00	362,00	192,00	1717,00	2135,00	1148,00	24,00	3307,00	5012,00
	25.06.1985	6,6	13,0	Мг/дм <sup>3</sup>	1141,00	338,00	167,00	1648,00	2080,00	1020,00	24,00	3124,00	4760,00
	X <sub>1</sub> -X <sub>2</sub>	0,1	0,0	Мг/дм <sup>3</sup>	14,00	24,00	25,00	69,00	55,00	128,00	0,00	183,00	252,0
	(X <sub>1</sub> -X <sub>2</sub> )·100/X <sub>1</sub> , %	1,5	0,0	%	1,21	6,63	13,02	4,02	2,58	11,15	0,00	5,53	5,0
4019	06.06.1985	6,4	20,0	Мг/дм <sup>3</sup>	831,00	326,00	183,00	1343,00	883,00	2022,00	37,00	2942,00	4267,00
	25.06.1985	5,6	16,0	Мг/дм <sup>3</sup>	875,00	298,00	149,00	1328,00	865,00	1965,00	6,00	2836,00	4161,00
	X <sub>1</sub> -X <sub>2</sub>	0,8	4,0	Мг/дм <sup>3</sup>	-44,00	28,00	34,00	15,00	18,00	57,00	31,00	106,00	106,0
	(X <sub>1</sub> -X <sub>2</sub> )·100/X <sub>1</sub> , %	12,5	20,0	%	-5,29	8,59	18,58	1,12	2,04	2,82	83,78	3,60	2,5

Наиболее значимое уменьшение концентрации сульфат-иона на 11–12% и вычисленного сухого остатка на 5–7% зарегистрировано в скважинах 4001 и 4003, удаленных на расстояние 1,2 и 1,5 км от эпицентра ПЯВ в скважине 1061бис, пройденных в пределах палеодолины. Изменение содержания сульфат-иона и минерализации в подземных водах, распространенных вдоль склона палеодолины, находятся в пределах точности определения макрокомпонент (по скв.4019, расположенной на расстоянии 1,3 км).

Напротив, повышенные значения концентрации гидрокарбонат-иона и углекислого газа в пробах воды, отобранных из скважины 4019 до проведения ПЯВ, по сравнению с данными химического анализа проб воды по скважинам 4002 и 4003 (таблица 1), подтверждают наличие вертикальной гидрогеохимической зональности. Соответственно, после проведения ПЯВ содержание гидрокарбонат-иона и углекислого газа в подземных водах, развитых вдоль погребенного склона палеодолины, уменьшилось в 5 раз (скв.4019), в пределах палеодолины по скважине 4002, наиболее приближенной к эпицентру ПЯВ, понизилось в 1,3 раз, по скважине 4001 – не изменилось.

Наиболее значимые вариации водородного показателя также прослежены вдоль склона палеодолины, реакция подземных вод изменилась от слабокислой к кислой. Выявленная закономерность взаимосвязана с амплитудой изменения пьезометрической поверхности водоносного горизонта (рисунок 7). В скважинах 4002 и 4019 увеличение гидростатического напора при ПЯВ на 0,2 атм привело к снижению значения водородного показателя на 8–12 %. Соответственно, и наиболее значимые уменьшение содержания катионов кальция и магния на 9 % и

19% зарегистрировано по скважинам, расположенным в ближней зоне на расстоянии 1,2–1,3 км.

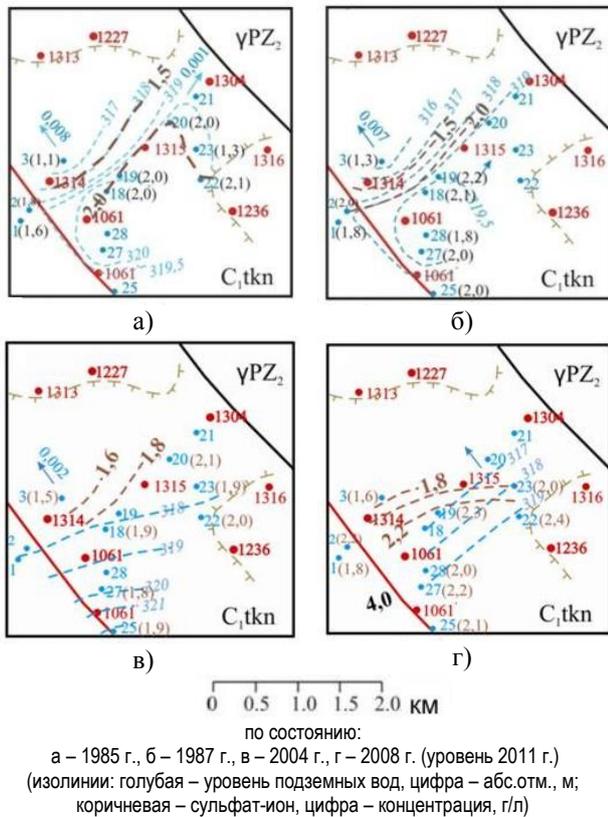
Увеличение напора при ПЯВ в скважине 4003, расположенной на расстоянии 1,5 км от эпицентра, на 0,06 атм значение водородного показателя и содержание углекислого газа не изменилось. Таким образом, кратковременное изменение гидрогеодинамического режима при ПЯВ приводит к изменениям гидрогеохимической обстановки. Реакция легкоподвижной фракции, содержащейся в подземных водах, на взрывное воздействие зависит от эпицентрального расстояния. Уменьшение содержания малоподвижного сульфат-аниона предопределяется условиями приуроченности водовмещающей толщи к днищу палеодолины.

Выявленные закономерности изменения химического состава подземных вод при проведении ПЯВ прослеживаются и при длительном мониторинге гидрогеодинамической обстановки рассматриваемого участка. Для сравнительного анализа были выбраны результаты режимных наблюдений за периоды 1985–1987 гг. и 2004–2008 гг., на основе которых были построены схемы концентраций основных анионов – сульфатов и хлора и минерализации подземных вод (рисунки 8–10).

Необходимо отметить, что в связи с наличием эрозионных «окон», расположенных вдоль северной и восточной границ выбранного участка, гидрогеодинамическая обстановка зависит от условий и интенсивности инфильтрационного питания подземных вод. Основное направление движения подземных вод контролируется палеорельефом, обуславливающим условия залегания и распространения водоносного горизонта трещинно-пластового типа, приуроченного к зоне экзогенного выветривания.

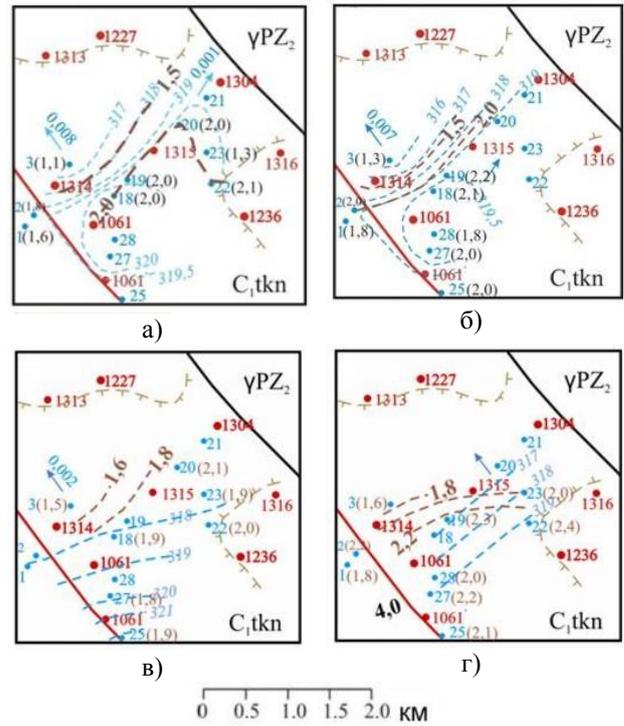
**ГИДРОХИМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ УЧАСТКА ПРОВЕДЕНИЯ ПЯВ  
(НА ПРИМЕРЕ ОБЪЕКТА 1315)**

По состоянию на 1985 год уклоны подземного потока вдоль палеодолины и водораздельного склона различаются на порядок. В северо-восточном направлении уклон подземных вод составляет 0,0012, в северо-западном – возрастает до 0,008 (рисунок 8а). В подземных водах, развитых вдоль южного борта палеодолины содержание анионов сульфатов стабильно и составляет 2,0 г/л (скв 4018-4020). На водоразделе пониженная концентрация сульфат-иона до 1,3 г/л в водоносном горизонте обусловлена составом водовмещающих пород, представленных в верхней части разреза скважины 4023 песчаником выветрелым. В подземных водах палеодолины содержание сульфатов уменьшается до 1,1-1,8 г/л (скв.4001-4003).



*Рисунок 8. Схемы распределения содержания сульфат-иона в подземных водах участка*

Распределение хлорид-иона соответствует палеорельефу и структуре подземного потока (рисунок 9а). По состоянию на 1985 г. в подземных водах на водоразделе вблизи области выклинивания глин неогена концентрация хлорид-иона в подземных водах минимальна, не превышает 0,4-0,5 г/л (скв.4022, 4023). В подземных водах, приуроченных к борту водораздельного склона, содержание хлор-иона составляет 0,9-1,0 г/л (скв.4018-4019), на переуглубленных участках палеодолины возрастает в северо-восточном направлении до 1,7 г/л (скв.4020), в северо-западном – до 1,8-2,1 г/л (скв.4001-4003).



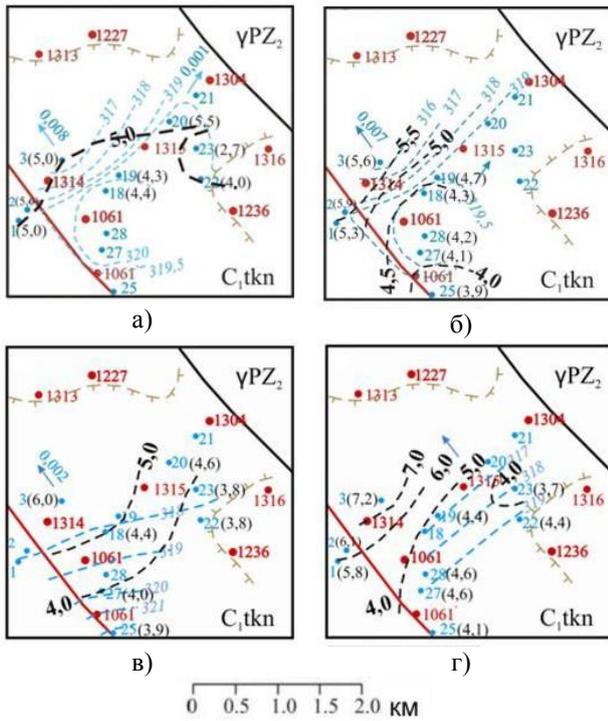
*Рисунок 9. Схемы распределения содержания хлорид-иона в подземных водах участка*

Слабосоленоватые воды распространены на водоразделе, вниз по склону в связи с увеличением минерализации до 5,5-5,6 г/л преимущественное развитие получают сильносоленоватые воды (рисунок 10а).

По состоянию на 1987 г. установлено региональное снижение уровня подземных вод, наиболее значительно выраженное в эпицентральной зоне ПЯВ, проведенных 12.03.1987 г. в скв.1315 и 03.04.1987 г. в скв.1318. Прослежено уменьшение уклона подземного потока до 0,0004 и 0,007 в северо-восточном и северо-западном направлении (рисунок 8б). Подобные изменения гидрогеодинамической обстановки привели к относительно равномерному увеличению содержания сульфат-иона до 2,2 г/л (скв.4019) в подземных водах, приуроченных к склону, и до 2,0 г/л (скв.4002) в пределах палеодолины. Концентрация хлорид-иона и минерализация подземных вод вниз по склону на переуглубленных участках палеодолины возросла до 2,4 г/л и 5,9 г/л соответственно (скв.4003) (рисунки 9б, 10б).

Мониторинг режима подземных вод на выбранном участке через 20 лет после проведения работ, связанных с исследованием влияния ПЯВ на геологическую среду, подтверждает наличие выраженного тренда снижения уровня подземных вод. По состоянию на 2004 г. уклон подземного потока в северо-западном направлении уменьшился до 0,002.

**ГИДРОХИМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ УЧАСТКА ПРОВЕДЕНИЯ ПЯВ  
(НА ПРИМЕРЕ ОБЪЕКТА 1315)**



по состоянию:  
 а – 1985 г., б – 1987 г., в – 2004 г., г – 2008 г. (уровень 2011 г.)  
 (изолинии: голубая – уровень подземных вод, цифра – абс.отм., м;  
 черная - минерализация, цифра – концентрация, г/л)

Рисунок 10. Схемы распределения минерализации подземных вод участка

Концентрация сульфатов в подземных водах переуглубленных участков палеодолины возросла до 1,5 г/л (скв.4003) – 2,1 г/л (скв.4020), на южном склоне водораздела уменьшилась до 1,8-1,9 г/л (скв.4025-4027) (рисунок 8в). В северо-западном направлении в подземных водах водораздела содержание хлорид-иона увеличилось от 0,6 г/л на водоразделе (скв.4022, 4023) до 2,4 г/л в палеодолине (скв.4003) (рисунок 9в). На участке повсеместно распространены сильносоленоватые воды (рисунок 10в).

По состоянию на 2008 г. в подземных водах зарегистрировано повсеместное увеличение содержания сульфат-иона (рисунок 8г). Наиболее высокие концентрации сульфат-иона до 2,4 г/л (скв.4022) зарегистрированы в водоносном горизонте, развитом на водоразделе, что косвенно указывает на формирование застойного режима. Значимое увеличение концентрации хлорид-иона до 3,1 г/л (скв.4003) прослежено в подземных водах в пределах палеодолины (рисунок 9г). Соответственно, и минерализация подземных вод на переуглубленных участках палеодолины возрастает до 5,8-7,2 г/л (скв.4001-4003) (рисунок 10г).

При сопоставлении графиков химического состава подземных вод (по Х. Шеллеру), построенных по состоянию на 1985 г. и 2008 г. прослеживается засоление подземных вод за счет увеличения содержания основных макрокомпонентов – анионов сульфатов и хлора, катионов кальция и магния и уменьшения концентрации натрия-калия (рисунок 11).

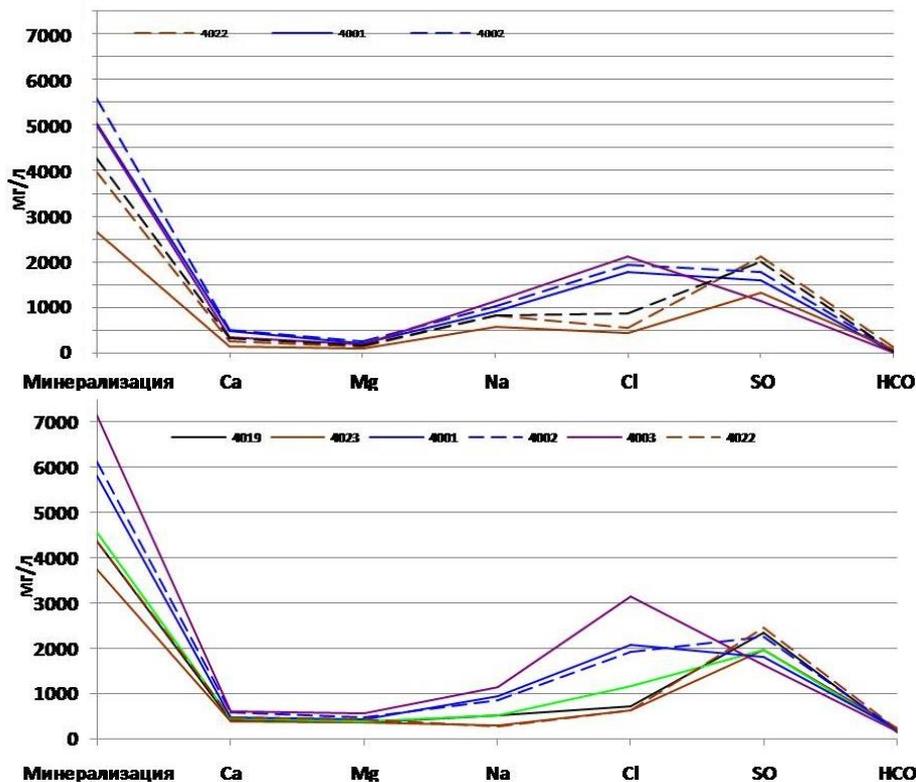


Рисунок 11. Диаграммы химического состава подземных вод (по Х.Шеллеру): а – 1985 г., б – 2008 г.

**ГИДРОХИМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ УЧАСТКА ПРОВЕДЕНИЯ ПЯВ  
(НА ПРИМЕРЕ ОБЪЕКТА 1315)**

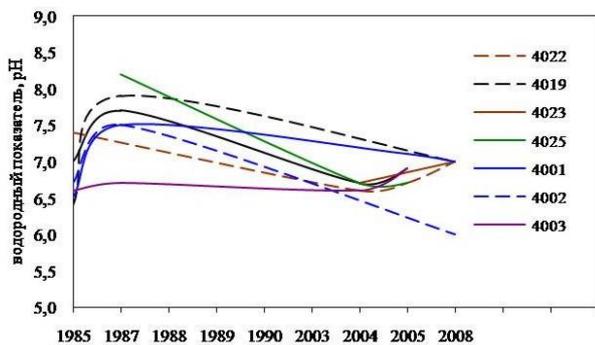


Рисунок 12. Диаграмма водородного показателя

Водородный показатель наиболее значимо изменяется на протяжении 1985–1987 гг. (рисунок 12).

В период проведения ПЯВ реакция подземных вод варьирует от слабокислой к слабощелочной. Последующий мониторинг химического состава указывает на постепенный переход реакции среды в нейтральную.

Исключение составляют подземные воды, развитые в зоне динамического влияния разрывного нарушения северо-западного простирания, которые характеризуются слабокислой реакцией по состоянию на 2008 г. (скв.4002, 4025).

#### ЛИТЕРАТУРА

- Горбунова, Э.М. Ретроспективный анализ режима подземных вод при проведении крупномасштабных экспериментов / Э.М. Горбунова, И.С. Свинцов // Мониторинг ядерных испытаний и их последствий. Тезисы докладов. VI Международная конференция. 09-13 августа 2010 г. Курчатов, Казахстан: НЯЦ РК, 2010. – С. 72-75.
- Химченко, Г.В. Отчет о площадных геофизических исследованиях по площадке Балапан / Г.В. Химченко // Экспедиция 113. 1974.
- Бардина, И.Ю. Геологическое строение, гидрогеологические и инженерно-геологические условия площадки Балапан / И.Ю. Бардина // Партия 27. 1975. (Фонды ПГО «Гидроспецгеология»).
- ГОСТ 24481-80. Вода питьевая. Отбор проб. – Взамен ГОСТ 4979-49 ; введ. 01.01.82. – М. : Изд-во стандартов, 1981. – 5с.
- ГОСТ 4151-72 Вода питьевая. Метод определения общей жесткости. – Взамен ГОСТ 4151-48 ; введ. 01.01.74. – М. : Изд-во стандартов, 1994. – 6 с.
- ГОСТ 4245-72 Вода питьевая. Методы определения содержания хлоридов. – Взамен ГОСТ 4245-48 ; введ. 01.01.74 до 01.01.79. – М. : Изд-во стандартов, 1976. – 7 с.
- ГОСТ 4389-72 Вода питьевая. Методы определения сульфатов. – Взамен ГОСТ 4389-48 ; введ. 01.01.74 до 01.01.79. – М. : Изд-во стандартов, 1976. – 8 с.
- ГОСТ 18164-72 Вода питьевая. Метод определения содержания сухого остатка.; введ. 01.01.74 до 01.01.79. – М. : Изд-во стандартов, 1976. – 3 с.

#### **ЖЯЖ ЖҮРГІЗІЛГЕН УЧАСКЕНІҢ ГИДРОХИМИЯЛЫҚ МОНИТОРИНГІСІ (1315 ОБЪЕКТИ ҮЛГІСІНДЕ)**

<sup>1)</sup> Резяпова-Атаханова В.А., <sup>2)</sup> Горбунова Э.М.

<sup>1)</sup> Қазақстан, Курчатов қ., Геофизикалық зерттеулер институты  
<sup>2)</sup> Ресей, Мәскеу қ., Ресей ғылыми академиясының Геосфера динамикасы институты

Семей сынау полигоны Балапан учаскесінің орталық бөлшегінде орналасқан жерасты ядролық жарылыс (ЖЯЖ) жүргізілген учаскеде (көлемі 4×4 км) гидрохимиялық жағдайын алдын ала талдаудың нәтижелері келтірілген. Жұмыста, 1985–1987 ж.ж. ЖЯЖ жүргізу және ХҒТО-893 жобасы бойынша 2004–2008 ж.ж. орындалған далалық ізденістер кезеңінде алынған қор деректері пайдаланылған. 1315 ұңғыма үлгісінде жерасты сулардың химиялық құрамының учаскенің құрылымды-геологиялық және гидрогеодинамикалық жағдайларына байланысы бар болу көрсетілген.

**HYDRO-CHEMICAL MONITORING OF UNE TEST AREA  
(BY THE EXAMPLE OF FACILITY 1315)**

<sup>1)</sup> V.A. Rezyarova-Atakhanova, <sup>2)</sup> E.M. Gorbunova

<sup>1)</sup> *Institute of Geophysical Research, Kurchatov, Kazakhstan*

<sup>2)</sup> *Institute of the Dynamics of Geosphere, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

The paper presents the results of preliminary analysis of hydro-chemical situation at the underground nuclear explosion (UNE) test area (the size of 4×4 km), which is located in the central part of Balapan site of Semipalatinsk Test Site. The fund's data obtained during the UNE testing period from 1985 to 1987, and field investigations conducted in 2004–2008 under the MNTS K-893 project, were used in the paper. The dependence of chemical composition of underground water on structural and geological conditions and hydro-geo-dynamic situation of the site was shown by the example of the borehole 1315.

УДК 550.344

## О ПРИЧИНАХ РАСХОЖДЕНИЙ ОЦЕНОК ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗНЫХ ЦЕНТРОВ ОБРАБОТКИ

Михайлова Н.Н., Рябенко О.В.

*Институт геофизических исследований, г. Курчатов, Казахстан*

Предложено объяснение расхождений в определении магнитуд и энергетического класса, получаемыми различными центрами обработки данных в Центральной Азии на основе сравнения параметров землетрясений и сейсмических шумов на близко расположенных сейсмических станциях с разными условиями установки регистрируемых приборов. Установлено, что магнитудные параметры, определяемые в Центре данных Института геофизических исследований, занижены в связи с тем, что большинство станций сети ИГИ оснащено скважинной аппаратурой, установленной на глубинах 30–80 м.

### ВВЕДЕНИЕ

В последние годы Центр данных РГП ИГИ (KNDC) участвует в службе срочных донесений о происходящих землетрясениях для МЧС РК. По всем сильным и ощутимым землетрясениям в оперативном режиме передаются основные параметры происшедших землетрясений на территории Казахстана и его окружения. Аналогичные сведения в МЧС передает и Центр обработки другой сети сейсмических наблюдений Казахстана – Сейсмологической опытно-методической экспедиции МОН РК. Оба Центра обработки представляют свои данные на своих сайтах в Интернете. Анализ данных по одним и тем же событиям показал, что оценки энергетических и магнитудных характеристик не совпадают. Было замечено, что чаще оценки KNDC являются заниженными по отношению к оценкам СОМЭ. В связи с этим, если в требованиях МЧС РК указан нижний предел энергии передаваемых землетрясений. То бывают случаи, когда в KNDC землетрясение имеет параметры. По которым оно не должно быть передано, а СОМЭ подает свое донесение по событию, удовлетворяющему критериям. Целью настоящей работы было сравнение получаемых в разных центрах решений, изучение энергетических определений по данным различных региональных центров Центральной Азии и выяснение причин несоответствия оценок.

### СРАВНЕНИЕ МЕТОДИК И РЕЗУЛЬТАТОВ ОПРЕДЕЛЕНИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И МАГНИТУДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК В РАЗНЫХ ЦЕНТРАХ

На территории Центральной Азии ведут постоянные наблюдения и обработку данных сети сейсмических наблюдений различных организаций. При этом определяются разные параметры, характеризующие величину землетрясения. Это различные типы магнитуд, определяемые по различным шкалам, энергетический класс, сейсмический момент. Мы выбрали

те центры, где обработка данных проводится по одинаковым методикам. В качестве параметров при массовой обработке землетрясений определяются: магнитуда по объемным волнам на каналах, аналогичных каналу прибора СКМ, рассчитываемая по региональной калибровочной кривой –  $trv$  [1]; энергетический класс  $K$ , равный логарифму высвобожденной сейсмической энергии в джоулях [2]. Все определения проводятся по цифровым записям, при этом используются аналогичные цифровые фильтры и программы расчетов. Такими центрами являлись: KNDC – Центр данных Института геофизических исследований КАЭ РК; СОМЭ – Центр данных Сейсмологической опытно-методической экспедиции; ЦДКИС – Центр данных Института сейсмологии Академии наук Кыргызской Республики.

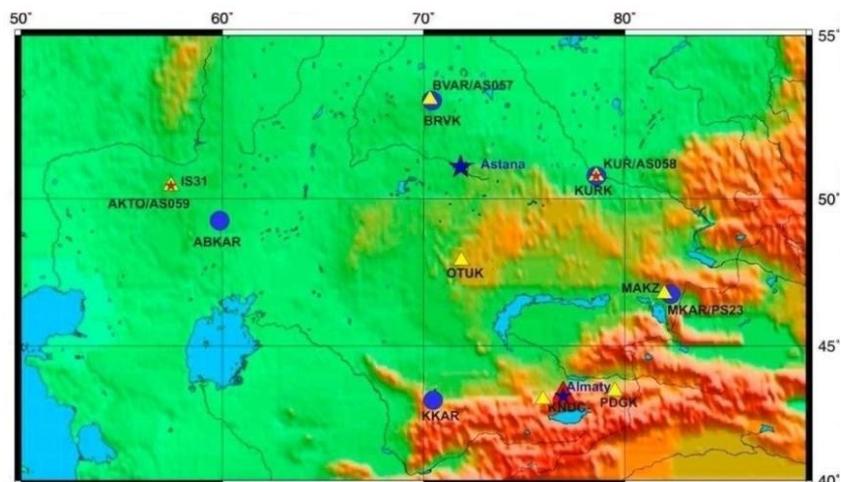
Станции этих сетей расположены на территории двух стран – Казахстана и Кыргызстана. На рисунке 1 показана сеть станций ИГИ КАЭ РК. Станции этой сети расположены в основном по периметру страны. Большую часть этих станций представляют сейсмические группы, состоящие из 10 – 21 элемента.

На рисунке 2 показана сеть станций СОМЭ. Станции этой сети сконцентрированы в основном на юге и юго-востоке Республики. Особенно плотная сеть имеется вблизи г. Алматы в пределах зребтов Северного Тянь-Шаня.

На рисунке 3 представлена сеть станций ИС НАН КР. Ее станции находятся на Северном и Южном Тянь-Шане вблизи сейсмически активных горных областей.

Станции СОМЭ и ИС НАН КР представляют собой отдельные трехкомпонентные станции. В пределах каждой сети станции передают свои данные в Центры обработки данных. Каждый центр обработки составляет каталог землетрясений и сейсмический бюллетень событий, в котором можно найти определения значений  $trv$  и  $K$ .

О ПРИЧИНАХ РАСХОЖДЕНИЙ ОЦЕНОК ЭНЕРГИТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
РАЗНЫХ ЦЕНТРОВ ОБРАБОТКИ



Кружки – сейсмические группы, треугольники – трехкомпонентные станции, звездочки – инфразвуковые станции

Рисунок 1. Схема расположения сейсмических станций сети ИГИ



Рисунок 2. Схема расположения станций ГУ «СОМЭ KH MOH PK»

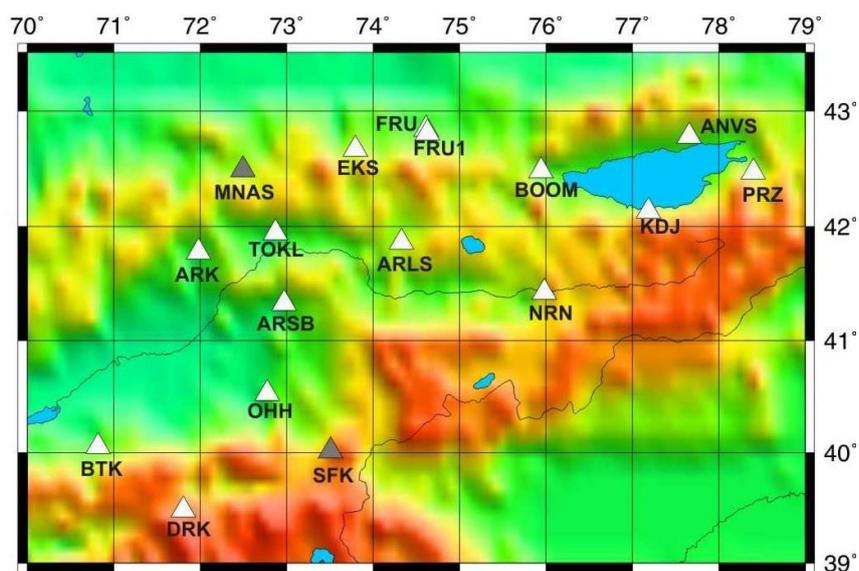


Рисунок 3. Схема расположения станций ИС НАН КР

**СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПРЕДЕЛЕНИЙ  
МАГНИТУД И ЭНЕРГИЧЕСКИХ КЛАССОВ В  
KNDC С ДВУМЯ ДРУГИМИ ЦЕНТРАМИ**

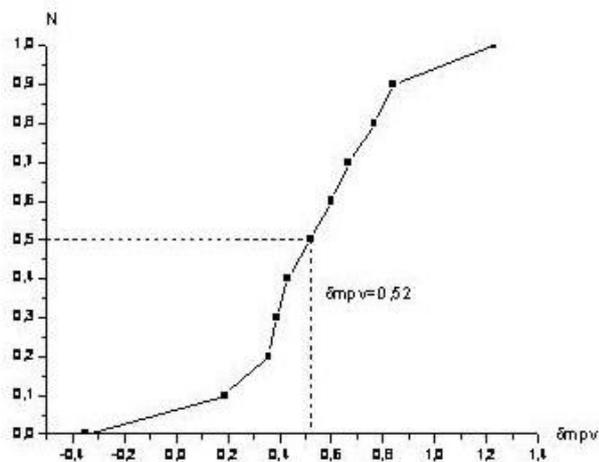
Для корректного сопоставления получаемых решений мы сделали выборку одних и тех же событий из каталога землетрясений KNDC и СОМЭ, далее провели сравнительный анализ полученных значений  $m_{pv}$  и  $K$ .

Для сопоставления данных KNDC и СОМЭ было отобрано 50 событий. Были рассчитаны значения разницы магнитуд и классов для каждого события.

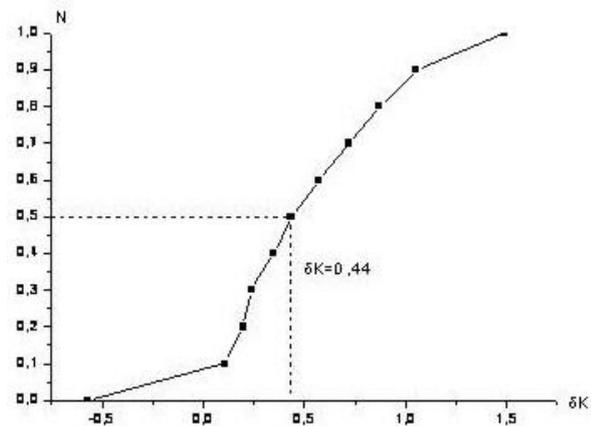
$$\delta m_{pv} = m_{\text{СОМЭ}} - m_{\text{KNDC}} \quad (1)$$

$$\delta K = K_{\text{СОМЭ}} - K_{\text{KNDC}} \quad (2)$$

Построены распределения полученных значений  $\delta m_{pv}$  и  $\delta K$ , приведенные на рисунке 4 (а, б).



а



б

Рисунок 4. Распределение  $\delta m_{pv}$  и  $\delta K$  по данным KNDC и СОМЭ

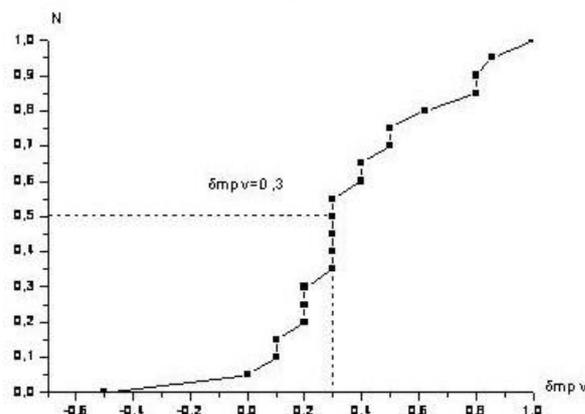
По распределениям на рисунке 4 определены значения медиан распределений и персентилей на уровне 15% и 85%. Получено, что медиана  $\delta m_{pv}=0,52$ , медиана  $\delta K=0,44$ . Это означает, что по данным станций СОМЭ происходит систематическое завышение магнитуд в среднем на 0,52, классов на 0,44.

Аналогичное исследование проведено по данным Кыргызской сети станций и сети станций РГП ИГИ. Для сопоставления данных KNDC и ЦД КИС было отобрано 50 событий. Полученные распределения значений показаны на рисунке 5 (а, б). Медианы распределений равны  $\delta m_{pv}=0,3$  и  $\delta K=0,5$ . Следует вывод, что сеть Института сейсмологии Кыргызстана также завышает значения магнитуд и классов относительно сети РГП ИГИ.

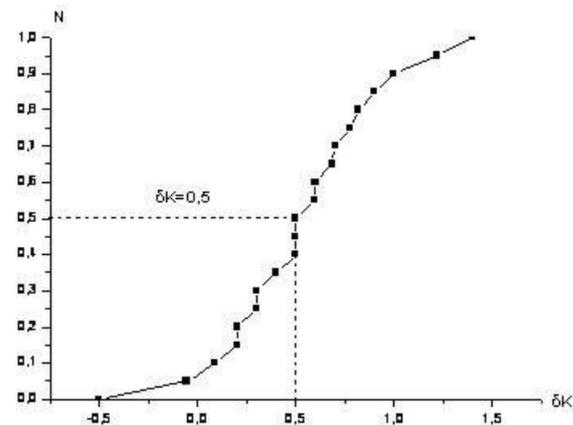
$$\delta m_{pv} = m_{\text{ЦДКИС}} - m_{\text{KNDC}} \quad (3)$$

$$\delta K = K_{\text{ЦДКИС}} - K_{\text{KNDC}} \quad (4)$$

Таким образом, мы получили, что при одинаковой методике определения  $m_{pv}$  и  $K$ , использовании одних и тех же калибровочных кривых по станциям, расположенным практически в одном регионе, в KNDC получают систематически меньшие значения  $m_{pv}$  и  $K$ , чем в двух других центрах.



а



б

Рисунок 5. Распределение значений  $\delta m_{pv}$  и  $\delta K$  по данным KNDC и ЦДКИС

**СВЯЗЬ РЕГИСТРИРУЕМЫХ АМПЛИТУД  
КОЛЕБАНИЙ С ГЛУБИНОЙ РАСПОЛОЖЕНИЯ  
СЕЙСМИЧЕСКОГО ДАТЧИКА**

Необходимо было выяснить причину такого занижения. Было сделано предположение, что это может быть связано с особенностями станций сети ИГИ. Основу этой сети составляют сейсмические группы, все элементы которых размещены в скважинах. Все станции СОМЭ и ИС НАН КР расположены на поверхности в бункерах или штольнях.

Возможно, занижение магнитуд и классов связано именно с уменьшением амплитуд сейсмических колебаний с глубиной.

Основное количество обрабатываемых землетрясений в KNDC приходится на четыре сейсмические группы, расположенные в разных частях Казахстана. Особенно важное значение имеют группы Маканчи, Каратау и Курчатов, находящиеся в сейсмически активных областях страны. Именно эти группы представлены скважинными наблюдениями. Дадим краткую характеристику сейсмических групп.

**Сейсмическая группа «Маканчи»**

Первичная сейсмическая группа международной системы мониторинга «Маканчи» – (MKAR, PS23) размещена в Урджарском районе Восточно-Казахстанской области в 25 км к востоку от поселка Маканчи.

Сейсмическая группа «Маканчи» состоит из 10 точек наблюдения, расположенных по двум окружностям с одной центральной точкой (рисунок 6). Радиус внутреннего кольца ~500 м, наружного ~2000 м. На 9 пунктах в скважинах установлены однокомпонентные вертикальные сейсмометры GS21 (GeotechInstruments). Кроме того, имеется одна широкополосная трехкомпонентная станция с сейсмометром CMG-3ТВ (Guralp). Регистрирующая аппаратура 24-битные АЦП AIM24S (ScienceHorizons). Частота оцифровки: 40 опросов/сек/канал. Привязка временной шкалы: система GPS. В январе 2002 г. станция была сертифицирована комиссией МСМ в качестве первичной станции МСМ. Координаты и характеристики скважин, в которых установлены

сейсмометры, приведены в таблице 1. Из таблицы видно, что аппаратура находится на глубине 31–61 м от поверхности Земли.

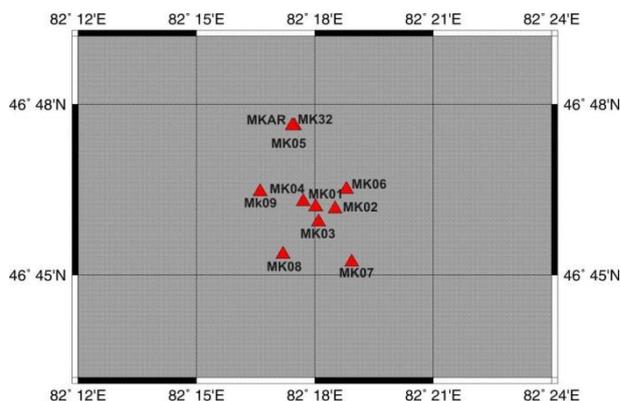


Рисунок 6. Схема расположения сейсмической группы «Маканчи»

**Сейсмическая группа «Акбулак»**

Сейсмическая группа «Акбулак» – (ABKAR) размещена в Айтикебийском районе Актюбинской области вблизи поселка Талдык.

Сейсмическая группа Акбулак состоит из 10 точек наблюдения, расположенных по двум окружностям с одной центральной точкой (рисунок 7). Радиус внутреннего кольца ~500 м, наружного ~2000 м. На 9 пунктах в скважинах установлены однокомпонентные вертикальные сейсмометры GS21 (GeotechInstruments). Кроме того, имеется одна широкополосная трехкомпонентная станция с сейсмометром KS54000 (GeotechInstruments). Регистрирующая аппаратура 24-битные АЦП AIM24S (ScienceHorizons). Частота оцифровки: 40 опросов/сек/канал. Привязка временной шкалы: система GPS. Координаты и характеристики скважин, в которых установлены сейсмометры, приведены в таблице 2. Из таблицы видно, что вся аппаратура размещена в скважинах на глубинах 40–80 м от поверхности Земли.

Таблица 1. Координаты и глубины скважин сейсмической группы «Маканчи» (MKAR, PS23)

№ сайта	Сейсмометр, тип	Глубина скважины, м	Широта	Долгота	Высота над уровнем моря, м	Примечания
MK31	CMG-3ТВ	61	N46.7937	E82.2904	615	трехкомпонентный
MK01	GS 21	31	N46.7700	E82.3003	609	вертикальный
MK02	GS 21	30.5	N46.7694	E82.3086	639	вертикальный
MK03	GS 21	30.5	N46.7656	E82.3015	631	вертикальный
MK04	GS 21	31	N46.7715	E82.2951	590	вертикальный
MK05	GS 21	31	N46.7937	E82.2913	615	вертикальный
MK06	GS 21	31	N46.7751	E82.3133	638	вертикальный
MK07	GS 21	31	N46.7538	E82.3156	628	вертикальный
MK08	GS 21	31	N46.7561	E82.2866	608	вертикальный
MK09	GS 21	31	N46.7744	E82.2769	580	вертикальный

**О ПРИЧИНАХ РАСХОЖДЕНИЙ ОЦЕНОК ЭНЕРГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
РАЗНЫХ ЦЕНТРОВ ОБРАБОТКИ**

Таблица 2. Координаты и глубины скважин сейсмической группы «Акбулак» (ABKAR)

№ сайта	Сейсмометр, тип	Глубина скважины, м	Широта	Долгота	Высота над уровнем моря, м	Примечания
AB31	KS 54000	80	N49.2556	E59.9431	233	трехкомпонентный
AB01	GS 21	80	N49.2556	E59.9431	233	вертикальный
AB02	GS 21	40	N49.2591	E59.9466	230	вертикальный
AB03	GS 21	40	N49.2511	E59.9431	234	вертикальный
AB04	GS 21	40	N49.2578	E59.9371	236	вертикальный
AB05	GS 21	40	N49.2736	E59.9431	239	вертикальный
AB06	GS 21	40	N49.2611	E59.9693	231	вертикальный
AB07	GS 21	40	N49.2410	E59.9593	230	вертикальный
AB08	GS 21	40	N49.2387	E59.9280	234	вертикальный
AB09	GS 21	40	N49.2614	E59.9280	237	вертикальный

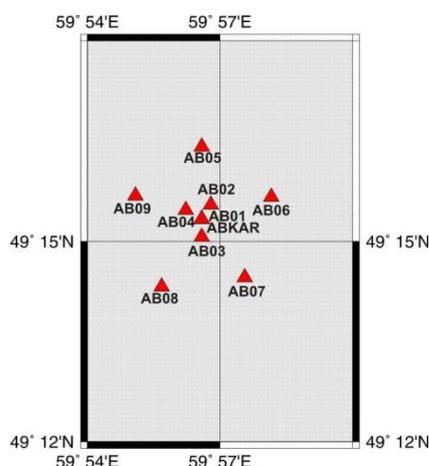


Рисунок 7. Схема расположения сейсмической группы «Акбулак»

**Сейсмическая группа «Каратау»**

Сейсмическая группа «Каратау» – (KKAR) размещена в Таласском районе Жамбылской области недалеко от г. Каратау.

Сейсмическая группа Каратау состоит из 10 точек наблюдения, расположенных по двум окружностям с одной центральной точкой (рисунок 8). Радиус внутреннего кольца ~500 м., радиус наружного ~2000 м. На 9 пунктах в скважинах установлены однокомпонентные вертикальные сейсмометры GS21 (GeotechInstruments). Кроме того, имеется одна ши-

рокопосная трехкомпонентная станция с сейсмометром KS54000 (GeotechInstruments). Регистрирующая аппаратура 24-битные АЦП AIM24S (ScienceHorizons). Частота оцифровки: 40 опросов/сек/канал. Привязка временной шкалы: система GPS. Координаты и характеристики скважин, в которых установлены сейсмометры, приведены в таблице 3. Из таблицы видно, что вся аппаратура размещена в скважинах на глубинах 50–60 м от поверхности Земли.

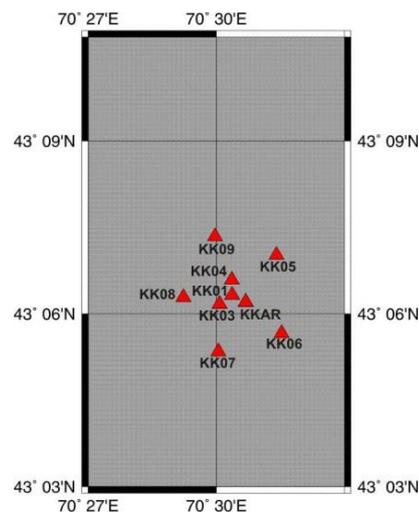


Рисунок 8. Схема расположения сейсмической группы «Каратау»

Таблица 3. Координаты и глубины скважин сейсмической группы «Каратау» (KKAR)

№ сайта	Сейсмометр, тип	Глубина скважины, м	Широта	Долгота	Высота над уровнем моря, м	Примечания
KK 31	KS 54000	60	N43.1034	E70.5115	521	трехкомпонентный
KK 01	GS 21	50	N43.1054	E70.5061	525	вертикальный
KK 02	GS 21	50	N43.1034	E70.5115	521	вертикальный
KK 03	GS 21	50	N43.1028	E70.5012	529	вертикальный
KK 04	GS 21	50	N43.1098	E70.5060	523	вертикальный
KK 05	GS 21	50	N43.1170	E70.5235	510	вертикальный
KK 06	GS 21	50	N43.0944	E70.5255	534	вертикальный
KK 07	GS 21	50	N43.0891	E70.5008	526	вертикальный
KK 08	GS 21	50	N43.1048	E70.4871	543	вертикальный
KK 09	GS 21	50	N43.1224	E70.4995	546	вертикальный

**Сейсмическая группа «Курчатов-Крест»**

Вспомогательная сейсмическая группа международной системы мониторинга «Курчатов-Крест» – (KURK, AS058) расположена вблизи города Курчатова Восточно-Казахстанской области.

Сейсмическая группа «Курчатов-Крест» представляет собой два пересекающихся линейных профиля приборных скважин с сейсмическими датчиками. (ссылка на схему сейсмической группы) Азимуты простирания профилей: 10° (меридиональный профиль, KUR1-KUR10) и 320° (широтный профиль, KUR11-KUR20) (рисунок 9). Длина каждого профиля ~22,5 км. На каждом профиле имеется по 10 приборных скважин (пунктов) с общим центральным пунктом в месте пересечения профилей. Среднее расстояние между пунктами профиля ~ 2,25 км. В скважинах установлены вертикальные сейсмометры CMG-3V (пункты KUR1-KUR20). В центре (KUR21, KURBB) установлен сейсмометр CMG-3TB. Все сейсмометры фирмы Guralp. Регистрирующая аппаратура: 24-битные АЦП Еуропа-Т (Nanometrics). Частота оцифровки: 40 опросов/сек/канал. Привязка временной шкалы: система GPS. В декабре 2006 г.

станция была сертифицирована комиссией МСМ в качестве вспомогательной станции МСМ. Из таблицы 4 видно, что все элементы группы представлены скважинными приборами, установленными на разных глубинах от 26.5 до 52 м от поверхности Земли.

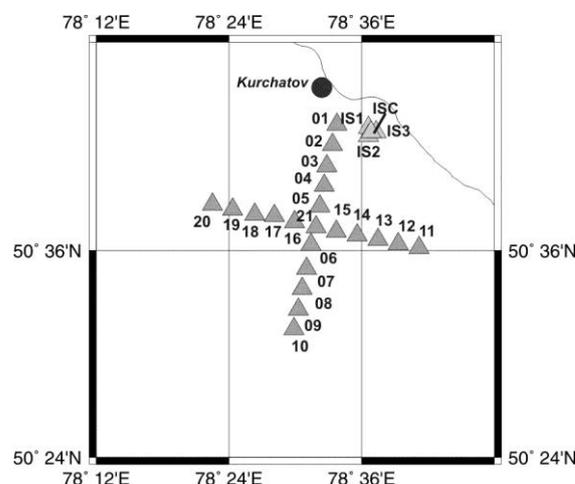


Рисунок 9. Схема расположения сейсмической группы «Курчатов-Крест»

Таблица 4. Координаты и глубины скважин сейсмической группы «Курчатов-Крест» (KURK, AS058)

№ сайта	Сейсмометр, тип	Глубина скважины, м	Широта	Долгота	Высота над уровнем моря, м	Примечания
KURBB	CMG-3TB	52	N50.6226	E78.5304	199,8	трехкомпонентный
KUR01	CMG-3V	35,6	N50.7216	E78.5634	164,6	вертикальный
KUR02	CMG-3V	50	N50.7017	E78.5566	169	вертикальный
KUR03	CMG-3V	32	N50.6820	E78.5500	175	вертикальный
KUR04	CMG-3V	38,9	N50.6622	E78.5434	177,4	вертикальный
KUR05	CMG-3V	27,5	N50.6424	E78.5366	183	вертикальный
KUR06	CMG-3V	35	N50.6028	E78.5239	196,5	вертикальный
KUR07	CMG-3V	37,5	N50.5831	E78.5172	200	вертикальный
KUR08	CMG-3V	39	N50.5632	E78.5108	200,8	вертикальный
KUR09	CMG-3V	29,5	N50.5433	E78.5043	201,2	вертикальный
KUR10	CMG-3V	36,2	N50.5236	E78.4977	205,4	вертикальный
KUR11	CMG-3V	30	N50.6019	E78.6863	202,4	вертикальный
KUR12	CMG-3V	34,1	N50.6061	E78.6551	204,0	вертикальный
KUR13	CMG-3V	44,4	N50.6102	E78.6242	224,4	вертикальный
KUR14	CMG-3V	38,2	N50.6144	E78.5927	217	вертикальный
KUR15	CMG-3V	36	N50.6185	E78.5615	200,7	вертикальный
KUR16	CMG-3V	32,7	N50.6269	E78.4993	194,4	вертикальный
KUR17	CMG-3V	38,3	N50.6318	E78.4690	196,6	вертикальный
KUR18	CMG-3V	49,4	N50.6353	E78.4368	192,4	вертикальный
KUR19	CMG-3V	26,5	N50.6394	E78.4057	181,8	вертикальный
KUR20	CMG-3V	50	N50.6436	E78.3746	183,4	вертикальный

Из теоретических соображений и экспериментальных работ различных исследователей известно, что амплитуды сейсмических колебаний на свободной поверхности возрастают по сравнению с амплитудами на глубине. Этот факт широко используется в работах по мониторингу: для уменьшения уровня сейсмического шума сейсмические датчики размещают в скважинах. В статье [3], на данных станции

Актюбинск показано, что после нескольких лет работы станции на поверхности в специальном бункере, в 2005 г. сейсмометр станции был помещен в скважину глубиной 65 м. Уменьшение уровня шума в связи с погружением сейсмометров произошло очень существенно. Интегральный эффект на периодах менее 0,1 с составил почти 30 дБ: уровень шума в скважине меньше уровня на поверхности. С увели-

чением периодов колебаний эффект снижения шума уменьшается. На периодах 0,5с – 1с разница в уровнях составляет 10–15 дБ (рисунок 10).

Аналогичный вывод можно сделать и при рассмотрении сейсмических шумов по станциям Маканчи – МКАР (скважинная) и МАКZIRIS/GSN (аппаратура в штольне). На рисунке 11 представлены спектральные кривые сейсмического шума по этим станциям.

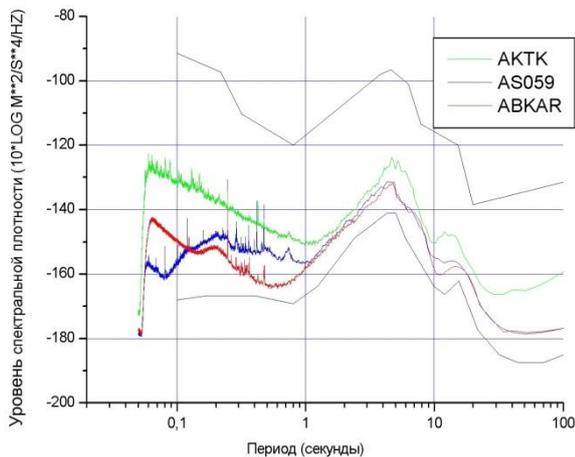


Рисунок 10. Спектральные кривые сейсмического шума по станциям АКTK(поверхность), АКТО-AS059 и АВКАR (скважины)

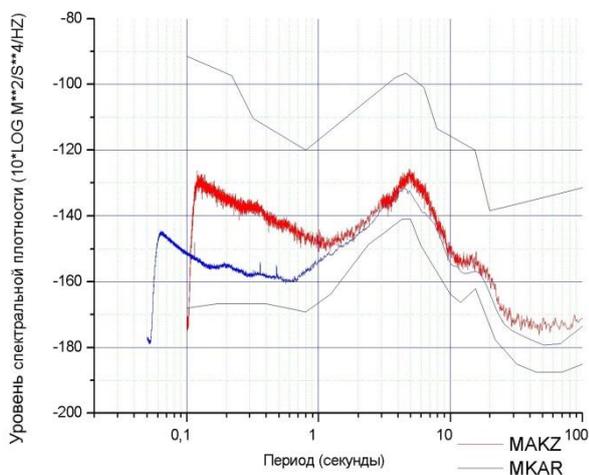
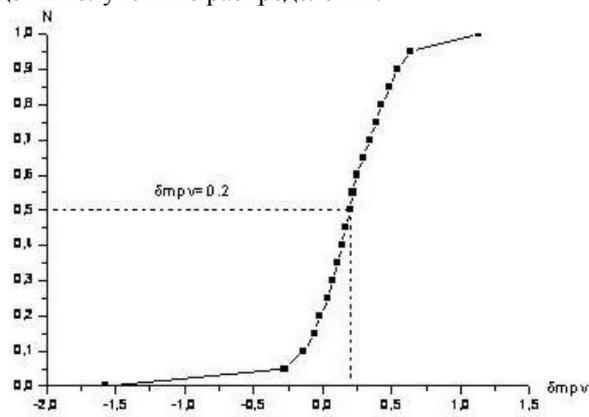


Рисунок 11. Спектральные кривые дневного сейсмического шума по станциям МКАР-PS23 и МАКZ-IRIS/GSN

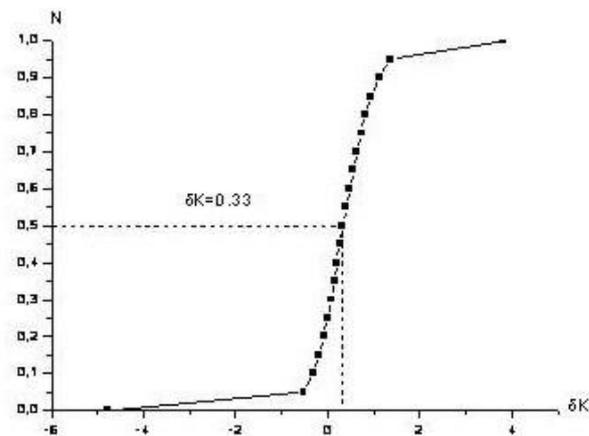
Видно, что различие в спектральных уровнях шума достигает наибольших значений на периодах от 0,1 с до 0,8 с: на поверхности шум почти на 20 дБ выше, чем в скважине. На 1 с различие в уровнях уменьшается до 7 дБ.

Станции МКАР и МАКZ находятся на расстоянии 24 км одна от другой. Это хорошая возможность проверить на их данных непосредственно различие в определяемых параметрах. Фактически они регистрируют одни и те же события. Расстояния до

гипоцентров различаются незначительно. Поэтому можно сопоставить значения магнитуд и классов для одних и тех же событий. Была сделана выборка событий из бюллетеня KNDC, где имелись данные этих двух станций. Построены распределения, аналогичные приведенным выше. На рисунке 12 приведены полученные распределения.



а



б

Рисунок 12. Распределения значений  $\delta mpv$  и  $\delta K$  по станциям МАКZ и МКАР

Это сравнение наиболее корректное. Когда сравниваются средние значения магнитуд и классов для событий, зарегистрированных всей сетью, то осредняются все данные по станциям, находящихся в разных азимутах, на разных расстояниях и т.д. Здесь же все аналогично при регистрации одного события. Поэтому можно отметить самые маленькие значения разброса в распределениях. Но, мы видим тот же эффект – станция на поверхности завывает как магнитуду, так и класс соответственно на 0,2 и 0,33 единицы соответственно. Были проведены исследования связи найденных различий с такими факторами, как азимут, расстояние, сами значения магнитуд. Достаточно четко обнаружена корреляционная зависимость значений завывшения магнитуд и классов с самими значениями этих параметров. Чем больше значение  $M$  и  $K$ , тем меньше различие между станциями (рисунок 13).

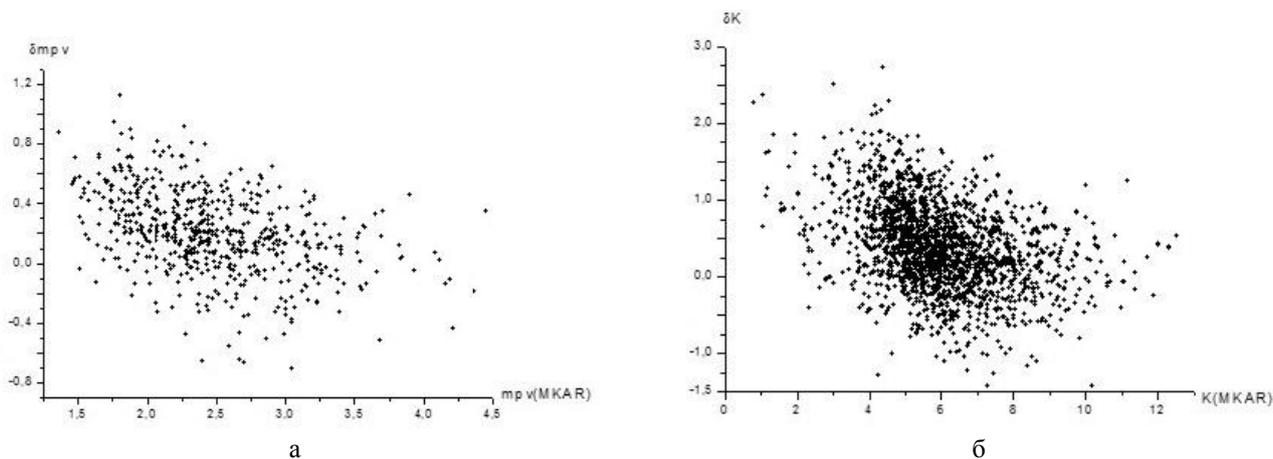
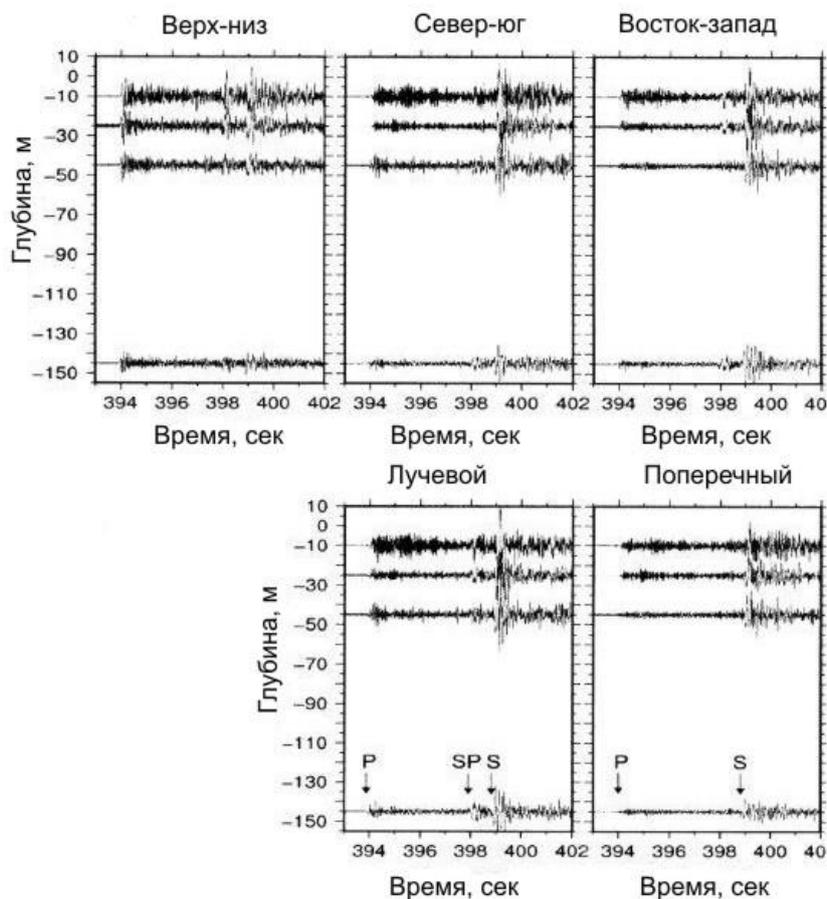


Рисунок 13. Зависимость различий в значениях магнитуд и классов от  $M$  и  $K$

Этого можно было ожидать, исходя из данных о частотной зависимости различий в уровнях сейсмических шумах. Как видно из рисунка 13, на больших периодах разница в уровнях уменьшается. Известно, что чем сильнее землетрясение, тем спектр его колебаний сдвинут в сторону больших периодов.

Интересные результаты прямых наблюдений на

разных глубинах получены в последние годы на Бишкекской вертикальной сейсмической группе ВІVА [4]. В скважине на различной глубине от 0 до 145 м установлены сейсмоприемники. 18 марта 2011 г. этой группой зарегистрировано землетрясение на глубинах 10, 25, 45, и 145 м. На рисунке 14 видно, как меняется волновая картина записи с глубиной.



Вверху – горизонтальные и вертикальные компоненты записей на различных глубинах.  
Внизу – радиальная и трансверсальная компоненты записей ускорений после поворота компонент [4]

Рисунок 14. Изменение волновой картины записи с глубиной

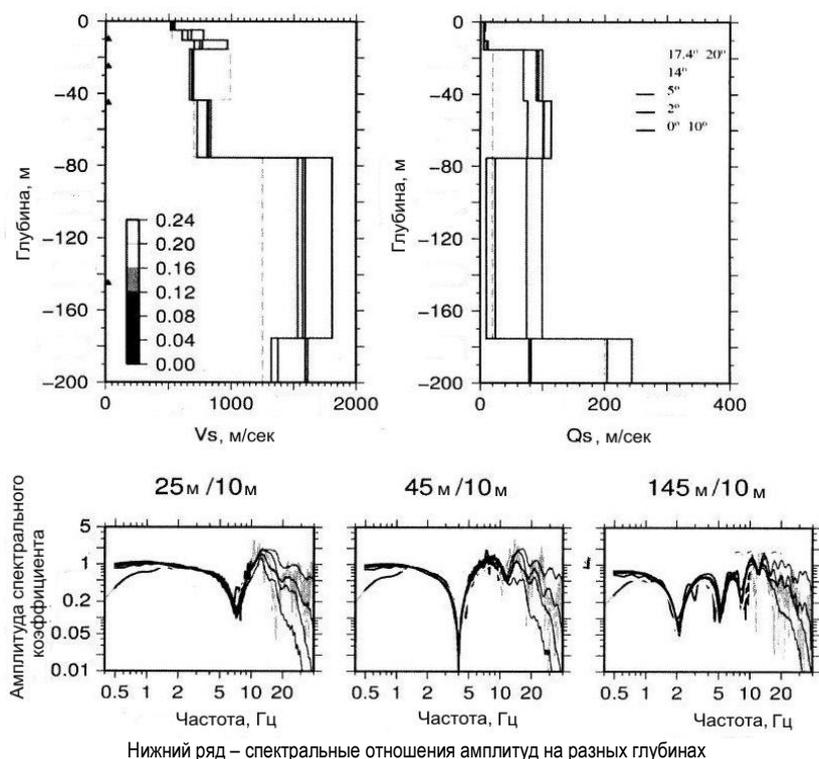


Рисунок 15. Связь получаемой на разных глубинах волновой картины с частотным составом и углами выхода сейсмических лучей

Четко видно, что амплитуды сейсмических колебаний уменьшаются с глубиной. Однако закон изменения амплитуд связан с геологическим строением пород верхней части разреза и его скоростными характеристиками.

В этой же работе показана связь получаемой на разных глубинах волновой картины с частотным составом и углами выхода сейсмических лучей (рисунок 15).

Получены синтетические сейсмограммы на разных глубинах для разных случаев. В области частот от 0,5 до 2 с снижение амплитуд составляет от 2 до 5 раз. Это может вызвать разницу в магнитудах от 0,3 до 0,7 единиц.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Получило количественное подтверждение систематическое различие в энергетических параметрах землетрясений по определениям разных Центров обработки. В KNDC при параметризации очагов землетрясений получают более низкие значения оценок магнитуд и энергетических классов, чем в казахстанском центре СОМЭ и киргизском Институте сейсмологии.

2. Выдвинута и подтверждена версия о связи наблюдаемых различий с размещением приборов сейсмических групп ИГИ в скважинах на глубинах от 26 до 80 м.

3. По данным регистрации сейсмических шумов и сигналов от землетрясений близко расположенными станциями - поверхностной МАКЗ и скважинной МКАР - показано различие в значениях параметров одних и тех же событий и наблюдаемое занижение оценок по станции МКАР.

4. С ростом энергии землетрясений различие в характеристиках на поверхностной и скважинной станции уменьшается.

5. Приведены литературные данные, свидетельствующие о том, что при разных землетрясениях могут наблюдаться разные расхождения, связанные с частотным составом колебаний и расстояниями до эпицентра. Моделирование волновой картины записей при хорошем знании строения и параметров среды, где расположена скважина, может дать прогнозируемые оценки амплитуд сигналов на глубине по отношению к наблюдаемым на поверхности при разных вариантах.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлова, Н.Н. Калибровочная функция  $\delta(\Delta)$  для определения магнитуды MPVA землетрясений Северного Тянь-Шаня / Н.Н. Михайлова, Н.П. Неверова. // Комплексные исследования на Алма-Атинском прогностическом полигоне. – Алма-Ата: Наука, 1986.
2. Раутиан, Т. Г. Об определении энергии землетрясений на расстояниях до 3000 км. / Т. Г. Раутиан // Труды ИФЗ АН СССР – 1964- № 32 (199). – С. 72-92.
3. Михайлова, Н.Н. Спектральные характеристики сейсмического шума по данным казахстанских станций мониторинга / Н.Н. Михайлова, И.И. Комаров // Вестник НЯЦ РК, 2006. – Вып. 2. – С 19-26.
4. Parolai, S. The Bishkek vertical array (BIVA): acquiring strong motion data in Kyrgyzstan and first results / S Parolai [et al] // Journal of Seismology, 17, 2, 707-719

### ӨНДЕУДІҢ ӘР ОРТАЛЫҚТАРДЫҢ ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ СИПАТТАМАЛАРЫН БАҒАЛАУЫНДА АЙЫРМАШЫЛЫҒЫНЫҢ СЕБЕПТЕРІ ТУРАЛЫ

Михайлова Н.Н., Рябенко О.В.

*Қазақстан, Курчатов қ., Геофизикалық зерттеулер институты*

Орталық Азияда деректерді өңдеудің әр орталықтарында магнитуда мен энергетикалық классын анықтауында алынатын айырмашылықтарды, тірекейтін аспаптарды орнатудың бірдемей емес жағдайларымен жақын орналасқан сейсмикалық станциялардағы жерсілкінулер параметрлері мен сейсмикалық шуларын салыстыру негізінде түсіндіруі ұсынылған. Геофизикалық зерттеулер институтының Деректер орталығында анықталатын магнитудалық параметрлері, ГЗИ желісі станцияларының көбі 30–80 м. тереңдіктерде орнатылған аппаратурамен жаракталғанына байланысты, төмен болуы анықталған.

### ON REASONS OF DISCREPANCIES OF ESTIMATES OF ENERGETIC PARAMETERS OF VARIOUS PROCESSING CENTERS

N.N. Mikhailova, O.V. Ryabenko

*Institute of Geophysical Research, Kurchatov, Kazakhstan*

The paper offers an explanation of discrepancies in the determination of magnitudes and energy class obtained by various data processing centers in Central Asia based on the comparison of parameters of earthquakes and seismic noises at closely located seismic stations with various conditions of recording device installations. It has been established that magnitude parameters that are determined in the Data Center of the Institute of Geophysical Research are lowered due to the fact that the majority of the stations of IGR network is equipped with borehole instrumentation that has been installed at the depth of 30–80 m.

УДК 550.344

## ИЗУЧЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРУНТОВ НА ПРОМЫШЛЕННОЙ ПЛОЩАДКЕ АО «УМЗ»

Рябенко П.В., Михайлова Н.Н.

*Институт геофизических исследований, г. Курчатов, Казахстан*

Приводятся результаты анализа зарегистрированных сейсмических событий полевыми сейсмическими станциями, полученных при комплексной количественной оценке изменения приращения сейсмичности на разных участках промышленной площадки АО «УМЗ». По данным сейсмологических наблюдений исследованы свойства короткопериодных волновых полей в районах расположения сейсмических станций. Результаты исследований сопоставлены с геофизическими данными по уточнению сейсмичности промышленной площадки. Отмечено их хорошее согласие. Полученные данные могут быть использованы при оценке сейсмостойкости инженерных сооружений УМЗ.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время сведения по сейсмическим свойствам грунтов промышленной площадки АО «УМЗ» базируются, главным образом, на данных инженерно-геологических исследований грунтовых условий размещения отдельных зданий. Недостаточность данных по сейсмической опасности промышленной площадки АО «УМЗ» определила целесообразность постановки специализированных работ по уточнению значения сейсмичности (в терминах Строительных норм и правил) промышленной площадки АО «УМЗ» на основе определения категории грунтов по сейсмическим свойствам. Реализация этого задания осуществлялась силами РГП ИГИ на основе проведения комплекса методов - площадных геофизических съёмок и мониторинговых сейсмологических наблюдений. Следует отметить, что были ограничения на выбор методов исследования, связанные с высоким уровнем техногенных сейсмических шумов, вызванных непрерывной производственной деятельностью завода.

Целью работ являлась количественная оценка изменения приращения сейсмичности промышленной площадки АО «УМЗ» по отношению к средним грунтам и получение исходных данных для теоретических расчётов изменения её сейсмичности. Информационной основой для выполнения этой задачи явились данные инструментальных сейсмологических наблюдений.

### СИСТЕМА НАБЛЮДЕНИЯ И ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ

В соответствии с требованиями [1] для решения таких задач на каждые типовые условия выбирается 2-3 пункта инструментальных наблюдений. Принимая во внимание относительную однородность геологического строения верхней части разреза и интенсивную застроенность территории, было принято решение о формировании системы наблюдений с равномерным покрытием исследуемой площади.

Для обеспечения эталонных пунктов регистрации были выбраны 3 пункта.

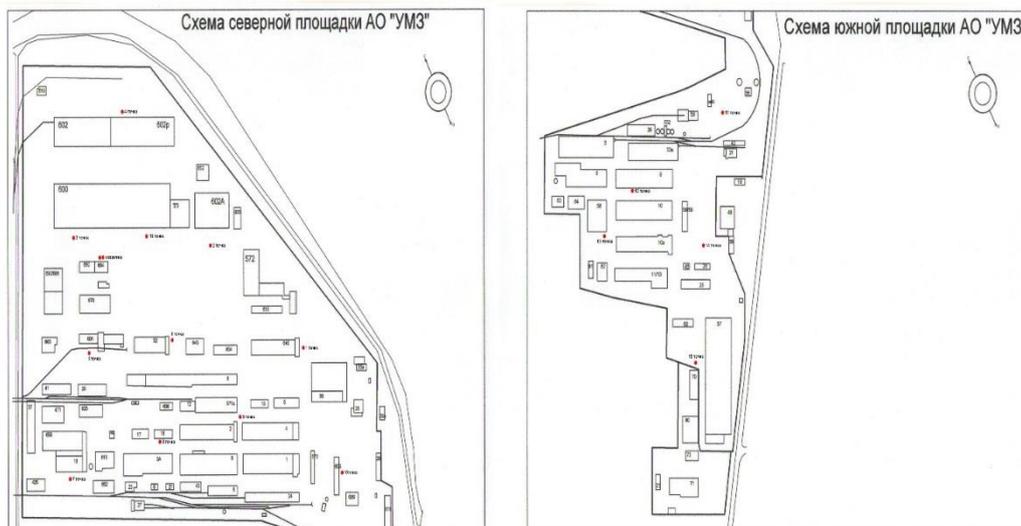
Первые два пункта, включавшие две сейсмостанции с сейсмометрами СК-1П и GuralpCMG-40T, располагались вблизи параметрической скважины 21а. Количественная оценка относительного изменения величины приращения сейсмической интенсивности в них обеспечивалась информацией о параметрах грунтов, полученной по данным бурения.

Третий пункт (1 сейсмостанция) был выбран на скальных грунтах и обеспечивал количественную оценку абсолютного изменения величины приращения сейсмической интенсивности.

В целом, система сейсмологических наблюдений включала 19 пунктов регистрации. Из них 16 (рисунок 1) были размещены по территории промышленной площадки АО «УМЗ» с расстоянием между ними порядка 250-300 м, 2 – в районе параметрической скважины на удалении от неё около 5 м и 1 пункт – на скальных грунтах за пределами промышленной площадки АО «УМЗ» на удалении порядка 5 км. Географические координаты пунктов сейсмологической регистрации приведены в таблице 1.

Из-за высокого уровня техногенных помех на изучаемой площадке продолжительность работ была определена и составила 1 месяц (с 14 октября по 14 ноября 2013 г.) для обеспечения регистрации необходимого количества сейсмических событий (землетрясений, промышленных взрывов). Наблюдения осуществлялись с помощью 19 комплектов цифровых станций в составе: регистраторы DASPMD 6102 и 6501 (с шагом квантования 100 отсчет/с) и сейсмометры СК-1П и GuralpCMG-40T, обеспечивающие трёхкомпонентную регистрацию сейсмических сигналов в полосе частот от 0.5 до 50 Гц. Автономное питание станций обеспечивалось приборными аккумуляторами 12В. Сейсмическая запись в непрерывном режиме в формате CSS 3.0 производилась на внешние носители информации – жесткие диски и флэш-карты.

**ИЗУЧЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРУНТОВ  
НА ПРОМЫШЛЕННОЙ ПЛОЩАДКЕ АО «УМЗ»**



*Рисунок 1. Промышленная площадка АО «УМЗ». Схема расстановки станций*

Для контроля качества регистрируемой сейсмической информации данные с некоторых станций периодически (примерно через 10 суток записи) снимались и отправлялись в ЦСОССИ. По завершению наблюдений, данные со всех станций были собраны, заархивированы и отправлены в ЦСОССИ для дальнейшей обработки.

*Таблица 1. Координаты пунктов инструментальной сейсмологической регистрации*

№ пункта	№ станции	Широта, °	Долгота, °
1	Das №09	49.987305	82.630361
2	Das №18	49.98987	82.62864
3	Das №12	48.99205	82.62386
4	Das №07	49.99306	82.62720
5	Das №02	49.989888	82.622694
6	Das №08	49.989028	82.625833
7	Das №01	49.98835	82.62016
8	Das №06	49.987667	82.624056
9	Das №15	49.987167	82.627111
10	Das №13	49.98475	82.63013
11	Das №19	49.98207	82.62852
12	Das №14	49.98210	82.62424
13	Das №05	49.981389	82.622556
14	Das №16	49.980222	82.625750
15	Das №11	49.978528	82.624444
16	Das №03	49.99062	82.62636
Скважина	Das №10 Das №17	49.991292	82.624510
Эталонная на скальном грунте	Das №04	50.009983	82.621195

**ШУМЫ, ИХ ИСТОЧНИКИ И СЛОЖНОСТИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ**

Поскольку целью сейсмологических наблюдений было выявление систематических различий в уровне регистрируемых сигналов, то первой задачей был поиск общих для всей локальной сети сейсмических сигналов от одних и тех же источников. К сожалению, анализ сейсмических записей показал, что на

всех без исключения станциях присутствует высокий уровень промышленных помех, связанный с эксплуатацией промышленного комплекса.

Причем на разных станциях имеются разные источники техногенного шума. Это следует из таблицы 2, где показаны условия установки станций и источники шума вблизи каждой станции.

*Таблица 2. Номера станций с указанием источника шума вблизи них*

№ пункта	№ станции	Условия установки и источники шума
1	Das №09	Тротуар, рядом автодорога
2	Das №18	Рабочий цех, теплотрасса
3	Das №12	Рабочий цех, автодорога
4	Das №07	Пустырь, законсервированное здание
5	Das №02	Ж/д, теплотрасса
6	Das №08	Ремонт здания, клумба
7	Das №01	Рядом Казцинк
8	Das №06	Рабочий цех, законсервированное здание, автодорога
9	Das №15	Теплоцентрали, водопровод, автодорога
10	Das №13	Рабочий цех, пустырь
11	Das №19	Пустырь, подстанция, ж/д
12	Das №14	Рабочие цеха, автодорога
13	Das №05	Гранильня, цеха
14	Das №16	Газон, тротуар
15	Das №11	Автодорога, Казцинк, тротуар
16	Das №03	Теплотрасса, пустырь
Скважина	Das №10	Рабочие цеха
Скважина	Das №17	
Эталонная на скальном грунте	Das №04	Станция расположена за пределами УМЗ на удалении порядка 5 км

Сейсмические помехи на станциях имеют высокий уровень как днем, так и ночью. Пример фрагмента сейсмических записей, иллюстрирующий наличие постоянного шума, представлен на рисунке 2.

Поэтому выделение сигналов и их идентификации были возможны только при применении различных цифровых фильтров.

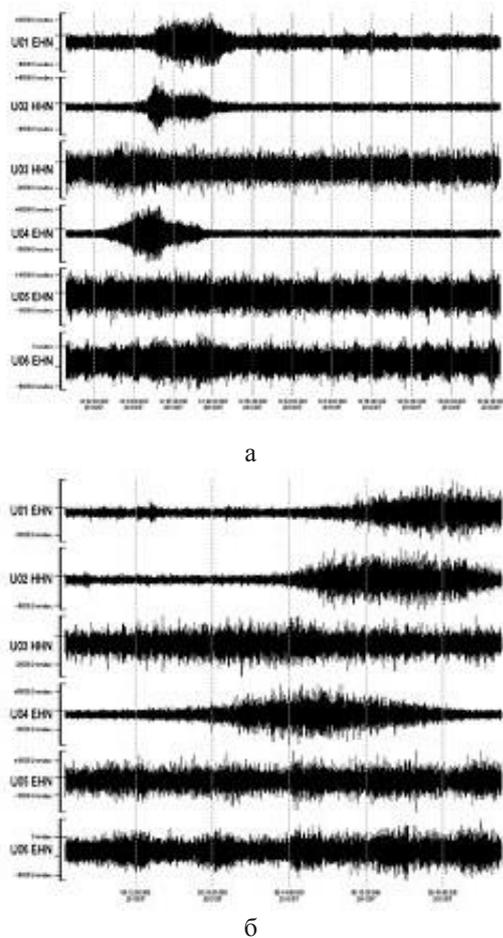


Рисунок 2. Фрагмент сейсмических записей, иллюстрирующий высокий уровень сейсмических техногенных шумов на станциях регистрации в дневное (а) и ночное время (б)

#### МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Методика предварительной обработки записей станций локальной сети включала в себя следующее. Данные полевых станций после их получения были преобразованы в формат CSS3.0 [2]. Для этого был создан комплекс программ конвертации «сырых» данных в формате mseed в формат CSS3.0. Данные в формате CSS3.0 содержат таблицы affiliation, instrument, network, sensor, site, sitechan и wfdisc. Преобразование данных полевых станций в формат CSS3.0 позволило провести визуализацию записей, расстановку времен вступлений, замер амплитуд, локализацию событий и расчет магнитуд при помощи пакета программ DATASCOPE.

После преобразования исходных данных в формат CSS3.0, сейсмические записи полностью были просмотрены с применением цифровой фильтрации. Обнаруженные на сейсмограммах сейсмические сигналы для установления их природы были проассоциированы с каталогом землетрясений EMSC (Европейского Средиземноморского сейсмологического Центра) для телесеismicких событий и с каталогом Центра данных РГП ИГИ для региональных событий. Ассоциация производилась при помощи годографа IASPEI91.

Всего обнаружено и проассоциировано 41 сейсмическое событие, все из которых являются землетрясениями. На рисунке 3 представлена карта расположения эпицентров проассоциированных землетрясений.

Диапазон магнитуд  $M$  от 3.2 до 7.1, диапазон эпицентральных расстояний от 300 до 16943 км. Таким образом, станциями были зарегистрированы как региональные, так и телесеismicкие события.

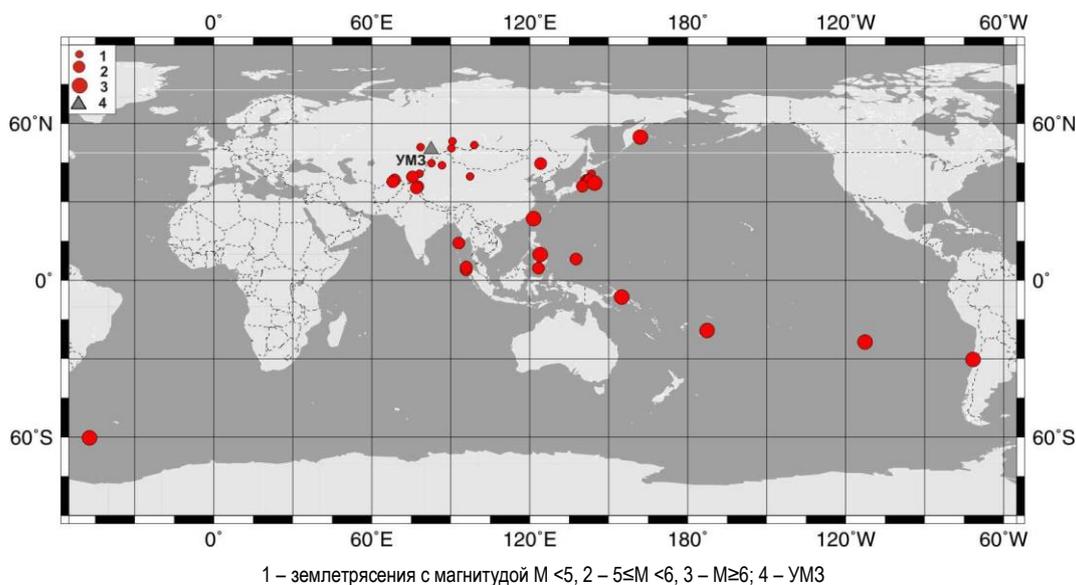


Рисунок 3. Карта эпицентров сейсмических событий, зарегистрированных сетью полевых станций на территории УМЗ

### ОЦЕНКА ПРИРАЩЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ПО ДАННЫМ СЕЙСМОЛОГИ- ЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

Решение этой задачи включало выявление сигналов от событий, зарегистрированных локальной сетью станций, обработку данных сейсмических событий по локальной сети станций и анализ распределения найденных значений приращения сейсмичности.

Выявление сигналов от событий, зарегистрированных локальной сетью станций. На рисунке 4а представлена схема расположения сейсмических станций локальной сети. Разными цветами показаны станции, представленные разными типами аппаратуры. Станции были укомплектованы широкополосными сейсмометрами CMG40T и узкополосными сейсмометрами СК-1П, дигитайзерами DAS6102 и DAS6501 (PMD) с частотой оцифровки 100 Гц. Кроме того, повышение чувствительности комплекта оборудования СК-1П и DAS6102 было достигнуто с помощью усилителя с коэффициентом усиления  $K=18$ . На рисунке 4б представлена амплитудно-частотная характеристика сейсмометров CMG40 T и СК-1П.

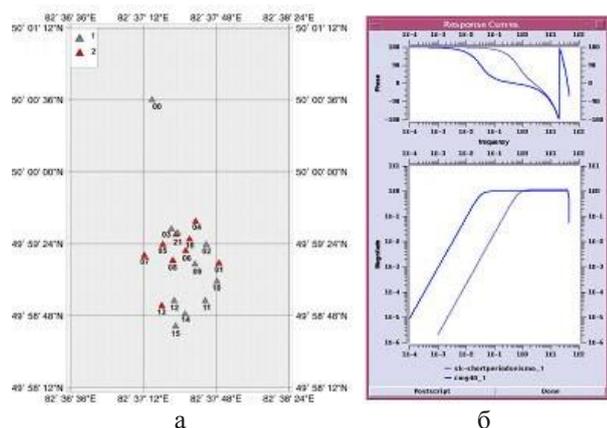


Рисунок 4. Схема расположения станций локальной сети (а), укомплектованных короткопериодными сейсмометрами CMG40T (▲) и широкополосными СК-1П (●), и их амплитудно-частотные характеристики (б)

### ОБРАБОТКА ДАННЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ ПО ЛОКАЛЬНОЙ СЕТИ СТАНЦИЙ

Наличие сильных помех на записях сейсмических станций, вызванных различными, в том числе специфическими только для конкретного пункта, промышленными шумами, не позволило для решения задачи районирования площадки по сейсмическим условиям воспользоваться методом сравнительного анализа сейсмического шума на разных станциях. Единственной возможностью было сравнение динамических характеристик сигналов от одних и тех же событий по данным разных станций.

Для этой цели сейсмические записи проассоциированных событий были вырезаны из непрерывных данных, сформирована база данных. На первом эта-

пе сейсмические записи фильтровались в трех диапазонах частот:  $f_1: 0.05 \div 0.5$  Гц,  $f_2: 0.5 \div 5$  Гц,  $f_3: 5 \div 50$  Гц. По каждому каналу каждой сейсмической станции, для каждого частотного фильтра были проведены замеры максимальных амплитуд скоростей и смещений, а также соответствующих им периодов для всех зарегистрированных землетрясений. Результаты замеров занесены в базу данных.

Найдены отношения амплитуд колебаний для сейсмических станций на территории технической площадки и амплитуд станции, расположенной на скальном грунте. Для каждой станции по найденным отношениям для каждой компоненты E-W и N-S рассчитаны медианы, перцентили, соответствующие 15% и 85%, средние значения и дисперсия. Все результаты представлены в табличном виде.

Следует отметить, что как для первого частотного диапазона, так и для третьего часто было невозможно провести анализ по всем станциям и событиям из-за высокого уровня помех на высокочастотном фильтре и невозможности регистрации длиннопериодных колебаний короткопериодным сейсмоприемником. Другой причиной была малая статистика данных на длиннопериодном фильтре (зарегистрированы только длиннопериодные колебания от сильнейших телесейсмических событий) по широкополосному прибору.

На рисунке 5 представлена запись на фильтре 5-50 Гц по одному из событий. Видно, что сигнала от события практически не видно из-за помех. Красными флажками показаны ожидаемые времена вступлений сейсмических волн.

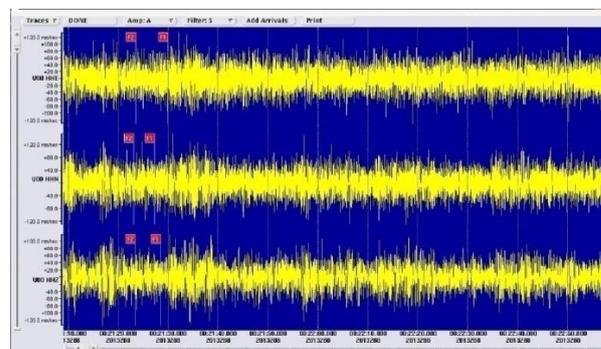
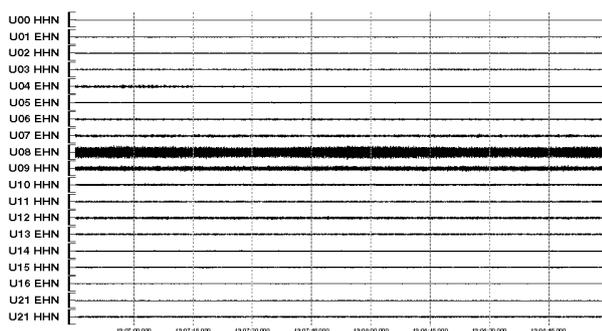


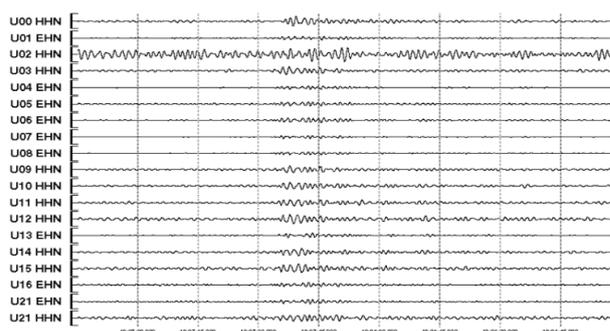
Рисунок 5. Вид записи телесейсмического землетрясения с Филиппинских островов с магнитудой 7,1 на фильтре 5–50 Гц

Детальный анализ позволил найти фильтры, на которых можно было более четко обнаружить локальные эффекты за счет мест расположения станций наблюдения и провести районирование по относительным сейсмологическим параметрам. При этом использовались полосовые частотные фильтры шириной 0,7 октавы с центральными частотами 0,6 Гц, 1,25 Гц, 2,5 Гц, 5 Гц.

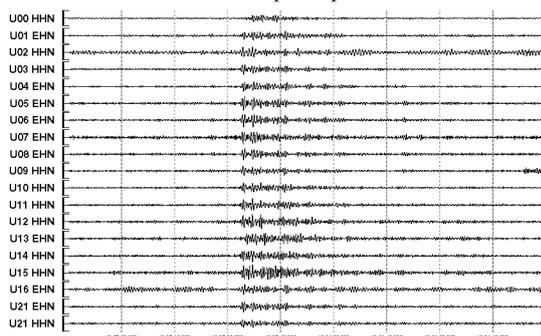
**ИЗУЧЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРУНТОВ  
НА ПРОМЫШЛЕННОЙ ПЛОЩАДКЕ АО «УМЗ»**



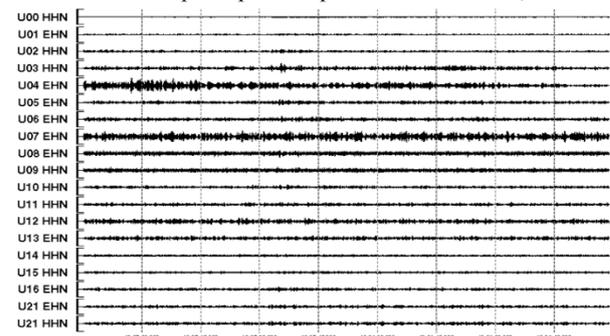
а – без фильтра



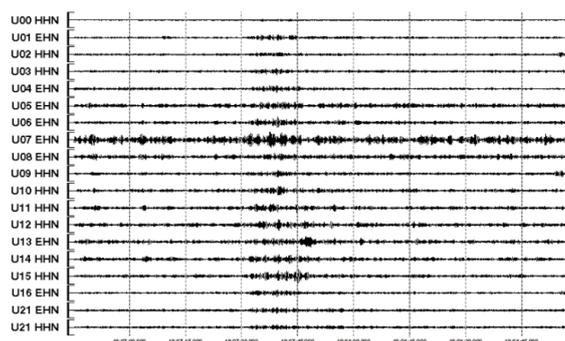
б – фильтр с центральной частотой 0,6 Гц



в – фильтр с центральной частотой 1,25 Гц



г – фильтр с центральной частотой 2,5 Гц



д – фильтр с центральной частотой 5 Гц

Рисунок 6. Вид записей землетрясения 12.11.2013,  $t_0=19-06-11.6$  без фильтра (а), с различными фильтрами (б, в, г, д)

Для зарегистрированных событий различия в уровне записей одних и тех же сейсмических фаз лучше видны на фильтрах с центральными частотами 1,25 Гц и 2,5 Гц. Это соответствует полосам пропускания 1–1,6 Гц и 2–3,2 Гц. В этой области частотные характеристики разных приборов, используемых для регистрации, имеют примерно одинаковые характеристики. Поэтому данные всего комплекса аппаратуры можно рассматривались совместно.

На рисунке 6 представлены записи по всем станциям для одного события с разными фильтрами. Сейсмограммы приведены для наиболее близкого от группы станций события: землетрясения 12.11.2013,  $t_0=19-06-11.6$ , координаты  $\varphi=50.87^\circ$ ,  $\lambda=78.65^\circ$ ,  $M_w=3.2$ , расстояние= 300 км. Видно, что наиболее четко сигналы видны на записях, соответствующих фильтру с центральной частотой 1,25 Гц.

Далее по каждой станции для всех зарегистрированных событий по двум горизонтальным компонентам N-S и E-W для различных фильтров 1,5 Гц и 2.5 Гц были промерены амплитуды в цуге поперечных волн. Станция U00, установленная на скальных грунтах, служила опорной для всех остальных станций.

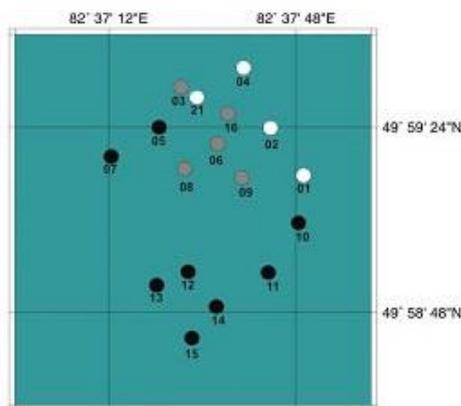
Были рассчитаны отношения амплитуд на разных станциях к амплитудам в тех же сейсмических фазах на станции U00. По каждой станции для всего набора событий получены медианы, 15% и 85% перцентили отношений по двум фильтрам и двум компонентам. Имеются таблицы всех измеренных и рассчитанных параметров. После этого расчетные отношения амплитуд были преобразованы в значения условного приращения бальности по приведенной выше формуле:

$$\Delta I = 3.31 \cdot \lg \left( \frac{A_i}{A_0} \right),$$

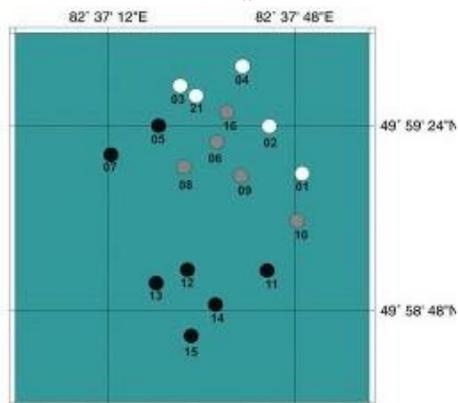
где  $\Delta I$  – приращение сейсмической интенсивности (в баллах);  $A_i$  – амплитуда колебаний на исследуемой станции;  $A_0$  – амплитуда колебаний на опорной станции.

Результаты сведены в таблицу 3.

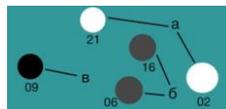
Анализ распределения найденных значений условных приращений балльности по промышленной площадке АО «УМЗ» в целом показывает достаточно устойчивую систему. Южная площадка характеризуется несколько большими значениями сигналов, чем северная. Результаты распределения значений приращений приведены на рисунке 7.



а



б



– градации по относительным  
грунтовым условиям:  
пониженные (а), средние (б) и  
повышенные (в) условные  
приращения балльности

Рисунок 7. Распределение относительных условных приращений балльности по компоненте N-S (а) и E-W (б) в пунктах наблюдения

Существует довольно хорошее согласие в системе группирования значений условных приращений балльности по обоим компонентам регистрации.

Сопоставление этих результатов с картами распределения средней скорости поперечных волн и

связанным с ней приращением сейсмической интенсивности за счет различия грунтовых условий также показывает их хорошую сходимость.

Таблица 3. Результаты расчета условных приращений балльности по компонентам E-W и N-S на площадке исследований

Станция	Фильтр 1,25 Гц		Фильтр 2,5 Гц	
	E-W	N-S	E-W	N-S
U 00	1	1	1	1
U 01	0,3	0	1,3	1,1
U 02	0,1	0,7	0,9	1,0
U 03	0,3	0,4	1,1	1,7
U 04	0,3	0	0,7	1,0
U 05	0,7	0,5	1,8	2,1
U 06	0,2	0,5	1,6	1,9
U 07	0,4	0,4	2,2	2,7
U 08	0,7	0,1	1,8	1,3
U 09	0,4	0,3	1,5	1,4
U 10	0,4	0,4	1,4	1,8
U 11	0,5	0,5	1,8	1,8
U 12	0,6	0,6	2,1	2,4
U 13	1,0	0,5	1,85	1,8
U 14	0,4	0,5	2,0	2,0
U 15	0,8	0,8	2,3	2,2
U 16	0,5	0,5	1,4	1,4
U 21	0,2 – 0,4	0,3 – 0,4	1,15 – 0,2	1,4 – 1,5

#### СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ СЕЙСМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ С РЕЗУЛЬТАТАМИ ИЗУЧЕНИЯ ВЛИЯНИЯ ГРУНТОВЫХ УСЛОВИЙ НА ПРИРАЩЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ПО КОМПЛЕКСУ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ

В основу оценки приращения сейсмичности промышленной площадки был положен метод сейсмических жесткостей в части влияния различия грунтовых условий. При этом учитывались следующие факторы:

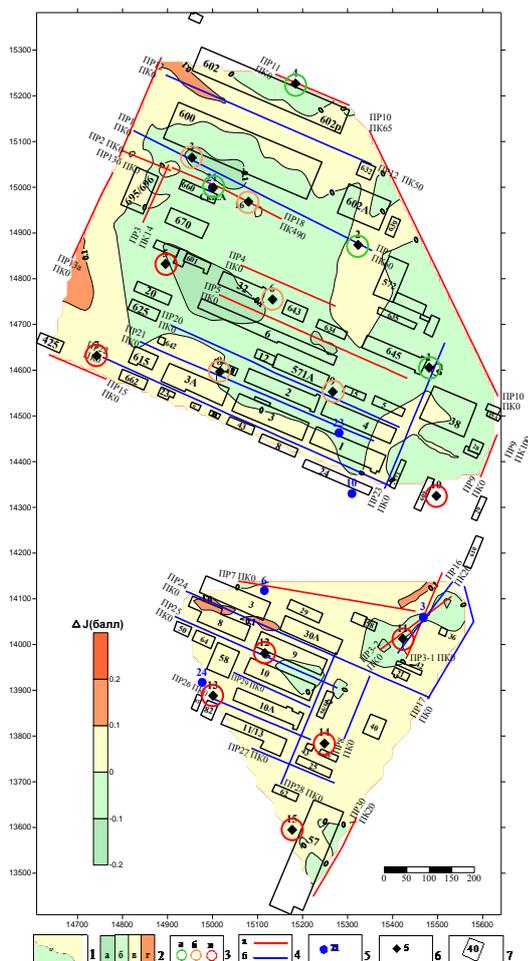
- приращение сейсмической интенсивности за счет различия сейсмической жесткости грунтов относительно средних ее значений на изучаемом участке;
- приращение сейсмической интенсивности за счет ухудшения сейсмических свойств грунтов на изучаемом участке при обводнении (водонасыщении).

Приращение сейсмической интенсивности за счет возможного возникновения резонансных явлений в покрывающей толще пород изучаемого разреза не учитывалось в виду высокого уровня сейсмических помех в сейсмологических данных, не позволивших диагностировать эти эффекты.

Как следует из приведенной карты, минимальные значения приращения сейсмичности в баллах составляют  $-0.18$ , максимальные –  $+0.16$  балла при стандартных отклонениях от среднего  $\pm 0.05$ . При этом практически вся центральная часть северной площадки характеризуется отрицательными приращениями сейсмичности. Области с положительными значениями сейсмичности распределились по пери-

ферии площадки. При этом приращения в балльности в основном составляют величину, не превышающую +0.1 балла.

Области, в которых приращение сейсмичности превышает +0.1 балла, установлены лишь между зданиями №600 и 602 на северном и между зданиями №425 и 695/696 на западном флангах этой площадки.



1 – изолинии балльности; контуры областей: а и б – с отрицательным (до -0.2) приращением балльности, в, г – с положительным (до +0.1 и +0.2);  
3 – градации относительных грунтовых условий по сейсмологическим данным: пониженные (а), средние (б) и повышенные (в) условные приращения балльности; 4 – профили геофизических исследований: а – сейсморазведки МРВ, б – георадарной съемки; 5 – скважина и её номер; 6 – положение сейсмостанции и её номер; 7 – здания и сооружения, намеченные для выполнения инженерных изысканий по уточнению сейсмичности

Рисунок 8. Промышленная площадка АО «УМЗ». Уточнение сейсмичности площадки по комплексным геофизическим данным

Несколько иные значения сейсмичности получены для южной площадки. Для нее характерным является в целом положительное приращение балльности. Однако, также, как и для северной площадки в основном такое приращение не превышает +0.1 балла. Более высокие значения этого параметра, но не превышающие 0.2 балла, установлены по северной окраине площадки в районе зданий №8 и 10, а также между зданиями №58 и 610.

Результаты интерпретации сейсмологических данных представлены также на рисунке 8 в виде градации относительных грунтовых условий в местах расположения каждой сейсмостанции. Выводы по грунтовым условиям, имеющим признаки для пониженных, средних и повышенных приращений балльности вполне согласуются с геофизическими данными по уточнению сейсмичности промышленной площадки.

В целом, по промышленной площадке полученные максимальные положительные приращения сейсмичности относительно средних условий незначительны.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По данным сейсмологических наблюдений уточнены сейсмические свойства грунтов в местах расположения сейсмостанций. Выводы по грунтовым условиям, имеющим признаки для пониженных, средних и повышенных приращений балльности вполне согласуются с геофизическими данными по уточнению сейсмичности промышленной площадки.

Выполнена оценка приращения сейсмичности для различных участков промышленной площадки АО «УМЗ» за счет влияния грунтовых условий по комплексу геофизических методов. При этом установлено, что относительно средних условий максимальное приращение сейсмичности не превышает +0.2 балла. Определены контуры участков с различным приращением балльности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. СН РК 1.02-16-2003. Инженерные изыскания для строительства. Сейсмическое микрорайонирование. Общие положения [Текст]: государственные нормативы в области архитектуры, градостроительства и строительства. Строительные нормы РК / Комитет по делам строительства МИИТ РК. – Взамен РСН 65-87 ; Введ. с 01.08.2003. – Заменен на СН РК 1.02-16-2003 издание 2007 с 01.06.2007. - Астана : Проектная академия “KAZGOR”, 2003. – 10 с.
2. СНиП РК 2.03-30-2006. Строительные нормы и правила РК. Строительство в сейсмических районах [Текст]: СНиП РК 2.03-30-2006. - Взамен СНиП РК 2.03-04-2001 ; Введ. с 01.07.2006 г. – Алматы : Комитет по делам строительства и ЖКХ Министерства индустрии и торговли РК, 2006. – 80 с.
3. Отчет «Об инженерных изысканиях для уточнения категории грунтов по сейсмическим свойствам. Объект: АО «УМЗ». Промышленная площадка». 2013 г. Договор № 104-13/28-04-01 от 25.10.2013 г. с АО «УМЗ»
4. РСН 65-87. Инженерные изыскания для строительства. Сейсмическое районирование. Технические требования к производству работ. Госстрой РСФСР, М.: МосЦТИСИС Госстроя РСФСР, 1987. – 26 с.

#### «УМЗ» АҚ ӨНЕРКӘСІПТІК АЛАҢЫНДАҒЫ ГРУНТТАРДЫҢ САЛЫСТЫРМАЛЫ СЕЙСМИКАЛЫҚ СИПАТТАМАЛАРЫН ЗЕРДЕЛҮ

Рябенко П.В., Михайлова Н.Н.

*Қазақстан, Курчатов қ., Геофизикалық зерттеулер институты*

«УМЗ» АҚ өнеркәсіптік алаңының әр учаскелерінде сейсмикалылықтың өсімшесі өзгеруін кешенді сандық бағалауында алынған далалық сейсмикалық станцияларымен тіркелген сейсмикалық оқиғаларды талдау нәтижелері келтіріледі. Сейсмологиялық бақылаулардың деректері бойынша сейсмикалық станциялар орналасу аудандарындағы қысқапериодты толқындық өрістердің қасиеттері зерттелген. Зерттеулердің нәтижелері өнеркәсіптік алаңның сейсмикалылығын дәлдеу бойынша геофизикалық деректерімен салыстырылған. Олардың жақсы сәйкестігі анықталған. Алынған деректерін УМЗ инженерлік құрылыстарының сейсмикалылығын бағалауында қолдануға болады.

#### STUDY OF RELATIVE SEISMIC PARAMETERS OF THE GROUND AT JSC “UMZ” INDUSTRIAL SITE

P.V. Ryabenko, N.N. Mikhailova

*Institute of Geophysical Research, Kurchatov, Kazakhstan*

The paper presents the results of analysis of recorded seismic events by field seismic stations obtained during complex quantitative estimate of the change of seismicity amplification in various places of JSC “UMZ” industrial site. Based on seismic observations data the parameters of short-period wave fields have been researched in the regions of seismic stations’ locations. The research results have been compared with geophysical data on clarification of the seismicity of industrial site. Their congruence has been noted. The obtained data can be used during the estimate of seismic resistance of engineering constructions of UMZ.

## СПИСОК АВТОРОВ

- Бабкова Е.А., 33  
Габсатарова И.П., 33  
Горбунова Э.М., 93  
Губицкая Е.Г., 54  
Дубровин В.И., 60  
Зеленский К.Л., 65  
Кириллов А.В., 72  
Колосков В.М., 13  
Комлев А.В., 77  
Копничев Ю.Ф., 39, 46  
Коровиков А.Г., 5
- Короткий А.И., 13  
Мельничук М.А., 77  
Михайлова Н.Н., 86, 102, 112  
Мукамбаев А.С., 86  
Ольховик Д.А., 5  
Пилюгина А.Л., 54  
Резяпова-Атаханова В.А., 93  
Романов А.М., 65, 72, 77  
Рухин А.Б., 21  
Рябенко О.В., 102  
Рябенко П.В., 112
- Середавина Т.А., 21  
Смирнов А.А., 60  
Соколова И.Н., 39, 46  
Стахов О.В., 21  
Субботин Ю.Н., 13  
Сушкова Н.С., 21  
Цепелев И.А., 13  
Чередниченко О.Г., 54  
Черных Н.И., 13  
Шаповалов Г.В., 28

---

## ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Статьи предоставляются в электронном виде (на CD, DVD диске или по электронной почте присоединенным [attachment] файлом) в формате MS WORD и печатной копии.

Текст печатается на листах формата А4 (210×297 мм) с полями: сверху 30 мм; снизу 30 мм; слева 20 мм; справа 20 мм, на принтере с высоким разрешением (300-600 dpi). Горизонтальное расположение листов не допускается.

Используются шрифт Times New Roman высотой 10 пунктов для обычного текста и 12 пунктов для заголовков. Пожалуйста, для заголовков используйте стили (Заголовок 1, 2...) и не используйте их для обычного текста, таблиц и подписочных подписей.

Текст печатается через одинарный межстрочный 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.

Максимально допустимый объем статьи – 10 страниц.

### **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 организации, города и страны местонахождения, которую они представляют;
- Ссылки на литературные источники даются в тексте статьи цифрами в квадратных [1] скобках по мере упоминания. Список литературы следует привести по ГОСТ 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, \*.jpg, \*.wmf 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);
- сведения об авторах (в бумажном и электронном виде): ФИО (полностью), наименование организации и ее полный адрес, должность, ученая степень, телефон, e-mail.

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, электронной почты.

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

---

---

**Ответственный секретарь** к.ф.-м.н. У.П. Козтаева  
тел. (722-51) 2-33-35, E-mail: KOZTAEVA@NNC.KZ

**Технический редактор** И.Г. Перепелкин  
тел. (722-51) 2-33-33, E-mail: IGOR@NNC.KZ

---

**Адрес редакции:** 071100, Казахстан, г. Курчатов, ул. Красноармейская, 2, зд. 054Б  
<http://www.nnc.kz/vestnik>

---

© Редакция сборника «Вестник НЯЦ РК», 2014

---

**Регистрационное свидетельство №1203-Ж от 15.04.2000 г.**  
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. Красноармейская, 2, зд. 054Б

