

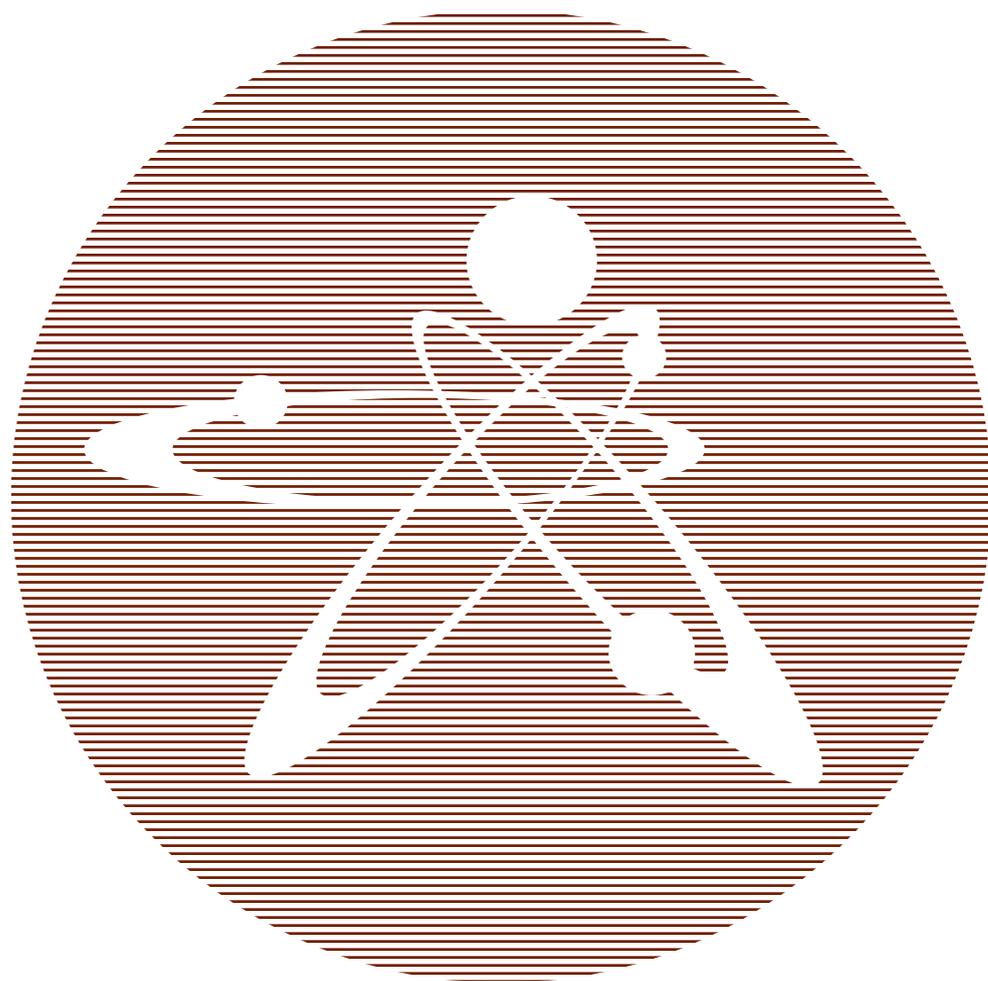
2016

ВЫПУСК 4

ISSN 1729-7516

ПЕРИОДИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ  
НАЦИОНАЛЬНОГО ЯДЕРНОГО ЦЕНТРА  
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ  
ВЕСТНИК



# **Вестник НЯЦ РК**

ПЕРИОДИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ  
НАЦИОНАЛЬНОГО ЯДЕРНОГО ЦЕНТРА РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

ВЫПУСК 4(68), ДЕКАБРЬ 2016

*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. ГРАДОБОЕВ 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(68) ШЫҒАРЫМ, ЖЕЛТОҚСАН, 2016 ЖЫЛ

## **NNC RK Bulletin**

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

ISSUE 4(68), DECEMBER 2016

**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 XV ежегодной конференции-конкурса НИОКР молодых ученых и специалистов РГП НЯЦ РК (18 – 20 мая 2016 г., Курчатов, Казахстан), стр. 43–129.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПУХАНИЯ И КОРРОЗИИ МАТЕРИАЛА ЧЕХЛА ОТРАБОТАВШИХ ТВС РУ БН-350</b> Скаков М.К., Ситников А.А., Яковлев В.И., Бакланов В.В., Коянбаев Е.Т., Сапатаев Е.Е., Курбанбеков Ш.Р., Кожаметов Е.А.....	5
<b>ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЧЕХЛОВ ОТРАБОТАВШЕЙ ЭКРАННОЙ СБОРКИ РЕАКТОРА БН-350</b> Скаков М.К., Ситников А.А., Бакланов В.В., Яковлев В.И., Коянбаев Е.Т., Сапатаев Е.Е., Миниязов А.Ж., Кожаметов Е.А. ....	11
<b>ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ НЕЙТРОНАМИ И ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР ИСПЫТАНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ФАЗОВОЕ <math>\gamma \rightarrow \alpha</math> ПРЕВРАЩЕНИЕ В СТАЛИ X18H9</b> Максимкин О.П., Рубан С.В., Турубарова Л.Г. ....	18
<b>КОЛЬЦЕВЫЕ СТРУКТУРЫ СЕЙСМИЧНОСТИ В РАЙОНЕ ЮЖНОЙ МЕКСИКИ: ВОЗМОЖНАЯ ПОДГОТОВКА СИЛЬНОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ</b> Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. ....	24
<b>КОЛЬЦЕВЫЕ СТРУКТУРЫ СЕЙСМИЧНОСТИ В ДВУХ ЗОНАХ СУБДУКЦИИ ТИХОГО ОКЕАНА: ВОЗМОЖНАЯ ПОДГОТОВКА СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ</b> Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. ....	30
<b>КОЛЬЦЕВЫЕ СТРУКТУРЫ СЕЙСМИЧНОСТИ В ЗОНЕ СУБДУКЦИИ КАСКАДИЯ: ВОЗМОЖНАЯ ПОДГОТОВКА СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ</b> Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. ....	36
<b>РАСЧЕТ КРЫШКИ АМПУЛЫ ПЕТЛЕВОГО КАНАЛА ИГР</b> Сулейменов Н.А., Котов В.М., Витюк Г.А.....	43
<b>ВЛИЯНИЕ ПЛАЗМЫ НА ВОЛЬФРАМ И МОЛИБДЕН КАК НА КАНДИДАТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА</b> Туленбергенов Т.Р., Скаков М.К., Рахадиллов Б.К., Соколов И.А. ....	48
<b>РАСЧЕТ ИНДУКЦИОННОГО РАЗОГРЕВА ШИХТЫ В ЭЛЕКТРОПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ УСТАНОВКИ «ЛАВА-Б»</b> Хажидинов А.С., Гановичев Д.А., Акаев А.С.....	58
<b>ОЧАГ И ПОСЛЕДСТВИЯ СИЛЬНЕЙШЕГО ГИНДУКУШСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 26 ОКТЯБРЯ 2015 г. (Mw=7.5)</b> Мурсрепов А.В., Соколов А.Н. ....	62
<b>ЭФФЕКТИВНОСТЬ СЕЙСМИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ В МОНИТОРИНГЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ТЕРРИТОРИИ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ</b> Рябенко П.В., Михайлова Н.Н. ....	70
<b>ИЗМЕНЕНИЕ В СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКЕ В РАЙОНЕ ПЛОЩАДКИ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО АТОМНОГО РЕАКТОРА ВВР-К ИЯФ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗУЧЕНИЯ МЕХАНИЗМОВ ОЧАГОВ ПОСЛЕДНИХ ЛЕТ</b> Узбеков А.Н., Полешко Н.Н. ....	77
<b>ЯДЕРНОЕ ИСПЫТАНИЕ В СЕВЕРНОЙ КОРЕЕ В 2016 ГОДУ</b> Узбеков Р.Б., Сейнасинов Н.А.....	85
<b>ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЕ УТОЧНЕНИЕ МЕСТ ПРОВЕДЕНИЯ МИРНЫХ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ НА ТЕРРИТОРИИ КАЗАХСТАНА</b> Абишев А.Х., Яковенко А.М., Маккей К.Г. ....	92

---

<b>СВЯЗЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ АКТИВНОСТИ РАДИОНУКЛИДОВ С ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ УЧАСТКА БАЙТЛЕС</b> Апенько А.В., Ботов А.А., Романов А.М.....	98
<b>ВЛИЯНИЕ РЕЛЬЕФА НА ОТЛОЖЕНИЕ РАДИОНУКЛИДОВ ИЗ ПОТОКА ВОД БОЕВЫХ ШТОЛЕН УЧАСТКА БАЙТЛЕС</b> Ботов А.А., Романов А.М.....	103
<b>РАЙОНИРОВАНИЕ СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА ПО ИНТЕНСИВНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ТЕРРИТОРИИ</b> Бахтин Л.В., Кокежанов Б.А., Пестов Е.Ю., Романов А.М.....	107
<b>ИЗМЕНЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ</b> Марченко И.О., Мельничук М.А., Романов А.М.....	111
<b>ОЦЕНКА ЗАВИСИМОСТИ СОРБЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ ПОРОД ОТ КРУПНОСТИ ФРАКЦИЙ</b> Реязпова-Атаханова В.А., Романов А.М. ....	115
<b>МОДЕЛИРОВАНИЕ МИГРАЦИИ ВЕЩЕСТВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ</b> Мельничук М.А., Романов А.М., Тлеугалиев Д.Р. ....	119
<b>ДИАГНОСТИКА РАДИАЦИОННЫХ ПОТЕРЬ ПЛАЗМЫ ДЛЯ ФИЗИЧЕСКОГО ПУСКА ТОКАМАКА КТМ НА ОСНОВЕ ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДЕТЕКТОРА</b> Шаповалов Г.В., Чектыбаев Б.Ж., Маусымбаев С.С., Купишев Е.Б., Сарычев Д.В.....	124
<b>ПАМЯТИ АКАДЕМИКА НАН РК ТАКИБАЕВА ЖАБАГЫ СУЛЕЙМЕНОВИЧА (28.09.1919 — 31.10. 2016).....</b>	130
<b>СПИСОК АВТОРОВ.....</b>	132

УДК 620.196.19

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПУХАНИЯ И КОРРОЗИИ МАТЕРИАЛА ЧЕХЛА  
ОТРАБОТАВШИХ ТВС РУ БН-350**<sup>1)</sup> Скаков М.К., <sup>2)</sup> Ситников А.А., <sup>1)</sup> Яковлев В.И., <sup>1)</sup> Бакланов В.В., <sup>1)</sup> Коянбаев Е.Т.,  
<sup>1)</sup> Сапатаев Е.Е., <sup>1)</sup> Курбанбеков Ш.Р., <sup>1)</sup> Кожаметов Е.А.<sup>1)</sup> Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан<sup>2)</sup> Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Барнаул, Россия

Исследовано состояние поверхности чехлов тепловыделяющих сборок (ТВС) после длительной эксплуатации в реакторе БН-350 и хранения в бассейне выдержки. Материалом для изготовления чехла ТВС служит аустенитная сталь 12Х18Н10Т. Получены данные по распуханию и коррозии внутренней и внешней сторон образцов в зависимости от расстояния до центра активной зоны. Показано, что основными факторами, приводящими к изменению структуры и охрупчиванию материала, являются радиационное распухание и коррозионное растрескивание высокооблученного реакторного материала.

**ВВЕДЕНИЕ**

Проблема безопасного длительного хранения отработавшего топлива энергетических ядерных реакторов тесно связана с исследованиями радиационно-термических изменений микроструктуры, физико-механических и коррозионных свойств конструкционных материалов стенок чехлов и оболочек ТВЭЛов ТВС реакторов на быстрых нейтронах. Аустенитные нержавеющие стали широко используются в качестве оболочек поглощающих элементов, пружинных элементов ТВЭЛов и ТВС и в отдельных случаях дистанционирующих решеток ТВС. Аустенитные стали с ГЦК-решеткой имеют при рабочих температурах (до 650 °С) удовлетворительную длительную прочность и ползучесть, но подвержены значительному радиационному распуханию, вызывающему также охрупчивание и потерю прочности [1].

Анализ результатов многочисленных публикаций по данной теме свидетельствует о том, что при облучении и последующем нахождении конструкционных материалов в воде возрастает их склонность к разрушению, вследствие чего увеличивается вероятность выхода в окружающую среду токсичных продуктов деления урана [2, 3]. В работах [4, 5] были исследованы различия влияния нейтронного облучения и последующего мокрого хранения на структуру и свойства внешних и внутренних приповерхностных слоев стенки чехлов ТВС реактора БН-350. Также было выявлено, что изменения структуры и свойств сталей неодинаково не только по высоте сборки и ширине граней, но и по толщине стенки чехла.

В этой связи изучение стойкости к радиационному распуханию и коррозионной повреждаемости конструкций активной зоны после их длительной эксплуатации в реакторе на быстрых нейтронах и последующего продолжительного хранения в воде является актуальной задачей реакторного материаловедения.

В настоящей работе приведены результаты исследования различия плотности, состояния поверхности материалов шестигранных чехлов отработавших ТВС после эксплуатации в реакторе БН-350 и длительного хранения в бассейне выдержки.

**МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

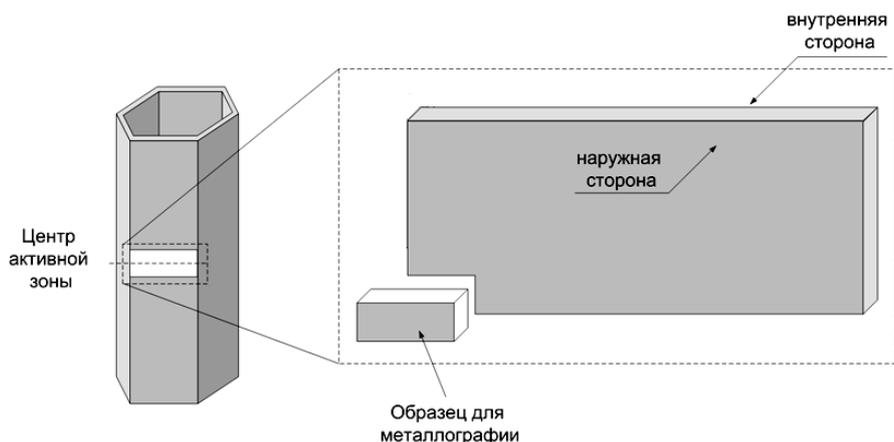
В таблице 1 приведены подробные характеристики исследуемых сталей. Отработавшие сборки после извлечения из реактора длительное время находились в воде бассейна-хранилища атомного реактора. В «горячих» камерах из стенок чехлов ТВС с различных отметок по высоте, в том числе на уровне ЦАЗ, были вырезаны пластины размером 50×20×2 мм (см. рисунок 1). За время эксплуатации образцы получили повреждающие дозы в интервале от 12 сна до 59 сна.

Визуальный осмотр образцов проводился невооруженным глазом. Все замеченные особенности строения регистрировались при помощи цифровой камеры CANON EOS 350 с функцией макросъемки. Шлифы для металлографических исследований изготавливались стандартными способами, включающими в себя механическую шлифовку, механическую и электролитическую полировку, а также конечное электролитическое травление. Предварительно, до проведения полировки и травления, определялись характер и глубина коррозионного повреждения материала металлографическим методом в соответствии с ГОСТ 9.908 [6]. Исследование структурных составляющих и морфологии поверхности образцов проводилось при помощи сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) JSM-6390. Оценка степени распухания образцов выполнялась посредством определения плотности методом гидростатического взвешивания.

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПУХАНИЯ И КОРРОЗИИ МАТЕРИАЛА ЧЕХЛА  
ОТРАБОТАВШИХ ТВС РУ БН-350**

*Таблица. Характеристики отобранных образцов отработавших ТВС РУ БН-350 из стали 12Х18Н10Т*

Наименование изделия, материал	Наработка, эфф. сутки	Координаты относительно ЦАЗ, размеры, мм	$\Phi$ , $10^{23}$ см <sup>-2</sup> (макс. доза, сна)	Мощность реактора, МВт	$T_{вк}$ , °С	$T_{вык}$ , °С	Макс. скорость набора дозы, $10^{-6}$ сна/с
Чехол Н-214	3696,7	«0 мм» 50×20×2	0,7 (~12)	750	285-290	440-450	0,038
Чехол Н-42	643,8		0,818 (~17)	650			0,305
Чехол В-198	537,6		1,214 (~29)	650			0,618
Чехол ЦЦ-15Т	291,8		1,731 (~48)	650			1,91
Чехол ЦЦ-19	370,9		1,944 (~59)	680			1,84

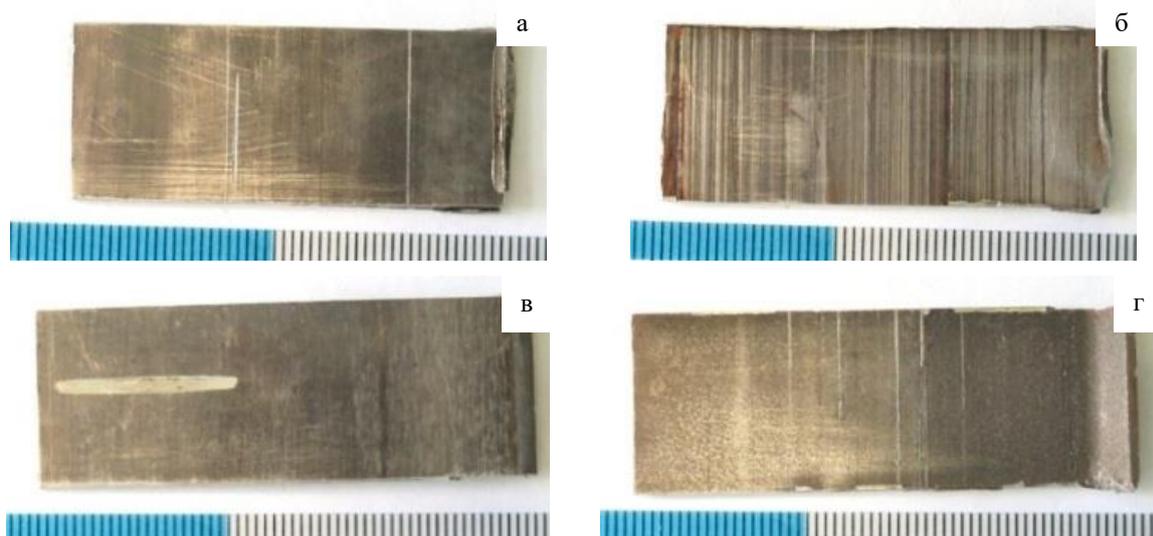


*Рисунок 1. Схема вырезки образцов для коррозионных испытаний из грани чехла отработавшие ТВС*

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ  
И ИХ ОБСУЖДЕНИЯ**

Визуальное исследование состояния поверхности чехла отработавших ТВС реактора БН-350 после длительного хранения в воде показало, что на всех исследованных образцах имеются следы коррозии. Также в характеризуемых образцах, вырезанных из стенки чехла отработавших ТВС различных типов, не было зафиксировано видимых формоизменений в

виде изгиба, скручивания и т.п., которые, как правило, формируются за счет релаксации внутренних напряжений [7, 8]. Тем не менее, нельзя исключить то, что формоизменение образцов может произойти через некоторое время после их вырезки из стенки чехла отработавших ТВС. На рисунке 2 приведены макрофотографии наружной и внутренней поверхностей стенок чехлов различных ТВС.



*Рисунок 2. Макрофотографии наружной и внутренней поверхности различных отработавших ТВС  
а) наружная, б) внутренняя сторона стенки чехла экранной отработавших ТВС Н-214 «0» от ЦАЗ,  
в) наружная, г) внутренняя сторона ЦЦ-15Т стенки чехла центральной ТВС ЦЦ-15Т «0» от ЦАЗ*

На макроснимках видно, что наружная поверхность стенки чехлов отработавших ТВС выглядит более гладкой и имеет следы обработки, в то время как на внутренней поверхности экранных сборок присутствуют визуально различимые темные полосы (линии) с различными оттенками (от светло-коричневого до черного цвета) (рис. 2 а, б). Эти полосы распространяются параллельно грани шестигранного чехла и присутствуют только на экранных сборках, что, скорее всего, является следствием их изготовления методом горячей прокатки. Внутренняя поверхность образцов из стенки чехла центральных ТВС ЦЦ-15Т характеризуется матовой шероховатой поверхностью в виде ориентированных волн, что также указывает на применение горячей прокатки при изготовлении шестигранных труб (рис. 2 в, г).

Результаты определения плотности материала стенки чехла отработавших ТВС различных типов представлены на рисунке 3. Анализ результатов показывает, что значение плотности всех исследуемых образцов меньше значения плотности материала шестигранного чехла ТВС в исходном состоянии, которое составляет  $7,824 \text{ г/см}^3$ , что свидетельствует о наличии эффекта набухания материала чехла отработавших ТВС после реакторного облучения.

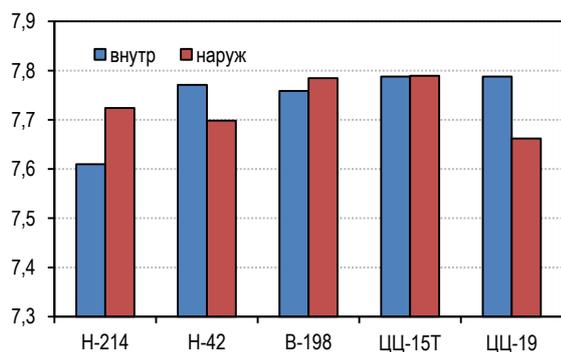


Рисунок 3. Значение плотности образцов внутренней и наружной стенки чехла ОТВС различных типов

Известно, что нейтронное облучение влияет на коррозионную стойкость конструкционных материалов, вызванную радиационно стимулированными структурными изменениями. Коррозионная стойкость аустенитной нержавеющей стали зависит от изменения состава материала, особенно на границах зерен. Авторами работы [9] было установлено наличие существенных различий в коррозионной повреждаемости наружной и внутренней поверхностей стенки чехла. Также в литературе приведено еще ряд разрозненных сведений о различиях структуры и физико-механических состояниях внутренней и наружных поверхностей чехла ТВС [10].

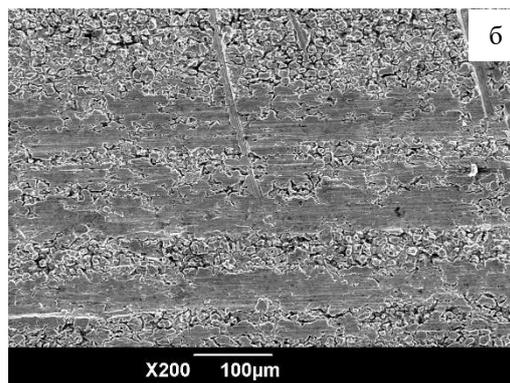
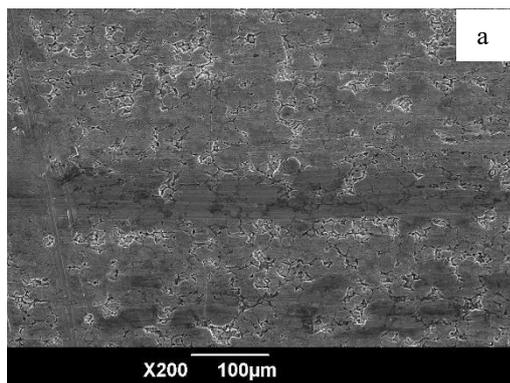
Изучение морфологии коррозионного поражения образцов исследуемой стали экранных и центральных ТВС с помощью сканирующего электронного микроскопа показало, что в результате реакторного облучения и последующего «мокрого» хранения обнаружены различия в характере коррозионной повреждаемости наружных и внутренних стенок чехла ТВС. На наружной стороне всех образцов наблюдается неравномерное распределение коррозионных повреждений: межкристаллитного типа на экранных сборках и язвенного типа (размерами до 300 мкм) на центральных сборках.

Подробное изучение структуры поверхностей образцов методом сканирующей электронной микроскопии показало, что на внешних (рис. 4 а, в, д) и внутренних (рис. 4 б, г, е) поверхностях чехла экранных сборок H-214, H-42, B-198 обнаружено сильно выраженное проявление несплошностей в виде межкристаллитной коррозии. Внутренняя сторона стенки чехла экранных сборок характеризуется наличием трех типов коррозии в привязке к макронаблюдаемым неоднородностям (рис. 4 б, г, е). На поверхности темных (черных) полос присутствует легко снимаемая тонкая пленка из продуктов коррозии, предположительно из окиси железа FeO, вероятнее всего, сформированных в процессе хранения отработавших ТВС. Светло-серые полосы характеризуются равномерно распределенной межкристаллитной коррозией, светлые полосы являются результатом поверхностной деформации (наклепа), где развитие межкристаллитной коррозии находится еще на начальных этапах.

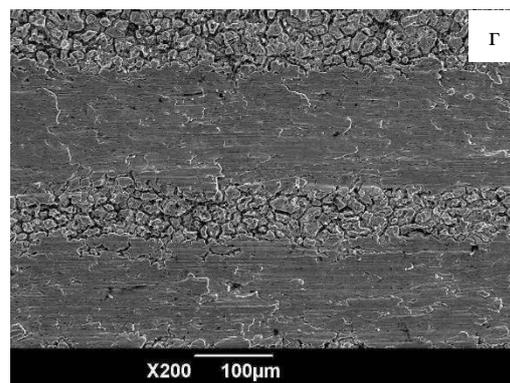
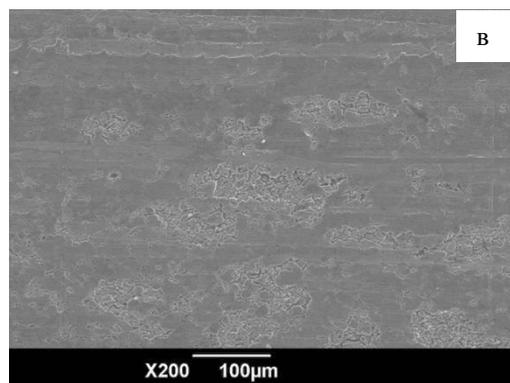
Металлографические исследования структуры поверхностей образцов показало, что коррозионное повреждение как необлученных, так и облученных нейтронами образцов имеет только межкристаллитный характер. Снижение стойкости к коррозионному растрескиванию после нейтронного облучения рассматриваемых сталей отмечается в работах [11, 12].

Осмотр внешнего вида образцов стали 12X18H10T чехла ТВС ЦЦ-19 и ЦЦ-15Т показал, что в результате облучения и последующего хранения в течение 25 лет на поверхности наружной стороны чехла имеются следы питтинговой коррозии.

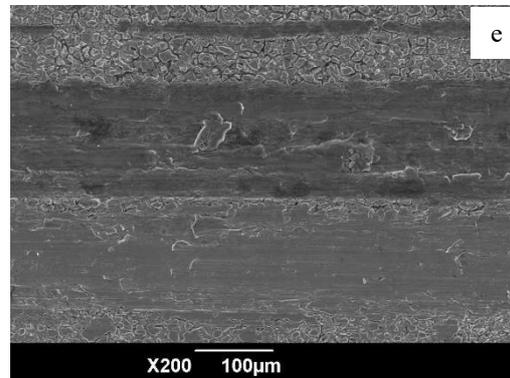
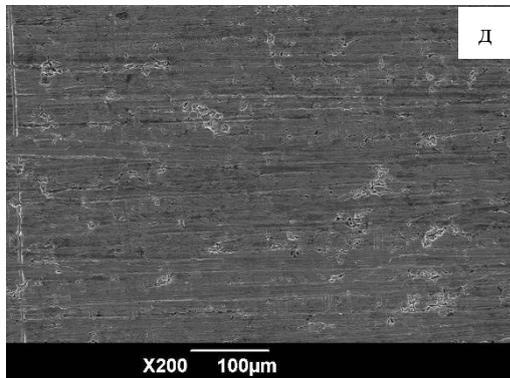
Коррозия материала происходит главным образом в результате появления новых очагов и слияния мелких питтингов в крупные язвы (рис. 5 а, в). На внутренней стороне чехла также наблюдаются коррозионные дефекты, образованные на поверхности образца. Полученные данные свидетельствуют о неравномерном процессе развития питтингов в образцах, которая определяется различным структурным состоянием материала и склонностью к межкристаллитной коррозии (рис. 5 б, г).



внешняя и внутренняя поверхность чехла экранных отработавших ТВС Н-214, «0» мм отметка от ЦАЗ



внешняя и внутренняя поверхность чехла экранных отработавших ТВС Н-42, «0» мм отметка от ЦАЗ

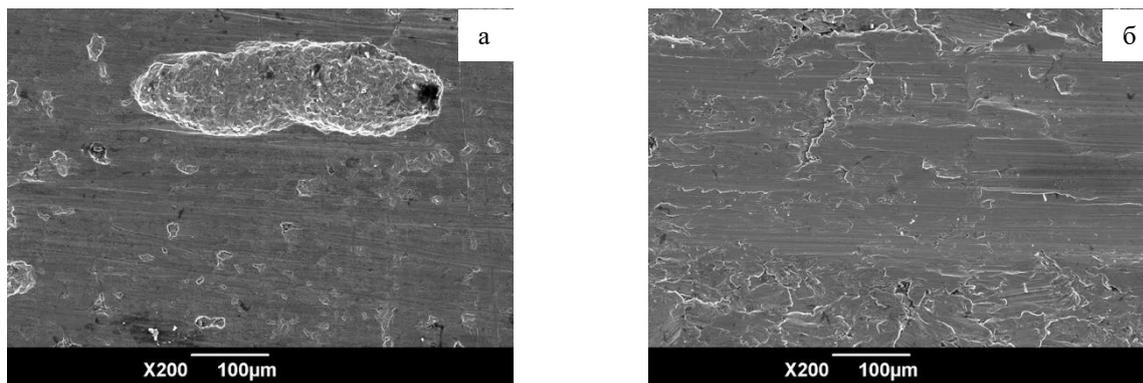


внешняя и внутренняя поверхность чехла экранных отработавших ТВС В-198, «0» мм отметка от ЦАЗ

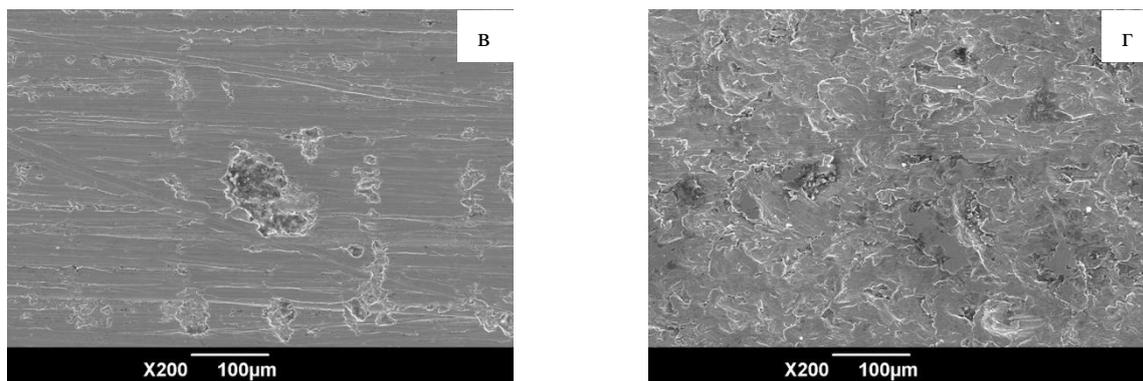
*Рисунок 4. Распределение различных типов коррозионных повреждений внешней (а, в, д) и внутренней (б, г, е) поверхностей чехла экранной ТВС*

Присутствие волнистой топографии на внутренней стороне образцов из центральных сборок (ЦЦ-15Т и ЦЦ-19) затрудняет установление характера коррозионного поражения, так как поверхностный слой сильно деформирован (рис. 5). Тем не менее, на поверхности можно наблюдать очаги распространения межкристаллитной коррозии.

На рисунке 6 представлены результаты измерения глубины коррозионного поражения металлографическим методом в соответствии с методом определения показателей коррозии и коррозионной стойкости [12]. Выявлено, что глубина проникновения межкристаллитной коррозии на внутренней поверхности стенки выше, чем на наружной поверхности стенки чехла экранной сборки и возрастает с увеличением значения повреждающих доз.



внешняя и внутренняя поверхность чехла центральной ТВС ЦЦ-15Т, «0» мм отметка от ЦА3



внешняя и внутренняя поверхность чехла центральной ТВС ЦЦ-19, «0» мм отметка от ЦА3

Рисунок 5. Различные типы коррозионных повреждений внешней (а, в) и внутренней (б, г) поверхности чехла центральной ТВС

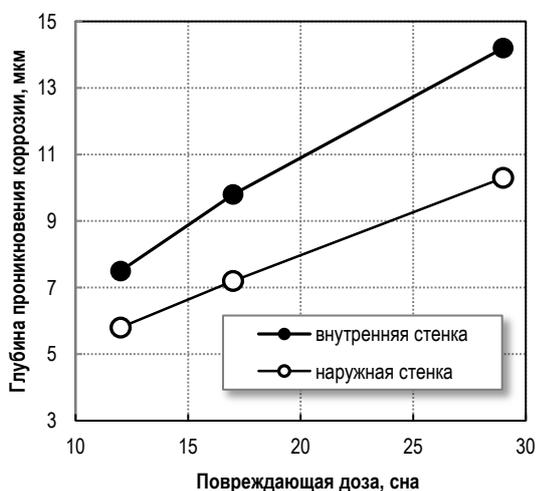


Рисунок 6. Глубина проникновения межкристаллитной коррозии на наружной и внутренней стенке экранных ТВС в зависимости от повреждающих доз

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании общего анализа полученных результатов в настоящей работе можно сделать следующие выводы:

Проведенные металлографические исследования и измерения гидростатической плотности чехла от-

работавших ТВС реактора БН-350 свидетельствуют о существенной неоднородности структуры облученной стали даже в пределах одного уровня. При этом выявлена нелинейная зависимость распухания нержавеющей стали 12Х18Н10Т от дозы облучения;

Определено, что в результате качественной и количественной оценки коррозионного разрушения внутренней и наружной поверхностей чехла отработавших ТВС обнаружены различные типы коррозии на поверхностях стенки чехла отработавших ТВС. Также установлено, что глубина проникновения межкристаллитной коррозии на внутренней поверхности стенки выше, чем на наружной поверхности стенки чехла экранных сборок и возрастает с увеличением значения повреждающих доз;

Показано, что основными факторами, приводящими к изменению структуры материала охрупчиванию материала, являются радиационное распухание и коррозионное растрескивание высокооблученного реакторного материала. Факторами, оказывающими влияние на структурные характеристики материалов, являются температуры и интегральный поток нейтронов. Так как уровень дозы облучения распределяется неравномерно по сечению конструкции, то очевидно влияние нейтронного облучения приведет к изменяющейся неоднородности структуры и свойств материалов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. В.Н. Воеводин, И.М. Неклюдов. Эволюция структурно-фазового состояния и радиационная стойкость конструкционных материалов. Киев: «Наукова думка», 2006, 76 с.
2. О.П. Максимкин, Т.А. Доронина, А.В. Яровчук Л.Г. Турубарова Коррозия сталей аустенитного и ферритного-мартенситного классов материалов чехлов отработавших ТВС БН-350 // ВАНТ.2007. №6. с. 97-102.
3. Р.Н. Кикичев Коррозионное растрескивание аустенитных хромоникелевых сталей и сплавов // ВАНТ. 2003. №3. с. 96-100.
4. О.П. Максимкин, О.В. Тиванова, Л.Г. Турубарова Различие структуры и свойств поверхностей шестигранного чехла отработавших ТВС реактора БН-350//ВАНТ. 2007. №2. с. 142-149.
5. О.П. Максимкин, О.В. Тиванова, Локализованная деформация в аустенитных нержавеющей сталей – материалах чехлов ТВС реактора БН-350, облученных до высоких повреждающих доз // ВАНТ. 2012. №2(78). с. 83-88.
6. ГОСТ 9.908-85. Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы и сплавы. Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости.– М.: Изд-во стандартов, 1985.
7. Коянбаев, Е.Т. Изучение поведения отработавших топливных сборок ядерных реакторов при их длительном сухом хранении / Е.Т. Коянбаев, О.П. Максимкин, А.С. Азимханов // Экспериментальные исследования в области безопасности атомной энергии, ч. 1.– Курчатов, НЯЦ РК.– 2010.– С. 331-348.
8. Кислицын, С.Б. Формоизменения чехлов отработанных тепловыделяющих сборок реактора на быстрых нейтронах БН-350 // Материалы 8-ой международной конференции «Взаимодействие излучений с твердым телом», 23-25 сентября 2009, Минск, Беларусь.– С. 89-91.
9. Максимкин, О.П. Радиационные эффекты в конструкционных материалах атомных реакторов ВВР-К и БН-350 // Материалы 9-й Международной конференции, 4-7 июня 2007.– Алматы: ИЯФ НЯЦ РК, 2007.– С. 470-489.
10. Радиационное материаловедение на АЭС / М.Д. Абрамович, С.Н. Вотинков, А.Г. Иолтуховский.– М.: «Энергоатомиздат», 1984.– 136 с.
11. Влияние облучения и пост-радиационной термообработки на микроструктуру и свойства стали 12Х18Н9Т, облученной в исследовательском реакторе ВВР-К до 5 сна / К.В. Цай, О.П. Максимкин, Л.Г. Турубарова // Вопросы атомной науки и техники.– 2008.– № 2.– С. 100-107.
12. Коррозия металлов в ядерном энергомашиностроении / А.М. Паршин, А.Н. Тихонов, Р.Н. Кикичев.– С-Пб.: «Политехника», 2000.– 104 с.

## БН-350 РҚ ЖБЖ ПАЙДАЛАНҒАН ҚАБЫНЫҢ МАТЕРИАЛЫНЫҢ КОРРОЗИЯСЫ ЖӘНЕ ІСІНУІН ЗЕРТТЕУ

<sup>1)</sup>М.К. Скаков, <sup>2)</sup>А.А. Ситников, <sup>1)</sup>В.И. Яковлев, <sup>1)</sup>В.В. Бакланов, <sup>1)</sup>Е.Т. Коянбаев,  
<sup>1)</sup>Е.Е. Сапатаев, <sup>1)</sup>Ш.Р. Курбанбеков, <sup>1)</sup>Е.А. Кожакметов

<sup>1)</sup> ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан  
<sup>2)</sup> И.И. Ползунов атындағы Алтай мемлекеттік техникалық университеті, Барнаул, Ресей

БН-350 реакторында ұзақ пайдаланудан кейін жылу бөлгіш жинақтардың (ЖБЖ) қаптарының беттерінің жағдайы ұстау бассейнде сақтауы зерттелді. ЖБЖ қабын жасауға арналған материал ретінде 12Х18Н10Т аустенитті болат болып табылады. Үлгілердің ішкі және шыртқы жақтарының центрінен активті зонасына дейінгі қашықтыққа байланысты коррозиясы мен ісінуі туралы мәліметтер алынды. Материал құрылысының өзгеруіне және осалдануына әкелетін негізгі факторлар ретінде жоғары сәулеленген реакторлық материалдардың радиациялық ісуі және коррозиялық жарылуы болып табылатындығы көрсетілді.

## RESEARCH ON SWELLING AND CORROSION OF SPENT FUEL ASSEMBLY CASING MATERIAL OF REACTOR INSTALLATION BN-350

<sup>1)</sup>M.K. Skakov, <sup>2)</sup>A.A. Sitnikov, <sup>1)</sup>V.I. Yakovlev, <sup>1)</sup>V.V. Baklanov, <sup>1)</sup>Ye.T. Koyanbaev,  
<sup>1)</sup>Ye.Ye. Sapataev, <sup>1)</sup>Sh.R. Kurbanbekov, <sup>1)</sup>Ye.A. Kozhakhmetov

<sup>1)</sup> Institute of Atomic Energy Branch RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan  
<sup>2)</sup> Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

Surface condition of FA casings were investigated after long-term exploitation in BN-350 reactor and storing in cooling pool. 12Cr18Ni10Ti austenitic stainless steel is used for FA casing manufacturing. Data on swelling and corrosion of outer and inner sides of samples depending on distance up to core center were received. Radiation swelling and stress corrosion cracking of high radiated reactor materials are the main factors leading to change structure and material embrittlement.

УДК 539.12.04

**ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЧЕХЛОВ  
ОТРАБОТАВШЕЙ ЭКРАННОЙ СБОРКИ РЕАКТОРА БН-350**<sup>1)</sup> Скаков М.К., <sup>2)</sup> Ситников А.А., <sup>1)</sup> Бакланов В.В., <sup>1)</sup> Яковлев В.И., <sup>1)</sup> Коянбаев Е.Т.,  
<sup>1)</sup> Сапатаев Е.Е., <sup>1)</sup> Миниязов А.Ж., <sup>1)</sup> Кожаметов Е.А.<sup>1)</sup> Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан<sup>2)</sup> Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Барнаул, Россия

В данной работе, исследованы изменения микроструктуры и механических свойств нержавеющей аустенитной стали марки 12X18H10T, материала шестигранного чехла отработавшей экранной тепловыделяющей сборки (ТВС) реактора на быстрых нейтронах БН-350 после хранения в бассейне выдержки. Материал облучен до повреждающей дозы 12 сна. Определены, особенности структуры материала стенки чехла отработавшей ТВС, в том числе обнаружено различие в структуре материала чехла по толщине стенки. Также в результате исследования микроструктуры установлено, что в основной структуре материала стенки чехла присутствуют неметаллические включения, а также мелкодисперсные выделения сферической формы с размерами ~1,2 мкм. Исследования механических свойств материала подтверждают данные об упрочнении и снижении пластичности в результате облучения.

**ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время аустенитные нержавеющие стали широко используются при изготовлении различных компонентов активной зоны быстрых реакторов, что связано с их высоким сопротивлением к вакансионному распуханию и низкой скоростью радиационной ползучести. С другой стороны, возможности этих сталей ограничены склонностью к хрупкому разрушению в результате низкотемпературного радиационного охрупчивания в области температур  $T_{\text{обл.}} < 350$  °С и недостаточной жаропрочностью при высоких температурах (выше 600-650 °С). Проблеме образования и эволюции радиационных дефектов в облучаемых нейтронами металлических материалах посвящено большое число экспериментальных и теоретических работ [1-4]. Однако, достигнутый уровень знаний в этом направлении недостаточен для прогнозирования поведения реакторных материалов, особенно влияние облучения на структуру и физико-механические свойства [5, 6]. В частности в работах [7-9] указано, что микроструктура и физико-механические свойства нержавеющей сталей отличаются в различных участках чехла по его периметру и высоте. Так же имеются существенные различия в области ребер по сравнению с серединой грани чехла по фазовому составу, физико-механическим свойствам, плотности и распуханию. Оптимизация состава и структуры хромистых сталей позволяет повысить их жаропрочность. Однако серьезной проблемой при создании материалов перспективных активных зон с повышенными параметрами остается стабильность структуры и свойств этих материалов в условиях нейтронного облучения. В этой связи, получение новых послереакторных данных об эволюции механических свойств и структуры сталей является по-прежнему актуальным.

В настоящей работе приведены результаты исследования степени изменения структуры и физико-механических свойств материала чехла экранной ТВС после эксплуатации в реакторе БН-350 и длительного хранения в бассейнах выдержки.

**МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Объектом исследований являлся образец размерами 50×10×2 мм (рис. 1, а), вырезанный из грани чехла экранной сборки Н-214 реактора БН-350 на уровне центра активной зоны (ЦАЗ). Чехол ТВС Н-214 изготовлен из аустенитной стали марки 12X18H10T. За время эксплуатации длительностью 3696 эффективных суток в ЦАЗ чехол ТВС Н-214 получил повреждающую дозу 12,3 сна. Температура облучения в ЦАЗ – 337 °С.

Для снижения дозовой нагрузки на персонал из образцов методом электроэрозионной резки были изготовлены микрообразцы. Изготовление микрообразцов состояла из двух основных этапов (рис. 1), на первом этапе из образца проволочным электродом вырезались прямоугольные микрообразцы. Второй этап заключается в изготовлении микрообразца с уменьшенной площадью сечения рабочей части при помощи специальных электродов (рис. 1, в).

Электроэрозионный метод, как правило, не исключает механическую обработку, так как в процессе резки появляется дефектный оплавленный подслои и недостаточная чистота поверхности. Глубина оплавленного подслоя в отдельных случаях достигает 100 мкм. Удаление поврежденного слоя и достижение заданной чистоты поверхности осуществляется методом механической шлифовки и полировки. Изображение микрообразца из материала сборки Н-214 на различных этапах его изготовления представлено на рисунке 2.

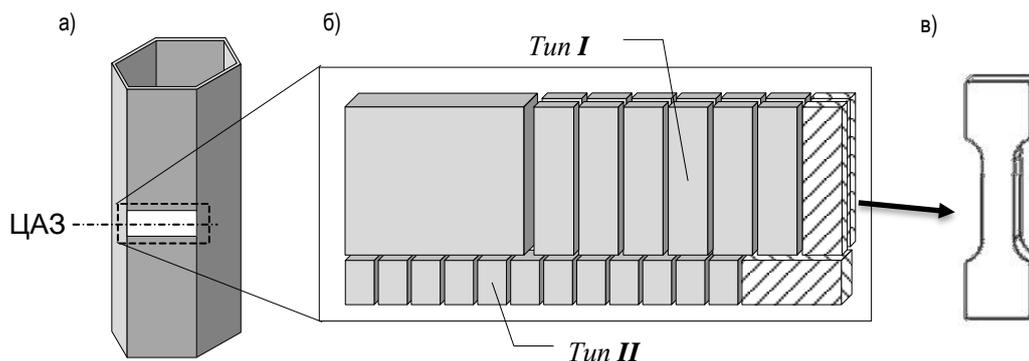


Рисунок 1. Схема отбора микрообразцов



Рисунок 2. Изображение микрообразца на различных этапах его изготовления

Исследования структуры образцов проводились методами оптической и электронной микроскопии. Шлифы для металлографических исследований изготавливались стандартными способами, включающими в себя механическую шлифовку, механическую и электролитическую полировку, а также конечное электролитическое травление. Предварительно, до проведения полировки и травления выполнялись измерения глубины коррозионного поражения металлографическим методом в соответствии с ГОСТ 9.908 [10]. Измерения микротвердости осуществлялась на шлифах по схеме Виккерса при нагрузке на индентор 100 г. Выявление микроструктуры образцов из аустенитной стали 12X18Н10Т производилось электролитическим методом в растворе хромового ангидрида. Изучение микроструктуры осуществлялась на оптическом микроскопе. Определение прочностных характеристик выполнялась методом одноосного растяжения на экспериментальной установке «КОРИНА» [11].

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЯ

В результате исследований установлена неравномерность структуры материала чехла отработавшего ТВС по толщине стенки. Возможно, это обусловле-

но не только различием повреждающих доз, но и технологией изготовления ТВС, в частности условиями исходной термомеханической обработки. Зерно аустенита характеризуется как разноразмерное, балл зерна находится в диапазоне от G10 до G13 по ГОСТ 5639-82. Структура характеризуется относительно большими зёрнами и множеством сферических выделений по границам и в теле зерна. Наружная поверхность имеет полосчатую структуру вдоль стенки чехла, что характерно для следов термомеханической обработки.

На рисунке 3 представлены изображения микроструктуры поперечного сечения внутренней и наружной поверхностей экранной сборки ТВС Н-214, где отчетливо видно, что приповерхностные слои состоят из нескольких различных зон. К первой зоне относится микроструктура области, расположенной ближе к поверхности, где протекало межкристаллитное разрушение. В глубине этой зоны наблюдается увеличение количества скопления вторичных выделений по границам и в теле зерна аустенита. Далее следует зона повышенной концентрации вторичных выделений. Вблизи наружной поверхности вторичные выделения располагаются преимущественно вдоль линии, параллельной стенке чехла, то есть по направлению прокатки, подчеркивая полосчатую структуру. Далее по глубине следует третья зона, где концентрация выделений меньше, чем во второй зоне, эта зона плавно переходит в зону основного материала, с уменьшением концентрации выделений.

Анализ результатов исследований показывает, что структура материала чехла Н-214 неоднородная, зерна имеют разные размеры по толщине стенки чехла. На рисунке 4 представлены гистограммы распределения размеров зерен по баллам, при различных расстояниях от внутренней поверхности. Оценка распределения зерен аустенита по баллам позволило определить, что во внутренней поверхности основная доля (более 65%) зерен по размерам соответствует баллам G10-G11, и по мере углубления в центральную область основная доля смещается в сторону уменьшения размера зерна. Ближе к наружной

**ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЧЕХЛОВ  
ОТРАБОТАВШЕЙ ЭКРАННОЙ СБОРКИ РЕАКТОРА БН-350**

поверхности размер зерен в основном (более 95%) равномерно распределен между баллами G10-G13. Таким образом, обнаружено что, микроструктура стенки чехла ТВС Н-214 имеет разнотелую структуру по всей толщине стенки чехла.

По результатам микроструктурных исследований обнаружена неоднородность размеров зерен стали, в

связи с этим исследуемая поверхность образца была разделена на три части: наружная, центральная и внутренняя части. Соответственно, методика измерения микротвердости состояла из двух подходов. Микротвердость измерялась по толщине стенки чехла от внутренней к наружной поверхности с шагом 0,04 – 0,2 мкм.

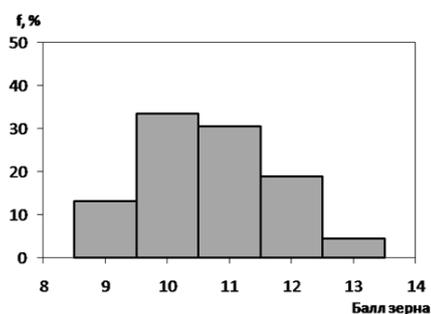


а) внутренняя поверхность

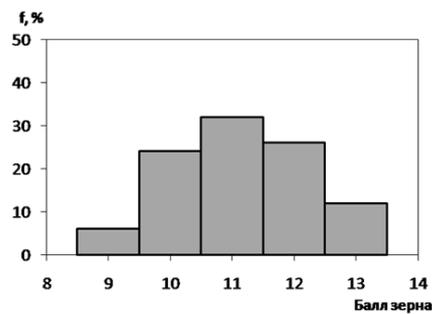


б) наружная поверхность

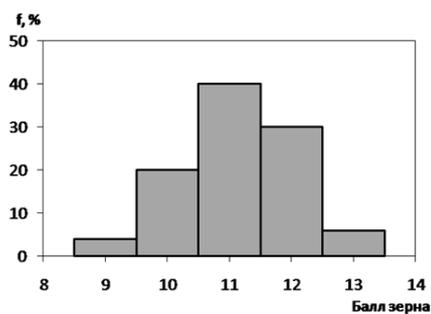
*Рисунок 3. Микроструктура (x500) поперечного сечения внутренней и наружной поверхностей экранной сборки ТВС Н-214 (с отметки «0» от ЦАЗ)*



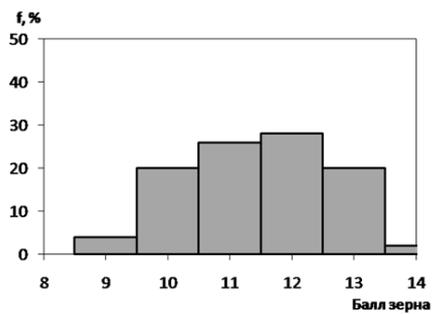
а) 100 мкм



б) 700 мкм



в) 1400 мкм



г) 1900 мкм

*Рисунок 4. Гистограммы распределения размеров зерен по баллам ОТВС наружного экрана Н-214, отметка «0» от ЦАЗ (~12 сна) при различных расстояниях от внутренней поверхности*

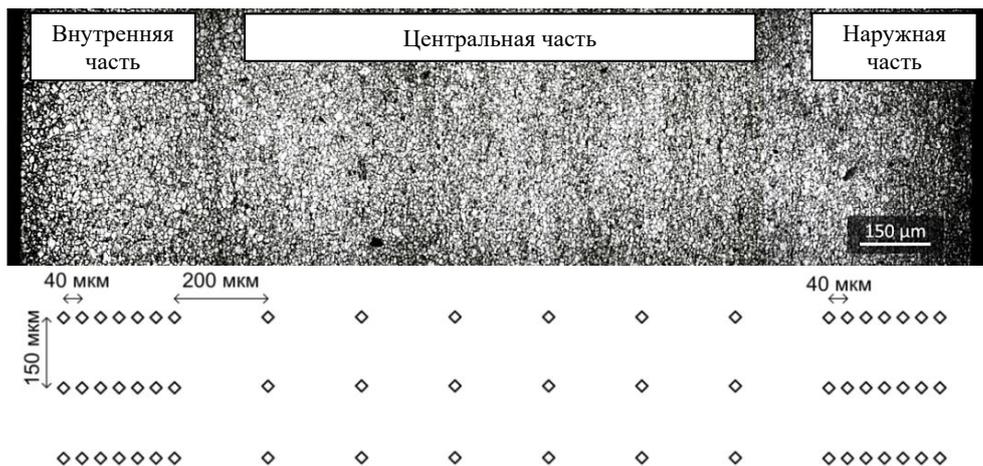


Рисунок 5. Структура поверхности образца и схема определения микротвердости по толщине стенки чехла ОТВС Н-214

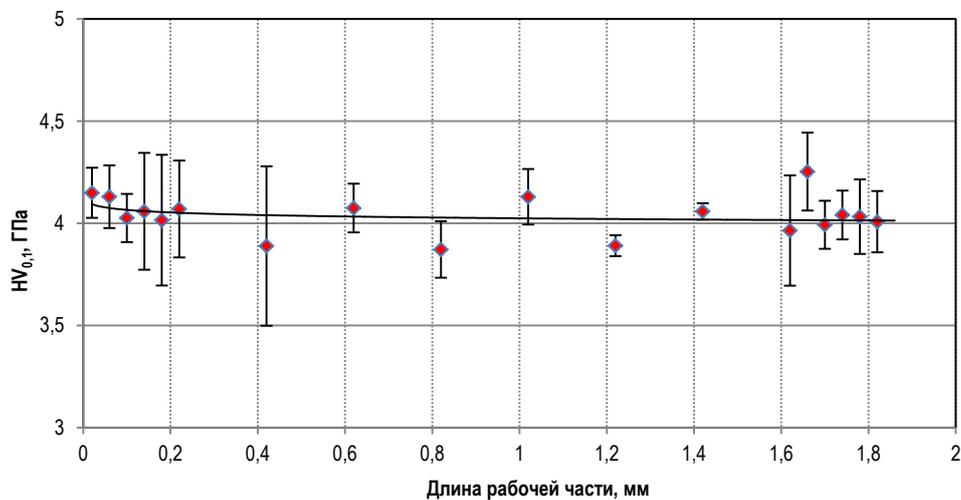


Рисунок 6. Распределение микротвердости по толщине стенки чехла ОТВС Н-214

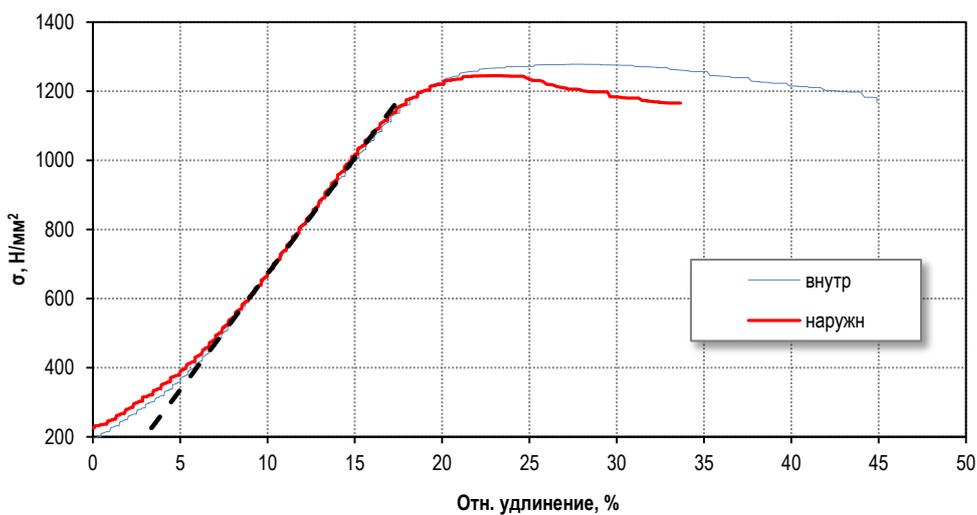


Рисунок 7. Диаграмма растяжения облученного микрообразца

При этом на каждом уровне, параллельно стенки чехла, было выполнено не менее 3 индентирований. На рисунке 5 приведена схема измерения микротвердости образца по толщине. На наружной и внутренней частях образца произведено по 6 уколов на расстоянии 300 мкм с шагом 40 мкм и в центральной части с шагом 200 мкм.

Распределение микротвердости по толщине образца (рисунок 6) показывает наличие эффекта упрочнения материала от исходного на 50%. На внутренней стенке грани ОТВС Н-214 имеется незначительное, порядка 3%, упрочнение материала.

Для определения прочностных характеристик материала были проведены механические испытания микрообразцов вырезанных с внутренней и наружной стенки чехла ТВС Н-214. Испытание проводилось на экспериментальной установке «КОРИНА» при комнатной температуре со скоростью деформации 3,66 мм/мин.. Диаграмма растяжения микрообразцов представлена на рисунке 7.

Значение условного предела текучести ( $\sigma_{0,2}$ ) высокооблученного микрообразцов из наружной и внутренней стенки, определенного графическим методом, соответствует 1120 Н/мм<sup>2</sup> и 1020 Н/мм<sup>2</sup>. Предел прочности ( $\sigma_b$ ) микрообразца из наружной поверхности составляет 1244 Н/мм<sup>2</sup>, а микрообразца внутренней поверхности – 1278 Н/мм<sup>2</sup>, при этом относительно остаточное удлинение рабочей части достигли 27,0% и 16,4% соответственно. На рисунке 8

представлен внешний вид микрообразцов после механических испытаний.

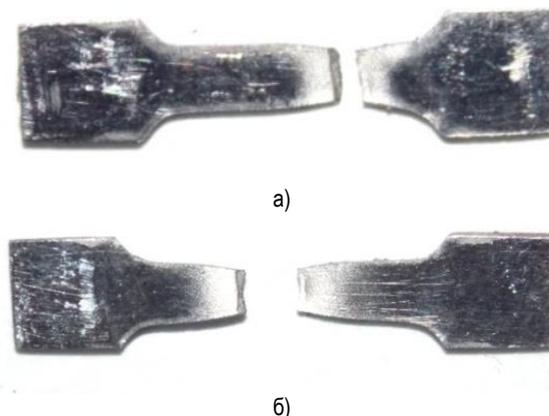


Рисунок 8. Внешний вид микрообразцов чехла ОТВС Н-214 после испытаний: а) наружная стенка, б) внутренняя стенка

После разрыва микрообразцов материала отработавшего ТВС Н-214 проводилось изучение зоны разрыва методом сканирующей электронной микроскопии. Результаты фрактографического анализа изломов свидетельствует, что разрушение носит преимущественно вязкий характер. Из рисунка 9 видно, что неметаллические включения с правильной формой расположены на дне ямок, характеризующих вязкий излом материала и являющихся источником зарождения и распространения вязкого излома.

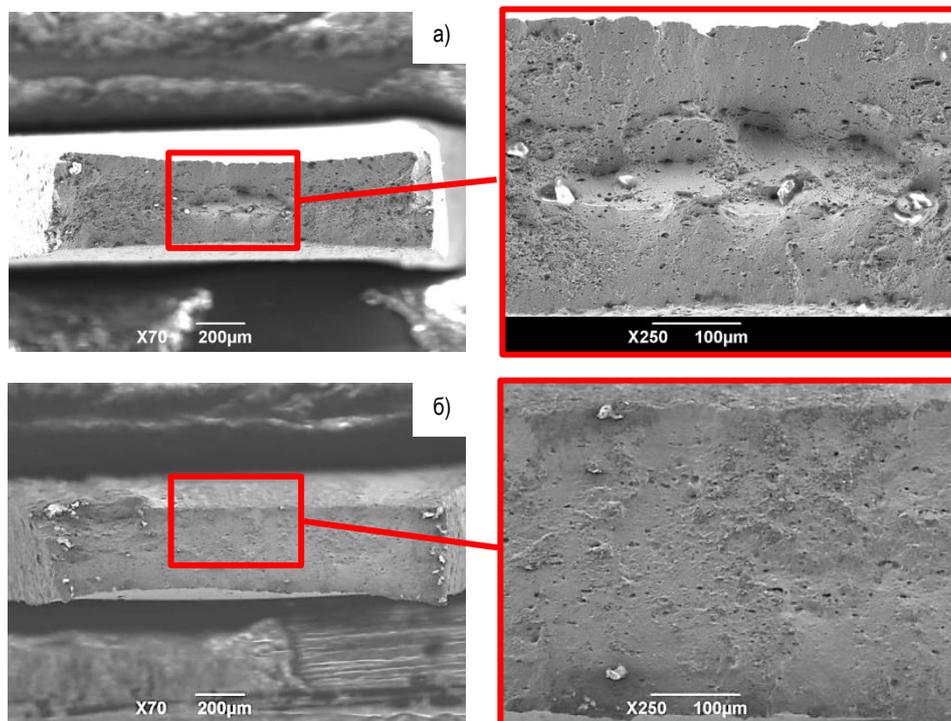


Рисунок 9. СЭМ изображение излома микрообразцов чехла отработавшей ТВС Н-214 а) наружная поверхность, б) внутренняя поверхность

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определены особенности структуры материала стенки чехла отработавших ТВС, обнаружено различие в структуре материала чехла по толщине стенки. В результате исследования микроструктуры установлено, что в основной структуре материала стенки чехла присутствуют неметаллические включения различных форм, а также вторичные выделения сферической формы размеров  $1,2 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$ , распределенные как в теле, так и по границам зерен.

В результате структурного анализа установлено, что микроструктура стенки чехла ТВС Н-214 имеет

разнозернистую структуру с градиентным распределением по всей толщине стенки чехла.

В результате измерения микротвердости среднее значение микротвердости составила  $4,02 \pm 0,1 \text{ ГПа}$ . Выявлено упрочнение на внутренней стенке грани ОТВС Н-214 порядка 3%.

Результаты исследований механических свойств материала стенки чехла отработавших ТВС подтвердили известные данные об упрочнении и снижении пластичности при облучении материала аустенитного класса. Результаты фрактографического анализа изломов свидетельствуют, что разрушение носит преимущественно вязкий характер.

### ЛИТЕРАТУРА

1. J. E. Pawel, A. F. Rowcliffe, D. J. Alexander, M. L. Grossbeck, and K. Shiba, "Effects of Low Temperature Neutron Irradiation on Deformation Behavior of Austenitic Stainless Steels," *Journal of Nuclear Materials*, vol. 233-237, pp. 202-206., 1996.
2. X. Li and A. Almazouzi, "Deformation and microstructure of neutron irradiated SS with different stacking fault energy". *Journal of Nucl. Mat.*, vol.385, №.2, pp.329–333, 2009.
3. F. A. Garner, M. B. Toloczko, and B. H. Sencer, Comparison of Swelling and Irradiation Creep Behavior of fcc-Austenitic and bcc-Ferritic/Martensitic Alloys at High Neutron Exposure, *J. Nucl. Mater.* 276 (2000) 123-142.
4. Ghauri I M. and Afzal Naveed. Effects of neutron irradiation on the stress relaxation rate in Al–Cu–Mg alloy. *Journal of Physics D Applied Physics*. 40(2007) 6044–6047.
5. Шепелев А.Г., Немашкало О.В., Юрченко Л.Д., Анализ информационного массива по новым физическим явлениям, возникающим в твердых телах при облучении // ВАНТ, Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. 2006. № 4(89). С. 78-92.,
6. D.J Edwards, E.P Simonen, S.M Bruemmer. Evolution of Fine-Scale Defects in Stainless Steels Neutron-Irradiated at 275 °C//*Journal of Nuclear Materials Volume 317, Issue 1, 1 April 2003, P.13–31*
7. О.П. Максимкин. Анализ результатов и новая концепция исследования материалов тепловыделяющих сборок реактора БН-350 // Сборник материалов международной конференции «Ядерная и радиационная физика», (26-29 сентября 2005 г.), Алматы, 2006, т. 1, с. 98-134.
8. О.П. Maksimkin, K.V.Tsai, L.G. Turubarova, T. Doronina F.A. Garner Void Swelling of Aisi 321 Analog Stainless Steel Irradiated at Low Dpa Rates in the BN-350 Reactor// *Journal of Nuclear Materials – 2007, - V.367-370. – P.990-994.*
9. M.N. Gusev, O.P. Maksimkin, I.S. Osipov, F.A. Garner. Anomalous Large Deformation of 12Cr18Ni10Ti Austenitic Steel Irradiated to 55 dpa at 310 °C in the BN-350 Reactor // *Journal of Nuclear Materials – 2009, – V.386–388. – P.273–276.*
10. ГОСТ 9.908-85. Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы и сплавы. Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости. – М.: Изд-во стандартов, 1985.
11. Проектирование установки для проведения исследований коррозионной стойкости облученных образцов чехла реактора БН-350 методом одноосного растяжения / Е.Т. Коянбаев, А.Д. Даулеткелдыев, С.Б. Кайрбекова // Вестник НЯЦ РК.– 2011.– Вып. 4.– С. 132-135.
12. Коррозия металлов в ядерном энергомашиностроении / А.М. Паршин, А.Н. Тихонов, Р.Н. Кикичев. – С-Пб.: «Политехника», 2000.– 104 с.

### БН-350 РЕАКТОРЫНЫҢ ПАЙДАЛАНҒАН ЭКРАНДЫ ЖИНАҒЫНЫҢ ҚАПТАРЫНЫҢ ҚҰРЫЛЫСЫ ЖӘНЕ ҚҰРАМЫНЫҢ ЕРЕКШЕЛІКТЕРІ

<sup>1)</sup> М.К. Скаков, <sup>2)</sup> А.А. Ситников, <sup>1)</sup> В.В. Бакланов, <sup>1)</sup> В.И. Яковлев, <sup>1)</sup> Е.Т. Коянбаев,  
<sup>1)</sup> Е.Е. Сапатаев, <sup>1)</sup> А.Ж. Миниязов, <sup>1)</sup> Е.А. Кожаметов

<sup>1)</sup> ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан  
<sup>2)</sup> И.И. Ползунов атындағы Алтай мемлекеттік техникалық университеті, Барнаул, Ресей

Осы жұмыста, БН-350 жылдам нейтрондардағы реакторының экранды жылу бөлгіш жинағының (ЖБЖ) пайдаланған алты қырлы материалының ұстау бассейнде сақтаудан кейін 12Х18Н10Т маркалы тотанбайтын аустенитті болаттың микроқұрылысы және механикалық құрамының өзгерістері зерттелді. Материал 12 сна зақымдаушы дозасына дейін сәулелендірілді. ЖБЖ пайдаланған қаптары қабырғасының материалының құрылысының ерекшелігі анықталды, соның ішінде қап материалының құрылысында қабырға қалыңдығы бойынша өзгешеліктері табылды. Сондай-ақ микроқұрылысын зерттеу нәтижесінде қаптың қабырғасы материалының негізгі құрылысында металл емес қоспалар, сонымен қатар  $\sim 1,2 \text{ мкм}$  көлемді сфералық формалы ұсақдисперлі бөлінгіштердің бар екендігі анықталды. Материалдың механикалық құрамын зерттеуді сәулелендіру нәтижесінде созылмалылығын беріктеу және төмендету туралы мәліметтер растайды.

**FEATURES OF STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES  
OF BN-350 REACTOR SPENT SHIELDING ASSEMBLY CASING**

<sup>1)</sup> M.K. Skakov, <sup>2)</sup> A.A. Sitnikov, <sup>1)</sup> V.V. Baklanov, <sup>1)</sup> V.I. Yakovlev, <sup>1)</sup> Ye.T. Koyanbaev,  
<sup>1)</sup> Ye.Ye. Sapataev, <sup>1)</sup> A.Zh. Miniyazov, <sup>1)</sup> Ye.A. Kozhakhmetov

<sup>1)</sup> *Institute of Atomic Energy Branch RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan*

<sup>2)</sup> *Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia*

This paper investigates changes of microstructure and mechanical properties of 12Cr18Ni10Ti austenitic stainless steel and hexagonal can material of spent shielding fuel assembly (FA) of BN-350 fast neutron reactor after storing in cooling pool. Material is irradiated up to damage dose of 12 dpa. Material structure features of can wall of spent FA are defined, difference in can material structure on wall thickness is detected. Also research results of microstructure showed that there are nonmetallic inclusions and spherical fine emissions with dimension of ~1,2 mkm in main material structure of can wall. Researches of material mechanical properties confirmed data on hardening and reducing of ductility by irradiation.

УДК: 539.21:539.12.04:669.3

**ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ НЕЙТРОНАМИ И ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР ИСПЫТАНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ФАЗОВОЕ  $\gamma \rightarrow \alpha$  ПРЕВРАЩЕНИЕ В СТАЛИ X18N9**

Максимкин О.П., Рубан С.В., Турубарова Л.Г.

*Институт ядерной физики РК, Алматы, Казахстан*

Исследованы закономерности изменения механических и магнитных свойств хромоникелевой нержавеющей реакторной стали, облученной нейтронами, а затем деформированной в интервале температур от  $-100$  до  $+20$  °С. Определены температурные зависимости характеристик прочности, пластичности, и энергетических параметров. Особенное влияние обращено на поведение стали в области температуры испытания  $-60$  °С.

**ВВЕДЕНИЕ**

Ранее нами был экспериментально обнаружен и исследован факт нетипичного деформационного поведения реакторных сталей, облученных быстрыми нейтронами до высоких повреждающих доз [1,2], появление и эволюция «волны пластической деформации» - приводит к неожиданно высоким величинам пластичности, вместо ожидаемого радиационного охрупчивания. Одной из наиболее вероятных причин необходимого эффекта называлось зарождение и накопление в решетке индуцированной деформацией мартенситной  $\alpha$ -фазы. Было исследовано влияние облучения на кинетику  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращения. В работах [3-5] с целью детального изучения нового физического явления были выполнены попытки воспроизвести его в необлученных и слабооблученных нейтронами образцах стали 12X18N10T с различными параметрами аустенизации термообработки. Показано, что эффект «волны деформации» исчезает при повышении температуры испытания больше, чем  $100$  °С, являющейся критической температурой ( $M_d$ ) возможного образования  $\alpha$ -фазы в данном деформируемом материале. Рассмотрены перспективы практического использования эффекта «волны деформации» как при обращении с облученными реакторными материалами, так и при переработке новых конструкционных материалов для атомной энергетики. Наряду с тем следует отметить, что такого рода научные изыскания на сегодняшний день малочисленны, но в связи с актуальностью получаемых результатов очевидна необходимость дополнительных исследований. Настоящая статья является продолжением работ, начатых в этом направлении.

**МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ**

Плоские образцы для механических испытаний с размерами в рабочей части  $3,5 \times 10$  мм изготавливали прецизионной штамповкой из листа нержавеющей стали X18N9 толщиной  $0,4$  мм, подвергали аустенизирующему отжигу ( $1050$  °С,  $30$  мин), а затем облучали в вертикальном канале активной зоны исследовательского реактора ВВР-К при температуре  $\sim 80$  °С до флюенсов нейтронов  $3,9 \cdot 10^{18}$ ,  $1,9 \cdot 10^{19}$  и  $9 \cdot 10^{19}$  н/см<sup>2</sup> ( $E > 0,1$  МэВ).

Необлученные и облученные образцы подвергали пошаговому растяжению на установке Инстрон-

1195 со скоростью  $0,5$  мм/мин в интервале температур от  $-100$  до  $+20$  °С. Синхронно с диаграммой «нагрузка – удлинение» регистрировали образование и накопление индуцированной деформацией ферромагнитной  $\alpha'$ -фазы (с помощью феррозонда, Feritscope MP30), а также текущие значения толщины и длины образца. Из полученных экспериментальных кривых наряду с величинами прочности ( $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_B$ ) и пластичности ( $\epsilon_p$ ,  $\epsilon_n$ ) находили также значения критического напряжения ( $\sigma_{кр}$ ) и деформации ( $\epsilon_{кр}$ ), соответствующие началу мартенситного  $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения. Помимо механических, были определены энергетические характеристики – работа затрачиваемая на растяжение образца до появления  $\alpha$ -фазы ( $A_{кр}$ ), работа испытательной машины в области равномерной ( $A_p$ ) и полной деформации.

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ**

Первичные экспериментальные кривые механических испытаний стальных образцов даны в работе [3], здесь же приведены температурные зависимости рассчитанных из диаграмм растяжения характеристик прочности и пластичности, а также параметров мартенситного  $\gamma \rightarrow \alpha$  перехода (рисунок 1). В таблице 1 наряду с механическими представлены энергетические характеристики деформационного процесса, а также значения количества мартенситной  $\alpha$ -фазы, накапливаемой к моменту достижения предела прочности.

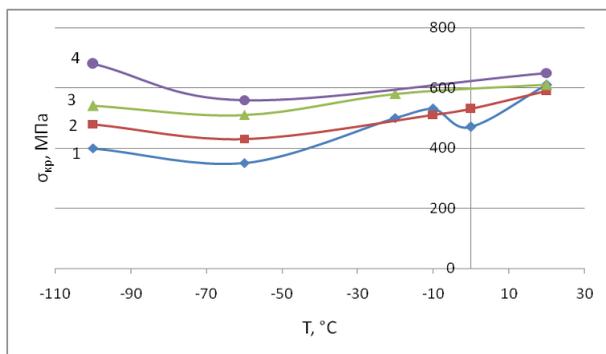
Установлено также, что при  $T=20$  °С критическое напряжение образования  $\alpha$ -фазы ( $\sigma_{кр}$ ) несколько уменьшается или остается неизменным с ростом флюенса облучения нейтронами. При этом количество индуцированной деформацией  $\alpha$ -фазы возрастает с ростом дозы от  $4 \cdot 10^{18}$  до  $9 \cdot 10^{19}$  н/см<sup>2</sup>. Рассчитанная усредненная интенсивность  $\gamma \rightarrow \alpha$  перехода при комнатной температуре деформации оказалось невысокой и достигает значений:  $(0,2-0,4)\%$  кол-во  $\alpha$ -фазы/% деформ. (по деформации), или  $(0,4)\%$  кол-во  $\alpha$ -фазы/кг/мм<sup>2</sup> (по напряжению) как для необлученных, так и для облученных стальных образцов. С ростом дозы облучения величина плотности механической работы, необходимой для растяжения образца до  $\sigma_B$   $A_{равн}$  уменьшается (рисунок 2).

**ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ НЕЙТРОНАМИ И ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР ИСПЫТАНИЯ  
НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ФАЗОВОЕ  $\gamma \rightarrow \alpha$  ПРЕВРАЩЕНИЕ В СТАЛИ X18H9**

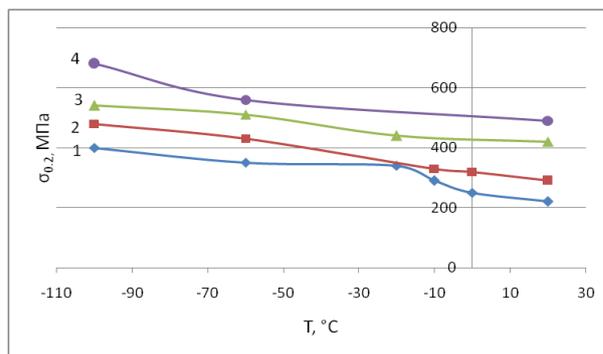
Анализ результатов проведенных механических испытаний показал, в частности, что с понижением температуры испытания величина предела текучести необлученных и облученных нейтронами образцов стали возрастает. В то же время при снижении температуры от комнатной до  $-60^\circ\text{C}$  «истинные» (т.е. с учетом изменения геометрических размеров образца) критические напряжения, соответствующие началу зарождения  $\alpha$ -фазы в  $\gamma$  решетке ( $\sigma_{кр}$ ), уменьшаются; т.е. в этом температурном интервале  $\alpha$ -мартенситу образовываться «легче», чем при дру-

гих температурах. Последующее понижение температуры испытания до  $-100^\circ\text{C}$ , напротив, препятствует образованию  $\alpha$ -мартенсита. Наряду с тем следует отметить, что:

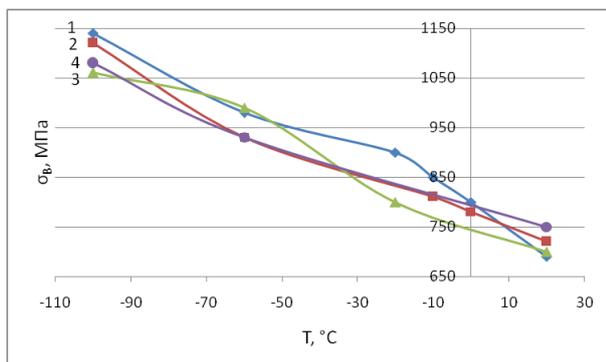
- для всего исследованного интервала температур и флюенсов нейтронов значения  $\sigma_{кр}$  для облученной стали выше, чем необлученной;
- при отрицательных температурах испытания  $-60$  и  $-100^\circ\text{C}$   $\alpha$ -мартенсит начинает образовываться сразу же по достижению предела текучести.



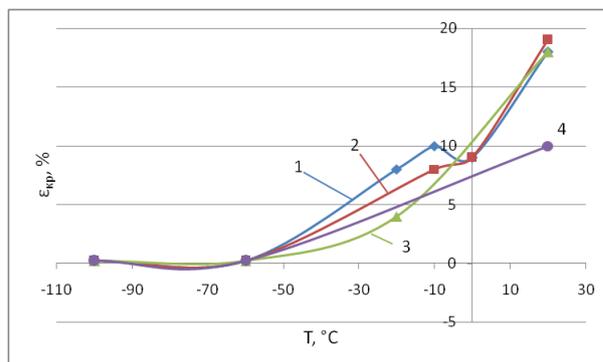
**а)**



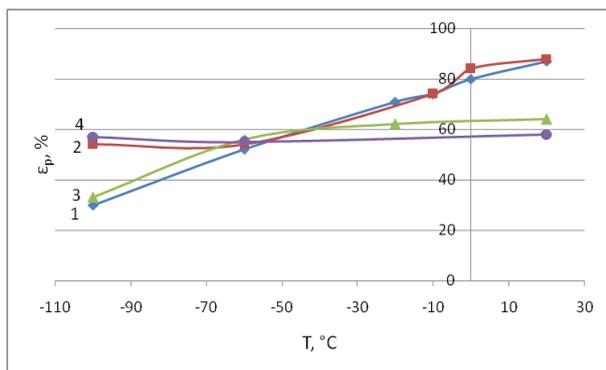
**б)**



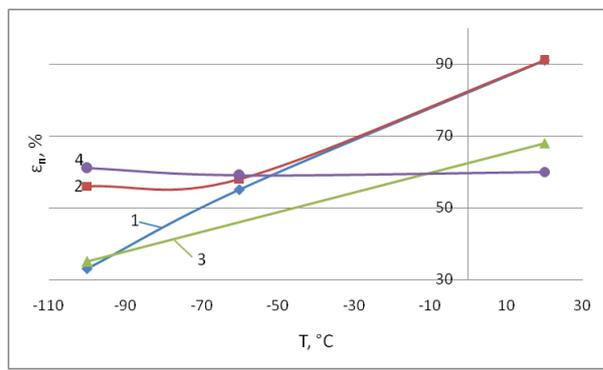
**в)**



**г)**



**д)**



**е)**

◆ 1 необлученный   
 ■ 2  $4 \cdot 10^{18}$  н/см<sup>2</sup>   
 ▲ 3  $1,9 \cdot 10^{19}$    
 ● 4  $9 \cdot 10^{19}$  н/см<sup>2</sup>

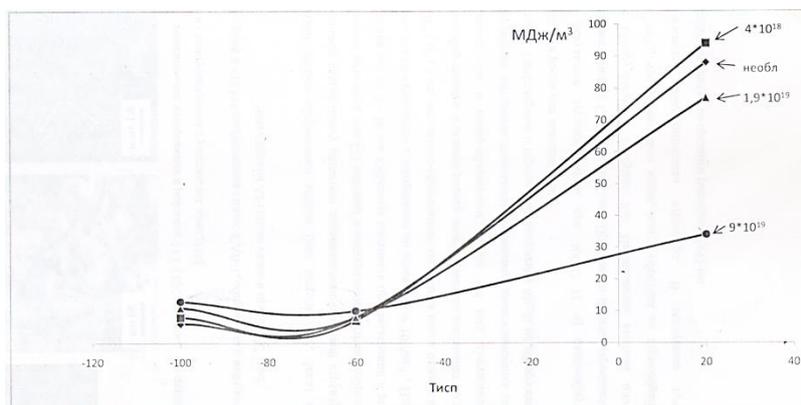
*Рисунок 1. Температурные изменения критических напряжений начала образования  $\alpha$ -фазы (а), предела текучести (б), предела прочности (в), критической деформации начала образования  $\alpha$ -фазы (г), равномерной деформации (д), полной деформации (е) для необлученных и облученных нейтронами образцов из стали X18H9*

**ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ НЕЙТРОНАМИ И ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР ИСПЫТАНИЯ  
НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ФАЗОВОЕ  $\gamma \rightarrow \alpha$  ПРЕВРАЩЕНИЕ В СТАЛИ X18N9**

*Таблица 1. Механические и энергетические характеристики стали X18N9 в необлученном и облученном нейтронами состояниях при различных температурах испытания*

Флюенс, н/см <sup>2</sup>	Температура испытания, °С	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$A_{кр.}$ , МПа/м <sup>3</sup> (условн)	$A_{полн.}$ , МДж/м <sup>3</sup>	$A$ , равн МДж/м <sup>3</sup>	$M_f$ на $\sigma_b$ , %	$\sigma_{0,2}/\sigma_b$
необлученный	20	220	88	530	320	18	0,3
	0	250			325	37	0,3
	-10	290			-	41	0,34
	-20	340			-	52	0,38
	-60	350	8	419	248	67	0,36
	-100	400	6	490	210	70	0,35
4·10 <sup>18</sup>	20	290	94	590	311	24	0,4
	0	320			317	37	0,4
	-10	330			-	41	0,4
	-60	430	7	380	232	-	0,46
	-100	480	8	437	201	-	0,43
1,9·10 <sup>19</sup>	20	420	77	510	293	21	0,6
	-20	440			-	50	0,55
	-60	510	8	391	268	60	0,52
	-100	540	11	565	252	61	0,5
9·10 <sup>19</sup>	20	490	34	439	282	24	0,65
	-60	560	10	439	256	43	0,6
	-100	680	13	560	252	51	0,6

Примечание: для энергетических характеристик приведены плотности их значений.



*Рисунок 2. Плотность механической работы, необходимой для начала  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращения при растяжении*

Экспериментальные данные, приведенные выше, показывают что практически все физико- механические величины описывающие поведение стали при отрицательной температуре -60°С, имеют некоторые характерные особенности.

– Так, при этой температуре испытания и ниже ее, значения критического напряжения образования  $\alpha$ -фазы и предела текучести стали практически совпадают.

– В районе температуры -60 °С величины равномерной и полной деформации стали в необлученном и облученном (вплоть до  $9 \cdot 10^{19}$  н/см<sup>2</sup>) состояниях – равны.

– При температуре -60 °С сравниваются значения критических напряжений образования  $\alpha$ -фазы

при деформации необлученных и облученных нейтронами стальных образцов.

– В интервале от 20 до -60 °С облучение способствует  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращению, т.е. требуется затрачивать меньше механической работы для создания одного и того же количества  $\alpha$ -мартенсита. В интервале температур испытания от -60 °С до -100 °С – наоборот.

В связи с некоторыми особенностями результатов, настоящих экспериментов, при -60 °С, были проведены дополнительные механические и металлографические исследования. Испытывали образцы близкой по составу стали X18N10T, которые после аустенизации при 1050 °С 30 мин деформировали растяжением при -60 °С. Полученная диаграмма растяжения представлена на рисунке 3.

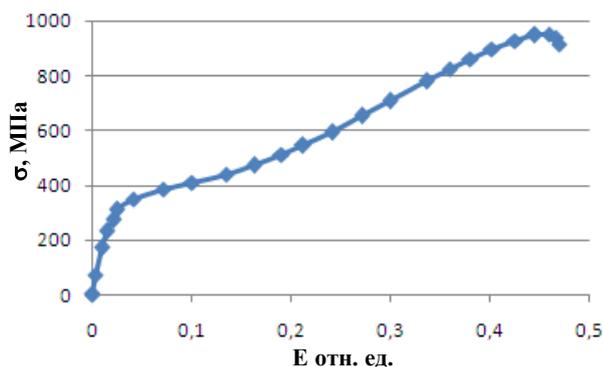


Рисунок 3. Диаграмма растяжения стали X18N10T при  $T = -60^\circ\text{C}$

До и после холодной деформации (46%) и отжига при  $450^\circ\text{C}$ , 30 мин измеряли содержание ферромагнитной  $\alpha$ -фазы в образце и определяли распределение микротвердости по рабочей длине. Металлографическое изучение поверхности деформированного образца проводили после химического травления в электролите следующего состава: 24 мл хлорной кислоты + 63 мл этилового спирта + 9 мл глицерина.

Полученные результаты представлены на рисунках 4 и 5.

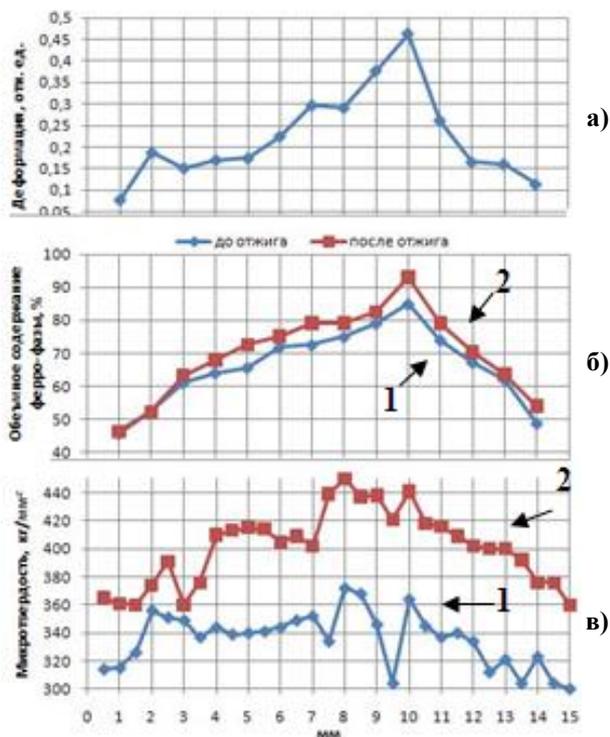


Рисунок 4. Распределение по длине деформированного при  $-60^\circ\text{C}$ , а затем отожженного при  $450^\circ\text{C}$  (30 мин) образца стали 12X18N10T, локальной деформации (а), объемного содержания ферромагнитной фазы (б) и микротвердости (в); 1 – до отжига, 2 – после отжига

Обращает на себя внимание эффект увеличения при отжиге ( $T = 450^\circ\text{C}$ ) объемного содержания ферромагнитной фазы и микротвердости в одном и том же участке образца. Характеризующегося максимальным значением локальной деформации. Аналогичный результат был получен в [6, 7] при изучении обратного мартенситного  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращения в реакторной высокооблученной стали.

При изучении изменений структуры отмечена следующая особенность: по всей длине рабочей части образец травится неравномерно. Края, где  $\alpha$ -мартенсита меньше всего, вытравливаются гораздо быстрее и деформированные зерна имеют более темную окраску, в то время как и на расстоянии от края 8-10 мм при максимальной деформации и максимальном содержании магнитной фазы вытравливание границ зерен и деформационных полос происходит при увеличении времени воздействия травителя в 4-6 раз. Окраска самих зерен более светлая, несмотря на наличие в них деформационных полос.

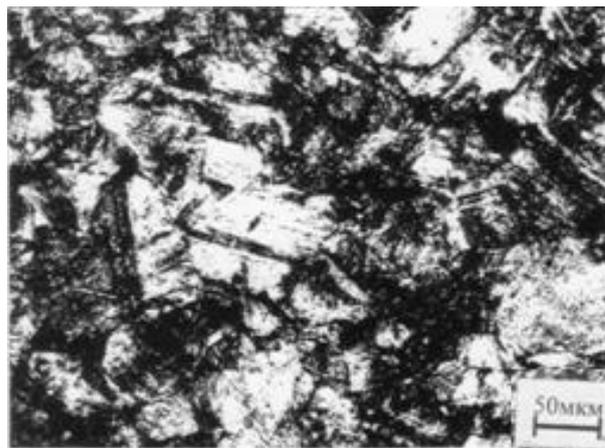
Одним из возможных объяснений металлографических результатов является то, что как известно из литературы мартенситные  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращения представляют собой один из эффективных механизмов релаксации внутренних напряжений и в этой связи, центральный участок образца, где произошло интенсивное фазовое превращение (см. рис. 4 б), протравливался значительно меньше, чем края образца, где сохранился высокий уровень внутренних напряжений и потому они энергичнее взаимодействуют с окружающей средой.

Как известно, при мартенситных превращениях в перестройке атомов в решетке большую роль играют сдвиговые, а не нормальные напряжения. Вследствие этого положения, поскольку сдвиговые напряжения, образующиеся в результате термических операций или облучения, сосредоточены в основном, в приграничных зонах, то именно в этих областях зарождаются и развиваются мартенситные превращения типа  $\gamma \rightarrow \alpha$  (или  $\gamma \rightarrow \epsilon \rightarrow \alpha$ ). И потому необходимо сосредоточить внимание на этих областях, т.е. необходимо различать характер внутренних напряжений в матрице зерна и вблизи его границ. Например, если под облучением образуются пары Френкеля, то в случае преобладания вакансий в матрице будут превалировать напряжения растяжения, тогда как в приграничных областях (в связи с недостатком вакансий) будут в основном, напряжения сжатия. При охлаждении, когда имеет место анизотропное сжатие кристаллитов, то в межзеренных областях возникают напряжения растяжения.

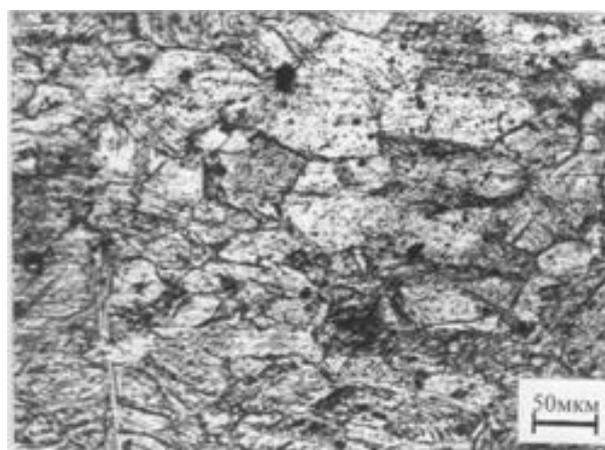
Так в нашем случае, при охлаждении стали в интервале температур от  $+20$  до  $-60^\circ\text{C}$  решетка в матрице зерна сжимается, но в приграничных областях возникают напряжения растяжения, связанные с неоднородностью сжатия отдельных кристаллитов.



а)



б)



в)

При этом термические напряжения растяжения  $\sigma^+$  суммируются с механическими напряжениями растяжения и для начала  $\gamma \rightarrow \alpha$  перехода требуются меньшие по величине напряжения – наблюдается уменьшение значений  $\sigma_{кр}$ .

С дальнейшим охлаждением образца перед растяжением при температурах от  $-60$  до  $-100$  °С напряжения сжатия становятся настолько большими, что намного превосходят радиационные напряжения растяжения. В этом случае часть механических напряжений растяжения «расходуется» на компенсацию напряжений сжатия, что приводит к тому, что к образцу необходимо приложить большие усилия растяжения, чтобы начался  $\gamma \rightarrow \alpha$  переход.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, на основании анализа полученных результатов можно заключить, что одновременное воздействие результатов проводимых операций аустенизации, нейтронного облучения и механических испытаний при отрицательных температурах приводит к созданию в решетке аустенита сложной картины полей внутренних напряжений растяжения и сжатия, комбинация которых определяет значения и температурные зависимости величин, характеризующих физико-механические свойства реакторных сталей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Максимкин О.П. Волны пластической деформации при деформации образцов нержавеющей стали 12X18N10T, облученных до 26-55 сна в реакторе БН-350 / О.П. Максимкин, М.Н. Гусев, Д.А. Токтогулова // Известия вузов. Физика - 2008. – т. 51. - №3. – стр. 78-89.
2. Максимкин О.П. Деформационно-пластическое поведение высокооблученных нержавеющей сталей 12X18N10T и 08X16N11M3 в области криогенных и повышенных температур / О.П. Максимкин, М.Н. Гусев // Физика металлов и металлостроения. – 2010. – т. 110. – №5. – стр. 1-6.
3. Рубан С.В. Экспериментальное изучение «волны деформации» в необлученной и облученной нейтронами метастабильной стали 12X18N10T / С.В. Рубан, М.Н. Гусев, С.В. Рыбин // Вестник НЯЦ РК. – 2010. -№2. – стр. 25-30.
4. Максимкин О.П. Изменение физико-механических свойств аустенитной хромоникелевой нержавеющей стали типа X18N9 (AISI304), облученной нейтронами и деформируемой при отрицательных температурах / О.П. Максимкин, С.В. Рубан // Вестник НЯЦ РК. – 2015. – №1. – стр. 5-9.
5. Максимкин О.П. Изменение физико-механических характеристик стали 08X16N11M3 в результате высокодозного облучения в реакторе БН-350 / О.П. Максимкин, С.В. Рубан, М.А. Захаров // Вестник НЯЦ РК. – 2015. – №3. – стр. 51-54.

Рисунок 5. Микроструктура стали 12X18N10T на различных участках деформированного при  $T = -60$  °С, образца: а, б – края образца, в – середина

6. Максимкин О.П. Обратное мартенситное  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращение в стали 12X18N10T облученной до 56 сна в реакторе БН-350 и деформированной при 293К / О.П. Максимкин, Б.К. Рахашев // Вестник НЯЦ РК. – 2009. - №3. – стр. 161-165.
7. Максимкин О.П. Аномальный эффект изменения магнитных и механических свойств облучения нейтронами нержавеющей стали 12X18N10T при отжиге 400 °С / О.П. Максимкин, С.В. Рубан, С.В. Рыбин // Вестник НЯЦ РК. – 2011. – №3. – стр. 98-101.

**X18N9 БОЛАТТА МЕХАНИКАЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІНЕ ЖӘНЕ ФАЗАЛЫҚ  $\gamma \rightarrow \alpha$   
ТҮРЛЕНУІНЕ НЕЙТРОНДАРМЕН СӘУЛЕЛЕНДІРУДІҢ ЖӘНЕ СЫНАҚТЫҢ  
ТЕРІС ТЕМПЕРАТУРАЛАРЫНЫҢ ЫҚПАЛЫ**

**О.П. Максимкин, С.В. Рубан, Л.Г. Турубарова**

*ҚР Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан*

Нейтрондармен сәулелендірілген, ал сонан соң  $-100$  бастап  $+20$  °С дейінгі температуралар ауқымында деформацияланған хромникельді тоттанбайтын реакторлық болаттың механикалық және магниттік қасиеттерінің өзгеру заңдылықтары зерттелді. Беріктіктің, пластикальлықтың және энергетикалық параметрлер сипаттамаларының температуралық тәуелділіктері анықталды.  $-60$  °С сынақ температуралары ауқымында болаттың өзгеруіне айтарлықтай ықпал ететіндігіне көңіл бөлінді.

**THE EFFECT OF NEUTRON IRRADIATION AND SUB-ZERO TESTING TEMPERATURE  
ON MECHANICAL PROPERTIES AND PHASE  $\gamma \rightarrow \alpha$  TRANSFORMATION IN 18Cr-9Ni STEEL**

**O.P. Maksimkin, S.V. Ruban, L.G. Turubarova**

*Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan*

There were studied changes in mechanical and magnetic properties of Cr-Ni stainless reactor steels irradiated with neutrons and then deformed in the temperature range of  $-100$  °C ...  $+20$  °C. The effect of testing temperature on strength characteristics, plasticity and energy parameters was determined. Special attention was paid to the steel behavior at  $-60$  °C.

УДК 550.34

## КОЛЬЦЕВЫЕ СТРУКТУРЫ СЕЙСМИЧНОСТИ В РАЙОНЕ ЮЖНОЙ МЕКСИКИ: ВОЗМОЖНАЯ ПОДГОТОВКА СИЛЬНОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

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

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

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

Рассматриваются характеристики сейсмичности в зоне субдукции, расположенной в районе южной Мексики, между  $18^\circ$  и  $20^\circ$  N. Установлено, что перед двумя сильными землетрясениями (10.09.1995 г.,  $M_w=8.0$  и 22.01.2001 г.,  $M_w=7.6$ ), начиная с 1973 г. сформировались неглубокие кольцевые структуры сейсмичности ( $h=0-33$  км) с одинаковыми пороговыми значениями магнитуд  $M_{p1}=4.9$ . В то же время здесь, в отличие от многих других зон субдукции, не проявились глубокие кольцевые структуры (в диапазоне глубин 34–70 км). Установлено, что перед двумя указанными землетрясениями образовалась линейная полоса сейсмичности с пороговым значением  $M_{p2}=5.1$ . Эпицентры главных событий располагались вблизи от областей пересечения или касания мелких колец и глубокой полосы. Предполагается, что в этих областях достигается наибольшая мощность двухфазного слоя с сообщающимися трещинами и порами, заполненными флюидом. На кровле такого слоя имеет место концентрация напряжений, которая и может приводить к подвижке при сильном землетрясении. Выделена еще одна пара, состоящая из мелкого кольца и глубокой полосы, сформировавшаяся к 2015 г. к северо-западу от очагов землетрясений 1995 и 2001 гг. ( $M_{p1}=4.9$ ,  $M_{p2}=4.5$ ). Есть основания предполагать, что в области касания этих структур может готовиться новое сильное землетрясение. На основании корреляционных зависимостей размеров колец сейсмичности и величин  $M_{p1}$  от магнитуды главных событий, полученных ранее для востока Тихого океана, оценена магнитуда возможного сильного землетрясения:  $M_w=7.7\pm 0.2$ .

### ВВЕДЕНИЕ

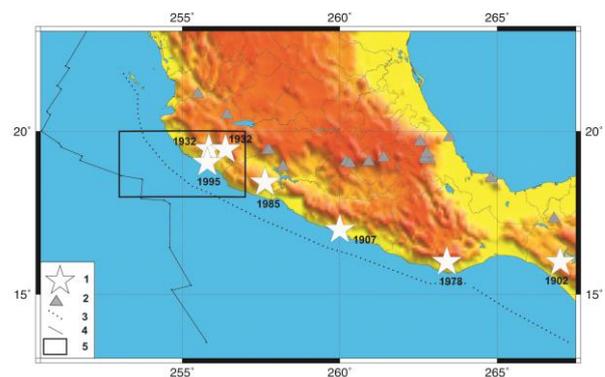
В последнее десятилетие установлено, что перед подавляющим большинством сильных и сильнейших землетрясений в зонах субдукции формируются кольцевые структуры сейсмичности [1–7]. Как правило, такие структуры, имеющие форму, близкую к эллипсам, образуются в двух диапазонах глубин: 0–33 и 34–70 км. Они характеризуются пороговыми значениями магнитуд (соответственно  $M_{p1}$  и  $M_{p2}$ ), а также длинами больших осей ( $L$  и  $l$ ). Длительность формирования таких структур в большинстве случаев не превышает 40 лет, в среднем она близка к 25 годам [4–7]. Полученные данные могут быть использованы для определения места и магнитуды готовящихся сильных землетрясений и, возможно, для их среднесрочного прогноза. Примеры успешного прогноза места и магнитуды Великого землетрясения Тохоку 11.03.2011 г. ( $M_w=9.0$ ) в северо-восточной Японии и землетрясения Икике 01.04.2014 г. ( $M_w=8.2$ ) в северном Чили приведены в [4, 7]. В статье с этой целью рассматриваются характеристики сейсмичности в зоне субдукции, расположенной в районе южной Мексики.

### ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

В районе южной Мексики океаническая плита Кокос погружается под Северо-Американский континент со средней скоростью  $\sim 61$  мм/год. Мексиканская зона субдукции имеет ряд необычных черт [8–11]. В этой зоне регистрируется очень мало землетрясений на глубинах более 100 км, а сильные события происходят только близко к побережью. Вулканический фронт не идет параллельно желобу, а от-

клоняется от него приблизительно на  $15^\circ$  (рисунок 1). Считается, что океаническая плита идет очень полого на расстояниях до 250 км от глубоководного желоба. В зоне субдукции регистрируются «тихие» землетрясения (события, связанные с медленным скольжением плиты), которые могут длиться около месяца [11].

С начала XX-го века в мексиканской зоне субдукции произошло 7 сильных землетрясений с  $M_w \geq 7.8$  (рисунок 1, таблица 1).



1 – эпицентры сильных землетрясений ( $M_w \geq 7.8$ ) с начала XX-го века [21]; 2 – вулканы; 3 – глубоководный желоб; 4 – СОХ; 5 – область, в которой анализировалась сейсмичность

Рисунок 1. Карта района исследований

Последнее такое событие произошло в штате Колима 10.09.1995 г. ( $M_w=8.0$ ). Были рассмотрены характеристики сейсмичности в области, расположенной между  $18^\circ$  и  $20^\circ$  N, где зона субдукции находится ближе всего к срединно-океаническому хребту (СОХ). В этой области погружающаяся океаничес-

**КОЛЬЦЕВЫЕ СТРУКТУРЫ СЕЙСМИЧНОСТИ В РАЙОНЕ ЮЖНОЙ МЕКСИКИ:  
ВОЗМОЖНАЯ ПОДГОТОВКА СИЛЬНОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ**

кая плита имеет наименьший возраст для всей мексиканской зоны субдукции (~10 млн. лет [8]).

*Таблица 1. Сильные землетрясения в районе южной Мексики (с начала XX-го века)*

Дата	Широта	Долгота	Mw	h, км
23.09.1902	16.06	-93.00	7.8	
15.04.1907	17.00	-100.00	7.9	
03.06.1932	19.46	-104.15	7.9	25
18.06.1932	19.45	-103.63	7.9	54
29.11.1978	16.01	-96.60	7.8	24
19.09.1985	18.45	-102.37	8.0	20
09.10.1995	19.05	-104.21	8.0	26

**ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ**

В исследованиях использовались каталоги NEIC (National Earthquake Information Center) Геологической службы США (USGS- United States Geological Survey), начиная с 1973 г.

Методика выделения кольцевых структур имеет следующие особенности

1. Длительность периода, в течение которого исследуются характеристики сейсмичности, составляет около 40 лет, что соответствует максимальным величинам, известным в настоящее время.

2. Рассматриваются параметры сейсмичности в двух диапазонах глубин: 0–33 и 34–70 км, в которых формируются кольцевые структуры. Для каждого диапазона отбираются события, магнитуда которых не меньше пороговой (соответственно  $M_{п1}$  и  $M_{п2}$ ), причем эти величины обычно на 2–3 единицы меньше, чем магнитуда главного землетрясения.

3. Проводится перебор пороговых величин магнитуд  $M_{п}$  (в обоих диапазонах глубин) с целью определения оптимальных значений, при которых кольцевые структуры выделяются наиболее четко.

4. Кольцевые структуры аппроксимируются, как правило, эллипсами. Кольца сейсмичности строятся таким образом, чтобы примерно равное количество относительно слабых событий находилось по обе стороны контуров эллипсов. При этом принимается, что кольцо сейсмичности сформировалось, если максимальная ширина полосы эпицентров, формирующих его (сумма наибольших отклонений эпицентров, расположенных соответственно внутри и вне эллипса, от его контура), не превышает  $\frac{1}{4}$  длины малой оси эллипса (критерий качества кольцевой структуры).

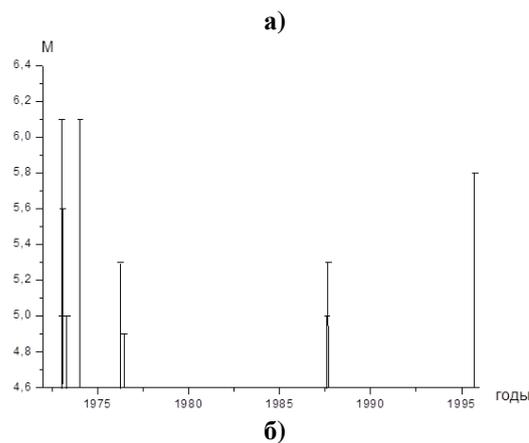
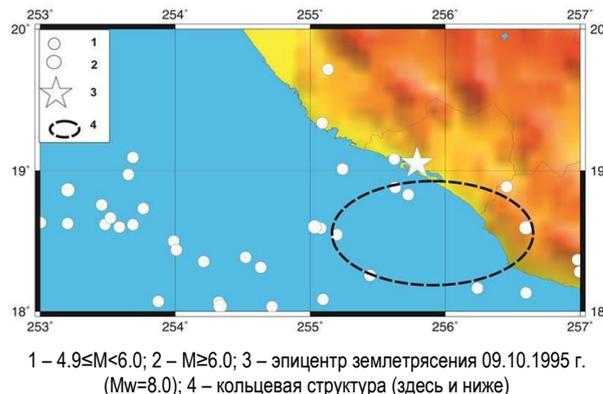
5. Выбираются кольцевые структуры с наибольшими возможными пороговыми значениями  $M_{п1}$  и  $M_{п2}$ . При прочих равных условиях выбирается кольцо сейсмичности с максимальной длиной большой оси эллипса (соответственно  $L$  и  $l$  для мелкого и глубокого колец).

6. Регулярно (не реже, чем раз в полгода) необходим контроль параметров сейсмичности, поскольку известны случаи, когда в течение последних 1–2

лет проявлялись новые кольцевые структуры с гораздо большими величинами  $M_{п}$  (как это было, например, перед Великим землетрясением Тохоку 11 марта 2011 г. [4]).

**АНАЛИЗ ДАННЫХ**

На рисунке 2-а показаны характеристики неглубокой ( $h=0-33$  км) сейсмичности перед землетрясением 09.10.1995 г. В окрестностях будущего очага в период 01.01.1973 – 08.10.1995 гг. сформировалась кольцевая структура, вытянутая в субширотном направлении ( $M_{п1}=4.9, L\sim 160$  км).



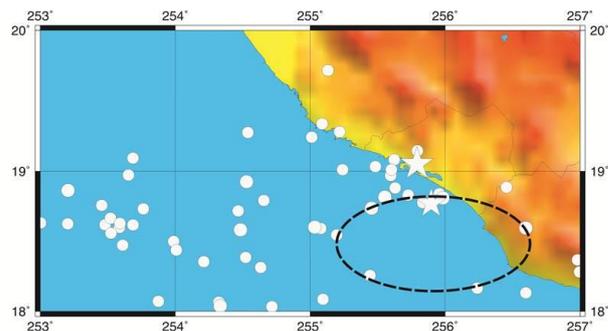
*Рисунок 2. Сейсмичность перед землетрясением 09.10.1995 г. ( $M_w=8.0$ ): а – неглубокая; б – зависимость магнитуд землетрясений от времени в области кольцевой структуры; в – глубокая*

**КОЛЬЦЕВЫЕ СТРУКТУРЫ СЕЙСМИЧНОСТИ В РАЙОНЕ ЮЖНОЙ МЕКСИКИ:  
ВОЗМОЖНАЯ ПОДГОТОВКА СИЛЬНОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ**

Максимальные магнитуды ( $M_{max}=6.1$ ) соответствуют двум событиям, произошедшим в 1973–1974 гг. Наибольшие скорости сеймотектонической деформации (СТД) в области кольца сейсмичности наблюдались в 1973–1976 и 1995 гг. (рисунок 2-б). Рисунок 2-в иллюстрирует характеристики относительно глубоководной сейсмичности ( $h=34-70$  км) в рассматриваемой области. В данном случае не образовалось глубоких колец для величин  $M_{p2} \geq 4.0$ ; вместе с тем достаточно четко проявилась структура, близкая к линейной, с пороговым значением  $M_{p2}=5.1$  и длиной  $l \sim 200$  км, вытянутая в запад-северо-западном направлении, параллельно желобу (на расстояниях от него  $\sim 80-100$  км). Существенно, что эпицентр главного землетрясения находится на расстоянии  $\sim 20$  км от области пересечения мелкого кольца и глубокой полосы, что во много раз меньше величины  $L$ .

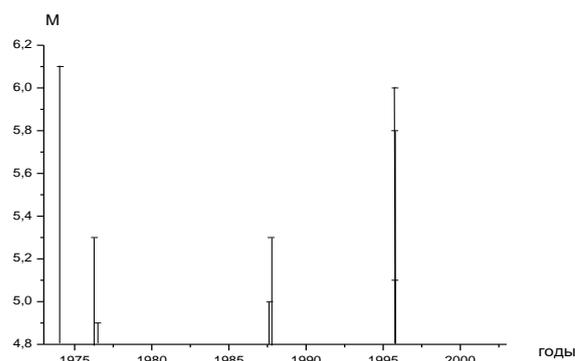
На рисунке 3-а представлены данные о неглубокой сейсмичности перед землетрясением 22.01.2003 г., эпицентр которого располагался на расстоянии  $\sim 30$  км к юго-востоку от эпицентра события 10.09.1995 г. В данном случае до 21.01.2003 г. проявилась кольцевая структура, форма и размер которой близки к изображенной на рисунке 2-а ( $M_{p1}=4.9$ ,  $L \sim 160$  км). Наибольшие скорости СТД наблюдались в 1973 - 1976 и 1995 гг. (рисунок 3-б). На рисунке 3-в показаны характеристики глубоководной сейсмичности. Видно, что для  $M_{p2}=5.1$  проявилась та же полоса эпицентров, простирающаяся параллельно желобу. Интересно, что эпицентр землетрясения 22.01.2003 г. располагался вблизи области касания мелкого кольца и глубокой полосы сейсмичности.

Рисунок 4-а иллюстрирует характеристики неглубокой сейсмичности, проявившейся в исследуемой области до 01.03.2015 г. За указанный период здесь сформировалась кольцевая структура с таким же пороговым значением ( $M_{p1}=4.9$ ), но меньшая по размерам ( $L \sim 110$  км), ориентированная в северо-западном направлении, параллельно глубоководному желобу. Кольцевая структура расположена в основном между желобом и афтершоковой зоной сильного землетрясения, произошедшего в штате Колима 10.09.1995 г. Самые высокие скорости СТД в области кольца сейсмичности имели место в 1973–1976 и 1995–2003 гг., а наибольшая магнитуда ( $M_{max}=6.4$ ) соответствует землетрясению 1995 г. (рисунок 4-б). На рисунке 4-в представлены эпицентры глубоких землетрясений ( $M_{p2}=4.5$ ). В данном случае в 1973 - 2015 гг. четко проявилась линейная субширотная полоса длиной около 120 км, расположенная к востоку от желоба. Можно считать, что глубокая полоса касается северной границы мелкого кольца. Интересно, что эта полоса, которая сформировалась в основном после землетрясения 10.09.1995 г., служит продолжением полосы, изображенной на рисунках 2-в и 3-в.

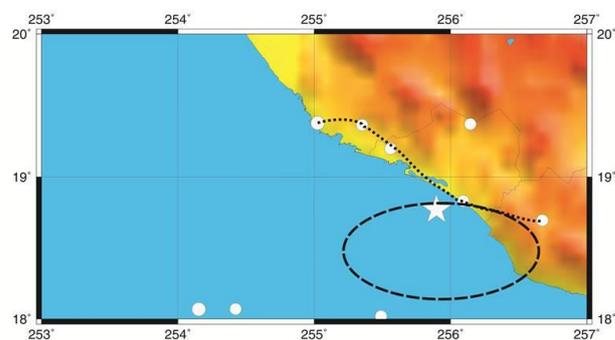


звездочки – эпицентры землетрясений 09.10.1995 г. и 22.01.2003 г.  
остальные обозначения – на рисунке 2-а

а)



б)



обозначения – на рисунках 2-а и 2-в

в)

Рисунок 3. Сейсмичность перед землетрясением 09.10.1995 г. ( $M_w=7.6$ ): а – неглубокая; б – зависимость магнитуд землетрясений от времени в области кольцевой структуры; в – глубокая

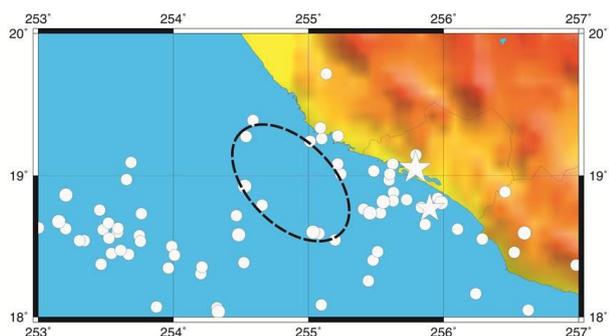
**Оценка магнитуд сильных землетрясений по параметрам кольцевых структур.** Для этих целей были использованы корреляционные зависимости размеров кольцевых структур и пороговых значений магнитуд от энергии главных событий, полученные в [6] для зон субдукции на востоке Тихого океана:

$$\lg L \text{ (км)} = -1.33 + 0.45M_w, r=0.88; \quad (1)$$

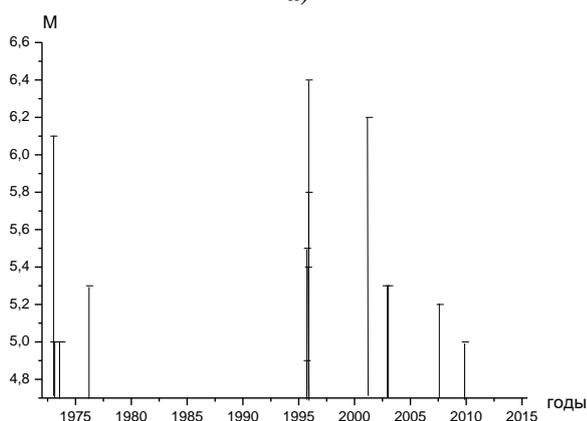
$$M_{p1} = -0.44 + 0.66M_w, r=0.89, \quad (2)$$

где  $r$  – коэффициент корреляции.

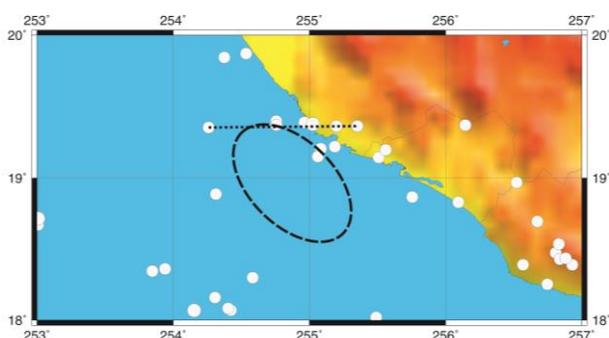
**КОЛЬЦЕВЫЕ СТРУКТУРЫ СЕЙСМИЧНОСТИ В РАЙОНЕ ЮЖНОЙ МЕКСИКИ:  
ВОЗМОЖНАЯ ПОДГОТОВКА СИЛЬНОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ**



обозначения – на рисунке 2-а  
а)



б)



обозначения – на рисунках 2-а и 2-в  
в)

Рисунок 4. Сейсмичность в исследуемой области кольцевой структуры за период до 01.03.2015 г.: а – неглубокая; б – зависимость магнитуд землетрясений от времени; в – глубокая

Таблица 2. Параметры кольцевых структур в районе южной Мексики

Интервал времени	Mw	Mп1	L, км	Прогноз Mw
01.01.1973-08.10.1995	8.0	4.9	160	8.0±0.1
01.01.1973-21.01.2003	7.6	4.9	160	8.0±0.1
01.01.1973-01.03.2015		4.9	110	7.7±0.2

Из таблицы 2 следует, что оценка величины Mw, полученная по данным о кольцевой структуре, которая образовалась перед землетрясением 1995 г., близка к реальной величине. В то же время аналогичная

оценка для события 2003 г. завышена на 0.4. Для нового кольца сейсмичности, проявившегося к 2015 г., исходя из формул (1) и (2) прогнозируется магнитуда возможного события:  $M_w=7.7\pm 0.2$ .

**ОБСУЖДЕНИЕ**

Полученные данные свидетельствуют о том, что в мексиканской зоне субдукции, так же как и в других районах тихоокеанского пояса, перед сильными землетрясениями формируются неглубокие кольцевые структуры сейсмичности. Вместе с тем, в области между 18° и 20° N не проявляются глубокие кольца сейсмичности. В то же время перед двумя сильными событиями здесь образовалась линейная полоса глубоких землетрясений. Существенно, что эпицентры сильных землетрясений находятся вблизи от областей пересечения или касания мелких колец и полосы глубокой сейсмичности.

В [1–7] показано, что эпицентры большинства сильных и сильнейших землетрясений в зонах субдукции находятся вблизи областей пересечения или наибольшего сближения мелких и глубоких кольцевых структур сейсмичности. Имеющиеся данные свидетельствуют о том, что мелкие кольца оконтуривают жесткие блоки литосферы, а глубокие – относительно маловязкие блоки [3–7]. На границах обоих типов блоков происходит подъем глубинных флюидов [3, 5]. При этом в областях пересечения или наибольшего сближения мелких и глубоких колец сейсмичности достигается наибольшая мощность двухфазного слоя с присутствием заметной доли флюидов. В случае, если флюиды формируют связную сеть, на кровле такого слоя наблюдается концентрация напряжений, причем уровень избыточных напряжений пропорционален мощности слоя [12]. Концентрация напряжений и может приводить к подвижке при сильном землетрясении [1–8].

Данные, полученные для исследуемой области, показывают, что, в отличие от многих других зон субдукции, в районе южной Мексики, между 18° и 20° N, на глубинах 34 - 70 км формируются не глубокие кольцевые структуры, а линейные полосы сейсмичности. Близость эпицентров сильных землетрясений к областям пересечения или касания мелких колец и глубокой полосы позволяет предполагать, что в этих областях также достигается наибольшая мощность двухфазного слоя.

Ранее [3, 5, 11] было установлено, что перед большинством сильных неглубоких землетрясений в зонах субдукции в верхах мантии формируются области высокого содержания флюидов. После сильных событий флюиды в течение нескольких десятков лет поднимаются в земную кору, о чем свидетельствуют вариации скоростей [14] и поглощения [3, 5, 11] короткопериодных S-волн, а также гравиметрические данные [15].

В [3–7] отмечалось, что формирование колец сейсмичности перед сильными землетрясениями служит отражением процессов самоорганизации

геологических систем [16], ведущих, в конечном счете, к уменьшению потенциальной энергии Земли в результате подъема легкой жидкой фазы. Можно предполагать, что в рассматриваемом районе южной Мексики формирование линейных полос сейсмичности вместо глубоких колец энергетически более выгодно, вероятно, вследствие меньшей доли флюидов в верхах мантии по сравнению с большинством зон субдукции [17]. Возможно, это связано с молодым возрастом субдуцирующей плиты Наска, в литосфере которой имеет место пониженное содержание гидратированных пород [18]. При дегидратации таких пород в процессе субдукции выделяется свободная вода, которая и служит одним из главных компонентов глубинных флюидов [19]. В этой связи следует отметить, что глубокие кольца сейсмичности не формируются также перед сильными землетрясениями в зоне субдукции Каскадия, где под Северо-Американский континент погружается очень молодая плита Хуан-де-Фука [20].

Важно отметить также, что неглубокая кольцевая структура и глубокая полоса сформировались к 2015 г. к западу от очага сильного землетрясения 1995 г., там, где не зарегистрировано событий с  $M \geq 7.0$ , по крайней мере, с начала XX-го века [21]. Указанные данные позволяют предполагать, что в рассматриваемой области может готовиться сильное сейсмическое событие. Использование корреляционных зависимостей (1) и (2) позволяет оценить магнитуду возможного землетрясения:  $M_w = 7.7 \pm 0.2$ . По аналогии с данными для событий 1995 и 2003 гг. можно предполагать, что эпицентр такого землетрясения будет располагаться вблизи области касания мелкого кольца и глубокой полосы. В этой области целесообразно проводить мониторинг различных геофизических и геохимических полей с целью среднесрочного прогноза сильного сейсмического события.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Копничев, Ю.Ф. Кольцевая сейсмичность в разных диапазонах глубин перед сильными и сильнейшими землетрясениями в зонах субдукции / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Докл. РАН, 2009. Т. 425. № 4. – С. 539–542.
2. Копничев, Ю.Ф. Характеристики кольцевой сейсмичности в разных диапазонах глубин перед сильными и сильнейшими землетрясениями в районе Суматры / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Докл. РАН, 2009. – Т. 429. № 1. – С. 106–109.
3. 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. 34–51.
4. Копничев, Ю.Ф. Кольцевые структуры сейсмичности и землетрясение 11.03.2011 г. ( $M_w=9.0$ ) в районе северо-восточной Японии / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Докл. РАН, 2011. – Т. 440. № 2. – С. 246–249.
5. 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. 22–33.
6. Копничев, Ю.Ф. Характеристики кольцевых структур сейсмичности, формирующихся перед сильными и сильнейшими землетрясениями на периферии Тихого океана / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Вестник НЯЦ РК, 2013. – Вып. 2. – С. 131–140.
7. Копничев, Ю.Ф. Кольцевые структуры сейсмичности в районе северного Чили и успешный прогноз места и магнитуды землетрясения Икике 01.04.2014 г. ( $M_w=8.2$ ) / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Вестник НЯЦ РК, 2015. – Вып. 4. – С. 153 – 159.
8. Chen, T. Seismic attenuation structure in central Mexico: Image of a focused high-attenuation zone in the mantle wedge / T. Chen, R.W. Clayton // J. Geophys. Res., 2009. 114. - B07304, doi:10.1029/2008JB005964.
9. Song, T.-R.A. Subducting slab ultra-slow velocity layer coincident with silent earthquakes in southern Mexico / T.-R.A. Song, D.V. Helmberger, M.R. Brudzinski, R.W. Clayton, P. Davis, X. Perez-Campos, S.K. Singh // Science, 2009. – P. 502–506. – DOI: 10.1126/science.1167595.
10. Perez-Campos, X. Horizontal subduction and truncation of the Cocos Plate beneath central Mexico / X. Perez-Campos, Y. Kim, A. Husker, P. M. Davis, R. W. Clayton, A. Iglesias, J. F. Pacheco, S. K. Singh, V. C. Manea, M. Gurnis // Geophys. Res. Lett., 2008. – 35, L18303, doi:10.1029/2008GL035127.
11. Payero, J. S. Nonvolcanic tremor observed in the Mexican subduction zone / J. S. Payero, V. Kostoglodov, N. Shapiro, T. Mikumo, A. Iglesias, X. Perez-Campos, and R. W. Clayton // Geophys. Res. Lett., 2008. – 35, L07305, doi:10.1029/2007GL032877.
12. 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.
13. Копничев, Ю.Ф. Пространственно-временные вариации поля поглощения поперечных волн в сейсмически активных и слабосейсмичных районах / Ю.Ф. Копничев, Д.Д. Гордиенко, И.Н. Соколова // Вулканология и сейсмология, 2009. – №1. – С. 49–64.
14. Husen, S. Postseismic fluid flow after the large subduction earthquake of Antofagasta, Chile / S. Husen, E. Kissling // Geology, 2001. – V. 29, N 9. – P. 847850.
15. Ogawa, R. Slow postseismic recovery of geoid depression formed by the 2004 Sumatra-Andaman earthquake by mantle water diffusion / R. Ogawa, K. Heki // Geophys. Res. Lett., 2007. – V. 34. L06313. doi: 10.1029/2007GL029340.
16. Летников, Ф.А. Синергетика геологических систем / Ф.А. Летников // Новосибирск: Наука, 1992. – 229 с.

17. Копничев, Ю.Ф. Кольцевые структуры сейсмичности, формирующиеся в континентальных районах перед сильными землетрясениями с различными механизмами очагов / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Геофизические исследования, 2013. – Т. 14. – № 1. – С.5–15.
18. Abers, G. Thermal–petrological controls on the location of earthquakes within subducting plates / G. Abers, J. Nakajima, P. van Keken, S. Kita, B. Hacker // Earth Planet. Sci. Lett. 2013. – V. 369–370. – P. 178–187.
19. Yamazaki, T. Double seismic zone and dehydration embrittlement of the subducting slab / T. Yamazaki, T. Seno // J. Geophys. Res., 2003. – V. 108. N B4. doi: 10/1029/2002JB001918.
20. Копничев, Ю.Ф. Кольцевые структуры сейсмичности в зоне субдукции Каскадия: возможная подготовка сильных землетрясений / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова / Вестник НЯЦ РК (в печати).
21. Engdahl, E. A. Global seismicity: 1990 – 1999 // E. Engdahl, A. Villaseñor // Earthquake & engineering seismology. Part A. - Academic Press. An imprint of Elsevier Science, 2002. – P. 665–690.

## ОҢТҮСТІК МЕКСИКА АУДАНЫНДАҒЫ СЕЙСМИКАЛЫҚТЫҢ АЙНАЛМАЛЫ ҚҰРЫЛЫМДАРЫ: БОЛАТЫН ҚАТТЫ ЖЕРСІЛКІНУДІ ДАЙЫНДАУ

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

<sup>1)</sup> *РФА О.Ю. Шмидт атындағы Жер физикасы институты, Москва, Ресей*

<sup>2)</sup> *Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатова, Қазақстан*

Оңтүстік Мексикада, 18° және 20° N аралығында орналасқан, субдукция аймағындағы сейсмикалықтың сипаттамасы қарастырылады. Екі қатты жерсілкінуің алдында (1995ж.09.10-ында, Mw=8.0 және 2001ж.01.22-сінде, Mw=7.6) 1973 жылдан бастап, сейсмикалықтың терең емес айналмалы құрылымдары (h=0 - 33 км) магнитудаларының бірдей шекті көрсеткіштерімен M<sub>p1</sub>=4.9 қалыптасқаны белгілі болды. Сол уақытта басқа көптеген субдукция аймақтарына қарағанда, терең айналмалы құрылымдар көрінбеген (34-70 км тереңдік диапазонында). Көрсетілген екі жерсілкінуің алдында шекті көрсеткіштерімен M<sub>p2</sub>=5.1 сейсмикалықтың сызықтық жолағы пайда болғаны белгілі болды. Басты оқиғалардың эпиортальдары қиылысу аумағына жақын жерде немесе ұсақ айналымдардың жанасу жерлерінде және терең жолақтарда орналасқан. Осы аумақтарда флюидпен толтырылған, қатынас жарықтары мен тесіктері бар екіфазалы қабаттың қуаттылығы ең көп мөлшерге жетеді деген болжам жасалынады. Осындай қабаттың төбесінде күшеюдің шоғырлануы орын алады, ал ол қатты жерсілкінуі кезінде қозғалтуды тудыруы мүмкін. 1995 және 2001 жж. (M<sub>p1</sub>=4.9, M<sub>p2</sub>=4.5) жерсілкінуі ошақтарының солтүстік-батысына қарай, 2015 жылы қалыптасқан, ұсақ айналым мен терең жолақтан тұратын тағы бір жұп белгіленді. Осы құрылымдардың жанасу аймақтарында жаңа қатты жерсілкіну дайындалып жатыр деп айтуға негіз бар. Тынық мұхиттың шығысына бұрын соңды алынған, басты оқиғалардың магнитудаларынан сейсмикалық айналымдардың көлемі мен M<sub>p1</sub> мөлшерінің корреляциялық тәуелділігінің негізінде, болатын қатты жерсілкінуінің магнитудасын Mw=7.7±0.2 бағалау жүргізілді.

## RING-SHAPED SEISMICITY STRUCTURES IN THE REGION OF SOUTHERN MEXICO: POSSIBLE PREPARATION FOR LARGE EARTHQUAKE

<sup>1)</sup> Yu.F. Kopychev, <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*

We have been studying seismicity characteristics in subduction zone, situated in the region of southern Mexico, between 18° and 20° N. It was established that since 1973 shallow (h=0–33 km) ring-shaped seismicity structures with threshold magnitude values M<sub>t1</sub>= 4.9 have been formed prior to two large earthquakes (10.09.1995, Mw=8.0 and 22.01.2003, Mw=7.6). At the same time, in contrast to many other subduction zones, deep ring-shaped seismicity structures (within the depth range of 34-70 km) were not revealed here. Interestingly, a linear seismicity strip with M<sub>t2</sub>=5.1 has been formed prior to these large earthquakes. Epicenters of the main events were located near areas of crossing or contact of the shallow rings and deep strip. We suppose that the biggest thickness of two-phase layer with connected cracks and pores filled with fluids is observed in these areas. Stress concentration takes place at the roof of such the layer, which can lead to large earthquake initiation. One more pair, consisting of the shallow ring and deep strip, has been formed to 2015 to the northwest of rupture zones of earthquakes of 10.09.1995 and 22.01.2003. We suppose that new large earthquake is being prepared in the area of these structures contact. Correlation dependences of seismicity ring sizes and values M<sub>t1</sub> on magnitudes of main events were obtained earlier for the east of Pacific. Using these dependences we estimated magnitude of possible large earthquake: Mw=7.7±0.2.

УДК 550.34

## КОЛЬЦЕВЫЕ СТРУКТУРЫ СЕЙСМИЧНОСТИ В ДВУХ ЗОНАХ СУБДУКЦИИ ТИХОГО ОКЕАНА: ВОЗМОЖНАЯ ПОДГОТОВКА СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

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

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

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

Рассматриваются некоторые характеристики сейсмичности в двух зонах субдукции: в районах Новой Зеландии (Северный о-в, между  $42^\circ$  и  $38.5^\circ$  S) и Центральной Америки (Сальвадор и Гватемала, между  $12^\circ$  и  $14.5^\circ$  N). Показано, что в обеих зонах, так же, как и во многих других районах, после 1973 г. формируются кольцевые структуры сейсмичности в двух диапазонах глубин: 0–33 и 34–70 км. Получены оценки пороговых значений магнитуд (соответственно  $M_p1$  и  $M_p2$  в указанных диапазонах глубин), а также размеров кольцевых структур ( $L$  и  $l$ ) для этих зон. Ранее были построены корреляционные зависимости этих параметров от магнитуд  $M_w$  главных событий для запада и востока Тихого океана. Используя эти зависимости, проведена оценка магнитуды возможных сильных землетрясений:  $M_w=8.4\pm 0.2$  и  $8.0\pm 0.3$  соответственно для районов Новой Зеландии и Центральной Америки.

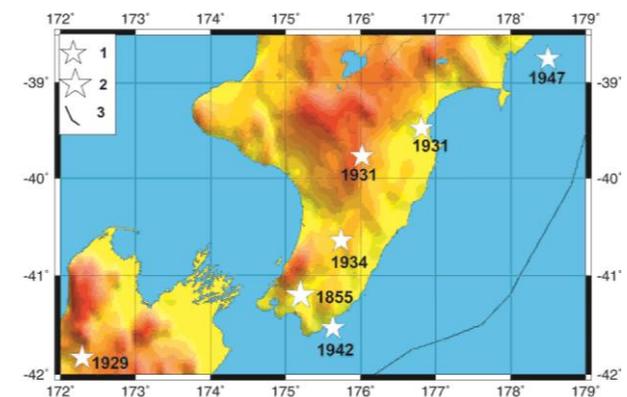
### ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие установлено, что перед подавляющим большинством сильных и сильнейших землетрясений в зонах субдукции формируются кольцевые структуры сейсмичности [1–7]. Как правило, такие структуры, имеющие форму, близкую к эллипсам, образуются в двух диапазонах глубин: 0–33 и 34–70 км. Они характеризуются пороговыми значениями магнитуд (соответственно  $M_p1$  и  $M_p2$ ), а также длинами больших осей ( $L$  и  $l$ ). Длительность формирования таких структур в большинстве случаев не превышает 40 лет и в среднем близка к 25 годам [4–7]. Данные об этих структурах сейсмичности могут быть использованы для определения места и магнитуды готовящихся сильных землетрясений и, возможно, для их среднесрочного прогноза. Примеры успешного прогноза места и магнитуды Великого землетрясения Тохоку 11.03.2011 г. ( $M_w=9.0$ ) в северо-восточной Японии и землетрясения Икике 01.04.2014 г. ( $M_w=8.2$ ) в северном Чили приведены в [4, 7]. В настоящей статье с этой целью рассматриваются характеристики сейсмичности в зонах субдукции, расположенных в районах Новой Зеландии и Центральной Америки (Гватемала-Сальвадор).

### СЕЙСМИЧНОСТЬ РАЙОНОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

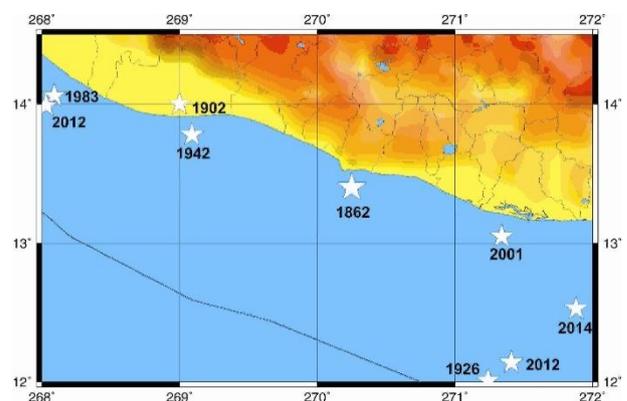
**Новая Зеландия.** Рассмотрены данные о сейсмичности в районе Северного острова Новой Зеландии и вблизи от него, ограниченном координатами  $42\text{--}37.5^\circ$  S,  $172\text{--}179^\circ$  E. На рисунке 1 показаны эпицентры сильных землетрясений, произошедших в исследуемом районе (с магнитудами  $M_w \geq 7.0$  начиная с 1900 г. и  $M_w \geq 8.0$  с середины XIX-го века) – таблица 1. За указанный период зарегистрировано 7 таких событий, из которых самое сильное (23.01.1855 г.) имело магнитуду  $M_w=8.2$  и механизм очага, нетипичный для зон субдукции (сдвиг с небольшой взбросовой компонентой). Это событие произошло на разломе Ваирапапа, имеющем северо-восточное направление; при нем зарегистрировано смещение

бортов разлома, наибольшее из известных на земном шаре (до 18 м [8]).



1 –  $M_w=7.0\text{--}7.9$ ; 2 –  $M_w>8.0$ ; 3 – ось глубоководного желоба

Рисунок 1. Эпицентры сильных землетрясений в районе Северного о-ва Новой Зеландии



Условные обозначения – на рисунке 1

Рисунок 2. Эпицентры сильных землетрясений в районе Центральной Америки

**КОЛЬЦЕВЫЕ СТРУКТУРЫ СЕЙСМИЧНОСТИ В ДВУХ ЗОНАХ СУБДУКЦИИ ТИХОГО ОКЕАНА:  
ВОЗМОЖНАЯ ПОДГОТОВКА СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ**

*Таблица 1. Сильные землетрясения в районе  
Новой Зеландии*

Дата	°S	°E	h, км	Mw
23.01.1855	41.2	175.2	33	8.2
16.06.1929	41.83	172.29	35	7.5
02.02.1931	39.77	176.02	35	7.7
13.02.1931	39.48	176.81	35	7.1
05.03.1934	40.64	175.74	35	7.3
24.06.1942	41.53	175.63	35	7.0
25.03.1947	38.75	178.50	-	7.0

С начала XIX-го века в районе Новой Зеландии не зарегистрировано сильных землетрясений субдукционного типа с  $M_w > 8$ . Вместе с тем, палеосейсмические данные показывают, что последние два таких события происходили здесь приблизительно 880–800 и 520–470 лет назад [9]. В связи с этим можно предполагать, что в районе желоба Хикуранги готовится новое сильное землетрясение в погружающейся океанической плите. В некоторых работах (например, в [10]), опубликованных в последние годы, предполагается, что в данном районе возможны сильнейшие события с  $M_w \sim 9.0$ . По этой причине важной задачей является уточнение магнитуды сильного землетрясения, которое может произойти здесь в ближайшие годы.

**Центральная Америка.** На рисунке 2 показаны эпицентры сильных землетрясений, произошедших в районе Центральной Америки, ограниченном координатами 12.0–14.5° N, 88–92° W. Так же как для района Новой Зеландии, на рисунке 2 указаны события с магнитудами  $M_w \geq 7.0$  (начиная с 1900 г.) и  $M_w \geq 8.0$  (с середины XIX-го века). В рассматриваемом районе за указанный период произошло 9 таких землетрясений. Наиболее сильное из них зарегистрировано 19.12.1862 г. ( $M_w = 8.0$ , таблица 2) [11]. Из рисунка 2 следует, что в центральной части района выделяется зона сейсмической бреши размером ~250 км, в которой с начала XX-го века не было событий с  $M_w \geq 7.0$ . Вместе с тем, в эту зону попадает очаг сильнейшего землетрясения 1862 г.

*Таблица 2. Сильные землетрясения в районе  
Центральной Америки*

Дата	°N	°W	h, км	Mw
19.12.1862	13.40	89.75	-	8.0
19.04.1902	14.00	91.00	-	7.5
08.02.1926	12.01	88.76	35	7.1
06.08.1942	13.78	90.91	35	7.7
02.12.1983	14.06	91.91	35	7.0
13.01.2001	13.05	88.66	60	7.7
27.08.2012	12.14	88.59	28	7.3
07.11.2012	13.99	91.97	24	7.4
14.10.2014	12.53	88.12	40	7.3

**ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ  
И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ**

Использовались каталоги NEIC (National Earthquake Information Center) Геологической службы США (USGS- United States Geological Survey), начиная с 1973 г. Методика выделения кольцевых структур состоит в следующем.

1. Длительность периода, в течение которого исследуются характеристики сейсмичности, составляет около 40 лет, что соответствует максимальным величинам, известным в настоящее время.

2. Рассматриваются параметры сейсмичности в двух диапазонах глубин: 0–33 и 34–70 км, в которых формируются кольцевые структуры. Для каждого диапазона отбираются события, магнитуда которых не меньше пороговой (соответственно  $M_{p1}$  и  $M_{p2}$ ), причем эти величины обычно на 2–3 единицы меньше, чем магнитуда главного землетрясения.

3. Производится перебор пороговых величин магнитуд  $M_p$  (в обоих диапазонах глубин) с целью определения оптимальных значений, при которых кольцевые структуры выделяются наиболее четко.

4. Кольцевые структуры аппроксимируются, как правило, эллипсами. Кольца сейсмичности строятся таким образом, чтобы примерно равное количество относительно слабых событий находилось по обе стороны контуров эллипсов. Считается, что кольцо сейсмичности сформировалось, если максимальная ширина полосы эпицентров, формирующих его (сумма наибольших отклонений эпицентров, расположенных соответственно внутри и вне эллипса, от его контура), не превышает  $\frac{1}{4}$  длины малой оси эллипса (критерий качества кольцевой структуры).

5. Выбираются кольцевые структуры с наибольшими возможными пороговыми значениями  $M_{p1}$  и  $M_{p2}$ . При прочих равных условиях выбирается кольцо сейсмичности с максимальной длиной большой оси эллипса (соответственно  $L$  и  $l$  для мелкого и глубокого колец).

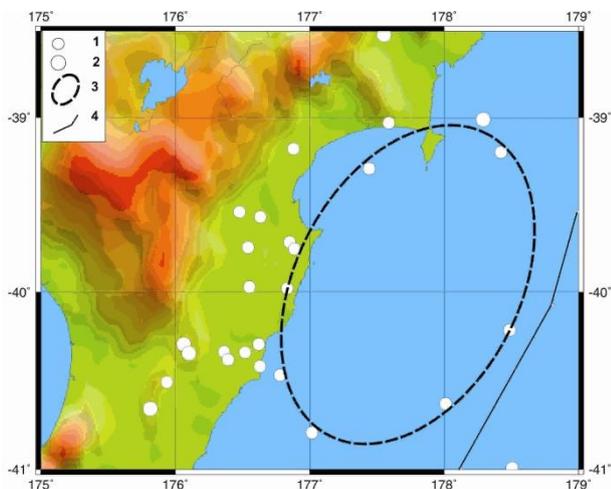
6. Регулярно (не реже, чем раз в полгода) необходимо контролировать параметры сейсмичности, поскольку известны случаи, когда за последние 1–2 года проявлялись новые кольцевые структуры с гораздо большими величинами  $M_p$ , как это было, например, перед Великим землетрясением Тохоку 11 марта 2011 г. [4].

**АНАЛИЗ ДАННЫХ**

**Новая Зеландия.** На рисунке 3 представлены характеристики неглубокой сейсмичности, начиная с 01.01.1973 г. в районе, ограниченном координатами 41.0–38.5° S, 175–179° E. Здесь к 01.06.2015 г. сформировалась крупная кольцевая структура, вытянутая в северо-северо-восточном направлении, параллельно желобу Хикуранги ( $M_{p1} = 5.1$ ,  $L \sim 220$  км). Наибольшая магнитуда в области кольца сейсмичности соответствует землетрясению 2007 г. ( $M = 6.6$ ). Кольцевая структура сформировалась в 1979–2011 г., текущее время  $T_p$  от начала ее формирования состав-

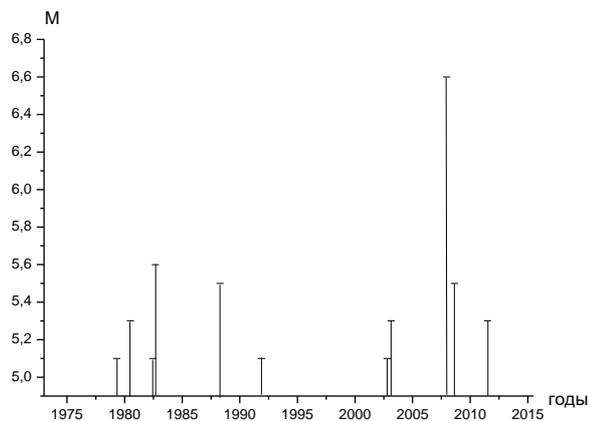
**КОЛЬЦЕВЫЕ СТРУКТУРЫ СЕЙСМИЧНОСТИ В ДВУХ ЗОНАХ СУБДУКЦИИ ТИХОГО ОКЕАНА:  
ВОЗМОЖНАЯ ПОДГОТОВКА СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ**

ляет ~36 лет. Зависимость магнитуд от времени в области кольца сейсмичности имеет двугорбую форму, максимальные скорости сейсмоструктурной деформации (СТД) наблюдались в 1979–1988 и 2002–2011 гг. (рисунок 4).



1 –  $M=5.1-5.9$ ; 2 –  $M \geq 6.0$ ; 3 – неглубокая кольцевая структура; 4 – ось глубоководного желоба

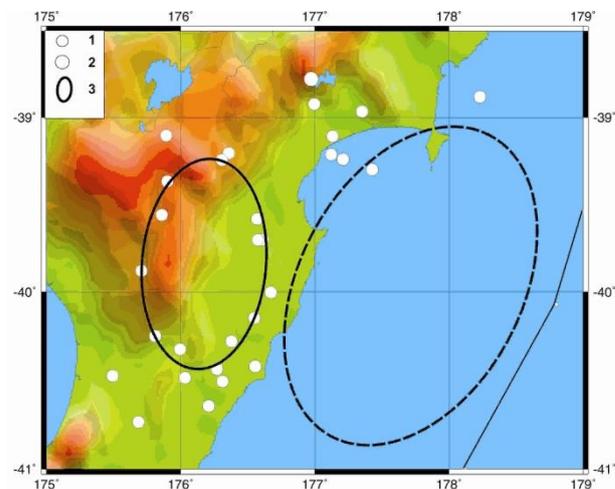
*Рисунок 3. Неглубокая сейсмичность в районе Северного о-ва Новой Зеландии*



*Рисунок 4. Район Северного о-ва Новой Зеландии. Зависимость магнитуд неглубоких землетрясений в области кольцевой структуры от времени*

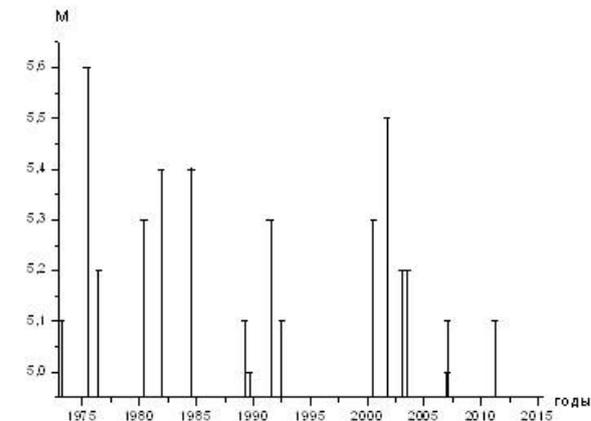
На рисунке 5 приведены данные о глубокофокусной сейсмичности ( $M_p2=5.0$ ): к западу от мелкого кольца четко проявилась меньшая по размерам кольцевая структура, ориентированная в субмеридиональном направлении ( $l \sim 130$  км). Наибольшая магнитуда события наблюдалась в 1975 г. ( $M=5.6$ ). Величина СТД распределена во времени более равномерно, чем для мелкого кольца сейсмичности (рисунок 6).

Важно отметить, что кольцевые структуры практически касаются в области  $\sim 40.0^\circ S, 176.7^\circ E$  (расстояние между ними  $\Delta r \sim 20$  км, что на порядок меньше размера мелкого кольца).



1 –  $M=5.0-5.9$ ; 2 –  $M \geq 6.0$ ; 3 – глубокая кольцевая структура. Остальные обозначения – на рисунке 3

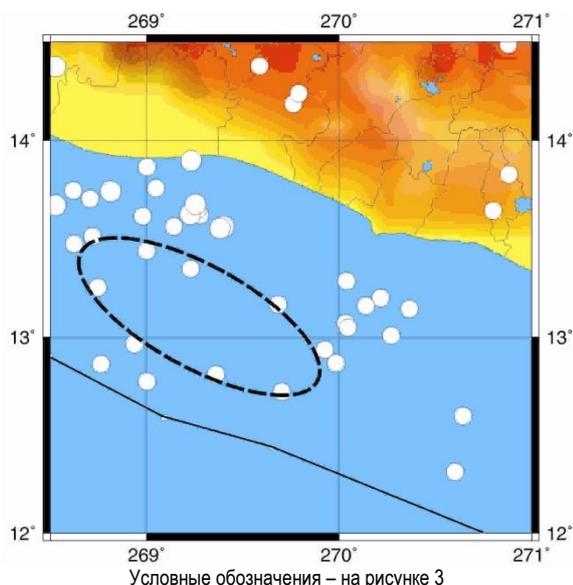
*Рисунок 5. Глубокая сейсмичность в районе Северного о-ва Новой Зеландии*



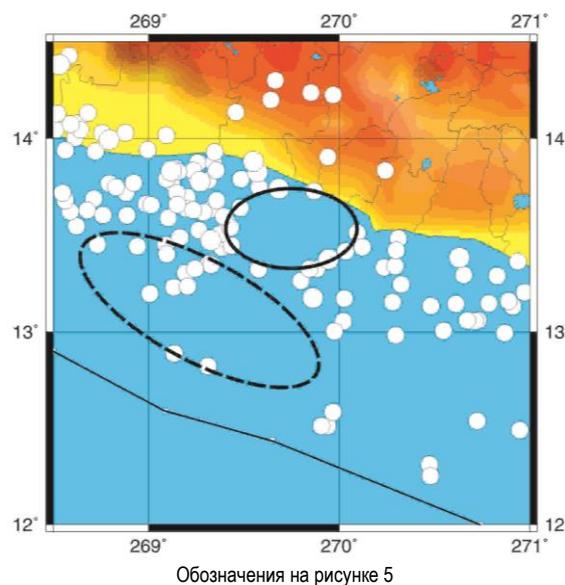
*Рисунок 6. Район Северного о-ва Новой Зеландии. Зависимость магнитуд глубокофокусных землетрясений в области кольцевой структуры от времени*

**Центральная Америка.** Рисунок 7 иллюстрирует неглубокую сейсмичность в районе, ограниченном координатами  $12.0-14.5^\circ N, 91.5-89.0^\circ W$  ( $M_p1=5.1$ ). Здесь в 1983–2015 гг. образовалась кольцевая структура, вытянутая в северо-западном направлении, параллельно глубоководному желобу ( $L \sim 150$  км). Величина  $T_p$  в данном случае заметно меньше, чем в районе Новой Зеландии (около 32 лет). Самая большая магнитуда (5.9) соответствует землетрясению 1996 г. (рисунок 8). Зависимость магнитуды от времени в области кольца сейсмичности имеет “зубчатую” форму: наибольшие скорости СТД наблюдались в 1993–1996 и 2013–2015 гг.

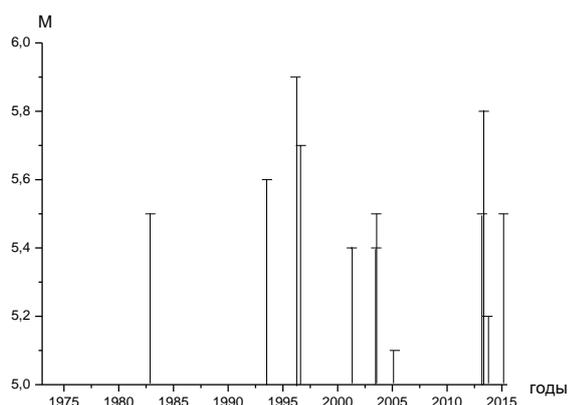
**КОЛЬЦЕВЫЕ СТРУКТУРЫ СЕЙСМИЧНОСТИ В ДВУХ ЗОНАХ СУБДУКЦИИ ТИХОГО ОКЕАНА:  
ВОЗМОЖНАЯ ПОДГОТОВКА СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ**



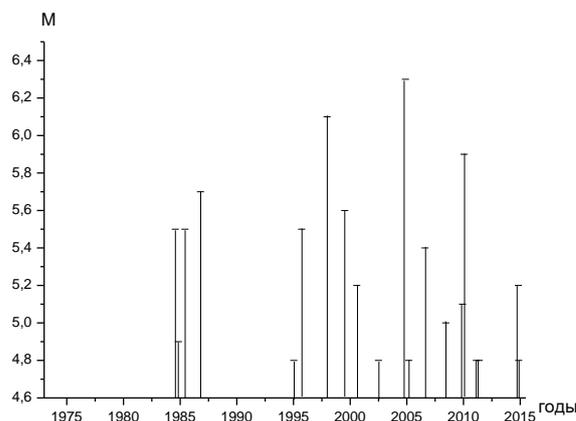
*Рисунок 7. Неглубокая сейсмичность в районе Центральной Америки*



*Рисунок 9. Глубокая сейсмичность в районе Центральной Америки. 1 – M=4.8–5.9*



*Рисунок 8. Район Центральной Америки. Зависимость магнитуд неглубоких землетрясений в области кольцевой структуры от времени*



*Рисунок 10. Район Центральной Америки. Зависимость магнитуд глубоководных землетрясений в области кольцевой структуры от времени*

На рисунке 9 приведены данные о глубоководной сейсмичности ( $M_{п2}=4.8$ ). К северу от мелкого кольца в 1984–2011 гг. сформировалась глубокая кольцевая структура (1–75 км), большая ось которой ориентирована в широтном направлении. Максимальная магнитуда (6.3) в области кольца наблюдалась в 2004 г. На зависимости  $M(T)$  выделяется короткий импульс в 1984–1986 гг. и размытый горбообразный участок в 1995–2014 гг. Самые высокие скорости СТД имели место в 1997–2010 гг. (рисунок 10). Обращает на себя внимание то, что кольцевые структуры почти касаются в области  $\sim 13.3$  N,  $\sim 90.5$  W (величина  $\Delta r \sim 10$  км). Существенно, что эта область находится в зоне сейсмической брешки, где не было сильных событий с  $M_w \geq 7.0$ , по крайней мере, начиная с 1900 г. Эпицентр сильнейшего землетрясения (1862 г.,  $M_w=8.1$ ) находится примерно в 80 км к востоку от области касания кольцевых структур.

**Оценка магнитуд возможных сильных землетрясений.** В [12] получены корреляционные зависимости размеров кольцевых структур и пороговых значений магнитуд от энергии главных событий для зон субдукции на западе и востоке Тихого океана. Для западной части тихоокеанского кольца получены только две зависимости с высокими коэффициентами корреляции  $r$ :

$$M_{п1} = -1.72 + 0.83 M_w, r=0.88, \quad (1)$$

$$M_{п2} = -1.14 + 0.72 M_w, r=0.96. \quad (2)$$

Для восточной части тихоокеанского кольца высокие величины  $r$  получены для всех четырех корреляционных зависимостей:

$$\lg L(\text{км}) = -1.33 + 0.45 M_w, r=0.88, \quad (3)$$

$$M_{п1} = -0.44 + 0.66 M_w, r=0.89, \quad (4)$$

$$\lg l(\text{км}) = -1.14 + 0.40 M_w, r=0.88, \quad (5)$$

$$M_{п2} = -0.92 + 0.70 M_w, r=0.86. \quad (6)$$

По формулам (1)–(2) и (3)–(6) проведена оценка магнитуды возможных сильных землетрясений соответственно в районах Новой Зеландии и Центральной Америки (таблица 3). Из таблицы 3 следует, что в районе Новой Зеландии можно ожидать событие с  $M_w=8.4\pm 0.2$ , а в районе Центральной Америки – с  $M_w=8.0\pm 0.3$ .

*Таблица 3. Прогноз магнитуд возможных сильных землетрясений*

Район	$M_w(L)$	$M_w(Mп1)$	$M_w(I)$	$M_w(Mп2)$	$M_w$
Новая Зеландия		8.2		8.5	$8.4\pm 0.2$
Центральная Америка	7.8	8.4	7.5	8.2	$8.0\pm 0.3$

### ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные данные показывают, что в районах Новой Зеландии и Центральной Америки, так же, как и в большинстве других зон субдукции, формируются кольцевые структуры сейсмичности в двух диапазонах глубин. В [1–7, 12] отмечено, что кольцевые структуры служат отражением процессов самоорганизации геологических систем [13], обеспечивающих подъем глубинных флюидов и в конечном счете ведущих к уменьшению потенциальной энергии Земли. Выделение флюидов в зонах субдукции происходит главным образом в результате дегидратации материала погружающихся океанических плит [14].

Следует отметить, что в некоторых районах, например, в зоне субдукции Каскадия, а также в южной Мексике не образуются глубокие кольцевые структуры [15,16], что может быть связано с относительно малым содержанием гидратированных пород в молодых океанических плитах Хуан-де-Фука и Ко-

кос, имеющих возраст ~5–10 млн лет [17]. В рассматриваемых здесь районах погружающиеся океанические плиты значительно более древние (с возрастом ~98 и 23 млн лет соответственно в районах Новой Зеландии и Центральной Америки [8, 11]) и содержат больше гидратированных пород, что и обуславливает появление глубоких колец сейсмичности.

Полученные данные показывают, что в рассматриваемых районах сформировались четкие кольцевые структуры, которые могут соответствовать подготовке сильных землетрясений с магнитудами  $M_w\sim 8.0$ . Исходя из параметров кольцевых структур, можно предполагать, что сильное событие с  $M_w\sim 9.0$  в районе Новой Зеландии в ближайшие годы маловероятно. Судя по полученным ранее данным [1, 2, 4–7], эпицентры готовящихся сильных событий, скорее всего, будут располагаться вблизи областей наибольшего сближения мелких и глубоких колец сейсмичности. Из рисунков 1, 2 следует, что эти области находятся в зонах сейсмических брешей, в которых не происходило землетрясений такой энергии, по крайней мере, с середины XIX-го века.

Следует отметить также, что текущее время формирования мелкой кольцевой структуры  $T_p$  заметно выше для района Новой Зеландии, оно близко к максимальным величинам, полученным для зон субдукции Тихого океана (~40 лет). В связи с этим есть основания предполагать, что в ближайшие годы более вероятно сильное землетрясение на западе тихоокеанского кольца. С учетом полученных данных имеет смысл проводить регулярный мониторинг геодинамических процессов в выделенных областях с целью среднесрочного прогноза готовящихся сильных землетрясений.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Копничев, Ю.Ф. Кольцевая сейсмичность в разных диапазонах глубин перед сильными и сильнейшими землетрясениями в зонах субдукции / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Докл. РАН, 2009. – Т. 425, № 4. – С. 539–542.
2. Копничев, Ю.Ф. Характеристики кольцевой сейсмичности в разных диапазонах глубин перед сильными и сильнейшими землетрясениями в районе Суматры / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Докл. РАН, 2009. – Т. 429, № 1. – С. 106–109.
3. 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. 34–51.
4. Копничев, Ю.Ф. Кольцевые структуры сейсмичности и землетрясение 11.03.2011 г. ( $M_w=9.0$ ) в районе северо-восточной Японии / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Докл. РАН, 2011. – Т. 440, № 2. – С. 246–249.
5. 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. 1, № 3. – С. 22–33.
6. Копничев, Ю.Ф. Характеристики кольцевых структур сейсмичности, формирующихся перед сильными и сильнейшими землетрясениями на периферии Тихого океана / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Вестник НЯЦ РК, 2013. – Вып. 2. – С. 131–140.
7. Копничев, Ю.Ф. Кольцевые структуры сейсмичности в районе северного Чили и успешный прогноз места и магнитуды землетрясения Икике 01.04.2014 г. ( $M_w=8.2$ ) / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Вестник НЯЦ РК, 2015. Вып. 4. – С. 153–159.
8. Rodgers, D. World's largest coseismic strike-slip offset: The 1855 rupture of the Wairarapa Fault, New Zealand, and implications for displacement/length scaling of continental earthquakes / D. W. Rodgers, T. A. Little // J. Geophys. Res., 2006. – V. 111. – B12. DOI: 10.1029/2005JB004065.
9. Clark, K. Evidence for past subduction earthquakes at a plate boundary with widespread upper plate faulting: southern Hikurangi margin, New Zealand / K. Clark, B. Hayward, U. Cochran, L. Wallace, W. Power, A. Sabaa // Bull. Seismol. Soc. Am., 2015. – V. 105. – P. 1661–1690.

10. Wallace, L.M. Earthquake and tsunami potential of the Hikurangi subduction thrust, New Zealand: Insights from paleoseismology, GPS, and tsunami modeling / L.M. Wallace, U.A. Cochran, W.L. Power, and K.J. Clark // *Oceanography*, 2014. – V. 27. N 2. – P. 104–117. <http://dx.doi.org/10.5670/oceanog.2014.46>.
11. Benito, M., A new evaluation of seismic hazard for the Central America region / M. Benito, C. Lindholm, E. Camacho, Á. Climent, G. Marroquín, E. Molina, W. Rojas, J. Escobar, E. Talavera, G. Alvarado, and Y. Torres // *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 2012. – V. 102. – P. 504–523.
12. Копничев, Ю.Ф. Кольцевые структуры сейсмичности, формирующиеся перед сильными и сильнейшими землетрясениями на северо-западе и востоке Тихого океана / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // *Вестник НЯЦ РК*, 2013. – Вып. 2. – С. 131–140.
13. Летников, Ф.А. Синергетика геологических систем / Ф.А. Летников // *Наука*. – Новосибирск, 1992. – 229 с.
14. Yamazaki, T. Double seismic zone and dehydration embrittlement of the subducting slab / T. Yamazaki, T. Seno // *J. Geophys. Res.*, 2003. – V. 108. N B4. - doi: 10/1029/2002JB001918.
15. Копничев, Ю.Ф. Кольцевые структуры сейсмичности в зоне субдукции Каскадия: возможная подготовка сильных землетрясений / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // *Вестник НЯЦ РК* (в печати).
16. Копничев, Ю.Ф. Кольцевые структуры сейсмичности в районе южной Мексики: возможная подготовка сильного землетрясения / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // *Вестник НЯЦ РК* (в настоящем выпуске).
17. Abers G. Thermal–petrological controls on the location of earthquakes within subducting plates / G. Abers, J. Nakajima, P. van Keken, S. Kita, B. Hacker // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2013. – V.369–370. – P. 178–187.

### ТЫНЫҚ МҰХИТТЫҢ ЕКІ СУБДУКЦИЯ АЙМАҒЫНДАҒЫ СЕЙСМИКАЛЫҚТЫҢ АЙНАЛМАЛЫ ҚҰРЫЛЫМДАРЫ: БОЛАТЫН ҚАТТЫ ЖЕРСІЛКІНУЛЕРДІ ДАЙЫНДАУ

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

<sup>1)</sup> *РФА О.Ю. Шмидт атындағы Жер физикасы институты, Москва, Ресей*

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

Екі субдукция аймақтарындағы сейсмикалықтың кейбір сипаттамалары қарастырылады: Жаңа Зеландия ауданында (Солтүстік арал, 42° арасында 38.5° S) және Орталық Америкада (Сальвадор және Гватемала, 12° және 14.5° N). Екі аймақта, сондай-ақ басқа да көптеген аудандарда, 1973 жылдан кейін, екі тереңдік диапазонында сейсмикалықтың айналмалы құрылымдары қалыптасады: 0–33 және 34–70 км. Магнитудалардың шекті көрсеткіштерінің бағалауы (M<sub>p1</sub> және M<sub>p2</sub> сәйкес, көрсетілген тереңдіктер диапазонында), сондай-ақ осы аймақтар үшін айналмалы құрылымдарының көлемдері (L және l). Бұрын Тынық Мұхиттың батыс пен шығысындағы басты оқиғаларының магнитудаларының Mw осы параметрлердің көлемдерінің корреляциялық тәуелділіктері құрылды. Осы тәуелділіктерді қолдана отырып, болатын қатты жерсілкінулердің магнитудаларының бағалауы орындалды: Mw=8.4±0.2 және 8.0±0.3, осыған сәйкес Жаңа Зеландия және Орталық Американы үшін.

### RING-SHAPED SEISMICITY STRUCTURES IN TWO SUBDUCTION ZONES OF THE PACIFIC: POSSIBLE PREPARATION FOR LARGE EARTHQUAKES

<sup>1)</sup> Yu.F. Kopychev, <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*

We have been studying some seismicity characteristics in two subduction zones: in the regions of New Zealand (North island, between 42° and 38.5° S) and Central America (El Salvador and Guatemala, between 12° and 14.5° N). It was shown that ring-shaped seismicity structures are being formed after 1973 in two depth ranges: 0–33 and 34–70 km in both zones, like in many other regions. We have obtained estimates of threshold magnitude values (M<sub>t1</sub> and M<sub>t2</sub> in the ranges mentioned respectively), and also dimensions of ring structures (L and l) for these zones. Earlier correlation dependences of these parameters on magnitudes Mw of main events for the west and east of the Pacific were constructed. Using these dependences we estimated magnitudes of possible large earthquakes: Mw=8.4±0.2 and 8.0±0.3 for the regions of New Zealand and Central America correspondingly.

УДК 550.34

## КОЛЬЦЕВЫЕ СТРУКТУРЫ СЕЙСМИЧНОСТИ В ЗОНЕ СУБДУКЦИИ КАСКАДИЯ: ВОЗМОЖНАЯ ПОДГОТОВКА СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

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

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

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

Рассматриваются характеристики сейсмичности в зоне субдукции Каскадия, расположенной на западе Северной Америки. Установлено, что перед двумя сильными землетрясениями (17.08.1991 г.,  $M_w=7.1$  и 25.04.1992 г.,  $M_w=7.2$ ), начиная с 1964 г. сформировались неглубокие кольцевые структуры сейсмичности ( $h=0-33$  км) с пороговыми значениями магнитуд  $M_{p1}$  соответственно 4.3 и 4.8. В то же время здесь, в отличие от многих других зон субдукции, не проявились глубокие кольцевые структуры (в диапазоне глубин 34–70 км). Выделены три новые кольцевые структуры с пороговыми значениями  $M_{p1}=4.7-5.2$ , которые начали формироваться с 1973 г. Предполагается, что в областях этих структур могут готовиться сильные землетрясения. На основании корреляционных зависимостей размеров колец сейсмичности и величин  $M_{p1}$  от магнитуды главных событий, полученных ранее для востока Тихого океана, сделаны оценки магнитуд возможных сильных землетрясений:  $M_w=7.6-7.9$  (самое сильное – в районе о-ва Ванкувер). С учетом этого сделан вывод, что в настоящее время в зоне субдукции Каскадия не готовится сильнейшее событие с  $M_w\sim 9.0$ , аналог землетрясения 1700 г. Однако вероятна реализация в ближайшие годы сильного землетрясения с  $M_w=7.9\pm 0.3$  в районе о-ва Ванкувер. Обсуждаются причины отсутствия глубоких колец сейсмичности в рассматриваемой зоне.

### ВВЕДЕНИЕ

В последние годы установлено, что перед большинством сильных и сильнейших землетрясений в зонах субдукции формируются кольцевые структуры сейсмичности [1–7]. Как правило, такие структуры, имеющие форму, близкую к эллипсам, образуются в двух диапазонах глубин: 0–33 и 34–70 км. Они характеризуются пороговыми значениями магнитуд (соответственно  $M_{p1}$  и  $M_{p2}$ ), а также длинами больших осей ( $L$  и  $l$ ). Длительность формирования таких структур в большинстве случаев не превышает 40 лет, в среднем она близка к 25 годам [4–7]. Полученные данные могут быть использованы для определения места и магнитуды готовящихся сильных землетрясений и, возможно, для их среднесрочного прогноза. Примеры успешного прогноза места и магнитуды Великого землетрясения Тохoku 11.03.2011 г. ( $M_w=9.0$ ) в северо-восточной Японии и землетрясения Икике 01.04.2014 г. ( $M_w=8.2$ ) в северном Чили приведены в [4, 7]. Возможность такого прогноза особенно важна для наиболее сильных землетрясений с  $M_w\rightarrow 9.0$ , для которых период повторяемости может составлять многие сотни лет [8]. В данной статье с этой целью рассматриваются характеристики сейсмичности в зоне субдукции Каскадия, расположенной на западе Северной Америки [9].

### ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Зона субдукции Каскадия длиной ~1100 км простирается от севера о-ва Ванкувер до мыса Мендосино в северной Калифорнии (рисунок 1). Она разделяет Северо-Американскую плиту и океаническую плиту Хуан де Фука. Океаническая литосфера Тихого океана погружается под континент со скоро-

стью ~40 мм/год. Молодая океаническая плита, субдуцируемая под Северо-Американскую, считается “теплой“, поскольку она разогрета гораздо сильнее, чем более древние плиты, например, тихоокеанская, погружающаяся под северо-восточную Японию [9].



1 – зона субдукции; 2 – вулканы; 3 – ось глубоководного желоба

Рисунок 1. Расположение зоны субдукции Каскадия на западе Северной Америки

Зона субдукции Каскадия может генерировать очень сильные землетрясения. Последнее такое событие с  $M_w \sim 9.0$  произошло в 1700 г. [10]. Землетрясение породило цунами, которое вызвало разрушения даже в районе Японии. Согласно палеосейсмическим данным, сильнейшие землетрясения происходили здесь, по меньшей мере, 7 раз за последние 3500 лет, при этом период повторяемости таких событий может варьироваться от 300 до 600 лет [11]. Недавние исследования показывают, что вероятность землетрясения с  $M_w \sim 9.0$  в ближайшие 50 лет может составлять  $\sim 17\%$  [11]. Это свидетельствует о необходимости более точного прогноза места и магнитуды готовящегося сильного сейсмического события.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

**Данные.** По аналогии с [1–7] рассмотрены характеристики сейсмичности в исследуемом районе, включающем очаговую зону сильного землетрясения или предполагаемую область подготовки такого события. Строились карты эпицентров землетрясений для двух диапазонов глубин: 0–33 и 34–70 км за период, начиная с 1964 г., для очаговых зон сильных землетрясений и с 1973 г. – для возможных областей их подготовки. Анализировались данные сейсмических каталогов NEIC (National Earthquake Information Center) Геологической службы США (USGS – United States Geological Survey) с 1973 г. и ISC (International Seismological Centre) за 1964–1972 гг.

**Методика** выделения кольцевых структур имеет следующие особенности.

1. Длительность периода, в течение которого исследуются характеристики сейсмичности, составляет около 40 лет, что соответствует максимальным величинам, известным в настоящее время.

2. Рассматриваются параметры сейсмичности в двух диапазонах глубин: 0–33 и 34–70 км, в которых формируются кольцевые структуры. Для каждого диапазона отбираются события, магнитуда которых не меньше пороговой (соответственно  $M_{p1}$  и  $M_{p2}$ ).

3. Проводится перебор пороговых величин магнитуд  $M_p$  (в обоих диапазонах глубин) с целью определения оптимальных значений, при которых кольцевые структуры выделяются наиболее четко.

4. Кольцевые структуры аппроксимируются, как правило, эллипсами. Кольца сейсмичности строятся таким образом, чтобы примерно равное количество относительно слабых событий находилось по обе стороны контуров эллипсов. Принимается, что кольцо сейсмичности сформировалось, если максимальная ширина полосы эпицентров, формирующих его (сумма наибольших отклонений эпицентров, расположенных соответственно внутри и вне эллипса, от его контура), не превышает  $\frac{1}{4}$  длины малой оси эллипса (критерий качества кольцевой структуры).

5. Выбираются кольцевые структуры с наибольшими возможными пороговыми значениями  $M_{p1}$  и  $M_{p2}$ . При прочих равных условиях выбирается кольцо сейсмичности с максимальной длиной большой оси эллипса (соответственно  $L$  и  $l$  для мелкого и глубокого колец).

6. Регулярно (не реже, чем раз в полгода) необходимо контролировать параметры сейсмичности, поскольку известны случаи, когда за последние 1–2 года проявлялись новые кольцевые структуры с гораздо большими величинами  $M_p$ , как это было, например, перед Великим землетрясением Тохоку 11 марта 2011 г. ( $M_w=9.0$ ) и землетрясением Икике в районе северного Чили 01.04.2014 [4, 7].

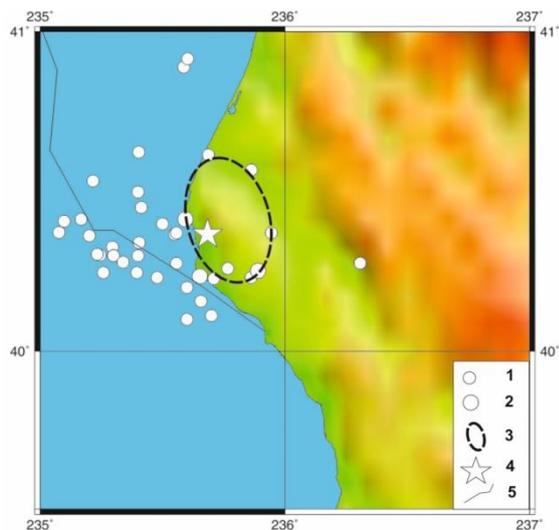
#### АНАЛИЗ ДАННЫХ

Рассмотрим сначала характеристики сейсмичности перед двумя сильными землетрясениями в зоне субдукции Каскадия, произошедшими в 1991 и 1992 гг.

**Кольцевые структуры сейсмичности, сформировавшиеся перед сильными землетрясениями.** 25.04.1992 г. в районе северной Калифорнии произошло землетрясение с  $M_w=7.2$ . Это событие имело механизм типа надвига, типичный для зон субдукции. На рисунке 2-а показаны эпицентры неглубоких ( $h=0$ –33 км,  $M_{p1}=4.8$ ) землетрясений, произошедших в данном районе с 01.01.1964 по 24.04.1992 гг. Из рисунка 2-а следует, что здесь сформировалась кольцевая структура с длиной большой оси  $L \sim 45$  км, вытянутая вдоль побережья в субмеридиональном направлении. Эпицентр главного события находится на расстоянии около 10 км от кольца сейсмичности. Рисунок 2-б иллюстрирует зависимость магнитуд землетрясений в области кольца сейсмичности от времени. Видно, что в данном случае кольцо начало формироваться в 1973 г.; наблюдается резкий рост скорости сейсмостектонической деформации (СТД) в 1987–1991 гг., когда произошли три события с  $M=6.0$ –6.3.

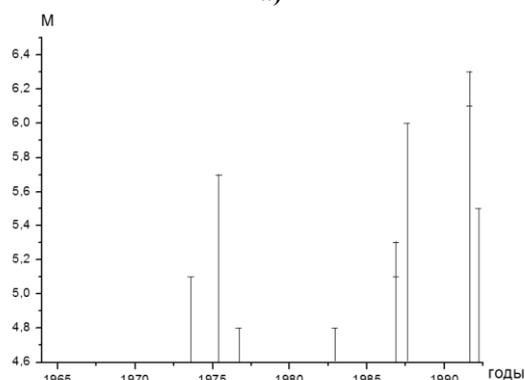
Рисунок 3-а иллюстрирует характеристики сейсмичности перед землетрясением 17.08.1991 г. ( $M_w=7.1$ ), произошедшим на северной границе Калифорнии. Механизм этого события – почти чистый сдвиг. Здесь в 1966–1991 гг. в океанической коре, к западу от глубоководного желоба, сформировалось кольцо сейсмичности ( $M_{p1}=4.3$ ,  $L \sim 60$  км), вытянутое в субширотном направлении. Наибольшие скорости СТД в области кольцевой структуры наблюдались в 1991 г., самое сильное событие имело магнитуду 6.9 (рисунок 3-б). Следует отметить, что в данном случае не зарегистрировано глубоких землетрясений с  $M \geq 3.6$ .

**КОЛЬЦЕВЫЕ СТРУКТУРЫ СЕЙСМИЧНОСТИ В ЗОНЕ СУБДУКЦИИ КАСКАДИЯ:  
ВОЗМОЖНАЯ ПОДГОТОВКА СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ**

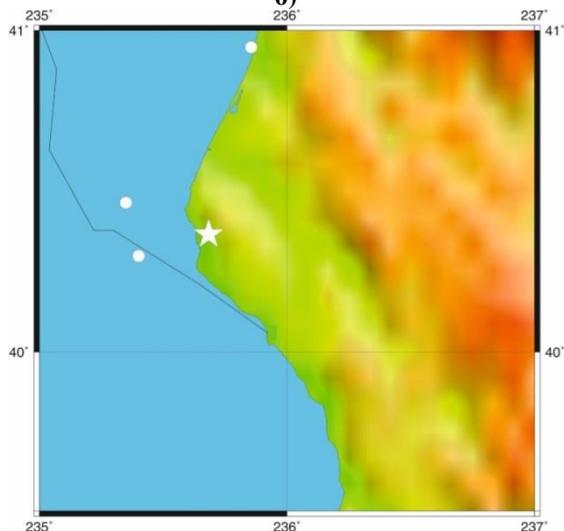


1 –  $M=4.8-5.9$ ; 2 –  $M \geq 6.0$ ; 3 – кольцо сейсмичности; 4 – эпицентр главного события; 5 – ось глубоководного желоба

**а)**

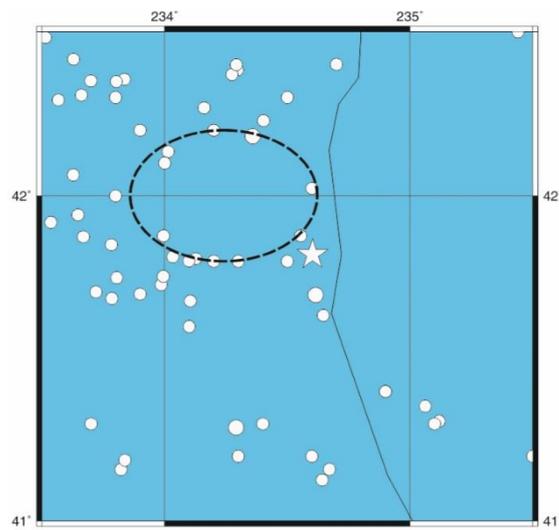


**б)**



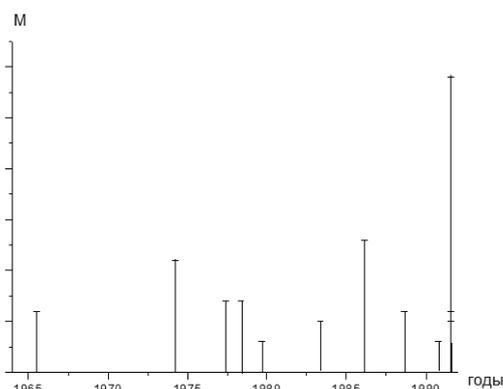
**в)**

Рисунок 2. Район северной Калифорнии: а – мелкая кольцевая структура сейсмичности, сформировавшаяся перед землетрясением 25.04.1992 г.; б – зависимость магнитуд землетрясений от времени в области кольцевой структуры; в – эпицентры глубоких землетрясений.  $M=3.6-4.4$



Обозначения – на рисунке 2-а

**а)**



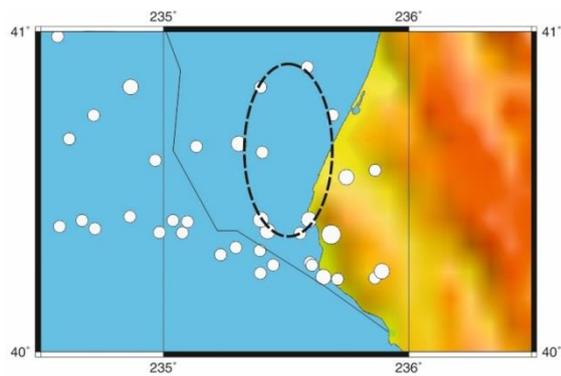
**б)**

Рисунок 3. Район северной границы Калифорнии: а – мелкая кольцевая структура сейсмичности, сформировавшаяся перед землетрясением 17.08.1991 г.  $M_p=4.3$ ; б – зависимость магнитуд землетрясений от времени в области кольцевой структуры

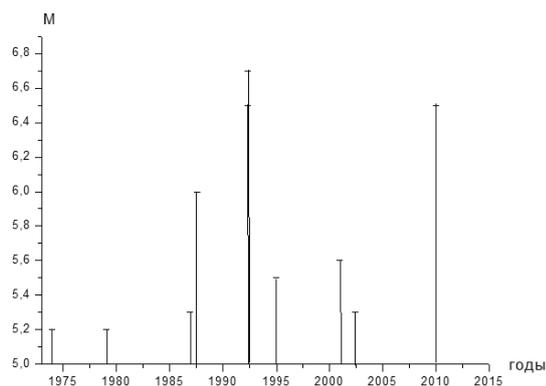
**Кольцевые структуры, сформировавшиеся до 01.01.2015 г.** На рисунке 4-а представлены данные о сейсмичности в районе северной Калифорнии, ограниченном координатами 40–41° N, 127–125° W. Здесь в 1973–2010 гг. на глубинах 0–33 км сформировалась кольцевая структура ( $M_{p1}=5.2$ ,  $L \sim 45$  км), вытянутая в субмеридиональном направлении вдоль побережья. Наибольшая магнитуда в области кольца сейсмичности соответствует событию 1992 г. ( $M_{max}=6.7$ ). На рисунке 4-б показана зависимость магнитуд землетрясений от времени в области кольцевой структуры. Видно, что наибольшие скорости STD наблюдались в 1986–1994 и 2010 гг.

Из рисунка 4-в следует, что в данном районе очень мало событий с глубинами 34–70 км, поэтому не сформировалось глубоких колец сейсмичности для  $M_{p2} \geq 3.6$ .

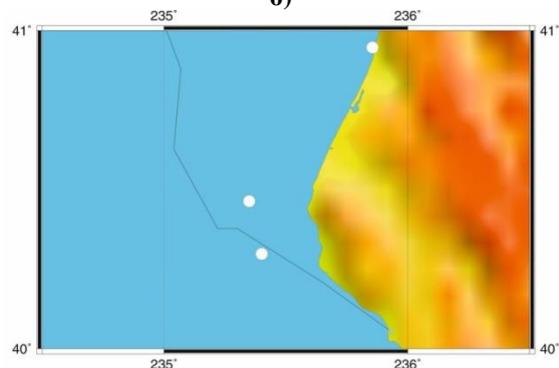
КОЛЬЦЕВЫЕ СТРУКТУРЫ СЕЙСМИЧНОСТИ В ЗОНЕ СУБДУКЦИИ КАСКАДИЯ:  
ВОЗМОЖНАЯ ПОДГОТОВКА СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ



Обозначения – на рисунке 2-а  
а)



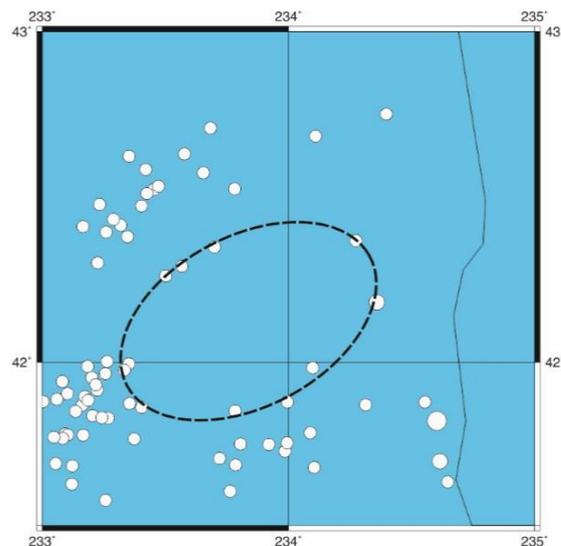
б)



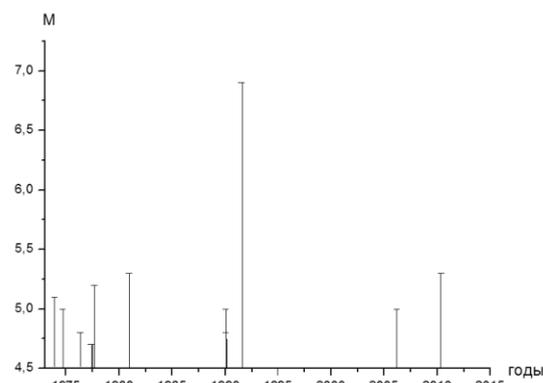
в)

Рисунок 4. Район северной Калифорнии: а – мелкая кольцевая структура сейсмичности, сформировавшаяся до 01.01.2015 г.  $M_{п1}=5.2$ ; б – зависимость магнитуд землетрясений от времени в области кольцевой структуры; в – эпицентры глубоких землетрясений.  $M=3.6-4.4$

На рисунке 5-а показаны характеристики сейсмичности в районе на границе Калифорнии и Орегона. В данном случае в 1973-2010 гг. проявилось мелкое кольцо сейсмичности с  $M_{п1}=4.7$ ,  $L\sim 110$  км, ориентированное в восточном-северо-восточном направлении. Наибольшая магнитуда имела место для землетрясения 1991 г. ( $M=6.9$ , см. рисунок 5б). В этом районе начиная с 1973 г. не зарегистрировано ни одного глубокого события с  $M\geq 3.6$ .



Обозначения – на рисунке 2-а  
а)

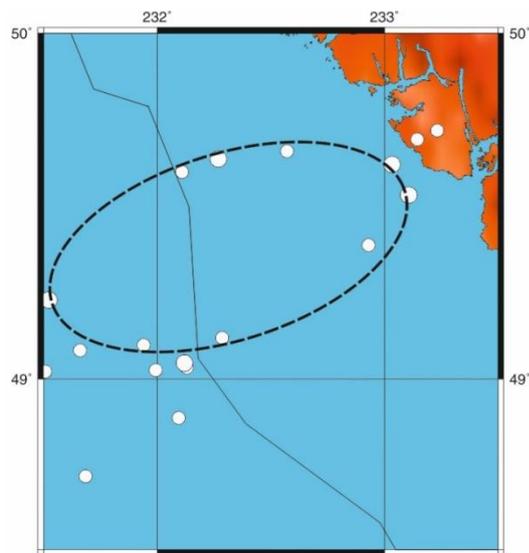


б)

Рисунок 5. Район границы Калифорнии и Орегона: а – мелкая кольцевая структура сейсмичности, сформировавшаяся до 01.01.2015 г.  $M_{п1}=4.7$ ; б – зависимость магнитуд землетрясений от времени в области кольцевой структуры

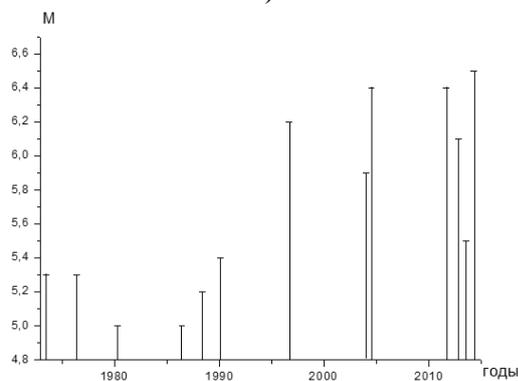
На рисунке 6-а представлены данные о сейсмичности в районе о-ва Ванкувер. Здесь в 1973–2014 гг. образовалась кольцевая структура с пороговым значением  $M_{п1}=5.0$ . Структура с длиной большой оси  $L\sim 120$  км вытянута в направлении восток-северо-восток. Наибольшая магнитуда  $M_{max}$  в области кольца сейсмичности составляет 6.5 (для землетрясения 2014 г.). Из рисунка 6б следует, что в области кольцевой структуры имел место резкий рост скорости СТД в 2004-2014 гг., когда произошло 4 события с  $M=6.1-6.5$ .

В данном районе в 1987-2011 гг. зарегистрировано только четыре землетрясения с глубинами более 33 км ( $M=4.0-4.6$ ,  $h=34-38$  км, см. рисунок 6в). Из приведенных данных следует, что в зоне субдукции Каскадия начиная с 1973 г. не сформировалось ни одной глубокой кольцевой структуры.

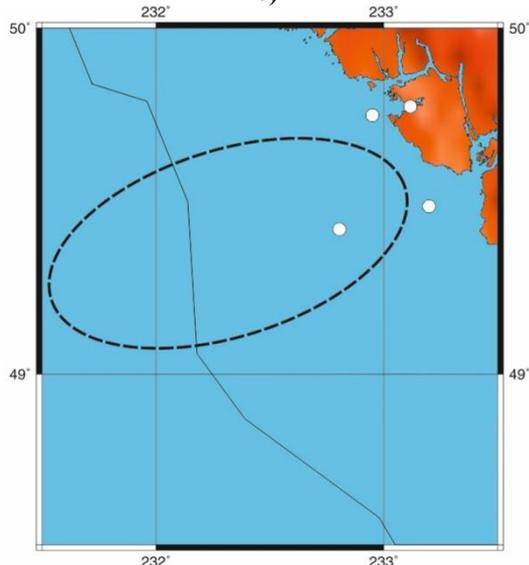


Обозначения – на рисунке 2-а

а)



б)



в)

Рисунок 6. Район о-ва Ванкувер: а – мелкая кольцевая структура сейсмичности, сформировавшаяся до 01.01.2015 г.  $M_{п1}=5.0$ ; б – зависимость магнитуд землетрясений от времени в области кольцевой структуры; в – эпицентры глубоких землетрясений.  $M=4.0-4.6$

**Оценки магнитуд возможных сильных землетрясений.** В [6] получены корреляционные зависимости размеров кольцевых структур, а также пороговых значений магнитуды от энергии главных землетрясений для зон субдукции на востоке Тихого океана (от Аляски до Южной Америки):

$$\lg L(\text{км}) = -1.33 + 0.45 M_w \quad (1)$$

$$r = 0.88, p < 0.0001,$$

$$M_{п1} = -0.44 + 0.66 M_w \quad (2)$$

$$r = 0.88, p < 0.0001,$$

где  $r$  – коэффициент корреляции,  $p$  – уровень статистической значимости.

По этим формулам выполнена оценка магнитуд сильных землетрясений, подготовка которых может идти в областях кольцевых структур (таблица).

Таблица. Оценки величин  $M_w$  по параметрам кольцевых структур

Район	L, км	$M_{п1}$	$M_w$
40–41° N	55	5.2	7.7±0.9
41.5–42.5° N	110	4.7	7.6±0.1
48.5–50° N	120	5.0	7.9±0.3

Из таблицы следует, что средние значения магнитуд возможных сильных землетрясений в зоне Каскадия варьируются в диапазоне 7.6–7.9. Для кольцевой структуры в районе северной Калифорнии наблюдается несоответствие между оценками  $M_w$  по L и  $M_{п1}$  (слишком малое кольцо для данной пороговой магнитуды).

#### ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные данные свидетельствуют о том, что в зоне субдукции Каскадия формируются неглубокие кольцевые структуры сейсмичности перед сильными землетрясениями. Однако, в отличие от многих других зон субдукции, здесь не проявляются глубокие кольцевые структуры (в диапазоне 34–70 км). Как отмечалось в [3–7], формирование колец сейсмичности есть отражение процессов самоорганизации геологических систем [12], обеспечивающих подъем глубинных флюидов и, в конечном счете, ведущих к уменьшению потенциальной энергии Земли. Отличие зоны субдукции Каскадия от многих других связано с тем, что здесь погружается под континент очень молодая океаническая плита (возраст ~6–9 млн лет в области о-ва Ванкувер [9]). Предполагается, что в теплой плите Хуан де Фука гидратирована только океаническая кора [9]. В связи с этим при дегидратации материала субдуцирующей плиты выделяется сравнительно малый объем воды, главным образом на небольших глубинах, а в диапазоне 34–70 км, видимо, содержание флюидов слишком мало для формирования кольцевых структур.

Выше показано, что перед двумя сильными землетрясениями в зоне субдукции сформировались неглубокие кольца сейсмичности. Учитывая эти дан-

ные, можно предполагать подготовку сильных сейсмических событий в трех областях зоны субдукции Каскадия, где нами выделены кольцевые структуры. Из приведенной таблицы следует, что в областях трех кольцевых структур могут произойти события с  $M_w \sim 7.6-7.9$ . Таким образом, сейсмические данные свидетельствуют о том, что в зоне субдукции в настоящее время не формируются кольцевые структуры, которые могут соответствовать готовящемуся землетрясению с  $M_w \sim 9.0$ . Следует отметить, что достаточно крупные кольцевые структуры с высокими значениями  $M_p1$  четко проявились перед недавними сильнейшими землетрясениями: Суматра-Андаманским 2004 г. ( $M_w=9.0$ ), Мауле 2010 г. ( $M_w=8.8$ ) и Тохоку 2011 г. ( $M_w=9.0$ ) [3–5]. Вместе с тем необходимо учитывать, что кольца сейсмичности могут перестроиться в структуры с более высокими величинами  $L$  и  $M_p1$  достаточно быстро – в течение 1–2

лет, как это было, например, перед землетрясениями Тохоку 2011 г. и Икике 2014 г. [4, 7]. В связи с этим необходимо регулярно (не реже, чем раз в полгода) переопределять характеристики кольцевых структур в целях уточнения места и магнитуды готовящихся сильных землетрясений. Кроме того, такая информация может быть полезной для среднесрочного прогноза времени таких событий.

В [3, 4, 7] показано, что перед многими сильными и сильнейшими землетрясениями наблюдается резкий рост скорости СТД в областях кольцевых структур непосредственно в последние годы перед этими событиями (см. также рисунки 2-б, 3-б). Подобный эффект может наблюдаться и в районе о-ва Ванкувер (рисунок 6-б). Учитывая этот эффект, можно предполагать, что в этом районе сильное землетрясение в ближайшие годы наиболее вероятно.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Копничев, Ю.Ф. Кольцевая сейсмичность в разных диапазонах глубин перед сильными и сильнейшими землетрясениями в зонах субдукции / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Докл. РАН, 2009. – Т. 425. – № 4. – С. 539–542.
2. Копничев, Ю.Ф. Характеристики кольцевой сейсмичности в разных диапазонах глубин перед сильными и сильнейшими землетрясениями в районе Суматры / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Докл. РАН, 2009. – Т. 429. – № 1. – С. 106–109.
3. 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. 34–51.
4. Копничев, Ю.Ф. Кольцевые структуры сейсмичности и землетрясение 11.03.2011 г. ( $M_w=9.0$ ) в районе северо-восточной Японии / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Докл. РАН, 2011. – Т. 440. – № 2. – С. 246–249.
5. 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. 22–33.
6. Копничев, Ю.Ф. Характеристики кольцевых структур сейсмичности, формирующихся перед сильными и сильнейшими землетрясениями на периферии Тихого океана / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Вестник НЯЦ РК, 2013 – Вып. 2. – С. 131–140.
7. Копничев, Ю.Ф. Кольцевые структуры сейсмичности в районе Северного Чили и успешный прогноз места и магнитуды землетрясения Икике 01.04.2014 г. ( $M_w=8.2$ ) / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Вестник НЯЦ РК, 2015 – Вып. 4. – С. 153–159.
8. Goldfinger C. Superquakes and supercycles / C.Goldfinger, Ya.Ikeda, R.Yeats, J.Ren // Seismol. Res. Lett., 2013. – V. 84.– N 1. – P. 24–32.
9. Abers, G. Thermal–petrological controls on the location of earthquakes within subducting plates / G.Abers, J.Nakajima, P. van Keken, S. Kita, B. Hacker // Earth Planet. Sci. Lett. 2013. – V. 369 – 370. – P. 178 – 187.
10. Satake, K. Fault slip and seismic moment of the 1700 Cascadia earthquake inferred from Japanese tsunami descriptions / K. Satake, K. Wang, B. Atwater // J. Geophys. Res., 2003. – V. 108. – N B11. – doi: 10.1029/2003JB002521.
11. Kulkarni, R. Statistical analysis of great earthquake recurrence along the Cascadia subduction zone / R. Kulkarni, I. Wong, J. Zachariassen, C. Goldfinger, M. Lawrence // Bull. Seismol. Soc. Amer., 2013. – V. 103. – N 6. – P. 3205–3221.
12. Летников, Ф.А. Синергетика геологических систем / Ф.А. Летников // Новосибирск: Наука, 1992. – 229 с.

#### КАСКАДИЯ СУБДУКЦИЯСЫНЫҢ ЗОНАСЫНДАҒЫ СЕЙСМИКАЛЫҚТЫҢ АЙНАЛМАЛЫ ҚҰРЫЛЫМДАРЫ: БОЛАТЫН ҚАТТЫ ЖЕРСІЛКІНУЛЕРДІҢ ДАЙЫНДАЛУЫ

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

<sup>1)</sup> РҒА О.Ю. Шмидт атындағы Жер физикасы институты, Москва, Ресей

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

Солтүстік Американың батысында орналасқан Каскадия субдукциясының зонасындағы сейсмикалықтың сипаттамалары қарастырылады. Екі қатты жерсілкінудің алдында (1991ж.08.17-сіндегі,  $M_w=7.1$  және 1992 ж.04.25-індегі,  $M_w=7.2$ ), 1964 жылдан бастап, сейсмикалықтың терең емес айналмалы құрылымдары қалыптасқаны белгілі болды ( $h=0-33$  км), магнитудаларының шекті көрсеткіштері  $M_p1$  осыған сәйкес 4.3 және 4.8. Сол уақытта, осы жерде басқа субдукция зоналарына қарағанда, сейсмикалықтың терең айналмалы

құрылымдары байқалмаған (34–70 км тереңдік диапазонында). Үш жаңа айналмалы құрылымдар белгіленді, олар 1973 жылдан бастап қалыптаса бастаған, шекті көрсеткіштері  $M_{p1}=4.7-5.2$ . Осы құрылымдардың аудандарында қатты жерсілкінулер пайда болуы мүмкін деген болжам жасалды. Сейсмикалықтың айналымдарының көлемдерінің корреляциялық тәуелділіктерінің және алдында Тынық Мұхиттың шығысы үшін алынған,  $M_{p1}$  шамасының басты оқиғалардың магнитудаларынан тәуелділіктерінің негізінде, болатын қатты жерсілкінулердің магнитудаларының бағалауы алынды:  $M_w=7.6-7.9$  (ең қаттысы – Ванкувер аралының ауданында). Осыны ескере отырып, қазіргі кезде Каскадия субдукциясының зонасында, 1700 жылдағы жерсілкінісіне ұқсайтын,  $M_w\sim 9.0$  магнитудалы қатты оқиға дайындалып жатқан жоқ деген қорытынды жасалды. Бірақ таяу жылдары, Ванкувер аралының ауданында  $M_w=7.9\pm 0.3$  магнитудалы қатты жерсілкінісі болуы ықтимал. Қарастырылып жатқан зонада сейсмикалықтың терең айналымдары жоқтығының себептері талқылануда.

### **RING-SHAPED SEISMICITY STRUCTURES IN THE CASCADIA SUBDUCTION ZONE: POSSIBLE PREPARATION FOR LARGE EARTHQUAKES**

<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*

We have been considering seismicity characteristics in the Cascadia subduction zone, located in the west of North America. It was established, that since 1964 shallow ( $h=0-33$  km) ring-shaped seismicity structures with threshold magnitudes  $M_{t1}$  of 4.3 and 4.8 respectively have been formed prior to two large earthquakes (17.08.1991,  $M_w=7.1$  and 25.04.1992,  $M_w=7.2$ ). At the same time deep ring-shaped structures ( $h=34-70$  km) were not observed here, in contrast to many other subduction zones. We have been identified three new ring-shaped structures with values  $M_{t1}$  varying from 4.7 to 5.2, which began to form since 1973. It is supposed that large earthquakes can be prepared in these areas. At the base of correlation dependences of ring sizes and  $M_t$  values on magnitudes of major events, obtained earlier for the east of Pacific, we estimated magnitudes for possible large earthquakes:  $M_w=7.6-7.9$  (the largest value – for the Vancouver island area). It follows from this data that the giant earthquake with  $M_w\sim 9$ , analog of the 1700 event is not being prepared now in the subduction zone. At the same time a realization of large earthquake ( $M_w=7.9\pm 0.3$ ) is most probable in the area of Vancouver island in the nearest years. We discuss the reasons for the deep rings absence in the Cascadia subduction zone.

УДК 621.039

## РАСЧЕТ КРЫШКИ АМПУЛЫ ПЕТЛЕВОГО КАНАЛА ИГР

Сулейменов Н.А., Котов В.М., Витюк Г.А.

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

В настоящей работе рассмотрены возникшие проблемы при организации связи элементов внешнего натриевого контура с экспериментальным устройством через крышку ампулы петлевого канала ИГР и технические решения, обеспечивающие их преодоление. В частности, предложено техническое решение, позволяющее избежать возможности перегрева крепежных элементов крышки ампулы и обеспечивающее безопасные параметры работы экспериментального устройства.

**ВВЕДЕНИЕ**

В Институте атомной энергии НЯЦ РК на реакторе ИГР в течение большого времени проводятся исследования процессов, имитирующие тяжелые аварии энергетических реакторов с плавлением активной зоны, вследствие которых возможно возникновение повторной критичности.

Проводились исследования стойкости одиночных твэлов к воздействию потока нейтронов, существенно превышающего его рабочие значения, модельных сборок твэлов различных конфигураций и различного состава топлива.

Настоящая работа выполнена в рамках НТП «Исследование процессов, определяющих возможность возникновения повторной критичности в случае тяжелой аварии ядерного реактора». Проект посвящен изучению возможностей реактора ИГР для моделирования переходных и аварийных режимов. Предполагается, что в рамках исследований будут проведены три эксперимента: прекращение расхода теплоносителя на номинальной мощности и два эксперимента с резким ростом мощности разной интенсивности.

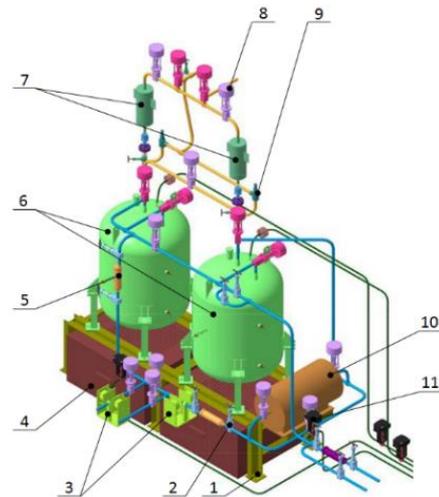
Особенностью проекта является использование петлевого натриевого контура, содержащего конструкционные элементы как в объеме экспериментальной ампулы, так и в реакторном помещении. Связь между ними осуществляется с помощью двух трубопроводов подвода и отвода натриевого теплоносителя, проходящих через крышку ампулы. Использование натриевого контура позволяет провести эксперименты с контролируемым расходом теплоносителя.

**ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ**

В рамках работ по исследованию тяжелых аварий с плавлением топлива была разработана предварительная конструкция петлевого натриевого контура ИГР (рисунок 1) и экспериментального устройства, устанавливаемого в ампулу петлевого канала реактора.

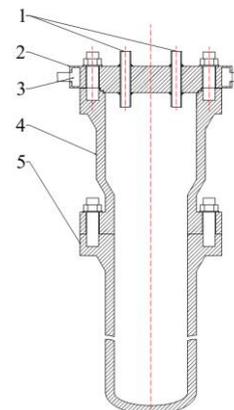
Ампула состоит из наружного, внутреннего корпусов и крышки (рисунок 2). Крышка ампулы служит связующим звеном между самим экспериментальным устройством и натриевым контуром ИГР, обеспечивая сохранение герметичности внутренней полости ампулы и подачу рабочих тел к испытатель-

ной секции в ходе эксперимента. Крышка ампулы состоит из коллектора и плоской крышки, которые крепятся друг к другу при помощи десяти шпилек и гаек. Герметизация в месте установки крышки осуществляется медной плоской прокладкой.



1 – опорная рама, 2 – клапан запорный с ручным приводом, 3 – датчик расхода, 4 – поддон самотушения, 5 – фильтр натриевый, 6 – баки-аккумуляторы, 7 – ловушка аэрозолей, 8 – клапан запорный с пневмоприводом для натрия, 9 – предохранительный клапан, 10 – насос ЦЛИН, 11 – клапан запорный с пневмоприводом для аргона

*Рисунок 1. Петлевой натриевый контур ИГР*



1 – патрубки входа и выхода теплоносителя, 2 – плоская крышка, 3 – тракт охлаждения, 4 – коллектор, 5 – наружный корпус ампулы

*Рисунок 2. Эскиз ампулы петлевого канала ИГР*

Так как через крышку проходят трубопроводы подвода и отвода теплоносителя, то основной проблемой при проведении экспериментов является возможность перегрева крепежных элементов крышки выше допустимой температуры 623 К. Следовательно, должно быть предусмотрено их охлаждение. В конструкции ампулы такое охлаждение реализуется путем прокачки азота через тракт охлаждения 3 крышки (поз. 3, рисунок 2).

Целью работы является расчет рабочих параметров крышки, при которых значения рабочей температуры ее элементов находятся в пределах допустимых и выбор технических решений в случае, если происходит превышение допустимых температур.

Основной задачей расчетов являлось определение соответствия расхода азота в тракте охлаждения крышки рабочей температуре элементов крышки при заданных условиях течения натрия через крышку.

По условиям проводимого эксперимента температура теплоносителя на входе составляет 673 К. Расчетные оценки [1] показывают, что на выходе эта величина может достигать 880 К, поэтому в качестве граничных условий на поверхности входного и выходного патрубков теплоносителя задавалась постоянная температура 673 К и 880 К соответственно, температура охлаждающего газа – 300 К (таблица 1).

Таблица 1. Исходные данные для расчетов

Параметр	Значение
Охлаждающий газ	азот
Температура охлаждающего газа на входе в крышку ампулы, К	300
Давление газа, МПа	0.1
Температура поверхности отверстия под входной патрубок натрия, К	673
Температура поверхности отверстия под выходной патрубок натрия, К	880

Основываясь на условиях осевой симметрии крышки ампулы, для расчета был выбран сегмент 1/2 части крышки. На внешних стенках крышки ампулы задавались условия конвективного теплообмена с окружающей средой с температурой 300 К при коэффициенте теплоотдачи 5 Вт/(м<sup>2</sup>·К), на боковых стенках модели заданы условия симметрии.

Расчеты проводились в программном пакете ANSYS Fluent [2]. Свойства материалов были получены из соответствующей справочной литературы [3–5].

**ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ КРЫШКИ АМПУЛЫ**

В результате проведенных расчетов определено, что расход азота в тракте охлаждения крышки, при котором значения температуры элементов крышки ампулы не превышают допустимую, составляет 170 г/с. Температурное поле элементов крышки ампулы и поле скоростей азота показаны на рисунке 3.

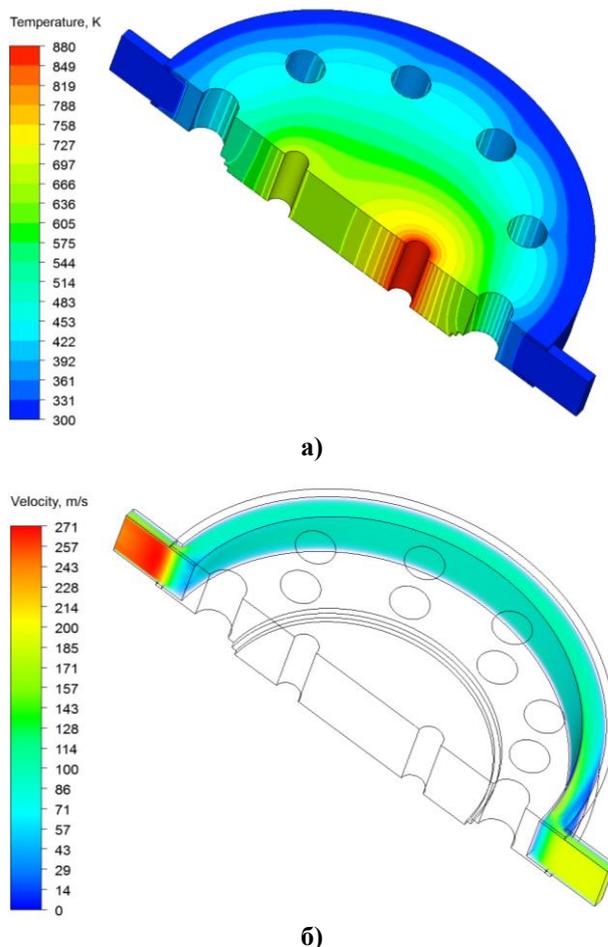


Рисунок 3. Температурное поле крышки (а) и поле скоростей азота (б)

В этом случае, при использовании азота под давлением 0.1 МПа в тракте охлаждения крышки наблюдаются высокая скорость и значительный перепад давления. С целью снижения этих показателей были проведены расчеты с рабочим давлением азота 0.5 МПа и 1 МПа. При этом расход азота составил 160 г/с и 130 г/с соответственно. Результаты приведены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты расчета системы охлаждения крышки ампулы

Параметр	Значение		
Расход азота, г/с	170	160	130
Давление азота, МПа	0.1	0.5	1.0
Температура азота на входе в тракт охлаждения, К	300		
Температура азота на выходе из тракта охлаждения, К	309	311	
Средняя скорость азота в тракте охлаждения, м/с	109.0	20.5	8.3
Перепад давления в тракте охлаждения, кПа	30.2	5.8	1.9
Максимальная температура на поверхности отверстий под шпильки в крышке, К	622		

На рисунке 4 представлены значения максимальной температуры на поверхности отверстий под шпильки в крышке ампулы при давлении азота 0,1, 0,5 и 1 МПа.

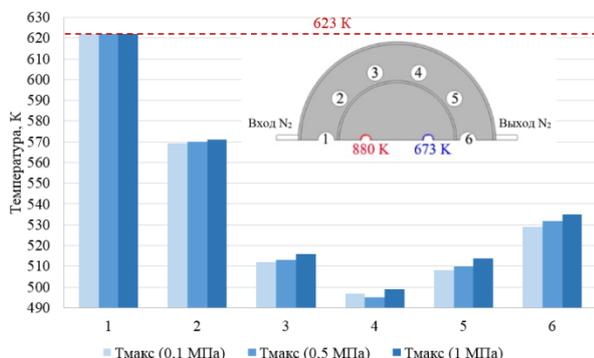


Рисунок 4. Значения максимальной температуры на поверхностях отверстий под шпильки в крышке при давлении азота 0,1, 0,5 и 1 МПа

На основании проведенных расчетов можно сделать следующие выводы:

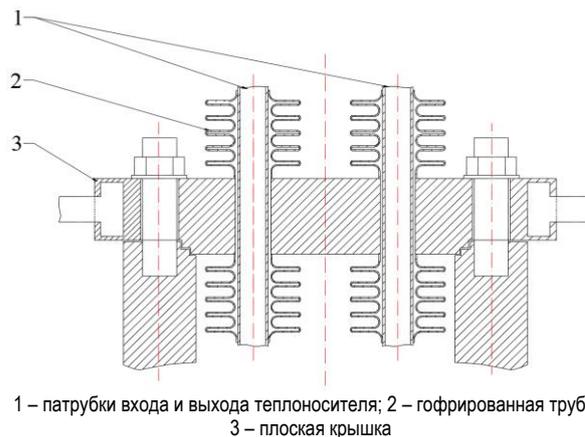
- требуемый расход азота в тракте охлаждения крышки ампулы, при котором значение температуры не превышает 623 К, составляет 170 г/с при давлении азота 0,1 МПа, 160 г/с при давлении азота 0,5 МПа и 130 г/с при давлении азота 1 МПа;
- представленные условия для охлаждения крышки трудно выполнимы.

**РАСЧЕТ МОДЕРНИЗИРОВАННОЙ КОНСТРУКЦИИ КРЫШКИ АМПУЛЫ**

В предыдущем расчете была выявлена необходимость подачи большого расхода охлаждающего газа, поэтому для оптимизации системы охлаждения крышки ампулы было предложено техническое решение, основанное на частичном изменении конструкции крышки ампулы (рисунок 5). При этом патрубки входа и выхода натрия размещаются в крышке с зазором, а их соединение с крышкой и герметизация полости ампулы выполнены с помощью дополнительных гофрированных стальных труб большего диаметра. Данная конструкция исключает прямой контакт горячих патрубков теплоносителя с крышкой и, соответственно, уменьшает нагрев крышки и ее элементов по сравнению с первым вариантом конструкции.

Теплофизические расчеты были проведены для двух вариантов. В первом варианте расчета расход азота в тракте охлаждения ампулы равен 1 г/с. Во втором варианте тракт охлаждения в крышке ампулы отсутствовал, т.е. крышка ампулы представляла собой цельную металлическую конструкцию.

На рисунке 6 представлены результаты расчета максимальной температуры на поверхностях отверстий под шпильки в крышке для обоих вариантов.



1 – патрубки входа и выхода теплоносителя; 2 – гофрированная трубка; 3 – плоская крышка

Рисунок 5. Эскиз крышки ампулы экспериментального устройства.

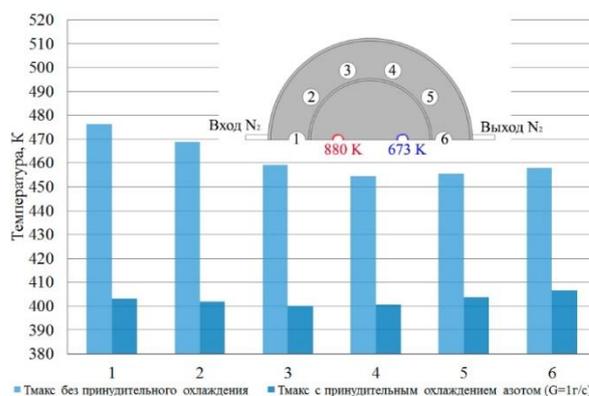


Рисунок 6. Максимальная температура на поверхностях отверстий под шпильки в крышке при модернизации системы охлаждения

В обоих случаях на поверхности отверстия в крышке под шпильки наблюдается допустимое значение температур, однако больший запас по температуре обеспечивает вариант с принудительным охлаждением крышки.

**ПРОЧНОСТНОЙ РАСЧЕТ ГОФРИРОВАННОЙ ТРУБКИ И ПАТРУБКА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ**

Как было отмечено в предыдущей части, патрубки теплоносителя закреплены к корпусу крышки гофрированной трубкой. При такой конструкции стоит учитывать температурное расширение патрубка теплоносителя и возможные механические нагрузки, которые воспримет гофрированная трубка. С учетом вышесказанного были рассмотрены различные варианты исполнения гофрированной трубы и в итоге был проработан ее наиболее оптимальный вариант (рисунок 7), состоящий из 5 гофр с внутренним радиусом закругления 1 мм и толщиной стенки 1 мм. Вследствие горизонтальной симметрии в расчете был рассмотрен участок патрубка равный 100 мм.

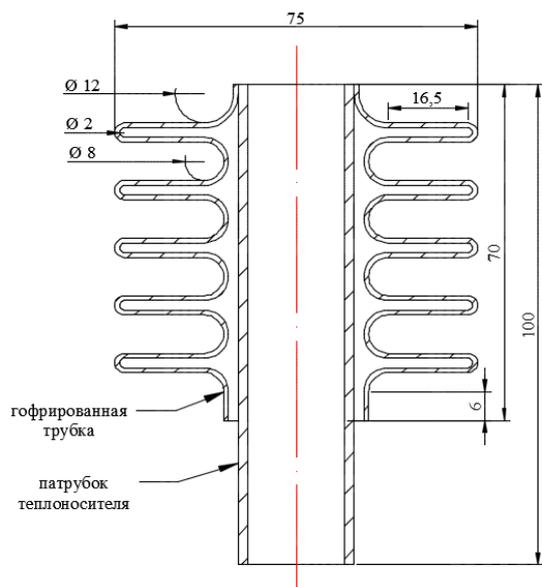


Рисунок 7. Вариант гофрированной трубки

Был выполнен связанный тепло-прочностной расчет в модулях ANSYS Steady-State Thermal и Static Structural. При этом выходные данные по тепловому расчету были импортированы в прочностной расчет в качестве входных данных.

Условия расчета следующие:

1. Гофрированная трубка и патрубок зафиксированы у нижнего торца.
2. На внутренней стенке патрубка задана температура 880 К.
3. На нижнем торце гофры задана температура 593 К (данное значение взято из предыдущего расчета исходной конструкции крышки).

Результаты расчета приведены ниже в таблице 3 и на рисунке 8.

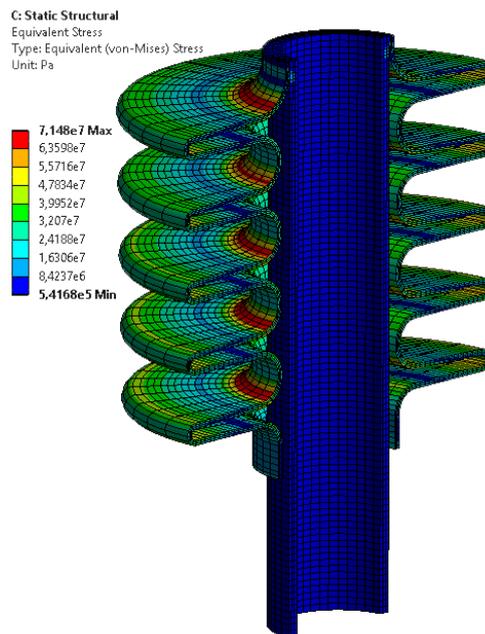
Таблица 3. Результаты расчета

Параметр Элемент	Удлинение, мм	Макс. мех. напряжение, МПа	Допустимое напряжение, МПа [6]	Предел текучести, МПа
Гофра	1.07	71.5	74	147
Патрубок		24.3		

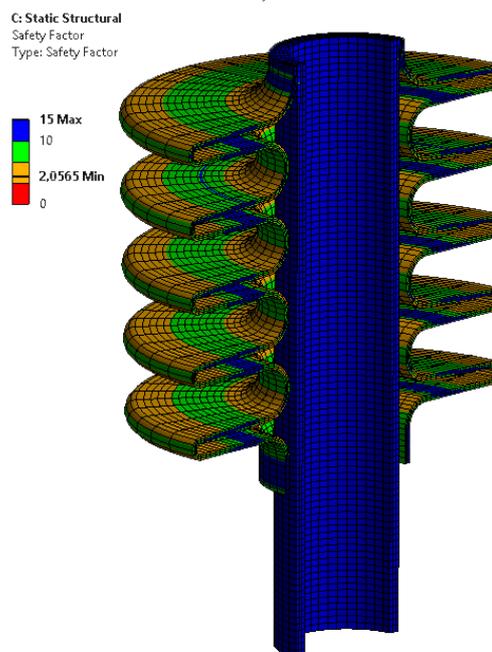
Удлинение модели составило 1.07 мм, в то время как максимальное механическое напряжение наблюдается на внешней поверхности гофр и составляет 71.5 МПа (рисунок 8а). При таких напряжениях минимальный коэффициент запаса по пределу текучести (рисунок 8б) равен 2.1 и удовлетворяет требуемым нормам [7].

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В целях обеспечения безопасных условий экспериментов по моделированию процессов, сопровождающих тяжелые аварии энергетических реакторов с плавлением активной зоны, были проведены исследования и получены данные, на основе которых можно сделать следующие выводы:



а)



б)

Рисунок 8. Механические напряжения гофрированной трубки (а) и коэффициент запаса по пределу текучести (б)

- Для существующей системы охлаждения крышки ампулы требуемый расход азота в тракте охлаждения, при котором значения температуры не превышают допустимой, составляет 170 г/с при давлении азота 0.1 МПа, 160 г/с при давлении азота 0.5 МПа и 130 г/с при давлении азота 1 МПа.

- При модернизации существующей системы охлаждения крышки на поверхности отверстий в крышке под шпильки наблюдается допустимое зна-

чение температур, как в случае с принудительным охлаждением крышки ампулы, так и без охлаждения крышки.

– Путем использования гофрированной трубки компенсируется температурное удлинение патрубка теплоносителя.

– Максимальные значения механических напряжений в гофрированной трубке составляют 71.5 МПа при допустимом 74 МПа.

– Рассмотренная конструкция гофрированной трубы обеспечивает двукратный запас по пределу текучести.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Bassi A., Payot F., Suteau C. and Serre F. SAIGA feasibility studies: STUDY OF THE BUNDLE DEGRADATION FOR THE TIB SCENARIO. NNC / CEA meeting – 2015 sept 10.
2. ANSYS, Inc. Products Release 14.5.7, 2013.
3. Чиркин, В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники / В.С. Чиркин ; М. : Атомиздат, 1968. – 121–128, 291–294, 237–239 с.
4. Сталь марки 12X18H10T // Центральный металлический портал РФ URL: [http://metallicheckiy-portal.ru/marki\\_metallov/stk/12X18H10T](http://metallicheckiy-portal.ru/marki_metallov/stk/12X18H10T).
5. Гохфельд Д.А., Гецов Л.Б., Кононов К.М., Кульчихин Е.Т., Ребяков Ю.Н., Садаков О.С., Тимашев С.А., Чепурский В.Н. Механические свойства сталей и сплавов при нестационарном погружении. Справочник. Екатеринбург: УрО РАН, 1996. ISBN 5-7691-0570-4.
6. ГОСТ 14249-89. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. – Взамен ГОСТ 14249-80; введ. 1989-05-18. – М.: Изд-во стандартов, 1989.
7. Атомные станции. Стальные защитные оболочки. Нормы расчета на прочность : ПНАЭ Г-10-012-89: утв. Постановлением Госатомэнергонадзора СССР 26.10.89 : введ в действие с 01.09.90. – М. : ГОСПРОМАТОМНАЗЗОР СССР, 1990.

#### ИГР ТҰЗАҚТЫ КАНАЛ АМПУЛЫНЫҢ ҚАҚПАҒЫНЫҢ ЕСЕБИ

Н.А. Сулейменов, В.М. Котов, Г.А. Витюк

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

Осы жұмыста ИГР тұзақты каналы ампулының қақпағы арқылы тәжірибелі құрылғылармен ішкі натрий контурының элементтерінің байланысын ұйымдастыру кезінде пайда болған мәселелер және оларды ұзартуды қамтамасыз ететін техникалық шешімдер қарастырылды. Жеке алғанда, тәжірибелік құрылғының жұмысының қауіпсіз параметрлерін қамтамасыз ететін және ампул қақпағының бекітпе элементтерінің қызып кетуін болдырмау мүмкіндігін береді.

#### COMPUTATION OF THE AMPULE LID OF IGR REACTOR'S LOOP CHANNEL

N.A. Suleymenov, V.M. Kotov, G.A. Vityuk

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

The paper addresses the problems occurred during organization the element connection of outer sodium loop with experimental device through the ampule lid of IGR reactor loop channel and engineering solutions to overcome these problems. In particular, it is suggested the engineering solution to avoid anchoring elements overheating of the ampule lid and to ensure safe operating parameters of experimental device.

УДК 533.932, 621.039.6

**ВЛИЯНИЕ ПЛАЗМЫ НА ВОЛЬФРАМ И МОЛИБДЕН КАК НА КАНДИДАТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА**

Туленбергенов Т.Р., Скаков М.К., Рахадиллов Б.К., Соколов И.А.

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

В статье представлены результаты экспериментальных исследований взаимодействия гелиевой, дейтериевой и водородной плазмы с кандидатными материалами дивертора ТЯР на имитационном стенде с плазменно-пучковой установкой.

Исследованы характеристики плазменно-пучкового разряда в среде водорода, при котором режимы плазменно-го воздействия обеспечивают наиболее приближенные характеристики плазмы токамака.

Для исследования структуры, определения элементного состава образцов вольфрама, молибдена и их физико-механических свойств, а также для изучения характера разрушения облученных слоев материалов использованы методы рентгеноструктурного фазового анализа, просвечивающей электронной микроскопии, сканирующей электронной микроскопии, оптико-эмиссионной спектроскопии.

**ВВЕДЕНИЕ**

Как известно, решение задачи создания реакторов управляемого термоядерного синтеза в значительной мере определяется выбором конструктивных материалов, испытывающие мощное воздействие, обусловленное облучением нейтронами, альфа-частицами, а также тепловыми нагрузками со стороны термоядерной плазмы. Предполагается, что тепловая нагрузка на диверторные пластины ITER в рабочем режиме будет достигать  $Q = 10 \text{ МВт/м}^2$ , а во время ELM-событий будет достигать  $Q = 20 \text{ МВт/м}^2$  [1, 2].

Имитационные установки являются весьма эффективными, поскольку позволяют оперативно проводить испытания кандидатных материалов термоядерных реакторов (ТЯР), пополнять базу данных по разнообразным аспектам плазменно-поверхностного взаимодействия, проверять расчетные модели и отрабатывать диагностические методики в достаточно хорошо программируемых условиях. При вводе в эксплуатацию полномасштабного термоядерного реактора, где в полной мере будут сочетаться все повреждающие факторы, следует ожидать проявления новых явлений и эффектов, изучение которых может в значительной мере опираться на базу данных и их физических моделей, разработанные в имитационных экспериментах.

Для достижения необходимых оптимальных параметров плазмы на плазменно-пучковой установке (ППУ), максимально приближенной к плазме Казахского токамака материаловедческого (КТМ), требуется проведение предварительных расчетно-теоретических и экспериментальных работ, которые будут направлены на исследование свойств и структуры конструктивных материалов в условиях их взаимодействия с плазмой. Поэтому, получение ба-

зы данных и моделирование эффектов воздействия плазмы на поверхности конструкционных материалов в термоядерном реакторе с помощью имитационной установки являются весьма актуальными задачами.

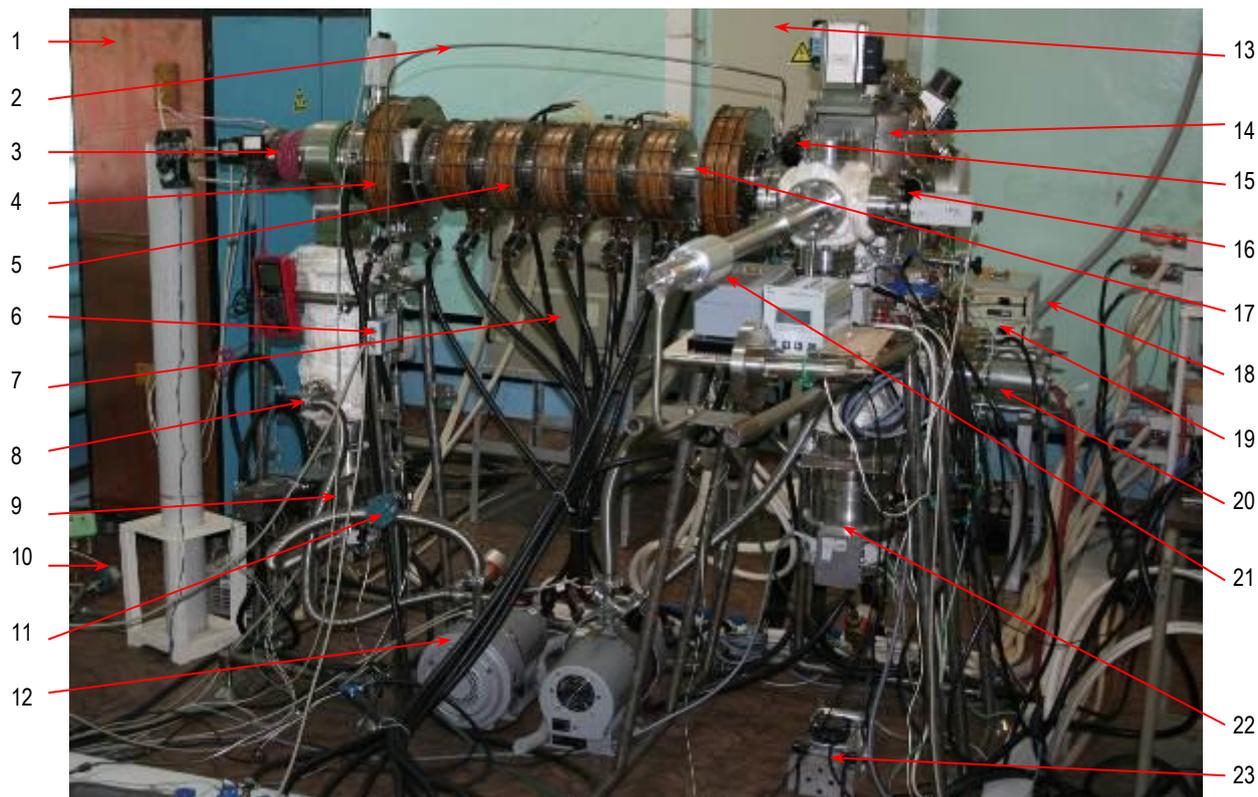
**ИМИТАЦИОННЫЙ СТЕНД С ПЛАЗМЕННОПУЧКОВОЙ УСТАНОВКОЙ**

Стенд имитационных испытаний предназначен для тестирования методик измерения параметров плазменно-пучкового разряда при исследовании взаимодействия плазмы с поверхностью материалов, для проведения испытаний диагностического оборудования, а также для развития существующих и разработки новых методов моделирования нагрузок на конструкционные материалы.

Основными элементами ППУ являются электронно-лучевая пушка, камера плазменно-пучкового разряда, камера откачки электронно-лучевой пушки (ЭЛП), вакуумная камера взаимодействия, электромагнитные катушки, мишенное устройство, шлюзовое устройство и камера загрузки [3]. Общий вид имитационного стенда с плазменно-пучковой установкой показан на рисунке 1.

Функционирование имитационного стенда обеспечивается следующими системами: вакуумной системой откачки, системой напуска газов в камеру плазменно-пучкового разряда (ППР); электрической системой (для подачи напряжения к устройствам и механизмам, входящим в состав стенда таким, как ЭЛП, электромагнитная система, насосы вакуумной системы и др.); системой водяного охлаждения элементов стенда; системой подачи газообразного азота для управления агрегатами стенда.

В таблице 1 приведены диапазоны значений реализуемых экспериментальных параметров пучка.



1 - шкаф с трансформаторами питания прямого и электронного накала пушки; 2 - тракт напуска газа в камеру ППР; 3 - электронная пушка; 4 - большая электромагнитная катушка; 5 - малая электромагнитная катушка; 6 - натекатель РРГ-12; 7 - блоки питания подачи ускоряющего напряжения на электронную пушку; 8 - клапан форвакуумной откачки стенда; 9 - турбомолекулярный насос TMU262; 10 - датчик давления Метран-55-ДА тракта охлаждения электронной пушки; 11 - датчик давления Метран-55-ДА тракта газонапуска; 12 - форвакуумный насос SH-110; 13 - шкаф питания имитационного стенда; 14 - камера взаимодействия; 15 - система развертки электронного пучка; 16 - смотровое окно Ду63; 17 - камера ППР; 18 - система выхлопа откачки насосов; 19 - блоки подачи питания на коллектор и мишень; 20 - сублимационный насос; 21 - устройство перемещения образцов из камеры загрузки в камеру взаимодействия; 22 - турбомолекулярный насос TMU521; 23 - форвакуумный мембранный насос

Рисунок 1. Общий вид имитационного стенда с плазменно-пучковой установкой

Таблица 1. Значения параметров пучка

Параметры пучка	Значение
Плотность теплового потока, кВт/см <sup>2</sup>	0–400
Электронная температура, эВ	0–15
Диаметр пучка, мм	3–30
Величина тока в плазме, мА	0–1000
Напряженность магнитного поля, создаваемая на оси генератора, Тл	0,1
Плотность плазмы в пучке, 1/м <sup>3</sup>	до 10 <sup>17</sup>

#### МЕТОД ЗОНДОВОЙ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ

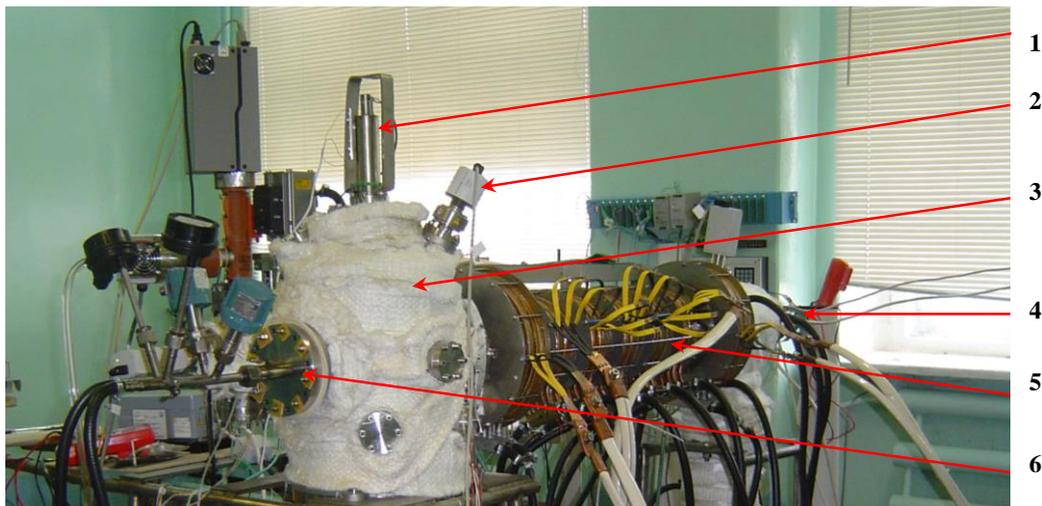
Для определения параметров плазменного потока в ППУ используется зонд Ленгмюра. Расположение зонда Ленгмюра на камере взаимодействия показано на рисунке 2.

Метод зондовой диагностики основан на измерении тока заряженных частиц, при размещении в

плазме электрического проводника, в зависимости от его потенциала [4, 5, 6].

Из анализа полученной вольт-амперной характеристики (ВАХ) можно извлечь информацию о параметрах плазмы таких, как электронная температура и концентрация заряженных частиц.

Большим достоинством зондового метода является простота измерений, для которых обычно не требуется специальной сложной аппаратуры. Основным недостатком этого метода — возмущение плазмы зондом. Одно из основных положений зондовой теории — допущение о том, что эти возмущения в основном локализуются вблизи зонда, поэтому он мало влияет на состояние плазмы и на режим газового разряда в большей части объема. В связи с этим размеры зонда и ток, измеряемый зондом из плазмы, не должны приводить к значительным возмущениям плазмы.



1 – зонд Ленгмюра (внешняя часть); 2 – датчик давления; 3 – камера взаимодействия; 4 – электронная пушка; 5 – камера ППР с электромагнитными катушками; 6 – фланец мишенного устройства

Рисунок 2. Расположение зонда на камере взаимодействия

#### ВЫБОР И ПОДГОТОВКА МАТЕРИАЛА К ИССЛЕДОВАНИЮ

Основное требование к материалам дивертора заключается в стойкости к экстремально высоким тепловым и корпускулярным нагрузкам, от которой напрямую зависит работоспособность его компонентов. Из-за невысокой глубины проплавления, при типичных параметрах срыва, до 50–100 мкм [7, 8] вольфрам и молибден выглядят привлекательными для облицовки мишеней дивертора.

В качестве материалов исследования был выбран поликристаллический вольфрам марки СВИ-1, содержащий ~2% примесей [9], с учетом интереса к применению этой марки вольфрама в термоядерных системах, а также молибдена марки МЧ [10]. Химический состав вольфрама марки СВИ-1 и молибдена марки МЧ приведен в таблице 2.

Таблица 2. Химический состав вольфрама марки СВИ-1 и молибдена марки МЧ

Вольфрам									
Элемент	W	O <sub>2</sub>	Mo	Si	Ni	Al	Fe	Ca	
Содерж., %	не менее 97,623	1,5-2,3	0,040	0,010	0,005	0,005	0,007	0,010	
Молибден									
Элемент	Fe	C	Si	Ni	Mo	Al	Ca	Mg	O <sub>2</sub>
Содерж., %	0,01	0,005	0,01	0,005	не менее 99,96	0,004	0,003	0,002	0,008

Заготовки образцов для исследований в виде цилиндра диаметром 10 мм изготовили из прутков вольфрама СВИ-1 и молибдена МЧ. Вырезку образцов выполняли на электроискровом станке модели 4531 с использованием в качестве электрода латунной проволоки диаметром 0,3 мм. При этом образец не испытывает деформации и термического воздействия.

#### МЕТОДИКА МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ОБРАЗЦОВ ВОЛЬФРАМА И МОЛИБДЕНА

Как известно, металлографический анализ широко используется в промышленности для контроля структуры металла, полуфабрикатов и готовых изделий для обеспечения их качества [11]. Для исследования структуры исследуемых материалов применяли оптическую металлографию. Для металлографического анализа использовали оптический световой микроскоп OLIMPUS VX41M отдела материаловедческих исследований ИАЭ НЯЦ РК.

Для выявления микроструктуры вольфрама использовали химическое травление в растворе, содержащего 50% плавиковой кислоты и 50% азотной кислоты. Для химического травления молибдена использовался раствор, содержащий 70% ортофосфорной кислоты, 10% азотной кислоты, 10% уксусной кислоты, 10% воды.

Структуру и элементный состав образцов вольфрама и молибдена до и после облучения исследовали на растровом электронном микроскопе JSM-6390, с приставкой энергодисперсионного микроанализа.

Для исследования тонкой структуры поверхностного слоя использовали просвечивающий электронный микроскоп JEM-2100, находящийся в научной лаборатории инженерного профиля «Irgetas» ВКГТУ им. Д. Серикбаева. Исследования проводились методом дифракционной электронной микроскопии тонких фольг при ускоряющем напряжении 125 кВ. Рабочее увеличение в колонне микроскопа выбиралось от 10000 крат до 80000 крат.

Для приготовления фольги с целью исследования обработанной поверхности образцов электроискровым методом вырезали пластинки толщиной 0,2–0,3 мм. Полученные пластинки утоняли механическим способом путем шлифования и полирования.

Последующее утонение осуществляли по стандартной методике на установке GATAN Model 691 (PIPS – устройство для прецизионного травления) (JEOL, Япония) с использованием финишного распыления ионами Ag с энергией от 2 кэВ до 3 кэВ при скользящем угле падения от 5° до 10°.

Для идентификации фаз, присутствующих в материале, применяли микродифракционный анализ. Идентификацию фаз проводили по методикам, описанным в работах [11, 12]. Для этого использовали схемы микродифракционных картин, рассчитанные по табличным значениям параметров соответствующих кристаллических решеток. Для каждого исследуемого конкретного места на образце была просмотрена большая площадь фольги и отснято до 20–30 микроснимков и микродифракционных картин к ним.

#### **ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАЗМЕННО-ПУЧКОВОГО РАЗРЯДА И ВЫБОР РЕЖИМА ПЛАЗМЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ**

Были определены параметры плазмы с помощью ВАХ, полученные с использованием одиночного зонда Ленгмюра при различных режимах работы ППУ и в водородной рабочей среде. В качестве мишени использовалось вольфрам марки СВИ-1. В таблице 3 показаны результаты измерения параметров плазмы, полученные при мощности электронного пучка 1; 1,5; 2 и 2,5 кВт в среде водорода.

*Таблица 3. Значения параметров плазмы*

Мощность эл. пучка, кВт	Потенциал на мишени, В	Ионный ток насыщения, мА	Плавающий потенциал, В	Электронная температура, эВ	Концентрация ионов, 1/м <sup>3</sup>
1	0	6	-25	7,3	2,22·10 <sup>17</sup>
1	800	7	-25	7,3	2,59·10 <sup>17</sup>
1	1200	9	-28	8,18	3,14·10 <sup>17</sup>
1	1600	10	-18	5,25	4,35·10 <sup>17</sup>
1,5	0	7	-23	6,72	2,70·10 <sup>17</sup>
1,5	800	9	-15	4,38	4,29·10 <sup>17</sup>
1,5	1200	12,5	-16	4,68	5,77·10 <sup>17</sup>
1,5	1600	9	-19	5,55	8,05·10 <sup>17</sup>
2	0	5	-25	7,3	1,80·10 <sup>17</sup>
2	800	10	-25	7,3	3,69·10 <sup>17</sup>
2	1200	12,5	-24	7,01	4,71·10 <sup>17</sup>
2	1600	11	-25	7,3	4,06·10 <sup>17</sup>
2,5	0	5	-20	5,8	2,06·10 <sup>17</sup>
2,5	800	6	-18	5,26	2,61·10 <sup>17</sup>
2,5	1200	6	-17	4,97	2,69·10 <sup>17</sup>
2,5	1600	6	-15	4,28	2,86·10 <sup>17</sup>

Из таблицы 3 видно, что с увеличением ускоряющего потенциала на мишени увеличивается концентрация ионов при разных значениях мощности, т.е. концентрация ионов пропорционально растет с ростом ускоряющего потенциала, что вполне закономерно. Вместе с этим между мощностью и концент-

рацией ионов не наблюдается такой пропорциональной зависимости. Максимальная концентрация ионов наблюдается при мощности 1,5 кВт. Дальнейшее повышение мощности не приводит к увеличению концентрации ионов.

Таким образом, нами установлено что, оптимальным режимом работы ППУ для получения плазмы с высокой концентрацией ионов является режим, при котором мощность электронного пучка составляет 1,5 кВт и ускоряющее напряжение –1200 В.

#### **ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ ВОЛЬФРАМА И МОЛИБДЕНА В РЕЗУЛЬТАТЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПЛАЗМЕННОГО ПУЧКА**

Были проведены экспериментальные исследования влияния облучения водородной плазмой на микроструктуру вольфрама и молибдена. На рисунке 3 показаны металлографические снимки поверхности вольфрама до и после облучения водородной плазмой. Металлографический анализ показал, что облучение водородной плазмой при мощности электронного пучка 2 кВт не приводит к изменению микроструктуры поверхности вольфрама, а после облучения водородной плазмой при мощности электронного пучка 2,5 кВт с потенциалом мишени от 800 В до 1600 В наблюдается изменение микроструктуры поверхности вольфрама. Наблюдается уменьшение размера зерна, выявляются границы зерен за счет травления поверхности ионами водорода. Также наблюдаются мелкие дефекты структуры. При облучении без потенциала, подаваемого на мишень, не происходит значительного изменения структуры, что связано с низкой энергией бомбардирующих ионов плазмы.

С помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ) была исследована структура вольфрамовых образцов. На рисунке 4 показана микроструктура образца вольфрама после облучения водородной плазмой при мощности электронного пучка 2,5 кВт с потенциалом мишени 1200 и 1600 В. Видно, что на поверхности вольфрама наблюдаются распыленные участки, отсутствуют разрушения в виде трещин и наблюдаются следы эрозии. При этом происходит изменение ее рельефа, наблюдаются ямки травления, образующиеся за счет бомбардировки ионами водорода.

Это связано с тем, что при взаимодействии твердого тела и ускоренных ионов с энергией, превышающей энергию распыления, на поверхности твердого тела происходит ряд процессов упругого и неупругого взаимодействия. На границе раздела «газ – твердое тело» протекают химические реакции, приводящие к изменению физико-химических свойств относительно тонкого поверхностного слоя массивного тела, т.е. происходит модификация структуры и соответственно свойств поверхности. Вследствие упругих и неупругих взаимодействий иона с энергией, превышающей энергию распыления, происходит распыление атомов. А после облучения при потен-

циале 1600 В наблюдается сглаженная поверхность с микродефектами. Это все, возможно, связано с тем, что повышение ускоряющего потенциала от 1200 В до 1600 В приводит к уменьшению процесса распыления и увеличению внедрения ионов. Так как при высоких уровнях энергии над процессом распыления начинает преобладать глубинное проникновение ионов – ионная имплантация и объемные нарушения, т.е. усиление дефектообразования. Процесс дефектообразования начинается при энергиях около 50 эВ и сопровождается процессом распыления.

На рисунке 5 приведены РЭМ-изображения образцов вольфрама, облученных в режиме при мощности электронного пучка 2,5 кВт и ускоряющем потенциале 1200 В и 1600 В. Изображения получены при больших увеличениях.

Топография облученной поверхности свидетельствует о ее сильной эрозии. Видно, что в результате облучения вольфрама стационарной плазмой в теле зерна образуются ямки травления размером от 100

нм до 500 нм, как результат распыления поверхности, вызываемое ионной бомбардировкой. Помимо этого в объеме вольфрама создаются микротрещины и мелкие поры. В частности, при облучении при ускоряющем потенциале 1600 В создаются большое количество мелких пор размером от 0,2 мкм до 1,0 мкм. Система трещин и пор создает транспортный путь между поверхностью и объемом материала, поэтому можно ожидать глубокое проникновение ионов в объем металла. Причиной появления этих структурных нарушений, по-видимому, являются механические напряжения в решетке вольфрама, вызванные имплантированным водородом.

С целью изучения изменения элементного состава поверхности вольфрама после облучения плазменным пучком был проведен рентгеноспектральный микроанализ поверхности с помощью электронного растрового микроскопа. Результаты рентгеноспектрального микроанализа показаны на рисунке 6.

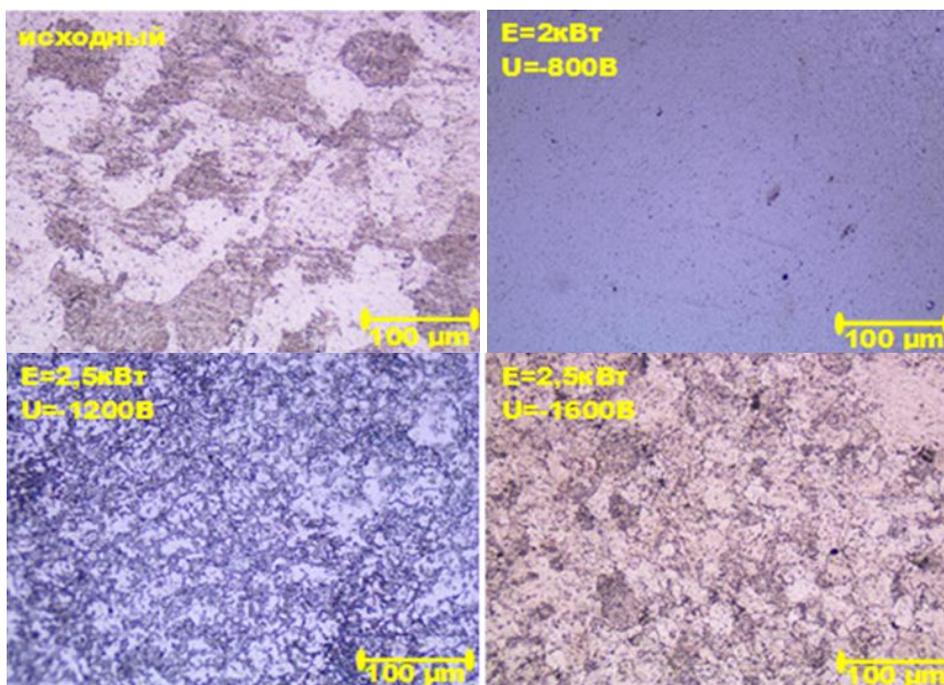


Рисунок 3. Микроструктура исходной поверхности образца вольфрама и после облучения водородной плазмой

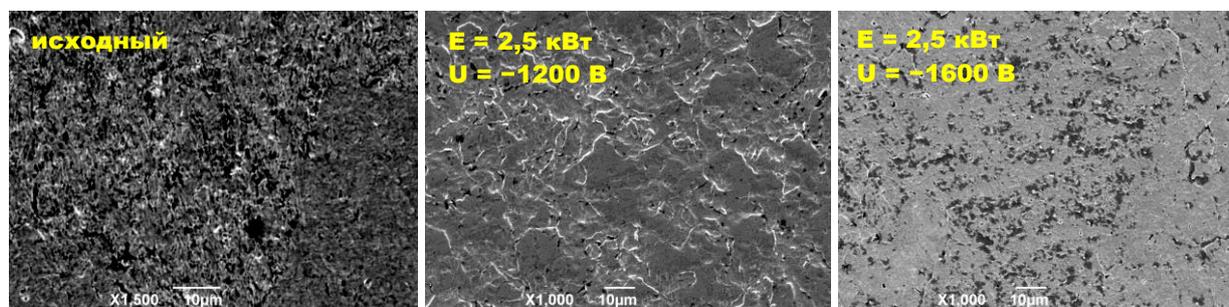


Рисунок 4. РЭМ-изображения исходной поверхности образца вольфрама и после облучения плазменным пучком в среде водорода при ускоряющем потенциале 1200 В и 1600 В

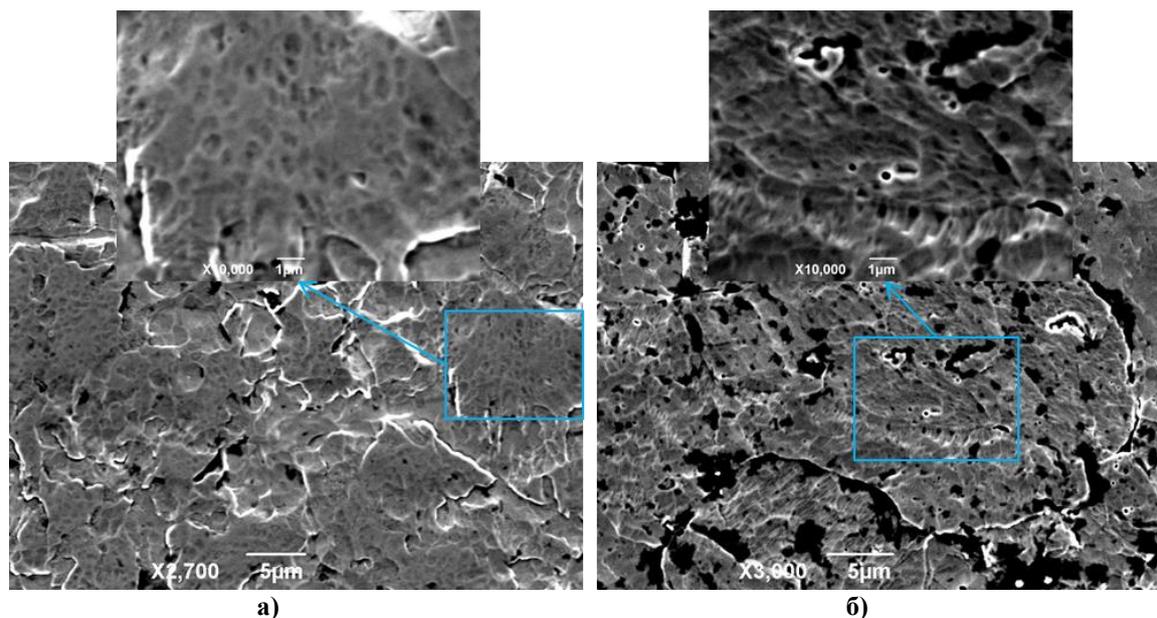


Рисунок 5. РЭМ-изображения поверхности образцов вольфрама после облучения плазменным пучком в среде водорода при ускоряющем потенциале 1200 В (а) и 1600 В (б)

Анализ показал, что в составе вольфрама в исходном состоянии и после облучения, помимо вольфрама наблюдается углерод, массовая доля которой составляет от 8% до 60%. Такое сравнительно большое количество углерода, видимо, связано с тем, что в камере микроскопа находился остаточный газ. При облучении водородной плазмой на поверхности накапливается водород, однако, рентгеноспектральным микроанализом не удастся определить легкие элементы с порядковым номером меньше 4. Из рисунка, также видны характерные признаки, отличающие облученную поверхность: присутствие на ней темных пятен микронного масштаба. Анализ структуры этих пятен показывает, что они представляют собой ямки, обогащенные углеродом, образующиеся в результате воздействия плазмы (рисунок 6).

На рисунке 7 показаны микроструктура молибдена до и после облучения водородной плазмой при энергии первичного пучка 2,5 кВт без потенциала и с потенциалом на мишень 1600 В. Металлографический анализ показал, что после облучения водородной плазмой не наблюдается значимые изменения микроструктуры поверхности молибдена. Для того чтобы подтвердить результаты металлографического анализа были проведены исследования микроструктуры молибдена с помощью растрового электронного микроскопа.

На рисунке 8 представлены РЭМ-изображения поверхности молибдена до и после облучения водородной плазмой при энергии первичного пучка 2,5 кВт с потенциалом на мишень 1600 В. Видно, что после облучения водородной плазмой на поверхности наблюдаются распыленные участки – ямки травления, поры.

На рисунке 9 представлены результаты рентгеноспектрального микроанализа. Анализ показал, что в составе молибдена до и после облучения не обнаружено примеси кроме углерода, так как, рентгеноспектральным микроанализом невозможно определить присутствие водорода. Присутствие углерода связано с тем, что в камере микроскопа находился остаточный газ. Тем не менее, в облученных образцах содержание углерода больше чем в исходных.

Тонкая структура вольфрама, наблюдаемая методом просвечивающей электронной микроскопии, представлена на рисунке 10. Хорошо видно, что после облучения структура вольфрама более фрагментирована и характеризуется дефектной субструктурой. Образующаяся дефектность, по-видимому, приближается к дефектности границ зерен. Возможность формирования такой субструктуры зерен при электронно-лучевой обработке обеспечивается повышенным энергетическим состоянием поверхности и подповерхностных слоев, подвергаемых на всем протяжении обработки бомбардировке ионами и нейтральными атомами низкотемпературной плазмы.

На рисунке 11 показаны электронно-микроскопические изображения тонкой структуры молибдена до и после облучения гелиевой и водородной плазмой. Обнаружено, что после облучения в поверхностном слое молибдена наблюдается фрагментированная субструктура. На границе зерен наблюдаются мелкие дефекты.

Таким образом, электронно-микроскопическим методом подтверждено образование дефектной субструктуры после облучения плазменным пучком вольфрама и молибдена.

**ВЛИЯНИЕ ПЛАЗМЫ НА ВОЛЬФРАМ И МОЛИБДЕН КАК НА КАНДИДАТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ  
ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА**

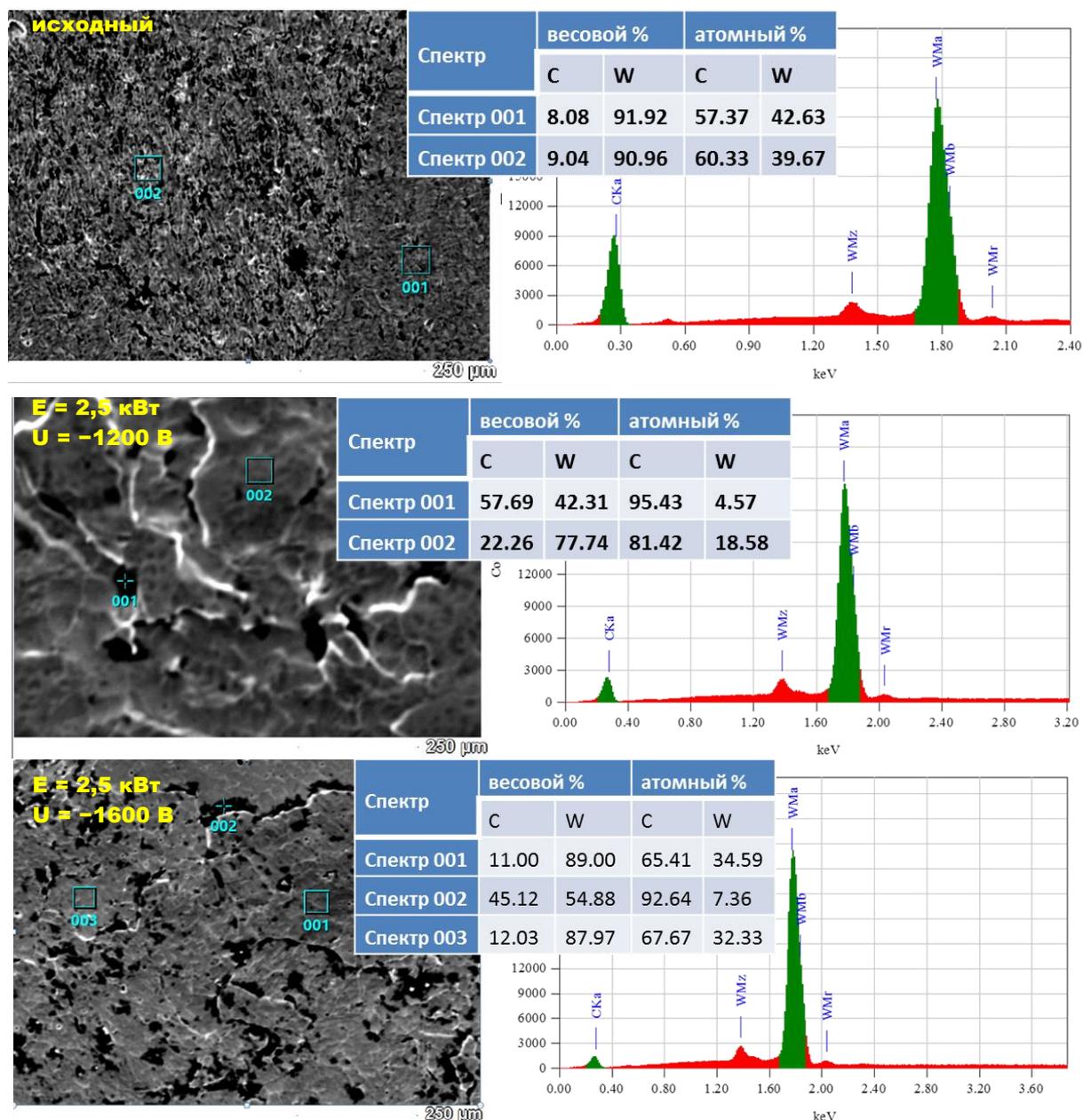


Рисунок 6. Результаты рентгеноспектрального микроанализа исходной поверхности образца вольфрама и после облучения водородной плазмой

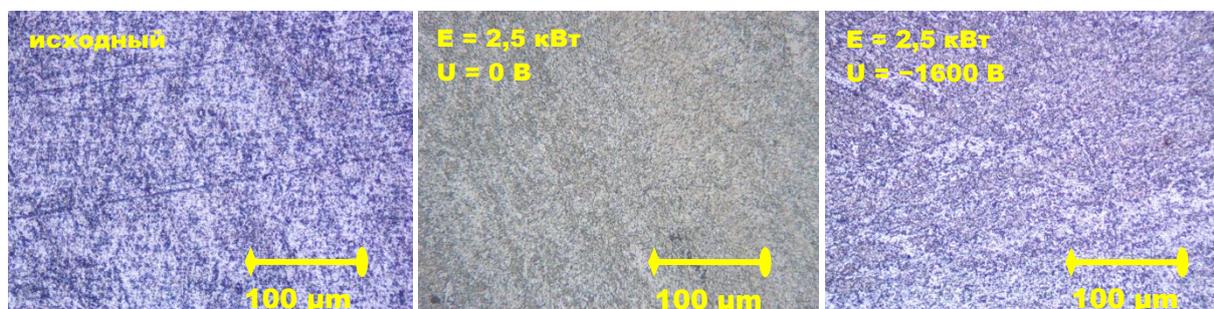


Рисунок 7. Микроструктура исходной поверхности образца молибдена и после облучения водородной плазмой

**ВЛИЯНИЕ ПЛАЗМЫ НА ВОЛЬФРАМ И МОЛИБДЕН КАК НА КАНДИДАТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ  
ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА**

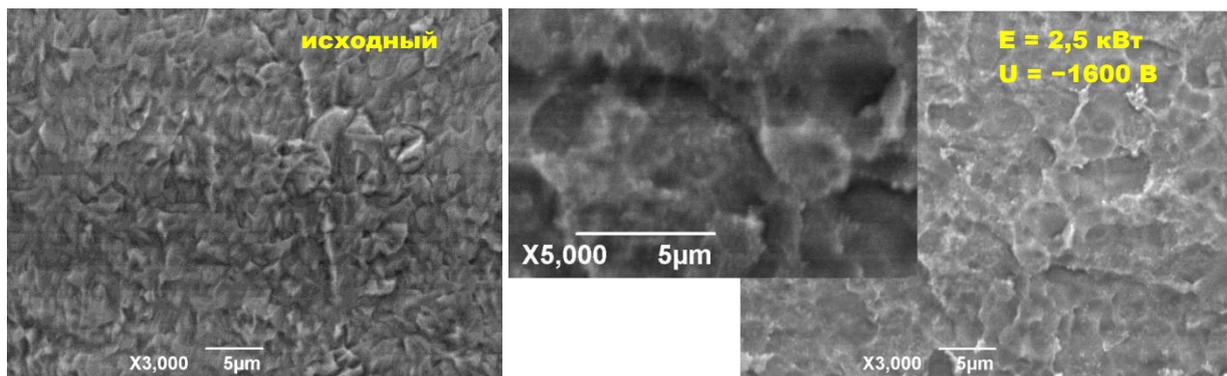


Рисунок 8. РЭМ-изображения исходной поверхности образца молибдена и после облучения плазменным пучком в среде водорода при ускоряющем потенциале 1600 В

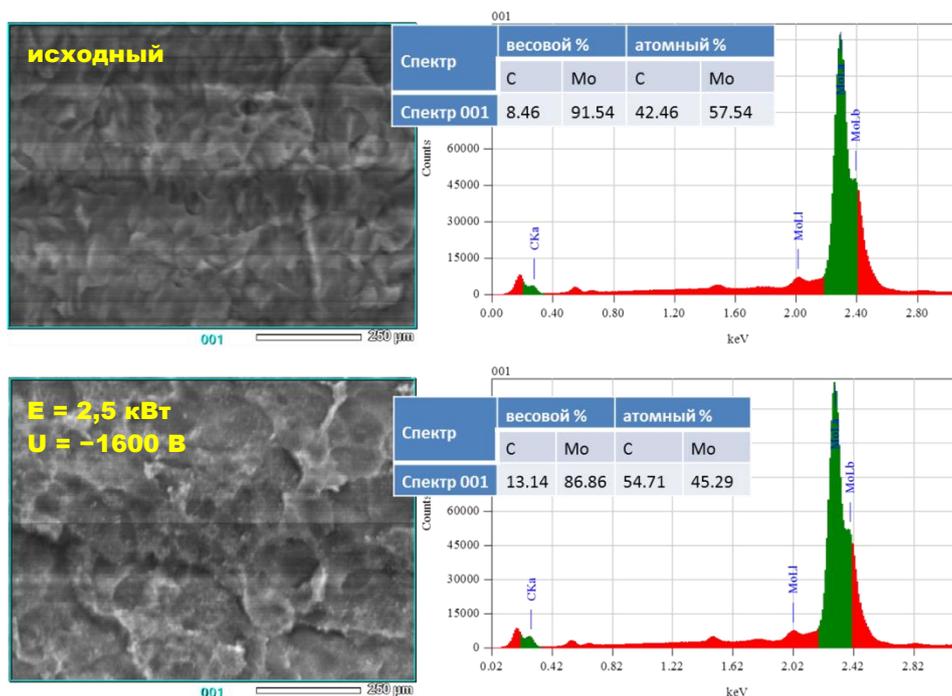


Рисунок 9. Результаты рентгеноспектрального микроанализа исходной поверхности образца молибдена и после облучения водородной плазмой при ускоряющем потенциале 1600 В

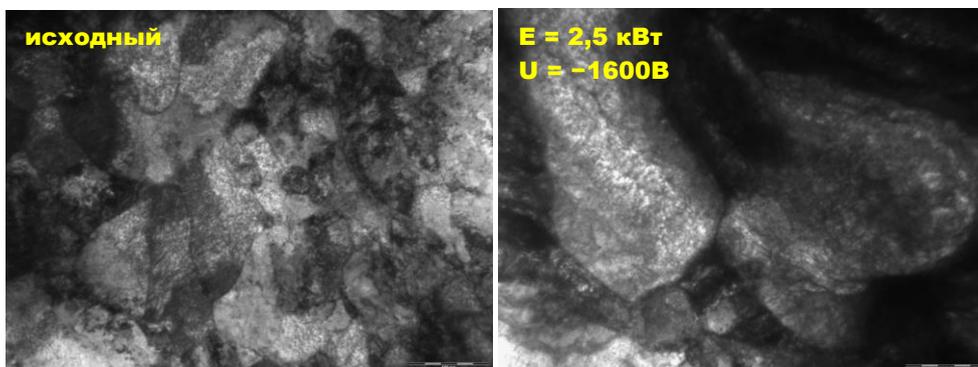


Рисунок 10. Электронно-микроскопические изображения тонкой структуры исходной поверхности вольфрама и после облучения гелиевой плазмой при энергии первичного пучка 2,5 кВт и ускоряющем потенциале 1600 В

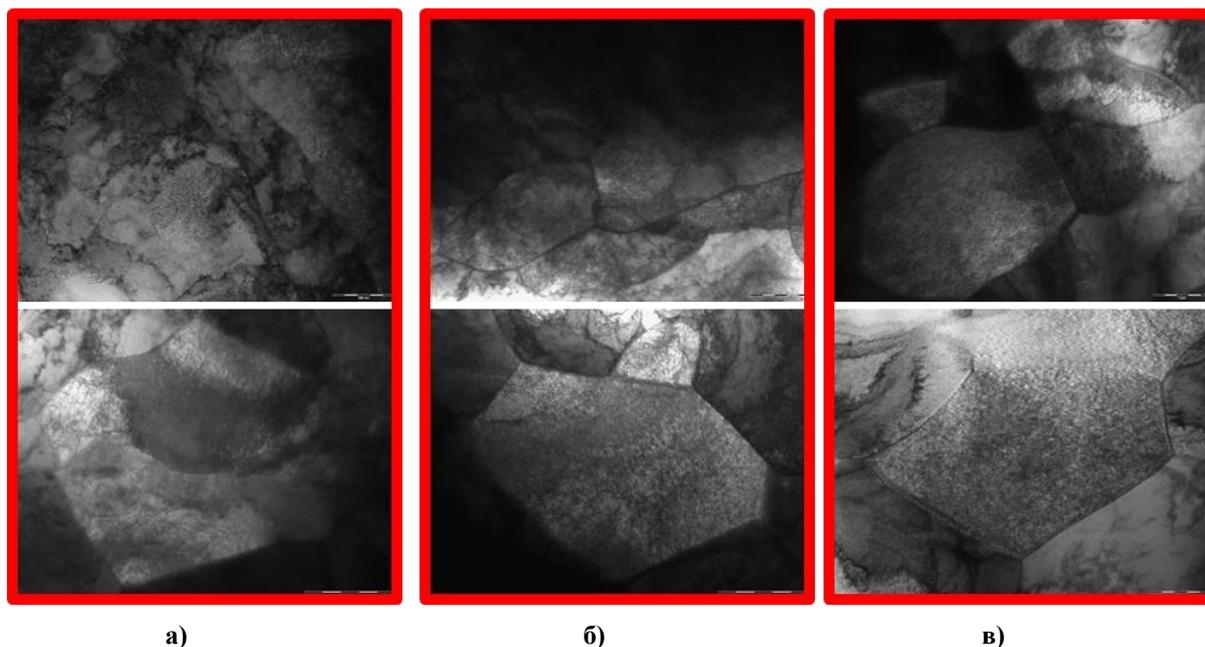


Рисунок 11. Электронно-микроскопические изображения тонкой структуры молибдена до (а) и после облучения гелиевой (б) и водородной (в) плазмой при энергии первичного пучка 2,5 кВт и ускоряющем потенциале 1600 В

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализируя полученные в работе результаты, можно сделать следующие выводы:

1) Исследованы характеристики плазменно-пучкового разряда в среде водорода, гелия и дейтерия. Параметры плазмы определены с помощью ВАХ, полученные с использованием одиночного зонда Ленгмюра. Установлено, что оптимальным режимом, при котором концентрация ионов равна  $5,84 \cdot 10^{17} \text{ 1/м}^3$ , является режим при мощности электронного пучка 1,5 кВт и ускоряющем напряжением -1200 В. Полученные результаты показали, что концентрация ионов не значительно зависит от материала и от состава рабочей среды;

2) Металлографическим анализом определено, что при облучении водородной плазмой с мощностью электронного пучка 2,5 кВт и при потенциале на мишени -1200 В с концентрацией ионов  $5 \cdot 10^{17} \text{ 1/м}^3$ , наблюдается уменьшение размеров зерен, выявляются границы зерна за счет травления поверхности ионами водорода, а также наблюдаются мелкие дефекты. Электронно-микроскопический анализ показал, что происходит изменение рельефа поверхности и на поверхности наблюдается эрозия, образующаяся за счет распыления. Обнаружено, что в результате облучения вольфрама стационарной плазмой в теле зерна образуются ямки травления размером от 100 нм до 500 нм, как результат вытравливания поверхности. Помимо этого, в объеме вольфрама создаются микротрещины и поры. В частности, при облучении при ускоряющем потенциале 1600 В формируется большое количество мелких пор размером от 0,2 мкм до 1,0 мкм. Выявлено, что после облучения структура вольфрама более фрагментирована и характеризуется

более развитой дефектной субструктурой. Образующаяся дефектность, по-видимому, приближается к дефектности границ зерен. Причиной появления этих структурных нарушений, по-видимому, являются механические напряжения в решетке вольфрама;

3) Изучено изменение структуры молибдена в результате облучения водородной и гелиевой плазмой. Облучение осуществлялось при мощности электронного пучка 2,5 кВт с потенциалом на мишень 1600 В. Обнаружено, что после облучения водородной и гелиевой плазмой в поверхностном слое молибдена формируется фрагментированная субструктура. На границе зерен наблюдаются мелкие дефекты.

Основные результаты, полученные в ходе реализации первого этапа календарного плана настоящей работы, доложены на следующих профильных научных международных конференциях: XVIII конференция «Взаимодействие плазмы с поверхностью», Москва, август 2015; XXII Международная конференция «Взаимодействие ионов с поверхностью», Москва, август 2015; X Международная конференция «Ядерная и радиационная физика» NRP-2015, Курчатов, сентябрь 2015.

Опубликована одна статья в высокорейтинговом журнале «Journal of Nuclear Materials» август 2015. Основные результаты также доложены и обсуждены на научном семинаре ИАЭ НЯЦ РК и рекомендованы к публикации в высокорейтинговом журнале «Materials testing» (ИФ 1,199 по базе Thomson Reuters).

*Работа выполнена при грантовой финансовой поддержке Комитета науки МОН РК.*

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Стенд имитационных испытаний в сопровождение исследований на токамаке КТМ (СИИ-КТМ): итоговый отчет: 85-3-021-129: Ч.1. – М. : МИФИ, 2005. – 46 с.
2. The numerical code TOKSCEN for modelling plasma evolution in tokamaks / D.Yu. Suchugov, G.V. Shapovalov, V.Zh. Chektybaev, M.K. Skakov, N.A. Gasilov, A.D. Sadykov [et al.] // Nuclear Fusion. – 2015.
3. Стенд имитационных испытаний: схема пневмогидравлическая принципиальная / ДГП ИАЭ РГП НЯЦ РК. – Курчатов. – 2005. – 1 с.– Инв. №К-44114.
4. Электрический зонд в плазме / О.В. Козлов.– М.: Атомиздат, 1969.
5. Зондовые методы исследования плазмы: лабораторная работа / Составители: В.А. Сеченов, Э.Е. Сон.– М.: 2002.
6. Измерение параметров плазмы методом электрического зонда: лабораторная работа / В.Д. Матюхин.– М.: МИФИ, 2005.– 6 с.
7. Assessment of erosion and tritium codeposition in ITER-FEAT / G. Federici, J.N. Brooks, D.P. Coster [et al.] // J. Nucl. Mater. – 2001. – Vol. 290-293. – P. 260–265.
8. Key issues in plasma-wall interactions for ITER: European approach / V. Philipps, J. Roth, A. Loarte // Plasma Physics and Controlled Fusion. – 2003. – Vol. 45. – P. 17–30.
9. ГОСТ 23949-80. Электроды вольфрамовые сварочные неплавящиеся. ТУ.– М., 1981.
10. ГОСТ 25442-82. Полосы молибденовые для глубокой вытяжки. ТУ.– М., 1981.
11. Утевский, Л.М. Дифракционная электронная микроскопия в металловедении.– М.: Металлургия, 1973.– 584 с.
12. Электронограммы и их интерпретация / К. Эндрус, Д. Дайсон, С. Киоун.– М.: Мир, 1971–256 с.
13. Салтыков, С.А. Стереометрическая металлография.– М.: Металлургия, 1976. – 190 с.

#### **ТЕРМОЯДРОЛЫҚ РЕАКТОРДЫҢ КАНДИДАТТЫ МАТЕРИАЛДАРЫ СИЯҚТЫ ВОЛЬФРАМ МЕН МОЛИБДЕННИҢ ПЛАЗМАҒА ӘСЕРІ**

**Т.Р. Туленбергенов, М.К. Скаков, Б.К. Рахадиллов, И.А. Соколов**

*ҚР ҰЯО «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов қаласы, Қазақстан*

Мақалада плазмашоқты қондырғысы бар еліктеуіш стендінде ТЯР диверторының кандидатты материалдарымен бірге гелилік, дейтерилік және сутегілік өзара әсерін тәжірибелік зерттеу нәтижесі берілген. Плазма-шоқты қондырғыға плазмалық әсердің режимі кезінде токамак плазмасының неғұрлым жақын сипаттарын қамтамасыз ететін Плазма-шоқты разрядтың сутегі ортадағы сипаттары зерттелді. Вольфрам, молибден үлгілерінің элементтік құрамын және олардың физико-механикалық құрылысын анықтау, құрылымын зерттеу үшін, сондай-ақ материалдардың сәулелену қабаттарының бұзу сипаттарын зерттеу үшін рентгенді құрылымының фазалық талдау әдісі, сәуле түсіруші электронды микроскоп, сканерлеуші электронды микроскоп, опико-эмиссиялық спектроскопия әдістері қолданылды.

#### **INFLUENCE OF PLASMA ON TUNGSTEN AND MOLIBDENUM AS CANDIDATE MATERIALS FOR FUSION REACTOR**

**T.R. Tulenbergenov, M.K. Skakov, B.K. Rakhadilov, I.A. Sokolov**

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

The paper presents the results of experimental studies of helium, deuterium and hydrogen plasma interaction with candidate materials of thermonuclear reactor's diverter in simulation test bench with plasma beam installation. The characteristics of beam-plasma discharge in hydrogen are studied, wherein the modes of plasma impact in plasma beam installation provide more approximate characteristics of Tokamak's plasma. To study the structure and to determine tungsten and molybdenum samples ultimate composition and their physical mechanical properties and also in order to study the fracture mode of irradiated layer materials the following methods were used: X-ray phase analysis, transmission electron microscopy, scanning electron microscopy and emission spectroscopy.

УДК 621.039.5

## РАСЧЕТ ИНДУКЦИОННОГО РАЗОГРЕВА ШИХТЫ В ЭЛЕКТРОПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ УСТАНОВКИ «ЛАВА-Б»

Хажидинов А.С., Гановичев Д.А., Акаев А.С.

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

Работа заключалась в разработке и валидации сопряженной теплофизической модели разогрева и плавления шихты в электроплавильной печи (ЭПП) установки «Лава-Б». Использование теплофизической расчетной модели ЭПП позволяет разработать диаграмму нагрева и плавления шихты в ЭПП перед проведением экспериментов по исследованию взаимодействия расплава с кандидатными жаростойкими материалами, которые могут быть использованы в системах локализации расплавленного топлива активной зоны ядерного реактора в случае тяжелой аварии. Использование диаграммы нагрева и плавления шихты в ЭПП увеличивает вероятность успешного проведения дорогостоящего эксперимента.

### ВВЕДЕНИЕ

В филиале «Институт атомной энергии» НЯЦ РК на установке «Лава-Б» проводятся эксперименты по исследованию взаимодействия кориума с жаростойкими материалами, которые могут быть использованы для защитного покрытия в системах локализации расплава активной зоны ядерного реактора нового поколения.

Разогрев и плавление шихты осуществляется индукционным нагревом в ЭПП, полученный кориум сливается в устройство приема расплава (УПР). После слива расплава в УПР, кориум попадает в бетонную ловушку, внутренняя полость которой облицована огнеупорными блоками. Внутри полости из огнеупорных блоков установлены плазматроны, имитирующие остаточное энерговыделение в расплаве.

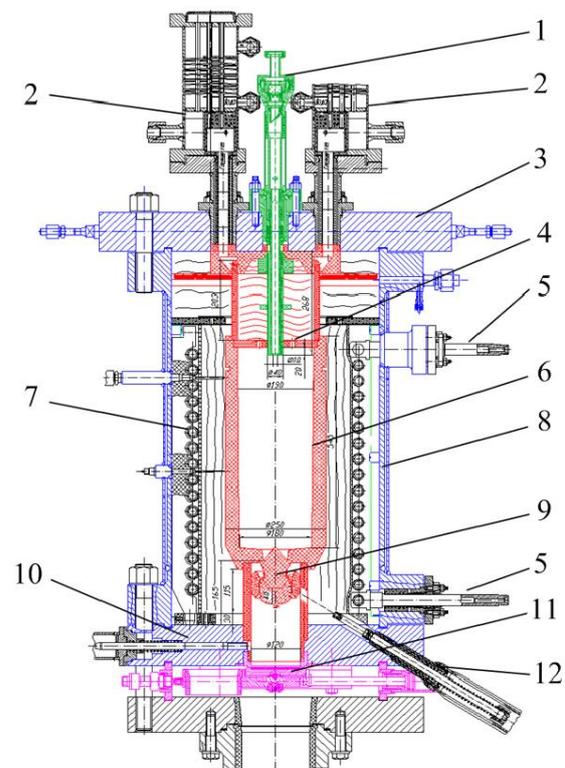
Для получения высокотемпературного кориума в ЭПП перед проведением эксперимента необходимо разработать диаграмму нагрева и плавления шихты. Диаграмма нагрева и плавления шихты должна обеспечивать выполнение следующих условий: равномерный нагрев шихты в сжатые сроки, минимизация времени контакта шихты со стенками графитового тигля на этапе разогрева и плавления шихты, при котором начинается химическая реакция взаимодействия оксидных компонентов шихты с графитом. Минимизация времени протекания химической реакции необходима для исключения выхода расплава в корпус ЭПП через крышку графитового тигля. Таким образом, определение диаграммы нагрева и плавления шихты с помощью разработанной теплофизической модели ЭПП позволяет повысить вероятность успешного проведения дорогостоящего эксперимента на установке «Лава-Б».

### ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Конструктивно установка состоит из двух основных узлов: электрической плавильной печи (рисунок 1) и устройства приема расплава.

ЭПП, индукционного типа, предназначена для плавления шихты различных композиций, состоящей из тугоплавких материалов, и слива расплава в экспериментальную секцию (ловушку расплава)

УПР. ЭПП имеет «классическую» схему компоновки печей с «горячим» тиглем и с цилиндрическим многовитковым индуктором.



1 - узел визирования пирометра; 2 - теплообменник; 3, 10 - медные фланцы; 4 - крышка тигля; 5 - токоввод; 6 - тигель; 7 - индуктор; 8 - корпус ЭПП; 9 - пробка тигля; 11 - затвор; 12 - механизм разрушения пробки

Рисунок 1. Конструктивная схема ЭПП

Основными узлами и элементами ЭПП являются: корпус плавильной печи; узел отвода отходящих газов; водоохлаждаемый индуктор; собственно плавильная камера - графитовый тигель; пакет теплоизоляции; устройство для разрушения пробки тигля, закрывающей сливное отверстие; шибберный затвор, перекрывающий сливной канал между ЭПП и УПР установки.

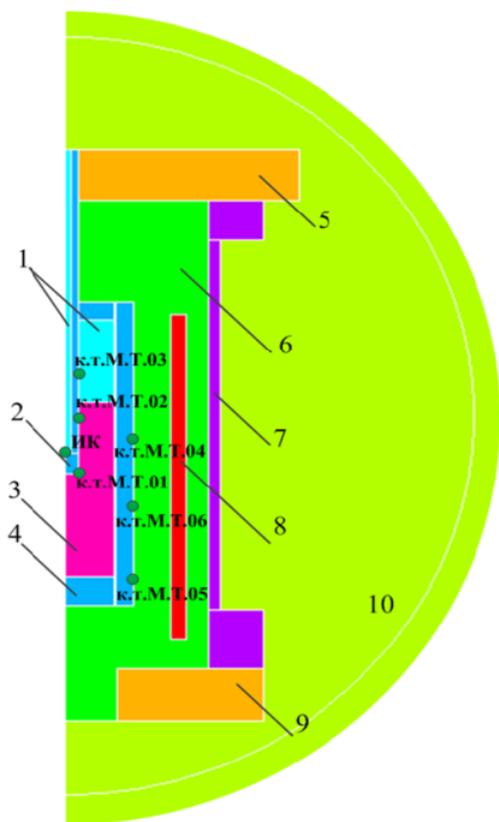
**РАСЧЕТ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ МОДЕЛИ**

**Исходные данные и условия расчета**

Начальная температура шихты принята равной 20 °С, масса шихты составляет 47 кг. Материальный состав кориума: массовая доля Zr – 0,325; массовая доля ZrO<sub>2</sub> – 0,035; массовая доля UO<sub>2</sub> – 0,638.

Теплофизические и электромагнитные свойства материалов взяты из справочной литературы [1, 2].

Индукционный разогрев шихты смоделирован комплексом расчетных программ. Расчетная модель приведена на рисунке 2.



1 – аргон; 2 – термовелл; 3 – шихта; 4 – графитовый тигель; 5 – медная крышка; 6 – теплоизоляция; 7 – стальной корпус; 8 – индуктор; 9 – днище (медь); 10 – окружающий воздух

Рисунок 2. Расчетная модель ЭПП

На этом же рисунке показано расположение контрольных точек (к.т.) для измерения температуры: к.т. М.Т.01, к.т. М.Т.02, к.т. М.Т.03, к.т. М.Т.04, к.т. М.Т.05, к.т. М.Т.06 и ИК-датчик температуры.

На рисунке 3 приведена конечно-элементная сетка расчетной модели. Рассматриваемая модель осесимметрична.

В расчетной модели учтены следующие процессы: теплообмен теплопроводностью, лучистый теплообмен, индукционный разогрев тигля, утечки теп-

ла через систему охлаждения ЭПП, пористость шихты до момента начала плавления, скин эффект.

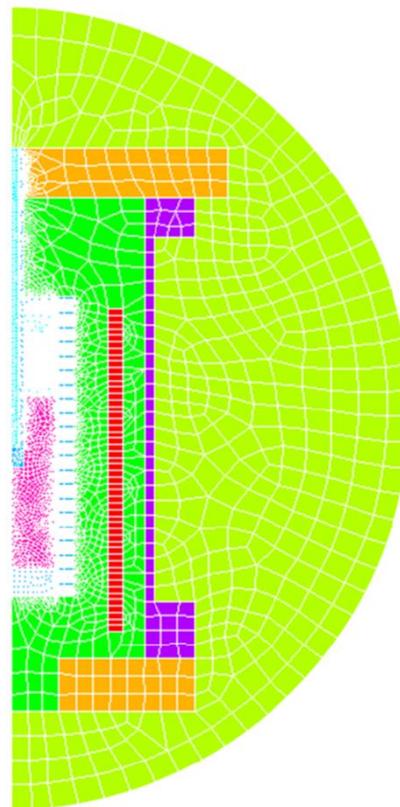


Рисунок 3. Конечно-элементная сетка расчетной модели

**РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА**

На рисунке 4 приведено сравнение расчетных и экспериментальных значений температуры в контрольных точках.

Из графика, приведенного на рисунке 4, видно, что расчетные значения температуры наружной поверхности графитового тигля в точках расположения термопар М.Т.04, М.Т.05 и М.Т.06 отличаются от экспериментальных значений, зарегистрированных в этих же точках, в среднем на 5,73%, 7,54% и 7,26%, соответственно.

Относительное отклонение расчетных значений температуры шихты внутри тигля от экспериментальных значений температуры в к.т. М.Т.01, к.т. М.Т.02 и к.т. М.Т.03 составляет в среднем 9,25%, 3,13% и 6,93% соответственно.

Максимальное экспериментальное значение температуры по показаниям ИК-датчика температуры составляет 2509 °С, что превышает максимальное расчетное значение на 63 °С (2,5%). Экспериментальные значения температуры по показаниям ИК-датчика отличаются от расчетных значений в среднем на 8,62%.

## РАСЧЕТ ИНДУКЦИОННОГО РАЗОГРЕВА ШИХТЫ В ЭЛЕКТРОПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ УСТАНОВКИ «ЛАВА-Б»

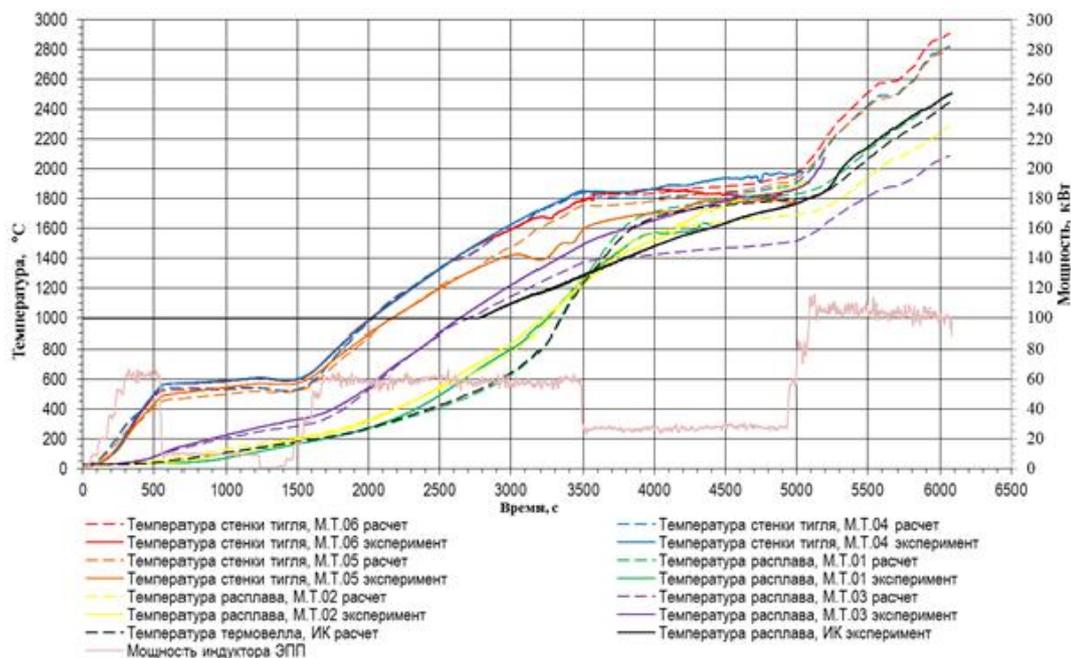


Рисунок 4. Экспериментальные и расчетные значения температуры

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работ по данной теме получены следующие результаты:

- Создана модель индукционного разогрева и плавления шихты в графитовом тигле ЭПП установки «Лава-Б».
- Проведена валидация разработанной теплофизической модели, отклонения расчетных значений температуры от экспериментальных значений составляет не больше 10%.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. – М: Энергия, 1977. – 336 с.
2. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники. – М.: Атомиздат, 1968. – 474 с.

## «ЛАВА-Б» ҚОНДЫРҒЫСЫНЫҢ ЭЛЕКТРМЕН БАЛҚЫТУ ПЕШІНДЕ ШИХТАНЫ ИНДУКЦИЯЛЫҚ ҚЫЗДЫРУ ЕЕСЕБІ

А.С. Хажидинов, Д.А. Гановичев, А.С. Ақаев

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

Жұмыс «Лава-Б» қондырғысының электрмен балқыту пешінде (ЭБП) шихтаны балқыту және қыздырудың түйіндескен жылу физикалық моделін валидациялау және жетілдіруден тұрады. ЭБП жылуфизикалық есептік моделін пайдалану, ядролық реакторының активті зонасының балқыған отынын локализациялау жүйелерінде ауыр апаттар кезінде пайдалануға болатын, кандидатты ыстыққа тұрақты материалдары бар балқытпаның өзара әрекетін зерттеу бойынша тәжірибелерді жүргізу алдында ЭБП шихтаның балқуы мен қызу диаграммасын өңдеуге мүмкіндік береді. ЭБП шихтаның балқуы мен қызу диаграммасын пайдалану қымбат бағалы тәжірибені жетістікпен жүргізу мүмкіндігін арттырады.

**COMPUTATION OF BURDEN INDUCTIVE HEATING IN THE ELECTRIC MELTING FURNACE  
OF LAVA-B FACILITY**

**A.S. Khazhidinov, D.A. Ganovichev, A.S. Akayev**

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

The idea beyond of this work is to develop and validate conjugated thermophysical model of burden heating and melting in the electric melting furnace (EMF) of LAVA-B facility. The use of thermophysical computational model of the EMF makes possible to develop the diagram of burden heating and melting in EMF before the experiment on study of melt interaction with candidate heat-resisting material, which can be used in the systems of the nuclear reactor core melted fuel location in the case of severe accident. The use of burden heating and melting diagram in the EMF enhances the possibility to carry out expensive experiment successfully.

УДК 550.344

## ОЧАГ И ПОСЛЕДСТВИЯ СИЛЬНЕЙШЕГО ГИНДУКУШСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 26 ОКТЯБРЯ 2015 г. ( $M_w=7.5$ )

Мусрепов А.В., Соколов А.Н.

*Институт геофизических исследований, Курчатов, Казахстан*

26 октября 2015 г. в районе Гиндукуша произошло катастрофическое землетрясение с  $M_w=7.5$ . Динамика разрыва в очаге была сложной, выявлено два последовательных толчка с разницей в  $\sim 10$  сек, у первого  $M=5.9$ , второй характеризовался максимумом высвобожденной сейсмической энергии с  $M_w=7.5$ . В работе рассмотрены особенности волновой картины землетрясения по данным сети ИГИ РК, проведено сопоставление с результатами обработки международных и региональных сейсмологических Центров. Рассмотрены характеристики сейсмичности района Гиндукуша по данным глобальных сетей сейсмических станций начиная с 1973 г. Исследованы закономерности афтершоковой деятельности. Проанализированы записи сильных движений по данным Казахстанских и Центральноазиатских станций.

### ВВЕДЕНИЕ

Уникальная зона глубокофокусной сейсмичности в районе Гиндукуша является одним из самых сейсмически активных районов Центральной Азии. За последние 20 лет здесь произошло несколько разрушительных землетрясений, сопровождавшимся большим количеством жертв. Так 4 февраля 1998 года здесь произошло землетрясение с  $m_b=5.9$ , унёсшее жизни 2323 человек, после землетрясения 30 мая 1998 с  $m_b=6.6$  погибли  $\sim 4000$  человек, а 25 марта 2002 г. погибли  $\sim 1000$  человек [1]. Сильнейшие землетрясения Гиндукуша ощущаются на большой территории Центральной Азии, в том числе на юге и юго-востоке Казахстана. Кроме того, выявлена тенденция группировки во времени сильнейших землетрясений с  $M \geq 7.0$ . В частности, установлено, что после сильнейших глубокофокусных гиндукушских землетрясений в течение периода от 2х недель до 4.5 месяцев нередко происходят сильные коровые события с  $M \geq 7.0$  в регионе Центральной и Южной Азии [2, 3]. Всего произошло 10 таких пар землетрясений, начиная с 1900 года. Помимо появления пар сильных событий, имеются также случаи группирования сильных землетрясений Гиндукуша, Алтая ( $M \geq 6.9$ ) и Северного Тянь-Шаня ( $M \geq 6.0$ ) [4]. В связи с этим, изучение характеристик сейсмичности Гиндукуша имеет большое значение для изучения сейсмической опасности Центральной Азии, а также в целях среднесрочного прогноза сильных коровых землетрясений. 26 октября 2015 г. в районе Гиндукуша произошло катастрофическое землетрясение с  $M_w=7.5$ , параметры очага и последствия землетрясения являются предметом изучения этой работы.

### ИСТОРИЧЕСКАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ ГИНДУКУША

Гиндукуш относится к складчатым горам и возник вследствие коллизии Индийской плиты и Евразии. Изучение тектонического строения и геодинамических процессов Гиндукушской зоны глубокофокусной сейсмичности привлекает внимание большого количества исследователей во всем мире [5–9]. Согласно [5] граница Мохо для исследуемой терри-

тории расположена на глубинах  $70 \pm 5$  км. Большинство землетрясений в районе Гиндукуша расположено в диапазоне глубин от 70 до 300 км. В таблице 1 представлены данные о землетрясениях с  $M \geq 7.0$ , произошедших с начала XX-го века [9]. С 1965 по 2002 гг. сильные землетрясения происходили регулярно с периодичностью 9 лет, потом в течение 13 лет землетрясений с магнитудой более 7 в рассматриваемом районе не было [9].

Таблица 1. Параметры землетрясений с  $M \geq 7.0$  с 1900 г. из [6]

Год	Мес.	День	Широта	Долгота	h	M
1902	8	30	37.0	71.0	200	7.7
1908	10	23	36.5	70.5	220	7.6
1909	7	7	36.5	69.0	230	8.1
1911	7	4	36.5	70.5	160	7.6
1921	11	15	36.5	70.5	215	8.1
1922	12	06	36.5	70.5	230	7.5
1929	2	1	36.5	70.5	220	7.1
1949	3	4	36.6	70.6	300	7.7
1965	3	14	36.6	70.8	215	7.8
1974	7	30	36.35	70.76	211	7.4
1983	12	30	36.37	70.74	214	7.2
1993	8	9	36.38	70.87	214	7.0
2002	3	3	36.50	70.48	225	7.4
2015	10	26	36.463	70.712	231	7.5

Для исследований характеристик сейсмичности Гиндукуша был использован каталог NEIC Геологической службы США (USGS) [1], начиная с 1973 г., когда глубины определялись с относительно высокой точностью, до 1 апреля 2016 г. На рисунке 1 приведён нормированный к 1 году график повторяемости землетрясений. Из него можно сделать вывод о представительной регистрации землетрясений в этом районе, начиная с  $M = 4.25$ . Соотношение (1) описывает закон повторяемости землетрясений рассматриваемого района, который характеризуется большим углом наклона  $\gamma = -0.93$ .

$$\lg N^* = -0.928 M + 5.814 \quad (1)$$

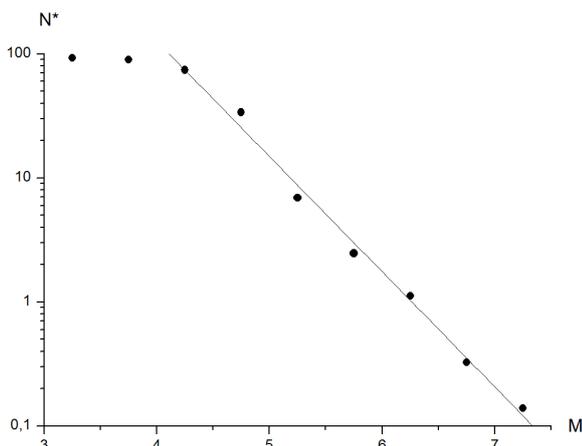


Рисунок 1. График повторяемости землетрясений

На рисунке 2 приведены карты распределения эпицентров землетрясений в зависимости от магнитуд и глубин. Наиболее сильные землетрясения сосредоточены ближе к центру района, чуть смещены на запад, на глубинах ~180–230 км (рисунок 2 в, г). Наибольшее количество мелких событий расположены на окраине зоны и имеют магнитуды менее 6 (рисунок 2 а, б).

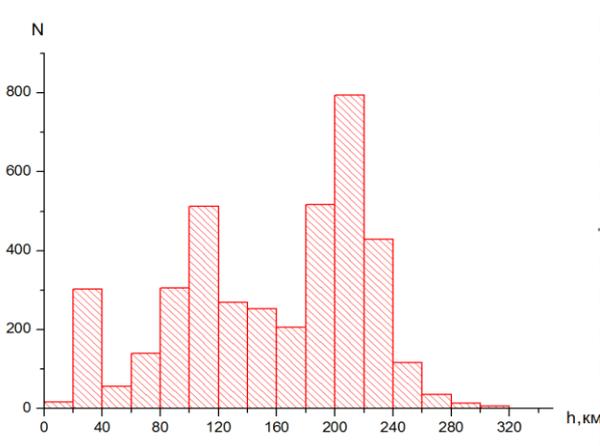


Рисунок 3. Распределение количества землетрясений по глубинам

На рисунке 3 показано распределение по глубинам количества землетрясений в районе Гиндукуша, большинство землетрясений сконцентрированы на глубинах 80–120 км и 180–240 км.

**ХАРАКТЕРИСТИКА ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОЧАГА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 26 ОКТЯБРЯ 2015 Г.**

26 октября 2015 г. в районе Гиндукуша произошло катастрофическое землетрясение с  $M_w=7.5$ . Динамика разрыва в очаге была сложной, выявлено два последовательных толчка с разницей в ~10 сек, у первого  $M=5.9$ , второй характеризовался максимум высвобожденной сейсмической энергии с  $M_w=7.5$  (рисунок 4). Многие Международные и региональные сейсмологические Центры провели оперативную обработку землетрясения некорректно,

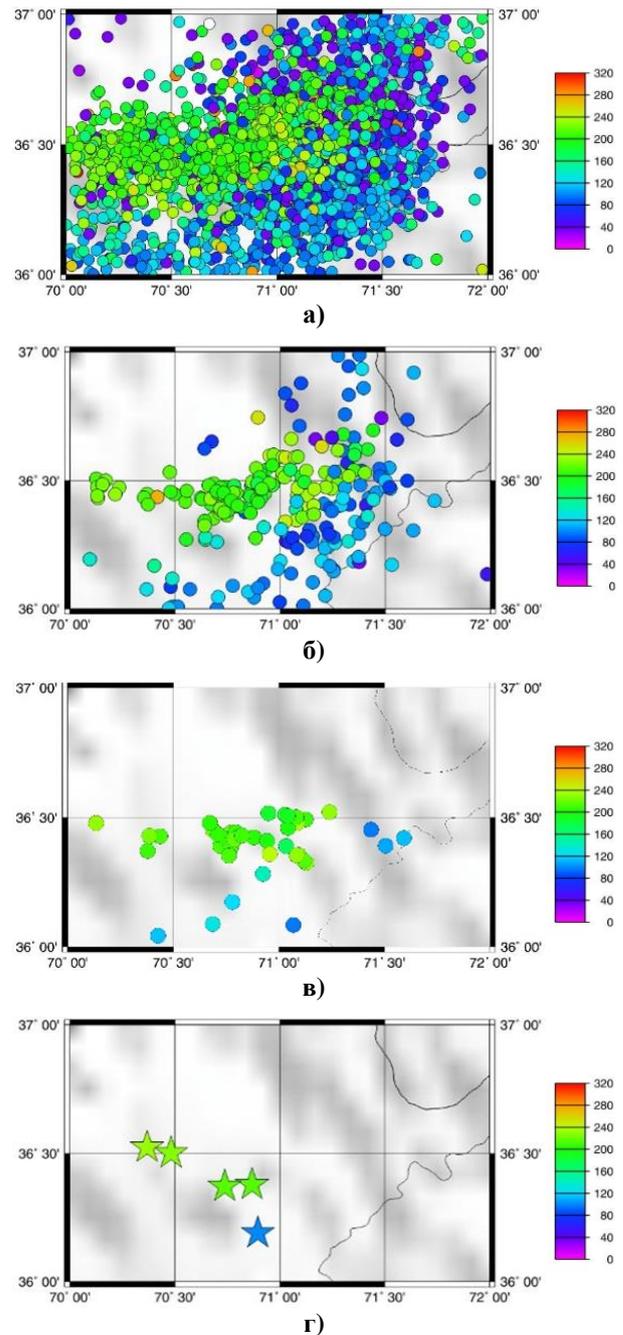


Рисунок 2. Карты распределения землетрясений по глубинам (выделены цветом) и магнитудам: а) магнитуды  $M < 5$ , б)  $5 \leq M < 6$ , в)  $6 \leq M < 7$ , г)  $M \geq 7$

приняв вступление Р-волны первого события ( $P_f$  на рисунке 4) за вступление Р-волны основного толчка, в связи с этим были некорректно определены такие параметры землетрясения как время в очаге, координаты эпицентра, Международный Центр данных (ИДЦ) не верно определил  $m_b$  (таблица 2). Окончательная обработка Геологической службы США и КНИЦД включает как обработку основного толчка так и первого события (таблица 3). Несмотря на то, что Казахские станции зарегистрировали землетрясение в диапазоне эпицентральных расстояний

740–1860 км от события с максимальной магнитудой, и все станции расположены на севере в узком диапазоне азимутов (рисунок 5), параметры обоих событий близки к параметрам определенным NEIC (таблица 3).

Фокальный механизм очага получен методом тензора центра сейсмического момента (СМТ)

[1]. На рисунке 6 приведена стереограмма фокального механизма. Механизм очага характеризуется взбросом, обе возможные плоскости имеют северо-восточное простирание. Ось сжатия близгоризонтальна и субмеридиональна. Ось растяжения – близвертикальна.

Таблица 2. Инструментальные характеристики землетрясения 26.10.2015 г. по данным региональных и международных сейсмологических Центров

Агентство	Время в очаге	Широта	Долгота	h, км	К-во фаз, используемых для решения	mb	mpv	Mw
ЦСОСЦИ (оперативный)	09:09:27.7	36.0843	70.7991	221	18	6.3	7.3	
ИС НАН КР	09:09:29.2	36.2622	71.2695			7.5		
EMSC (Франция)	09:09:30.6	36.320	71.100					7.7
ГС РАН	09:09:31.0	36.490	70.850	215	31	7.4		
GFZ (ФРГ)	09:09:31.2	36.380	70.900	189	32	7.7		
NEIC (оперативный)	09:09:32	36.463	70.712	231	194	7.7		7.5
IDC REV (Австрия)	09:09:33.8	36.467	70.832	231	93	5.4		

Таблица 3. Уточненные параметры гиндукушского землетрясения 26.10.2015 г. (форшока и основного толчка) по данным ЦСОСЦИ ИГИ и NEIC Геофизической службы США

Агентство	Время в очаге	Широта	Долгота	Смажах, км	h, км	К-во фаз, используемых для решения	mb	mpv	Mw
<b>форшок</b>									
ЦСОСЦИ	09:09:32.9	36.601	70.745	117	206	12	5.5	6.5	
NEIC	09:09:32.0	36.459	70.685	6	207	187	5.9		
<b>основной толчок</b>									
ЦСОСЦИ	09:09:44.6	36.801	70.546	20	216	16	6.7	7.8	
NEIC	09:09:42.6	36.524	70.368	6.7	231	194			7.5

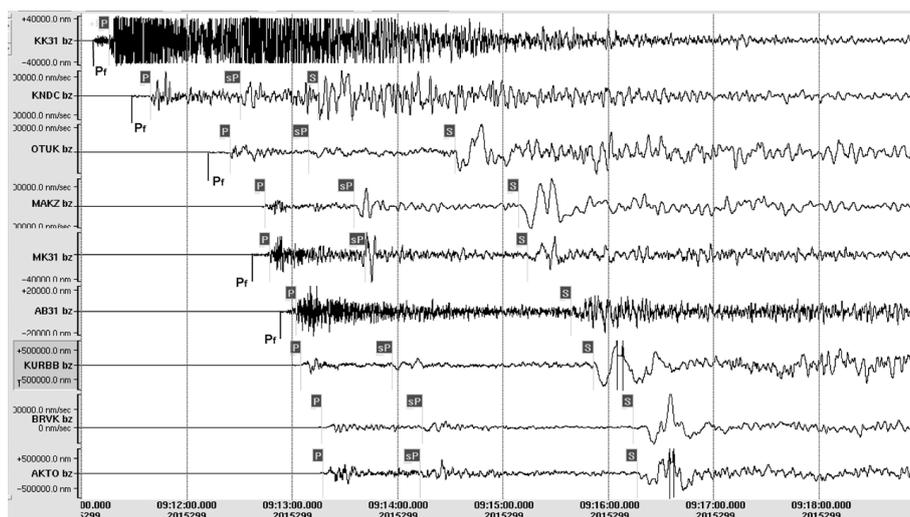


Рисунок 4. Сейсмограммы землетрясения 26 октября 2015 г.  $t_0=09-09-42$  по станциям РГП ИГИ. Z-компонента. Здесь Pf – время вступления P-волн форшока землетрясения

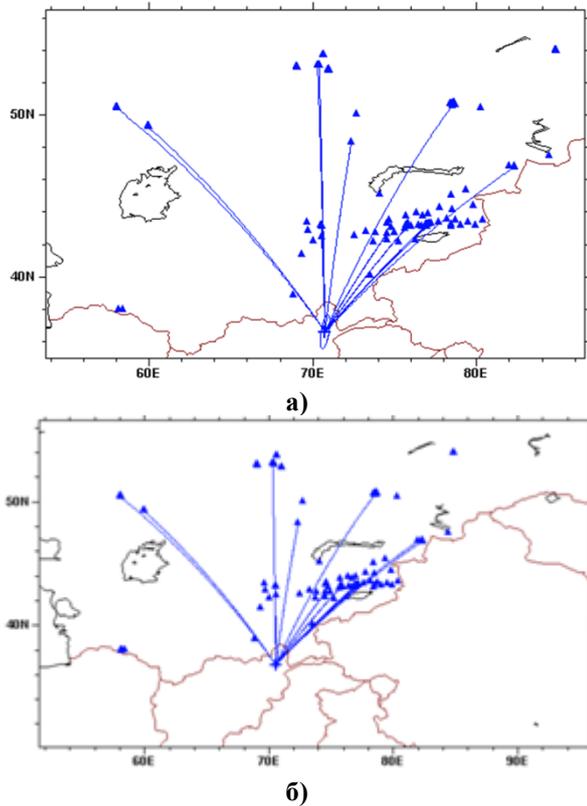


Рисунок 5. Карта расположения эпицентров а) форшока, б) – основного толчка гиндукушского землетрясения 26.10.2015 г. и станций РГП ИГИ, участвовавших в обработке

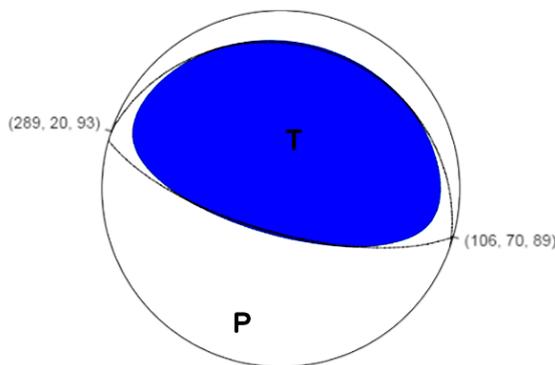


Рисунок 6. Стереогрaмма фокального механизма очага [1]

**АФТЕРШОКОВАЯ АКТИВНОСТЬ**

Как правило, после глубокофокусных землетрясений, либо афтершоков не бывает, либо происходит незначительное количество. Однако после основного толчка землетрясения 26 октября 2015 г. за период до 1 апреля 2016 г. произошло 54 афтершока с магнитудами  $m_b$  от 3.9 до 4.6, в диапазоне глубин 182–229 км. В первые сутки произошло 19 афтершоков. На рисунке 7 представлена карта расположения эпицентров афтершоков и главного толчка, а на ри-

сунке 8 показано распределение афтершоков по времени.

Интересно, что сразу после основного толчка произошло перераспределение землетрясений из района Гиндукуша по глубинам. Но рисунке 9 представлено распределение сейсмических событий из района Гиндукуша по глубинам за период времени 26.10.2015 г.–01.04.2016 г., значительно уменьшилось количество событий с глубинами меньше 180 км, существенно возросла доля землетрясений с глубинами от 180 до 220 км. Интересно, что такая же закономерность наблюдалась после некоторых сильных землетрясений с магнитудами более 6.5, на рисунке 10 представлено распределение количества сейсмических событий из района Гиндукуша по различным диапазонам глубин  $80 \leq h < 120$  км,  $120 \leq h < 180$  км,  $180 \leq h < 220$  км и  $h \geq 220$  км. Интересно, что перед землетрясением 26.10.2015 г., начиная с середины 2009 года наблюдалось сейсмическое затишье.

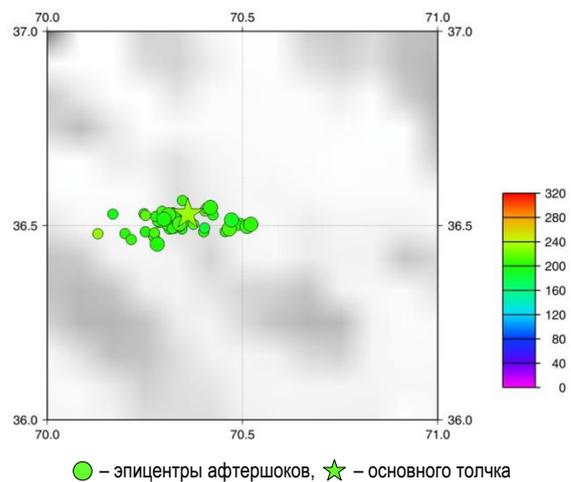


Рисунок 7. Пространственное распределение афтершоковой последовательности

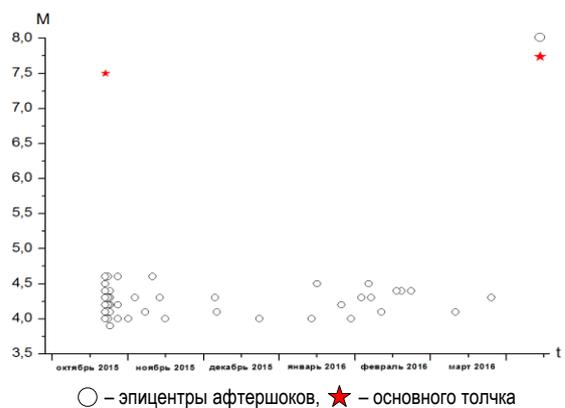


Рисунок 8. Распределение афтершоковой последовательности по времени и магнитуде.

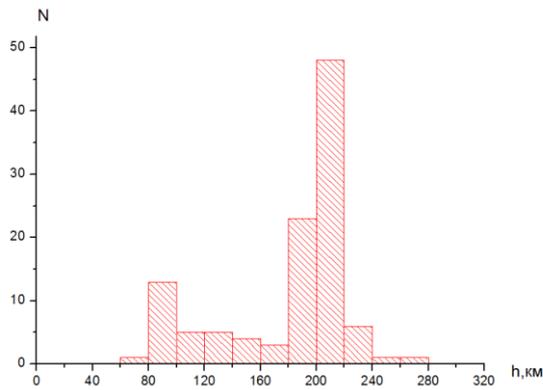


Рисунок 9. Распределение сейсмических событий из района Гиндукуша по глубинам за период времени 26.10.2015 г. – 01.04.2016 г.

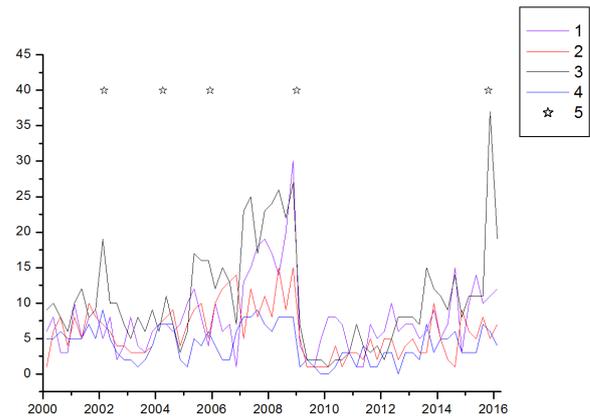


Рисунок 10. Распределение количества сейсмических событий из района Гиндукуша по различным диапазонам глубин (км): 1 –  $80 \leq h < 120$ , 2 –  $120 \leq h < 180$ , 3 –  $180 \leq h < 220$ , 4 –  $h \geq 220$ ; 5 – землетрясения с  $M_w \geq 6.5$

**МАКРОСЕЙСМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ  
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ**

Землетрясение вызвало большое количество жертв (374), несколько тысяч раненых (более 2200), огромное количество разрушенных и поврежденных зданий (более 100000). на территории Пакистана, Афганистана и Индии [1]. Ощущалось жителями Таджикистана (Хорог 6 б, Душанбе 5–6 б), Узбекистана (Самарканд 5 б, Ташкент 4–5 б, Фергана 4 б,

Андижан и Наманган 3 б), Кыргызстана (Ош 4 б, Бишкек 3 б), Казахстана (Шымкент 4 б, Тараз 3–4 б, Алматы 3 б), России (Новосибирск и Уфа 2 б). Сразу после ощутимых землетрясений Геологическая служба США проводит интернет-опрос населения, на основе такого опроса была составлена карта интенсивности сотрясений землетрясения 26.10.2015 г. [1] (рисунок 11).

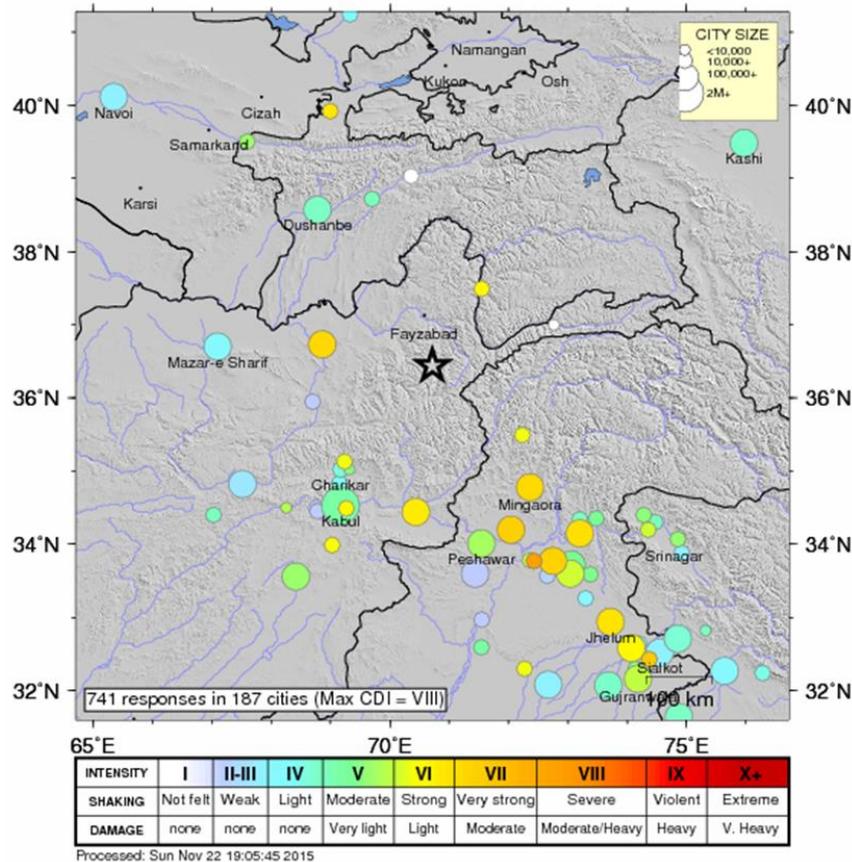


Рисунок 11. Карта интенсивности сотрясений землетрясения 26.10.2015г. по результатам оперативного интернет опроса населения [1]

Таблица 4. Параметры записей сильных движений для землетрясения 26.10.2015 г.

Станция	$\Delta$ , км	I, баллы, в пункте регистрации	Амплитуды ускорений, см/с <sup>2</sup>			Амплитуды скоростей, см/с			Период ускор., с	Период скор., с
			ВЗ	СЮ	Z	ВЗ	СЮ	Z		
KBL	260	5	15,4	21,2	11,4	1,61	1,67	1,35	0,5	0,5
GARM	315		48,1	53,01		1,9	1,8			
NIL	387		21	19,8	6,9	2,87	2,87	2,623	1	1
ARLS	677		1,1	1,6	0,9	0,36	0,40	0,19	2,3	2,3
MNAS	689		2,2	2,6	1,6	0,71	0,42	0,36	3,3	3,3
MDO	922	3	0,3	0,3	0,3	0,16	0,13	0,17	3	3
ANVS	923		0,4		0,3	0,16		0,17	3,3	3,3
KNDC	923	3	0,7	0,8	0,6	0,26	0,29	0,19	4, 1,5	2, 1,5
PRZ	943		0,5		0,4	0,19		0,19	3,3	3,3
OTUK	1318		0,3	0,1	0,2	0,19	0,05	0,08	5	5
MAKZ	1483		0,1	0,1	0,2	0,06	0,09	0,1	7	7
ABKAR	1671		0,1	0,1	0,1	0,04	0,03	0,04	2,7	2
BRVK	1848		0,1	0,1	0,1	0,04	0,06	0,11	5	5
AKTO	1859			0,1			0,03		1,5, 3, 5	1,5

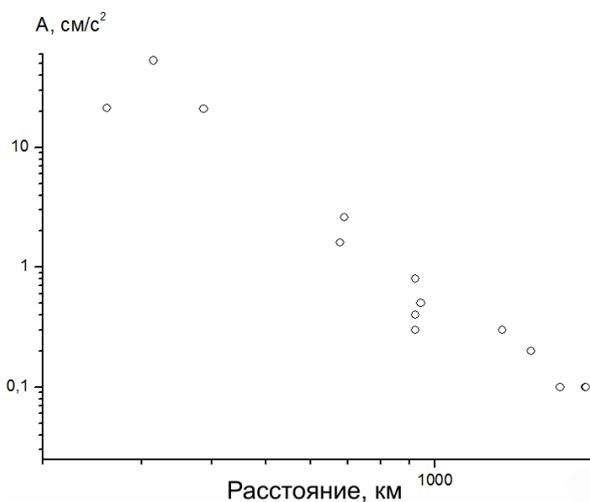


Рисунок 12. Зависимость максимальных амплитуд сильных движений от расстояния

Для научных исследований, оценки сейсмической опасности, риска и практики сейсмостойкого строительства большой интерес представляет анализ параметров записей сильных движений. Постоянный мониторинг сильных движений в ЦСОССИ был начат с 2006 г., с этого времени была создана и постоянно пополняется база данных цифровых записей сильных движений [11]. Обработка данных осуществляется при помощи программного обеспечения ViewWave, разработанного Т. Кашимой [12], которое позволяет проводить визуализацию записи, откалиброванной за характеристики прибора в физических единицах, производить расчеты спектра Фурье и спектра реакции для разных значений затухания, производить дифференцирование и интегрирование записей. Для землетрясения 26.10.2015 г. были собраны записи акселерографов и велосигрофов Центральноазиатских станций, к сожалению часть данных пришлось отбраковать из-за того, что они были зашкалены. Записи велосигрофов были

предварительно продифференцированы. В таблице 4 представлены параметры записей сильных движений для землетрясения 26.10.2015 г., минимальное расстояние соответствует станции Кабул на расстоянии 280 км от эпицентра. На рисунке 12 представлена зависимость максимальных амплитуд сильных движений от расстояния.

#### ИНДУЦИРОВАННОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ В ТАДЖИКИСТАНЕ ( $M=7.2$ ) КАК ПОСЛЕДСТВИЕ ГИНДУКУШСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 26.10.2015 г. ( $M=7.5$ )

В работах [2, 3] отмечено группирование сильных землетрясений в районе Центральной и Южной Азии. Согласно [2, 3] пары событий составляют глубоководное гиндукушское землетрясение ( $M \geq 6.7$ ) и коровое событие ( $M \geq 7.0$ ), произошедшее после него с запаздыванием до 4.5 месяцев в регионе Азии, ограниченном координатами  $30-50^\circ$  N и  $50-90^\circ$  E. Сильные коровые землетрясения после гиндукушских происходили в районах Тянь-Шаня, Туранской плиты, Копетдага, Иранского нагорья, Гиндукуша, Гималаев (таблица 5, рисунок 13). Сильнейшее глубоководное гиндукушское землетрясение 26 октября 2015 г. повлияло на геодинамические процессы в Центральной Азии, после него произошло сильное коровое землетрясение в Таджикистане 7 декабря 2015 г. ( $M=7.2$ ) вблизи оз.Сарез, его параметры приведены в таблице 5, расстояние между эпицентрами гиндукушского и Таджикского землетрясений 270 км.

Согласно работам [2, 3] после сильного гиндукушского землетрясения происходит перестройка флюидного поля в обширном регионе Центральной Азии, которая, увеличивает концентрацию флюидов в отдельных участках крупных разломных зон, что обеспечивает резкое ускорение процессов подготовки сильных землетрясений в наиболее ослабленных зонах.

Таблица 5. Параметры сильных землетрясений в регионе Центральной и Южной Азии [2, 3]

Дата гг, чч, мм	Координаты эпицентра		Глубина очага, км	M	Пауза, мес.	Расстояние между эпи- центрами Δ, км
	φ°, N	λ°, E				
21.04.1916	36.5	70.5	220	6.8	4.3	1210
28.08.1916	30.0	81.0	33	7.3		
01.02.1929	36.7	71.3	200	7.4	3	1200
01.05.1929	37.8	57.8	20	7.2		
07.09.1948	36.9	70.6	220	6.7	0.9	1090
05.10.1948	38.0	58.3	18	7.3		
04.03.1949	36.6	70.6	300	7.7	4.3	290
10.07.1949	39.2	70.8	16	7.4		
06.04.1956	36.5	70.7	200	6.8	2.1	330
09.06.1956	35.0	67.5	20	7.2		
30.07.1974	36.4	70.8	200	7.3	0.4	410
11.08.1974	39.3	73.7	18	7.3		
02.05.1981	36.5	71.1	220	7.0	2.9	1430
28.07.1981	30.0	57.8	11	7.2		
30.12.1983	36.4	70.8	210	7.3	2.7	780
19.03.1984	40.4	63.4	15	7.2		
29.07.1985	36.2	70.9	100	7.2	0.8	530
23.08.1985	39.4	75.4	20	7.0		
26.10.2015	36.5	70.7	231	7.5	1.5	270
07.12.2015	38.2	72.8	22	7.2		

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследований детально изучены характеристики сейсмического режима в районе Гиндукуша, построен график повторяемости землетрясений за период 1973–2016 гг. построены распределения землетрясений по различным параметрам, изучено влияние сильных землетрясений на распределение землетрясений по глубинам.

### ЛИТЕРАТУРА

- [Электронный ресурс]: <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes>.
- Копничев, Ю.Ф. Вариации скорости вращения Земли и геодинамические процессы в Центральной Азии / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Доклады А.Н. – 1997. – Т. 353, N 3. – С. 386–389.
- 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.
- 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, N 2. – С. 246–249.
- Roecker, S.W., 1982. Velocity structure of the Pamir–Hindu Kush region: possible evidence of subducted crust / S.W. Roecker // J. Geophys. Res. 87, 945–959.
- Копничев, Ю.Ф. Картирование верхней мантии Памиро-Гиндукуша по поглощению поперечных волн / Ю.Ф. Копничев, П.Б. Каазик, О.В. Павлова // Докл. АН СССР. 1987. Т. 236. № 6. С.1335–1338.
- Копничев, Ю.Ф. Новые данные о строении верхней мантии Гиндукуша / Ю.Ф. Копничев // Докл. РАН. 1997. Т. 352. № 3. С. 400–404.
- Negredo, A.N. Modeling the evolution of continental subduction processes in the Pamir–Hindu Kush region / A.N. Negredo, A. Replumaz, A. Villaseñor, S. Guillot // Earth and Planetary Science Letters 259 (2007) 212–225.
- Копничев, Ю.Ф. Пространственно-временные вариации поля поглощения короткопериодных S-волн в районе Гиндукуша и их связь с глубокофокусной сейсмичностью / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Вестник НЯЦ РК, 2012. – Вып. 4. С. 53–61.
- [Электронный ресурс]: <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin>
- Соколов, А.Н. Использование данных по сильным движениям для прогноза воздействий на площадки строительства ответственных объектов / А.Н. Соколов, Р.Б. Узбеков // Актуальные вопросы мирного использования атомной энергии. Доклады международной конференции молодых ученых и специалистов. 6–8 июня 2012 г. г. Алматы ИЯФ. С. 97–105.
- Kashima, T. 2002. ViewWave Help, IISSE, BRI.

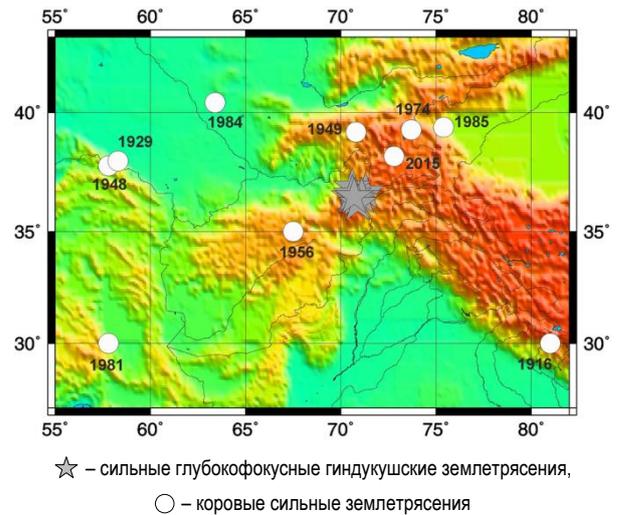


Рисунок 13. Карта расположения эпицентров пар сильных землетрясений с 1900 г.

Собраны макросейсмические данные разрушительного землетрясения 26 октября 2015 г., обработаны записи сильных движений по данным сейсмических станций Афганистана, Пакистана, Таджикистана, Кыргызстана и Казахстана.

Подтверждена гипотеза о парах сильных землетрясений: глубокофокусное гиндукушское землетрясение ( $M \geq 6.7$ ) и коровое событие ( $M \geq 7.0$ ), произошедшее после него с запаздыванием до 4.5 месяцев в районе Центральной и Южной Азии. Сильнейшее глубокофокусное гиндукушское землетрясение 26 октября 2015 г. ускорило процесс подготовки сильного корового землетрясения в Таджикистане 7 декабря 2015 г. ( $M=7.2$ ) вблизи оз. Сарез.

**2015 ж. 26 ҚАЗАНДАҒЫ ӨТЕ ҚАТТЫ ГИНДУКУШ ЖЕРСІЛКІНУДІҢ (Mw=7.5)  
ОШАҒЫ МЕН САЛДАРЛАРЫ****А.В. Мусрепов, А.Н. Соколов***Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатов, Қазақстан*

2015 ж. 26 қазанда Гиндукуш ауданында Mw=7.5 апатты жерсілкінуі болған. Ошақтағы айырылым динамикасы күрделі болған, арасы ~10 сек. екі бірізді соққылар болған, біріншісінде M=5.9, екіншісі босатылған сейсмикалық энергияның Mw=7.5 максимумымен сипатталған. Жұмыста, ҚР ГЗИ желісінің деректері бойынша жерсілкінудің толқындық сүретінің ерекшеліктері қарастырылған, халықаралық және аймақтық сейсмологиялық Орталықтардың өңдеу нәтижелерімен салыстыруы жүргізілген. Глобаль сейсмикалық желілердің 1973 ж. бастап деректері бойынша Гиндукуш ауданы сейсмикалығының сипаттамалары қарастырылған. Афтершоқ қимылының заңдылықтары зерттелген. Қазақстандық және Ортаазиялық станциялардың деректері бойынша қатты козғалыстардың жазбалары талданылған.

**THE ORIGIN AND CONSEQUENCES OF THE LARGEST HINDU KUSH EARTHQUAKE  
OF OCTOBER 26, 2015 (Mw=7.5)****A.V. Musrepov, A.N. Sokolov***Institute of Geophysical Research, Kurchatov, Kazakhstan*

On October 26, 2015 there was a catastrophic earthquake Mw=7.5 at Hindu Kush region. The slip history was complex, it revealed two consecutive shocks with a difference of ~ 10 seconds of the first M = 5.9, the second was characterized by a maximum of released seismic energy with Mw = 7.5. The waveform peculiarities using data IGR RK seismic network studied. Earthquake parameters were compared with the results of the processing of International and regional seismological centers. The work considers seismicity characteristics of Hindu Kush area by data of global seismic stations networks since 1973. The regularities of aftershock activity investigated. The records of strong motion by data of Kazakhstan and Central Asia stations analyzed.

УДК 550.344

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ СЕЙСМИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ В МОНИТОРИНГЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ТЕРРИТОРИИ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ

Рябенко П.В., Михайлова Н.Н.

*Институт геофизических исследований, Курчатов, Казахстан*

В Казахском национальном центре данных (КНЦД) в круглосуточном режиме в реальном времени ведется сбор данных со всех станций ИГИ МЭ РК и передача их в Международные центры данных. По результатам обработки формируются бюллетени сейсмических событий разной степени оперативности: бюллетень срочных донесений, автоматический бюллетень, интерактивный бюллетень, сводный сейсмологический оперативный бюллетень по данным двух сетей наблюдений Казахстана – ИГИ МЭ РК и СОМЭ МОН РК.

### ВВЕДЕНИЕ

Настоящая работа посвящена анализу данных, включаемых в сводный бюллетень сейсмических событий, и оценке вклада и возможностей различных станций – как ИГИ, так и СОМЭ, в обнаружении сигналов и локализации источников землетрясений и взрывов.

К оценке эффективности сейсмических станций можно подойти с разных позиций. Например, по участию станции в обработке включенных в бюллетень событий. Такой подход использовался, например, в работе [1] для характеристики роли станции Маканчи в глобальном и региональном мониторинге. Но этот подход не вполне справедлив в отношении станций, расположенных в асейсмичных зонах, где априори известно, что в районе расположения станций на значительных расстояниях не происходят землетрясения. Поэтому использовались и другие подходы – сравнение станций по спектральному уровню сейсмических шумов, по графикам дальности регистрации событий с разными магнитудами,

по участию станций в обработке событий из разных регионов.

### ХАРАКТЕРИСТИКА СЕТИ НАБЛЮДЕНИЙ И ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Сеть станций ИГИ в её нынешнем составе сформировалась в основном к 2010 году. Основу сети составляют сейсмические группы нового поколения (рисунок 1), введенные в строй последовательно с 1999 по 2006 годы. Это регионально – телесеismicкие группы с апертурой 3–4 км Маканчи (МКАР), Акбулак (АВКАР), Каратау (ККАР), Боровое (ВВАР), а также телесеismicкая группа с апертурой 22,5 км Курчатов-Крест (КУРВВ). Все группы располагаются по периметру территории Казахстана и участвуют как в глобальном мониторинге по контролю за выполнением Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний, так и в мониторинге землетрясений и взрывов на территории Казахстана и стран Центральной Азии.

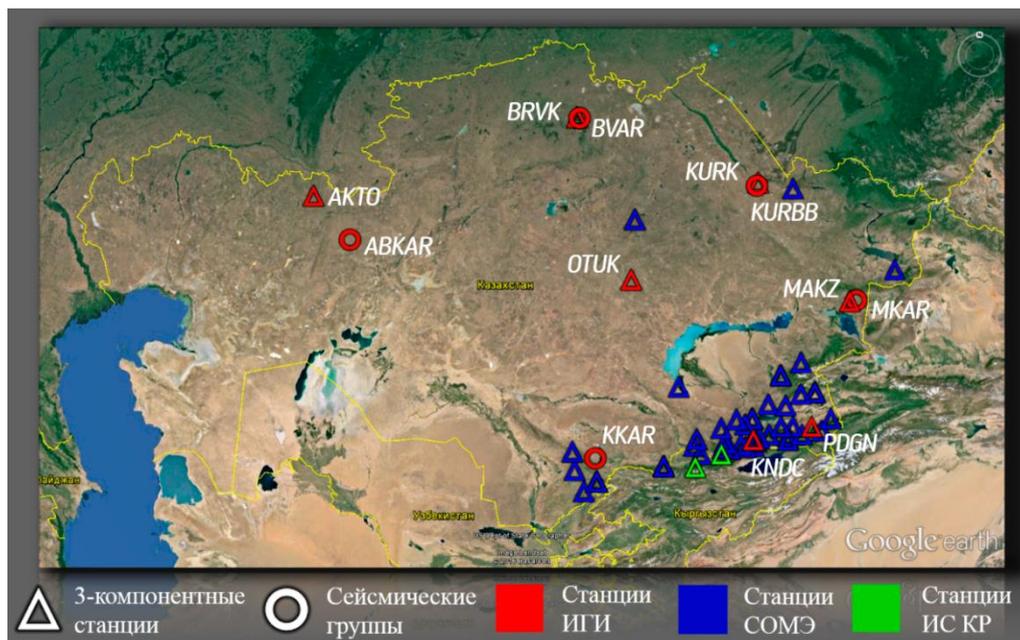


Рисунок 1. Карта расположения сейсмической сети ИГИ, СОМЭ и ИС КР

Кроме сейсмических групп в состав сети станций ИГИ входят несколько трёхкомпонентных станций, расположенных в разных частях Казахстана. Это станции Актюбинск (АКТО), Ортау (ОТУК), Подгорное (PDG) и KNDC в г. Алматы.

Среди станций ИГИ две группы и две трехкомпонентные сейсмические станции расположены в сейсмически активных районах Казахстана – это Маканчи, Каратау, Подгорное и KNDC. Остальные объекты находятся на территориях, до последнего времени считающихся асейсмичными, то есть на которых не прогнозировалось появление сильных событий с интенсивностью проявления колебаний более 5 баллов.

Для повышения качества сейсмических бюллетеней, их полноты и точности определения параметров источников с 2006 г. дополнительно в КНЦД начали поступать результаты обработки по станциям СОМЭ с задержкой на одни сутки. Всего в настоящее время к обработке привлекаются данные 44 станций СОМЭ. Кроме того, в реальном времени ведется сбор данных с двух станций ИС Кыргызской Республики, расположенных на территории Кыргызстана. Это станции Ала-Арча (ААК) и Токмак (ТКМГ).

Заметим, что практически все станции СОМЭ МОН РК и ИС КР, используемые в КНЦД, расположены в сейсмическом районе Северного Тянь-Шаня и Джунгарии. Исключение составляет станция Семипалатинск, расположенная в пределах города Се-

мипалатинска, и станция Березники, открытая несколько лет назад.

Сводный сейсмический бюллетень формируется в КНЦД с запаздыванием 2 суток по отношению к реальному времени, доступен специальным пользователям на веб-сайте КНЦД [2] и отправляется из КНЦД в ИС РК и СОМЭ МОН РК.

**ОЦЕНКА ВКЛАДА СЕЙСМИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ  
В СЕЙСМОМОНИТОРИНГ ТЕРРИТОРИИ  
КАЗАХСТАНА И ПРИЛЕГАЮЩИХ СТРАН**

В настоящей работе нас интересовала информация последних двух лет, когда система наблюдений и методика обработки оставались практически неизменными. Для анализа были взяты данные за 2014 и 2015 год. Создана база данных под управлением СУБД MySQL, куда вошли как параметры обработанных очагов, так и данные всех станций, участвующих в обработке событий. Всего за этот период в бюллетень было включено 27 114 событий.

На рисунке 2 представлена карта эпицентров всех событий за два года событий, среди которых есть и землетрясения, и взрывы. Видно, что события, которые обрабатываются в КНЦД, находятся на огромной территории Центральной Азии.

Далее была сделана оценка вклада каждой станции в обработку этих событий. В таблице 1 приведены данные только по станциям ИГИ, но расчеты сделаны для абсолютно всех станций, участвующих в составлении сводного бюллетеня.

Таблица 1. Оценка вклада в составление сводного бюллетеня по каждой станции

Сейсмические станции	МКАР	ККАР	ААК	МАКЗ	ТКМ2	PDGN	АВКАР	КУРБВ	УЗВ	АКТО	КУРК	БРВК	KNDC	ОТУК
Количество землетрясений	10840	8387	7080	6554	6458	5326	5253	5064	4379	3940	2522	1681	1119	599

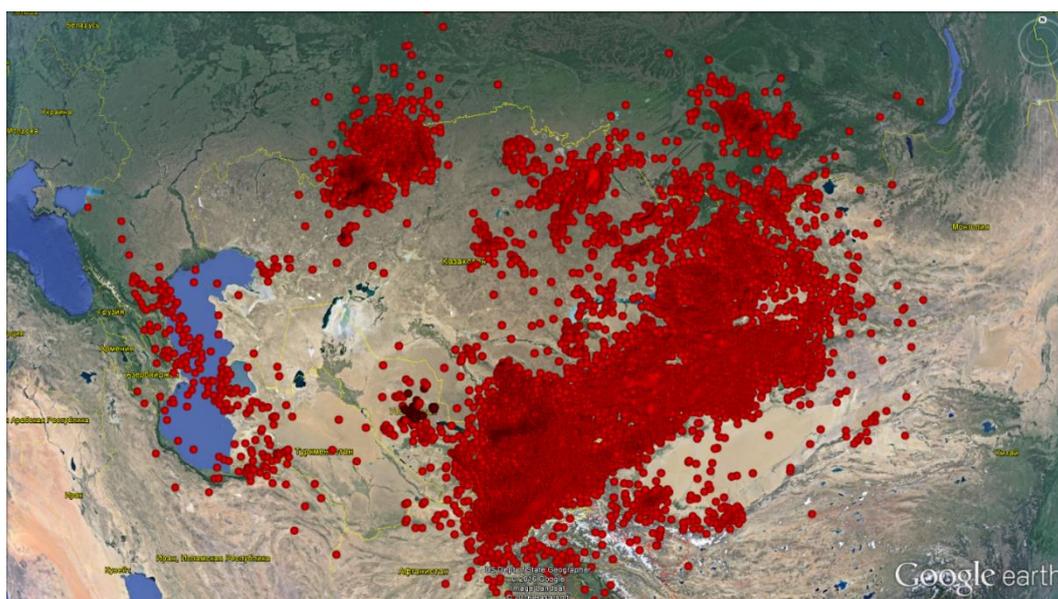


Рисунок 2. Карта эпицентров сейсмических событий за период с 2014–2015 гг.

Как видно, самый существенный вклад в мониторинг Центральной Азии вносят две сейсмические группы ИГИ – Маканчи и Каратау. Они обладают высокой чувствительностью и находятся вблизи областей высокой сейсмической активности.

На рисунке 3 в графическом виде представлена информация о степени участия в сводной обработке всех станций, данные которых поступают в КНЦД. Всего расчеты сделаны по 62 станциям. Первые восемь позиций занимают станции ИГИ и две станции Кыргызстана, данные которых поступают в КНЦД в полном объеме в реальном времени и обрабатываются аналитиками КНЦД. Станция Ала-Арча, также, как и станции ИГИ, входит в Международную систему мониторинга ОДВЗЯИ и является одной из лучших в регионе. Станции СОМЭ занимают позиции с 9-ой и ниже. Это связано, с одной стороны, с их несколько меньшей чувствительностью, с другой стороны – с использованием в нашем анализе результатов оперативной обработки, выполненный сотрудниками СОМЭ. Возможно, при окончательной обработке число обнаруженных в СОМЭ событий возрастает.

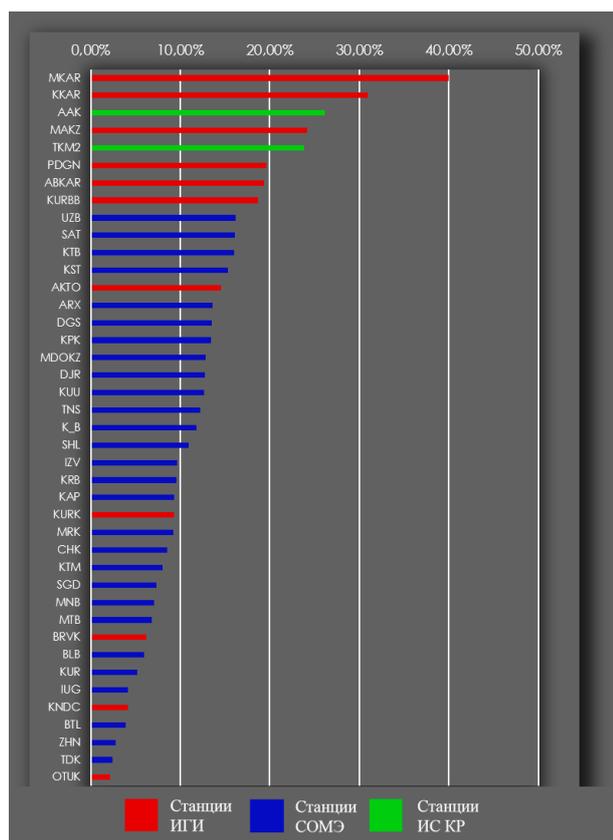


Рисунок 3. Степень участия каждой станции в сводной обработке (отношения количества событий с участием данной станции к общему числу событий бюллетеня)

Можно сказать, что таким образом мы оценили в интегральном виде вклад каждой станции. Однако при рассмотрении сейсмичности отдельных регио-

нов Казахстана эта картина может существенно измениться. Например, такая ситуация проявляется в отношении территории Западного Казахстана.

Здесь основную нагрузку в отношении регистрации тектонических землетрясений, техногенных землетрясений, промышленных взрывов несут две станции ИГИ – Акбулак (сейсмическая группа) и Актюбинск (скважинная трехкомпонентная станция).

На рисунке 4 взят один фрагмент карты эпицентров для Западного Казахстана и оценен вклад в обработку этих событий станций. В 52% всех событий участвует группа Акбулак, в 46% – станция Актюбинск. Только в единичных событиях (0,16% от общего числа) при обработке используется данные групп Боровое и Каратау. Это происходит потому, что все события на этой территории, в основном, слабые. Их магнитуда не превышает 3,5.

Следует отметить, что этот район является чрезвычайно важным для оценки сейсмической опасности и слежения за проявлением активности в местах интенсивной разработки месторождений углеводородного сырья. Только станции ИГИ в настоящее время могут регистрировать возникающие в процессе разработки месторождений события. Ни в одном международном центре нет данных о слабых событиях в районе месторождений. В частности, получены уникальные данные о сейсмичности на месторождении Тенгиз. С увеличением объема добычи нефти произошел и рост количества землетрясений и их высвобожденной энергии. До 2005 г. здесь не происходило событий с магнитудой более 2 [3]. За период 2011–2015 гг. на территории месторождения зарегистрировано 20 землетрясений с магнитудами от 2,5 до 4,3 на глубинах 3–4 км. Некоторые из этих землетрясений являются ощутимыми, как например, землетрясения 21 февраля 2011 года, проявившиеся с интенсивностью 4 балла. Благодаря этим данным, доказавшим наличие на Тенгизе техногенной сейсмической активности, возросло внимание в целом к проблеме, связанной с риском техногенных землетрясений в Казахстане. Начаты работы по созданию специальных сетей геодинамического мониторинга землетрясений. На рисунке 5 показаны записи техногенного землетрясения на Тенгизе по станциям ИГИ.

Ценность данных станций Актюбинск и Акбулак велика и в отношении других районов, считающихся асейсмичными. Например, впервые доказано существование природной активности вблизи г. Рудный, где в 2004 и 2016 году произошли ощутимые землетрясения. Поэтому, несмотря на меньший общий вклад в сейсмический бюллетень, станции ИГИ расположенные на западе и севере Казахстана приносят очень важную информацию, не дублируемую никакими другими сейсмическими станциями региона и мира.

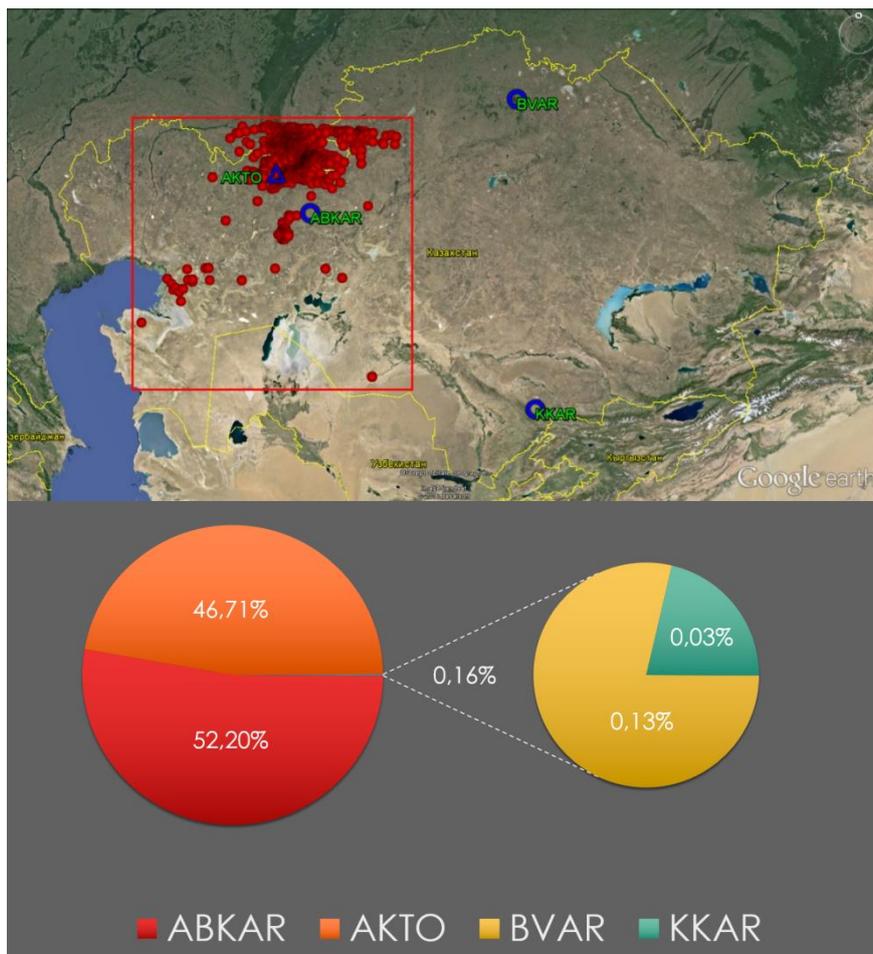


Рисунок 4. Карта эпицентров сейсмических событий западного Казахстана и оценка вклада в обработку станциями ИГИ

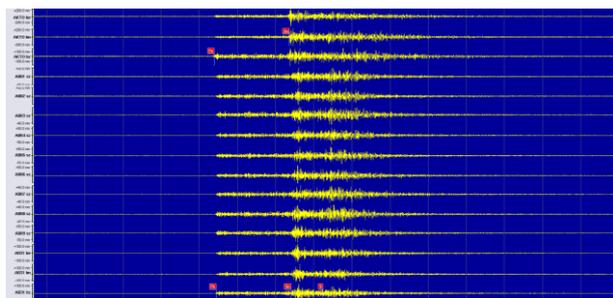


Рисунок 5. Пример техногенного землетрясения на Тенгизе по станциям ABKAR и AKTO

#### О МАГНИТУДНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ СТАНЦИЙ КАЗАХСТАНА

О возможностях и эффективной чувствительности каждой станции можно судить по зависимостям предельных расстояний от магнитуды регистрируемых землетрясений. Известно, что для каждой станции в зависимости от типа аппаратуры регистрации, условий в месте установки прибора, уровня сейсмических шумов будет различно то расстояние, на котором станция может «видеть» событие той или иной магнитуды. По сейсмическим бюллетеням за

2014–2015 г. г. были построены по всем участвующим в обработке станциям графики дальности регистрации. Пример такого графика по сейсмической группе Маканчи приведен на рисунке ба. Каждая точка на графике соответствует одному событию с соответствующей магнитудой  $m_{rv}$  и расстоянием до эпицентра  $\Delta$ , км. По графику видно, что станция расположена в зоне, где даже в непосредственной близости от станции происходят землетрясения. Для каждого значения магнитуды  $m_{rv}$  есть предел по расстояниям, где такое событие еще может быть отмечено. Ограничивающая кривая  $m_{rv}=f(\Delta)$  поля всех точек на графике снизу показывает предельные расстояния для каждой магнитуды. Эта кривая показана на рисунке бв. На рисунке бб представлен аналогичный график по лучшей согласно рисунка 3 трехкомпонентной станции СОМЭ Узун-Булак (UZB), расположенной в активной зоне Северного Тянь-Шаня на восток от Алматы. На рисунке бв на одном графике приводится сравнение двух кривых  $m_{rv}=f(\Delta)$  по двум станциям Маканчи и Узун-Булак. Видно, что для всех расстояний Маканчи является более чувствительной, чем Узун-Булак.

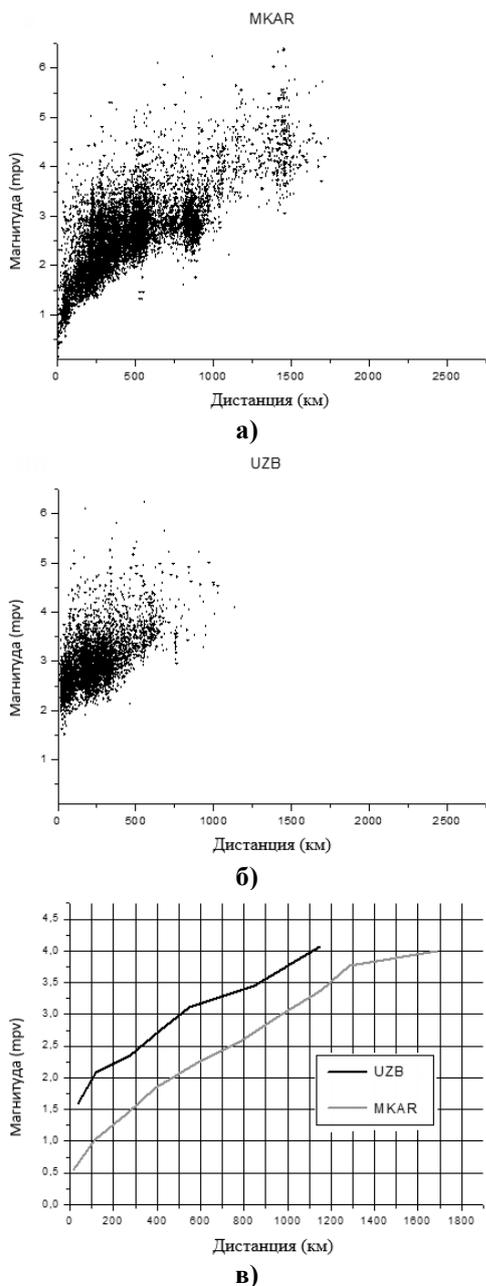


Рисунок 6. а – график дальности регистрации сейсмической группы Маканчи, б – график дальности регистрации сейсмической станции Узун-Булак, в – сравнение двух кривых по двум станциям Маканчи и Узун-Булак

Практически разница в магнитудах на одном и том же расстоянии составляет единицу. Маканчи регистрирует более слабые события на всем диапазоне расстояний. Этот вывод подтверждается и данными таблицы 2, где для одного и того же значения магнитуд показано расстояние, на котором событие этой магнитуды еще может быть зарегистрировано.

Когда графики дальности регистрации построены по всем станциям, то можно расчетным способом оценить, какой энергетический уровень землетрясений или взрывов является представительным

для всей территории Казахстана, то есть, начиная с какого минимального уровня энергии, событие не будет пропущено никогда при данной сети наблюдений. Для такого расчета требуется сначала перейти от предельных радиусов регистрации к представительным. Это означает, что нужно оценить тот уровень энергии, когда события ни при каких обстоятельствах не будут пропущены, то есть обнаружение будет возможно при любых уровнях варьирующих сейсмических шумов. Для этого мы воспользовались выводами работы [4]. Кроме того, для удобства трактовки выводов от магнитуды событий был осуществлен переход к энергетическим классам  $K$ , являющимся логарифмом высвобожденной сейсмической энергии:  $K = \lg E$  (Дж). Графики представительных расстояний по энергетическим классам приведены в сводном виде по всем станциям ИГИ на рисунке 7. Видно, что лучшими по этой характеристике являются три сейсмические группы – Маканчи, Каратау и Акбулак.

Если предположить, что не существует азимутальных различий в чувствительности станций и во всех направлениях для одной магнитуды радиусы предельной регистрации одинаковы, то можно построить карту минимальной представительной магнитуды для всей территории Казахстана. (рисунок 8).

В настоящее время на всей территории не может быть пропущено, не обработано и не включено в бюллетень событие с минимальной магнитудой  $mrv=3,5-3,7$  и энергетическим классом  $K=8,5$ .

Эти расчеты подтверждаются и построенной по эмпирическим данным картой минимальных энергетических классов событий, которые вошли в интерактивный бюллетень сейсмических событий. Карта построена по следующей методике: для каждой ячейки размером  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$  выбирался минимальный энергетический класс из всех событий, попавших в ячейку. На рисунке 9 показана карта минимальных энергетических классов по данным станций ИГИ. На карте четко видны области, связанные с сейсмическими группами Маканчи, Каратау, Акбулак. Видно, что их магнитудная чувствительность очень высока. Вблизи групп имеют место события с энергетическими классами менее 2. По мере роста расстояния уровень класса растет. Видно, что на всей территории нет областей, где бы минимальный энергетический класс превышал 9 или 10. Это соответствует выводами, что сеть ИГИ контролирует сейсмичность Казахстана по всей территории с уровня  $K=8,5$ . На Северном Тянь-Шане и вблизи групп этот уровень значительно ниже. Это позволяет получить необходимые для научных исследований по сейсмической опасности и прогноза землетрясений материалы и представлять их в ИС, ДЧС с необходимой для этих целей оперативностью и точностью.

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ СЕЙСМИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ В МОНИТОРИНГЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ТЕРРИТОРИИ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ

Таблица 2. Регистрация минимальных магнитуд на разных расстояниях по станциям Маканчи и Узун-Булак

	MKAR	UZB	MKAR	UZB	MKAR	UZB	MKAR	UZB
Магнитуда	1	1	2	2	3	3	4	4
Дистанция, км	111	-	475	106	997	510	1672	1125

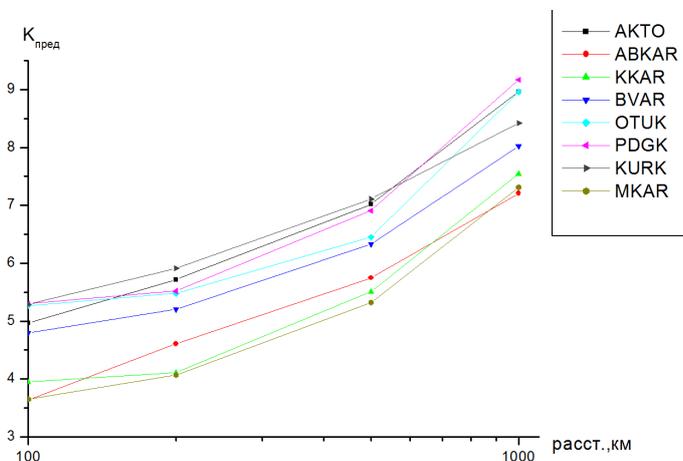


Рисунок 7. Графики представительной регистрации  $K$  сейсмических групп и трёхкомпонентных станций ИГИ на региональных расстояниях

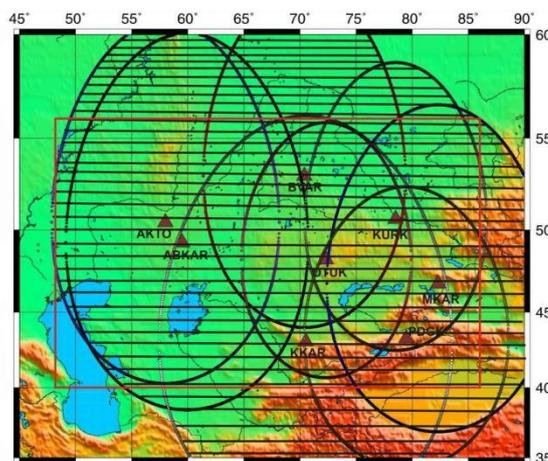


Рисунок 8. Карта областей представительной регистрации землетрясений с  $K = 8.5$  сейсмическими группами и трёхкомпонентными станциями ИГИ

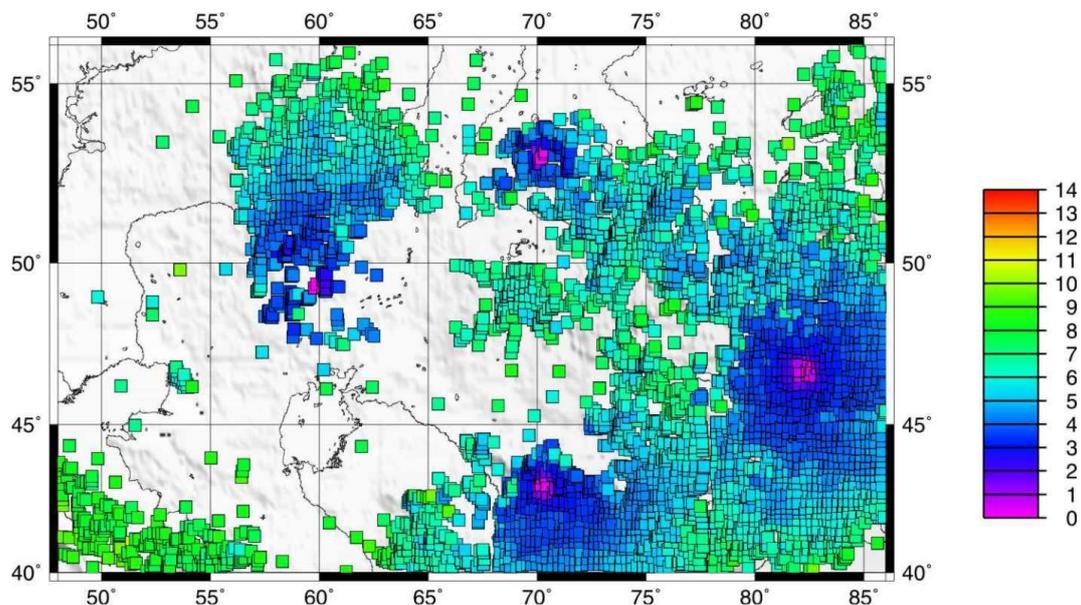


Рисунок 9. Карта минимальных энергетических классов  $K$  по данным интерактивного сейсмического бюллетеня КНЦД

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что по разным характеристикам наиболее эффективными для сейсмического мониторинга Казахстана являются сейсмические группы ИГИ Маканчи, Каратау, Акбулак. Всей сетью станций ИГИ обеспечена представительная регистрация на территории страны земле-

трясений и взрывов с минимальной магнитудой 3.5, энергетическим классом 8.5. Именно сеть станций ИГИ позволила зарегистрировать события в районах, считавшимися асейсмичными, и показать наличие среди сейсмических событий землетрясений техногенной природы, например, на месторождении Тенгиз.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Синёва, З.И. Оценка эффективности сейсмической группы PS23-Маканчи при регистрации региональных и телесеизмических событий / З.И. Синёва, Н.Н. Михайлова // Вестник НЯЦ, 2004. – Вып. №2 (18). – С. 15–22.
2. [Электронный ресурс] : <http://www.kndc.kz/> – Сайт Казахстанского Национального Центра Данных.
3. Абаканов, А.Т. Проявления техногенной сейсмичности на нефтяных и газовых месторождениях республики казахстан (на примере месторождения Тенгиз) / А.Т. Абаканов, Д.В. Казаков, Н.О. Нуржумаев, А.Ж. Жараспаев, А.Т. Данабаев // Материалы докладов VIII Международной конференции молодых ученых и студентов «Современные техника и технологии в научных исследованиях». г. Бишкек. 2016. – С 3–7.
4. Синёва, З.И. Участие Казахстанского национального центра данных в оценке эффективности сейсмического мониторинга в рамках ОДВЗЯИ / З.И. Синёва, Н.Н. Михайлова // Мониторинг ядерных испытаний и их последствий: тезисы докладов. VI Междунар. конф., Курчатов, 09–13 авг.2010. – Курчатов: НЯЦ РК, 2010. – С. 37.

### **ОРТАЛЫҚ АЗИЯ АУМАҒЫ ЖЕРСІЛКІНУЛЕРІНІҢ МОНИТОРИНГІСІНДЕ СЕЙСМИКАЛЫҚ СТАНЦИЯЛАРДЫҢ ТИІМДІЛІГІ**

**П.В. Рябенко, Н.Н. Михайлова**

*Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатов, Қазақстан*

Қазақстандық ұлттық деректер орталығында (ҚҰДО) тәулік бойлық режимінде нақты уақытында ҚР ЭМ ГЗИ барлық станцияларынан деректерді жинауы және оларды Халықаралық деректер орталығына жіберуі жүргізіледі. Өңдеу нәтижелері бойынша әр түрлі жеделдігінде оқиғалардың сейсмикалық бюллетеньдері қалыптастырылады: жедел хабарламалар бюллетені, автоматты бюллетень, интерактивті бюллетень, Қазақстанның екі бақылау желілерінің – ҚР ЭИ ГЗИ және ҚР БҒМ СТӘЭ – деректері бойынша жинақы сейсмологиялық бюллетені.

### **SEISMIC STATIONS EFFECTIVENESS IN EARTHQUAKE MONITORING OF CENTRAL ASIA TERRITORY**

**P.V. Ryabenko, N.N. Mikhailova**

*Institute of Geophysical Research, Kurchatov, Kazakhstan*

Kazakhstan Data Centre compiles several types of seismic bulletins. The contribution of RSE IGR and SEME MES RK stations into the joint operative bulletin is assessed. The most effective are seismic arrays Makanchi and Karatayu located in seismically active regions of Kazakhstan. For the West Kazakhstan, the significant role of Akbulak station (seismic array) and Aktyubinsk station is noted as the stations contribute much into the monitoring of induced events at oil and gas field deposits.

УДК 550.344

**ИЗМЕНЕНИЕ В СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКЕ  
В РАЙОНЕ ПЛОЩАДКИ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО АТОМНОГО РЕАКТОРА ВВР-К ИЯФ  
ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗУЧЕНИЯ МЕХАНИЗМОВ ОЧАГОВ ПОСЛЕДНИХ ЛЕТ**

Узбеков А.Н., Полешко Н.Н.

*Институт геофизических исследований, Курчатов, Казахстан*

В работе представлены результаты исследования сейсмоструктурной деформации в районе площадки размещения атомного реактора ВВР-К ИЯФ вблизи г. Алматы. Одним из важнейших способов получения информации о напряженно-деформированном состоянии глубинных частей земной коры является изучение механизмов очагов. По результатам мониторинга сейсмичности за 2015 г. составлен каталог механизмов очагов, содержащий более 250 землетрясений. Изучены параметры землетрясений, построены механизмы очагов, составлена карта типов подвижек землетрясений. Сделаны выводы о сейсмической обстановке в районе реактора ВВР-К ИЯФ.

В Казахстане объектами повышенной опасности является ряд исследовательских атомных реакторов, в том числе площадка размещения атомного реактора ВВР-К ИЯФ вблизи г. Алматы. Согласно карте общего сейсмического районирования (ОСР) территории Казахстана [1], действующей и в настоящее время, площадка реактора ИЯФ находится вблизи сейсмогенерирующей зоны с магнитудой от 6,6 до 7,0, где возможны сотрясения с интенсивностью 9 баллов по шкале MSK-64 (рисунок 1).

Таким образом, зона расположения площадки реактора ИЯФ с одной стороны характеризуется высокой плотностью населения и промышленных объектов, с другой стороны, высокой сейсмической активностью земной коры. Поэтому оценка сейсмострук-

турного деформирования в зоне расположения площадки реактора будет иметь важное практическое значение в связи с оценкой сейсмобезопасности объекта атомной отрасли. Одним из важнейших способов получения информации о напряженно-деформированном состоянии глубинных частей земной коры до сих пор является изучение механизмов очагов. В работе [2] было показано, что в обширном регионе, простирающемся от Таримской до Прибалхашской впадины в 2015 г. по данным механизмов очагов сложилась аномальная обстановка НДС. Представляется важным оценить ситуацию в более локальной зоне, в которой возникновение сильного землетрясения может оказать ощутимое воздействие на площадке размещения атомного реактора ИЯФ.

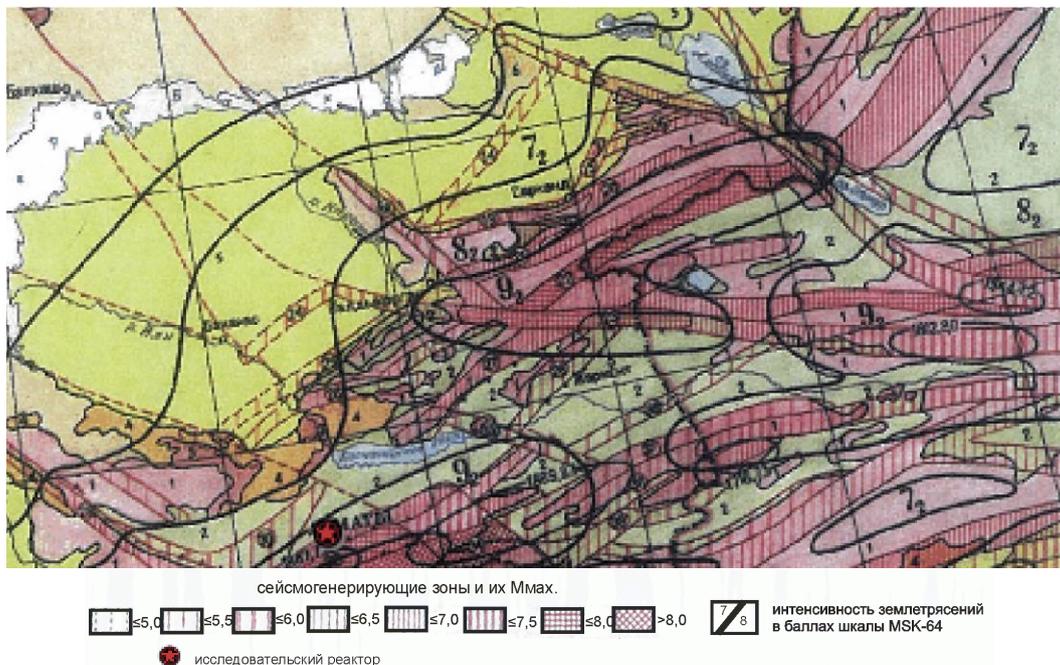
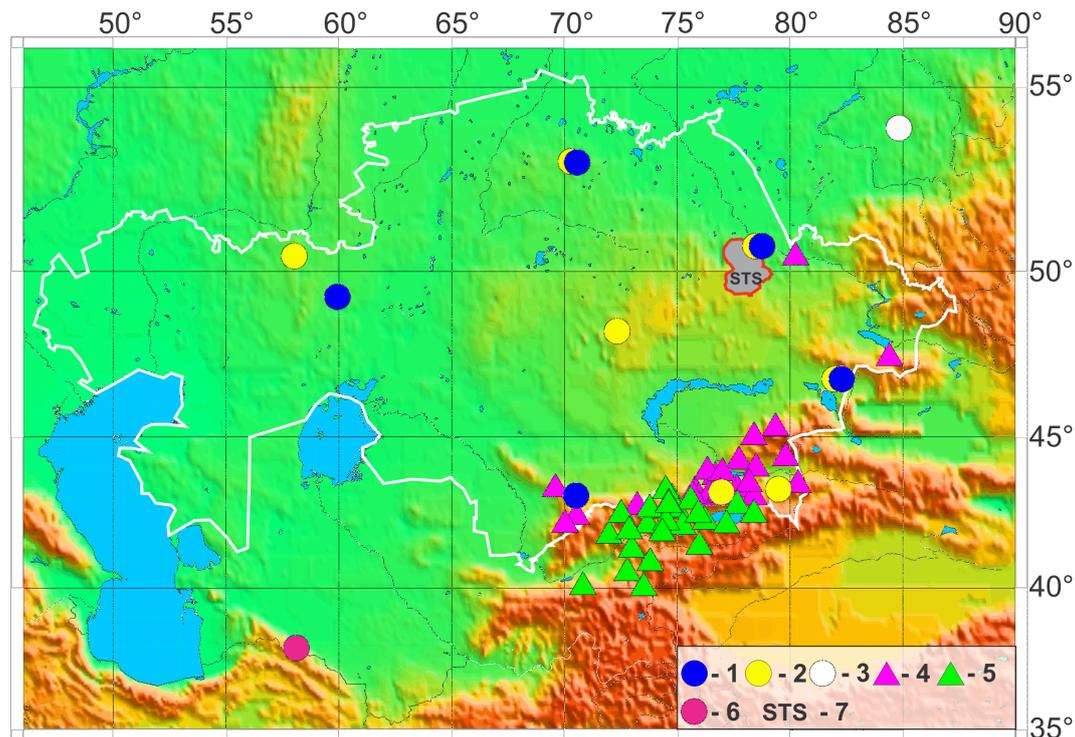


Рисунок 1. Размещение площадки атомного реактора ВВР-К ИЯФ на фрагменте карты общего сейсмического районирования



1 – сейсмические группы РГП ИГИ, 2 – трехкомпонентные станции РГП ИГИ, 3 – сейсмическая группа Залесово (Россия), 4 – сейсмические станции СОМЭ МОН РК, 5 – сейсмические станции КР, 6 – сейсмическая группа Алибек (Туркмения), 7 – территория бывшего СИП

Рисунок 2. Карта сейсмических станций

### ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Для массового определения механизмов очагов используются записи землетрясений, полученные существующими в регионе сейсмическими станциями сетей Казахстана и Кыргызстана.

На территории Казахстана функционируют две сети сейсмических станций (рисунок 2): сейсмологической опытно-методической экспедиции (СОМЭ) и Института геофизических исследований (ИГИ). Постоянные сейсмические наблюдения в районе Северного Тянь-Шаня, где находится реактор ИЯФ, уже несколько десятилетий проводится сейсмическими станциями сети сейсмологической опытно-методической экспедиции РК, большинство которых расположено вдоль хребтов Северного Тянь-Шаня.

Цифровая сеть сейсмических станций РГП ИГИ (рисунок 2) создана в последние десятилетия, основными задачами этой сети является мониторинг ядерных испытаний и землетрясений во всем мире. Сейсмические станции РГП ИГИ характеризуются отличными условиями регистрации сейсмических сигналов, определяемыми низким уровнем сейсмических шумов в районе их расположения, а также расположением приборов в скважинах.

Между центрами обработки СОМЭ и ИГИ проводится обмен данными: как сведениями о первых

вступлениях на записях землетрясений, так и результатами построения механизмов очагов.

В Центре данных ИГИ проводится определение механизмов очагов относительно сильных землетрясений с энергетическим классом  $K \geq 9$ , которые несут более надежную информацию о напряженно-деформированном состоянии земной коры. Однако предыдущие исследования показали, что по статистике слабых событий, также можно достаточно уверенно получать сведения о характере НДС [3]. Данные этих землетрясений несут информацию о характере НДС в зонах, где отсутствуют сильные землетрясения, поэтому для исследования привлечены данные землетрясений всего энергетического диапазона.

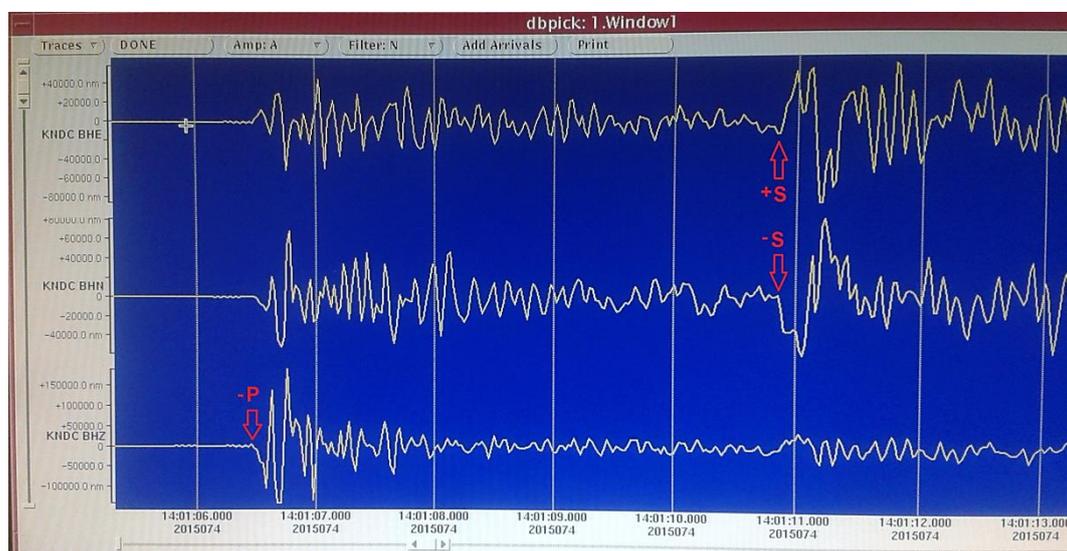
Всего за период наблюдения с 1969 г. до 2014 г. собраны параметры механизмов очагов 7172 землетрясений в широком диапазоне энергетических классов от  $K_p=6$  до  $K_p=12$ , что составляет 44% от всех землетрясений, зарегистрированных в исследуемом районе за этот период. По результатам мониторинга сейсмичности за 2015 г. получены параметры механизмов очагов более 250 землетрясений. Анализ распределения землетрясений с определенными механизмами по энергетическим классам показывает превалирование слабых землетрясений с  $K < 12$ , они составляют 99,7%.

### МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЗМОВ ОЧАГОВ

Определение фокальных механизмов в Казахстане производится на основе моделирования очага в рамках теории дислокаций с использованием программы Масаки Накамура [4] по знакам первых вступлений P- и S- волн. На первом этапе проводится анализ записей зарегистрированных сейсмических событий, в результате которого устанавливается возможность надежного определения достаточного количества знаков первых вступлений волн (не менее 6). Точность определения параметров индивидуальных механизмов оценивается степенью допустимых вариаций положения нодальных линий на фокальной сфере в поле экспериментально определенных знаков первых вступлений волн. Отсюда следует важность надежного определения знаков первых вступлений волн на записях землетрясений станция-

ми сетей, а также достаточно большого числа регистрирующих станций и хорошего окружения ими эпицентров. Надежными являются решения механизмов очагов, в которых вариации определяемых параметров не превышают  $20^\circ$ , а значение согласованности знаков первых вступлений составляет не менее 80% [5].

Пример записи землетрясения с четкими вступлениями волн показан на рисунке 3. Здесь демонстрируется запись землетрясения, полученная на сейсмической станции ИГИ «KNDC», расположенной на территории Центра данных в городе Алматы. Из представленной на рисунке записи следует, что станции ИГИ, даже в черте города с высоким уровнем промышленных помех, позволяют получить надежные сведения о направлении первых вступлений P- и S-волн, что обеспечивает надежность решений механизмов очагов.



Снизу-вверх записи на каналах «Z», «N» и «E»

Рисунок 3. Пример записи землетрясения станцией KNDC

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ В РАЙОНЕ РАЗМЕЩЕНИЯ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО РЕАКТОРА ВВР-К ИЯФ В 2015 Г. ПО ДАННЫМ МЕХАНИЗМОВ ОЧАГОВ

Площадка реактора ИЯФ расположена в районе, наиболее изученном как сейсмологическими, так и геолого-геофизическими методами. В целом исследуемый район по данным фоновых значений сейсмотектонического деформирования, полученных по механизмам очагов за 1969-2005 гг., характеризуется условиями горизонтального субмеридионального сжатия, под действием которого в очагах землетрясений реализуется взбросовый тип подвижки, свидетельствующий о воздымании пород земной коры [3]. Эти результаты согласуются с условиями деформирования земной коры в неотектонический этап акти-

визации тектонического процесса по геологическим данным. Данный факт свидетельствует о том, что сейсмотектонические деформации, полученные по материалам механизмов очагов землетрясений, отражают современную геодинамику района, и региональный характер деформирования пород практически не меняется на протяжении десятков тысяч лет.

Однако ранее было показано существование в исследуемом районе существенных пространственно-временных вариаций параметров механизмов очагов относительно фоновых значений [6]. Наблюдение таких вариаций способствует изучению и прогнозированию сейсмотектонического процесса, в частности, связанного с процессами формирования сильных землетрясений. Поэтому важно проводить мониторинг напряженно-деформированного состояния среды и сравнительный анализ этого состояния

с фоновыми значениями, а также с характером деформирования среды перед сильными землетрясениями.

Для характеристики напряженно-деформированного состояния территории в 2015 г. проведен анализ распределения землетрясений всего энергетического диапазона по типам подвижек, по ориентации осей главных напряжений, снимаемых в очагах, а также по пространственному распределению типов механизмов очагов.

#### ТИПЫ ПОДВИЖЕК

Для характеристики распределения землетрясений всего энергетического диапазона по типам подвижек проведена градация по трем группам: 1) взброс, 2) сброс, 3) сдвиг. В двух первых преобладают компоненты подвижек по падению плоскости разрыва, в последней – по простиранию разрыва. Взбросы (взбросо-сдвиги) реализуются в условиях напряжения горизонтального сжатия, сбросы (сбросо-сдвиги) – напряжения горизонтального растяжения.

Результаты, распределения землетрясений по типам подвижек в период наблюдения 2015 г. характеризует диаграмма на рисунке 4. Из представленной на рисунке диаграммы видно, что в исследуемом районе Тянь-Шаня по данным 2015 г. преобладают очаги со сбросовой подвижкой по падению плоскости разрыва, они составляют 57%, а на долю взбросов приходится только 38% случаев, 5% составляют сдвиги. По данным фоновых значений картина прямо противоположная: отмечается преобладание взбросов, составляющих 60%, сбросы составляют порядка 37%, сдвиги только 3-4% [3]. Причиной такого увеличения количества очагов со сбросовыми типами подвижек в исследуемом районе может быть миграция флюидов в земной коре, о чем упоминалось в ряде статей, в частности в работе, посвященной исследованию геодинамических процессов в очаговой зоне Байсорунского землетрясения 12 ноября 1990 года [7].

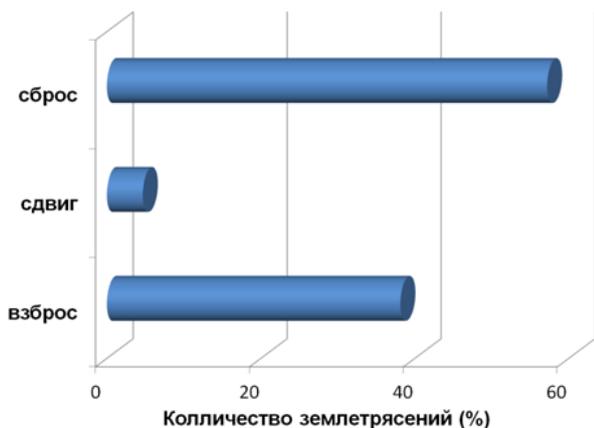


Рисунок 4. Диаграммы распределения очагов землетрясений разных энергетических диапазонов по типам подвижек

Таким образом, из результатов сопоставления преобладающих типов в очагах землетрясений текущего периода с фоновыми следует, что наблюдаемая ситуация распределения очагов по типам подвижек является аномальной, и не согласуется с региональными условиями горизонтального сжатия.

#### ОРИЕНТАЦИЯ ОСЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ

Для исследования ориентации главных напряжений в очагах землетрясений были построены векторные диаграммы частот повторения азимутов и углов наклона к горизонту осей главных напряжений в очагах землетрясений 2015 года (рисунок 5а, 5б).

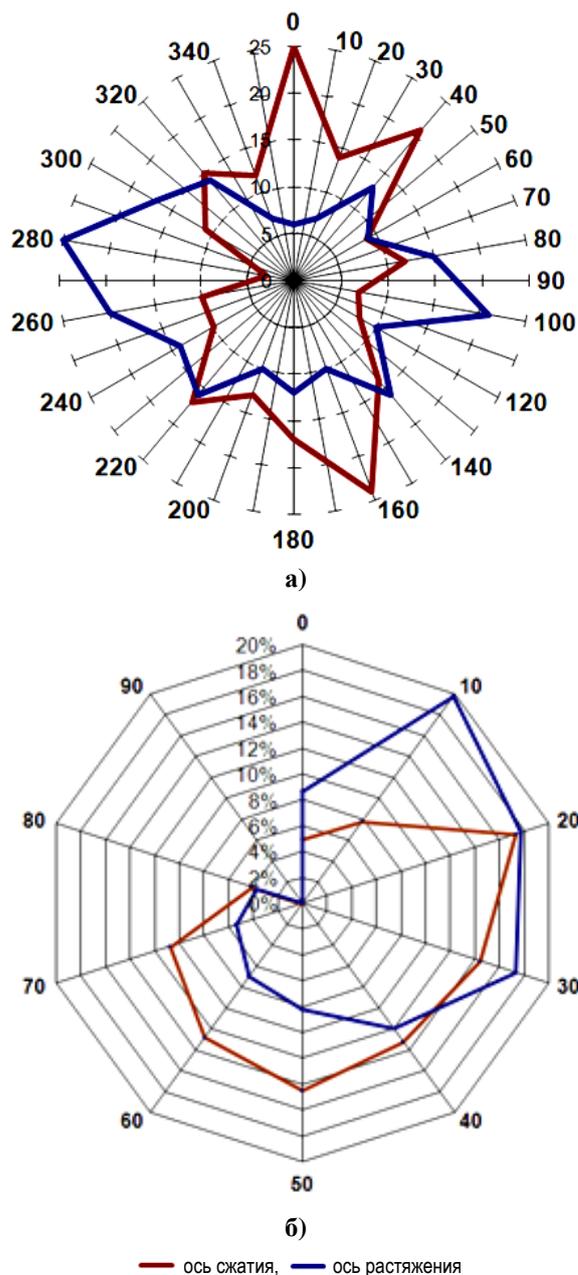


Рисунок 5. Диаграммы азимутов (а) и углов выхода (б) осей сжатия и растяжения по данным механизмов очагов 2015 г.

Анализ векторных диаграмм распределения азимутов осей свидетельствует о превалировании субмеридионального направления осей напряжения сжатия и субширотного направления осей растяжения, что соответствует данным по фоновым значениям [3].

Результаты, полученные по значениям углов наклона к горизонту осей главных напряжений (рисунок 5б), свидетельствуют, что и для оси сжатия, и для оси растяжения четки максимумы выделяются в диапазоне 0–30°. Причем, для оси сжатия в диапазоне 0–30° находится только 39% значений, т.е. под действием близгоризонтального сжатия реализовалось около 40% очагов. В то же время для оси растяжения в диапазоне 0–30° находится 55% значений, из чего следует, что более половины всех очагов реализовалось в условиях горизонтального растяжения. Данный факт позволяет утверждать, что в 2015 г. превалируют аномальные для региона условия близгоризонтального растяжения.

Таким образом, результаты исследования показывают, что в 2015 г. режим деформирования земной коры исследуемого региона характеризуется преимущественно субширотным растяжением, вдоль основных рельефообразующих структур и, в меньшей степени сжатием в крест их простираения. Наблюдаемый в текущем периоде характер напряженно-деформированного состояния земной коры контрастно отличается от фоновых характеристик и не соответствует условиям регионального сжатия.

Отметим, что высокая активность сильных землетрясений в районе Северного Тянь-Шаня наблюдается в периоды, когда на долю взбросов, реализующихся в условиях горизонтального сжатия, прихо-

дится 70% очагов землетрясений [6] (рисунок 6). Из чего следует, что в текущий период аномально низкого количества землетрясений со взбросовой подвижкой и аномально большого количества сбросовых очагов, реализующихся в условиях горизонтального растяжения, возникновение сильного землетрясения маловероятно.

#### ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТИПОВ МЕХАНИЗМОВ ОЧАГОВ

Важным для прогноза места возможного возникновения землетрясения является распределение типов механизмов очагов в пространстве. По данным фоновых характеристик характерным для региона является мозаичное распределение по площади всех типов механизмов очагов, с превалированием взбросов и взбросо-сдвигов. Прогнозным признаком является формирование зон, в которых концентрируются очаги с контрастным типом подвижек [6].

Формирование таких контрастно-деформированных зон намечается в 2015 году (рисунок 7). Из рисунка видно, что большинство очагов землетрясений в 2015 г. характеризуется сбросовым типом подвижек. Причем очаги этого типа сконцентрированы преимущественно в локальной зоне в восточной части территории между двумя разломами северо-западного простираения. На западной границе этой зоны вдоль северо-западного разлома, секущего хребты Тянь-Шаня западнее Алматы, отмечается концентрация преимущественно взбросовых типов очагов землетрясений. Они образуют относительно небольшую вытянутую вдоль разлома локальную зону, однако в этой зоне реализовались наиболее сильные землетрясения периода.

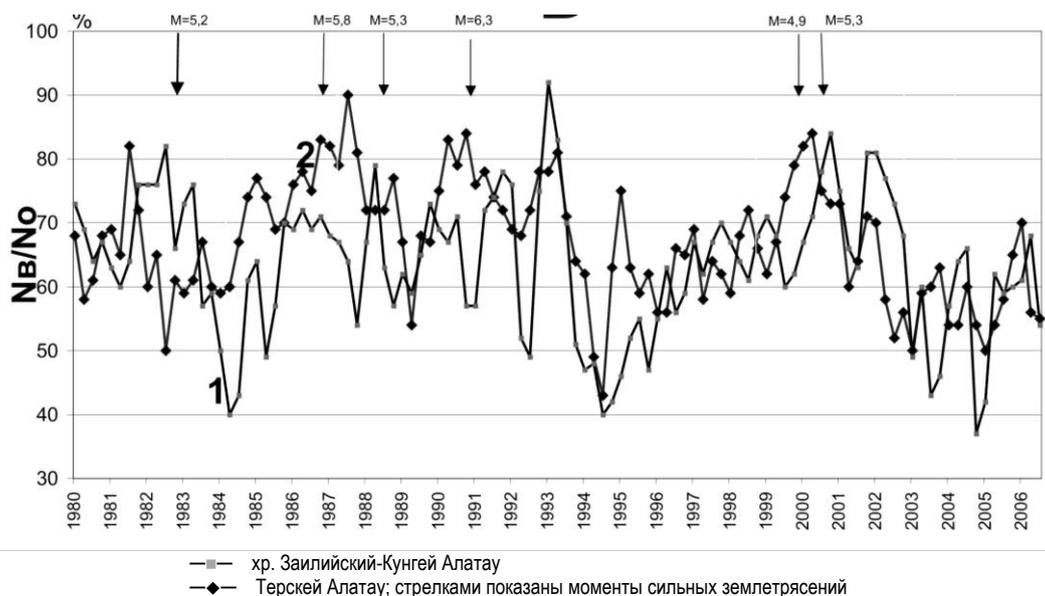


Рисунок 6. Изменение во времени относительного числа землетрясений со взбросовой подвижкой к общему числу землетрясений из [6]

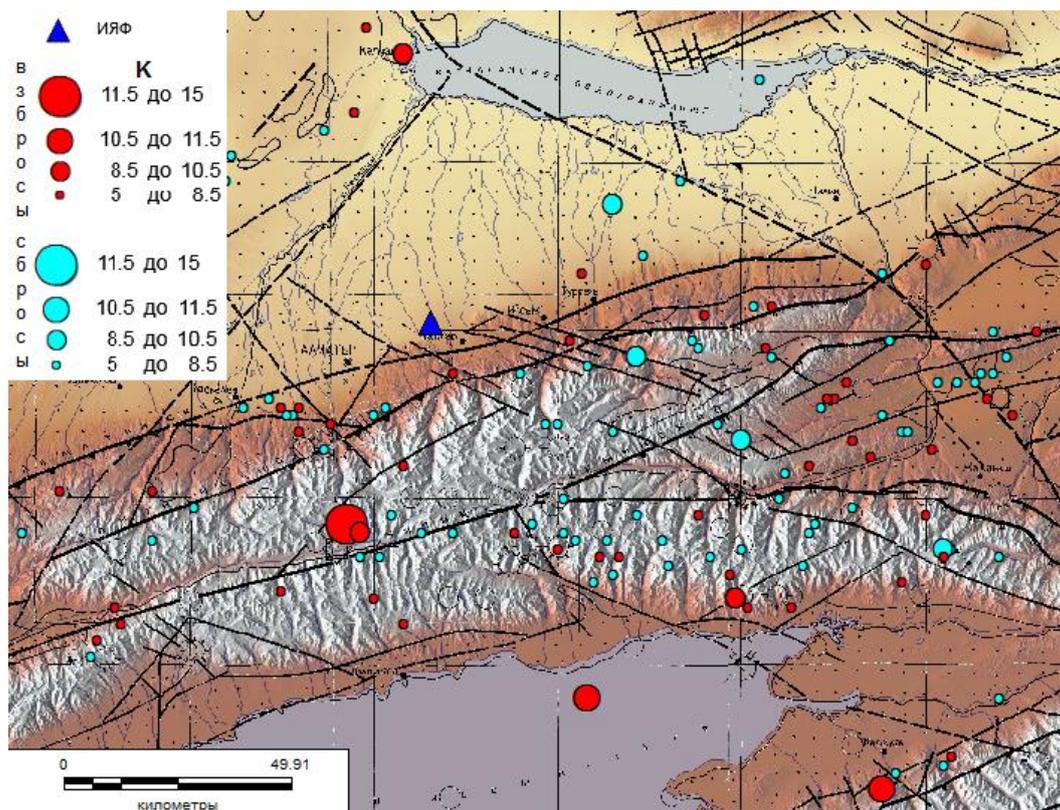


Рисунок 7. Карта распределения по площади очагов землетрясений с разным типом механизмов в 2015 г.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В результате проведенного анализа данных механизмов очагов землетрясений установлено изменение режима напряженно-деформированного состояния в исследуемом районе. Одной из причин такого перераспределения поля сейсмоструктурного деформирования, как показано в ряде работ может быть изменение флюидного режима в земной коре, сопровождаемое изменением структуры поля поглощения поперечных волн [7, 9, 10]. Увеличению сбросовых подвижек соответствуют высокие значения поля поглощения поперечных волн, увеличению взбросовых подвижек в очагах – низкие значения поля поглощения поперечных волн. Наблюдаемое в настоящее время увеличение сбросов в очагах землетрясений согласуется с образованием зон высокого поглощения в восточной и западной частях Тянь-Шаня [11]. Отметим, что в условиях растяжения, отмечающихся в текущем периоде, реализация сильных землетрясений в регионе не отмечалась. Однако, в такие периоды возможно происходит подготовка очагов будущих землетрясений.

С другой стороны, о возможной подготовке очага землетрясения, может свидетельствовать формирование в текущем периоде контрастно деформированных зон вдоль структур северо-западного простирания. В восточной части, где преобладают сбросы, деформирование пород характеризуется растяжением вдоль простирания хребтов Тянь-Шаня. В

западной части территории, где преобладают взбросовые подвижки в очагах, деформирование характеризуется сжатием в крест простирания хребтов. Граница, между двумя зонами с преобладанием контрастных типов подвижек, проходит вблизи г. Алматы. Формирование контрастно-деформированных зон создает опасную ситуацию, поскольку в сплошной среде компоненты деформации соседних точек взаимосвязаны, несовместность сейсмоструктурной деформации компенсируется дополнительными внутренними упругими деформациями и напряжениями. При склонности материала области к разрушению, связанной с развитием ослабленных зон, неблагоприятная ориентация внутренних напряжений может инициировать разрушение, т. е. возникновение землетрясения вблизи границ между контрастно деформированными зонами [8]. Реализация сильного землетрясения происходит через 3–4 года после начала формирования таких зон [3]. Из чего следует, что хотя в настоящее время в условиях напряженно-деформированного состояния, характеризующихся растяжением, реализация сильного землетрясения маловероятна, ситуация может стать опасной в дальнейшем. Поскольку по имеющимся данным о периодичности вариаций сейсмоструктурных вариаций [6, 10] после наблюдаемого спада наступит рост количества взбросов, именно в такой период наиболее вероятно реализация сильнейших землетрясений. В случае увеличения количества взбросов до 70% и

сохранения в этот период контрастно деформированных зон вероятность возникновения сильного землетрясения может сильно увеличиться.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для оценки метода изучения напряженно-деформированного состояния земной коры по данным механизмов очагов в районах размещения объектов атомной отрасли в связи с сейсмобезопасностью в районе размещения исследовательского реактора ИЯФ был проведен сравнительный анализ НДС земной коры в 2015 г. с фоновыми характеристиками и характеристиками перед реализацией сильных землетрясений. По результатам выполненных в ИГИ РК работ по анализу данных механизмов очагов выявлена аномальная ситуация напряженно-деформированного состояния земной коры в районе размещения исследовательского реактора ИЯФ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Курскеев, А.К. Общее сейсмическое районирование территории Казахстана / А.К. Курскеев, А.В. Тимуш, А.С. Сыдыков, В.И. Шацков // Карта ОСР территории Казахстана. Объяснительная записка. – Алма-Ата, 2003. – С. 84.
2. Полешко Н.Н., Досайбекова С. Сейсмоструктурная обстановка по данным механизмов очагов землетрясений Джунгаро-Северо-Тянь-Шаньского региона Казахстана // Вестник АО «КазНИИСА» Наука –2016. –№4(9). –25–33.
3. Полешко, Н. Н. Механизмы очагов землетрясений и сейсмоструктурная деформация земной коры Северного Тянь-Шаня и Жонгарии: дис... канд. г.м. наук: 25.00.10: защищена 24.04.2009; утв. 07.10.2009 / Н.Н. Полешко // Алматы, 2009. – С. 135.
4. Masaki, N. Determination of focal mechanism solution using initial motion polarity of P and S waves / N. Masaki // Physics of the Earth and Planetary Interiors. – 2002. – 130. – P. 17–29.
5. Ризниченко, Ю.В. Проблемы сейсмологии / Избранные труды. – М.: Наука, 1985. – 406 с.
6. Михайлова, Н.Н., Полешко Н.Н. Временные вариации параметров механизмов очагов в сейсмоактивных регионах / Н.Н. Михайлова, Н.Н. Полешко // Промышленность Казахстана. – 2008. – №1(46). – С. 39–42.
7. Копничев, Ю.Ф. Геодинамические процессы в очаговой зоне Байсорунского землетрясения 12 ноября 1990 года (Северный Тянь-Шань) / Ю.Ф. Копничев, Н.Н. Михайлова // Доклады РАН. – 2000. Т. 373. – С.93–97.
8. Юнга, С. Л. О механизме деформирования сейсмоактивного объема земной коры / С.Л. Юнга // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1979. – № 10. – С.14–23.
9. Михайлова, Н.Н., Полешко Н.Н. Тензоры моментов центридов и механизмы очагов землетрясений Центральной Азии / Н.Н. Михайлова // Изв НАН РК. Сер. геол. – 2007. – №6 (410). – С.87–90.
10. Полешко, Н.Н., Сейсмоструктурная деформация и добротность среды на Северном Тянь-Шане: связь с вариациями солнечной активности. / Н.Н. Полешко, Ю.Ф.Копничев, А.Б. Садыкова, Г.Я. Хачикян, И.Н. Соколова // Тезисы докладов пятого международного симпозиума «Современные проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов» к 75-летию со дня рождения Ю.А. Трапезникова. Бишкек. 2011. Том.1. – С. 272–275.
11. Копничев, Ю.Ф. Об активизации сейсмичности в регионе Центральной и Южной Азии после Макранских землетрясений: возможное ускорение подготовки сильных сейсмических событий в районе Тянь-Шаня/ Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Доклады РАН. – 2015. – С. 101–112.

### СОҢҒЫ ЖЫЛДАРДЫҢ ОШАҚ МЕХАНИЗМДЕРІН ЗЕРДЕЛЕУ НӘТИЖЕЛЕРІ БОЙЫНША ЯФИ ВВР-К ЗЕРТТЕУЛІК АТОМДЫҚ РЕАКТОРЫ АЛАҢЫНЫҢ АУДАНЫНДА СЕЙСМОТЕКТОНИКАЛЫҚ ЖАҒДАЙЫНДА ӨЗГЕРІСТЕР

А.Н. Өзбеков, Н.Н. Полешко

*Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатов, Қазақстан*

Жұмыста, Алматы қ. жанындағы ЯФИ ВВР-К атомдық реакторы орналасқан алаңның ауданында сейсмоструктуралық деформациясын зерттеу нәтижелері келтірілген. Жер қыртысының тереңдегі бөліктерінің кернеу-деформациялық күйі туралы ақпаратты алудың ең маңызды бір әдісі болып табылатыны – ошақ механизмдерін зерделу. 2015 ж. үшін сейсмикалықтың мониторингі нәтижелері бойынша 250 астам жерсілкінулердің ошақ механизмдерінің каталогы құрастырылған. Жерсілкінулердің параметрлері зерделенген, ошақтардың механизмдері салынған, жерсілкінулер жылжу типтерінің картасы жасалған. ЯФИ ВВР-К реакторы ауданындағы сейсмикалық жағдай туралы қорытындылар жасалған.

**CHANGE IN SEISMOTECTONIC CONDITIONS IN THE AREA OF PLATFORM RESEARCH NUCLEAR  
REACTOR VVR-K INP THE STUDY OF FOCAL MECHANISMS RECENT YEARS**

**A.N. Uzbekov, N.N. Poleshko**

*Institute of Geophysical Research, Kurchatov, Kazakhstan*

The results of the study seismotectonic deformation in the vicinity of the site of placement of the nuclear reactor VVR-K INP near Almaty. One of the most important ways of getting information about the stress-strain state of deep parts of the Earth's crust is the study of focal mechanisms. According to the results of monitoring of seismicity in 2015 the catalog of focal mechanisms, comprising more than 250 earthquakes studied parameters earthquake focal mechanisms are constructed, a map of the types of movements of earthquakes. The conclusions about the seismic situation in the area of reactor VVR-K INP.

УДК 550.344

**ЯДЕРНОЕ ИСПЫТАНИЕ В СЕВЕРНОЙ КОРЕЕ В 2016 ГОДУ**

Узбеков Р.Б., Сейнасинов Н.А.

*Институт геофизических исследований, Курчатов, Казахстан*

Основными задачами сети сейсмических и инфразвуковых станций ИГИ РК, является мониторинг ядерных испытаний. Станции успешно зарегистрировали все 4 северокорейских ядерных испытания (10.9.2006, 05.25.2009, 02.12.2013 и 01.06.2016). Диапазон эпицентральных расстояний от северокорейского ядерного полигона Пунгери составлял 3725–5375 км. Казахстанскому центру данных удалось с удовлетворительной точностью определить параметры взрывов в оперативном режиме. Для улучшения результатов обработки проведена перелокализация взрыва, произведенного 6 января 2016 г., после введения азимутальных поправок для сейсмических групп Акбулак, Курчатов-Крест и Маканчи. В результате уточнения параметров, координаты эпицентра взрыва значительно приблизились к решениям Международных Центров данных и к истинному положению штольни. Проведен сравнительный анализ кинематических и динамических параметров 4-х северокорейских испытаний по данным казахстанских сейсмических станций.

**ВВЕДЕНИЕ**

Основной задачей Казахстанской сети мониторинга ядерных испытаний, часть станций которой входит в со-став Международной сети мониторинга в поддержку ДВЗЯИ, является обнаружение, определение параметров и распознавание ядерных взрывов на региональных и телесеизмических расстояниях. 6 января 2016 года все сейсмические станции РГП ИГИ [1] зарегистрировали сигналы от события, источник которого находился на территории КНДР, в районе испытательного полигона Пунгери. Оперативная обработка этих данных проведена в Казахстанском национальном центре данных (КНЦД). Станции Казахстана расположены на довольно большом расстоянии от источника испытания, все они сконцентрированы в узком азимутальном секторе. Диапазон эпицентральных расстояний от станций Казахстана до эпицентра в КНДР составляет 3725–5375 км, диапазон азимутов составляет всего 13 градусов. В связи с этим, очень важным является тот факт, что все станции РГП ИГИ являются частью различных глобальных сетей и участвуют наравне с другими станциями в обнаружении сигналов и обработке записей этого взрыва в международных центрах данных. Естественно, что результаты обработки по мировым данным будут более точными и надежными, чем данные отдельных национальных сетей. Очень важным является также тот факт, что обмен данными происходит в автоматическом режиме в реальном времени, что позволяет получать результаты обработки очень оперативно.

В работе показано [2], что сейсмическое событие 6 января 2016 года из района полигона Пунгери с большой вероятностью является ядерным взрывом. Следует отметить, что это уже четвертый по счету ядерный взрыв КНДР [2-4], ранее взрывы были проведены 9 октября 2006 г., 25 мая 2009 г. и 12 февраля 2013 г.

**СИСТЕМА НАБЛЮДЕНИЯ И ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

На рисунке 1 представлена система регистрации казахстанскими станциями ядерного мониторинга события в КНДР 6 января 2016 г.

На всех станциях зарегистрирован четкий сигнал. Записи вертикальной компоненты 3-х компонентных широкополосных приборов (фильтр с 1.0-2.5 Гц) приведены на рисунке 2. Четко можно выделить только вступления продольных волн Р и РсР. Другие сейсмические фазы на записях отсутствуют.

**ПАРАМЕТРЫ СЕВЕРОКОРЕЙСКИХ ВЗРЫВОВ ПО ДАННЫМ РАЗЛИЧНЫХ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ ЦЕНТРОВ**

В таблице 1 представлены кинематические характеристики и магнитуа сейсмического события 6 января 2016 г. по станциям РГП ИГИ. Данные казахстанских станций в реальном времени поступают в ряд международных Центров данных (USGS, IDC, GFZ), где используются для оценки параметров источников в комплексе с другими сейсмическими станциями мира. Кроме того, для ряда международных сейсмологических агентств центр данных КНЦД высылает сейсмологические бюллетени с результатами обработки казахстанских станций (ISC, GSRAS, EMSC), которые используются для определения параметров сейсмических событий. В таблице 2 представлены результаты определения параметров северокорейского события различными международными сейсмологическими центрами с использованием данных казахстанских станций [5–8]. Там же представлены и результаты локализации в центре КНЦД, хотя априори можно было утверждать, что только по данным казахстанских станций точность локализации будет ниже, чем при использовании данных глобальных сетей наблюдений.

## ЯДЕРНОЕ ИСПЫТАНИЕ В СЕВЕРНОЙ КОРЕЕ В 2016 ГОДУ

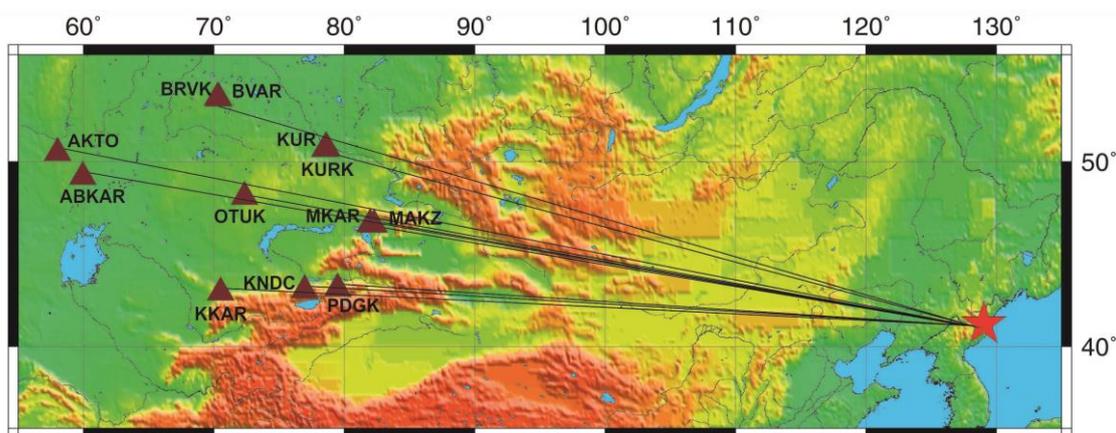


Рисунок 1. Карта расположения сейсмических станций ИГИ МЭ РК, записавших северокорейский ядерный взрыв. ★ – эпицентр взрыва

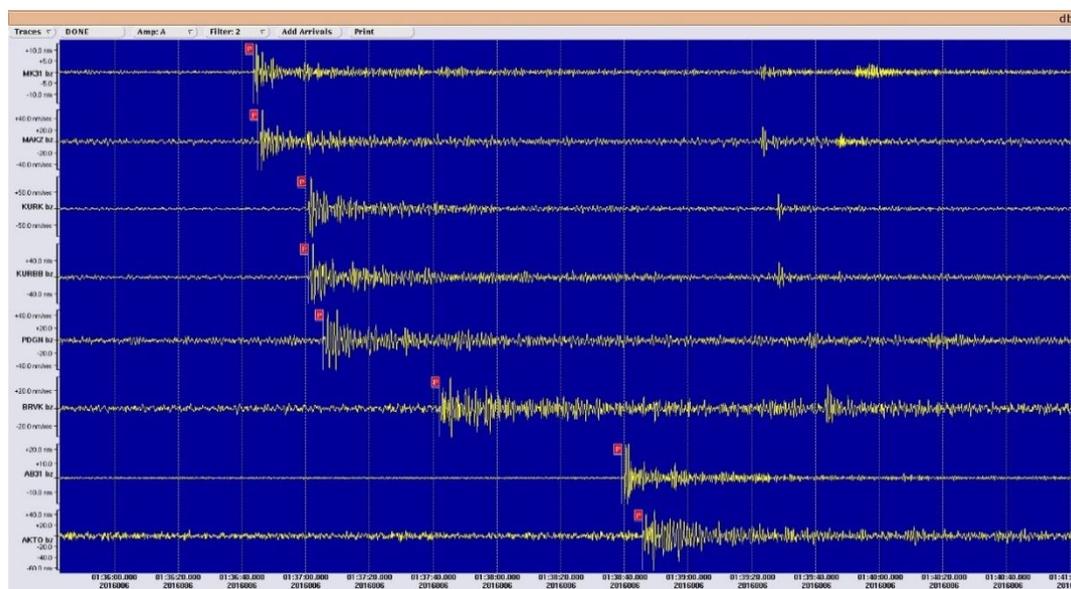


Рисунок 2. Запись взрыва 2016 г. станциями РГП ИГИ. Фильтр 1.0-2.5 Гц. Z-компоненты

Таблица 1. Кинематические и динамические характеристики сейсмических колебаний сейсмического события 6 января 2016 г.

Станция	$\Delta$ , км	Истинный азимут	$t_p$	mb
MKAR	3726	82.02	01:36:43.5	4.6
MAKZ	3749	81.36	01:36:44.8	4.6
KURK	3946	85.314	01:37:00.1	4.9
KUR	3953	85.12	01:37:00.1	4.8
PDGK	4017	75.70	01:37:04.8	4.7
KNDC	4217	74.45	01:37:21.7	5.2
OTUK	4434	78.13	01:37:37.4	4.4
BRVK	4489	82.44	01:37:41.7	4.5
AVKAR	5283	72.02	01:38:39.1	4.7
AKTO	5373	71.91	01:38:45.5	4.7

Примечание: цветом выделены станции, записавшие все четыре взрыва в Северной Корее

**ЯДЕРНОЕ ИСПЫТАНИЕ В СЕВЕРНОЙ КОРЕЕ В 2016 ГОДУ**

*Таблица 2. Параметры северокорейских взрывов по данным различных сейсмологических центров*

Дата	Источник	Время в очаге, чч:мм:сс.	Широта, с.ш.	Долгота в.д.	К-во станций	mб	Станции Казахстана, участвовавшие в обработке
10.09.2006	ГС РАН (Россия)	01:35:26.0	41.35	128.96	11	4.0	МКАР
05.25.2009	ГС РАН (Россия)	00:54:40.9	41.29	129.07	51	5.0	МКАР, KURK, VOS, BRVK, ZRNK, ABKAR, AKTO
02.12.2013	ГС РАН (Россия)	02:57:49.4	41.31	129.1	70	5.3	МКАР, MAKZ, KURK, PDGK, OTUK, BRVK, K KAR, ABKAR, AKTO
06.01.2016	ГС РАН (Россия)	01:29:59.0	41.28	129.09	39	5.2	МКАР, KURK, BRVK
10.09.2006	NEIC (США)	01:35:28.0	41.294	129.094	31	4.3	CHKZ, ZRNK, BRVK, МКАР
05.25.2009	NEIC (США)	00:54:43.3	41.306	129.029	75	4.7	МКАР, KURK, BRVK, BVAR, AKTO
02.12.2013	NEIC (США)	02:57:51.4	41.308	129.076	5.1	168	МКАР, MAKZ, KURK, BRVK, K KAR, ABKAR
06.01.2016	NEIC (США)	01:30:01.5	41.308	129.049	5.1	103	МКАР, MAKZ, BRVK, KURK, ABKAR
10.09.2006	IDC (REB)	01:35:27.6	41.312	129.019	22	4.1	МКАР
05.25.2009	IDC (REB)	00:54:42.8	41.311	129.046	59	4.5	МКАР, KUR, BVAR, AKTO
02.12.2013	IDC (REB)	02:57:50.8	41.301	129.065	51	4.9	МКАР, KUR, BVAR, AKTO
06.01.2016	IDC (REB)	01:30:00.5	41.304	129.048	83	4.8	МКАР, KURK, BVAR, AKTO
05.25.2009	EMSC (Франция)	00:54:44.5	41.31	128.98	126	4.8	МКАР, KURK, BRVK
02.12.2013	EMSC (Франция)	02:57:51.4	41.32	128.99	514	5.0	ABKAR, AKTO, BRVK, BVAR, K KAR, KURK, MAKZ, МКАР, OTUK, PDGK
06.01.2016	EMSC (Франция)	01:30:00.7	41.31	129.05	140	5.1	МКАР, MAKZ, KURK, BRVK, ABKAR
10.09.2006	КНЦД	01:35:30.7	41.105	128.518	6	3.9	KUR, ZRNK, VOS, CHKZ, BRVK, ABKAR
05.25.2009	КНЦД	00:54:43.2	41.386	129.139	11	4.5	МКАР, KURK, KUR, VOS, BRVK, BVAR, ZRNK, ABKAR, AKTO, CHKZ, KNDC, K KAR,
02.12.2013	КНЦД	02:57:53.3	41.554	128.997	12	4.7	ABKAR, AKTO, BRVK, BVAR, K KAR, KURK, KUR, MAKZ, МКАР, OTUK, PDGK, KNDC
06.01.2016	КНЦД (оперативное решение)	01:30:01.3	41.089	128.949	12	4.7	AKTO, ABKAR, BRVK, BVAR, K KAR, KUR, KURK, KNDC, MAKZ, МКАР, OTUK, PDGK
06.01.2016	КНЦД (с использованием поправок)	01:30:01.3	41.462	128.760	3	4.7	AKTO, ABKAR, BRVK, K KAR, KUR, KURK, MAKZ, МКАР, OTUK, PDGK, ZAL, MDO, AAK

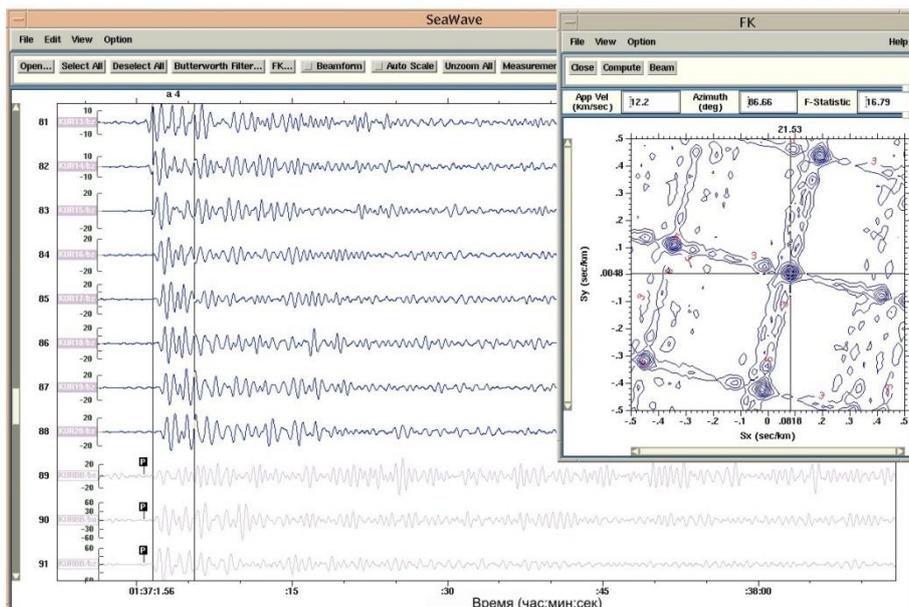
**Уточнение параметров локализации сейсмического события 6 января 2016 г.**

После оперативной обработки сейсмического события, для значительного количества событий проводится уточнение параметров локализации. Для этой задачи на региональных расстояниях добавляется большее количество станций, используется региональный или локальный годограф, SCSSI поправки, магнитудные, азимутальные поправки и др. Для сейсмического события в Северной Корее была проведена перелокализация с использованием азимутальных поправок по станциям, записавшим все 4 взрыва (таблица 1). В таблице 3 представлены результаты сравнения наблюденных и истинных азимутов на эпицентр взрывов по всем 4-м северокорейским взрывам. Найдены средние значения азимутальных поправок  $\delta AZ_{ср}$ . Определение расчетного

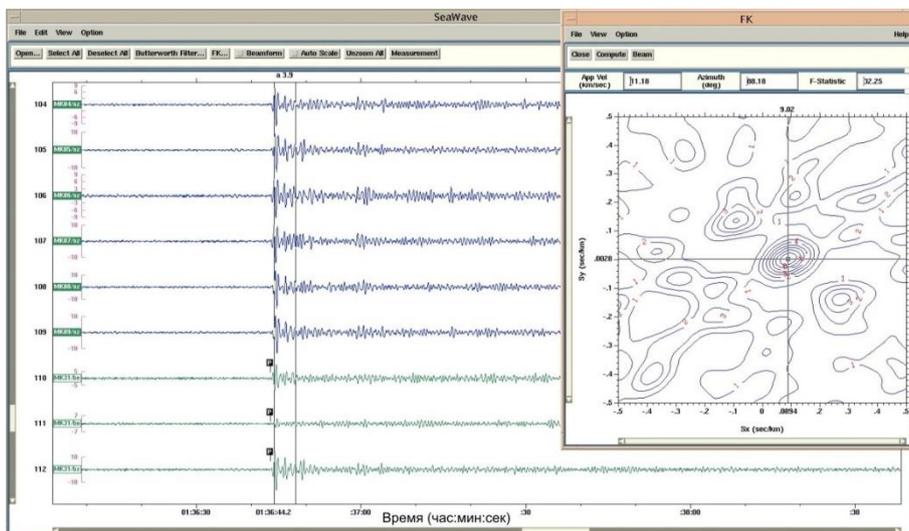
азимута на эпицентр проводилось при помощи fк-анализа, на рисунке 3 приведены результаты fк-анализа по сейсмическим группам Курчатов Крест и Маканчи. При помощи программного обеспечения SEATOOLS, после введения азимутальных поправок для сейсмических групп Акбулак, Курчатов-Крест и Маканчи проведена перелокализация взрыва, произведенного 6 января 2016 г. (рисунок 4). В результате уточнения параметров, координаты эпицентра взрыва сместились к юго-востоку от оперативного решения, и значительно приблизились к решениям Международных Центров данных и к истинному положению штольни (рисунок 5). Для аналитиков КНЦД, занимающихся круглосуточной обработкой данных в режиме реального времени сделаны рекомендации для уточнения определения координат событий из района Северной Кореи.

*Таблица 3. Результаты сравнения наблюденных и истинных азимутов на эпицентр взрывов*

Дата	Станция	Истинный азимут	Расчётный азимут, f-k анализ	$\delta AZ$	$\delta AZ_{ср}$
10.09.2006	ABKAR	72.07	75.27	-3.2	-3.175
05.25.2009		72.09	74.41	-2.32	
02.12.2013		72.04	75.95	-3.91	
01.06.2016		72.02	75.29	-3.27	
10.06.2006	MKAR	82.06	89.40	-7.34	-7.05
05.25.2009		82.07	89.64	-7.57	
02.12.2013		82.02	89.15	-7.13	
01.06.2016		82.02	88.18	-6.16	
10.06.2006	KURBB	85.14			-0.95
05.25.2009		85.16	85.66	-0.5	
02.12.2013		85.11	85.93	-0.82	
01.06.2016		85.12	86.66	-1.54	



а)



б)

Рисунок 3. Результаты fk-анализа по сейсмическим группам (а) – Курчатов Крест и (б) – Маканчи

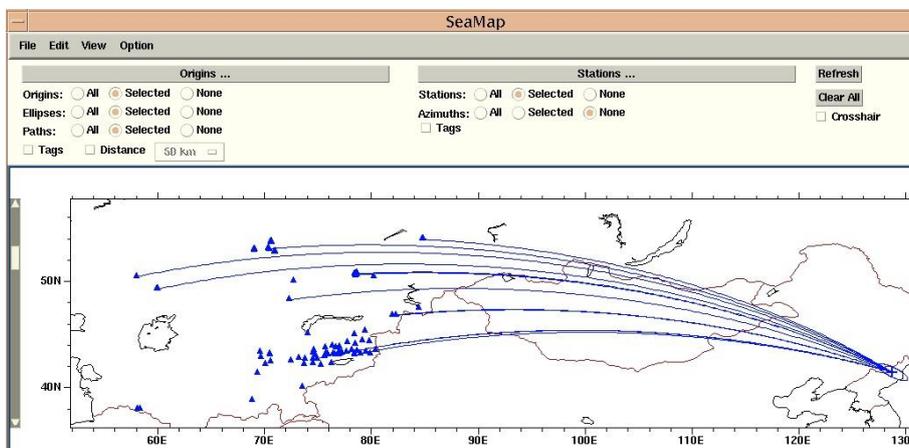


Рисунок 4. Система наблюдения и результат перелокализации Северо-Корейского взрыва 2016 г.

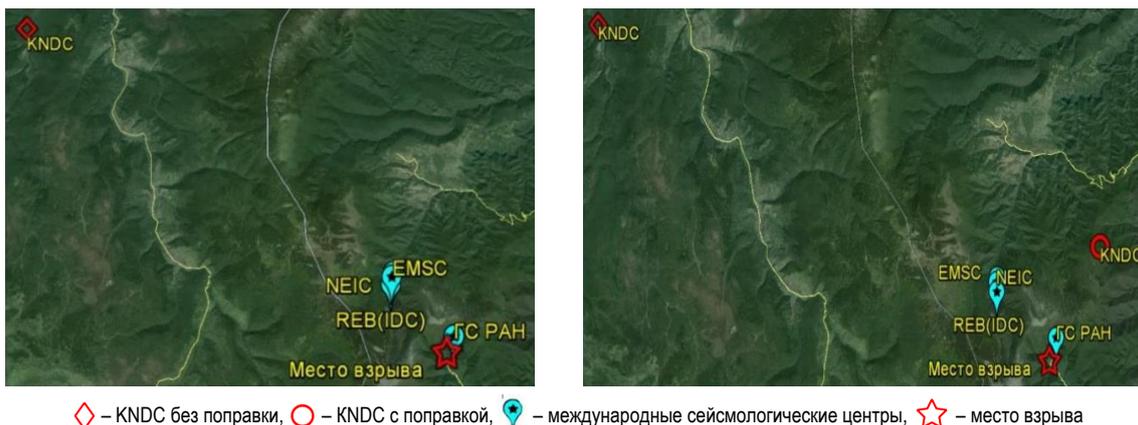
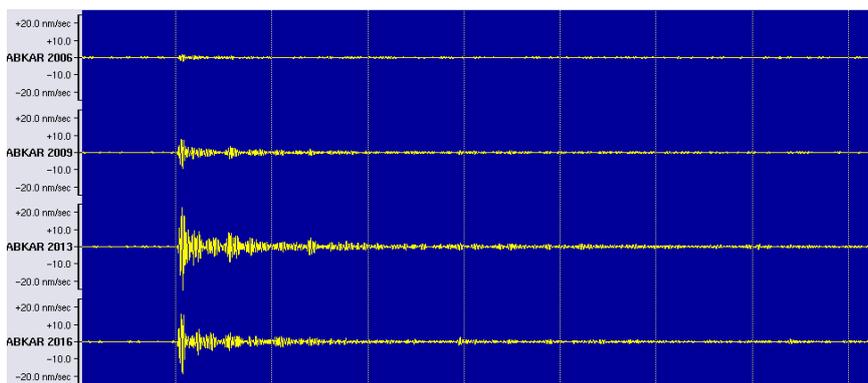


Рисунок 5. Координаты 4-го Северо-Корейского взрыва 2016 г. по данным различных международных центров

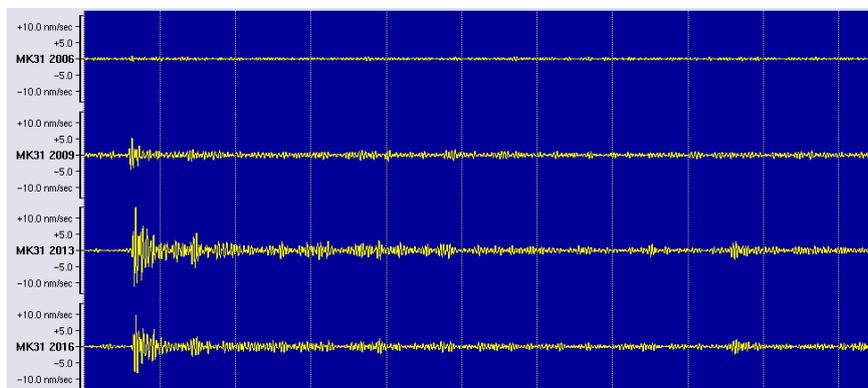
### ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЯДЕРНЫХ ИСПЫТАНИЙ В СЕВЕРНОЙ КОРЕЕ

Из станций сети РГП ИГИ три сейсмические группы – АВКАР (Акбулак в Западном Казахстане), МКАР (Маканчи в Восточном Казахстане) и Курчатов-Крест (в Восточном Казахстане близ бывшего Семипалатинского испытательного полигона) ранее зарегистрировали все три предыдущих северо-корейских взрыва. Большой интерес представляет сопоставление параметров записей северо-корейских взры-

вов по одним и тем же станциям сети с целью сравнения волновой картины и оценки относительной разницы магнитуд разных взрывов. На рисунке 6 представлены сейсмограммы северо-корейских взрывов по вертикальным компонентам элементов сейсмических группы АВКАР и МКАР. Обращает на себя внимание очень большое сходство всех записей от разных событий по одной и той же станции. Это может свидетельствовать о близости в пространстве источников и сходстве природы источников.



а) станция АВКАР



б) станция МКАР. Z-компонента

Рисунок 6. Сравнительный анализ северо-корейских ядерных испытаний по данным станций РГП ИГИ (трассы записей сверху-вниз: 9 октября 2006, 25 мая 2009, 12 февраля 2013, 6 января 2016 г.)

Таблица 4. Сравнение амплитуд колебаний по трем компонентам для трех ядерных испытаний по станциям Акбулак и Маканчи

Станции	1 взрыв, 2006 год			2 взрыв, 2009 год			3 взрыв, 2013 год			4 взрыв, 2016 год		
	N, nm	E, nm	Z, nm	N, nm	E, nm	Z, nm	N, nm	E, nm	Z, nm	N, nm	E, nm	Z, nm
ABKAR	0.5	0.5	0.8	1.0	2.1	3.4	1.8	6.1	8.4	1.4	3.7	5.2
MKAR	0.3	0.1	0.4	1.5	1.4	1.8	1.6	4.0	6.2	0.9	3.7	6.9
KUR	0.4	0.9	1.5				3.0	12.8	23.3	2.2	7.8	13.8

Таблица 5. Параметры четырех северокорейских испытаний по данным станций ABKAR, MKAR, KUR20

Дата	Станция	Азимут	$\Delta AZ$	Amp, nm	mb	mb-mb(2006)	mb-mb(NEIC)
10.09.2006	ABKAR	76.02	3.95	0.8	3.82	0	-0.5
05.25.2009		74.07	1,98	3.4	4.45	0.63	-0.3
02.12.2013		75.63	3.59	8.4	4.84	1.02	-0.3
01.06.2016		76.90	4.88	6.9	4.72	0.9	-0.4
10.06.2006	MKAR	89.17	7.11	0.4	3.48	0	-0.8
05.25.2009		89.41	7.34	1.8	4.17	0.69	-0.5
02.12.2013		89.6	7.58	6.2	4.67	1.19	-0.4
01.06.2016		88.69	6.67	5.2	4.56	1.08	-0.5
10.06.2006	KUR20*	85.39	0.25	1.2	3.54	0	-0.8
05.25.2009		85.52	0.36	2.0	4.1	0.56	-0.6
02.12.2013		85.55	0.44	7.8	4.6	1.06	-0.5
01.06.2016		85.04	1.56	5.8	4.4	0.86	-0.7

\* Элемент сейсмической группы Курчатов-Крест

В таблице 4 приведено сравнение амплитуд колебаний по трем компонентам для четырех ядерных испытаний по этим сейсмическим группам. Заметим, что во время регистрации 2-го взрыва трехкомпонентный элемент группы Курчатов-Крест KUR21 не работал, остальные элементы KUR01-KUR20 были исправны. По первым трем взрывам по всем станциям Казахстана наблюдается закономерное увеличение амплитуд сигналов, что свидетельствует о возрастании сейсмического эффекта взрывов, как следствие большей мощности – второй взрыв был сильнее первого, третий – сильнее второго. С этим связано и увеличение количества сейсмических станций, регистрирующих каждый последующий взрыв. Четвертый взрыв имеет несколько более слабый сигнал, чем третий взрыв.

Приращение магнитуд второго взрыва по сравнению с первым по всем трем станциям согласуется между собой и составляет  $mb(2009)-mb(2006)\sim 0.6$ , третьего со вторым  $mb(2013)-mb(2009)\sim 0.4$ ,  $mb(2016)-mb(2013)\sim 0.14$  (таблица 4). Четвертый взрыв оказался слабее третьего взрыва. Как следует из таблицы 5, его магнитуда  $mb$  в среднем на 0.14 единиц магнитуд меньше, чем у третьего взрыва [2].

Что касается сравнения магнитуды  $mb$  по станциям Казахстана с решениями других международных центров, наблюдается занижение магнитуд по станциям РГП ИГИ, что, возможно, связано с особенностью обработки в KNDC, а также с особенностью размещения регистрирующей аппаратуры сейсмических групп в скважинах. Например, по

сравнению с решением NEIC, занижение магнитуд  $mb$  составляет 0.4-0.7 (таблица 2).

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Четыре северокорейские ядерные испытания 9 октября 2006 г., 25 мая 2009 г., 12 февраля 2013 г., 6 января 2016 г. были успешно зарегистрированы как казахстанской сейсмической сетью, так и глобальными сейсмическими сетями. Все определения положения эпицентра взрывов в Международных центрах данных с участием аналитиков характеризуются высокой точностью в несколько километров и показывают, что эпицентры взрывов относятся к полигону ядерных испытаний в КНДР. Большое сходство записей этого взрыва с записями трех предыдущих, скорее всего, говорит о том, что это было ядерное испытание.

Для улучшения результатов обработки проведения перелокализация взрыва, произведенного 6 января 2016 г., после введения азимутальных поправок для сейсмических групп Акбулак, Курчатов-Крест и Маканчи. В результате уточнения параметров, координаты эпицентра взрыва значительно приблизились к решениям Международных Центров данных и к истинному положению штольни.

По данным казахстанских станций мониторинга определены характеристики волновых форм записей и рассчитаны приращения магнитуд для трех взрывов относительно первого. Последнее испытание наиболее близко по мощности к третьему испытанию, но незначительно уступает ему: магнитуда  $mb$  на 0,14 единиц меньше.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлова, Н.Н. Казахская система мониторинга Института геофизических исследований Национального ядерного центра и ее возможности / Н.Н. Михайлова, З.И. Синева, И.Н. Соколова // Сейсмопрогностические наблюдения на территории Азербайджана / РЦСС НАНА. – 2012. – С. 329–336.
2. Соколова, И.Н. О сейсмическом событии 6 января 2016 года в районе Северной Кореи / И.Н. Соколова, Н.Н. Михайлова // Вестник АО КАЗНИИСА. Наука. – 2016. – № 3. – С. 30–39.
3. Михайлова, Н.Н. Северокорейское ядерное испытание 9 октября 2006 г. по данным Казахской и глобальной систем мониторинга / Н.Н. Михайлова, И.Н. Соколова // Вестник НЯЦ РК, 2008. – Вып.1. – С. 17–26.
4. Михайлова, Н.Н. Северокорейское ядерное испытание 25 мая 2009 г. по данным казахстанской системы мониторинга / Н.Н. Михайлова // Вестник НЯЦ РК, 2009. – Вып. 3. – С. 17–21.
5. [Электронный ресурс]: // <http://www.isc.ac.uk>.
6. [Электронный ресурс]: <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/epic>.
7. [Электронный ресурс]: <http://www.ceme.gsras.ru/ccd.htm>.
8. [Электронный ресурс]: <http://www.emsc-csem.org>.

## 2016 ЖЫЛҒЫ СОЛТҮСТІК КОРЕЯДАҒЫ ЯДРОЛЫҚ СЫНАҚ

Р.Б. Узбеки, Н.А. Сейнасинов

*Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатов, Қазақстан*

ҚР ГЗИ сейсмикалық және инфрадыбыстық станциялары желісінің негізгі міндеттері болып табылатыны – ядролық сынақтардың мониторингі. Станциялар барлық 4 солтүстіккореялық ядролық жарылыстарды табысты тіркеген (10.9.2006, 05.25.2009, 02.12.2013 және 01.06.2016). Солтүстіккореялық Пунгери ядролық полигонынан эпиорталықтық қашықтықтардың ауқымы 3725–5375 км. құрайды. Қазақстандық деректер орталығы жедел режимінде қанағаттанарлық дәлдігімен жарылыстың параметрлерін анықтаған. Өңдеудің нәтижелерін жақсарту үшін, 2016 ж. 6 қаңтарда жүргізілген жарылысты, Ақбұлақ, Курчатов-Крест және Мақаншы сейсмикалық топтары үшін азимутальдік түзетулерін енгізгеннен кейін, қайта жергіліктеуі жүргізілген. Параметрлерін дәлдеу нәтижесінде жарылыс эпиорталығының координаттары Халықаралық деректер орталығының шешіміне және шотльняның іс-жүзінде орналасқан жеріне едәуір жақын болды. Қазақстандық сейсмикалық станцияларының деректері бойынша 4 солтүстіккореялық сынақтардың кинематикалық және динамикалық параметрлерін салыстырма талдауы жүргізілген.

## NUCLEAR TEST IN NORTH KOREA 2016

R.B. Uzbekov, N.A. Seinassinov

*Institute of Geophysical Research, Kurchatov, Kazakhstan*

Monitoring of the Nuclear Tests is one of the main objectives of the seismic and infrasound stations of IGR RK. These stations had successfully registered all 4 North Korean nuclear tests (10.9.2006, 05.25.2009, 02.12.2013 и 01.06.2016). The epicentral distances from the North Korean test site Punggye-ri are in the range of 3725–5375 km. Kazakh National Center succeeded in determining the parameters of these explosions with sufficient accuracy. To improve the results, the explosion conducted on January 6, 2016 is relocated after introducing azimuthal corrections for the Akbulak, Kurchatov and Makanchi seismic arrays. As a result of the parameters correction the coordinates of the explosion epicenter became considerably closer to the solutions of the International Data Centers as well as to the original location of the tunnel. A comparative analysis of the kinematic and dynamic parameters is conducted for 4 tests using the data from Kazakh seismic stations.

УДК 528.35

## ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЕ УТОЧНЕНИЕ МЕСТ ПРОВЕДЕНИЯ МИРНЫХ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ НА ТЕРРИТОРИИ КАЗАХСТАНА

<sup>1)</sup> Абишев А.Х., <sup>1)</sup> Яковенко А.М., <sup>2)</sup> Маккей К.Г.

<sup>1)</sup> *Институт геофизических исследований, Курчатов, Казахстан*

<sup>2)</sup> *Университет штата Мичиган, Факультет геологических наук, Ист-Лансинг, США*

Правильное и точное определение эпицентров сейсмических событий (землетрясений либо взрывов) важно для сейсмического и ядерного мониторинга. Описаны результаты инструментального определения мест проведения мирных ядерных взрывов (МЯВ), проведенных в советское время. Это позволило откорректировать данные в ранее опубликованных работах и предложить их использование для разработки методов событий разной природы (ядерных взрывов, промышленных взрывов, землетрясений).

### ВВЕДЕНИЕ

В 2013, 2015 годах в рамках совместного договора между РГП Институт геофизических исследований РК и Мичиганским государственным университетом США были проведены совместные работы по определению точной локализации (ТЛ) мест проведения ядерных испытаний в мирных целях на территории Республики Казахстан.

Точность локализации координат для мирных ядерных взрывов (МЯВ), проведенных в Советском Союзе, как правило, считается известной, но эти данные могут быть недостаточно точными (с ошибкой до десятков километров). Серия взрывов, которые были проведены на территории Казахстана, не является исключением.

Правильное и точное определение гипоцентров сейсмических событий (землетрясений либо взрывов) важно для целей сейсмологического и ядерного мониторинга. Однако, как правило, гипоцентры землетрясений точно не определяются, что делает МЯВ очень важными в калибровке сейсмических станций (годографов), за счет использования информации об

известном событии в известном месте и применении этих данных при разработке методов локализации, распознавания природы ядерных взрывов в поддержку ДВЗЯИ.

В рамках проекта было обследовано девять мест проведения МЯВ в различных регионах Казахстана: в Мангыстауской, Западно-Казахстанской, Актюбинской, Костанайской, Акмолинской и Южно-Казахстанской областях (рисунок 1).

### ЯДЕРНЫЕ ВЗРЫВЫ В МИРНЫХ ЦЕЛЯХ

Мирные ядерные взрывы в СССР проводились в период с 1965 по 1988 год в рамках «закрытой «Программы № 7»». Всего в СССР было проведено 124 мирных ядерных взрыва в интересах народного хозяйства (в том числе 117 – вне границ ядерных полигонов). Из них, по крайней мере, четыре («Глобус-1», «Кратон-3», «Тайга» и «Кристалл») сопровождались авариями, при которых произошла утечка радиоактивных продуктов взрыва. В [1] приведены другие цифры: в 169 мирных ядерных взрывах было подорвано 186 ядерных взрывных устройств.

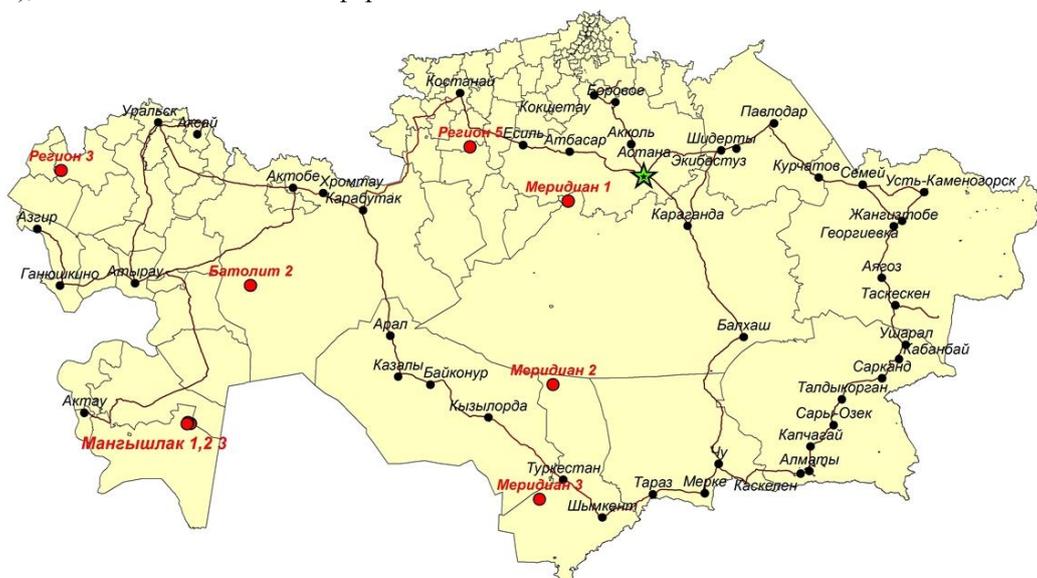


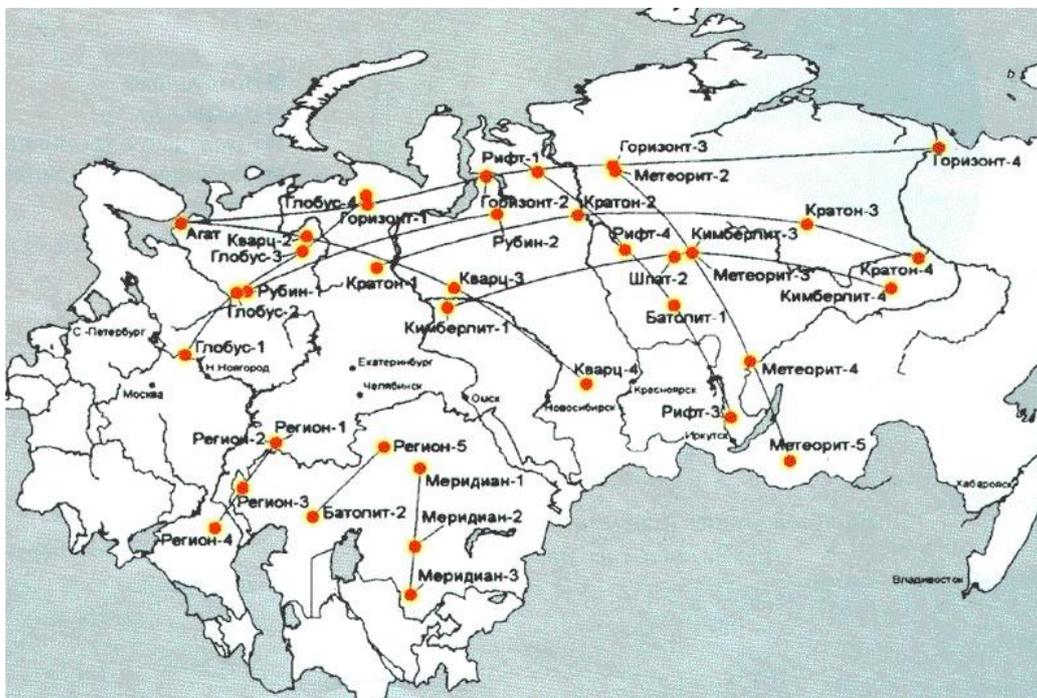
Рисунок 1. Расположение обследованных взрывов на территории Казахстана

**ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЕ УТОЧНЕНИЕ МЕСТ ПРОВЕДЕНИЯ МИРНЫХ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ  
НА ТЕРРИТОРИИ КАЗАХСТАНА**

Ядерные взрывы в мирных целях производились в двух государствах: в СССР и в США. Аналогом советской программы в США был проект «Операция Плаушер» (Operation Plowshare), запущенный в 1957 году и свёрнутый в 1973 году, в рамках программы было осуществлено 27 взрывов на территории трёх штатов [1, 4].

Ядерные взрывы в мирных целях производились для следующих научных и промышленных целей (рисунок 2):

- глубинное сейсмическое зондирование земной коры, для выявления залежей полезных ископаемых;



**а) с целью глубинного сейсмозондирования**



**б) промышленного назначения**

*Рисунок 2. Мирные ядерные взрывы на территории СССР*

- создание подземных ёмкостей и хранилищ для создания запаса полезных ископаемых;
- интенсификация добычи газа и нефти;
- экскавационные эксперименты (выемка и перемещение огромных объёмов породы и грунта);
- ликвидация аварийных газовых фонтанов;
- образование провальных воронок (воронок от взрывов);
- захоронение жидких токсичных отходов (перекрытие взрывом путей отхода сопутствующим добычи ископаемых вредных отходов, не поддающихся очистке);
- дробление руды;
- предупреждение внезапных выбросов угольной пыли и метана (специализированный взрыв для нужд угледобычи);
- создание плотины-хвостохранилища путём рыхления породы (специализированный взрыв для нужд нефтедобычи).

#### ЯДЕРНЫЕ ВЗРЫВЫ В МИРНЫХ ЦЕЛЯХ В КАЗАХСТАНЕ

Всего на территории Казахстана проведено 39 мирных ядерных взрывов из них 7 на Семипалатинском испытательном полигоне (СИП) [1, 3].

Цель проведения взрывов:

- скважина 1003 (СИП, площадка Сары Узень), для отработки методики создания воронки для водоёма;
- скважина 1004 («Чаган», СИП, площадка Балапан), для отработки методики создания воронки для водоёма;
- Телькем-1 (СИП), 1968 г., калибровочный выброс грунта для создания воронки для водоёма;
- Телькем-2 (СИП), 1968 г., экскавационный калибровочный для формирования траншеи;
- Лазурит (СИП, урочище Муржик), 1974 г., перемещение части горного склона для строительства плотины;

- Азгир, 17 взрывов (22 ядерных заряда) на площадке Галит в 1966–1979 гг.;
- Регион-3, Западно-Казахстанская область, 1972 г., сейсмозондирование;
- Регион-5, Костанайская область, 1972 г., сейсмозондирование;
- Лира, 6 взрывов для создания полостей под подземные газохранилища на Карачаганакском газоконденсатном месторождении в Западно-Казахстанской области;
- Мангышлак (Сай-Утёс), 3 взрыва в 1969–1970 гг., для создания провальной воронки;
- Меридиан-1, Акмолинская область, 1973 г., сейсмозондирование;
- Меридиан-2, Южно-Казахстанская область, 1973 г., сейсмозондирование;
- Меридиан-3 Южно-Казахстанская область, 1973 г., сейсмозондирование;
- Батолит-2, Актюбинская область, сейсмозондирование.

#### ПРОВЕРКА И УТОЧНЕНИЕ ЛОКАЛИЗАЦИИ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ МИРНЫХ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ НА ТЕРРИТОРИИ КАЗАХСТАНА

При подготовке к полевому обследованию были собраны и изучены доступные данные:

- космические снимки, полученные с использованием ресурса Google Earth, SasPlanet (данные Internet-ресурсы позволяют бесплатно выбрать из базы имеющихся снимков искомую съёмочную систему и даты проведения съёмки);
- публикации о мирных ядерных взрывах в СССР [1–5].

Анализ собранных данных показал, что некоторые объекты имеют несколько названий, например, Сай-Утёс и Мангышлак.

Для обследования были отобраны 9 объектов (таблица 1).

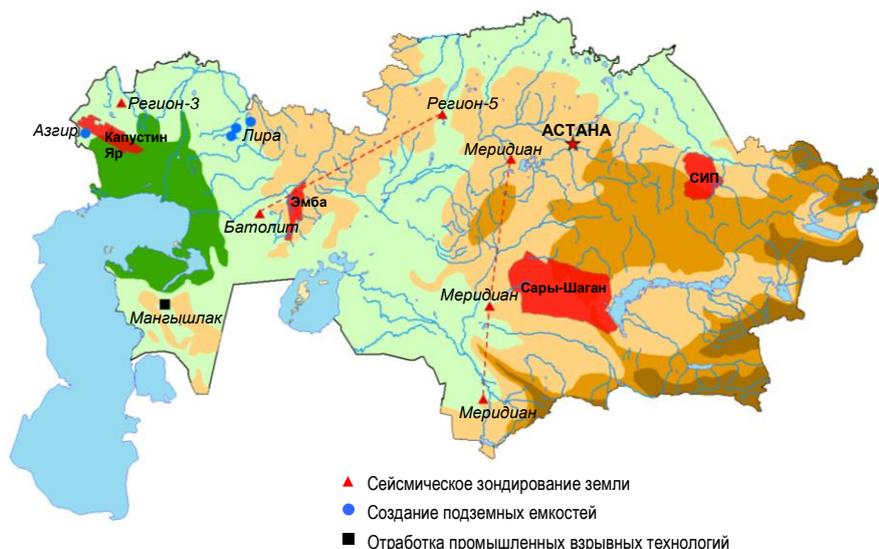


Рисунок 3. Мирные ядерные взрывы на территории Казахстана

**ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЕ УТОЧНЕНИЕ МЕСТ ПРОВЕДЕНИЯ МИРНЫХ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ  
НА ТЕРРИТОРИИ КАЗАХСТАНА**

*Таблица 1. Характеристики МЯВ*

МЯВ	Дата испытания	Место испытания	Глубина заложения, м	Мощность заряда, кт	Цель испытания
Мангышлак-1	6 декабря 1969 г.	Мангыстауская обл.	407	30	создание провальной воронки
Мангышлак-2	12 декабря 1970 г.	Мангыстауская обл.	740	80	создание провальной воронки
Мангышлак-3	23 декабря 1970 г.	Мангыстауская обл.	470	75	создание провальной воронки
Регион-3	20 августа 1972 г.	Западно-Казахстанская обл.	489	6.3	сейсмозондирование
Регион-5	24 ноября.1972 г.	Костанайская обл.	423	6.6	сейсмозондирование
Меридиан-1	28 августа 1973 г.	Акмолинская обл.	395	6.3	сейсмозондирование
Меридиан-2	19 сентября 1973 г.	Южно-Казахстанская обл.	400	6.3	сейсмозондирование
Меридиан-3	19 августа 1973 г.	Южно-Казахстанская обл.	600	6.3	сейсмозондирование
Батолит-2	3 октября 1987 г.	Актюбинская обл.	1002	6.6	сейсмозондирование

В результате сбора и изучения доступных данных было установлено, что часть площадок (на космоснимках) не подтверждается наличием зон обрушения или других явных доказательств проведения МЯВ: Мангышлак-1, -2, -3 и др. (таблица 1). После более детального изучения по космоснимкам ближайших территории испытательных площадок были выбраны смещенные площадки, более похожие на провальные воронки от МЯВ.

**МАНГЫШЛАКСКИЕ ПЛОЩАДКИ**

В 2013 г. проведена полевая проверка трех участков Мангышлакских МЯВ. Провальные воронки Мангышлак-1 и Мангышлак-2 хорошо видны на местности, и обе окружены большой сетью опоясывающих трещин за пределами провальных воронок. На участке Мангышлак-1 проведена частичная рекультивация и устье скважины не найдено на дне воронки. На участке Мангышлак-2 предположительно центральная (испытательная) скважина закрыта в бетонном блоке около 3 кв. м, рядом располагается открытая инструментальная скважина. Приустьевая площадка окружена прямоугольной траншеей и валом в нижней части воронки обрушения (рисунок 4). Участок Мангышлак-3 легко идентифицирован на основании наличия нескольких крупных скважин. Приустьевая площадка окружена прямоугольной траншеей и обваловкой так же как Мангышлак-2 [1].

**УЧАСТКИ РЕГИОН-3, -5, МЕРИДИАН-1, -2, -3 И БАТОЛИТ-2**

Для данных участков были разработаны маршруты по регионам: (пример одного из маршрутов приведен на рисунке 5).

**Маршрут 1** – Центральный и Северный Казахстан, для посещения мест проведения МЯВ Меридиан-1, Регион-5.

Меридиан-1 расположен в 230 км юго-западнее г. Астаны, Акмолинская обл.

Регион-5 расположен в 156 км юго-восточнее г. Костанай, Костанайская обл.

**Маршрут 2** – Западный Казахстан, участки Батолит-2, Регион-3.

Батолит-2 расположен в 320 км юго-западнее г. Актобе, Актюбинская обл.

Регион-3 расположен в 267 км юго-западнее г. Уральск, Западно-Казахстанская обл.

**Маршрут 3** – Южный Казахстан, Меридиан-2 и Меридиан-3

Меридиан-2 расположен в 210 км северо-восточнее г. Кызылорда, Южно-Казахстанская обл.

Меридиан-3 расположен в 180 км северо-западнее г. Шымкент, Южно-Казахстанская обл.



**а) космоснимок**



**б) обзорное фото**

*Рисунок 4. Площадка Мангышлак*



Рисунок 5. Пример маршрута 1 – Центральный и Северный Казахстан

Таблица 2. Разница координат

МЯВ	GPS координаты после посещения		Координаты по данным Султанова и др.		Разница, км
	широта (°N)	долгота (°E)	широта (°N)	долгота (°E)	
Мангышлак-1	43.86234	54.77269	43.867	54.800	2.3
Мангышлак-2	43.90960	54.79321	43.85	54.80	6.7
Мангышлак-3	43.88579	54.89734	44.025	54.933	15.7
Меридиан-1	50.52790	68.32129	50.550	68.395	5.8
Меридиан-2	45.75876	67.82288	45.635	67.850	13.9
Меридиан-3	42.77402	67.40685	42.711	67.410	7.0
Регион-3	49.41687	48.16158	49.462	48.179	5.2
Регион-5	51.84152	64.21249	51.843	64.152	4.2
Батолит-2	–	–	47.605	56.227	–

#### МЕТОДИКА ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Инструментальная привязка выполнялась с применением навигационных приемников Garmin Oregon 550, при помощи системы глобального позиционирования GPS (*Global Positioning System*). Современные приемники позволяют определять координаты в системе WGS-84 с точностью до 3-6 метров. При сравнении координат МЯВ, полученных с помощью GPS-приемников, с данными, полученными методом дистанционного зондирования мест с наиболее выраженными формами рельефа и различных объектов, используя космоснимки с ресурсов Google Earth, SasPlanet, разница определения мест проведения испытаний была в пределах 50–200 метров, а по отношению к координатам, опубликованным ранее, наша локализация отличается от 2.3 до 15.7 километров (таблица 2).

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в результате проведенных исследований была достигнута достаточная точность определения местоположения участков МЯВ. Уточ-

ненные местоположения, вносят существенную корректуру в локацию этих событий в ранее опубликованных координатах Султанова и др. (1999) [5] а также несут в себе гораздо меньшую неопределенность.

Использование полевой проверки и калиброванных событий в сейсмологии расширяется, они ценятся в качестве источников эталонных данных высокого качества для тем различных сейсмологических исследований. МЯВ особенно полезны в этом отношении, если их местоположение достаточно точно и проверено, потому что они произошли в регионах, не имеющих естественной сейсмичности и следовательно могут представлять удобное лучевое покрытие для изучения скорости и затухания в земной среде.

Их важность в качестве опорных событий очень важна, при разработке методов локализации, распознавания природы ядерных взрывов в поддержку ДВЗЯИ и для калибровки станций с использованием известных событий в известном месте.

Рекомендуется тщательно проверять точность локализации, особенно когда стали доступны для анализа новые источники данных и технологии. Таким образом, совершенствование баз данных ТЛ представляет собой непрерывный процесс, который не ограничивается добавлением новых событий, это

очень важно, чтобы эти наборы данных подтверждали точное местоположение. Не исключено что местоположение других МЯВ также может отличаться существенной ошибкой в определении координат эпицентра.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Яблоков, А.В. Миф о безопасности и эффективности подземных ядерных взрывов, Москва, 2003.
2. Kevin, G. Short Note Ground-Truth Location for the Mangyshlak Peaceful Nuclear Explosion Sequence / G. Kevin, Mackey, Eric Bergman Western Kazakhstan.
3. Михайлов, Ядерные испытания СССР. Том 1. Цели. Общие характеристики. Организация. Первые ядерные испытания, РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, 1997.
4. Михайлов, В. Н. Испытания ядерного оружия и ядерные взрывы в мирных целях СССР 1949-1990 годы. РФЯЦ - ВНИИЭФ, Саров, 1996.
5. Sultanov, D.D. A seismic source summary for Soviet peaceful nuclear / D.D. Sultanov, J.R. Murphy, K.D. Rubinstein // 1999.

### **ҚАЗАҚСТАН АУМАҒЫНДА БЕЙБІТ ЯДРОЛЫҚ ЖАРЫЛЫСТАРДЫ ЖҮРГІЗУ ОРЫНДАРЫН АСПАПТЫ ДӘЛДЕУ**

<sup>1)</sup> А.Х. Абишев, <sup>1)</sup> А.М. Яковенко, <sup>2)</sup> К.Г. Маккей

<sup>1)</sup> *Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатов, Қазақстан*

<sup>2)</sup> *Мичиган штатының университеті, геологиялық ғылымдар факультеті Ист-Лансинг, АҚШ*

Сейсмикалық оқиғалардың (жерсілкінулердің немесе жарылыстардың) эпиорталықтарын дұрыс және дәл анықтауы сейсмикалық және ядролық мониторингі үшін маңызды болып келеді. Кеңес уақытында жүргізілген бейбіт ядролық жарылыстарды (ЖЯЖ) жүргізу орындарын аспапты анықтаудың нәтижелері келтірілген. Бұл, бұрын жарияланған жұмыстардағы деректерді түзетуге мүмкіншілік берген және әр түрлі тегіндегі оқиғаларды (ядролық жарылыстар, өнеркәсіптік жарылыстар, жерсілкінулер) анықтау әдістерін әзірлеу үшін ұсынуға мүмкіншілік берген.

### **INSTRUMENTAL PRECISION OF PEACEFUL NUCLEAR EXPLOSIONS CONDUCTING SITES ON THE TERRITORY OF KAZAKHSTAN**

<sup>1)</sup> A.Kh. Abishev, <sup>1)</sup> A.M. Yakovenko, <sup>2)</sup> K.G. Mackey

<sup>1)</sup> *Institute of Geophysical Research, Kurchatov, Kazakhstan*

<sup>2)</sup> *Department of Geological Sciences, Michigan State University, East Lansing, U.S.A.*

Correct and accurate determination of seismic events (earthquakes or explosions) epicenters is important for seismic and nuclear monitoring. The results of instrumental determination of peaceful nuclear explosions (PNE) location sites conducted in the Soviet time are described. This allowed reviewing the data published before and suggesting its application for development of discrimination techniques for events of different nature (nuclear explosions, industrial blasts, earthquakes).

УДК 624.121

## СВЯЗЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ АКТИВНОСТИ РАДИОНУКЛИДОВ С ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ УЧАСТКА БАЙТЛЕС

Апенько А.В., Ботов А.А., Романов А.М.

*Институт геофизических исследований, Курчатов, Казахстан*

На Семипалатинском полигоне отрабатывается способ контроля линейного распространения радиоактивного загрязнения. Получены данные радиометрических и электроразведочных работ по ручью Байтлес, вытекающему из боевой штольни. Доказано соответствие результатов съемок физико-геологической модели взаимодействия горных пород и вод через посредство естественного электрического потенциала течения. Установлена проявленность динамического, вещественного и структурного факторов модели в реальной обстановке.

### ВВЕДЕНИЕ

В результате ядерных испытаний на Семипалатинском полигоне в недрах и на поверхности земли образовались участки радиоактивных загрязнений. Движение вод на этих участках приводит к выщелачиванию и миграции радионуклидов из очагов взрывов с последующим отложением и накоплением опасных для биосферы активностей. Наиболее вероятная форма потоков — линейная. Соответственно линейными являются формы отложения радионуклидов.

Трассирование потоков, содержащих радионуклиды, осложняется высокой вероятностью промаха точечных замеров активности, даже при оконтуривании ореолов загрязнения на поверхностном землі. Вероятность промаха возрастает в случаях линейных ореолов загрязнения в недрах, особенно при неравномерном распределении активностей по потокам [1].

Для снижения вероятности промаха в таких условиях необходимо сгущение сети наблюдений. Это резко удорожает поисковые работы. При поисках в недрах себестоимость работ возрастает на два порядка из-за необходимости использования скважин. В результате возможно нарушение принципа экономической целесообразности: затраты на обнаружение загрязнения превысят потери от избыточного облучения биосферы. Тем не менее, данные работы необходимы из-за того, что отсутствие контроля за развитием радиационной ситуации и неопределенность уровня ущерба (область применения) могут квалифицироваться как радиационная авария. Следовательно, работы в этом направлении — актуальны.

Отработка способа контроля распространения радиоактивного загрязнения производится на территории Семипалатинского полигона. В начальной стадии объектом исследования являются участки с наличием поверхностных потоков вод переносящих радионуклиды в окружающую среду.

### Цели работы:

1. Подтверждение соответствия физико-геологической модели взаимодействия горных пород и

вод, через посредство электрического поля потенциала течения природным условиям;

2. Обоснование и подготовка на этой основе методики выявления подземных водотоков с радиоактивным загрязнением.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В настоящее время радиоактивное загрязнение формируется в гидродинамических системах, проходящих через очаги ядерных взрывов. Отложение радионуклидов происходит на границах раздела твердой и жидкой фаз этих систем — структурный критерий. Вещественным критерием локализации загрязнения обычно полагается адсорбционная способность горных пород, а также их повышенная окислительно-восстановительная способность. В то же время, на базе данных по урановым и нефтяным месторождениям установлено отсутствие значимой связи накопления радиоактивного загрязнения с участками повышенных уровней адсорбции (в частности — горных пород с высокими содержаниями органического вещества) и окислительно-восстановительной способности [2].

При таких взаимоисключающих предпосылках непосредственное определение участков, отвечающих этим критериям, дистанционными способами, использующими методы структурной геофизики, — затруднено.

Поставлена задача: определить фактическую возможность выявления участков миграции и отложения радиоактивных веществ на территории СИП геофизическими методами.

### РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Теоретическое обоснование уже разработано [3]. Правомерность его доказана для природных объектов (урановых и нефтяных месторождений), а также для техногенных — хвостохранилище ураноперерабатывающего завода и пункты хранения радиоактивных отходов [3, 4].

Базовым является представление о взаимодействии горных пород и вод гидродинамических структур литосферы через посредство электрического поля потенциала течения. Напряженность электрического поля является силовой характеристикой его

воздействия на интенсивность межфазного перехода веществ, в том числе и радионуклидов [3]. Уровень электрического поля определяется динамическим (скорость течения вод относительно горных пород), структурным (изменение поперечного сечения потока вод) и вещественным (отношение удельных электрических сопротивлений вод и горных пород) параметрами.

В природных условиях эти параметры определяются электроразведкой методами естественного электрического поля, а также кажущегося электрического сопротивления.

В качестве опытного участка выбрана территория ручья Байтлес, вытекающего из боевой штольни массива Дегелен (рисунок 1). Выбор обусловлен изменчивостью вышеуказанных параметров по направлению потока, а также доступностью к исследованиям не только самого потока, но и примыкающих территорий (вмещающих горных пород). Таким образом обеспечивается минимальность затрат на доказательство применимости базового представления для использования комплекса геофизических методов на территории СИП.



Рисунок 1. Космоснимок участка Байтлес

Выполнены:

- маршрутные съемки по руслу ручья, включившие интегральную гамма-съемку (мощность экспозиционной дозы – МЭД), электроразведку методами кажущегося сопротивления и естественного электрического поля. Интервал съемок от портала штольни до выхода ручья в долину;

- площадные съемки верхней и средних частей долины ручья, включивших интегральную гамма-съемку, замеры бета излучения и естественного электрического поля.

Результаты маршрутных съемок представлены на рисунке 2. Из сопоставления данных следует, что большая часть аномальных значений МЭД пространственно связана с локальными максимумами потенциала течения (ЕП). Локальные максимумы выделены на фоне регионального тренда, обусловленного общим распределением ЕП по склонам поднятия.

Особо подчеркивается, что характерная связь между ЕП и МЭД проявлена на участках локальных

повышений ЕП. Связь с региональным распределением ЕП отсутствует. Причина: региональный тренд проявлен по склону поверхности в целом, независимо от того, в русле или по берегам ручья производятся замеры.

Доказательство правомерности съемок ЕП и КС следует из сопоставления данных:

- характерные пики аномально высоких значений КС соответствуют аномальным локальным понижениям ЕП;

- подобное сочетание аналогично и систематически проявляется в данных каротажа КС и ПС (ЕП) скважин, пройденным по скальным породам.

Более подробные данные по взаимным распределениям значений этих и дополнительных параметров представлены результатами площадных съемок верхней части ручья. Съемка велась по сети 1×5 м на заболоченном плесе. Направление профилей – поперек ручья. Одновременно выполнены замеры гамма-излучения, бета-активности и потенциала ЕП. На рисунке 3 показаны типичные распределения этих данных по трем профилям, в местах расширения плеса, его центральной части и в начале сужения по направлению потока.

По этим графикам устанавливаются следующие особенности:

- повышения гамма- и бета-активности проявлены в заболоченной части долины, преимущественно на переходе от русла ручья к пойме;

- повышения активностей пространственно связаны с локальными максимумами ЕП;

- по направлению потока амплитуда локальных максимумов ЕП последовательно возрастает от +7 мВ (верхний профиль) до +27 мВ (нижний профиль), т.е. от начала плеса к его окончанию;

- соответственно возрастают амплитуды максимумов пиков бета- и гамма-излучения; локальные минимумы ЕП преимущественно отмечаются в местах видимого проявления течения воды;

- локальные минимумы ЕП преимущественно отмечаются в местах видимого проявления течения воды;

- повышения бета-активности имеют большее распространение по сравнению с повышениями МЭД.

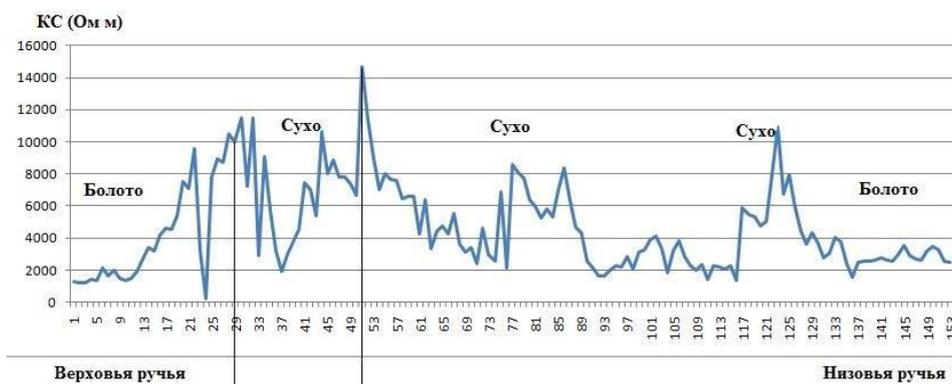
Минимальные значения ЕП (до –58 мВ) отмечены непосредственно в месте сужения плеса.

Судя по графикам ЕП воды из плеса движутся не только по направлению течения ручья, но также и во вмещающие горные породы.

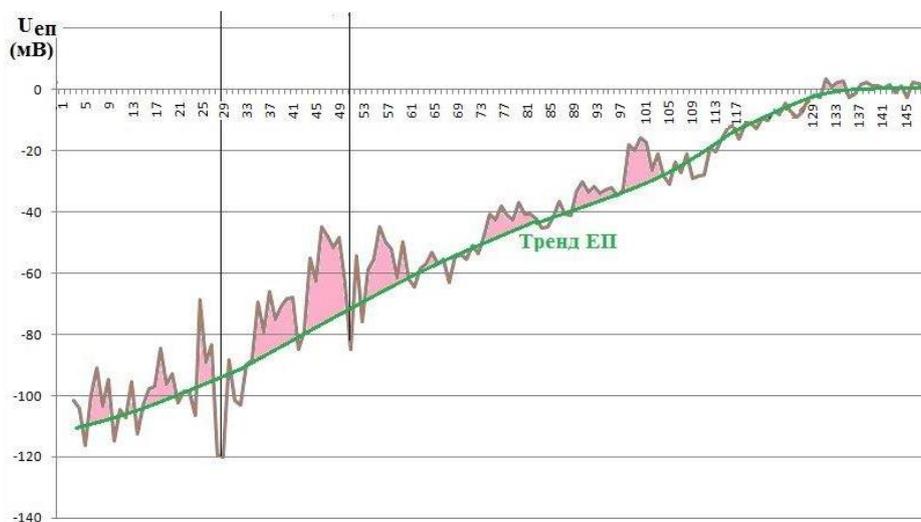
Аналогичные результаты получены и в другом интервале ручья, на 300 м ниже по течению. Отличия нижнего участка от верхнего:

- русло ручья сухое;
- заболоченность отсутствует;
- уклон местности заметно меньший;

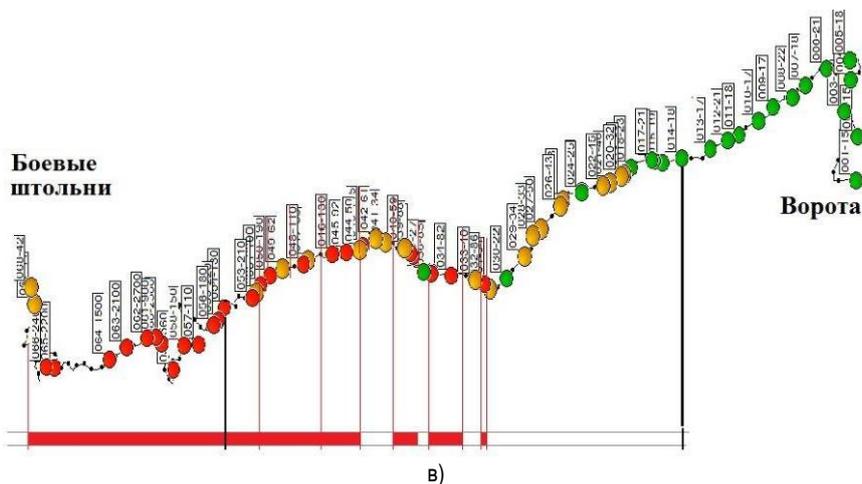
**СВЯЗЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ АКТИВНОСТИ РАДИОНУКЛИДОВ  
С ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ УЧАСТКА БАЙТЛЕС**



а) маршрутная съемка КС по руслу ручья Байтлес (шаг 10 м)



б) маршрутная съемка МЭД по руслу ручья Байтлес (шаг 10 м)



- в)
-  значения МЭД менее 0,20 мкЗв
  -  значения МЭД от 0,20 до 0,50 мкЗв
  -  значения МЭД свыше 0,50 мкЗв
  -  максимумы ЕП относительно тренда

Рисунок 2. Сопоставление данных маршрутных съемок МЭД, КС и ЕП по руслу ручья Байтлес

**СВЯЗЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ АКТИВНОСТИ РАДИОНУКЛИДОВ  
С ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ УЧАСТКА БАЙТЛЕС**

- поток вод преимущественно подземный, поверхностный поток отмечается только во время весеннего паводка;
- уровень активности на порядок меньший чем вышерасположенного участка.

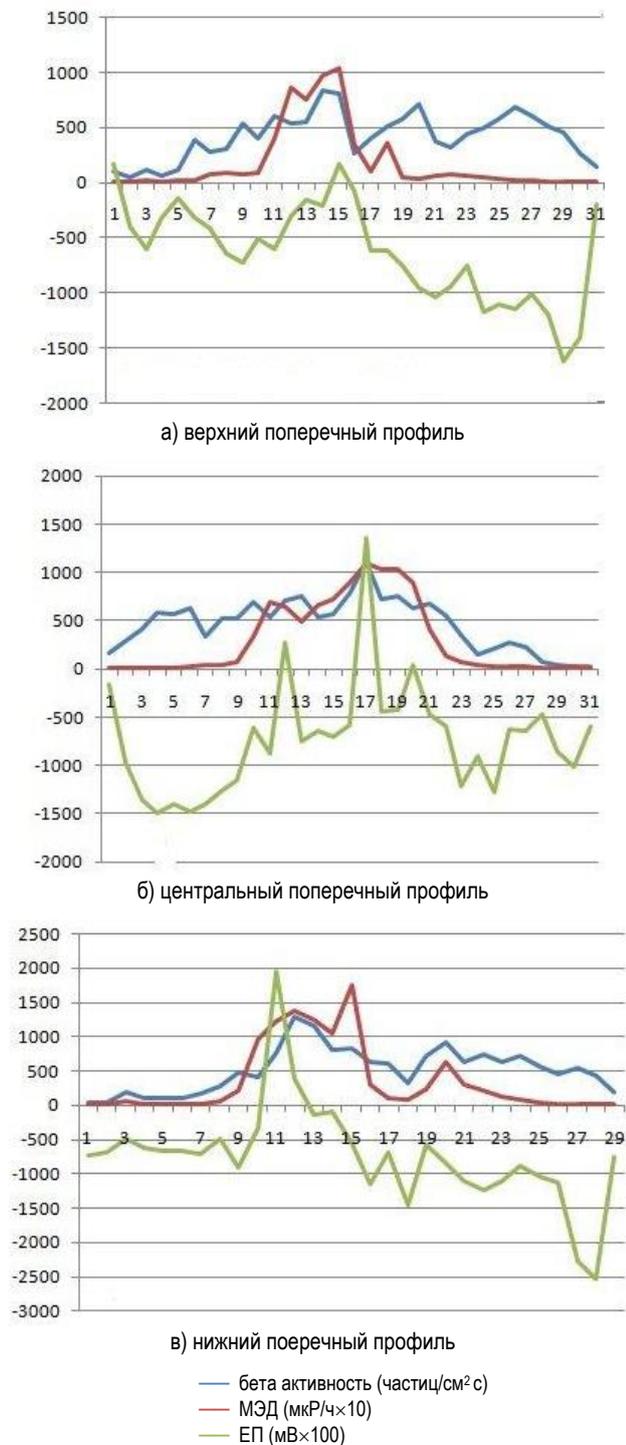


Рисунок 3. Распределения значений гамма-активности, бета-активности и потенциала течения (ЕП) на плесе верховья ручья Байтлес

Несмотря на эти отличия особенности распределений активности и геоэлектрических параметров сохраняются.

Обобщая вышеизложенное принимается следующее представление о фактической связи активности радионуклидов с особенностями геоэлектрической обстановки участка Байтлес:

Установленное наличие ЕП является следствием движения поверхностных и подземных вод по руслу ручья. Чем больше наклон рельефа, — тем больше уровень потенциала течения. Общий уровень активности твердой фазы при этом резко возрастает. Таким образом проявлен динамический параметр процесса взаимодействия горных пород.

Большее распространение ореолов бета-активности по сравнению с ореолами МЭД отражает различие миграционной способности стронция-90 и цезия-137 соответственно. Согласно физико-геологической модели причиной этого является различие воздействия электрического поля потенциала течения на катионы. Переход катионов стронция-90 из вод в твердую фазу происходит интенсивнее, чем переход цезия-137 [4]. Тем самым объясняются большие размеры ореолов стронция-90 по сравнению с размерами ореолов цезия-137.

Изложенное позволяет сделать следующие выводы:

1. Установленные на участке Байтлес аномалии ЕП являются следствием движения поверхностных и подземных вод по руслу ручья. Чем больше наклон рельефа, — тем больше уровень потенциала течения. Общий уровень активности твердой фазы при этом резко возрастает. Таким образом проявлен динамический параметр процесса взаимодействия горных пород.

2. Отмечаются явно выраженные локальные изменения уровня ЕП и активности по руслу ручья, а также в поперечном направлении. Они связаны с изменением ширины русла, а также поймы ручья. Соответственно изменяется скорость потока. Изменения геометрии потока характеризуют структурный параметр.

3. В местах протекания потока по выходам коренных пород уровень активности существенно выше, чем при прохождении потока по рыхлым отложениям. Это относится к воздействию вещественного параметра процесса — соответствующему изменению отношения удельных электрических сопротивлений твердой и жидкой фаз гидродинамической системы. В данном случае — ручья.

На основе работ первого этапа определяются главные направления и методы геофизических съемок для выявления гидродинамических структур, по которым могут распространяться радиоактивные вещества. Вещественный параметр — наличие, местоположение и мощности зон трещиноватости и микротрещиноватости определяется электроразведочными методами кажущегося сопротивления. На-

чальными являются съемки методом срединного градиента (МСГ). Для уточнения результатов МСГ предусматривается использование метода заряда.

Следующими являются съемки методом ЕП. Сначала по наличию протяженных аномалий ЕП устанавливается проявленность структурного фактора — наличие потоков вод по зонам трещиноватости. Затем устанавливается проявленность динамического параметра — интенсивность движения вод, отражающаяся в уровне аномалий ЕП.

Проверка применимости этого комплекса при исследовании миграции радионуклидов в недрах предусматривается на втором этапе по территории участка Балапан, где производились подземные взрывы в скважинах.

#### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Детальными съемками на участке ручья Байтлес установлено взаимное проявление особенностей в распределениях активностей радионуклидов и есте-

ственного электрического поля потенциала течения, а также кажущегося электрического сопротивления, отвечающих физико-геологической модели.

Особенности распределений радионуклидов, связанные с геоэлектрическими характеристиками вмещающей среды (горных пород и вод гидродинамической системы), установленные для поверхности литосферы, должны проявляться и в недрах. Для подтверждения этого в дальнейшем предусматривается проведение соответствующих исследований на участке Балапан, где подземные ядерные взрывы производились в скважинах (в глубине недр).

Приведенное фактическое представление отвечает теоретическому, изложенному в информационном отчете гранта МОН РК «Обоснование применения геофизических методов для контроля миграции радионуклидов на Семипалатинском испытательном полигоне (СИП)» за 2015 г. и доказывает его правоту.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Романов, А.М. Преимущественная форма распространения веществ в литосфере и атмосфере // Вестник НЯЦ РК, 2015. – Вып.4. – С. 107–110.
2. Романов, А.М. Модификация физико-геологического представления о формировании эпигенетических месторождений урана / А.М. Романов, М.А. Романова // Екатеринбург, УИПП. – 238 с.
3. Романов, А.М. Взаимодействие вод с горными породами / А.М. Романов // Алматы, ИВТ НАК «Казатомпром». – 247 с.
4. Романов, А.М. Физико-геологическое обоснование картирования участков миграции и осадения радионуклидов на семипалатинском испытательном полигоне / А.М. Романов // Вестник НЯЦ РК, 2014. – Вып.2. – С. 178–185.

### **БАЙТІЛЕС УЧАСКЕСІНДЕ РАДИОНУКЛИДТЕР БЕЛСЕНДІЛГІ ТАРАЛУДЫҢ ГЕОЭЛЕКТРЛІК СИПАТТАМАЛАРЫМЕН БАЙЛАНЫСЫ**

**А.В. Апенко, А.А. Ботов, А.М. Романов**

*Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатов, Қазақстан*

Семей сынау полигонында, радиоактивті ластану сызықты таралуын бақылау әдісін толық игеріп алуы жүргізілуде. Соғыс штольнядан шығатын Байтілес бұлағы бойы радиометриялық және электрбарлау жұмыстардың деректері алынған. Түсірулердің нәтижелері ағымның табиғи электрлік потенциалы арқылы таужыныстар мен сулардың өзара әрекеттестігінің физика-геологиялық моделіне сәйкес келетіні дәлелделген. Нақты жағдайында модельдің динамикалық, заттық және құрылымды факторларының байқалуы анықталған.

### **DEPENDENCE OF RADIONUCLIDE ACTIVITY DISTRIBUTION WITH GEOELECTRICAL CHARACTERISTICS OF BAYTLES AREA**

**A.V. Apenko, A.A. Botov, A.M. Romanov**

*Institute of Geophysical Research, Kurchatov, Kazakhstan*

The monitoring technique of linear distribution of radioactive contamination is being tested at the Semipalatinsk Test Site. The data of radiometric and electrical exploration works along Baytles stream flowing out of the military tunnel were received. The correspondence of the survey results of physical and geological model of mountain rocks and water interaction via natural electrical potential of the stream was confirmed. The availability of dynamic, material and structural factors of the model in real environment was determined.

УДК 550.83; 551.594

## ВЛИЯНИЕ РЕЛЬЕФА НА ОТЛОЖЕНИЕ РАДИОНУКЛИДОВ ИЗ ПОТОКА ВОД БОЕВЫХ ШТОЛЕН УЧАСТКА БАЙТЛЕС

Ботов А.А., Романов А.М.

*Институт геофизических исследований, Курчатов, Казахстан*

Выполнена маршрутная гамма-съемка по руслу ручья Байтлес участка Дегелен Семипалатинского испытательного полигона. Получены данные по распределениям гамма-активности горных пород русла от портала штольни к границам участка. Выполнено статистически обоснованное разделение радиометрического ореола на зоны. Установлена зависимость интенсивности гамма-активности от наклона рельефа, определяющего скорость потока вод в ручье и, соответственно — уровень естественного электрического поля потенциала течения, влияющего на межфазный переход веществ, в том числе и радионуклиды.

### ВВЕДЕНИЕ

Работы выполнены по гранту МОН РК «Обоснование применения геофизических методов для контроля миграции радионуклидов на Семипалатинском испытательном полигоне (СИП)» в 2015 г. Она относится к задаче 1.б. «Установление проявленности структурных и вещественных особенностей миграции и зон осаждения радионуклидов в физико-геологических характеристиках литосферы по ручьям на участках боевых штолен». Назначение: подтверждение соответствия физико-геологического представления взаимодействия горных пород и вод реальным геологическим условиям СИП. Новизна заключается в определении связи перехода радионуклидов из потока растворов в твердую фазу под действием электрического поля потенциала течения вод гидродинамических систем.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Воды ручья загрязнены продуктами ядерных взрывов — искусственными радионуклидами. Основное внимание в настоящей работе уделено распределению радионуклида  $Cz-137$  (гамма-излучатель) в зависимости от природных условий на поверхности земли.

Исследования выполнены по ручью Байтлес, вытекающему из боевых штолен №№ 609, 176, массива Дегелен. Расположение ручья представлено на рисунке 1. Ландшафт — горный, частично осложненный техногенным вмешательством. Отмечаются: периодические сужения и расширения русла, локальные проявления болот, местами ручей уходит под землю. Русло ручья прослеживается от устья штолен до урочища, где ручей окончательно уходит под землю.

Необходимы:

- доказательство того, что радиометрический ореол по ручью Байтлес образовался вследствие единого процесса взаимодействия горных пород и вод: выноса радионуклидов из очагов подземных ядерных взрывов в штольнях и последующего отложения в природной среде;

- выявление локальных неоднородностей радиоактивного ореола и определение их связи с особенностями природной среды.



Рисунок 1. Космоснимок участка Байтлес

### РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Обычно значения гамма-активности радиометрических ореолов характеризуются логнормальным распределением. Поэтому для удобства представления рассматривается зависимость натурального логарифма МЭД (мощности экспозиционной дозы) от расстояния от порталов штолен. Установлен высокий, статистически значимый уровень связи (-0,80) уменьшения МЭД по мере удаления от порталов штолен (таблица 1).

На парном графике (рисунок 2) выделяются три различные зоны:

- локальный ореол с максимальными значениями МЭД в непосредственной близости от порталов штолен (зона 1)
- ореол высоких и повышенных значений МЭД по ручью (зона 2);
- рекультивированные порталы штолен (зона 3).

По гистограмме МЭД рисунка 2 устанавливается наличие двух вершин. Расстояние между ними по оси  $\ln(\text{МЭД})$  превышает утроенное стандартное отклонение. Таким образом подтверждается статистически значимое различие зон 1 и 2.

**ВЛИЯНИЕ РЕЛЬЕФА НА ОТЛОЖЕНИЕ РАДИОНУКЛИДОВ ИЗ ПОТОКА ВОД  
БОЕВЫХ ШТОЛЕН УЧАСТКА БАЙТЛЕС**

Таблица 1. Корреляционная зависимость интенсивности  $\ln(\text{МЭД})$  и удаления от штолен ( $L$ ) по генеральной выборке

	Среднее	Стандартное отклонение	L	$\ln(\text{МЭД})$
L	670,0000	395,4744	1,000000	-0,801115
$\ln(\text{МЭД})$	4,2165	1,3917	-0,801115	1,000000

Погрешность отмеченных красной заливкой значений  $p < ,05000$   $N=68$ . С вероятностью 95% коэффициент корреляции относится к значимым

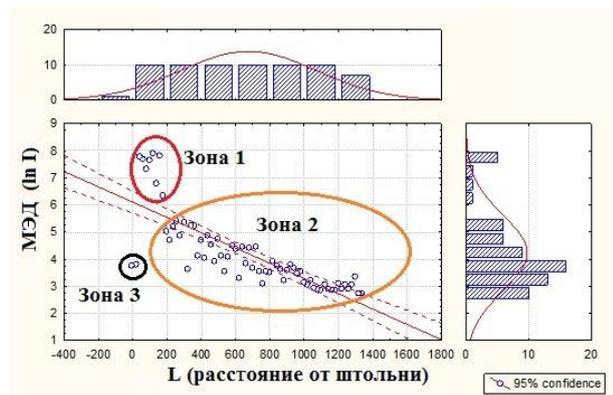


Рисунок 2. График парных значений МЭД и расстояния от штолен и гистограмма распределений МЭД генеральной выборки

Таблица 2. Корреляционная зависимость интенсивности МЭД и удаления от штолен по частной выборке зоны 2

	Среднее	Стандартное отклонение	L	$\ln(\text{МЭД})$
L	770,0000	337,7376	1,000000	-0,879432
$\ln(\text{МЭД})$	3,7914	0,7828	-0,879432	1,000000

Погрешность отмеченных красной заливкой значений  $p < ,05000$   $N=58$

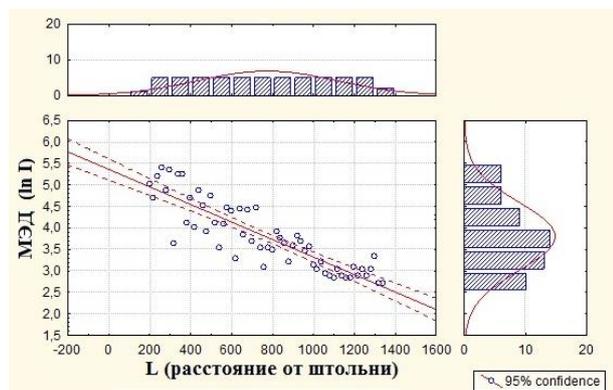


Рисунок 3. График парных значений МЭД и расстояния от штолен и гистограмма распределений МЭД частной выборки зоны 2

Таблица 3. Корреляционная зависимость интенсивности МЭД и удаления от штолен по частной выборке зоны 1

	Среднее	Стандартное отклонение	L	$\ln(\text{МЭД})$
L	110,0000	48,98979	1,000000	-0,558156
$\ln(\text{МЭД})$	7,4122	0,56576	-0,558156	1,000000

Представленные значения незначимы с погрешностью  $p < ,05000$   $N=8$

Наибольший вклад в уровень коэффициента корреляции генеральной выборки вносят значения МЭД зоны 2. Удаление значений МЭД зон 1 и 3 из генеральной выборки заметно изменяет вид распределения и приводит к возрастанию модуля коэффициента корреляции (-0,88 вместо -0,80) (таблица 2). Однотипность частной выборки зоны 2 выражена отчетливо (рисунок 3).

Распределения МЭД по 1 зоне характеризуются низкой (меньше критического уровня значимости) зависимостью от расстояний до штолен (таблица 3). Безусловно, зона 1 является частью общего радиометрического ореола, но приведенные статистические данные указывают на существенное влияние дополнительных факторов, подлежащих определению.

Ландшафтная характеристика зон:

1. Горная — заболоченное дно ущелья, примыкающее к скальному склону (рисунок 4). Удаление от порталов штолен, интервал 30–200 м. Среднее значение МЭД составляет около 50 мкЗв/ч (рисунок 5);

2. Предгорная — дно широкой лощины у борта пологого склона (рисунок 6). Преимущественно развит покров, представленный аллювиальными отложениями. Максимальные значения МЭД — 3 мкЗв/ч (рисунок 7).

3. Техногенная — насыпь привозного щебня на порталах штолен. Значение МЭД — 0,4 мкЗв/ч.

Характерные различия зон:

– близость зоны 1 к порталам штолен интервал 30–200 м, интенсивный уклон поверхности, наличие поверхностных вод, непосредственный и повсеместный контакт поверхностных вод со скальными образованиями;

– расположение зоны 2 от порталов штолен на расстоянии свыше 200 м, протекание загрязненных вод в местах среднего (около 5%) уклона, преимущественное прохождение русла по аллювиальным отложениям с редкими обнажениями коренных пород. Кроме того, на протяженных участках русло ручья сухое. Наличие вод в нижней части русла является следствием потока подземных вод под руслом;



Рисунок 4. Горный ландшафт зоны 1. Русло ручья Байтлес

– материал укрытия зоны 3 — привозной щебень, слабо загрязненный радионуклидами в процессе работ. Из дальнейшего рассмотрения исключается.



Рисунок 5. Средние показания МЭД (мкЗв/ч) по руслу ручья Байтлес в горной зоне



Рисунок 6. Предгорный ландшафт зоны 2, сухое русло ручья Байтлес



Рисунок 7. Максимальные показания МЭД (мкЗв/ч) по руслу ручья Байтлес в предгорной зоне 2

На рисунке 8 приведено сопоставление значений МЭД с рельефом местности. Наибольшие значения МЭД отмечаются в локальных понижениях рельефа, на участках выполаживания уклона. Локальные понижения МЭД проявлены в местах резкого уклона рельефа. Для удобства восприятия связи МЭД и рельефа приведены фактические и осредненные значения уклона.

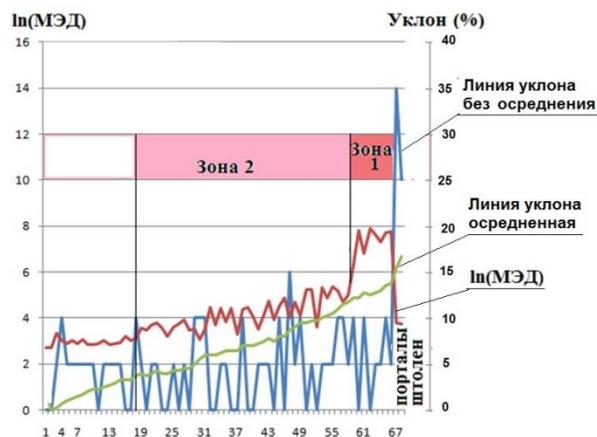


Рисунок 8. Распределение МЭД по рельефу русла

Так, перед зоной 1 уклон максимален, а непосредственно сама зона находится в локальной части рельефа с уменьшенным наклоном. Нижняя граница зоны 1 связана с локальным увеличением наклона.

Зона 2 находится на участке среднего (около 5%) уклона местности. Максимумы МЭД связаны с локальными понижениями рельефа, характеризующимися уменьшенным наклоном. Нижняя граница зоны 2 связана с общим увеличением наклона рельефа.

#### ОБСУЖДЕНИЕ

Воды, вытекающие из боевых штолен СИП характеризуются повышенными активностями радионуклидов [1]. Многократный переход вод ручья Байтлес из поверхностного потока в подземный обуславливает низкую вероятность миграции радионуклидов в виде взвесей. Судя по внешнему виду растворов, свежетобранных и отстоявшихся (отсутствие замутненности), а также результатам радиохимического анализа, можно принять, что радионуклиды жидкой фазы находятся преимущественно в растворенном состоянии.

С течением времени активность горных пород русла ручья возрастает из-за поступления новых порций раствора и последующего отложения радионуклидов.

Естественно, что переход радионуклидов из жидкой фазы (потока вод) в твердую (горные породы) не имеет непосредственной связи с высотными отметками рельефа. Но данные о распределении высотных отметок позволяют судить о скорости потока вод в ручье. Чем больше скорость потока, тем

больше уровень естественного электрического поля, влияющего на межфазный переход веществ [2].

Наибольшая напряженность электрического поля, способствующая поступлению веществ из жидкой фазы в твердую, формируется в месте перехода от быстрого потока к медленному. Применительно к рассматриваемому случаю резкое замедление скорости потока происходит на участках сочетания крутого и выположенных наклонов русла ручья – первый ореолообразующий фактор. Именно эти участки характеризуются максимальными значениями МЭД.

Помимо изменения скорости потоков вод на отложение радионуклидов оказывает влияние различие удельных электрических сопротивлений твердой и жидкой фаз. Чем больше различие, тем больше уровень естественного электрического поля потенциала течения, тем интенсивнее переходят вещества (радионуклиды) из жидкой фазы в твердую [2]. Это и обуславливает существенно большую активность ореола 1 зоны, находящейся на участке преимущественного развития высокоомных скальных пород. Тем самым устанавливается наличие второго ореолообразующего фактора.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Обеспечение радиационной безопасности на территории Республики Казахстан. Мероприятие 1. Обеспечение безопасности бывшего Семипалатинского испытательного полигона: отчет РБП 038 (информационный, годовой), по договору № 1/3 от 09.02.2011 г. / ИРБЭ НЯЦ РК; рук. Лукашенко С.Н. –Курчатов: ИРБЭ НЯЦ РК, 2011. – 164с.
2. Романов, А.М., Взаимодействие вод с горными породами / А.М. Романов // ИВТ НАК «Казатомпром» Алматы, 2003. – 247 с.

### **БАЙТЛЕС УЧАСКЕСІНДЕГІ СОҒЫС ШТОЛЬНЯЛАРДЫҢ СУ АҒЫМЫНАН РАДИОНУКЛИДТЕР ТҮЗІЛУІНЕ БЕДЕРДІҢ ҰҚПАЛЫ**

**А.А. Ботов, А.М. Романов**

*Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатов, Қазақстан*

Семей сынау полигоны Дегелең учаскесінің Байтілес бұлағының арнасы бойы маршруттық гамма-түсіру орындалған. Штольняның порталынан учаскенің шекараларына таужыныстардың гамма-активтігі таралу бойынша деректері алынған. Радиометрлік шеңберін зоналарға статистикалық негізделген бөлуі орындалған. Бұлақта су ағымының жылдамдығын және, сәйкес – заттектердің фазааралық ауысуына ықпал ететін ағымның табиғи электрлік потенциалдың деңгейін белгілейтін бедер еңісінен гамма-активтік қарқындылығының тәуелділігі анықталған. Соның ішінде радионуклидтер.

### **INFLUENCE OF THE RELIEF ON DEPOSITION OF RADIONUCLIDES FROM WATER FLOW OF MILITARY TUNNELS OF BAYTLES AREA**

**A.A. Botov, A.M. Romanov**

*Institute of Geophysical Research, Kurchatov, Kazakhstan*

The routing gamma survey along the bed of Baytles stream at Degelen site of the Semipalatinsk Test Site was conducted. The data on the distribution of mountain rock gamma activity of the bed from the tunnel entry to the site borders were received. Statistically grounded division of radiometric halo into the zones was conducted. The dependence of gamma-activity intensity on the relief slope influencing on the water speed in the stream and determining the level of natural electrical field of the flow potential influencing on interphase transition of substances including the radionuclides was established.

УДК 550.46

## РАЙОНИРОВАНИЕ СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА ПО ИНТЕНСИВНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ТЕРРИТОРИИ

Бахтин Л.В., Кокежанов Б.А., Пестов Е.Ю., Романов А.М.

*Институт геофизических исследований, Курчатов, Казахстан*

Выполнен анализ влияния ландшафтно-климатических условий на интенсивность разрушения горных пород. Цель — обоснование предпосылок районирования на зоны преимущественной дезинтеграции горных пород и зоны аккумуляции. Обоснованием для районирования являются гидрогеохимические данные по рН и гидрокарбонатам. Доказана применимость данного способа районирования для Семипалатинского испытательного полигона. Предложено использование способа на основе гидрогеохимических данных по скважинам, т.е. зонирование локальных участков по особенностям распределений рН и гидрокарбонатов в недрах.

### ВВЕДЕНИЕ

На земной поверхности и в породах фундамента широко развиты процессы разрушения и изменения природных сред. Интенсивность разрушения в различных регионах может существенно различаться. В общем случае она зависит от геоморфологических условий, характеризующихся региональным распространением. Анализ влияния ландшафтно-климатических условий на формирование геоморфологических особенностей и на разрушение горных пород является основой для дифференцирования территории по природной способности к миграции загрязняющих, в том числе и радиоактивных веществ.

### ПАРАМЕТРЫ РАЙОНИРОВАНИЯ

#### СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА И ПРИЛЕГАЮЩИХ ТЕРРИТОРИЙ

Первичное районирование территории СИП по ожидаемой скорости природного изменения существующей или предполагаемой радиационной обстановки производится на основе различия интенсивности регионального выветривания, обуславливающего разрушение, изменение и вынос веществ из верхних частей литосферы. Для этого использованы сведения о наиболее общих гидрогеохимических процессах в различных ландшафтных зонах [2, 3]. Численными характеристиками процесса разрушения горных пород подземными водами являются скорость химического выветривания и химической денудации, значения литогенной составляющей выноса, отношения выноса к остатку вещества. Априорное знание о том, какая из характеристик имеет преобладающее значение — отсутствует. Волевое решение о большей приемлемости той или иной характеристики носит субъективный характер и может оказаться ошибочным. Поэтому принимается условие их равной значимости.

### ВЫБОР УЧАСТКА РАБОТ

Основными ландшафтно-климатическими зонами СИП и прилегающих территорий с известным поверхностным радиоактивным загрязнением являются: степи умеренной зоны (участок Балапан),

а также горностепная зона (участок горного массива Дегелен).

Решение ведется двумя путями:

1. Устанавливаются взвешенные значения характеристик по отдельно взятой ландшафтной зоне. Для этого каждое значение в столбцах 2, 3, 4, 5 таблицы 1 нормируется (делится) на наименьшие значения соответствующих столбцов. Полученные таким образом относительные значения суммируются по каждой строке отдельно (столбец 6 таблицы 1).

Согласно результатам, представленным в таблице 1, наименьшей суммой взвешенных значений характеризуется степи умеренной зоны — 7.8. Остальные зоны характеризуются высокими суммами весовых значений. Чем больше сумма взвешенных значений, тем интенсивнее разрушающее воздействие процессов выветривания на горные породы, тем больше вероятность миграции радионуклидов из мест первичного загрязнения.

2. Другим путем является ранжирование значений зон. При этом определяется ранг значения каждой характеристики для отдельно взятой ландшафтной зоны: наименьшее значение в столбце соответствует единице, а наибольшее — общему количеству значений в столбце.

После поочередного ранжирования таблицы 1 по столбцам 2, 3, 4 и 5, выполняется суммирование рангов по каждой строке, полученное значение присваивается соответствующей ландшафтной зоне (столбец 6 таблицы 2). Согласно ранжированию устанавливается, что степи характеризуются наименьшей интенсивностью проявления воздействия природных вод на горные породы (таблица 2), а также на массы загрязнений.

Оба пути дают одинаковые решения: наименьшее воздействие природных вод на горные породы и массы отходов свойственно зонам степей.

Фактически горные зоны являются участками дезинтеграции горных пород, слагающих верхний слой литосферы. Разрушение происходит в результате физического и химического выветривания.

**РАЙОНИРОВАНИЕ СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА  
ПО ИНТЕНСИВНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ТЕРРИТОРИИ**

Таблица 1. Взвешенные значения объемов и скоростей разрушения горных пород подземными водами [2, 3]

Ландшафтные зоны	Литогенная составляющая выноса, т/год·км <sup>2</sup>	Отношение выноса к остатку веществ	Скорость подземного химического выветривания см/1000 лет	Скорость подземной химической денудации см/1000 лет	Сумма весов
1	2	3	4	5	6
Умеренная зона					
Лесостепь	4.4	1.5	10.9	4.3	21.1
Степь	1.2	1.0	4.2	1.2	7.8
Горная зона					
Горно-лесная	5.4	2.6	8.5	5.3	21.8
Горно-степная	3.0	1.4	7.9	13.0	25.3

Таблица 2. Взвешенные значения объемов и скоростей разрушения горных пород подземными водами [2, 3]

Ландшафтные зоны	Литогенная составляющая выноса, т/год·км <sup>2</sup> (ранг)	Отношение выноса к остатку веществ (ранг)	Скорость подземного химического выветривания см/1000 лет (ранг)	Скорость подземной химической денудации см/1000 лет (ранг)	Сумма рангов
1	2	3	4	5	6
Умеренная зона					
Лесостепь	6.6 (7.5)	1:6.0 (4)	1.85 (12)	0.26 (7.5)	31
Степь	1.8 (2)	1:9.0 (1)	0.72 (3)	0.07 (2)	8
Горная зона					
Горно-лесная	8.1 (9)	1:3.5 (7.5)	1.45 (9)	0.32 (9)	34.5
Горно-степная	4.5 (5)	1:6.5 (3)	1.35 (8)	0.78 (14)	30

Физическое выветривание в горных зонах сопровождается смещением по латерали дезинтегрированного материала, в том числе загрязненного радионуклидами. Особенно интенсивное смещение происходит на участках постоянных и временных водотоков. Распространение механических ореолов радиоактивного загрязнения при этом может достигать первых километров за год и более.

В степных зонах смещение продуктов физического выветривания слабое. Большая часть дезинтегрированного материала остается на месте. Степные области являются преимущественно зонами аккумуляции разрушенного материала горных областей и локальных возвышенностей. При отсутствии техногенного воздействия даже в песчаных грунтах смещение радиоактивных ореолов не превышает 40–70 см за 10 лет. Это установлено многочисленными съемками радиоактивного загрязнения грунта на складах временного хранения отработанного оборудования предприятий по добыче и переработке урановых руд, а также добычи нефти.

#### ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ

Химическое выветривание в горных и степных зонах сопровождается переходом части компонентов горных пород в водную фазу литосферы. Следствие — увеличение минерализации вод поверхностных и подземных водотоков. Большая часть минерализации представлена главными химическими компонентами природных растворов – натрием, калием, магнием, кальцием, хлором, сульфат-ионом, карбонат-ионом. Коэффициент корреляции минерализации с этими компонентами достигает 0,9 и более. Т.е. связь значимая, устойчивая. Пример этой связи приведен на рисунке 1.

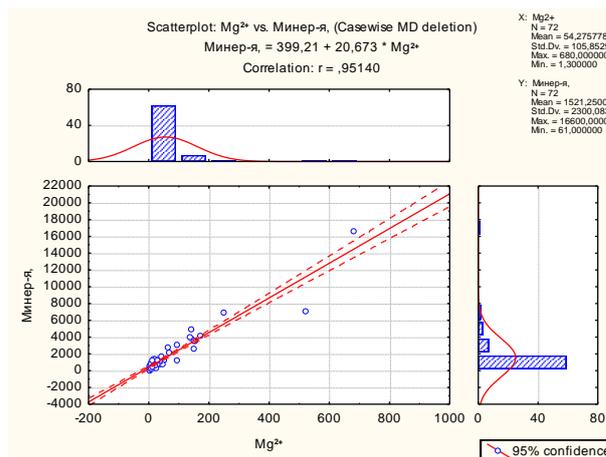


Рисунок 1. Типичная связь минерализации и концентрации главных химических компонентов природных растворов

Обычно минерализация и содержания главных химических компонентов возрастают по мере продвижения потоков природных вод, относительно вмещающих горных пород. Согласно статистической обработке гидрогеохимических данных, взаимосвязи между главными химическими компонентами природных вод рек, озер и подземных водотоков, характеризуются высокими уровнями коэффициентов корреляции и являются значимыми [1].

Гидрокарбонат-ион в природных водах содержится также в большом количестве, но взаимосвязь его с минерализацией существенно иная (рисунок 2).

**РАЙОНИРОВАНИЕ СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА  
ПО ИНТЕНСИВНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ТЕРРИТОРИИ**

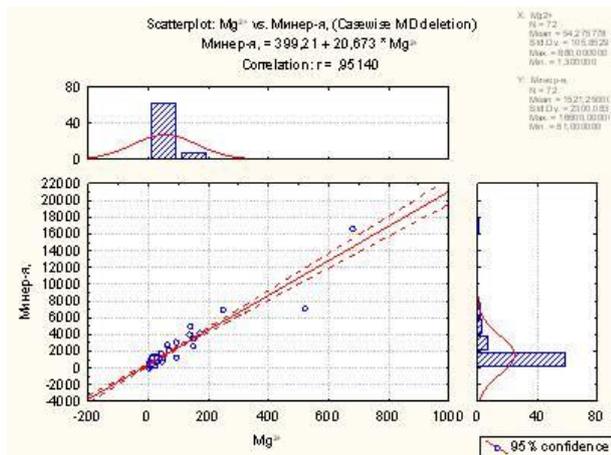


Рисунок 2. Типичные виды графиков парных зависимостей концентрации гидрокарбонат-иона от содержаний главных химических компонентов природных вод на территории СИП

Высокие концентрации гидрокарбонат-иона проявлены в водах с преимущественно низкой минерализацией. В целом связь этих показателей характеризуется низким коэффициентом корреляции и практически отсутствует. Кроме того, известно, что по мере удаления от начала потока, содержания гидрокарбонат-иона сначала возрастают, затем выходят на асимптоту, а после снижаются [1].

Данное распределение существенно отличается от последовательного возрастания минерализации природных вод по мере удаления от начала потока.

Следует также отметить особенности в распределениях значений водородного показателя для вод рек, озер, болот и подземных водотоков. Данные, представленные Зверевым В.П. [2] и Шварцевым С.Л. [3] свидетельствуют о том, что речные и родниковые воды горных зон характеризуются повышенными значениями pH (8–8,5) относительно рек степных зон (7–7,5). Особенно низкие значения pH (до 3–3,5) имеют болота. И это при том, что в водах указанных природных накопителей не содержатся кислоты и щелочи, приводящие к изменению pH.

Таблица 3. Сопоставление средних значений главных химических параметров природных вод СИП

	Частные выборки				
	Реки, родники	Озера	Скважины Косшоқы	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 <sup>-</sup>	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

Приведенные особенности свойственны также природным водам СИП (таблица 3). pH рек и родников значительно превышает pH озер. Распределения гидрокарбонат-иона свойственна обратная картина. Содержания HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> в реках и родниках втрое больше, чем в озерах и подземных водах, вскрытых скважинами.

Самыми низкими значениями pH (5,9–6,3) характеризуются подземные воды, формирующиеся при просачивании поверхностных вод из рек, ручьев и озер. Обращается особое внимание на отсутствие связи pH и содержаний гидрокарбонат-иона с содержаниями главных химических компонентов природных вод. Коэффициент корреляции при этом низкий, не достигающий критического уровня значимости [1].

Отсюда неизбежно следует различие в природе формирования pH (а также содержаний HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) и содержаний главных химических компонентов вод.

Последовательное возрастание содержаний главных химических компонентов вод связано с веществом фактором — выщелачиванием, приводящим к частичному переходу веществ из твердой фазы горных пород в растворы. Отсутствие кислот и щелочей в природных водах указывает на влияние другого фактора, обуславливающего изменение pH и содержаний HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>.

Последовательным перебором возможных вариантов установлена наибольшая приемлемость структурного фактора – зависимости свойств раствора от скорости течения вод относительно горных пород [1].

Это движение формирует электрическое поле потенциала течения, влияющего на взаимодействие горных пород и вод. Оно позволяет непротиворечиво объяснить изменение химического состава и pH вод в природных условиях, а также геохимических и гидрогеохимических проб, находящихся на длительном хранении.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ КОМПЛЕКСНЫХ ДАННЫХ

По гидрогеохимическим данным уверенно выделяются зоны преимущественной дезинтеграции (истока) и аккумуляции (накопления). Горная зона, безусловно, характеризуется большей интенсивностью разрушения дневной поверхности по сравнению со степной зоной и подлежит более частому мониторингу радиоактивного загрязнения. Из сопоставления таблиц 1 и 2 предполагается, что в горных зонах (участок Дегелен) мониторинг поверхности земли должен производиться в 3–4 раза чаще, чем в степях (участки Балапан).

Обращено особое внимание на различие показателей pH и содержаний  $\text{HCO}_3^-$  вод в скважинах. Так воды скважин степного участка Акбота характеризуются пониженными значениями показателей pH и содержаний  $\text{HCO}_3^-$  по сравнению с водами скважин горных участков Дегелен и Косшоки. Тем самым проявляются предпосылки для выделения зон истока и накопления подземных вод на основе гидрогео-

химических исследований. Т.е. возможна дифференциация недр степей на локальные участки истока и накопления подземных вод с последующим прогнозом миграции и накопления радионуклидов.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании комплексного рассмотрения геохимических характеристик процессов физического и химического выветривания горных пород закономерно установлены предпосылки для выделения территорий СИП с различной интенсивностью миграции радионуклидного загрязнения. Наибольшей миграционной способностью характеризуются горно-степные, горно-лесные и лесостепные ландшафтно-климатические зоны. В степных зонах дезинтеграционные процессы с последующим переносом радионуклидов проявлены заметно слабее. Это обуславливает различие в частоте проведения мониторинга в указанных зонах. По особенностям гидрогеохимических данных предполагается возможность выделения зон истока и накопления вод в недрах независимо от рельефа (ландшафта) местности.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Романов, А. М. Взаимодействие вод с горными породами / А. М. Романов // Алматы, 2003. – с. 247.
2. Зверев, В. П. Гидрогеохимия осадочного процесса / В. П. Зверев // М., Наука, 1993, – с. 171.
3. Шварцев, С. Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза / С. Л. Шварцев // М., Недра, 1978. – с. 422.

## АУМАҚ БЕТІ БҰЗЫЛУ ҚАРҚЫНДЫЛЫҒЫ БОЙЫНША СЕМЕЙ СЫНАУ ПОЛИГОНЫН АУДАНДАУ

Л.В. Бахтин, Б.А. Кокежанов, Е.Ю. Пестов, А.М. Романов

*Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатова, Қазақстан*

Таужыныстар бұзылудың қарқындылығына ландшафты-климаттық жағдайлардың әсер етуін талдауы орындалған. Мақсат – таужыныстар артықшасында дезинтеграциялану зоналарына және аккумуляциялану зоналарына аудандаудың алғышарттарын негіздеу. Аудандау үшін негізі болып табылатыны pH және гидрокарбонаттар бойынша гидрохимиялық деректері. Аудандаудың осы әдісін Семей сынау полигоны үшін қолдануға болатыны дәлелделген. Ұңғымалар бойынша гидрогеохимиялық деректері негізіндегі әдісін қолдануы ұсынылған, яғни локаль учаскелерді pH және гидрокарбонаттар таужыныстарда таралу ерекшеліктері бойынша зоналау.

## ZONING OF THE SEMIPALATINSK TEST SITE BY THE INTENSITY OF THE SURFACE TERRITORY DESTRUCTION

L.V. Bakhtin, B.A. Kokezhanov, Ye.Yu. Pestov, A.M. Romanov

*Institute of Geophysical Research, Kurchatov, Kazakhstan*

The influence of landscape and climatic settings on the intensity of mountain rocks destruction was analyzed. The aim is substantiation of zoning background into the zones of dominating rock breaking or accumulation zones. The substantiation for the zoning is hydrogeochemical data on pH and hydro carbonates. The applicability of this zoning method for the Semipalatinsk Test Site is confirmed. It is suggested to apply the method basing on hydrochemical data of boreholes, i.e. zoning of local sites by features of pH and hydro carbonate distribution in subsoil.

УДК 550.83; 551.594

## ИЗМЕНЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Марченко И.О., Мельничук М.А., Романов А.М.

*Институт геофизических исследований, Курчатов, Казахстан*

Одним из следствий перемещения вод относительно твердой фазы является электрическое поле потенциала течения. Оно неизбежно влияет на перераспределение веществ, изменяющих физические и химические свойства фаз. Выполнены опыты, установившие зависимость удельного электрического сопротивления электролитов от наложенного электрического поля. Причиной зависимости является структурирование электролита в приэлектродных зонах при наложении электрического поля. Полагается, что именно этот эффект обуславливает 80% уменьшения электрического сопротивления электролита. Тем самым структурирование жидкой фазы под действием электрического поля входит в обоснование представления взаимодействия горных пород и вод в гидродинамических структурах литосферы.

### ВВЕДЕНИЕ

Основными объектами геосферы, исследуемой при определении миграции загрязнения, являются две фазы: твердая (литосфера) и жидкая (гидросфера). Они характеризуются различной подвижностью и взаимно проникают друг в друга.

Исходной частью процесса геологического развития является механическое движение масс веществ. В результате его происходит перераспределение веществ и энергии внутри фаз и между фазами. Главным агентом извлечения, переноса и отложения веществ в геосфере является вода.

Одним из следствий перемещения вод относительно твердой фазы является электрическое поле потенциала течения. Оно неизбежно влияет на протекание физико-химических реакций в геологических средах. Перераспределение приводит к изменению физических и химических свойств фаз, т.е. электрическое поле является внешним источником воздействия на геологические среды.

Согласно принципу Ле-Шателье система оказывает сопротивление возмущающему воздействию извне. При этом происходит взаимодействие сред, приводящее к их изменению. Как правило, изменения сред происходят по пути, обеспечивающему наименьшее сопротивление – минимизации энергетических затрат. Выявление и объяснение особенностей изменений сред является физической основой представления динамических процессов.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Наиболее активное взаимодействие горных пород и вод происходит в гидродинамических структурах литосферы. Одной из сторон взаимодействия является электрическое поле потенциала течения. Оно изменяет твердую и жидкую фазы горных пород. Возникают вопросы:

1. Возможно ли изменение свойств среды без изменения концентраций содержащихся в ней веществ?

2. Каким образом можно выявить эти изменения?

3. Наиболее вероятный вариант объяснения?

Актуальность обусловлена необходимостью разработки одной из сторон нового представления о взаимодействии горных пород и вод в рамках выполнения гранта МОН РК «Обоснование применения геофизических методов для контроля миграции радионуклидов на Семипалатинском испытательном полигоне (СИП)».

Целью данной работы является выявление изменения жидкой фазы, происходящего в результате воздействия электрического поля на воды.

### РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Одним из простых представлений изменения сред при спонтанном прохождении процессов по пути наименьшего сопротивления является опыт по уменьшению электрического сопротивления вод при наложении на них электрического поля.

В центре лабораторного бака размером 90×90×60 см, заполненного водой, на поверхности воды устанавливались два линейных медных электрода, длиной по 5.6 см. Межэлектродное расстояние составляло 8 см. К электродам подводилось стабилизированное напряжение 200 В. Измерения постоянного тока производились через 10, 30, 60, 120, 180 и 300 сек после включения. Значения тока при этом составили 280, 290, 300, 310, 320 и 325 мА соответственно. Из отношения напряжения и тока устанавливается, что электрическое сопротивление раствора межэлектродного пространства последовательно уменьшается по мере увеличения длительности пропускания тока. При этом последнее значение сопротивления оказалось в 1.16 раз меньше начального.

На рисунке 1 приведены значения тока, показывающие, что с течением времени уровень тока при стабилизированном напряжении растет. Это свидетельствует об уменьшении электрического сопротивления межэлектродного пространства при наложении электрического поля.

## ИЗМЕНЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

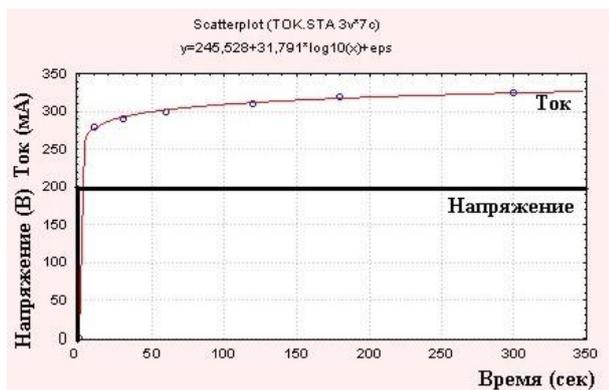


Рисунок 1. Изменение тока в воде с течением времени

Аналогичные результаты получены другими исследователями [2]. Условия опыта несколько отличались от вышеприведенных. В частности – электрическое напряжение и ток не стабилизировались. На момент включения в ионопроводящей среде регистрируются скачкообразные возрастания тока и напряжения. Далее, ток и напряжение экспоненциально уменьшаются. Приблизительно в 1.7 раза уменьшается напряжение и в 1.5 раза — ток. То есть при наложении электрического поля происходит изменение состояния ионопроводящей среды в 1.13 раза. Согласно различию в спаде напряжения и тока это изменение заключается в уменьшении электрического сопротивления межэлектродного пространства.

Таким образом, независимые по исполнению и условиям опыта дают близкие значения уменьшения электрического сопротивления однородного электролита с течением времени при наложении постоянного электрического поля.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Попытками тривиальными объяснениями уменьшения удельного электрического сопротивления воды в вышеприведенном опыте являются:

- поступление веществ из анода в электролит;
- увеличение температуры электролита.

При пропускиании электрического тока вещество положительного электрода переходит в воду, что отмечается визуально. Перешедшее в воду вещество электрода представлено гидроокисью меди. Гидроокись меди в воде практически нерастворима [1] и находится в виде геля. После отключения тока гидроокись осаждается на дно бака. Повторное включение тока не действует на осажденный гель:

- пространственное перераспределение гидроокиси меди визуально не фиксируется;
- растворение геля — не отмечается.

Таким образом, уменьшение электрического сопротивления воды за счет поступления в нее вещества электродов для данного опыта относится к некорректным.

Проведена серия опытов по изучению зависимости удельного электрического сопротивления рас-

творя от его температуры. Использовалась пластиковая кювета, в которую тонким слоем наливалась вода с добавкой NaCl (электролит). На удаленных краях кюветы располагались линейные медные электроды. К электродам подводилось стабилизированное постоянное напряжение. Температура воды возрастала за счет прохождения через нее электрического тока. Температура замерялась в центре кюветы, а также в приэлектродных зонах. Кроме того, измерялся ток, проходящий через электролит. Замеры производились в начале опытов и через каждую минуту после включения тока.

Для повышения уверенности в надежности получаемых зависимостей в единую выборку включались данные с различной длительностью интервалов времени, а также с измененной полярностью электродов. После каждого опыта отработанный электролит заменялся свежим.

Результаты статистической обработки результатов экспериментов представлены на рисунке 2. По графику парных значений температуры (T) и электрического сопротивления (R) отмечается явная взаимная зависимость этих параметров. С вероятностью 95% она значима. Коэффициент корреляции, равный  $-0,84$  для объема 50 измерений позволяет эту взаимозависимость определить, как близкую к функциональной.

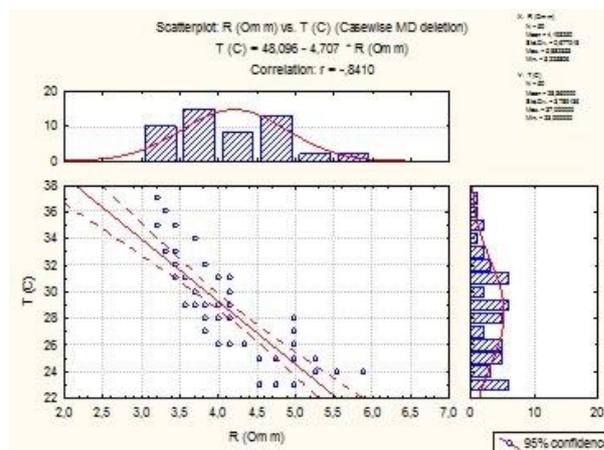


Рисунок 2. Общая статистическая характеристика зависимости электрического сопротивления электролита от температуры

Известно, что зависимость электрического сопротивления электролита от его температуры выражается формулой [3]:

$$R = R_0 \cdot (1 - \alpha T)$$

где  $R_0$  – начальное электрическое сопротивление электролита,  $R$  – изменяющееся во время опыта электрическое сопротивление при изменении температуры  $T$ ,  $\alpha$  – коэффициент зависимости сопротивления от температуры.

Для электролита, представленного раствором поваренной соли, коэффициент  $\alpha$  (или коэффициент наклона) равен  $0,02$  (1/градус К) [3].

Исходя из результатов опыта и уравнения регрессии коэффициент зависимости равен 0,098. Это практически в 5 раз больше значения коэффициента для зависимости сопротивления только от температуры. Причина – в приведенном опыте сопротивление электролита зависит не только от температуры, но и от электрического поля. При этом 80% изменения электрического сопротивления электролита обусловлено воздействием электрического поля, а не изменением температуры.

Отсутствие зависимости электрического сопротивления раствора от вещества, поступающего из анода в межэлектродное пространство, а также малый вклад изменения температуры в уровень сопротивления (20%) указывают на то, что в данном опыте электрическое сопротивление преимущественно обусловлено другими причинами. Согласно замерам установлено, что вблизи анода  $pH=3\div5$ , вблизи катода  $pH=8\div9$ , в центре межэлектродного пространства  $pH=7$ . Кислоты и щелочи в растворе отсутствуют.

Наиболее вероятной причиной уменьшения удельного электрического сопротивления и  $pH$  является структурирование электролита в приэлектродных зонах под действием электрического поля [4].

Простейшим случаем структурирования предполагается пространственное перераспределение ионов электролита  $Na^+$  и  $Cl^-$  и последующее соединение с ионами воды  $H^+$  и  $OH^-$ . Пространственные образования  $NaOH$  и  $HCl$  должны снижать электрическое сопротивление среды в 1,8–2,1 раза в зависимости от формы образований [4].

Приведенный вариант условный и в реальных условиях невозможен. Зато вполне реален вариант с перераспределением ионов в линейные образования — каналы. Схематическое представление распределения ионов в каналах, образующихся под действием электрического поля, приведено на рисунке 3.

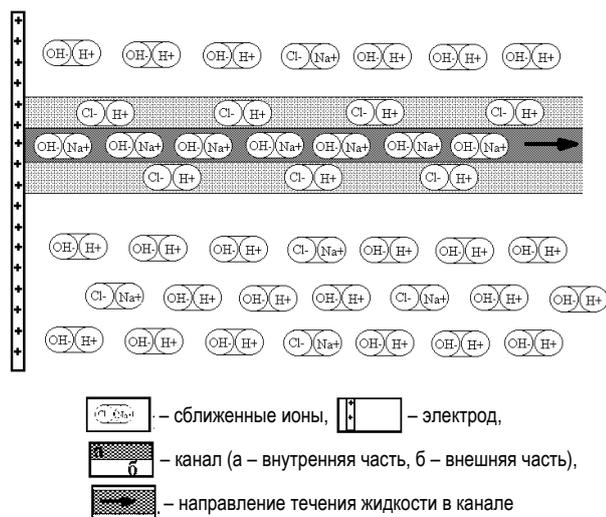


Рисунок 3. Схема распределения ионов в электролите под действием электрического поля

Фактическое наличие каналов отмечено экспериментально. В электролизной ячейке с медными электродами при включении постоянного тока появляются линейные образования – каналы (рисунок 4). Т.е. происходит структурирование жидкой фазы под действием электрического тока. Полагается, что именно этот эффект обуславливает 80% уменьшения электрического сопротивления электролита.

В соответствии с рисунком 1 определяется преимущественно кислотная реакция анодной зоны электролита. Аналогично характеризуется повышение щелочности в катодной зоне.



Рисунок 4. Образование каналов в растворе электролизной ячейки

Установление структурирования жидкой фазы под действием электрического поля входит в обоснование представления о взаимодействии горных пород и вод в гидродинамических структурах литосферы.

Изменение  $pH$  среды под действием наложенного электрического поля несомненно влияет на протекание физико-химических реакций в геологических средах. В результате возможно образование новых (вторичных) минералов. Тем самым отражается проявление вещественного фактора физико-геологической модели, представляющей взаимодействие горных пород и вод в гидродинамических структурах литосферы [5].

Изменение удельного электрического сопротивления воды приводит к проявлению структурного фактора. Он отражается в образовании линейных каналов, по направлению которых происходит развитие вторичных минералов. Вид этих минералов представлен на фотографии рисунка 5 показывающих единую вытянутость шестоватости кварц-серпичитовых оторочек на сульфидных включениях. Особо подчеркивается, что данная минералогическая особенность преимущественно проявлена вблизи рудных зон гидродинамических структур [4]. Т.е. в местах наиболее интенсивного движения потоков вод и, соответственно — наибольшего уровня электрического поля потенциала течения.

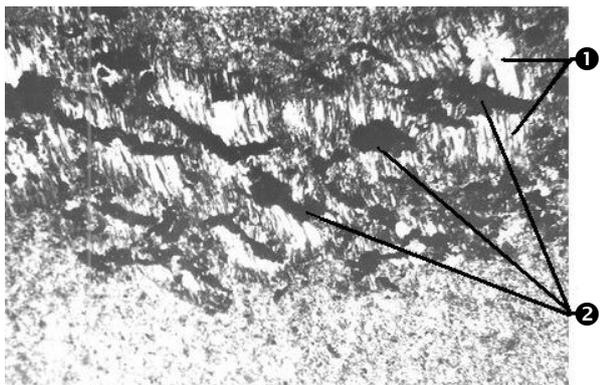


Рисунок 5. Кварц-серицитовые оторочки (1)  
на сульфидных включениях (2) (на примере участка  
урановых месторождений Восток – Звездное)

Указанная связь вещественного и структурного факторов с экспериментальными данными объясняет физическую сторону процесса межфазного обмена веществами в гидродинамических структурах литосферы — составной части исследования, выполненного в рамках гранта МОН РК «Обоснование применения геофизических методов для контроля

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гороновский, И.Т. Краткий справочник по химии / И.Т. Гороновский, Ю.П. Назаренко, Е.Ф. Некряч // Акад. наук УССР, Киев. – 1962.
2. Комаров, В.А. Электроразведка методом вызванной поляризации / В.А. Комаров // Л.: Недра, 1980. – 391 с.
3. Ландсберг, Г.С. Элементарный учебник физики / Г.С. Ландсберг // М. Наука, 1985. – Т.2. – 479 с.
4. Романов, А.М. Взаимодействие вод с горными породами / А.М. Романов // Алматы: ИВТ НАК «Казатомпром», 2003. – 247 с.
5. Романов, А.М. Геолого-геофизическое картирование на основе геоэлектрических особенностей взаимодействия горных пород и вод / А.М. Романов // Электронный журнал «Современные проблемы науки и образования», 2013. – № 5.

#### ЭЛЕКТР ӨРІСІ ЫҚПАЛЫНДА СУ ЕРІТІНДІЛЕРДІҢ МЕНШІКТІ ЭЛЕКТР КЕДЕРГІСІ ӨЗГЕРІЛУІ

И.О. Марченко, М.А. Мельничук, А.М. Романов

*Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатов, Қазақстан*

Қатты фазасына қатысты сулар орын ауысудың салдарларының бірі болып табылатыны ағым потенциалының электрлік өрісі. Ол, фазалардың физикалық және химиялық қасиеттерін өзгертетін, заттар қайта таралауына шарасыз ықпал етеді. Электролиттердің меншікті электрлік кедергісі келтірілген электр өрісінен тәуелділігін анықтайтын тәжірибе орындалған. Тәуелділіктің себебі болып табылатыны электр өрісін келтіруінде электродтар жанындағы зоналарда электролиттің құрылымдануы. Дәл осы әсер электролиттің электрлік кедергісі 80% төменделуіне себеп болады деп саналады. Сонымен, электр өрісі ықпалында сұйық фазаның құрылымдануы, литосфераның гидродинамикалық құрылымдарында таужыныстар мен сулардың өзара әрекеттестігін түсіну негіздемесіне кіреді.

#### CHANGE OF ELECTRICAL RESISTIVITY OF WATER SOLUTIONS UNDER THE INFLUENCE OF ELECTRICAL FIELD

I.O. Marchenko, M.A. Melnichyuk, A.M. Romanov

*Institute of Geophysical Research, Kurchatov, Kazakhstan*

One of the consequences of water moving regarding the solid phase is electrical field of the stream potential. It influences directly on redistribution of substances changing physical and chemical properties of phases. The conducted experiments showed the dependence of electrical resistivity of electrolytes on superimposed electrical field. The reason of dependence is electrolyte structuring in near-electrode zones at superposing of electrical field. It is supposed that namely this effect stipulates 80% decrease of electrolyte electrical resistance. Thus, the structuring of liquid phase under the influence of electrical field enters the grounding for interaction of mountain rocks and waters in hydrodynamic structures of the lithosphere.

УДК 550.83; 551.594

**ОЦЕНКА ЗАВИСИМОСТИ СОРБЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ ПОРОД ОТ КРУПНОСТИ ФРАКЦИЙ**

Резяпова-Атаханова В.А., Романов А.М.

*Институт геофизических исследований, Курчатов, Казахстан*

Рассмотрены данные, а также интерпретация результатов опыта по оценке зависимости сорбционной способности горных пород от крупности фракций. Установлено, что при уменьшении крупности фракции нарастание удержания радионуклидов в эксперименте отстает от расчетного в 1,9–9,5 раз. Полученное различие не объясняется представлениями о сорбции в результате воздействия сил «некулоновского происхождения». Причиной различия является движение вод относительно горных пород. Оно формирует электрическое поле потенциала течения, которое влияет на переход веществ между жидкой и твердой фазами. Это непротиворечиво объясняет несоответствие экспериментальных данных расчетным значениям.

**ВВЕДЕНИЕ**

Геологические и геоэкологические исследования в обязательном порядке используют фракционный анализ. Применительно к условиям СИП результаты анализа используются для определения фактической поглотительной способности радионуклидов различными фракциями тех или иных горных пород.

Статистическая обработка данных анализа обычно устанавливает обратную зависимость накопления загрязняющих радионуклидов от крупности фракций. На этой основе делается вывод о преимущественном повышении удерживающей способности с уменьшением размеров фракций горных пород.

Результаты соответствующих исследований учитываются при определении процесса взаимодействия горных пород и вод — базового представления о распространении радиоактивного загрязнения территории СИП. Правомочность применения данного вида анализа в данном контексте рассмотрена на конкретных данных.

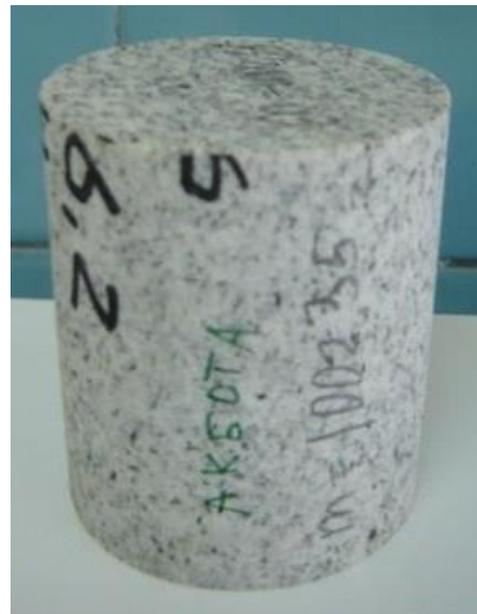
Назначение: формирование строгой базы доказательства соответствия физико-геологического представления взаимодействия горных пород и вод реальным геологическим условиям СИП.

Новизна: критический подход к оценке поглотительной способности горных пород в зависимости от крупности их фракций.

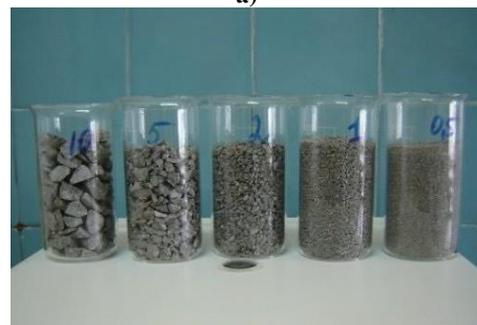
**ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ**

Рассматриваются результаты одного из ряда широко известных экспериментов по определению зависимости поглощения радионуклидов из растворов от крупности твердой фракции. Данный эксперимент был проведен лабораторией радиоэкологического контроля Института атомной энергии. [2].

Для опыта использовались раздробленные образцы керна скважины (рисунок 1-а), разделенные на фракции методом отсева (рисунок 1-б) и раствор  $^{137}\text{Cs}$  известной активности. Размер зерен анализируемых фракций: 10, 5, 2, 1 и 0,5 мм (рисунок 1). Согласно линейным размерам 1 зерно фракции 10 мм эквивалентно 8 зернам фракции 5 мм, 125 зернам фракции 2 мм и т.д.



а)



б)

Рисунок 1. Подготовка образцов

Спектрометрические измерения проведены по растворам, в которых они выдерживались (до и после насыщения), промывным водам и непосредственно по дробленным образцам.

Образцы в течение 18 часов выдерживались в растворе  $^{137}\text{Cs}$  с активностью  $A_1$ , затем извлекались из радиоактивного раствора и помещались в сосуд с дистиллированной водой (рисунок 2).

**ОЦЕНКА ЗАВИСИМОСТИ СОРБЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ ПОРОД  
ОТ КРУПНОСТИ ФРАКЦИЙ**



Рисунок 2. Насыщение образцов раствором цезия-137

Таблица 1. Усреднённые результаты гамма-спектрометрических измерений

Вид образца	A <sub>1</sub> , Бк/пробу	A <sub>2</sub> , Бк/пробу	A <sub>3</sub> , Бк/пробу	A, Бк/пробу	M, г	A <sub>удерж.</sub> Бк/г
плаггиограниты						
монолит	1219,04±56,03 100%	1107,02±46,42 90,81%	8,35±0,66 0,68%	103,67±10,18 (8,5%)	1002,35	0,103
фракция 10 мм	1219,04±56,03 100%	1056,36±43,02 86,94%	37,09±1,42 3,04%	121,91±9,43 (10,01%)	290,344	0,42
фракция 5 мм	1219,04±56,03 100%	1031,66±34,67 84,63%	47,64±3,06 3,91%	137,34±5,93 (11,27%)	308,028	0,45
фракция 2 мм	1219,04±56,03 100%	978,04±48,63 80,23%	61,29±2,85 5,03%	191,45±8,04 15,68%	279,433	0,69
фракция 1 мм	1219,04±56,03 100%	902,49±38,81 73,3%	71,98±5,46 5,03%	252,51±9,58 20,71%	305,8	0,83
фракция 0,5 мм	1219,04±56,03 100%	957,60±33,57 72,32%	85,79±5,78 7,18%	261,41±10,81 21,44%	296,649	0,88

Радиоактивный раствор цезия после извлечения из него исследуемого образца передавался на  $\gamma$ -спектрометрию для определения остаточной активности  $^{137}\text{Cs}$  – A<sub>2</sub>.

Исследуемый образец промывался дистиллированной водой. Промывочная вода передавалась на  $\gamma$ -спектрометрию для определения снимаемой активности A<sub>3</sub>. Измерение каждого образца проводилось трижды. В таблице 1 приведены усредненные результаты измерений.

Удерживаемую активность образцов определяли по формуле:

$$A_{\text{удерж.}} = (A_1 - A_2 - A_3)/M = A/M \quad (1),$$

где A<sub>удерж.</sub> – удерживаемая активность образца, в Бк/г;

A<sub>1</sub> – первоначальная активность раствора Cs<sub>137</sub> в Бк/пробу;

A<sub>2</sub> – активность раствора Cs<sub>137</sub> после извлечения образца, в Бк/пробу;

A<sub>3</sub> – активность промывных вод в Бк/пробу;

A – активность образца в Бк/пробу;

M – масса образца в граммах.

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Одним из выводов данного исследования является: удерживаемая активность пород обратно пропорциональна размеру исследуемых фракций. Чем

меньше размер фракции, тем больше ее удерживаемая активность. Это отчетливо прослеживается по данным определений A<sub>удерж.</sub> различных фракций, представленным в таблице 1.

Согласно полученным результатам удерживаемая активность последовательно возрастает с уменьшением размера фракции. Именно эти выводы использовались при интерпретации результатов данного опыта. В частности «удерживаемая активность» отождествлялась с «удерживающей способностью».

Возникает вопрос о правомерности этого отождествления.

1. Удерживающая способность обычно связывается с сорбционными свойствами твердой фазы. То есть с удельной поглотительной способностью. За короткое время (18 часов): раствор с радионуклидами проникает на малую глубину (десятые-сотые доли мм).

Таким образом, поступление радионуклидов в данном опыте относится к адсорбции. Адсорбция — это процессы перехода веществ из жидкой фазы в твердую, происходящие на поверхности твердой фазы. Определяющим параметром для оценки общего поглощения радионуклидов является площадь поверхности твердой фазы, а не ее масса.

**ОЦЕНКА ЗАВИСИМОСТИ СОРБЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ ПОРОД  
ОТ КРУПНОСТИ ФРАКЦИЙ**

Отсюда следует сомнение в правомерности связи зависимости удерживающей способности твердой фазы с размерами ее фракции. Учет поверхности поглощения позволяет правомерно определить поглонительную способность радионуклидов для каждой фракции.

Площадь поверхности зерен каждой фракции оценивается следующим образом:

– при дроблении исходного образца образуется множество мелких зерен;

– общая поверхность множества мелких зерен существенно превышает поверхность исходного образца. Чем меньше фракция, тем больше общая поверхность твердой фазы;

– так, деление куба на 8 мелких одинаковых кубов приводит к увеличению поверхности твердой фазы в два раза, деление на 125 — в 5 раз и т.д. (ряды 4 и 5 таблицы 2);

– общая удерживаемая способность твердой фазы возрастает пропорционально площади ее поверхности.

Выполнено сопоставление ожидаемого (расчетного) и экспериментального удержаний активности. Для обоих случаев отмечается увеличение удерживающей способности. Но оно оказалось различным. Так, в столбце 8 таблицы 2 показано, что при уменьшении крупности фракции нарастание удержания радионуклидов в эксперименте отстает от расчетного в 1,9–9,5 раз.

*Таблица 2. Сопоставление расчетной и фактической удерживающей способности*

Вид образца	Длина ребра относит.	Площадь граней одного зерна	Кол-во зерен	Отношение площадей поверхности расчетные	$A_{удерж.}$ Бк/г факт.	Отношение $A_{удерж.}$ эксперимент	Сопоставление расчет. и факт. способ.
1	2	3	4	5	6	7	8
фракция 10 мм	1	6	1	1	0,42	1	1
фракция 5 мм	0,5	1,5	8	2	0,45	1,07	1,87
фракция 2 мм	0,2	0,24	125	5	0,69	1,64	3,05
фракция 1 мм	0,1	0,06	1000	10	0,83	1,98	5,05
фракция 0,5 мм	0,05	0,015	8000	20	0,88	2,10	9,52

2. Общепринятым является представление об адсорбции веществ поверхностью твердой в результате воздействия сил «не кулоновского происхождения» [1]. Таким образом, априорно предполагается независимость адсорбции от воздействия электрического поля. Это также относится к физическим факторам — магнитному, гравитационному и другим полям.

Из отсутствия воздействия указанных физических факторов следует обязательность строгой зависимости поглощения от площади поверхности твердой фазы — поглотителя. Различие фактических и расчетных данных в данном контексте — необъяснимо.

В данном отношении интерпретация результатов исходного эксперимента, основанная на априорном положении, является некорректной. Соответственно выражается сомнение в правомерности отнесения поглощения радионуклидов твердой фазой к процессу адсорбции.

3. В реальных геологических условиях различие фракций проявлено преимущественно по рыхлым отложениям и локальным зонам дезинтеграции на участках разрушения скальных пород разломами. Т.е. предварительное группирование производится уже при отборе проб. При этом определяются частота, а так же интенсивность активности в коренных породах, коре выветривания, рыхлых отложениях и локальных зонах дезинтеграции.

Вопрос о необходимости более подробного изучения — фракционного анализа играет существенную

роль при определении технологических параметров переработки рудных масс. Для целей экологического исследования использование фракционного анализа вряд ли оправдано.

**Выводы**

1. В контексте изложенного удерживаемая активность горных пород не относится к адсорбционной способности. Связь удерживаемой активности с размером фракций не имеет особого смысла;

2. Интерпретация результатов приведенного эксперимента и аналогичных исследований, некорректна;

3. Необходимость подобных исследований для целей геоэкологии сомнительна.

Тем не менее, результаты опыта представляются важными в базовом аспекте. Ранее приведенная цитата о «не кулоновском происхождении» сил, обуславливающих адсорбционные процессы, и ее несоответствие результатам эксперимента заставляет определить причину, наиболее соответствующую объяснению процесса взаимодействия горных пород и вод.

В результате перебора из всех возможных вариантов наиболее приемлемым принято объяснение вышеприведенного различия расчетной и фактической поглонительной способности, как следствие воздействия потенциалов течения вод на осаждение радионуклидов. Формирование потенциалов течения в опыте неизбежно, т.к. поток вод проходит через горные породы или по их поверхности при погружении

и выемке образцов из раствора, а также при их промывке дистиллированной водой.

Чем больше потенциал, тем интенсивнее происходят реакции обмена в т.ч. и перехода радионуклидов из жидкой фазы в твердую [3]. Величина потенциала течения прямо зависит от протяженности непрерывного контакта твердой и жидкой фаз исследуемой системы [3]. Чем меньше интервал контакта зерна с потоком воды, тем меньше потенциал течения и тем меньше интенсивность перехода радионуклидов из жидкой фазы в твердую.

#### НАПРАВЛЕНИЯ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для фактического доказательства последнего утверждения необходимо модифицировать данный опыт: дополнительно определить интенсивность перехода радионуклидов при различной скорости непрерывного течения раствора через исследуемые образцы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Антропов, Л.И. Теоретическая электрохимия. – М.: Высшая школа, 1969. – 509 с.
2. Развитие геолого-геофизических методов изучения и оценки кристаллических горных пород СИП для экологически безопасной изоляции РАО: отчет по теме 04.02Н; рук. Е.Ю. Пестов, 2010.
3. Романов, А.М. Взаимодействие вод с горными породами. – Алматы: ИВТ НАК «Казатомпром», 2003. – 247 с.

### ФРАКЦИЯЛАРДЫҢ ІРІЛІГІНЕН ТАУЖЫНЫСТАРДЫҢ СІҢІРУ ҚАБІЛЕТІНІҢ ТӘУЕЛДІЛІГІН БАҒАЛАУ

В.А. Резяпова-Атаханова, А.М. Романов

*Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатов, Қазақстан*

Фракциялардың ірілігінен таужыныстардың сіңіру қабілетінің тәуелділігін бағалау бойынша тәжірибенің деректері және нәтижелерін пайымдауы қарастырылған. Фракциялардың ірілігі азайғанда радионуклидтерді ұстап қалудың ұлғаюы экспериментте есептісінен 1,9–9,5 есе артта қалатыны анықталған. Алынған айырмашылық «кулондық емес тегіндегі» күштердің әсері нәтижесінде сіңіру туралы ұғыммен түсіндірілмейді. Айырмашылықтың себебі болып келетіні — таужыныстарға қатысты сулардың қозғалысы. Ол, сұйық және қатты фазалар арасында заттар ауысуына ықпал ететін ағым потенциалының электрлік өрісін қалыптастырады. Бұл, эксперименталдық деректері еспетелген мәндеріне сәйкессіздігін қарама-қайшылық емес түсіндіреді.

### ESTIMATION OF SORPTION CAPACITY DEPENDENCE OF ROCKS ON FRACTION COARSENESS

V.A. Rezapova-Atakhanova, A.M. Romanov

*Institute of Geophysical Research, Kurchatov, Kazakhstan*

The data and results interpretation of the experiment on estimating of sorption capacity dependence of mountain rocks on fraction coarseness are considered. It was determined that at fraction coarseness decrease the augmentation of radionuclide retention in the experiment lags behind the calculated by 1.9–9.5 times. The obtained difference is not explained by sorption as a result of “non-Coulombic origin” forces influence. The reason of difference is water movement regarding the mountain rocks. It forms the electrical field of the stream potential that influences on the substance transition between the liquid and solid phases. This explains consistently the discrepancy between the experimental data and calculated values.

УДК 550.83; 551.594

**МОДЕЛИРОВАНИЕ МИГРАЦИИ ВЕЩЕСТВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ**

Мельничук М.А., Романов А.М., Тлеугалиев Д.Р.

*Институт геофизических исследований, Курчатов, Казахстан*

Представлен способ моделирования взаимодействия горных пород и вод через посредство электрического поля потенциала течения. Именно это поле определяет интенсивность и направленность обмена веществами между твердой и жидкой фазами. Наряду с динамическим параметром — скоростью движения вод относительно твердой фазы — учитываются структурный и вещественный параметры процесса взаимодействия. Визуализация процесса достигается путем использования веществ, характеризующихся специфической окраской. Приведены результаты экспериментов, моделирующих отложение веществ из вод в твердую фазу горных пород.

**ВВЕДЕНИЕ**

Моделирование является одним из способов представления геологических процессов. Зачастую физические процессы сложно характеризовать на базе логических или математических представлений. Числовое моделирование геологических процессов в ряде случаев обосновывает преимущественно априорные представления исследователя и может не иметь связи с реальностью. Примером этого является моделирование процессов оруденения.

Многие геологические задачи решаются на основе непосредственных наблюдений. Так, например, в практике геологических исследований визуальные обследования позволяют картировать выходы на поверхность горных пород различной литологии, и проследить тектонические нарушения. Отмечаются также характерные изменения горных пород на участках месторождений полезных ископаемых. Эти и другие аналогичные задачи сложно представить в цифровом виде даже с привлечением смысловых понятий. Еще сложнее представить изменение указанных объектов в динамике, особенно при мониторинге загрязнений геологических сред.

В этом случае наиболее подходящим является экспериментальное моделирование, соответствующее в физическом отношении реальным условиям и позволяющее визуализировать происходящие при этом процессы. Визуализация позволяет упростить понимание динамики процессов.

**Актуальность** обусловлена необходимостью экспериментального доказательства наличия вещественного, динамического и структурного факторов физико-геологической модели взаимодействия горных пород и вод в гидродинамических структурах литосферы [1].

**ПОДБОР УСЛОВИЙ И ПАРАМЕТРОВ  
ЭКСПЕРИМЕНТОВ**

Известно, что движение вод по горным породам сопровождается формированием электрического поля потенциала течения [2]. Электрическое поле оказывает непосредственное воздействие на движение вод [3] и на прохождение химических реакций, в т.ч. на ионный обмен. Статистическими исследованиями [4] доказано, что физические процессы, протекаю-

щие в среде при наложении электрического поля, определяются и термодинамическими и электрическими параметрами. При этом 80% изменения физического состояния среды определяется электрическими параметрами, а 20% — термодинамическими.

Электрическое поле оказывает силовое воздействие на воду. В результате образуется поток, направленный от участков положительного значения потенциала к отрицательному. Этот эффект наблюдается в природных условиях. Он используется при защите технологических объектов от грунтовых вод. Способ защиты — установка положительно заряженных электродов вблизи объекта защиты. Уровень стояния грунтовых вод на таких участках понижается из-за оттока [2].

При механическом движении вод участки истока характеризуются отрицательными значениями потенциала течения, а участка накопления — положительными [2]. Силовое воздействие электрического поля направлено против движения механического потока вод и тормозит его.

Воздействие поля не только тормозит движение исходного механического потока, но и оказывает непосредственное влияние на прохождение реакций взаимодействия горных пород и вод. Целью данной работы является визуальное установление специфических распределений веществ под действием электрического поля, моделирующих процессы, происходящие в гидродинамических структурах литосферы. Непосредственное наличие механического потока вод в опытах не требуется. Необходимо изучение только его следствия — электрического поля, которое можно наложить на исследуемую среду с помощью внешнего источника тока, оказывающего воздействие на межфазный переход веществ и движение вод.

Это указывает на необходимость определения в экспериментах непосредственно электрических воздействий на исследуемую среду. Визуализация достигается путем использования цветных веществ, не влияющих на ее электрические параметры.

Взаимодействие горных пород и вод обычно проявляется в форме ионного обмена между твердой и жидкой фазами. В реальных условиях динамика

взаимодействия визуально не регистрируется из-за медленности данного геологического процесса. Подбирались физические условия и параметры экспериментов, позволяющие ускорить и визуализировать динамику процесса, соответствующего поведению веществ в природных средах.

Условия, обеспечивающие соответствие эксперимента природным процессам:

1. Наличие твердой и жидкой фаз — соответственно горных пород и вод (вещественный параметр);

2. Наличие электрического поля, моделирующего следствие движение жидкой фазы относительно твердой — потоков вод в гидродинамических системах (динамический параметр);

3. Обеспечение возможности визуализации ионного обмена между твердой и жидкой фазами;

4. Обеспечение возможности изменения поперечного сечения потока вод — моделирование зон пересечения разрывных нарушений, изменение пористости, кавернозность, флексурные перегибы водопроницаемых слоев (структурный параметр).

Термодинамические представления для обоснования моделирования при таких условиях и параметрах непригодны [5]. Основание:

1. Соблюдение определяющего условия применимости химической термодинамики возможно только для закрытых систем. А геологические среды относятся к открытым системам.

2. Химическая термодинамика не учитывает геометрию потока. Структурный параметр не может включаться в термодинамическое объяснение процесса взаимодействия фаз.

Используются новые, физические представления [5], на базе которых следует моделировать процессы взаимодействия горных пород и вод в гидродинамических структурах литосферы. Исходя из них задавались исходные параметры опытов:

– водная среда представлена электролитом (NaCl), температурой от 18 до 35 °С;

– стабилизированное электрическое поле от электродов, расположенных в водной среде. Используемое напряжение от 10 до 200 В;

– изменение напряженности электрического поля достигалось путем ввода в межэлектродное пространство твердых объектов с удельным электрическим сопротивлением, отличающимся от сопротивления электролита.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТВЕРДОЙ И ЖИДКОЙ ФАЗ ПРИ НАЛОЖЕНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Использована пластиковая кювета, в которую наливалась вода с добавкой NaCl (электролит). На удаленных краях кюветы располагались линейные медные электроды. К электродам подводилось стабилизированное постоянное напряжение. При включении тока от анода в сторону катода в электролите распространялась нерастворимая взвесь гидроокиси ме-

ди. Взвесь имеет голубой цвет и уверенно отмечается визуально.

**Опыт 1. Характеристика движения гидроокиси меди в однородном межэлектродном пространстве. Результат воздействия динамического фактора.** Начало потока взвеси характеризуется пониженными значениями pH (кислые воды pH=5), окончание — повышенными (щелочные воды pH=9). В однородном по фазовому признаку межэлектродном пространстве на участке средних значений pH (нейтральные воды pH=7) наблюдается первоначальное формирование сгущения взвеси. Затем отмечается переход взвеси  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  из жидкой фазы в осадок с последующим образованием пленки (твердую фазу). Непосредственно перед этой пленкой со стороны анода продолжается дальнейшее накопление взвеси и переход в осадок (рисунок 1).

Этот опыт представляет воздействие электрического поля на движение воды, а также межфазный переход веществ в межэлектродном пространстве.

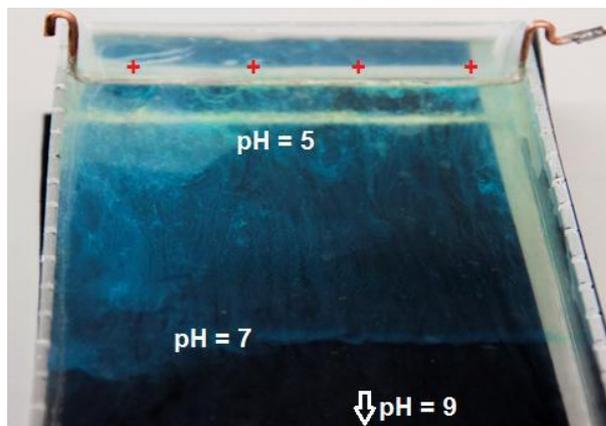


Рисунок 1. Модель миграции, накопления и отложения веществ в растворах под действием электрического поля

**Опыт 2. Характеристика движения гидроокиси меди в гетерогенном межэлектродном пространстве. Преобладающее влияние структурного и вещественного факторов.** Между электродами в электролит помещается непроводящий (высокоомный) объект. Как и в предыдущем опыте наблюдается первоначальное формирование сгущения взвеси. Затем отмечается переход взвеси  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  из жидкой фазы в осадок с последующим образованием пленки (твердую фазу). Приводятся три разновидности этого опыта, определяемые формой возмущающего объекта.

**Опыт 2а. Возмущающий объект представлен высокоомной горной породой, овальной формы. Объект расположен в анодной зоне.** Отложение гидроокиси меди происходит на дне кюветы по нормали к потоку на участках минимального расстояния между краями объекта (рисунок 2) и бортами кюветы. Фактически это зона минимальной ширины потока, в которой напряженность электрического поля, а следовательно и его воздействие на межэлек-

тродное пространство, — максимальны. Отложение происходит по линии максимальных значений напряженности поля.

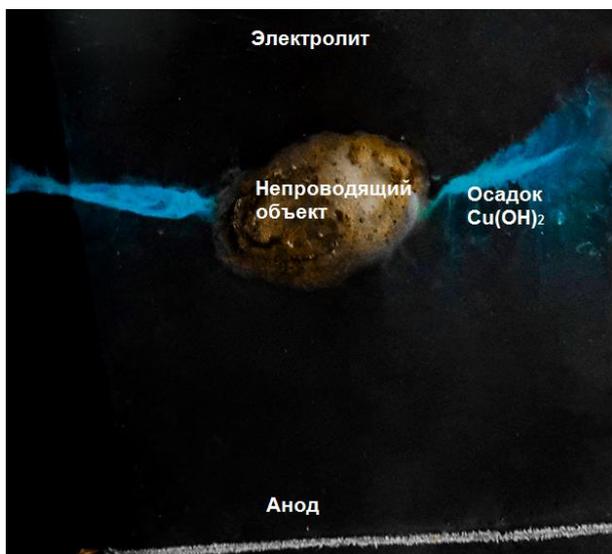


Рисунок 2. Отложение гидроокиси по линии максимальных значений напряженности

**Опыт 2б.** Возмущающий объект представлен сегментом стеклянной линзы с острыми краями. Объект расположен в анодной зоне. Отложение гидроокиси меди происходит на дне кюветы вблизи острых концов линзы (рисунок 3). Форма осадка — крест. Эта форма обусловлена линиями максимальной напряженности до и после прохождения потоком острых краев линзы.

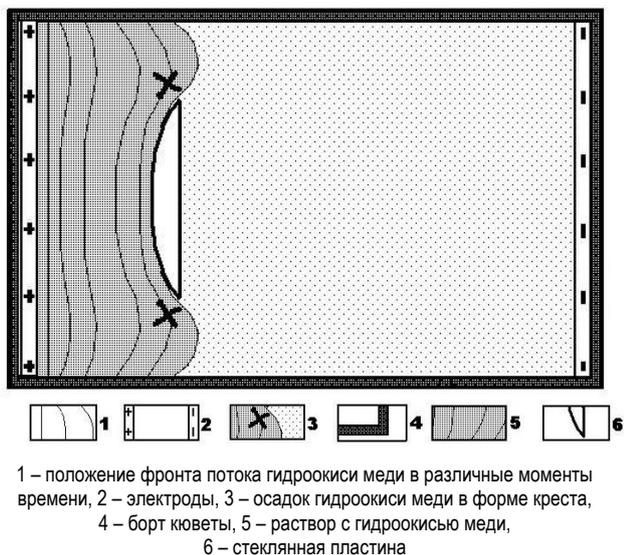


Рисунок 3. Осаждение гидроокиси меди в местах максимального градиента потенциалов электрического поля за пределами границ раздела фаз с различным удельным электрическим сопротивлением

**Опыт 2в.** Возмущающие объекты представлены несколькими прямоугольными параллелепипедами,

изготовленными из высокоомных горных пород. Объекты расположены в анодной зоне. Расстояние между непроводящими (высокоомными) объектами — различное. Отложение гидроокиси меди на дно кюветы для узких и широких протоков существенно различается. Наиболее интенсивное отложение, с последующим преобразованием части  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  в окись меди (осадок коричневого цвета), происходит в начале широких зон после прохождения узких протоков (рисунок 4). В широких протоках отложение происходит намного слабее и вблизи середины возмущающих объектов (рисунок 5).



Рисунок 4. Отложение гидроокиси меди на дне кюветы после узких протоков



Рисунок 5. Отложение в широких протоках вблизи середины возмущающих объектов

#### АНАЛИЗ И ОБРАБОТКА ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТА

**Интерпретация опыта 1.** Движение взвеси  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  моделирует поток вод в гидродинамической системе. Распределение значений электрического потенциала при этом отвечает распределению  $\Delta E_h$  в рудных зонах экзогенных месторождений: положительное перед рудной зоной и отрицательное — после рудной зоны по направлению потока [6]. Непосредственно рудная зона (участок преимущественного осаждения рудных веществ) находится в зоне переходных значений  $\Delta E_h$  (от высоких к низким) и, соответственно — потенциала. Именно эти схема и модель непротиворечиво объясняют известный факт — образование вторичных сульфидов на внутренней поверхности роллов экзогенных урановых месторождений — т.е. в зоне окисления [6]. Тогда

как общепринятые представления не могут объяснить подобное образование пирита.

Этим же опытом моделируется и наглядно представляется еще один парадоксальный факт: сначала первичное накопление рудных компонентов происходит непосредственно в жидкой фазе (потоках вод) и только после этого вещество переходит из жидкой фазы в твердую [7].

**Интерпретация опыта 2.** При помещении возмущающего высокоомного объекта в межэлектродное пространство, площадь поперечного сечения электролита уменьшается. Соответственно возрастают плотность тока и напряженность электрического поля. Тем самым создается структура, с повышенной вероятностью межфазного перехода веществ. Этим и объясняется образование осадка на участках минимального поперечного сечения потока  $\text{Cu}(\text{OH})_2$ . Эпицентральная линия максимума осаждения проходит перпендикулярно направлению потока вод (**Опыт 2а**).

Опыты (2 и 2а) демонстрируют проявленность структурного фактора — приуроченность отложения веществ из растворов к участкам резкого изменения поперечного сечения потока. Подобную приуроченность невозможно визуализировать моделями, основанными на применении термодинамических параметров.

Опыт 2б демонстрирует и объясняет возможность осложнения форм отложения веществ при воздействии электрического поля из-за резкого изменения направленности векторов электрического поля.

Особый интерес вызывают результаты опыта 2в. Структура межэлектродного пространства определяет различие отложения веществ в узких и широких трещинах. Модель отложения доказывает закономерность проявления более контрастного и богатого оруденения на участках выхода рудных растворов из узких трещин в широкое пространство по сравнению с участками середины и окончания широких

зон потока вод. Т.е. поступление рудного вещества из узких трещин в полости обуславливает большую вероятность формирования богатого и контрастного оруденения.

Представленные опыты отражают далеко не полный перечень возможных геоэлектрических ситуаций. В зависимости от ожидаемой геоструктурной обстановки эти опыты можно модифицировать и применять для визуального моделирования процессов оруденения, а также загрязнения исследуемых участков.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для визуализации взаимодействия горных пород и вод предложен новый способ моделирования процесса миграции и межфазного обмена веществ в гидродинамических структурах литосферы. Соответствие природы межфазного обмена веществ в эксперименте и в природных условиях обосновывает правомерность моделирования.

Визуализация моделируемых процессов обеспечивает наглядное представление о поведении веществ в природных структурах и может использоваться для подбора значений параметров, определяющих межфазное перераспределение веществ, в частности — рудообразование.

Представленное моделирование доказывает возможность накопления рудных веществ в зонах окисления. На этой основе непротиворечиво объясняется образование вторичных сульфидов в зонах окисления урановых месторождений.

Приведенные опыты можно модифицировать и применять для визуального моделирования процессов оруденения, а также загрязнения исследуемых участков.

*Работа выполнена в рамках гранта МОН РК «Обоснование применения геофизических методов для контроля миграции радионуклидов на Семипалатинском испытательном полигоне (СИП)» в 2015 г.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Романов, А.М. Геолого-геофизическое картирование на основе геоэлектрических особенностей взаимодействия горных пород и вод / А.М. Романов // Электронный журнал «Современные проблемы науки и образования» – № 5, 2013.
2. Справочник геофизика. Электроразведка. М.:Недра, 1980. – 516 с.
3. Приклонский, В.А. Грунтоведение // М., «Московский рабочий», 1955. – 430 с.
4. Романов, А.М. Взаимосвязи термодинамических и электрических параметров процесса взаимодействия горных пород и вод / А.М. Романов // Восьмые научные чтения памяти Ю.П. Булашевича, Институт геофизики УРО РАН, Екатеринбург, 2015. – С. 273–281.
5. Романов, А.М. Взаимодействие вод с горными породами / А.М. Романов// Алматы: ИВТ НАК «Казатомпром», 2003. – 247 с.
6. Лисицын, А.К. Гидрогеохимия рудообразования. М., Недра, 1975. – 248 с.
7. Романов, А.М. Модификация физико-геологического представления о формировании эпигенетических месторождений урана / А.М. Романов, М.А. Романова // Екатеринбург, 2012. – УИПП. – 238 с.

**ЭЛЕКТР ӨРІСІ ЫҚПАЛЫНДА ЗАТТЕКЕР ЖЫЛЫСТАУЫН МОДЕЛЬДЕУ**

**М.А. Мельничук, А.М. Романов, Д.Р. Тлеугалиев**

*Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатов, Қазақстан*

Ағым потенциалының электр өрісі арқылы таужыныстар мен сулардың өзара әрекеттестігін модельдеу әдісі келтірілген. Дәл осы өріс қатты және сұйық фазалар арасында заттармен алмасудың қарқындылығы мен бағытын белгілейді. Динамикалық параметрімен — қатты фазасына қатысты сулар қозғалу жылдамдығымен қатар өзара әрекеттестік процессінің құрылымды және заттық параметрлері есепке алынады. Процессті көзбен шолуына ерекше түсімен сипатталатын заттарды пайдалану жолымен қол жеткізіледі. Сулардан таужыныстардың қатты фазасына заттар түзілуін моделдейтін эксперименттердің нәтижелері келтірілген.

**MODELLING OF SUBSTANCES MIGRATION UNDER ELECTRICAL FIELD INFLUENCE**

**M.A. Melnichyuk, A.M. Romanov, D.R. Tleyugaliyev**

*Institute of Geophysical Research, Kurchatov, Kazakhstan*

The modelling technique of interaction between mountain rocks and water via electrical field of the stream potential is shown. Namely this field determines the intensity and direction of substance exchange between solid and liquid phases. Along with dynamic parameter — water movement speed regarding solid phase — the structure and substance parameters of interaction process are considered. The process visualization is reached by application of substances with featured color. The experiments results modelling the substances deposition from water into the solid phase of rocks are shown.

УДК 533.9.08;621.039.66

## ДИАГНОСТИКА РАДИАЦИОННЫХ ПОТЕРЬ ПЛАЗМЫ ДЛЯ ФИЗИЧЕСКОГО ПУСКА ТОКАМАКА КТМ НА ОСНОВЕ ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДЕТЕКТОРА

<sup>1)</sup> Шаповалов Г.В., <sup>1)</sup> Чектыбаев Б.Ж., <sup>2)</sup> Маусымбаев С.С., <sup>2)</sup> Купишев Е.Б., <sup>3)</sup> Сарычев Д.В.

<sup>1)</sup> Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

<sup>2)</sup> ГУ имени Шакарима города Семей, Семей, Казахстан

<sup>3)</sup> НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

Статья посвящена разработке болометра для диагностики радиационных потерь на казахстанском материаловедческом токамаке КТМ, который увеличивает возможности и повышает качество исследований. Особое внимание уделяется разработке конструкции и методике калибровки диагностики. Представлены первые экспериментальные результаты, которые показали работоспособность диагностики.

### ВВЕДЕНИЕ

В 2017 году планируется провести физический пуск на Казахстанском материаловедческом токамаке со следующими параметрами разряда: ток плазмы 100 кА и длительностью 100 мс. На современных установках с горячей плазмой болометры являются одними из базовых и неотъемлемых частей диагностического комплекса. Они дают важные сведения об общей излучаемой мощности плазмы и роли излучения в энергетическом балансе, а также ее зависимость от параметров разряда. Болометрическая диагностика является одной из первых по очереди внедрения и основной как на стадии запуска токамака, так и в последующей эксплуатации установки.

В целом болометр позволяет проводить:

- измерение радиационных потерь плазмы, включая потоки нейтральных частиц;
- исследование эволюции излучения плазмы;
- изучение роли излучаемой мощности плазмы в энергетическом балансе;
- определение энергетического времени жизни плазмы.

В составе диагностического комплекса токамака КТМ к физическому пуску имеется проектный болометр на основе тонкопленочной никелевой фольги [1]. Однако он имеет недостатки: сравнительно невысокую чувствительность и быстрое действие, а также неудобства, вызванные необходимостью использования жидкого азота для охлаждения детекторов. С учетом длительности планируемого плазменного разряда на физическом пуске использование штатного болометра приведет к погрешностям восстановления реальной динамики излучения плазмы во время разряда. В связи с этим является актуальным использовать болометр с характеристиками (чувствительность и быстрое действие), позволяющими измерить с более высокой точностью эволюцию мощности энергетических потерь плазмы на планируемом физическом пуске токамака КТМ. При этом если у нового болометра будет отсутствовать необходимость использования жидкого азота, то это значительно повысит эксплуатационные характеристики прибора. Одним из вариантов нового болометра, от-

вечающим вышеперечисленным требованиям может быть болометр на основе пироэлектрического детектора. Пироэлектрические детекторы уже использовались для измерения излучаемой мощности на некоторых установках типа токамак [2–4].

В статье представлена диагностика радиационных потерь на основе пироэлектрика (далее пироболометр), разработанная для физического пуска токамака КТМ и последующей его эксплуатации. Разработанная диагностика более чувствительна и имеет более высокое временное разрешение. Также в статье приведена методика калибровки диагностики и первые результаты измерений в экспериментах на токамаке КТМ.

### БОЛОМЕТР НА ОСНОВЕ ПИРОЭЛЕКТРИКА

Представленный в работе болометр основан на использовании свойств пироэлектрика [5]. Пироэлектрики — кристаллические диэлектрики, обладающие спонтанной (самопроизвольной) поляризацией, то есть поляризацией в отсутствие внешних воздействий.

Основанный на данном эффекте пироболометр имеет свойство поляризации при изменении температуры под действием излучения плазмы. Температурное изменение спонтанной поляризованности  $P_s$  обусловлено двумя основными причинами. С одной стороны, повышение температуры нарушает упорядоченность в расположении элементарных дипольных моментов (первичный или истинный пироэффект), а с другой — нагревание вызывает изменение линейных размеров диэлектрика и пьезоэлектрическую поляризацию, обусловленную деформацией (вторичный пироэффект).

Изменение температуры пироэлектрика приводит к генерации пирозарядов на его поверхности и возникновением пиротока при замыкании:

$$I = \frac{dQ}{dt} = A\gamma \frac{dT}{dt}$$

где  $A$  — площадь электродов,  $\gamma = dP_s / dT$  — пироэлектрический коэффициент, который учитывает оба фактора поляризации.

Пироболометры имеют постоянную спектральную чувствительность в широком спектральном диапазоне и чувствительны к энергиям нейтральных частиц по сравнению с болометрами на основе полупроводниковых AXUV-диодов (Absolute eXtreme UltraViolet), которые имеют «провал» на кривой спектральной чувствительности для энергии квантов меньше 40 эВ и не чувствительны к энергиям нейтральных частиц.

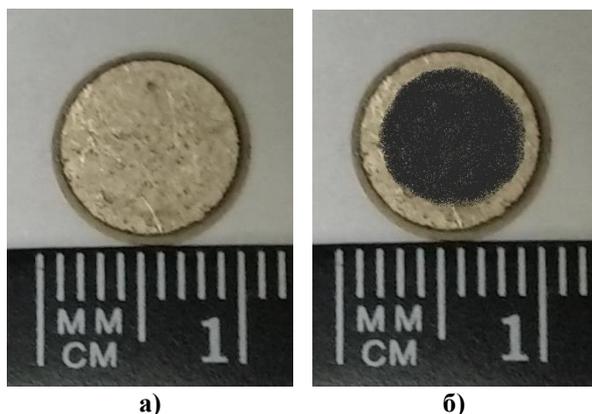


Рисунок 1. Пирозлектрик

Для пироболометра на КТМ в качестве чувствительного элемента используется пирозлектрический кристалл из высокополяризуемого ниобата лития  $\text{LiNbO}_3$  с постоянным до температуры 400 °С пирозлектрическим коэффициентом [6]. На рисунке 1-а показан сам чувствительный элемент (ЧЭ). Он представляет собой конденсатор в форме таблетки диаметром 10 мм и толщиной 1 мм, образованный путем нанесения металлических электродов на пирозлектрический кристалл. Спектральная чувствительность любого вида теплового устройства определяется только спектральной зависимостью поглощения излучения, которая зависит от коэффициента отражения поверхности. Для УФ и мягкого рентгеновского излучения, которое в основном будет на токамаке КТМ, коэффициент отражения близок к нулю.

Для увеличения квантовой эффективности ЧЭ во время калибровки поверхность ее зачернялась, как показано на рисунке 1-б.

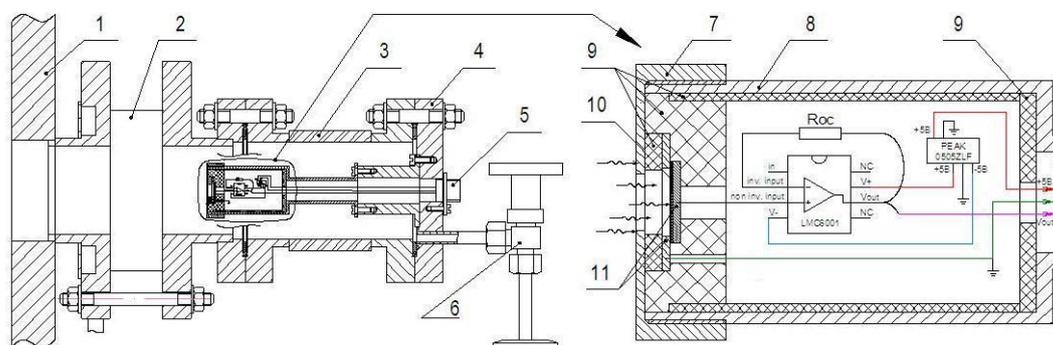
Схема регистрации сигналов пироболометра представлена на рисунке 2. Базовыми узлами диагностики являются чувствительный элемент и усилитель. В результате облучения пирозлектрика изменяется его спонтанная поляризация, возникающий ток цепи усиливается в операционном усилителе, являющимся преобразователем ток – напряжение. Далее сигнал поступает на вход регистрирующего устройства – АЦП. Следует отметить, что пироток находится в пикоамперном диапазоне, что приводит к необходимости использования прецизионных усилителей с очень низким током утечки и большим коэффициентом усиления.



Рисунок 2. Схема регистрации пироболометра

### КОНСТРУКЦИЯ ПИРОБОЛОМЕТРА ТОКАМАКА КТМ

Пироболометр размещен на месте проектного болометра на патрубке вакуумной камеры (ВК) токамака КТМ. На рисунке 3 показан эскиз размещения диагностики на заглушке экваториального патрубка. Между пироболометром и вакуумной камерой установлен вакуумный затвор для герметичной развязки от вакуумной камеры КТМ. Конструкцией предусмотрен также штуцер с вентилем для организации напуска атмосферы или вакуумной откачки камеры детектора во время оперативной установки или демонтажа пироболометра. Детектор керамическим изолятором гальванически развязан от потенциала вакуумной камеры.



1 – заглушка экваториального патрубка; 2 – шибер; 3 – керамический изолятор; 4 – заглушка; 5 – разъемы РСГС-10; 6 – вентиль; 7 – крышка корпуса; 8 – стакан детектора; 9 – фторопластовый изолятор; 10 – ниобат лития; 11 – медные проводники)

Рисунок 3. Конструкция пироболометра

Пироболометр оформлен в цилиндрическом немагнитном корпусе из нержавеющей стали. На плоском торце крышки корпуса расположено круглое отверстие, через которое потоки электромагнитного излучения и нейтральных частиц плазмы попадают на пироэлектрический детектор. Фторопластовые изоляторы, фиксирующие чувствительный элемент, ограничивают теплоотвод пироэлектрика. Для уменьшения влияния электромагнитных наводок, усилитель сигнала детектора был установлен вблизи чувствительного элемента в ВК токамака. Все необходимые электрические соединения осуществлены с помощью вакуумного разъема типа РСГС-10 [7].

На рисунке 4 приведена используемая в пироболометре электрическая схема. Генерируемый чувствительным элементом пироток измеряется, как падение пиронапряжения  $V$  на внешнем резисторе  $R_{OC}$ . В данной схеме в качестве неинвертирующего усилителя использован прецизионный фемтоамперный операционный усилитель с низким током утечки типа LMC6001 [8]. Схема обладает высоким полным входным сопротивлением, коэффициент усиления всей схемы по напряжению корректируется сопротивлением  $R_{OC}$ . Сопротивление  $R_{OC}$  следует выбирать так, чтобы общий пироток нагрузки не превышал максимального выходного пиротока усиления.

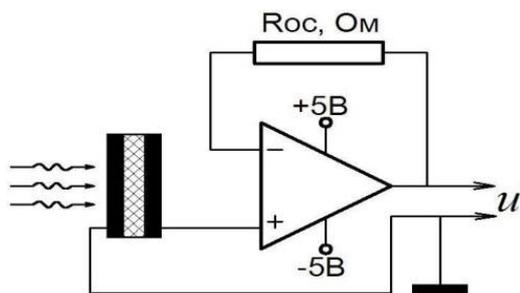


Рисунок 4. Электрическая схема усилителя пироболометра КТМ

Следовательно, уравнение мощности радиационных потерь, регистрируемых пироболометром примет вид:

$$P_{rad}(t) = \frac{1}{S} \left( V(t) + \frac{1}{\tau} \int_0^t V(t) dt \right),$$

где:  $S$  (В/Вт) – чувствительность пироболометра;  $\tau$  (с) – постоянная времени компенсации.

Было проведено тестирование пироболометра на токамаке КТМ во время работы системы предыонизации, когда наблюдалось свечение рабочего газа. При таком режиме энергетическая освещенность пироболометра была очень низкой, поэтому регистрация предыонизации осуществлялась большим углом обзора в тороидальном сечении без коллимирующей диафрагмы. Угол обзора пироболометра на токамаке КТМ без коллимирующей диафрагмы в тороидальном сечении изображен на рисунке 5-а ( $21^\circ$ ), в полоидальном сечении – 5-б ( $32^\circ$ ).

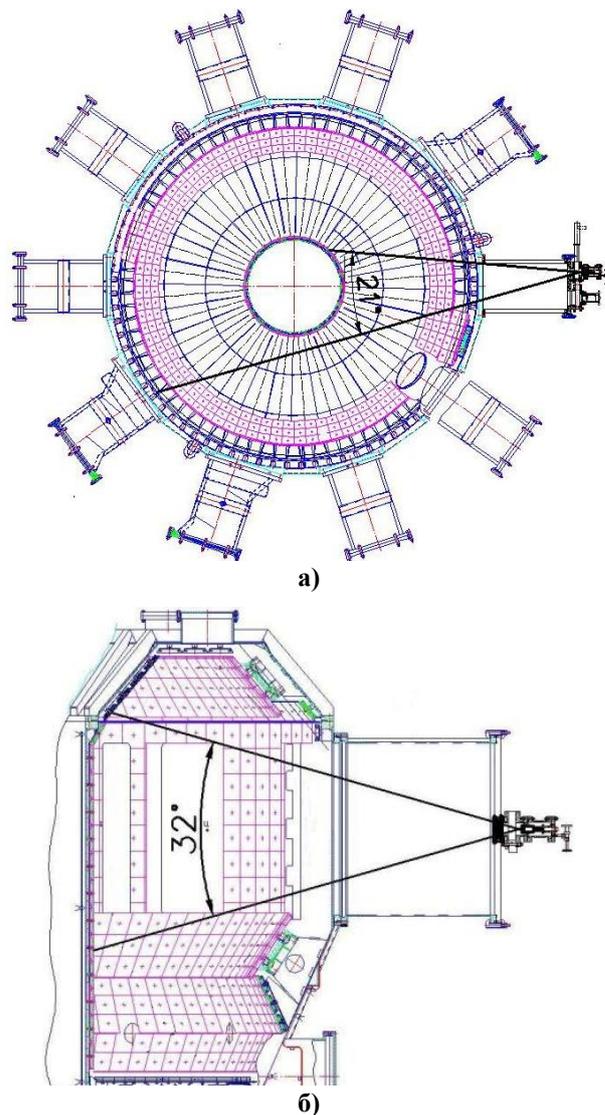


Рисунок 5. Углы обзора пироболометра на токамаке КТМ

#### КАЛИБРОВКА, ТЕСТИРОВАНИЕ И ПЕРВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

После завершения комплектации всех необходимых элементов и изготовления корпуса пироболометра в лабораторных условиях была проведена сборка и абсолютная калибровка пироболометра. Схема калибровки изображена на рисунке 6. Мощность излучения лазера предварительно замерялась измерителем мощности излучения, далее лазер направлялся на детектор пироболометра с регистрацией выходного сигнала при помощи осциллографа. Для калибровки в качестве излучателя использовался лазер с длиной волны 650 нм, калиброванный заводом изготовителем измеритель мощности излучения типа Sanwa LP1 [9], и осциллограф WaveJet [10].

На рисунке 7 приведена иллюстрация процесса калибровки диагностики. При калибровке учитывались: фоновое освещение помещения, расстояние от излучателя до приемника, угол падения излучения лазера.

**ДИАГНОСТИКА РАДИАЦИОННЫХ ПОТЕРЬ ПЛАЗМЫ ДЛЯ ФИЗИЧЕСКОГО ПУСКА ТОКАМАКА КТМ  
НА ОСНОВЕ ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДЕТЕКТОРА**

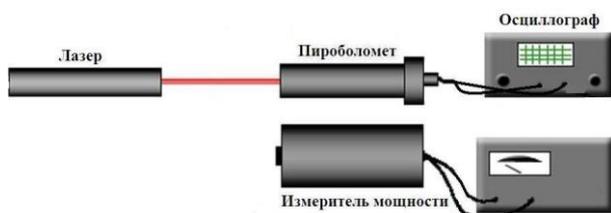
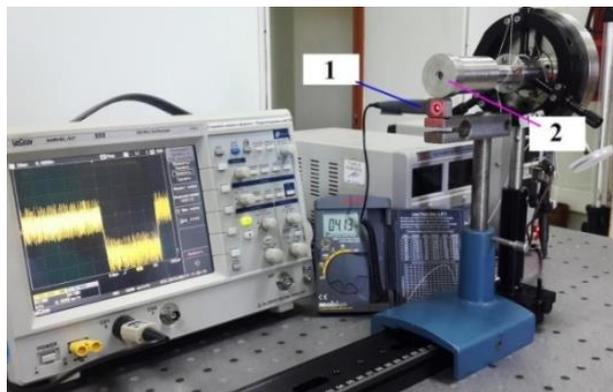


Рисунок 6. Схема калибровки пироболометра



1 – измеритель мощности лазера; 2 – пироболометр

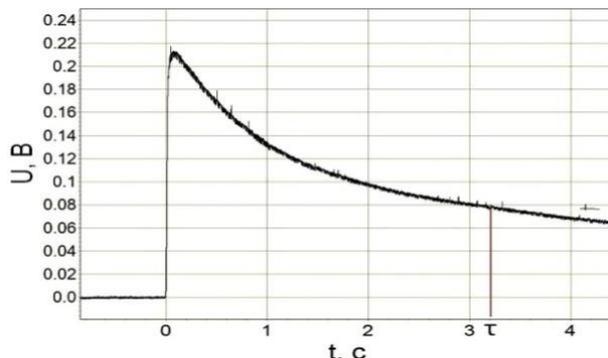
Рисунок 7. Калибровка пироболометра

На рисунке 8 приведены графики регистрации пироболометром излучения лазера. На графике рисунка 8а отмечена постоянная времени компенсации  $\tau$ , на графике рисунка 8б – постоянная времени нарастания  $\tau_n$ . Такой процесс обусловлен мгновенной поляризацией пирозлектрика под действием излучения лазера с образованием разности потенциалов на обкладках пирозлектрика. С поляризацией происходит также процесс постепенной компенсации: свободные заряды пирозлектрика начинают компенсировать поляризацию.

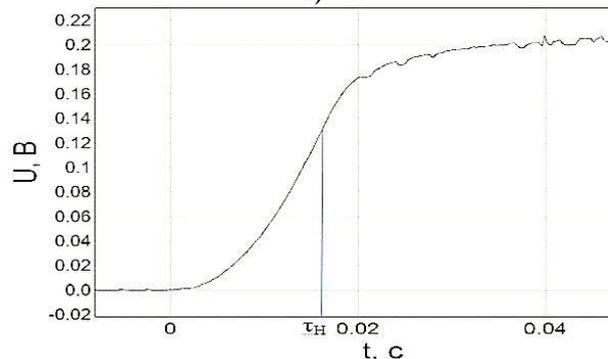
В процессе калибровки пироболометра были определены необходимые характеристики, которые приведены в сравнении с проектным болометром в таблице 1. Из таблицы 1 видно, что пироболометр имеет в два раза выше быстродействие (постоянная времени нарастания сигнала в два раза меньше) и чувствительность пироболометра почти в два раза выше проектного пироболометра. Такое улучшение параметров расширит возможности измерений энергетических потерь плазмы в экспериментах на токамаке КТМ.

Таблица 1. Технические характеристики болометров токамака КТМ

Характеристика	Пироболометр	Проектный болометр
Чувствительность, В·см <sup>2</sup> /Вт	19,7	10
Постоянная времени нарастания сигнала $\tau_n$ , мс	15	30
Постоянная времени компенсации $\tau$ , с	3,2	–



а)



б)

Рисунок 8. График регистрации лазера

После калибровки в лабораторных условиях пироболометра диагностика была размещена на патрубке вакуумной камеры токамака КТМ и проведены первые эксперименты.

На рисунке 9 приведен график регистраций сигнала пироболометра (черная кривая) в сравнении с диагностикой радиационных потерь на основе полупроводниковых детекторов AXUV (красная кривая). Следует отметить, что динамика сигналов диагностики пироболометра и AXUV достаточно схожи. Отклик на AXUV быстрее, что обусловлено его временным разрешением (мкс).

Анализ полученных экспериментальных данных показал, что диагностика энергетических потерь плазмы на основе пироболометра для токамака КТМ работоспособна.

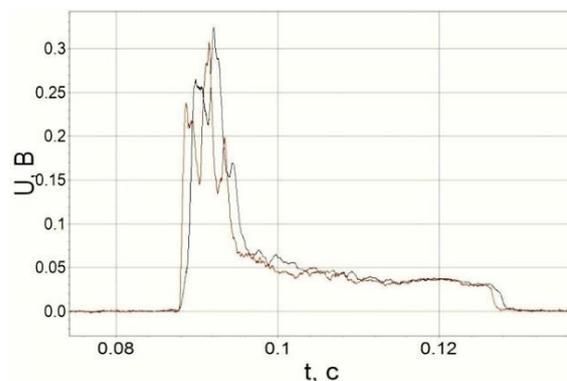


Рисунок 9. Сигналы регистраций пироболометра и AXUV детектора (черный – пироболометр, красный – AXUV)

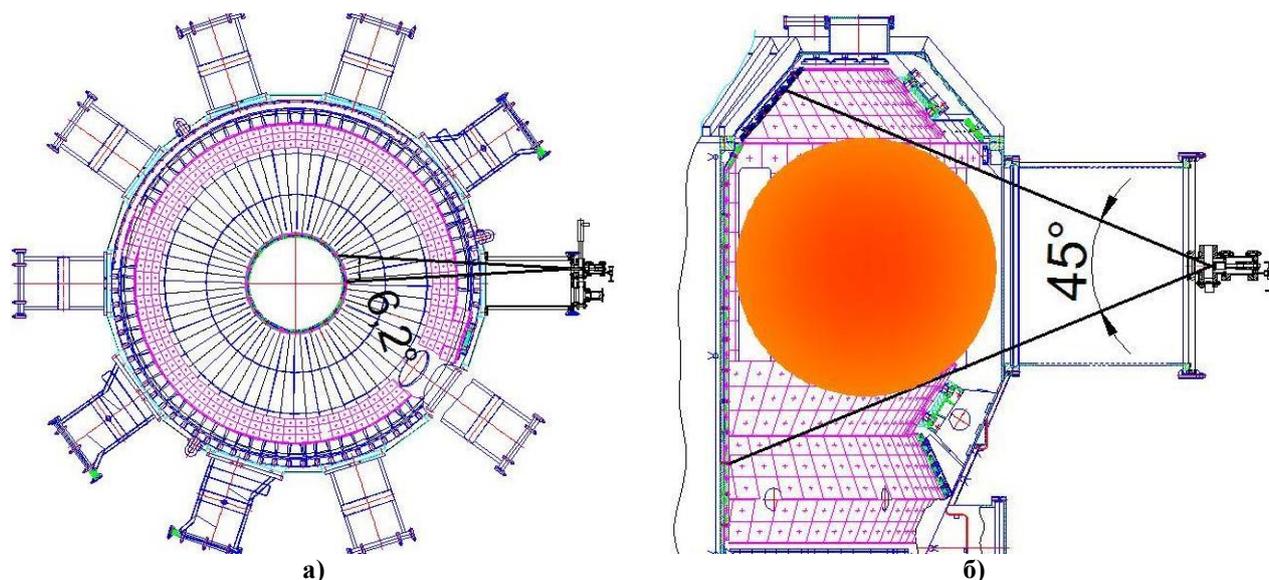


Рисунок 10. Угол обзора пироболометра

По результатам моделирования разряда с помощью программы TOKSCEN [11] с максимальным током плазмы 100 кА получена оценка размера и формы плазмы. Теоретически рассчитана мощность омического нагрева и мощность излучения плазмы. С учетом этого для физического пуска подготовлена коллимирующая в тороидальном сечении диафрагма и проставка, что позволит корректно восстанавливать мощность радиационных потерь. Угол обзора пироболометра на токамаке КТМ с коллимирующей диафрагмой изображен на рисунке 10-а и составляет  $6,2^\circ$ , в полоидальном сечении увеличен до  $45^\circ$  и изображен с плазмой на рисунке 10-б.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан пироболометр для измерения мощности излучения плазмы, включая потоки нейтральных

частиц плазмы для физического пуска токамака КТМ и последующей ее эксплуатации с более высокой чувствительностью и временным разрешением. Разработанная диагностика позволит проводить исследования эволюции мощности излучения плазмы более качественно.

Отработана методика калибровки. Определены характеристики диагностики: чувствительность, быстродействие (отклик), постоянная времени «остывания» компенсации.

Получены первые экспериментальные результаты, которые показали работоспособность диагностики в условиях КТМ.

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1 Г.В. Шаповалов, Комплекс физических диагностик токамака КТМ, Экспериментальные возможности токамака КТМ и программа исследований, Астана, 2005
- 2 Ochando, M.A., Mirones, E., Rueda, C., Rodríguez, P., Bolometry systems for the TJ-II flexible heliac, Rev. Sci. Instrum. 70 (1999) 384–386.
- 3 Côté, C., DE Silva, A.W., Fast pyroelectric detector for broad and radiated power measurements, Rev. Sci. Instrum. 67 (1996) 4146–4149.
- 4 Lukjanov, S.Yu., Maksimov, Yu.S., Vertiporokh, A.N., Radiative losses in the T-10 tokamak, Sov. J. Plasma Phys. 6 (1980) 7–11.
- 5 Sarychev D.V. Bolometry, in Fusion Physics. Ed. M.Kikuchi, K.Lackner, M.Q. Tran. Vienna, 2012, p.378.
- 6 D. Sarychev, Pyroelectrics. Fusion Physics. (2012) Pages 381.
- 7 Интернет сайт завода «Электрон»: [www.zavod-elecon.ru](http://www.zavod-elecon.ru)
- 8 Интернет сайт компании «Texas Instruments»: [www.ti.com](http://www.ti.com)
- 9 Интернет сайт завода «Sanwa electric instruments CO., LTD»: [www.sanwa-meter.co.jp](http://www.sanwa-meter.co.jp)
- 10 Интернет сайт компании «LeCroy»: [www.lecroy.com](http://www.lecroy.com)
- 11 А.Д. Садыков, Г.В. Шаповалов, Б.Ж.Чектыбаев, Д.Ю. Сычугов, Н.А. Гасилов Расчетный код «Tokscen» моделирования сценария разряда в токамаке. – ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2013. т.36, вып. 4.

**ПИРОЭЛЕКТРИК ДЕТЕКТОР НЕГІЗІНДЕ КТМ ТОКАМАКТЫ ІСКЕ ҚОСУ ҮШІН ПЛАЗМАНЫҢ  
РАДИАЦИЯЛЫҚ ЖОҒАЛТУЛАРЫН ДИАГНОСТИКАЛАУ**

<sup>1)</sup> Г.В. Шаповалов, <sup>2)</sup> Б.Ж. Чектыбаев, <sup>2)</sup> С.С. Маусымбаев, <sup>2)</sup> Е.Б. Күпишев, <sup>3)</sup> Д.В. Сарычев

<sup>1)</sup> ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясын институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

<sup>2)</sup> Шәкәрім атындағы Семей мемлекеттік университеті, Семей, Қазақстан

<sup>3)</sup> ФЗО «Курчатов институты», Мәскеу, Ресей

Мақала ғылыми зерттеулердің мүмкіндіктерін арттырады және сапасын жақсартады. Қазақстандық материалдық КТМ токамақтың радиациялық шығындардарын диагностикалау үшін болометрді дамытуға арналған. Диагностиканы калибрлеу әдістемесіне және құрылғыны жасауға ерекше көңіл бөлінді. Диагностиканы жұмысқа қабылет көрсеткен алғашқы тәжіребелік кәтижелер көрсетінді.

**DIAGNOSTIC OF PLASMA RADIATION FOR START-UP  
IN TOKAMAK KTM BASED PYROELECTRIC SENSOR**

<sup>1)</sup> G.V. Shapovalov, <sup>1)</sup> B. Zh. Chektybaev, <sup>2)</sup> E.B. Kupishev, <sup>3)</sup> D.V. Sarychev

<sup>1)</sup> Institute of Atomic Energy Branch RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

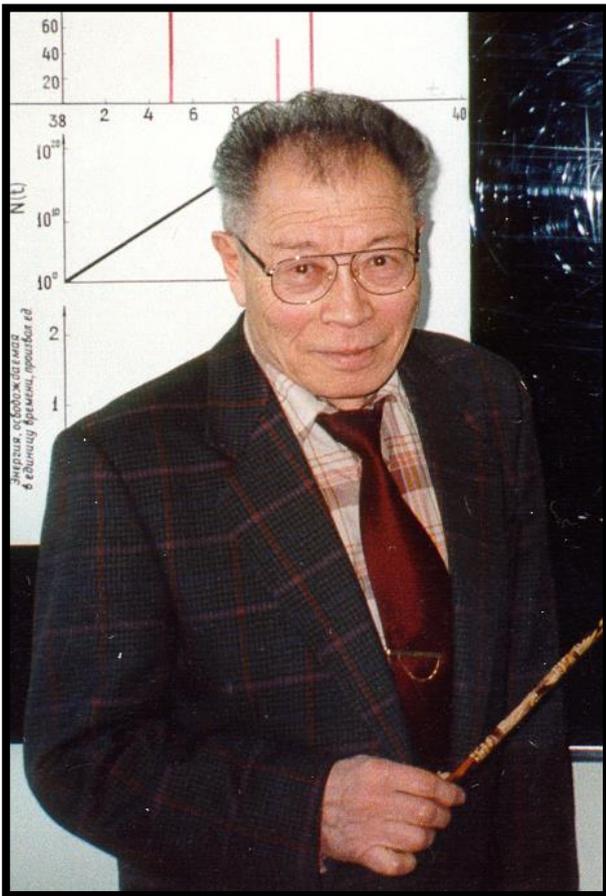
<sup>2)</sup> State University named after Shakarim Semey, Semey, Kazakhstan

<sup>3)</sup> RC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

The article is devoted to the development of a bolometer for the diagnosis of radiation losses to Kazakhstan material Tokamak KTM, which increases opportunities and improves the quality of research. Particular attention is paid to the development of the design and methodology of diagnostics calibration. The first experimental results showed that diagnostic performance.

## ПАМЯТИ АКАДЕМИКА НАН РК ТАКИБАЕВА ЖАБАГЫ СУЛЕЙМЕНОВИЧА

(28.09.1919 — 31.10. 2016)



**31 октября 2016 г. на 98-м году ушел из жизни бывший научный руководитель Национального ядерного центра РК, академик НАН РК, академик Международных академий, заслуженный деятель науки и техники РК, профессор, доктор физико-математических наук Такибаев Жаблага Сулейменович.**

Он родился 28 сентября 1919 г. в г. Семипалатинске. Семья пострадала от репрессий, и он рано остался без родителей, воспитывался в семипалатинских детских домах.

Такибаев Ж.С. начал свою трудовую деятельность в 1942 году после окончания Среднеазиатского государственного университета. Позднее окончил аспирантуру Физического института им. Лебедева АН СССР и в 1949 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-матема-

тических наук. После окончания аспирантуры он получил персональное приглашение К.И. Сатпаева в Институт астрономии и физики АН КазССР на должность научного сотрудника, а затем был назначен заведующим лаборатории космических лучей. В 1951 году Ж.С. Такибаеву поручают руководство Физико-техническим институтом.

В этот же период руководством Академии наук было принято решение о создании Института ядерной физики и оснащении его исследовательским ядерным реактором и ускорителями заряженных частиц. При поддержке К. И. Сатпаева было определено место расположения нового Института, а также решены вопросы по обустройству жилого поселка для сотрудников Института. Институт ядерной физики АН КазССР был создан в 1957 году, который также было поручено возглавить Ж.С. Такибаеву.

В 1958 году он успешно защитил докторскую диссертацию, затем получил звание профессора и был избран действительным членом в Академию наук КазССР. Плодотворные научные исследования Ж.С. Такибаев совмещал с активной педагогической деятельностью. Так под его руководством в Казахском государственном университете им. С.М. Кирова была создана кафедра ядерной физики.

В 1962 году Ж.С. Такибаев был избран академиком-секретарем Отделения физико-математических наук Академии наук КазССР, затем в течение 10 лет занимал пост вице-президента Академии наук, был членом Президиума. Важным этапом его жизни является совместная работа с К.И. Сатпаевым, который являлся Президентом АН КазССР.

В 1970 году был создан Институт физики высоких энергий, который также возглавил Ж.С. Такибаев. По его инициативе и под его руководством для этого Института созданы просмотрово-измерительный комплекс и высокогорная станция космических лучей.

Несмотря на активную научно-исследовательскую и педагогическую работу Ж.С. Такибаев занимался и общественной работой. Он был депутатом Верховного Совета КазССР, входил в состав его Президиума, являлся председателем Проблемного Совета по ядерной физике и физике элементарных частиц, членом ученых советов ряда институтов Алматы и Москвы, председателем диссертационных советов.

В 1993 году Ж.С. Такибаев был назначен научным руководителем Национального ядерного центра Республики Казахстан, в организацию и создание которого он внес свои обширные знания и опыт.

В должности научного руководителя НИЦ РК Ж.С. Такибаев выполнял обязанности соруководителя международных программ по проблемам ликвидации инфраструктуры испытаний ядерного оружия, радиационной экологии, реабилитации земель бывшего Семипалатинского испытательного полигона. Ж.С. Такибаев выступал с научными докладами по развитию ядерных технологий и конверсии инфраструктуры испытаний ядерного оружия в Казахстане на различных Международных форумах и конференциях, в печати и на телевидении.

Ж.С. Такибаев внес вклад в становление и развитие физической науки в Казахстане, был основателем многих направлений и школ в области физической науки Казахстана. В многочисленных научных трудах Ж.С. Такибаева, число которых превышает 600, им совместно с учениками и коллегами получены важные теоретические и экспериментальные результаты в широком диапазоне физических наук, имеющие как фундаментальное, так и прикладное народно-хозяйственное значение.

Ж.С. Такибаев воспитал большое число учеников, к которым относятся: академики Э.Г. Боос, И. Я. Часников, Д.К. Каипов; профессора: А.Ш. Гайтинов, М.А. Ташимов, В.А. Ботвин, А.А. Локтионов, Т.Х. Садыков, Р. А. Турсунов и др. Многие из его учеников стали крупными учеными, имеют свои научные направления и школы.

За большие заслуги в развитии физической науки, плодотворную педагогическую деятельность и подготовку высококвалифицированных научных кадров Ж.С. Такибаев был удостоен звания «Заслуженный деятель науки Казахской ССР», лауреата премии «Тарлан-2002», награжден орденами Трудового Красного Знамени (СССР), «Парасат» (РК), медалями, Почетными грамотами Президиума Верховного Совета Казахской ССР.

Жабага Сулейменович был талантливым ученым и прекрасным наставником, который много сделал для развития казахстанской физической науки, пропаганды научных знаний, подготовки высококвалифицированных специалистов. Он навсегда останется в памяти и сердцах своих учеников и коллег.

## СПИСОК АВТОРОВ

- Абишев А.Х., 92  
Акаев А.С., 58  
Апенько А.В., 98  
Бакланов В.В., 5, 11  
Бахтин Л.В., 107  
Ботов А.А., 98, 103  
Витюк Г.А., 43  
Гановичев Д.А., 58  
Кожаметов Е.А., 5, 11  
Кокежанов Б.А., 107  
Копничев Ю.Ф., 24, 30, 36  
Котов В.М., 43  
Коянбаев Е.Т., 5, 11  
Купишев Е.Б., 124  
Курбанбеков Ш.Р., 5  
Маккей К.Г., 92  
Максимкин О.П., 18
- Марченко И.О., 111  
Маусымбаев С.С., 124  
Мельничук М.А., 111, 119  
Миниязов А.Ж., 11  
Михайлова Н.Н., 70  
Мусрепов А.В., 62  
Пестов Е.Ю., 107  
Полешко Н.Н., 77  
Рахадиллов Б.К., 48  
Резяпова-Атаханова В.А., 115  
Романов А.М., 98, 103, 107,  
111, 115, 119  
Рубан С.В., 18  
Рябенко П.В., 70  
Сапатаев Е.Е., 5, 11  
Сарычев Д.В., 124  
Сейнасинов Н.А., 85
- Ситников А.А., 5, 11  
Скаков М.К., 5, 11, 48  
Соколов А.Н., 62  
Соколов И.А., 48  
Соколова И.Н., 24, 30, 36  
Сулейменов Н.А., 43  
Тлеугалиев Д.Р., 119  
Туленбергенов Т.Р., 48  
Турубарова Л.Г., 18  
Узбеков А.Н., 77  
Узбеков Р.Б., 85  
Хажидинов А.С., 58  
Чектыбаев Б.Ж., 124  
Шаповалов Г.В., 124  
Яковенко А.М., 92  
Яковлев В.И., 5, 11

---

## 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 подписанных 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 аннотация к статье на русском языке, ключевые слова и основной текст. В конце статьи, после списка литературы, повторяются блоки «название, авторы, организации, аннотация, ключевые слова» на казахском и английском языке.

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 ключевых слов, 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:**

- 2 рецензии высококвалифицированных специалистов (докторов 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», 2016

---

**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

