

2014
ВЫПУСК 1

ISSN 1729-7516

ЖУРНАЛ
Вестник

ПЕРИОДИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
НАЦИОНАЛЬНОГО ЯДЕРНОГО ЦЕНТРА
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН



ISSN 1729-7516

Вестник НЯЦ РК

ПЕРИОДИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
НАЦИОНАЛЬНОГО ЯДЕРНОГО ЦЕНТРА РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

ВЫПУСК 1(57), МАРТ 2014

Издается с января 2000 г.

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

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

ҚР ҰЯО Жаршысы

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҰЛТТЫҚ ЯДРОЛЫҚ ОРТАЛЫҒЫНЫҢ
МЕРЗІМДІК ҒЫЛЫМИ-ТЕХНИКАЛЫҚ ЖУРНАЛЫ

1(57) ШЫҒАРЫМ, НАУРЫЗ, 2014 ЖЫЛ

NNC RK Bulletin

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

ISSUE 1(57), MARCH 2014

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

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

В журнале представлены доклады XII ежегодной конференции-конкурса НИОКР молодых ученых и специалистов РГП НЯЦ РК (15–17 мая 2013 г., Курчатов, Казахстан), стр. 86–131.

СОДЕРЖАНИЕ

ИЗМЕНЕНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ, ТВЕРДОСТИ И МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ПРИ ОТЖИГЕ СТАЛИ 12X18H9T, ОБЛУЧЕННОЙ В РЕАКТОРЕ ВВР-К ДО ПОВРЕЖДАЮЩЕЙ ДОЗЫ 5 СНА ПРИ НИЗКОЙ (~80°C) ТЕМПЕРАТУРЕ Максимкин О.П., Цай К.В.....	5
ИЗМЕРЕНИЕ И РАСЧЕТ АКТИВНОСТИ ПРОТЯЖЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ Котов В.М., Бакланова Ю.Ю., Ерыгина Л.А., Супрунов В.И.....	13
ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫХ СОСТОЯНИЙ И МИКРОТВЕРДОСТИ СПЛАВА 67KH5B ПРИ ОБРАБОТКЕ ИОННЫМИ И ЭЛЕКТРОННЫМИ ПУЧКАМИ Скаков М.К., Рахадиллов Б.К., Зарва Д.Б., Гулькин А.В.	19
СТРУКТУРА И МОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛИ P6M5, ОБРАБОТАННОЙ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ Скаков М.К., Рахадиллов Б.К., Зарва Д.Б., Гулькин А.В.	25
ДВАЖДЫ-ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ И ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СЕЧЕНИЯ РЕАКЦИЙ ($^3\text{He},xd$), ($^3\text{He},xt$) И ($^3\text{He},x\alpha$) НА ЯДРЕ ^{59}Co ПРИ ЭНЕРГИИ ^3He 50,5 МэВ Дуйсебаев А., Дуйсебаев Б.А., Жолдыбаев Т.К., Садыков Б.М., Исмаилов К.М., Мереке А.	30
ПИТТИНГОВАЯ КОРРОЗИЯ ХОЛОДНОДЕФОРМИРОВАННОЙ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ 12X18H10T Яровчук А.В., Максимкин О.П., Цай К.В., Рубан С.В.	38
О ЛОКАЛИЗАЦИИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ В ОБЛУЧЕННОЙ АУСТЕНИТНОЙ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ 12X18H10T Максимкин О.П., Такиева А.М.....	45
ИЗУЧЕНИЕ РЕАКЦИИ $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ЭНЕРГИЙ Буртебаев Н., Мади Г.А., Еденбаев А.Н., Кенжебеков А.С.	52
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ РАСЧЕТОВ ПРОТИВОПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ Борисенко А.Н., Зверев В.В., Кукушкин С.М., Цынгаев В.М.	56
НЕОДНОРОДНОСТИ ПОЛЯ ПОГЛОЩЕНИЯ КОРОТКОПЕРИОДНЫХ S-ВОЛН В ЛИТОСФЕРЕ АЛТАЯ И ИХ СВЯЗЬ С СЕЙСМИЧНОСТЬЮ Копничев Ю.Ф., Кунакова О.К., Соколова И.Н.	63
НОВЫЕ КОЛЬЦЕВЫЕ СТРУКТУРЫ СЕЙСМИЧНОСТИ В РАЙОНАХ СЕВЕРНЫХ КУРИЛ И КАМЧАТКИ Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н.	69
ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛЯ ПОГЛОЩЕНИЯ S-ВОЛН В ОЧАГОВЫХ ЗОНАХ ДВУХ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ЮЖНОЙ АЗИИ И ИХ СВЯЗЬ С СЕЙСМИЧНОСТЬЮ Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н.	79
СОЗДАНИЕ ПИЛОТНОЙ ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ УЧАСТКА АКБОТА, ПОТЕНЦИАЛЬНО ПРИГОДНОГО ДЛЯ ИЗОЛЯЦИИ РАО Гаджимагомедова М.Г., Яковенко А.М.	86
АНАЛИЗ ЗАПИСЕЙ ЧЕБАРКУЛЬСКОГО МЕТЕОРИТА НА ИНФРАЗВУКОВЫХ СТАНЦИЯХ ЯДЕРНОГО МОНИТОРИНГА Дубровин В.И., Смирнов А.А.	91

ГЕОРАДИОЛОКАЦИЯ: ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ НА УЧАСТКАХ СИП И ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ Лисаевич А.В., Фролов З.Н.	96
100 ЛЕТ КЕМИНСКОЙ КАТАСТРОФЕ: НОВЫЕ ДАННЫЕ ОБ ОЧАГЕ Мукамбаев А.С., Михайлова Н.Н.	104
ОЧАГ И АФТЕРШОКОВАЯ АКТИВНОСТЬ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 28.01.2013 г. НА СЕВЕРНОМ ТЯНЬ-ШАНЕ Рябенко П.В., Узбеков Р.Б.	112
СОПОСТАВЛЕНИЕ ЗАПИСЕЙ ТРЕХ СЕВЕРО-КОРЕЙСКИХ ЯДЕРНЫХ ИСПЫТАНИЙ ПО ДАННЫМ КАЗАХСТАНСКИХ СТАНЦИЙ Сейнасинов Н., Михайлова Н.Н.	117
РЕГИСТРАЦИЯ И БАЗА ДАННЫХ СИЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ НА КАЗАХСТАНСКИХ СТАНЦИЯХ ЯДЕРНОГО МОНИТОРИНГА Соколов А.Н., Михайлова Н.Н.	125
СПИСОК АВТОРОВ.....	132

УДК 621.039.531:669

ИЗМЕНЕНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ, ТВЕРДОСТИ И МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ПРИ ОТЖИГЕ СТАЛИ 12X18H9T, ОБЛУЧЕННОЙ В РЕАКТОРЕ ВВР-К ДО ПОВРЕЖДАЮЩЕЙ ДОЗЫ 5 СНА ПРИ НИЗКОЙ (~80°C) ТЕМПЕРАТУРЕ

Максимкин О.П., Цай К.В.

Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан

Методами просвечивающей электронной микроскопии, измерением намагниченности и микротвердости исследовали аустенитную нержавеющую сталь 12X18H9T (материал стержня автоматического регулирования активной зоны реактора ВВР-К), облученную до 5 сна при 80°C и подвергнутую пострadiационным изохронным отжигам (1 час) в интервале температур 450–950°C. Выявлены особенности эволюции тонкой структуры облученной стали (ансамбля петель Франка и мелких дефектов типа black dots) в результате термического воздействия, которые сопоставляли с изменениями величины намагниченности материала. Сделано предположение, что носителями индуцированного облучением и отжигом магнетизма аустенитной стали являются петли Франка определенного размера (15–20 нм), в которых при сравнительно низких температурах облучения ($\leq 300^\circ\text{C}$) и дозах (<20 сна) возможно образование ферромагнитной α -фазы в ходе фазового $\varepsilon \rightarrow \alpha$ -превращения.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что при нейтронном облучении реакторных сталей и сплавов тип образующихся в микроструктуре радиационных дефектов и вторичных фаз, их конфигурация, размеры и плотность, а также эксплуатационные свойства облучаемых конструкционных материалов во многом определяются температурой облучения.

Анализ большого количества имеющихся в открытом доступе экспериментальных данных по аустенитным сталям, температуры облучения которых изменялись в широком интервале значений от 50 до 700°C [1, 2], позволяет выделить два температурных режима нейтронного облучения, приводящих к формированию принципиально различных дефектных микроструктур:

– низкотемпературный режим ($\leq 300^\circ\text{C}$), при котором в материале доминируют мелкие дефекты типа black dots и дислокационные петли Франка, но, в то же время, нет вакансионных пор и заметного количества вторичных выделений;

– высокотемпературный режим (300–700°C), при котором для материала характерны образование вакансионных пор, радиационно-стимулированных вторичных выделений, дислокационных петель и сетки дислокаций.

Вместе с тем существует сильная зависимость характера радиационного изменения микроструктуры от элементного состава облучаемого материала и условий облучения в активных зонах разных реакторов, что затрудняет построение общей теории влияния параметров облучения на структуру и свойства нержавеющих сталей и актуализирует необходимость получения новых экспериментальных данных по их радиационной деградации.

В настоящей работе приведены и обсуждаются результаты материаловедческих исследований изменений структуры и свойств реакторной стали 12X18H9T, облученной тепловыми нейтронами при

сравнительно низких значениях температуры облучения, скорости набора повреждающей дозы и длительном времени экспозиции.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследовали аустенитную нержавеющую сталь 12X18H9T – материал сердечника стержня тонкого автоматического регулирования (АР) реактивности активной зоны исследовательского реактора ВВР-К. Стержень АР в течение длительного времени (более 20 лет) облучался сравнительно слабыми потоками нейтронов ($E > 0.1$ МэВ) при 80°C, в результате чего, согласно расчетам, для материала из нижнего участка стержня была достигнута повреждающая доза 5 сна при суммарном флюенсе 1.3×10^{22} н/см².

Образцы для исследования вырезались с нижнего конца стержня АР и представляли собой плоскопараллельные пластины $18 \times 4 \times 0.3$ мм, из которых затем выбивали диски диаметром 3 мм для объектов просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). Подготовленные образцы подвергали изохронным часовым отжигам в интервале температур 200–950°C. До и после отжигов контролировали намагниченность облученной стали (содержание ферромагнитной фазы) с помощью феррозонда Fisher МР-30 и измеряли микротвердость материала, используя микротвердомер ПМТ-3 с нагрузкой на индентор 50 г. Тонкую структуру стали исследовали с помощью стандартных методик на просвечивающем электронном микроскопе JEM-100CX при ускоряющем напряжении 100 кВ. Более подробно методические особенности исследования высококордиоактивных образцов описаны в [3, 4]. ПЭМ-исследования проводили на образцах после облучения и отжигов при температурах 450–950°C.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Изменение микроструктуры при отжиге

Непосредственно после облучения (до отжига) в микроструктуре стали 12Х18Н9Т преобладали дислокационные петли и мелкие кластеры black dots, дающие на изображении в темном поле контраст белых точек (рисунок 1). Дислокационные петли представляли собой междоузельные петли Франка с вектором Бюргерса $a/3\langle 111 \rangle$, средняя плотность которых составила $6.6 \times 10^{21} \text{ м}^{-3}$, а размеры изменялись в достаточно широком интервале значений, от 5 до 60 нм. Средний размер петель – 23 нм, а максимальная доля приходилась на петли размером 15 нм.

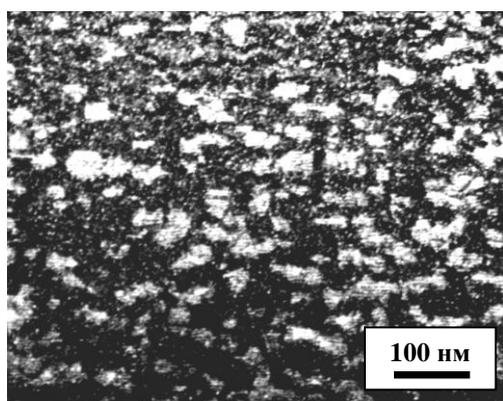


Рисунок 1. Микроструктура облученной стали 12Х18Н9Т с нижнего конца стержня-АР (темное поле в рефлексе 002)

Большинство крупных петель были ориентированы вдоль определенных направлений в ГЦК-решетке, формируя некоторое подобие лабиринтной сетчатой структуры. Линейные размеры сегментов «сетки» близки к 0.1 мкм, что примерно соответствует толщине просвечиваемого участка фольги. Внутри сегментов наблюдали однородно распределенные мелкие дефекты типа black dots (с размерами от 1 до 4 нм), плотность которых составляла не менее $1.4 \times 10^{23} \text{ м}^{-3}$, а средний размер 2.7 нм.

Характеристики радиационных дефектов до и после изохронных отжигов приведены в таблице 1. Эволюция дислокационной структуры в облученной

стали при повышении температуры отжига ($T_{\text{отж}}$) показана на рисунках 2, 3. На рисунке 4 представлены гистограммы распределения дислокационных петель по размерам после облучения и отжигов в интервале температур 450–650°С.

После часового отжига при 450°С в микроструктуре стали наблюдали возрастание плотности дислокационных петель Франка в 2 раза за счет дефектов с размерами 5–25 нм, сокращение доли крупных петель и исчезновение петель с размерами > 50 нм. При этом средний размер петель уменьшился в 1.4 раза по сравнению с материалом до термообработки. Концентрация кластеров black dots после отжига уменьшилась более чем в 4 раза.

После часового отжига при 550°С дефектная микроструктура состояла из конгломерата петель Франка с внутренним дефектом упаковки и полных петель с вектором Бюргерса $a/2\langle 110 \rangle$ (~ 30% от всего содержания петель), а также остаточного количества black dot – дефектов, гомогенно распределенных в пространстве между петлями. Суммарная плотность петель (независимо от их типа) незначительно уменьшилась по сравнению с отжигом при 450°С, а их средний размер несколько возрос. Преобразование петель Франка в полные петли имело место в результате пострадиационной термообработки. Заметим, что аналогичный эффект возможен и под облучением.

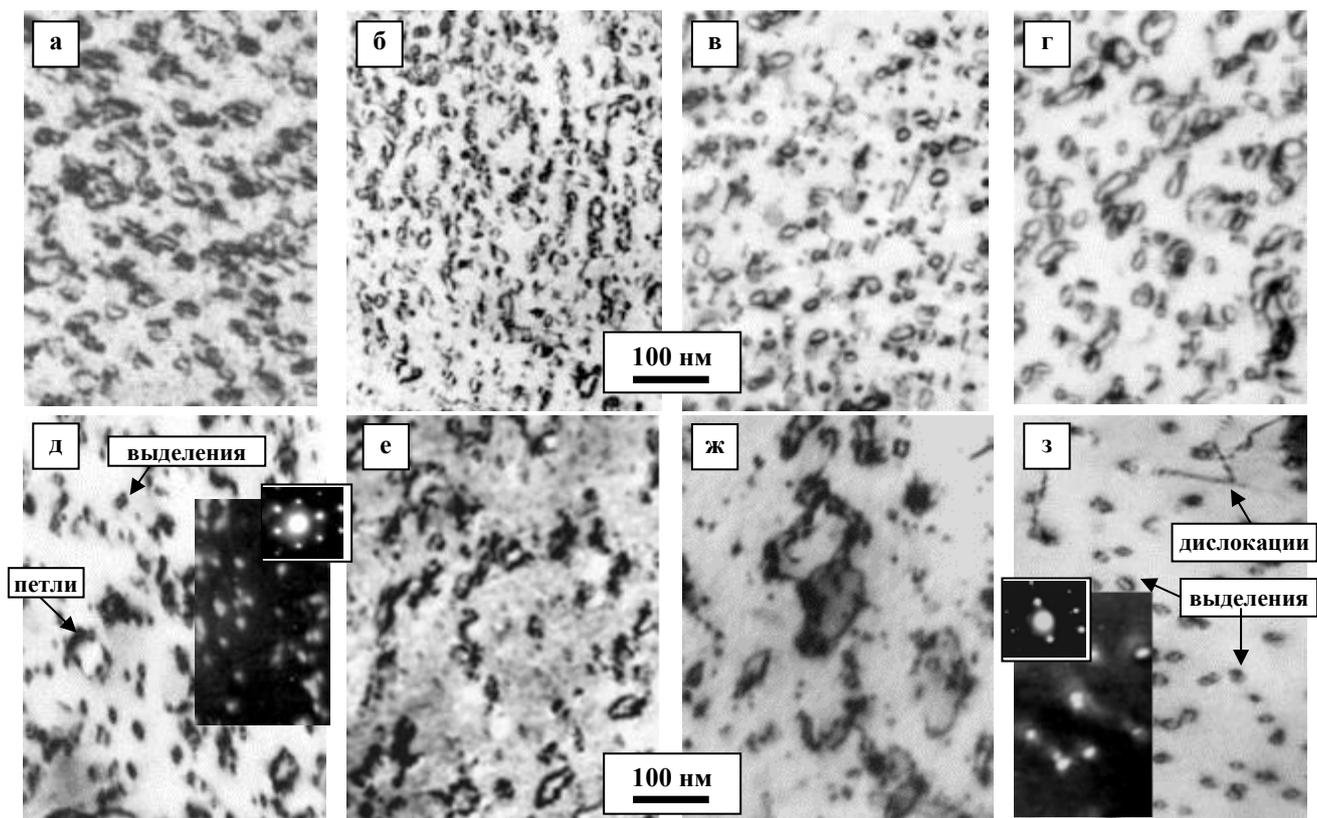
После часового отжига при 650°С в материале продолжали наблюдаться дислокационные петли, но уже не было black dot дефектов. Основную массу петель составляли полные петли, тогда как доля петель Франка была невелика (~8% от общего количества дефектов). При этом суммарная плотность петель уменьшилась в 2 раза по сравнению с отжигом при 550°С, а их средний размер возрос в 1.7 раза. Появились отдельные крупные дефекты размером до 90 нм.

Таким образом, можно констатировать, что в температурном интервале отжигов 550–650°С имели место исчезновение дефекта упаковки внутри петель и трансформация петель Франка в полные (призматические) петли.

Таблица 1. Структурные характеристики дислокационных петель и кластеров black dots в облученной и термообработанной стали 12Х18Н9Т

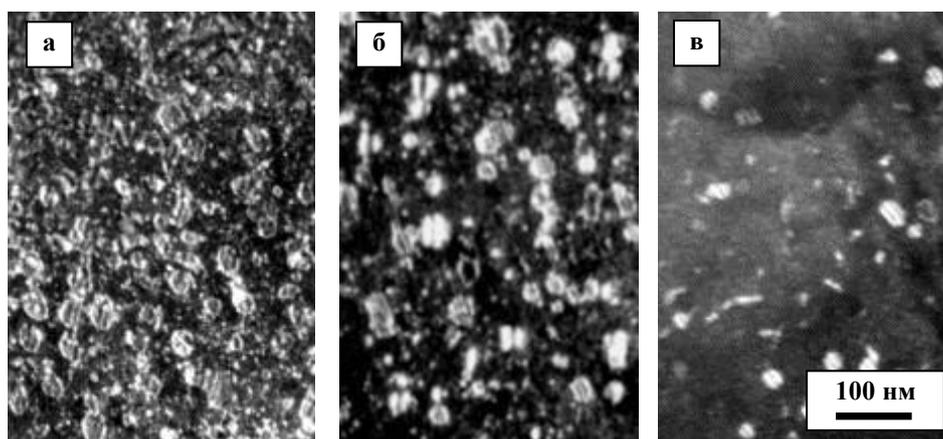
$T_{\text{отж}}, \text{ } ^\circ\text{C}$	Дислокационные петли			Кластеры black dots	
	Плотность, м^{-3}	Средний размер, нм	Диапазон размеров, нм	Плотность, м^{-3}	Средний размер, нм
без отжига	6.6×10^{21}	23.0	5 – 60	1.4×10^{23}	2.7
450	1.3×10^{22}	16.7	5 – 50	3.1×10^{22}	2.7
550	1.2×10^{22}	17.2	5 – 50	1.2×10^{22}	2.8
650	5.7×10^{21}	29.0	10 – 90	–	–
750	6.3×10^{20}	42.8	15 – 100	–	–
800	3.9×10^{20}	55.6	25 – 100	–	–
850	Наблюдались эпизодически		30 – 120	–	–

ИЗМЕНЕНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ, ТВЕРДОСТИ И МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ПРИ ОТЖИГЕ СТАЛИ 12Х18Н9Т, ОБЛУЧЕННОЙ В РЕАКТОРЕ ВВР К ДО ПОВРЕЖДАЮЩЕЙ ДОЗЫ 5 СНА ПРИ НИЗКОЙ (~80°С) ТЕМПЕРАТУРЕ



а – без отжига, б – 450°С, в – 550°С, г – 650°С, д – 750°С, е – 800°С, ж – 850°С, з – 950°С. д – з – в микроструктуре помимо дислокаций наблюдаются вторичные выделения TiC (см. изображения в режиме темного поля).

Рисунок 2. Эволюция дислокационной структуры в стали 12Х18Н9Т, облученной нейтронами до 5 сна, в результате пострadiaционных отжигов (длительностью 1 час) при различных температурах



а – 450°С (снимок в темном поле, в рефлексе 002), б – 550°С (снимок в рефлексе 002), в – 650°С (снимок в рефлексе 111).

Рисунок 3. Уменьшение содержания дефектов black dots и петель Франка в облученной нейтронами стали 12Х18Н9Т с ростом температуры изохронного отжига

ИЗМЕНЕНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ, ТВЕРДОСТИ И МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ПРИ ОТЖИГЕ СТАЛИ 12Х18Н9Т, ОБЛУЧЕННОЙ В РЕАКТОРЕ ВВР К ДО ПОВРЕЖДАЮЩЕЙ ДОЗЫ 5 СНА ПРИ НИЗКОЙ (~80°С) ТЕМПЕРАТУРЕ

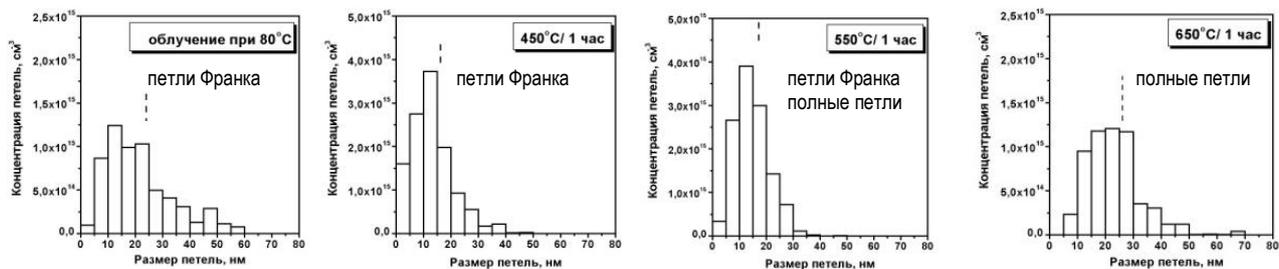
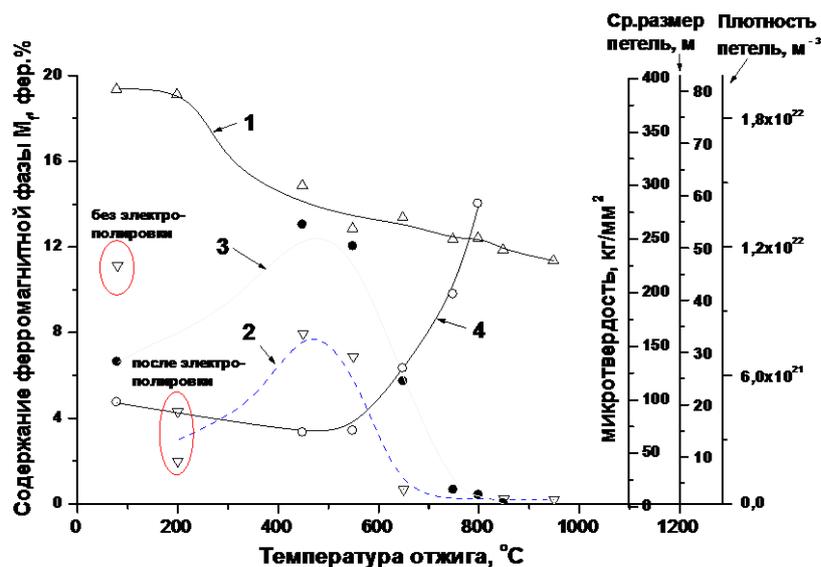


Рисунок 4. Диаграммы распределения дислокационных петель по размерам после облучения при 80°С и изохронных отжигов в температурном интервале 450–650°С



кривая 1 (Δ) – изменение микротвердости стали с ростом $T_{отж}$; кривая 2 (∇) – изменение намагниченности стали; кривая 3 (●) – изменение плотности дислокационных петель, кривая 4 (○) – изменение среднего размера дислокационных петель.

Рисунок 5. Влияние температуры изохронного отжига на микротвердость, содержание ферромагнитной α' -фазы и параметры дислокационных петель в микроструктуре для стали 12Х18Н9Т, облученной нейтронами до 5 сна

ПЭМ-исследования стали, проведенные после отжига при 750°С, показали, что средний размер дислокационных петель увеличился в 1.5 раза, а их плотность уменьшилась более чем на порядок по сравнению с облученной сталью до отжига. Одновременно в микроструктуре отмечено формирование сетки дислокаций и образование множественных мелкодисперсных выделений вторичной фазы TiC [5], когерентных с решеткой аустенитной матрицы. Плотность выделений 10^{22} м^{-3} , средний размер ~16.3 нм. Частицы TiC, идентифицируемые по дополнительным рефлексам на электронограммах, на фотографиях в режиме светлого поля (рисунок 2д) имеют вид мелких петлевых образований. Выделения размещаются на линиях дислокаций и дислокационных петель. Петли на снимках имеют гораздо больший размер по сравнению с частицами вторичной фазы.

После отжига при 850°С наблюдался дополнительный рост размеров дислокационных петель, до 120 нм. Обнаружены мелкие пузырьки (с размерами

< 20 нм и плотностью $3.7 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$), наполненные гелием. После нагрева до 950°С дислокационные петли выявлены не были, а наблюдались лишь отдельные дислокационные скопления и увеличившиеся в размерах частицы карбида титана (рисунок 2з) и гелиевые пузырьки.

Температурные изменения микротвердости

Измерения микротвердости (см. рисунок 5, кривая 1) показали, что отжиг облученной стали при 450°С, когда регистрируемая плотность black dot-дефектов существенно уменьшилась по сравнению с их содержанием до отжига, привел к 50% падению прироста микротвердости ΔH_c от первоначального значения после облучения, несмотря на общее увеличение плотности петель Франка почти в 2 раза.

Отжиг при 650°С, характеризующийся исчезновением из микроструктуры мелких дефектов и завершением превращения петель Франка в полные, в свою очередь, привел к уменьшению прироста микротвердости на ~70%.

Образование многочисленных вторичных выделений в интервале отжига 750–950°С не повлекло за собой дополнительного упрочнения материала, хотя формирующиеся выделения когерентны или частично когерентны с матрицей. Наличие когерентности обычно связывают с повышением упрочняющего фактора выделений – как препятствий на пути движущихся дислокаций [6]. Отсутствие же заметного упрочнения при образовании частиц TiC в нашем случае можно объяснить одновременным «размягчением» матрицы, обусловленным обеднением по углероду и титану [7, 8].

Температурные изменения магнитных свойств

Измерения с помощью феррозонда показали, что после облучения намагниченность приповерхностного слоя аустенитной стали толщиной ~30 мкм эквивалентна содержанию в матрице 11% ферромагнитной фазы. Заметим, что после вырезки образца из стального сердечника не проводили его дополнительной «глубокой» электрополировки, вследствие чего в приповерхностном наклепанном слое сохранилось повышенное содержание ферромагнитного α' -мартенсита деформации. Этим объясняется повышенная намагниченность стального образца до отжига.

В результате отжига стального образца при 200°С с последующей электрополировкой показания феррозонда значительно уменьшились (см. рисунок 5, кривая 2). Полученную намагниченность условно можно принять за исходную, т.е. после облучения.

После отжига при температурах 450°С и 550°С обнаружено повторное увеличение намагниченности почти в 2 раза. Аналогичное, но количественно более слабое, возрастание намагниченности наблюдалось после отжига при температурах 400–500°С в образцах деформированной аустенитной стали, содержащих мартенситную α' -фазу [9]. Данный эффект связывали с возможностью количественного роста включений α' -мартенсита в результате снятия внутренних напряжений во время термообработки. Отжиг при 650°С привел к существенному уменьшению показаний намагниченности материала, что аналогично осуществлению обратного мартенситного $\alpha' \rightarrow \gamma$ -превращения в деформированной и термообработанной стали [10]. После отжига при 850°С намагниченность облученной стали стала близка к нулю.

ОБСУЖДЕНИЕ

Принято считать, что радиационное упрочнение стали по сравнению с необлученным состоянием, определяемое как ΔH_{μ} или $\Delta \sigma_{02}$ ($3.03 \Delta H_{\mu}$ [кг/мм²] = $\Delta \sigma_{02}$ [МПа], [11]), достаточно корректно описывается в рамках полумпирической модели дисперсных барьеров Орована [6], где суммируются вклады в упрочнение от различных радиационных дефектов. При этом вклад от каждого типа дефектов определя-

ется выражением $\alpha \sqrt{Nd}$, где α – коэффициент упрочнения или «силы» дефекта-барьера, N – плотность дефектов, d – их средний размер. В нашем случае после облучения и отжига при температурах 450–550°С основной упрочняющий вклад вносят петли Франка и кластеры black dots. При более высоких температурах отжига микроструктуру упрочняет наличие полных петель, выделений TiC и гелиевых пузырьков.

При коэффициентах упрочнения 0.2 для black dots, 0.33 для петель Франка и 0.2 для полных петель получено хорошее согласие с экспериментом по величине ΔH_{μ} для стали, отожженной в интервале температур 450–650°С. Заметим, что при расчете $\Delta H_{\mu}(T_{отж}) = H_{\mu обл}(T_{отж}) - H_{\mu 0}(T_{отж})$ для облученной и термически обработанной стали корректно брать значение $H_{\mu 0}$ необлученного материала в состоянии МТО после отжига при той же температуре.

Известно, что при нейтронном облучении сталей при температурах < 100°С упрочняющий эффект от петель Франка оказывается выше, чем в случае $T_{обл} > 300^{\circ}\text{C}$, где α петель полагают равным 0.33 [12,13]. Например, для стали 316SS при $T_{обл} = 60\text{--}100^{\circ}\text{C}$ [14] для петель Франка α изменялось в интервале значений 0.4–0.6, а для стали 316LN при $T_{обл} = 90^{\circ}\text{C}$ [15] $\alpha = 0.5$. При этом нет данных о влиянии низкой $T_{обл}$ на упрочняющий эффект от кластеров black dots, для которых α , обычно, не превышает 0.2. В нашем случае после облучения в реакторе ВВР-К при 80°С хорошее согласие с экспериментом получено при $\alpha = 0.5$ для петель Франка и 0.2 – для дефектов black dots.

Хорошее согласование экспериментальных и расчетных данных по радиационному упрочнению стали показывает, что имеет место коррелированное изменение микроструктуры радиационно-термических дефектов и величины микротвердости материала как после облучения при 80°С, так и после отжига на температурном интервале 450–650°С.

Особый интерес представляет сравнительное рассмотрение свойств стали 12Х18Н9Т после облучения и отжига при температурах 450 и 550°С, когда в микроструктуре доминировали петли Франка и дефекты black dots. Анализ микрофотографий показал, что в результате термообработки основная доля дефектов black dots диссоциировала под действием температуры, а составляющие их точечные дефекты рекомбинировали или были поглощены более крупными дислокационными петлями. Другая часть black dots, гораздо меньшая по размеру, напротив, развилась в полноценные дислокационные дефекты – петли Франка. В результате плотность петель выросла в 2 раза, а их средний размер сместился в область более мелких дефектов. В то же время, после отжига более чем в 2 раза увеличилась намагниченность стали (см. рисунок 5, кривая 2), т.е., условно говоря, в материале выросло содержание ферро-

магнитной составляющей (фазы).

Из рисунка 5 видно, что поведение намагниченности с ростом $T_{отж}$ по виду подобно температурному изменению плотности дислокационных петель. Можно предположить, что величина намагниченности коррелирует с концентрацией данных дефектов в микроструктуре, т.е. в ответ на рост плотности петель намагниченность образца будет увеличиваться, и, наоборот, с уменьшением плотности петель – уменьшаться. Чтобы определить с каким типом дислокационных петель может быть связана возникающая после облучения намагниченность, проведем анализ результатов исследования образцов, отожженных при разных температурах.

По плану эксперимента не проводилось изучение микроструктуры стали после отжига при 200°C. Однако, опираясь на результаты измерения микротвердости при $T_{отж}=200^\circ\text{C}$, которые близки по величине к H_u до отжига, и на известные рассуждения о хорошей корреляции микроструктурных данных и упрочнения (ΔH_u) можно утверждать, что плотность петель Франка после 200°C-отжига также мало отличается от исходной (после облучения). Отличие может заключаться в незначительном уменьшении содержания кластеров black dots в стали после отжига.

После облучения и отжига при 450°C в микроструктуре наблюдались только петли Франка, тогда как полные петли были обнаружены после отжигов при более высоких температурах (550, 650°C). Это позволяет предположить, что намагниченность стали связана именно с дефектами Франка, расположенными в плоскостях типа $\{111\}$ ГЦК решетки.

Плотность петель после отжига при 650°C близка по величине и гистограмме распределения по размерам к исходной, однако постотжиговая намагниченность значительно меньше исходной. Кажущееся рассогласование в поведении структуры и намагниченности после отжига при 650°C можно объяснить тем, что плотность дислокационных петель после отжига рассчитывалась с учетом петель всех типов (петель Франка и полных петель). При этом доля дефектов Франка в материале была крайне незначительна, также незначителен должен быть возможный вклад от них в намагниченность.

В намагниченность стали до и после отжигов вносит вклад остаточный α' -мартенсит в следах наклепа на поверхности стального образца. Поведение данной магнитной фазы при отжиге аналогично поведению мартенсита деформации при отжиге деформированных стальных образцов. Следовательно, можно ожидать частности известен эффект возрастания намагниченности после отжига стали в интервале 400–500°C. Однако величина данного прироста обычно не превышает 20–30% от исходной намагниченности до отжига. Данный деформационный вклад в намагниченность присутствует, конечно, и в других точках отжиговой диаграммы, однако, коли-

чественно он много меньше магнитного вклада от радиационных дефектов.

Зависимость среднего размера петель от температуры отжига (рисунок 5, кривая 4) показывает, что при температурах 80, 450 и 550°C основная доля дефектов приходится на размерный интервал 16–23 нм. Согласно предложенной гипотезе, это означает, что ферромагнитные свойства стали могут быть обусловлены наличием в микроструктуре дефектов Франка (или комплексов из этих дефектов) с небольшими средними размерами 16–23 нм, плотность которых прямо пропорциональна намагниченности материала.

Тот факт, что намагниченность стали после отжига при 550°C уменьшилась незначительно по сравнению с отжигом при 450°C также заслуживает пояснения, поскольку в микроструктуре появились полные петли. Известно, что доля петель Франка при $T_{отж}=550^\circ\text{C}$ составляет ~ 70% от общего содержания петель. При этом полные петли относятся к дефектам с размерами свыше 30 нм (т.е. за пределами выше описанного размерного интервала), тогда как доля петель Франка в меньшем размерном диапазоне уменьшается незначительно, чем, по-видимому, и обусловлено слабое изменение намагниченности.

Анализ полученных данных подтверждает правоту гипотезы о наличии взаимосвязи между содержанием ферромагнитной фазы (намагниченности) и наличием петель Франка в облученной нейтронами аустенитной стали 12X18H9T. Одним из возможных объяснений данного эффекта, как и ранее в работе [16], является предположение о том, что под действием нейтронного облучения на петлях, содержащих дефект упаковки (ϵ -фаза, ГПУ), возможно образование зародышей ферромагнитной α' -фазы (ОЦК) в результате $\epsilon \rightarrow \alpha'$ перехода, подобно тому, как это происходит при деформации. Из рисунка 5 видно, что максимальному содержанию ферромагнитной фазы соответствует средний размер петель ~16 нм и их плотность $\sim 1.3 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$, тогда как уже при размере петель 30 нм намагниченность стали практически не регистрируется.

Таким образом, на основании полученных в работе данных сделано предположение, о возможности зарождения ферромагнитной α' -фазы под облучением непосредственно на петлях Франка, причем только в тех дефектах, которые характеризуются определенным (16–23 нм) средним размером (или, другими словами, энергией дефекта упаковки). При этом с ростом размера петель вероятность образования в них ферромагнитной фазы уменьшается и становится невозможным с превращение петель Франка в совершенные полные петли.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ экспериментальных данных, полученных при исследовании радиационного изменения микроструктуры, магнитных свойств и микротвердости образцов стали 12Х18Н9Т, облученных в исследовательском реакторе ВВР-К до 5 сна и затем отожженных в интервале температур 450–950°С.

Выявлена корреляционная связь между изменениями микроструктуры радиационно-термических дефектов и величиной упрочнения облученной и термически обработанной (при температурах 450–650°С) стали.

Обнаружен прирост намагниченности облученного материала, после отжигов 450 и 550°С на фоне двукратного увеличения плотности петель Франка в микроструктуре. Сделано предположение, что носителями намагниченности, индуцированной облучением и отжигом в аустенитной стали, являются петли Франка определенного среднего размера (16–23 нм). С наличием данных дефектов может быть связано образование на них зародышей ферромагнитной α' -фазы, которые и служат причиной увеличения намагниченности при отжиге.

Работа выполнена при поддержке гранта МОН РК 0786 / ГФ2.

ЛИТЕРАТУРА

1. Maziasz, P. J. Microstructural evolution in annealed austenitic steels during neutron irradiation / P.J. Maziasz, Mc.Hague // International Materials Reviews. – 1987. – V. 32. – P. 190-219.
2. Воеводин, В.Н. Эволюция структурно-фазового состояния и радиационная стойкость конструкционных материалов / В. Н. Воеводин, И. М. Неклюдов. – «Наукова Думка». Киев. – 2006. – 375 С.
3. Цай, К. В. Эволюция выделений вторичных фаз при отжиге аустенитной стали 12Х18Н9Т, облученной нейтронами до 5 сна / К. В. Цай, О. П. Максимкин, Л. Г. Турубарова // Физика металлов и металловедение. – 2007. – Т. 103. – № 3. – С. 294-302.
4. Цай, К. В. Влияние облучения и пострadiационной 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 // ВАНТ. Серия «ФРП и РМ». – 2008. – №2. – С. 100-107.
5. Sourmail, T. Literature Review: Precipitation in creep resistant austenitic stainless steels / T. Sourmail // Materials Science and Technology. – 2001. – V.17. – P. 1-14.
6. Lucas, G. E. The evolution of mechanical property change in irradiated austenitic steels / G. E. Lucas // Journal of Nuclear Materials. – 1993. – V. 206. – P. 287-305.
7. Gessel, G.R. Effects of minor alloying additions on the strength and swelling behavior of an austenitic stainless steel / G. R. Gessel // Oak Ridge National Laboratory Report ORNL/TM 6359. – 1978. – P. 205.
8. Nembach, E. Superposition of solid solution and particle strengthening in (Cu-Au)-Co single crystals / E. Nembach, M. Martin // Acta Metallurgica. – 1980. – V.28. – P. 1069-1075.
9. Максимкин, О.П. Аномальный эффект изменения магнитных и механических свойств облученной нейтронами нержавеющей стали 12Х18Н10Т при отжиге 400°С / О. П. Максимкин, С. В. Рубан, С. В. Рыбин // Вестник НЯЦ. – 2011. – № 3. – С.98-101.
10. Максимкин, О.П. Обратное мартенситное $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращение в стали 12Х18Н10Т, облученной до 56 сна в реакторе БН-350 / О. П. Максимкин, Б. К. Рахашев // Вестник НЯЦ. – 2009. – №3, С. 161-165.
11. Busby, J.T. The relationship between hardness and yield stress in irradiated austenitic and ferritic steels / J.T. Busby, M.C.Hash, G.S.Was // Journal of Nuclear Materials. – 2005. – V. 336. – P. 267-278.
12. Cole, J.I. Microstructural changes induced by post-irradiation annealing of neutron-irradiated austenitic stainless steels / J.I. Cole, T.R. Allen // Journal of Nuclear Materials. – 2000. – V. 283-287. – P. 329- 333.
13. Неустроев В.С., Островский З.Е., Белозеров С.В. Эволюция микроструктуры стали типа Х18Н10Т при низкотемпературном облучении нейтронами как основной фактор упрочнения // ВАНТ. Сер. ФРП и РМ.- 2007.- Т.91, №6.- С. 78-81.
14. Hashimoto, N. Microstructural analysis of deformation in neutron-irradiated fcc materials / N. Hashimoto, T.S. Byun, K. Farrell // Journal of Nuclear Materials. – 2006. – V. 351. – P. 295-392.
15. Hashimoto, N. Relationship between hardening and damage structure in austenitic stainless steel 316LN irradiated at low temperature in the HFIR / N. Hashimoto, E. Wakai, J.P. Robertson // Journal of Nuclear Materials. – 1999. – V. 273. – P. 95-101.
16. Максимкин, О. П. Изменение магнитных свойств нержавеющей сталей, облученных в реакторе БН-350 / О. П. Максимкин // Вестник НЯЦ РК. – 2011. – № 4. – С. 101-119.

ТӨМЕН ТЕМПЕРАТУРАДА (80°C) БҮЛДІРЕТІН 5 СНА ДОЗАҒА ДЕЙІН ВВР-К РЕАКТОРЫНДА СӘУЛЕЛЕНДІРІЛГЕН, 12Х18Н10Т БОЛАТЫНЫҢ БОСАТУ КЕЗІНДЕГІ МИКРОҚҰРЫЛЫМЫНЫҢ, ҚАТТЫЛЫҒЫНЫҢ ЖӘНЕ МАГНИТТІК ҚАСИЕТТЕРІНІҢ ӨЗГЕРУІ

Максимкин О.П., Цай К.В.

Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан

450–950°C температуралар аралығында пост-радиациялық изохронды босатуға (1 сағат) ұшыратылған және 80°C кезінде 5 снаға дейін сәулелендірілген (ВВР-К реакторының белсенді зонасының автоматты реттеу өзегінің жадығаты) аустенитті тотықпайтын 12Х18Н10Т болатының микроқаттылығы мен магниттелгендігін өлшеу арқылы жарықтүсіруші электронды микроскопия әдістерімен зерттеді. Термиялық әсердің негізінде пайда болған сәулелендірілген болаттың (black dots негізіндегі ұсақ ақаулардың және Франк ілмектерінің ансамблі) жіңішке құрылым эволюциясының ерекшеліктері айқындалды, оларды өз кезегінде жадығаттың магниттелгендігінің шамасының өзгеруімен салыстырды. Салыстырмалы төмен температуралар ($\leq 300^\circ\text{C}$) мен дозаларда (< 20 сна) сәулелендіру кезіндегі $\varepsilon \rightarrow \alpha$ -фазалық түрлену жүрісі үрдісінде ферромагнитті α -фазаның туындауы мүмкін, белгілі бір мөлшердегі Франк ілмектері (15–20 нм) аустенитті болаттың сәулелендіру және босатудан туындаған магнетизм индукциясының таратушысы болып табылады деген болжам жасалды.

CHANGES IN MICROSTRUCTURE, HARDNESS AND MAGNETIC PROPERTIES DURING ANNEALING OF 12CR18NI9TI STEEL IRRADIATED IN WWR-K REACTOR TO DAMAGE DOZE OF 5 DPA AT LOW (80°C) TEMPERATURE

Maksimkin O.P., Tsay K.V.

Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan

12Cr18Ni9Ti austenitic stainless steel (a material of the automatic control rod for WWR-K reactor active zone) irradiated to 5 dpa at 80°C and annealed at 450–950°C for 1 hr has been studied using TEM, magnetic properties and microhardness measurements. Evolution in fine structure of the irradiated steel resulting from heat treatment was identified (Frank loops and black dots) and it was compared to changes in magnetic properties. It was assumed that magnetism of austenitic steel is associated with Frank loops of certain size (15–20 nm) in which at a relatively low temperatures ($\leq 300^\circ\text{C}$) and irradiation doses (< 20 dpa) the formation of ferromagnetic α -phase during $\varepsilon \rightarrow \alpha$ -transformation may occur.

УДК 621.039.546: 543.52

ИЗМЕРЕНИЕ И РАСЧЕТ АКТИВНОСТИ ПРОТЯЖЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

Котов В.М., Бакланова Ю.Ю., Ерыгина Л.А., Супрунов В.И.

Институт атомной энергии РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

Работа посвящена определению распределения активности гамма-излучающих радионуклидов в линейном источнике неразрушающим методом. Вклады излучения различных участков рассчитаны аналитически для источника простой геометрии. В качестве источника гамма-излучения использовался корпус хлоратора с отложениями радионуклидов на его внутренней стенке.

Были получены расчетные значения коэффициентов вкладов, распределение активности по участкам хлоратора и абсолютное значение суммарной активности отложений.

ВВЕДЕНИЕ

Определение активности точечного источника гамма-излучения возможно путем измерения потока гамма-квантов в точке на известном расстоянии от источника с использованием следующего соотношения:

$$A = \Phi \cdot 4 \cdot \pi \cdot R^2, \quad (1)$$

где Φ – поток квантов, $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$;

R – расстояние между источником и детектором, см;

A – активность источника, Бк.

Несколько сложнее задача, если источник и детектор являются объемными телами. В этом случае возможны различные варианты.

В простейшем случае, при равномерном распределении активности в теле источника, равномерной чувствительности в объеме детектора, малом уровне самопоглощения в источнике и достаточно большом расстоянии между детектором и источником можно использовать выражение (1), принимая R равным расстоянию между центрами источника и детектора.

Такая постановка на практике возможна очень редко. В объемных источниках, чаще всего, самопоглощение велико. Измерение интенсивности на больших расстояниях зачастую невозможно из-за сравнительно малой активности.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В настоящей работе рассматривается задача, в которой источником является протяженный объект и, помимо, общей активности нужно знать её распределение по длине этого объекта.

В работе [1] рассматривался вариант измерения относительного распределения активности по длине цилиндрического источника (или иного объемного источника с сечением постоянной геометрии) с учетом вкладов излучения различных участков источника в сигнал детектора с коллиматором. Схема таких измерений представлена на рисунке 1.

Вклады различных участков определяются экспериментально. Для этого используется источник с заведомо постоянной по длине активностью на длине близкой к той, при которой вклад от конечного

участка близок к нулю и имитатор с аналогичным содержанием материалов и нулевой активностью.

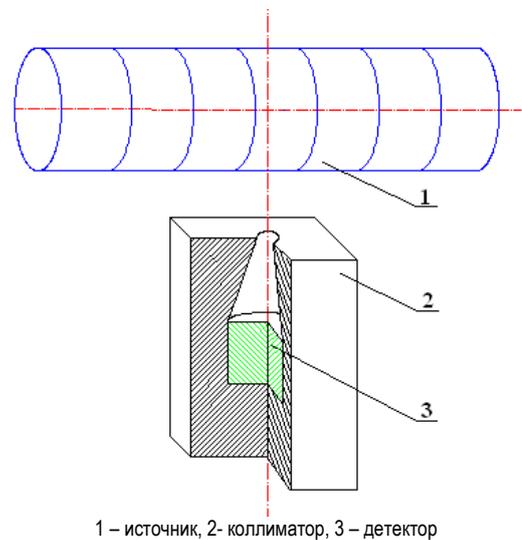


Рисунок 1. Схема измерения активности излучения цилиндрического источника

Связь активности линейного источника и регистрируемой интенсивности можно представить интегральным уравнением Фредгольма первого рода

$$I(z) = \int_0^H K(z, z') A(z') dz', \quad (2)$$

где $I(z)$ – регистрируемая интенсивность излучения в точке z , имп/с;

H – высота источника, см;

$A(z')$ – активность участка с координатой центра источника z' , Бк;

$K(z, z')$ – эффективность регистрации γ -квантов, рожденных в точке z' , детектором, установленным в точке z .

Интеграл (2) можно представить в виде

$$I_i = \sum_{j=1}^n K_{ij} A_j, \quad i = 1, \dots, n, \quad (3)$$

где $A_j = \int_{(j-1)h}^{jh} A(z') dz'$ – активность j -го участка при разбиении источника на n частей, $h = \frac{H}{n}$;

$K_{ij} = \frac{1}{A_j} \int_{(j-1)h}^{jh} A(z') K(z, z') dz'$ – коэффициент

вклада, представляющий собой эффективность регистрации γ -излучения j -го участка при измерении детектором интенсивности излучения в i -той точке вблизи источника. В рациональном случае точка i находится в центре участка j .

Решением системы уравнений (3) будет распределение активности по источнику. В общем случае система уравнений (3) имеет n^2 коэффициентов K_{ij} . При симметричном относительно оси коллиматора, установленном перпендикулярно к оси источника, и однородном материале источника, число коэффициентов вклада уменьшается до n .

ЛИНЕЙНЫЙ ИСТОЧНИК С МАЛЫМ САМОПОГЛОЩЕНИЕМ

Более простым является вариант, в котором источник является линейным с малым самопоглощением и в измерении не используется коллиматор. В этом случае вклады излучения от соседних участков можно рассчитать аналитически.

Относительная эффективность регистрации отдельной точки источника ε точечным детектором рассчитывается по формуле

$$\varepsilon = R^2 \cdot (R^2 + L^2)^{-1}, \quad (4)$$

где R – расстояние между детектором и осью источника;

L – расстояние от оси детектора (рисунок 1) к точкам источника.

Коэффициент вклада от участка конечной длины в этом случае является средним значением эффективности счета в диапазоне расстояний L_1 - L_2 источника, ограничивающими дискретный участок измерений.

На рисунке 2 приведена зависимость эффективности счета от места расположения источника и коэффициенты вкладов для участков с заданным шагом, при расположении детектора в ходе измерений над серединой этих участков.

При шаге равном 10 см, расстоянии между осью источника и центром детектора 5,5 см коэффициенты вкладов будут равны:

$$K_0 = 0,78; \quad K_1 = 0,29; \quad K_2 = 0,075; \\ K_3 = 0,04; \quad K_4 = 0,02; \quad K_5 = 0,015.$$

Остальными вкладами можно пренебречь.

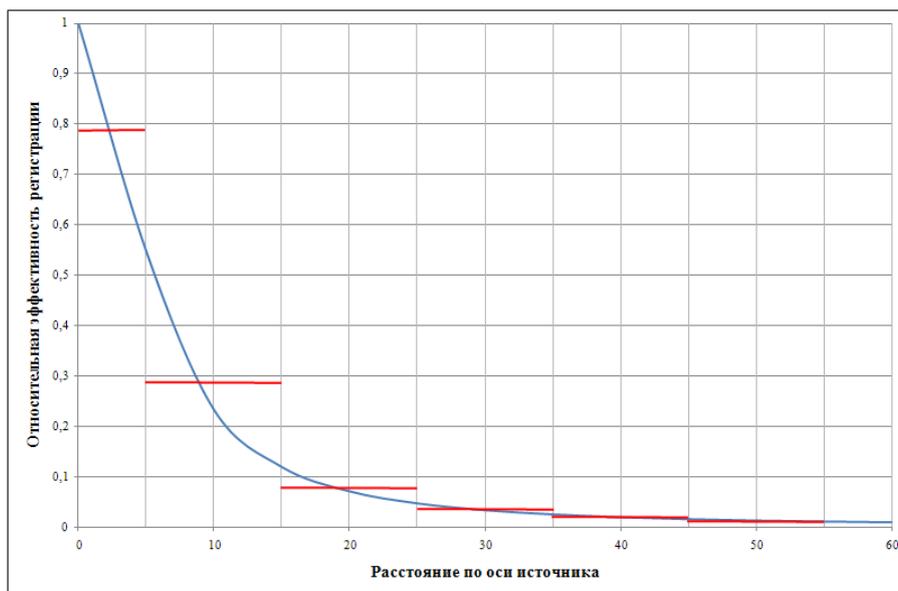


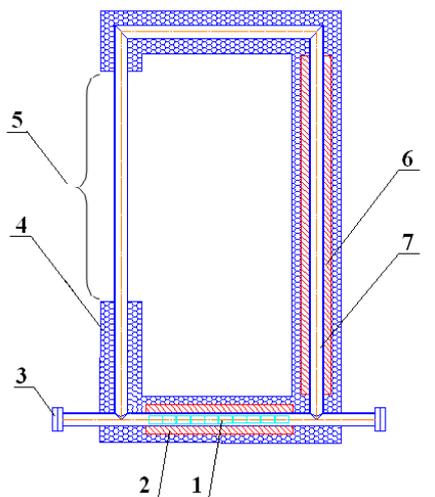
Рисунок 2. Зависимость эффективности регистрации точечных участков (синяя линия) и коэффициентов вклада (красные линии) при измерении источника без самопоглощения с $R=5,5$ см и шагом 10 см

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОТЛОЖЕНИЙ НА СТЕНКАХ ХЛОРАТОРА

Одной из практических задач было определение распределения активности отложений в полости хлоратора после взаимодействия находившегося в нем облученного бериллия с хлором. Схема хлоратора представлена на рисунке 3. Хлоратор выполнен сварным из труб диаметром $57 \times 3,5$ мм из стали 12X18H10T. В нижнем участке хлоратора установлен ложемент с образцами бериллия. На одной из

вертикальных секций хлоратора расположен холодильник, на другой – нагреватель.

В ходе эксперимента происходило взаимодействие хлора с бериллием. Образовавшийся хлорид бериллия отложился на внутренних стенках хлоратора. Радиоактивный хлорид кобальта из прореагировавшего бериллия растворялся в хлориде бериллия. Одной из задач исследований было определить количество прореагировавшего бериллия и распределение хлоридов по длине участков хлоратора.



1 – образцы бериллия, 2, 6 – нагреватели, 3 – фланец, 4 – теплоизоляция, 5 – холодильник, 7 – контур хлоратора

Рисунок 3. Схема хлоратора

Измерения интенсивности гамма-излучения вблизи стенок хлоратора проводились с шагом 10 см радиометром РКС-СОЛЮ-01. Детектор устанавли-

вался на расстоянии 1,5 см от поверхности стенок хлоратора, что соответствовало расстоянию между центром детектора и осью корпуса хлоратора 5,5 см. В каждой точке проводилось по 6 измерений интенсивности излучения. На рисунке 4 представлены распределения измеренных значений интенсивности излучения в точках отсчета и расположение нагревателя на нижнем участке. Значения интенсивности по горизонтальным участкам представлены от места входа хлора в хлоратор, а по вертикальным участкам снизу вверх.

Характер изменения распределения интенсивности в вертикальных участках хлоратора различен. Интенсивность участка с нагревателем меньше интенсивности участка с холодильником. В участке с нагревателем интенсивность увеличивается с высотой, а в участке с холодильником – падает. Эти различия можно объяснить так. Первое, меньшая температура корпуса участка с холодильником вызывает большую интенсивность осадений. Второе, конвекционный ток в полости хлоратора направлен снизу вверх на горячем участке и сверху вниз на холодном. Осаждение убывает по ходу тока газа.

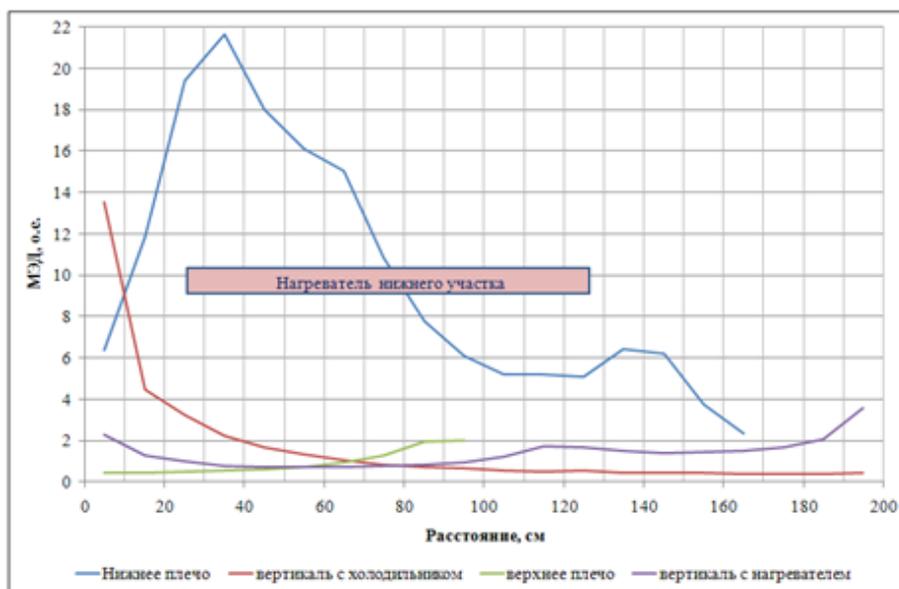


Рисунок 4. Измеренные интенсивности отложений на стенках хлоратора

ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТОВ

Для нахождения распределения активности по длине отдельных участков решались системы уравнений (3):

$$K_{11} \cdot A_1 + K_{12} \cdot A_2 + K_{13} \cdot A_3 + \dots + K_{1n} \cdot A_n = P_1 \cdot R \cdot L / \Gamma \quad (5)$$

$$K_{n1} \cdot A_1 + K_{n2} \cdot A_2 + K_{n3} \cdot A_3 + \dots + K_{nn} \cdot A_n = P_n \cdot R \cdot L / \Gamma$$

где K_{ij} – коэффициент вкладов активности интервала j на измерение МЭД интервала i ;

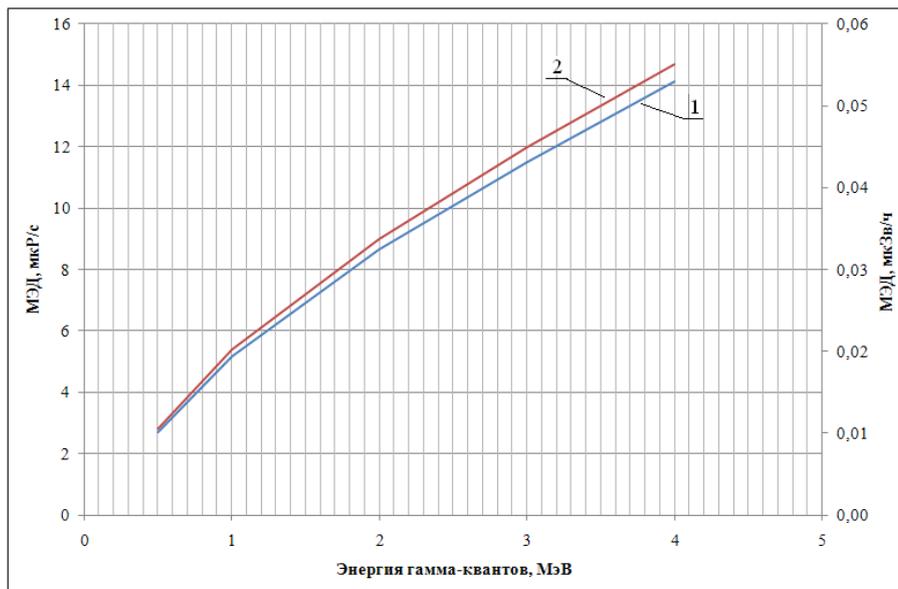
A_j – активность интервала j , Бк;

P_i – мощность дозы интервала i , Зв/ч;

Γ – гамма-постоянная, Зв·см²/ч·Бк [2, стр.40],
 R – расстояние между источником и детектором, м;

L – длина интервала, м.

При определении соответствия между измеряемой мощностью дозы и потоком гамма-квантов использовались данные [2], которые для удобства трансформированы в графический вид, представленный на рисунке 5. На графике показана зависимость мощности дозы от энергии гамма-квантов при потоке гамма-квантов, равном 10⁴ см⁻²с⁻¹. Данные представлены для случаев измерения мощности дозы в мкР/с и в мкЗв/ч.



1 – в мкЗв/ч, 2 – в мкР/с

Рисунок 5. Зависимость мощности дозы от различной энергии гамма-квантов при потоке $10^4 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$

Решения системы уравнений (3) проще всего найти матричным методом. Рассматриваемая система уравнений может быть записана в виде

$$A \cdot X = B \quad (6)$$

$$\begin{pmatrix} 0,78 & 0,29 & 0,075 & 0,04 & 0,02 & 0,015 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,29 & 0,78 & 0,29 & 0,075 & 0,04 & 0,02 & 0,015 & 0 & 0 & 0 \\ 0,075 & 0,29 & 0,78 & 0,29 & 0,075 & 0,04 & 0,02 & 0,015 & 0 & 0 \\ \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,015 & 0,02 & 0,04 & 0,075 & 0,29 & 0,78 \end{pmatrix} \quad (7)$$

Элемент измеряемой части матрица с номером 1 имеет вид:

$$B1 = \frac{0,445}{G \cdot R \cdot L}$$

где $R = 5,5 \text{ см}$, $L = 10 \text{ см}$.

Тогда матрица B будет представлена в виде

$$(3,375; 3,386; 3,583; 4,03; 4,583; 5,568; 7,083; 9,53; 14,98; 15,33) \cdot 10^5 \quad (8)$$

Так как детерминант матрицы $A \neq 0$, то существует обратная матрица A^{-1} , позволяющая найти решение в виде:

$$X = A^{-1} \cdot B \quad (9)$$

Алгоритм решения системы уравнений (3) был реализован при помощи математического пакета MathCAD 2001. Для этого вводилась матрица коэффициентов вклада A размером 10×10 и правая часть системы – вектор B . Затем проверяли условие единственности решения системы уравнений (3) $\det A \neq 0$. Если условие выполнялось, то вычислялся вектор решений X системы уравнений (3). Фрагмент программы вычислений на экране компьютера пред-

ставлен на рисунке 6. Основная матрица системы, симметричная относительно главной диагонали ($k_{ij}=k_{ji}$), состоит из коэффициентов вкладов. Запишем ее с учетом следующего: при $|j-i| > 5$ $k_{ij}=k_{ji}=0$.

Тогда для измерения десяти точек имеем:

ставлен на рисунке 6.

После решения для X получены следующие значения:

$$(3,19; 1,85; 2,17; 2,32; 2,34; 2,94; 4,01; 4,57; 11,42; 14,64) \cdot 10^5$$

На рисунке 7 представлены результаты распределений активности отложений на стенках хлоратора, рассчитанные с помощью метода вкладов. Изменения активности по длине участков стали более резкими, а значения активностей различных участков на их стыке более близкими друг к другу.

Суммирование активностей участков хлоратора дает активность отложений, которая равна $2,28 \cdot 10^7$ Бк. В состав гамма-излучающих радионуклидов облученного бериллия входят ^{60}Co ($2,7 \cdot 10^8$ Бк/кг), $^{108\text{m}}\text{Ag}$ ($2,4 \cdot 10^7$ Бк/кг) [3], ^{137}Cs ($1,8 \cdot 10^7$ Бк/кг) [4]. В соответствии с полученными экспериментальными данными [4] при взаимодействии хлора с бериллием серебро оставалось в теле бериллия и не выходило в хлорид бериллия. По данным [2] эффективность регистрации линий ^{137}Cs в ~ 2 раза выше, чем эффективность регистрации ли-

ний ^{60}Co . Соответственно, вклад в регистрируемый сигнал ^{137}Cs будет составлять 13,3%. Т.е. активность ^{60}Co в отложениях составляет $1,97 \cdot 10^7$ Бк.

По данным экспериментов [4] доля прореагиро-

вавшего бериллия составляет 6,1%, и находящаяся в хлориде бериллия активность ^{60}Co составляет $1,8 \cdot 10^7$ Бк.

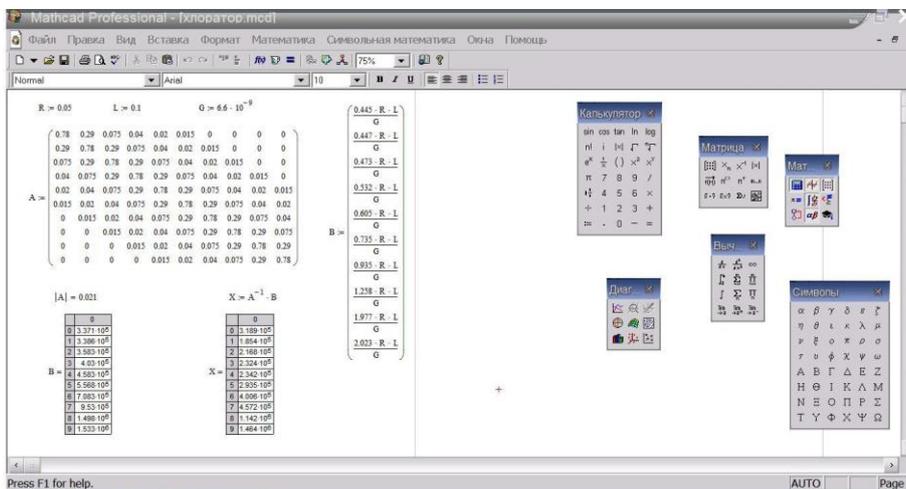


Рисунок 6. Фрагмент программы MathCAD решения системы уравнений

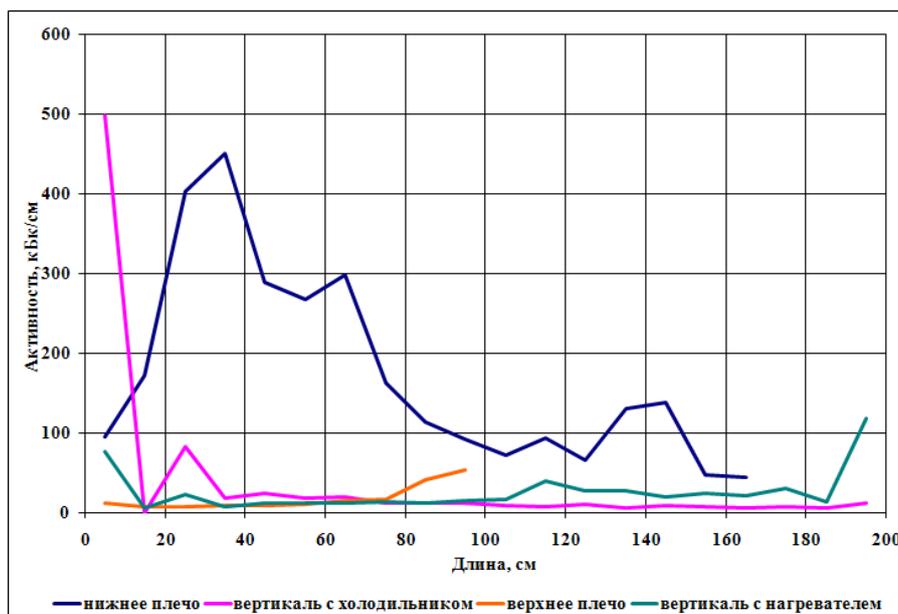


Рисунок 7. Распределения значений активности отложений на стенках хлоратора, рассчитанные по методу вкладов

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЙ И РАСЧЕТОВ

Расчет погрешностей измерений проводился по [5]. Для доверительного интервала 0,95 относительная погрешность измерений активности отдельного участка составляет ~10%. Большой вклад в погрешность этих измерений вносит азимутально неравномерное распределение отложений внутри хлоратора.

Как видно из предыдущих данных, рассчитанная величина общей активности также не превышает 10%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методика измерения и расчета распределения и суммарной активности в протяженных источниках относится к технологии неразрушающих измерений.

Проведены измерения активности отложений хлоридов, содержащих ^{60}Co , ^{137}Cs после работ по хлорированию облученного бериллия. Определены аналитические коэффициенты вкладов для объемного источника без самопоглощения.

В ходе расчетов получены распределения активности по участкам хлоратора и суммарная активность отложений, которые хорошо согласуются с другими данными, полученными независимыми измерениями.

Предлагаемый способ расчета активности протяженных источников достаточно прост и легко реализуется с помощью современных технических средств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грознов В.Н., Котов В.М., Парамонов В.В. [и др.] Измерения распределения активности источников неразрушающим методом // Атомная энергия.– 1979.– Т. 47, вып. 2.– С.118-119.
2. Моисеев А.А., Иванов В.И. Справочник по дозиметрии и радиационной гигиене.– Москва: Атомиздат.– 1974.– 386 с.
3. Transportation of Irradiated Beryllium Samples for Scientific Investigation. Specification of Beryllium Samples and Packaging in Containers // Japan Atomic Energy Agency (JAEA), Marubeni Utility Services, Ltd.– 2009.
4. Бакланова Ю.Ю., Котов В.М., Тажибаева И.Л. [и др.] Отработка технологии получения хлорида из облученного бериллия // Ядерная и радиационная физика: материалы 9-ой междунар. конф.– Алматы.– 2013.– С.68-69.
5. ГОСТ 8.207-76 Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки наблюдений.– Введ. 1977-01-01.–М.: Стандартиформ, 2008

ҰЗЫН-КӨЗДЕРІНІҢ БЕЛСЕНДІЛІГІН ӨЛШЕУ ЖӘНЕ ЕСЕПТЕУ

Котов В.М., Бакланова Ю.Ю., Ерыгина Л.А., Супрунов В.И.

ҚР ҰЯО Атом энергиясы институты, Курчатов, Қазақстан

Жұмыс бұзбайтын әдіспен желілік көздерде гамма-сәулеленуші радионуклидтердің белсенділігін анықтауға арналған. Әртүрлі учаскелердің сәулелену үлесі қарапайым геометрияның көздері үшін аналитикалық есептелген. Гамма-сәулелену көзі ретінде, оның ішкі қабырғаларында радионуклидтерді бөлумен хлоратор корпусы пайдаланылды.

Үлес коэффициенттерінің есептік мағыналары, хлоратор учаскесі бойынша белсенділіктің таралуы және бөлінудің жиынтықты белсенділігінің абсолютті мағынасы алынған болатын.

MEASUREMENT AND ACTIVITY CALCULATION OF GAMMA-EMITTING LINEAR SOURCES

V.M. Kotov, Yu.Yu. Baklanova, L.A. Erygina, V.I. Suprunov

Institute of Atomic Energy NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

The work is devoted to determination of the distribution of gamma-emitting radionuclides in the linear source by the nondestructive method. Contributions of radiation from different sites are calculated analytically for the source of simple geometry. As a source of gamma radiation a chlorinator body with deposits of radionuclides on its inner wall is used.

Calculated values of contribution coefficients, the distribution of activity on the chlorinator sites and the absolute value of the total activity of deposits were obtained.

УДК 539.534.9

ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫХ СОСТОЯНИЙ И МИКРОТВЕРДОСТИ СПЛАВА 67КН5Б ПРИ ОБРАБОТКЕ ИОННЫМИ И ЭЛЕКТРОННЫМИ ПУЧКАМИ

Скаков М.К., Рахадиллов Б.К., Зарва Д.Б., Гулькин А.В.

Национальный ядерный центр Республики Казахстан, Курчатова, Казахстан

В статье показано влияние ионной имплантации азота и электронно-лучевой обработки на структурно-фазовые состояния и микротвердость дисперсионно-твердеющего сплава 67КН5Б. Установлено, что при обработке поверхности электронными и ионными пучками имеют место морфологические изменения и изменения элементного состава сплава 67КН5Б. Определено, что в результате облучения ионами азота и электронами на поверхности дисперсионно-твердеющего сплава 67КН5Б образуются мелкодисперсные включения за счет поверхностной сегрегации ниобия. Показано, что ионная имплантация приводит к возрастанию микротвердости на 10–50%, в зависимости от дозы облучения. Определено, что микротвердость поверхности сплава 67КН5Б после электронного облучения увеличивается почти в 2 раза.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие современной техники приводит к необходимости создания материалов, работающих в экстремальных условиях высоких температур, больших механических нагрузок, агрессивных контактирующих сред, внешнего ионизирующего облучения. Одним из наиболее перспективных путей развития современного материаловедения является создание новых методов обработки материалов концентрированными потоками энергии [1]. В связи с этим, в настоящее время ведутся интенсивные исследования по изучению влияния обработки концентрированными потоками энергии на структуру и свойства металлов и сплавов. При обработке концентрированными потоками энергии одновременно осуществляется радиационное, тепловое и ударно-механическое воздействия. Развивающиеся при этом процессы перестройки структуры происходят в условиях, далеких от термодинамических равновесных состояний, и позволяют получать поверхностные слои с уникальным комплексом физико-механических свойств [2]. Поэтому изучение механизмов и особенностей изменения структурно-фазовых состояний и микротвердости дисперсионно-твердеющего сплава 67КН5Б при воздействиях ионных и электронных пучков представляет большой научный и практический интерес в плане выяснения общих закономерностей фазовых превращений в изучаемом сплаве и разработки новых прогрессивных способов обработки материалов для улучшения их практически важных свойств. Несмотря на широкое практическое применение и исследование [3] дисперсионно-твердеющего сплава 67КН5Б на Co-Ni основе, не все особенности структурных и фазовых превращений в нем хорошо изучены. В частности, недостаточно сведений о влиянии обработки концентрированными потоками энергий на структурно-фазовое состояние и свойства дисперсионно-твердеющего сплава 67КН5Б, об особенностях упрочнения этого сплава после обработки ионными и электронными пучками. Отсутствие этих данных ограничивает возможности

выбора и оптимизации методов поверхностных обработок дисперсионно-твердеющего сплава. В этой связи исследования, направленные на изучение связи параметров микроструктуры сплавов с их механическими свойствами, с целью формирования структур с оптимальным сочетанием прочности, являются весьма актуальными и позволяют создать основу при разработке новых технологий обработки этого сплава.

В связи с вышеизложенным, целью настоящей работы является исследование влияния облучения электронами и ионной имплантацией на структурно-фазовые состояния и микротвердость дисперсионно-твердеющего сплава 67КН5Б.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В соответствии с поставленными задачами в качестве объекта исследования был выбран аустенитный дисперсионно-твердеющий сплав 67КН5Б (67%-Co, 28%-Ni, 5%-Nb), широко используемый при изготовлении токоведущих упругих элементов, контактных пружин для электромагнитных и ртутных реле. Выбор материала исследования обоснован тем, что сплав 67КН5Б относится к дисперсионно-твердеющим аустенитным сплавам и используется в электротехнической промышленности. Сплав 67КН5Б после закалки находится в состоянии γ -твердого раствора с ГЦК-решеткой и упрочняется при деформации или при старении за счет выделения избыточных вторичных фаз [4]. В данном сплаве путем несложных термических или механико-термических обработок можно получить широкий спектр структурных состояний, отличающихся фазовым составом, механизмом выделения избыточных фаз, степенью дисперсности и морфологией выделяющихся частиц, дислокационной структурой и состоянием границ зерен. Как показано в работе [5], наиболее оптимальные механические свойства сплава 67КН5Б достигаются обработкой: закалка от 950°C (10 мин), прокатка на 90%. Поэтому для проведения обработки концентрированными потоками энергий изготавливали плоские образцы с размера-

**ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫХ СОСТОЯНИЙ И МИКРОТВЕРДОСТИ СПЛАВА 67КН5Б
ПРИ ОБРАБОТКЕ ИОННЫМИ И ЭЛЕКТРОННЫМИ ПУЧКАМИ**

ми 20×20×0,5 мм, после предварительной обработки: закалка от 950°C (10 мин) и прокатка на 90%. Перед облучением образцы электролитически полировали. Внедрение ионов азота с энергией 100 кэВ, дозами 1×10^{17} , 2×10^{17} , 5×10^{17} ион/см² проводилось в вакууме (10⁻⁴ Па) при плотности тока 2 мкА/см² на ионном имплантаторе МКСП-99 в лаборатории кафедры электрических аппаратов и техники высоких напряжений Люблинского технического университета (г. Люблин, Польша). Непрерывное электронное облучение выполнялось на ускорителе ЭЛВ-4. Энергия электронов на поверхности образцов при облучении составляла 1,3 МэВ, а плотность тока пучка – 10 мкА/см². Образцы были облучены до дозы $0,28 \times 10^{19}$ е⁻/см². В процессе облучения температура образцов не превышала 100°C. Исследование фазового состава и кристаллической структуры образцов сплава осуществляли методами рентгеноструктурного анализа на дифрактометре X'Pert Pro в CuK_α-излучении. Морфологию поверхности изучали в ионно-электронной лаборатории ИРГЕТАС ВКГТУ на растровом электронном микроскопе JSM-6390LV, оснащенный приставкой энергодисперсионного анализа. Микротвердость поверхностных слоев образцов до и после облучения измеряли методом вдавливания алмазного индентора на приборе ПМТ-3 при трех нагрузках 20, 50 и 100 г и выдержке под нагрузкой 10 с.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ изображений, полученных методом растровой электронной микроскопии, позволяет гово-

рить, что в результате ионной имплантации происходит изменение морфологии поверхности образцов исследуемого сплава. В результате облучения на поверхности образцов были обнаружены каплеобразные частицы размером до 0,5 мкм, мелкие блистеры и поры (рисунок 1). Для выяснения химического состава микродефектов был проведен микроанализ в режиме энергетического дисперсионного анализа. В таблице 1 приведен химический состав поверхности сплава 67КН5Б.

Из анализа данных таблицы 1 можно заключить, что под воздействием ионного облучения происходит пространственное перераспределение легирующих элементов сплава. При этом обнаружено, что в составе обнаруженных на поверхности светлых каплеобразных частиц количество ниобия больше по сравнению с составом основы. Учитывая зону охвата энергодисперсионного анализа (до 5 мкм), которая намного превышает размер частиц (до 0,5 мкм), предполагается, что светлые каплеобразные частицы являются нитридами на основе ниобия, которые образовались в результате сегрегации ниобия.

На рисунке 2 представлено изображение сплава 67КН5Б после облучения ионами до дозы $2 \cdot 10^{17}$ ион/см². Чтобы определить глубину проникновения ионов азота, был проведен рентгеновский микроанализ. В таблице 2 приведен химический состав области микровыделений. Видно, что глубина проникновения ионов азота составляет около 500 нм. Выше этой глубины ионы азота не обнаружены.

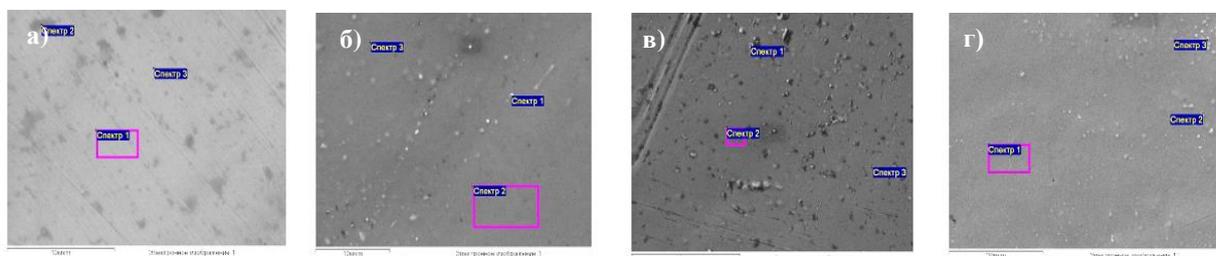


Рисунок 1. РЭМ-изображение до (а) и после облучения ионами до дозы 10^{17} ион/см² (б), 2×10^{17} ион/см² (в), 5×10^{17} ион/см² (г)

Таблица 1. Химический состав поверхности сплава 67КН5Б (в весовых %)

Доза облучения	Спектр	O, %	N, %	Mn, %	Fe, %	Co, %	Ni, %	Nb, %	ИТОГО, %
Необлученный	Спектр 1			0.37	1.64	65.21	28.08	4.69	100.00
	Спектр 2	1.90		0.34	1.58	63.67	27.30	5.22	100.00
	Спектр 3			0.33	1.79	64.78	28.00	5.09	100.00
10^{17} ион/см ²	Спектр 1				1.42	55.99	27.80	14.80	100.00
	Спектр 2				1.82	64.07	28.44	5.67	100.00
	Спектр 3				1.72	64.66	27.91	5.72	100.00
2×10^{17} ион/см ²	Спектр 1		1.35		1.77	59.64	26.84	10.41	100.00
	Спектр 2		2.65		1.61	62.78	27.58	5.37	100.00
	Спектр 3			0.45	1.74	64.15	27.59	6.08	100.00
5×10^{17} ион/см ²	Спектр 1		7.35		1.56	60.11	25.85	5.13	100.00
	Спектр 2			0.45	1.85	65.19	27.00	5.51	100.00
	Спектр 3			8.14	1.20	55.17	25.32	10.17	100.00

**ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫХ СОСТОЯНИЙ И МИКРОТВЕРДОСТИ СПЛАВА 67КН5Б
ПРИ ОБРАБОТКЕ ИОННЫМИ И ЭЛЕКТРОННЫМИ ПУЧКАМИ**

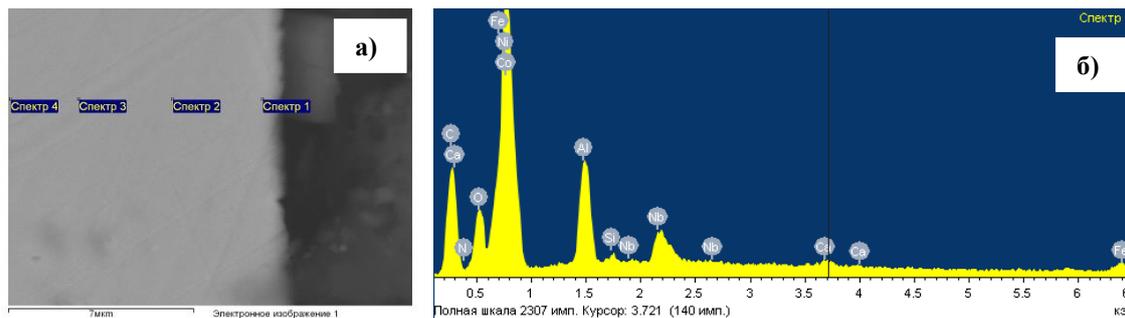


Рисунок 2. РЭМ-изображение поперечного сечения сплава 67КН5Б после облучения ионами до дозы 2×10^{17} ион/см² (а) и результаты рентгеновского микроанализа в области микровыделений (б)

Таблица 2. Химический состав поперечного сечения сплава 67КН5Б после облучения ионами до дозы 2×10^{17} ион/см² (в весовых %)

Спектр	O	N	Fe	Co	Ni	Nb	Al	Si	Ca	ИТОГО, %
Спектр 1	9.06	1.82	1.35	50.88	22.86	4.78	8.37	0.51	0.37	100.00
Спектр 2	4.69	0.00	1.53	58.96	25.73	4.94	3.70	0.44		100.00
Спектр 3	4.36	0.00	1.74	59.34	26.08	4.74	3.22	0.52		100.00
Спектр 4	3.83	0.00	1.57	59.84	25.86	5.12	3.15	0.34	0.28	100.00

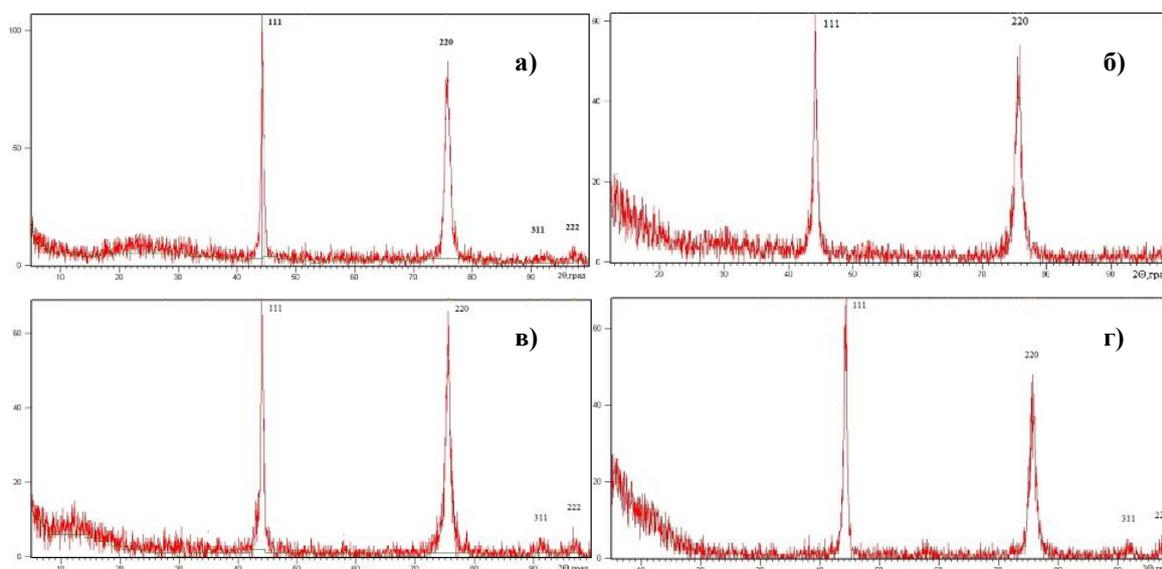


Рисунок 3. Дифрактограммы сплава 67КН5Б до (а) и после облучения ионами до дозы 10^{17} ион/см² (б), 2×10^{17} ион/см² (в), 5×10^{17} ион/см² (г)

На рисунке 3 представлены дифрактограммы сплава 67КН5Б до и после облучения. Рентгеноструктурные исследования не выявили новых нитридных фаз, возможно, ввиду их низкой концентрации и малой глубины образования.

Электронно-микроскопическими исследованиями установлено, что в результате электронного облучения происходит изменение морфологии поверхности образцов сплава (рисунок 4). Видно, что поверхность неоднородна, имеет развитый рельеф. В результате облучения электронами с энергией 1,3 МэВ до дозы $0,28 \times 10^{19}$ е⁻/см² на поверхности образца сплава 67КН5Б были обнаружены поры и мел-

кодисперсные включения размерами 0,1–0,5 мкм. Для выяснения химического состава дефектов был проведен микроанализ в режиме энергетического дисперсионного анализа. На рисунке 5 приведены результаты рентгеновского микроанализа в области микровыделений и изображение соответствующего участка поверхности сплава 67КН5Б, облученного электронами с энергией 1,3 МэВ до дозы $0,28 \times 10^{19}$ е⁻/см². Видно, что мелкодисперсные включения обогащены ниобием. Предполагается, что эти мелкодисперсные включения образуются в результате поверхностной сегрегации ниобия.



Рисунок 4. Микроструктуры поверхности сплава 67КН5Б после облучения электронами с энергией 1,3 МэВ до дозы $0,28 \times 10^{19} \text{ e}^-/\text{см}^2$

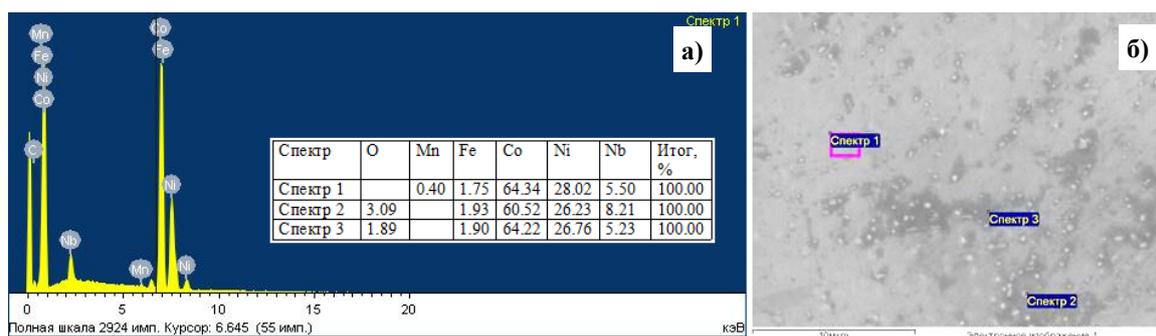


Рисунок 5. Результаты рентгеновского микроанализа в области микровыделений (а) и изображение соответствующего участка поверхности сплава 67КН5Б, облученного электронами с энергией 1,3 МэВ до дозы $0,28 \times 10^{19} \text{ e}^-/\text{см}^2$ (б)

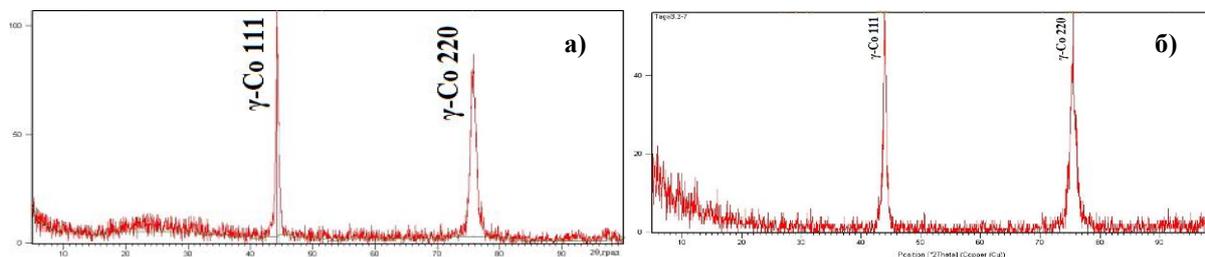


Рисунок 6. Рентгенограммы поверхности образцов сплава 67КН5Б необлученной (а) и облученной (б) стороны электронами до дозы $0,28 \times 10^{19} \text{ e}^-/\text{см}^2$ энергией 1,3 МэВ

На рисунке 6 представлены рентгенограммы сплава 67КН5Б с облученной электронами и с противоположной облучению стороны мишени. Из их сопоставления следует, что на облученной стороне отражения от плоскости (220) становятся более интенсивными, что свидетельствует об изменении ориентации кристаллитов. При этом было установлено, что параметр решетки по сравнению с исходным не меняется (в пределах погрешности). Но рентгеноструктурный метод не фиксирует однозначно глубину структурных изменений. Рентгенограмма необлученной стороны мишени аналогична рентгенограмме исходного образца. Рентгеноструктурный анализ не смог дать информацию о фазовом составе мелкодисперсных включений, возможно, ввиду их низкой концентрации и малой глубины образования.

Микротвердость сплава 67КН5Б в исходном состоянии составляет 5000 МПа и увеличивалась после облучения ионами азота в зависимости от дозы

облучения (рисунок 6). Микротвердость образцов, облученных ионами азота, увеличивается на 10–50% по сравнению с исходным значением, что согласуется с представлением об упрочняющем воздействии ионно-лучевой обработки материалов. На рисунке 7 представлена зависимость микротвердости от дозы имплантированных ионов. Видно, что максимальное увеличение микротвердости (7800 МПа) образцов наблюдается при дозе $5 \times 10^{17} \text{ ион}/\text{см}^2$ (нагрузка на индентор 20 г). Предполагается, что увеличение микротвердости при облучении связано с интенсивным образованием радиационных дефектов и обнаруженных каплеобразных частиц новых фаз.

На рисунке 8 приведены зависимости микротвердости от нагрузки (то есть распределение микротвердости по глубине) сплава 67КН5Б, облученных электронами с энергией 1,3 МэВ до дозы $0,28 \times 10^{19} \text{ e}^-/\text{см}^2$. Микротвердость поверхности сплава после электронного облучения, при малых нагрузках на

пирамидку, увеличивается почти в 2 раза, по сравнению с исходным значением, что согласуется с представлением об упрочняющем воздействии электронно-лучевой обработки материалов.

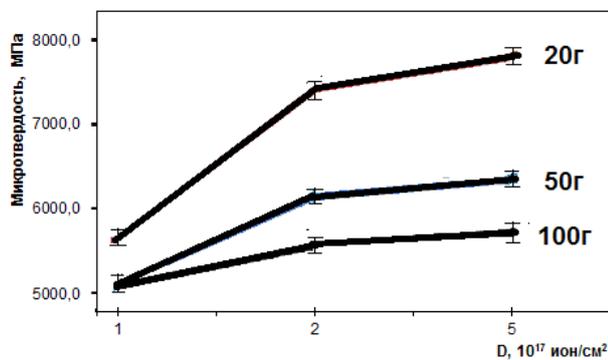


Рисунок 7. Зависимость микротвердости сплава 67КН5Б от дозы имплантированных ионов азота

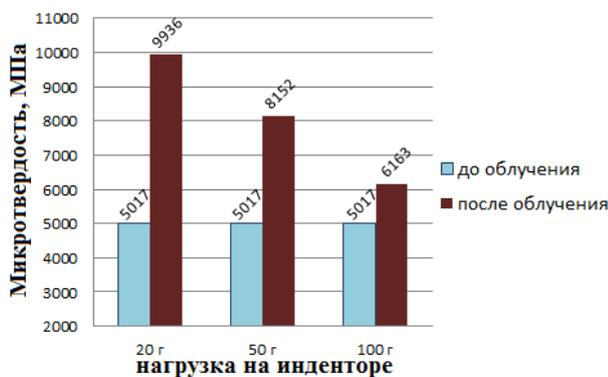


Рисунок 8. Микротвердость поверхностных слоев сплава 67КН5Б до и после облучения непрерывными электронами (1,3 МэВ, $D=0,28 \times 10^{19}$ e^-/cm^2) при различных нагрузках индентора

Выявлено, что электронное облучение приводит к возрастанию микротвердости сплава на Co-Ni-основе почти в 2 раза. Предполагается, что увеличение микротвердости облученного сплава обусловлено изменениями структурно-фазового состояния поверхностных слоев с образованием мелкодисперсных включений и радиационных дефектов при обработке электронным пучком.

Таким образом, проведенные исследования свидетельствуют об увеличении микротвердости образцов облученных ионами азота и электронами. Определено, что в результате облучения ионами азота и электронами на поверхности сплава образуются мелкодисперсные включения за счет поверхностной сегрегации ниобия. Сформированные в результате облучения ионами азота и электронами мелкодисперсные включения и радиационные дефекты способствуют повышению микротвердости поверхностного слоя дисперсионно-твердеющего сплава 67КН5Б. Впервые обнаружен эффект поверхностной сегрегации ниобия при облучении сплава 67КН5Б ионами азота и электронами, и авторы утверждают,

что его можно использовать для модификации поверхности подобных сплавов с помощью ионного и электронного облучения. Тем не менее, чтобы понять механизм взаимодействия ускоренных ионов и электронов с твердым телом, который приводит к макроскопическим изменениям, требуется большой объем дальнейшей экспериментальной и теоретической работы. Для исследования этого механизма необходимо использовать новые экспериментальные методы. Как считают авторы работы [6], ими должны стать атомно-ядерные неразрушающие методы, которые не вносят искажений в процессе исследований и могут дать надежную информацию о профилях распределения внедренных ионов и протяженности области с повышенной концентрацией дефектов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализируя полученные в работе результаты, можно сделать следующие выводы:

1. Установлено, что при обработке поверхности электронными и ионными пучками имеют место морфологические изменения и изменения элементного состава сплава 67КН5Б.

2. Впервые обнаружено, что в результате облучения ионами азота и электронами на поверхности дисперсионно-твердеющего сплава 67КН5Б образуются мелкодисперсные включения за счет поверхностной сегрегации ниобия.

3. Установлено, что ионная имплантация приводит к возрастанию микротвердости на 10–50%, в зависимости от дозы облучения. Микротвердость достигает максимума при дозе 5×10^{17} ион/см². Предполагается, что увеличение микротвердости при облучении связано с интенсивным образованием радиационных дефектов и каплеобразных частиц новых фаз.

4. Определено, что микротвердость поверхности сплава после электронного облучения увеличивается почти в 2 раза. Увеличение микротвердости облученного сплава обусловлено изменениями структурно-фазового состояния поверхностных слоев с образованием мелкодисперсных включений и радиационных дефектов при обработке электронным пучком.

5. Разработан и предложен для практического применения способ обработки дисперсионно-твердеющих сплавов на Co-Ni-основе ионной имплантацией N^+ с энергией 100 кэВ и интегральной дозой облучения $10^{17} \div 5 \times 10^{17}$ ион/см², приводящий к увеличению микротвердости до 7800 МПа.

Таким образом, полученные в работе экспериментальные данные помогают предсказать максимальное увеличение микротвердости сплава 67КН5Б при различных видах обработок. Разработанные в работе способы и режимы упрочняющих обработок, позволяют практикам-материаловедам решить проблему упрочнения сплава 67КН5Б методами ионной имплантации и электронно-лучевой обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нанокристаллические интерметаллидные и нитридные структуры, формирующиеся при ионно-лучевом воздействии / И.А. Курзина [и др.] – Томск: Изд-во НТЛ, 2008. – 324 с.
2. Ионно-лучевая и ионно-плазменная модификация материалов / К.К. Кадыржанов [и др.] – М.: Изд-во МГУ, 2005, 640 с.
3. Комаров Ф.Ф. Ионная имплантация в металлы / Ф.Ф. Комаров – М.: Metallurgy, 1990. 216 с.
4. Суховаров В.Ф. Прерывистое выделение фаз в сплавах / В.Ф. Суховаров – Новосибирск: Наука, 1983. – 164 с.
5. Ерболатулы Д. Влияние структурных превращений на сверхпластические и прочностные свойства аустенитных никель-хромовых и кобальт-никелевых сплавов / Д. Ерболатулы, Д.Л. Алонцева, М.К. Скаков // Вестник КарГУ, серия Физика. – 2004. – №2 (34). – С.18–21.
6. Диденко А.Н., Шаркеев Ю.П., Козлов Э.В., Рябчиков А.И. Эффекты дальнего действия в ионно-имплантированных металлических материалах. – Томск: НТЛ. 2004. – 326 с.

ИОНДЫҚ ЖӘНЕ ЭЛЕКТРОНДЫҚ ШОҚТАРМЕН ӨНДЕУ КЕЗІНДЕГІ 67КН5Б ҚОРЫТПАСЫНЫҢ ҚҰРЫЛЫМДЫҚ-ФАЗАЛЫҚ КҮЙЛЕРІНІҢ ЖӘНЕ МИКРОҚАТТЫЛЫҒЫНЫҢ ӨЗГЕРУІ

Скаков М.К., Рахадиллов Б.К., Зарва Д.Б., Гулькин А.В.

Қазақстан Республикасының Ұлттық ядролық орталығы, Курчатов, Қазақстан

Мақалада азотты иондық ендірудің және электронды-сәуле арқылы өндеудің 67КН5Б қорытпаның құрылымдық-фазалық күйлеріне және микроқаттылығына әсері көрсетілген. 67КН5Б қорытпасының бетін электронды және ионды шоқтармен өндеу кезінде оның морфологиялық және элементтік құрамы өзгеретіні анықталды. Азотты иондық ендірудің және электронды-сәуле арқылы өндеудің нәтижесінде ниобидің беттік сегрегациясы әсерінен 67КН5Б қорытпасының бетінде ұсақдисперсиялық қосылыстар түзілетіні анықталды. Иондық ендіру кезінде сәуле түсірудің дозасына байланысты микроқаттылықтың 10–50 пайызға өсуі көрсетілген. Электронды сәуледен кейін 67КН5Б қорытпа бетінің микроқаттылығы 2 есеге артқаны анықталды.

THE CHANGE IN THE STRUCTURAL-PHASE STATE AND MICROHARDNESS OF THE 67CoNi5Nb ALLOY WHILE ION AND ELECTRON BEAMS PROCESSING

Skakov M.K., Rakhadilov B.K., Zarva D.B., Gulkin A.V.

National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov, Kazakhstan

The article shows the influence of ion implantation of nitrogen and electron-beam processing on structural-phase state and microhardness of a dispersion-hardening 67CoNi5Nb alloy. It is established that at the surface treatment of electronic and ion beams is the place to morphological changes, and changes in the elemental composition of the 67CoNi5Nb alloy. It is determined that in the result of treatment by nitrogen ions and electrons on the surface of a dispersion-hardening 67CoNi5Nb alloy formed fine inclusion due to surface segregation of niobium. It is shown that the ion implantation leads to an increase in the microhardness to 10–50%, depending from dose of irradiation. It is determined that the surface microhardness of the 67CoNi5Nb alloy after electron irradiation increases almost to 2 times.

УДК 538.971

СТРУКТУРА И МОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛИ Р6М5, ОБРАБОТАННОЙ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

¹⁾ Скаков М.К., ²⁾ Рахадиллов Б.К., ¹⁾ Зарва Д.Б., ¹⁾ Гулькин А.В.

¹⁾ *Национальный ядерный центр Республики Казахстан, Курчатов, Казахстан*

²⁾ *Восточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан*

В статье исследовано влияние азотирования электролитно-плазменным воздействием на структуру и морфологию быстрорежущей стали Р6М5. Показано, что после азотирования электролитно-плазменным воздействием на поверхности стали Р6М5 формируются мелкие поры, микродефекты и мелкодисперсные включения. Экспериментально установлено, что в поверхности стали Р6М5 после азотирования электролитно-плазменным воздействием при температуре 550°C формируется диффузионный упрочненный слой с монофазным нитридом Fe₄N (γ' -фаза). Определено содержание азота на структурных составляющих после азотирования. Выявлено, что модифицированная поверхность отличается большей величиной поверхностных микронеровностей.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, в настоящее время широкое распространение получили способы высокоэнергетического упрочнения поверхности металлов с использованием лазерного и плазменного воздействий [1]. Опыт показывает, что плазменные источники поверхностного нагрева можно во многих случаях применять наряду с такими источниками, как лазерный и электронно-лучевой, обеспечивая высокие технико-экономические показатели процесса. Так, поверхностная обработка режущих инструментов из быстрорежущих сталей воздействием плазмы является существенным резервом экономии материальных, трудовых и энергетических затрат [2]. Следует выделить два направления использования плазменного нагрева для поверхностного упрочнения материалов. К первому направлению можно отнести технологию ионно-плазменного и электролитно-плазменного упрочнения. Второе направление применения плазменного нагрева базируется на использовании сжатой дуги прямого или косвенного действия, генерируемой специальным плазмотроном. Особый интерес среди них представляет первое направление, а именно технология электролитно-плазменного упрочнения, благодаря которой можно достичь достаточно высоких эксплуатационных свойств при низкой трудоемкости [3]. В процессе обработки электролитно-плазменным воздействием происходят значительные изменения структурно-фазовых состояний и соответственно свойств материала в тонких поверхностных слоях вследствие физического воздействия ионов низкотемпературной плазмы и электрического разряда [4]. Развивающиеся при

этом процессы перестройки структуры, структурно-фазовые превращения происходят в условиях, далеких от термодинамически равновесных состояний, и они позволяют получать модифицированные поверхностные слои с уникальным комплексом физико-механических свойств [5]. Более того, воздействие электролитической плазмой, при котором происходит насыщение поверхности различными химическими элементами, сопровождается формированием поверхности со специфической морфологией.

В связи с вышеизложенным, целью настоящей работы является исследование влияния азотирования электролитно-плазменным воздействием на структуру и морфологию поверхности быстрорежущей стали Р6М5.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В соответствии с поставленной задачей в качестве объекта исследования была выбрана быстрорежущая вольфрамомолибденовая сталь Р6М5. Выбор материала исследования обоснован тем, что сталь Р6М5 является наиболее распространенной в металлообработке, типичной быстрорежущей сталью умеренной теплостойкости. Химический состав исследуемой стали приведен в таблице 1.

Заготовки образцов для исследований в виде параллелепипедов с размерами 10×30×30 мм³ вырезали из прутков стали Р6М5 в состоянии поставки. Затем образцы подвергали стандартной для этой стали термообработке: закалке от 1230°C в масле и последующему трехкратному отпуску при 560°C (длительность каждого отпуска 1 ч, охлаждение в воздухе) [6]. После чего подвергали азотированию электролитно-плазменным воздействием.

Таблица 1. Химический состав быстрорежущей стали Р6М5 (ГОСТ 19265-73)

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Mo	W	V	Co
0.82-0.9	до 0.5	до 0.5	до 0.4	до 0.025	до 0.03	3.8-4.4	4.8-5.3	5.5-6.5	1.7-2.1	до 0.5

Электролитно-плазменное азотирование образцов осуществляли на опытно-промышленной установке, имеющей следующие основные части: электролитическая ячейка, источник питания, система автоматического управления, система охлаждения электролита, система подачи электролита [7]. Процесс азотирования проводили в электролите из водного раствора, содержащего 20% карбамида, 10% карбоната натрия в следующем режиме: температура нагрева образца – 550°C, напряжение при нагреве до температуры обработки – 320 В, плотность тока ~ 4 А/см², напряжение при выдержке при 550°C – 200 В, плотность тока ~3 А/см², время обработки варьировалось от 3 до 7 минут. Перед азотированием образцы стали отшлифовали и отполировали.

Металлографические исследования проведены на оптическом микроскопе «ALTAMI-MET-1M». Морфологию поверхности изучали на атомно-силовом микроскопе С3М Solver HV. Микроструктуру и элементный состав образцов стали исследовали на растровом электронном микроскопе JSM-6390LV, который оснащен приставкой энергодисперсионного микроанализа INCAEnergy. Исследования фазового состава и кристаллической структуры образцов стали осуществляли методами рентгеноструктурного анализа на дифрактометре D8 ADVANCE в CuK_α-излучении, используя шаг размером 0.02° и время шага 0,2 с. Для выявления структуры и частиц карбидных фаз было применено химическое травление шлифов в 4% спиртовом растворе азотной кислоты (время травления 5–7 с).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В работах [8, 9], экспериментально выявлено, что микроструктура стали Р6М5 в исходном состоянии, то есть после закалки и трехкратного отпуска, состоит из пластинчатого мартенсита отпуска и специальных карбидов (рисунок 1, а). Частицы карбидов равномерно распределены и близки к правиль-

ной сферической форме диаметром менее 3 мкм. Сравнение микроструктуры стали Р6М5 до и после обработки показало, что модифицирование электролитно-плазменным воздействием способствует не только измельчению карбидов, но и изменению их морфологии. После азотирования электролитно-плазменным воздействием на поверхности стали Р6М5 формируются мелкие поры, микродефекты и мелкодисперсные включения (рисунок 1, б, стрелками показаны). Обнаруженные мелкие поры, микродефекты, по-видимому, образуются при бомбардировке заряженными частицами электролитной плазмы. Предполагается что, мелкодисперсные включения являются нитридами легирующих элементов (хром, молибден и ванадий), которые образуются при воздействии плазмы азотосодержащего электролита. Увеличение времени обработки приводит к дальнейшему повышению микродефектов [9]. Известно, что за счет возникновения избыточных вакансий и других дефектов кристаллической решетки возрастает доля стимулированной диффузии через кристаллическую решетку металла. Поэтому возникновение таких дефектов вполне закономерно при электролитно-плазменной обработке и объясняет интенсификацию процесса диффузионного насыщения азота при использовании непосредственного воздействия электролитической плазмы на насыщаемый материал [10].

Металлографическим анализом установлено, что при азотировании электролитно-плазменным воздействием при 550°C протекает процесс диффузионного насыщения стали азотом с ускоренным образованием модифицированного слоя на поверхности стали Р6М5. Микроструктура модифицированного слоя стали Р6М5 показана на рисунке 2. Видно, что после обработки на поверхности образцов стали Р6М5 формируется модифицированный слой толщиной 20–30 мкм.

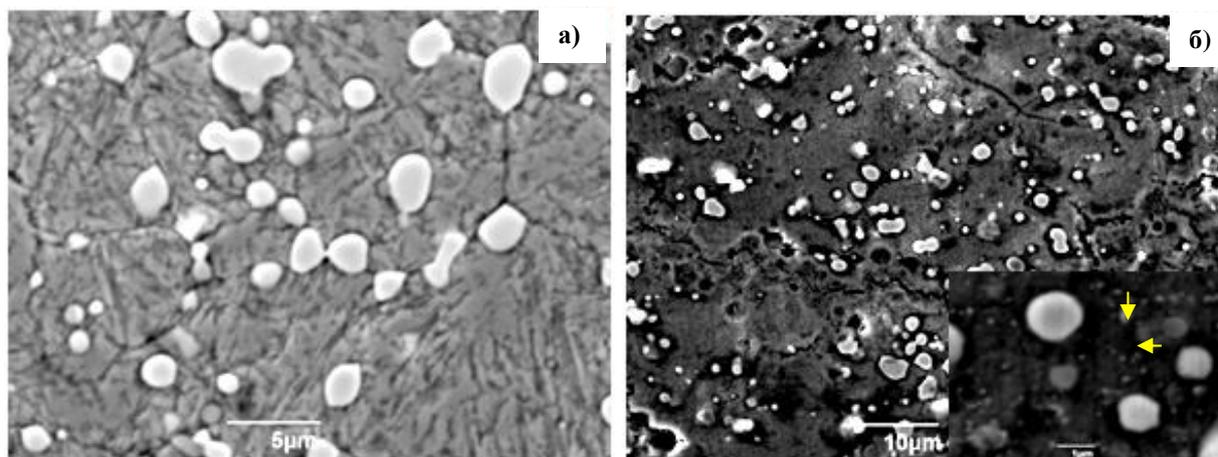


Рисунок 1. Микроструктура поверхности образцов стали Р6М5: а) до, б) после азотирования электролитно-плазменным воздействием при температуре 550°C в течении 7 мин

**СТРУКТУРА И МОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛИ Р6М5,
ОБРАБОТАННОЙ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ**

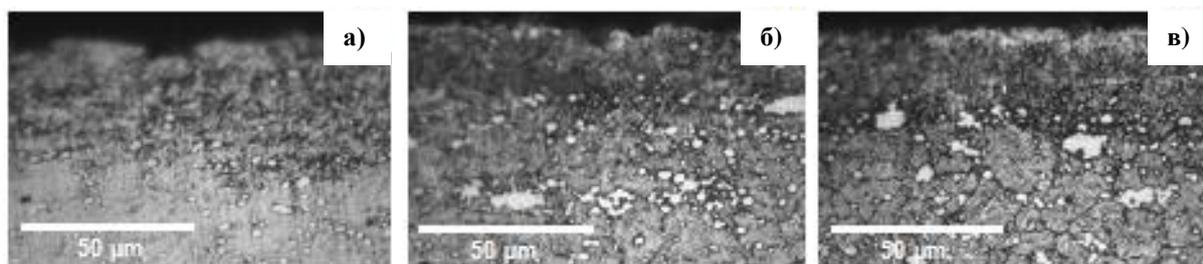


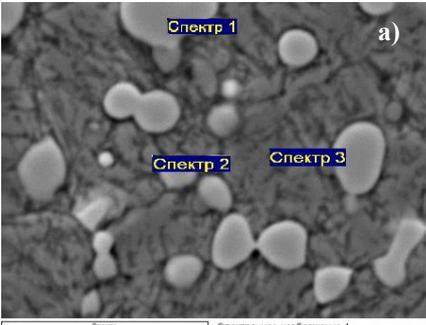
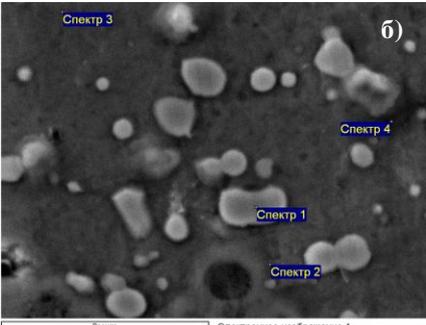
Рисунок 2. Микроструктура диффузионного слоя стали Р6М5 после азотирования электролитно-плазменным воздействием при температуре 550°С: а) 3 мин, б) 5 мин, в) 7 мин

В таблице 2 приведены результаты микрозондового анализа. Приведено содержание легирующих элементов в карбидных частицах и матрице стали Р6М5 до и после азотирования электролитно-плазменным воздействием. Видно, что светлые карбиды обогащены вольфрамом и молибденом, а темные карбиды ванадием. После электролитно-плазменного воздействия содержание азота в матрице составляло около 6-ти процентов, а на темной карбидной частице около 1,5 процентов. На светлых карбидных частицах азот не обнаружен.

Исследования морфологии поверхности, проведенные методом атомно-силовой микроскопии, по-

казали, что поверхность в исходном состоянии обладает менее выраженной топографией, чем поверхность, подвергнутая азотированию электролитно-плазменным воздействием (рисунок 3). Помимо этого модифицированная поверхность отличается большей величиной поверхностных микронеровностей, что объясняется распылением поверхностного слоя в процессе модифицирования налетающими заряженными частицами электролитной плазмы и электрическими разрядами. При этом микронеровность модифицированных поверхностных слоев увеличивается в зависимости от времени выдержки, что вполне закономерно.

Таблица 2. Содержание легирующих элементов в структурных составляющих стали Р6М5

Спектр	Структурные составляющие	Исходный					После обработки					
												
		Содержание элементов, % (масс.)					Содержание элементов, % (масс.)					
		V	Cr	Fe	Mo	W	N	V	Cr	Fe	Mo	W
1	Светлые карбиды	3.42	3.31	30.86	26.05	36.37	0.00	3.25	3.51	32.04	25.91	35.29
2	Темные карбиды	26.47	4.45	30.82	16.62	21.64	1.37	19.86	6.14	57.59	7.12	7.93
3	Мартенсит	1.33	4.62	84.51	4.25	5.30	5.87	1.45	4.70	80.41	3.60	3.97

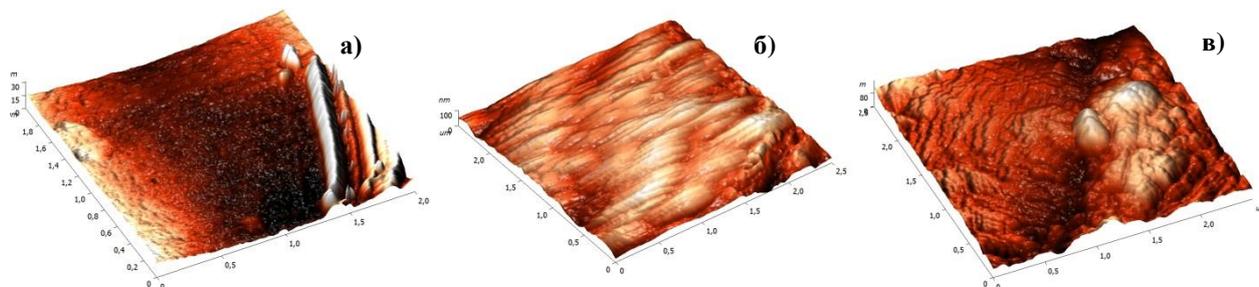


Рисунок 3. Изображения рельефа поверхности образцов стали Р6М5, азотированных электролитно-плазменным воздействием продолжительностью 3 мин (а), 5 мин (б) и 7 мин (в)

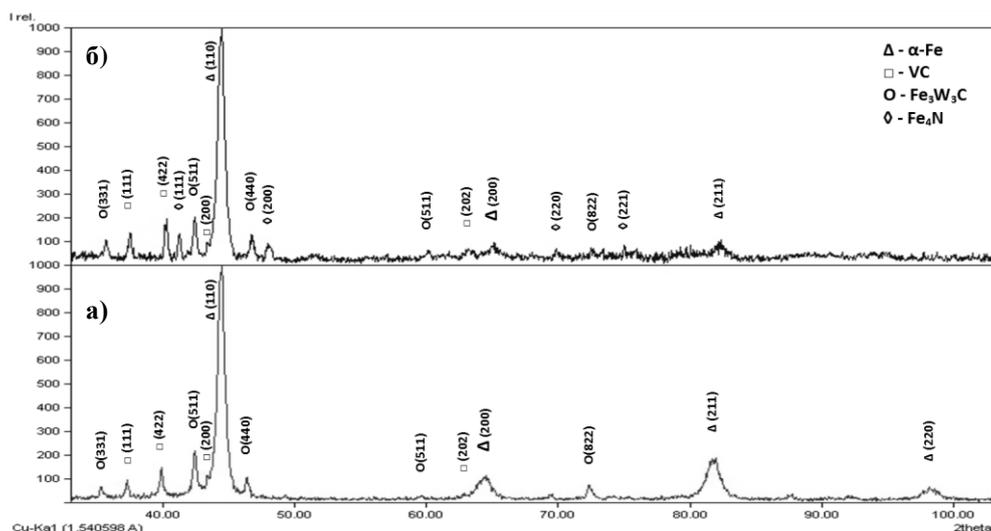


Рисунок 4. Дифрактограммы стали Р6М5 до (а) и после азотирования электролитно-плазменным воздействием при температуре 550°C в течение 7 мин (б)

На рисунке 4 приведены рентгеновские дифрактограммы образцов стали Р6М5 до и после азотирования электролитно-плазменным воздействием. В исходном состоянии основной фазой матрицы стали является α -фаза (мартенсит). А также в фазовом составе стали Р6М5 имеются частицы карбида ванадия VC и карбида вольфрама Fe_3W_3C , которые имеют сложную ГЦК-кристаллическую решетку и пространственную группу Fd3m [11]. После азотирования электролитно-плазменным воздействием при температуре 550°C, на дифрактограммах обнаружены интерференционные линии фазы Fe_4N (рисунок 4). Наблюдается уширение, спад интенсивности и сдвиг в сторону меньших брегговских углов интерференционных линий (110) и (211) α -фазы, что свидетельствует об образовании твердого раствора азота в железе, т.е. зона внутреннего азотирования. Рентгеноструктурные исследования не выявили нитридных фаз легирующих элементов, возможно, ввиду их низкой концентрации и малого размера. Это также связано с образованием мелкодисперсных нитридов, распределение которых по слою не обеспечивает их выявление при имеющейся чувствительности фазового рентгеноструктурного анализа. Тем не менее, на основе данного микроструктурного и микрозондового анализов и литературных данных по формированию азотированного слоя легированных сталей можно предположить, что сформированные в поверхности стали Р6М5 после азотирования электролитно-плазменным воздействием мелкодисперсные включения являются мелкодисперсными нитридами легирующих элементов.

Таким образом, главным достоинством азотирования электролитно-плазменным воздействием является возможность получения диффузионного упрочненного слоя с монофазным нитридом Fe_4N (γ' -фаза), в отличие от газового азотирования в аммиаке, где нитридный слой состоит из двух γ' - и

ϵ -фаз, что является источником внутренних напряжений на границе раздела фаз и вызывает хрупкость и отслаивание упрочненного слоя режущих инструментов при эксплуатации [12]. Образование диффузионного слоя из азотистого мартенсита в поверхностных слоях будет положительно влиять на эксплуатационные свойства режущего инструмента из быстрорежущей стали Р6М5, т.к. нитриды железа обладают большей теплоемкостью по сравнению с железом [13]. При этом создаются благоприятные условия для предотвращения температурных всплесков на поверхности режущего инструмента.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализируя полученные в работе результаты, можно сделать следующие выводы:

1. Определено, что после азотирования электролитно-плазменным воздействием на поверхности стали Р6М5 формируются мелкие поры, микродефекты и мелкодисперсные включения. Предполагается, что мелкодисперсные включения являются нитридами легирующих элементов.

2. Экспериментально установлено, что на поверхности стали Р6М5 после азотирования электролитно-плазменным воздействием при температуре 550°C формируется диффузионный упрочненный слой с монофазным нитридом Fe_4N (γ' -фаза).

3. Выявлено, что модифицированная поверхность отличается большей величиной поверхностных микронеровностей, что объясняется распылением поверхностного слоя в процессе бомбардировки налетающими заряженными частицами электролитной плазмы и электрическими разрядами. Микронеровности модифицированных поверхностных слоев увеличиваются в зависимости от времени выдержки.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки МОН РК на 2013-2015 гг. по программе «Грантовое финансирование научных исследований».

ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьев С.Н. Технологические методы повышения износостойкости контактных площадок режущего инструмента [Текст] : Монография / С. Н. Григорьев; В.П. Табаков, М.А. Волосова. – Старый Оскол: ТНТ, 2011. – 379 с.
2. Соснин Н.А., Ермаков С.А., Тополянский П.А. Плазменные технологии. Сварка, нанесение покрытий, упрочнение. М.: Машиностроение, 2008, – 406 с.
3. Суминов И.В., Белкин П.Н. и др. Мир материалов и технологий. В 2-х томах, Том 1, М. изд. Техносфера, 2011, – 464 с.
4. Gupta P., Tenhundfeld G., Daigle E.O., Ryabkov D. Electrolytic plasma technology: Science and engineering – an overview // Surf. & Coat. Technol. 2007. V. 25. P. 87–96.
5. Plasma electrolysis for surface engineering, Yerokhin A.I., Nie X., Leyland A., Matthews A., Dowey S.J., // Surf. and Coat. Tech. 1999. V. 122. P. 73–93.
6. Гольдштейн М.И., Грачев С.В., Векслер Ю.Г. Специальные стали. – М.: Metallurgia, 1985. – 408с.
7. Установка электролитно-плазменной обработки: Патент на полезную модель Республики Казахстан: МПК8 C25F 7/00 / Скаков М.К., Веригин А.А., Фурсов А.В., Парунин С.В., Сапатаев Е.Е., Курбанбеков Ш.П. // – № 878 / Заявл. 31.01.2012; Оpubл. 15.11.12, Бюл. № 11.
8. Skakov M.K., Rakhadilov B.K., Scheffler M., Karipbayeva G.S., Rakhadilov M.K. Electrolyte-plasma nitriding of high-speed steel // Applied Mechanics and Materials. – 2013. – Vol. 379. – P. 161-166 www.scientific.net.
9. Skakov M.K., Rakhadilov B.K., Karipbayeva G.S. Specifics of microstructure and phase composition of high-speed steel R6M5 // Applied Mechanics and Materials. – 2013. – Vol. 404. – P.20-24 www.scientific.net.
10. Дураджи В.Н., Химико-термическая обработка металлов с нагревом в электролитной плазме // Actual Conference. Технологии обработки поверхности, 6 (69), 2010 г – с. 45–50.
11. Skakov M.K., Rakhadilov B.K., Scheffler M. Influence of electrolyte plasma treatment on structure, phase composition and microhardness of steel R6M5 // Key Engineering Materials. – 2013. – Vol. 531–532. P. 627–631. <http://www.scientific.net/KEM.531-532.627>.
12. Арзамасов Б.Н., Братухин А.Г., Елисеев Ю.С., Панайоти Т.А. Ионная химико-термическая обработка сплавов. М., изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999, 400 с.
13. Усманов К.Б., Якунин Г.И. Влияние внешних сред на износ и стойкость режущих инструментов. – Ташкент: изд-во «Фан» УзССР, 1984. 160 с.

ЭЛЕКТРОЛИТТИ ПЛАЗМА ӘСЕРІМЕН ӨНДЕЛГЕН Р6М5 БОЛАТЫНЫҢ ҚҰРЫЛЫМЫ МЕН БЕТТІК МОРФОЛОГИЯСЫ

¹⁾ Скаков М.К., ²⁾ Рахадиллов Б.К., ¹⁾ Зарва Д.Б., ¹⁾ Гулькин А.В.

¹⁾ Қазақстан Республикасының Ұлттық ядролық орталығы, Курчатов, Қазақстан

²⁾ Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан мемлекеттік техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан

Мақалада электролитті плазмалық әсермен азоттаудың Р6М5 жылдам кескіш болатының құрылымы мен морфологиясына әсері зерттелген. Электролиттік плазмалық әсермен азоттаудан кейін Р6М5 болатының бетінде ұсақ тесіктер, микроақаулар және ұсақ дисперсті қосылыстар түзілетіндігі корсетілген. 550°C температурада электролиттік плазмалық әсермен азоттаудан кейін Р6М5 болатының бетінде Fe₄N (γ' -фаза) монофазалық нитридті бар беріктендірілген диффузиялық қабат түзілетіндігі экспериментті түрде анықталды. Азоттаудан кейін құрылымдардағы азоттың үлесі анықталған. Турлендірілген бет беттік микротегісеместікпен ерекшеленетіні анықталған.

STRUCTURE AND SURFACE MORPHOLOGY OF R6M5 STEEL AFTER ELECTROLYTE-PLASMA TREATMENT

¹⁾ Skakov M.K., ²⁾ Rakhadilov B.K., ¹⁾ Zarva D.B., ¹⁾ Gulkin A.V.

¹⁾ National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov, Kazakhstan

²⁾ D. Serikbayev East Kazakhstan State Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

In article influence of nitriding on the structure and morphology of R6M5 high-speed steel by electrolytic-plasma treatment was study. It is shown that after nitriding by electrolytic-plasma treatment on the R6M5 steel surface formation of small pores, microdefects and fine inclusion. It is found experimentally that R6M5 steel surface after electrolytic-plasma nitriding at 550°C temperature formed diffusion strengthened layer with Fe₄N-monophasic nitride (γ' -phase). The content of nitrogen on structural components after nitriding was determined. It is revealed that modified surface differs by having greater magnitude of the surface imperfection.

УДК 539.172.15

ДВАЖДЫ-ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ И ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СЕЧЕНИЯ РЕАКЦИЙ (${}^3\text{He},xd$), (${}^3\text{He},xt$) И (${}^3\text{He},x\alpha$) НА ЯДРЕ ${}^{59}\text{Co}$ ПРИ ЭНЕРГИИ ${}^3\text{He}$ 50,5 МэВ

¹⁾ Дуйсебаев А., ¹⁾ Дуйсебаев Б.А., ¹⁾ Жолдыбаев Т.К., ¹⁾ Садыков Б.М., ²⁾ Исмаилов К.М., ³⁾ Мереке А.

¹⁾ *Институт ядерной физики КАЭ МИИТ РК, Алматы, Казахстан*

²⁾ *Назарбаев Университет, Астана, Казахстан*

³⁾ *КазНУ им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан*

Работа является продолжением цикла исследований инклюзивных сечений реакций, инициированных ионами ${}^3\text{He}$ на ядрах – кандидатах конструкционных элементов проектируемых ядерно-энергетических установок. Получены дважды-дифференциальные сечения реакций (${}^3\text{He},xd$), (${}^3\text{He},xt$) и (${}^3\text{He},x\alpha$), образующихся при взаимодействии ионов ${}^3\text{He}$ с энергией 50,5 МэВ с ядром ${}^{59}\text{Co}$. После интегрирования по углу определены интегральные и парциальные сечения указанных реакций. Анализ экспериментальных результатов выполнен на основе экситонной модели распада ядер в рамках расчетного кода PRECO-2006, описывающей переход возбужденной системы в равновесное состояние. Наряду с предравновесным, рассчитаны вклады в формирование интегральных сечений составных и прямых механизмов. Решение поставленной задачи имеет большое значение, как для фундаментальных вопросов ядерной физики, так и для различных прикладных областей, например, ядерной трансмутации долгоживущих радиоактивных отходов.

ВВЕДЕНИЕ

В середине прошлого столетия была выдвинута идея создания ядерно-энергетической системы, реализованная к настоящему времени как Accelerator Driven System (ADS), состоящая из ускорителя протонов (дейтронов) с энергией 0,8–1,5 ГэВ и током 30–100 мА, нейтронопроизводящей мишени мощностью 30–100 МВт и подкритического реактора (бланкета) с потоком тепловых нейтронов $(1-5) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Помимо получения энергии, система является мощным трансмутатором долгоживущих радиоактивных отходов атомной промышленности [1].

Техническое воплощение такой ядерно-энергетической системы связано с необходимостью получения большого объема точных ядерных данных. Согласно физическому сценарию работы ADS, высокоэнергичные протоны при взаимодействии с ядрами конструкционных элементов и топлива реактора в результате реакций скалывания порождают спектр вторичных частиц (нейтроны, протоны, дейтроны, нуклиды гелия ${}^3\text{He}$, ${}^4\text{He}$ и т.д.) которые, в свою очередь, способны через прямые и неравновесные (предравновесные) реакции приводить к образованию третичных частиц и т.д. Диапазон нуклонного состава и энергий возбуждения делящихся ядер в ADS неизмеримо шире соответствующих диапазонов в традиционных реакторах. Имеющиеся ключевые ядерные параметры – сечения взаимодействия нуклонов и кластеров, их энергетические спектры известны с точностью в 10 раз хуже требуемых. Разброс экспериментальных результатов тоже велик (2–3 раза и более).

Физически и экономически невозможно изменить все необходимые сечения ядерных реакций для элементов ADS. В этой ситуации крайне важна разработка и развитие ядерных моделей механизма реакций, повышение их предсказательной силы. Особое значение имеет развитие концепции предравновесного распада ядер, отражающей динамику обра-

зования и эволюции возбужденной системы к равновесному состоянию [2–4]. Характерными особенностями реакции на этой стадии является образование большого количества высокоэнергетичных частиц, обладающих значительной асимметрией вперед в угловых распределениях. Это означает, что энергия возбуждения ядра распределяется среди ограниченного числа степеней свободы и что направление движения частицы во входном канале на этих стадиях, в определенной степени, сохраняется. Не менее важной задачей остается тестирование и совершенствование вычислительных кодов, основанных на соответствующих теоретических подходах, обладающих достаточной предсказательной способностью.

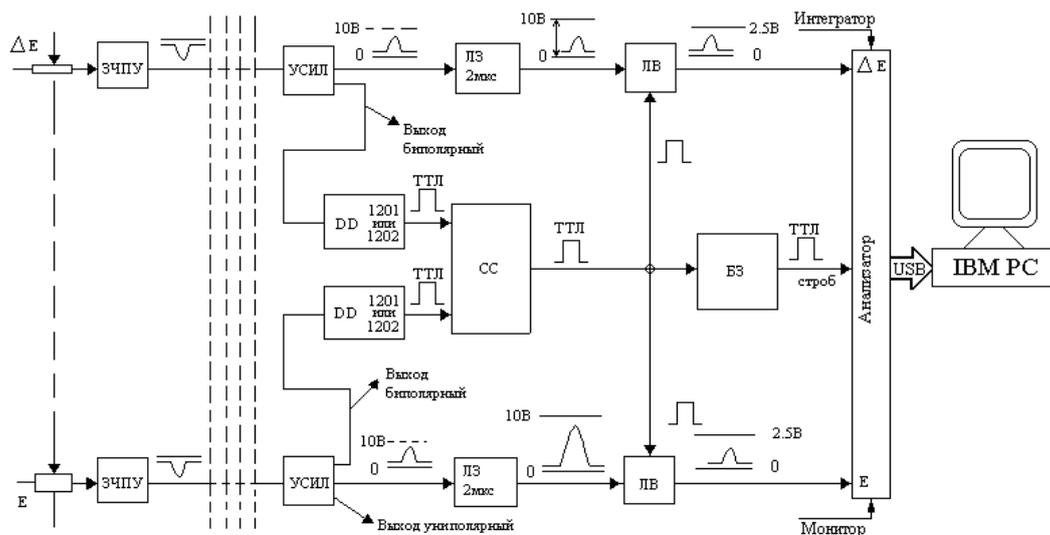
Следует отметить, что экспериментальная информация, связанная с измерением инклюзивных распределений легких заряженных частиц, инициированных налетающими ионами ${}^3\text{He}$, гораздо более ограничена, чем для нуклонов и α -частиц [5, 6].

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Проведена работа по адаптации экспериментального комплекса применительно к получению инклюзивных спектров легких заряженных частиц, образующихся при взаимодействии ядер ${}^3\text{He}$ с энергией 50,5 МэВ с ядром ${}^{59}\text{Co}$. Выполнены измерения сечений ядерных реакций (${}^3\text{He},xd$), (${}^3\text{He},xt$) и (${}^3\text{He},x\alpha$) на ядре ${}^{59}\text{Co}$ на изохронном циклотроне У-150М Института ядерной физики [7, 8]. В качестве исследуемого ядра-мишени выбран ${}^{59}\text{Co}$ как кандидат на конструкционный элемент проектируемых ядерно-энергетических установок.

Идентификация продуктов реакций по массам и энергии проводилась на основе $(\Delta E - E)$ методики и осуществляется системой многомерного программируемого анализа с использованием спектрометрических линеек на основе электроники фирм ORTEC и POLON, блок-схема которой представлена на рисунке 1.

ДВАЖДЫ-ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ И ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СЕЧЕНИЯ РЕАКЦИЙ (${}^3\text{He},x\text{d}$), (${}^3\text{He},x\text{t}$) И (${}^3\text{He},x\alpha$) НА ЯДРЕ ${}^{59}\text{Co}$ ПРИ ЭНЕРГИИ ${}^3\text{He}$ 50,5 МэВ



ЗЧПУ – зарядово-чувствительный предусилитель, Усил – усилитель, ЛЗ – линия задержки, СС – схема совпадений, ЛВ – линейные ворота, БЗ – блок задержки.

Рисунок 1. Блок-схема системы регистрации и идентификации заряженных частиц

Сигналы от ΔE - и E -детекторов поступают по двум спектрометрическим трактам («E», « ΔE ») на двумерный анализатор, выполненный на микроконтроллерах и представляющий собой выносной блок, подключаемый к USB-порту персонального компьютера. Системная программа задает режимы работы анализатора и передачу данных в компьютер, в программу для графической визуализации данных и сохранения их в его файлах.

Выносной блок содержит также счетчик управляющих импульсов для оценки величины просчетов в набираемой двумерной матрице путем сопоставления их числа с интегральным количеством событий, зарегистрированных в поле матрицы, и два счетчика внешних событий (сигналов от интегратора тока пучка ускорителя и монитора мишени).

К измерениям изготовлена мишень ${}^{59}\text{Co}$ с толщиной $2,3 \text{ мг/см}^2$ (моноизотоп). Толщина мишени измерялась по потерям энергии α -частиц из тройного источника ${}^{241,243}\text{Am} + {}^{244}\text{Cm}$.

Основные кинематические характеристики эксперимента приведены в таблице 1. Для измерения однозарядных частиц использовали в качестве стопового детектор на основе сцинтиллятора CsI(Tl). В качестве пролетных детекторов применялись полупроводниковые кремниевые детекторы толщиной 100–200 мкм. При измерении в выходном канале α -частиц толщины тонких ΔE -детекторов составили 25–50 мкм. Стоповым детектором служил толстый кремниевый детектор толщиной 1 мм.

Энергетическая калибровка проводилась по пикам в исследуемых спектрах, отвечающих известным состояниям конечных ядер. Дважды дифференциальные сечения в лабораторной системе координат находились из соотношения:

$$\frac{d^2\sigma}{d\varepsilon_n d\Omega_n} = \frac{A_t z_x e I_n \cos \phi_t}{\rho_t p N_0 \Delta\Omega_n \Delta Q}, \quad (1)$$

где A_t – масса ядра мишени в а.е.м.; $z_x e$ – заряд налетающей частицы в микрокулонах; I – число отсчетов в канале n ; ϕ_t – угол между рамкой мишени и пучком; ρ_t – толщина мишени (мг/см); p – обогащение мишени (относительные единицы); $N_0 = 6,02217 \times 10^{20} \text{ (мг}\cdot\text{моль)}^{-1}$ число атомов в одном миллиграмм-моле вещества; $e = 1,602192 \times 10^{-13} \text{ мкКл}$; $\Delta\Omega_n$ – телесный угол, стягиваемый коллиматором телескопа детекторов (ср); ΔE_n – ширина канала с номером n в МэВ; ΔQ – заряд, прошедший через мишень на интегратор тока за время экспозиции (мкКл).

Таблица 1. Основные кинематические характеристики эксперимента

Ядро-мишень	Реакция	Диапазон энергии вылетающих частиц, МэВ
${}^{59}\text{Co}$	${}^3\text{He},x\text{d}$	5,2 – 37,9
	${}^3\text{He},x\text{t}$	5,1 – 32,8
	${}^3\text{He},x\alpha$	9,8 – 43,8

Пересчет дважды дифференциальных сечений из лабораторной в систему центра масс осуществляли по формуле:

$$\frac{d^2\sigma}{d\varepsilon d\Omega} = \frac{p}{p_l} \frac{d^2\sigma}{d\varepsilon_n d\Omega_n}, \quad (2)$$

где p_l и p – импульс регистрируемой частицы, соответственно в лабораторной и системе центра масс.

После обработки экспериментальных спектров рассчитаны дважды-дифференциальные сечения реакции (${}^3\text{He},x\text{d}$), (${}^3\text{He},x\text{t}$) и (${}^3\text{He},x\alpha$) на ядре ${}^{59}\text{Co}$, представленные на рисунках 2–4.

Для получения интегрального спектра $d\sigma/dE$ с абсолютной ошибкой $\Delta d\sigma/dE$ и полного парциального сечения σ с ошибкой $\Delta\sigma$ выполнен пересчет дважды-дифференциальных сечений в с.д.м. к равномерной шкале по энергии.

Тогда интегрирование по телесному углу Ω вследствие азимутальной симметрии можно записать в виде:

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = 2\pi \int_0^x \sin\theta \frac{d^2\sigma}{d\varepsilon d\Omega} d\theta. \quad (3)$$

Пусть $\frac{d^2\sigma}{d\varepsilon_i d\Omega_i} \equiv Y_i$ – дважды дифференциальное

сечение в с.д.м., соответствующее j – му значению энергии и i – му значению угла, $j=I \div M$, $i=I \div N$, здесь: M – число узлов на равномерной сетке, N – число углов, для которых были получены значения величины Y_i .

Интегрирование выражения (3) методом трапеций можно записать в виде:

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \pi \sum_0^N (Y_i \sin\theta_i + Y_{i+1} \sin\theta_{i+1}) (\theta_{i+1} - \theta_i), \quad (4)$$

где $\theta_0=0$, $\theta_{N+1}=\pi$.

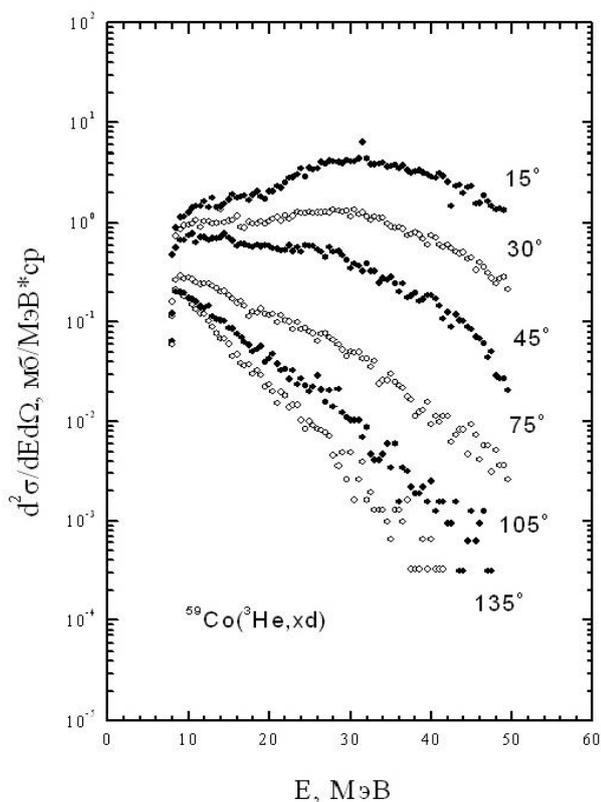


Рисунок 2. Дважды дифференциальные сечения реакции (${}^3\text{He},x\text{d}$) при $E_{({}^3\text{He})} = 50,5$ МэВ на ядре ${}^{59}\text{Co}$

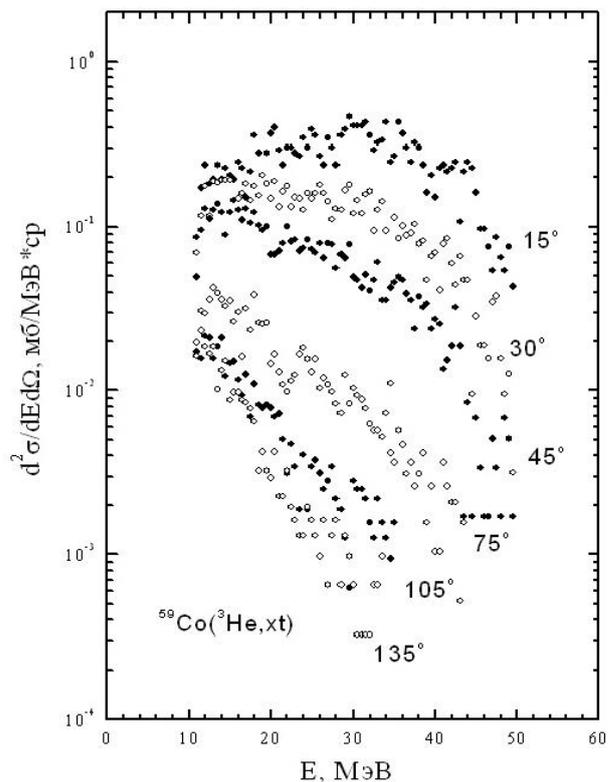


Рисунок 3. Дважды дифференциальные сечения реакции (${}^3\text{He},x\text{t}$) при $E_{({}^3\text{He})} = 50,5$ МэВ на ядре ${}^{59}\text{Co}$

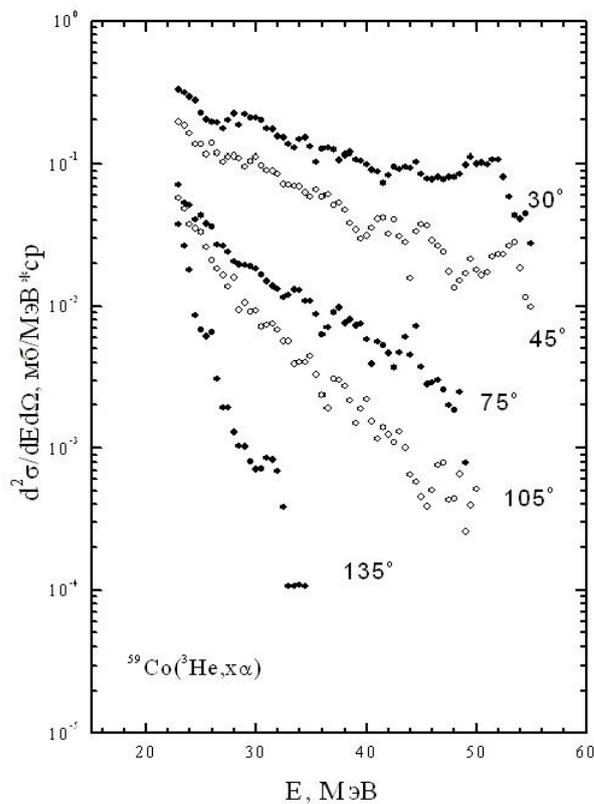


Рисунок 4. Дважды дифференциальные сечения реакции (${}^3\text{He},x\alpha$) при $E_{({}^3\text{He})} = 50,5$ МэВ на ядре ${}^{59}\text{Co}$

Ошибка интегрального спектра находится следующим образом:

$$\Delta(d\sigma/d\varepsilon) = \left[\sum_1^n F_i^2 (\Delta Y_i)^2 \right]^{1/2}, \quad (5)$$

где $F_i \equiv \frac{d(d\sigma/d\varepsilon)}{dY_i}$.

Пусть $G_i \equiv \frac{d\sigma}{d\varepsilon_j}$, $j = 1 \div M$. Тогда полное сечение:

$$\sigma = \frac{1}{2} \sum_1^{m-1} (G_i + G_{i+1}) (\varepsilon_{j-1} - \varepsilon_j). \quad (6)$$

Интегрирование по энергии так же проводилось методом трапеций. Ошибка в определении полного сечения $\Delta\sigma$ равна:

$$\Delta\sigma = \left[\sum_1^m (R_i \Delta G_i)^2 \right]^{1/2}, \quad (7)$$

где $R_i = \frac{d\sigma}{dG_i}$, $i = 1 \div M$.

Экспериментальные данные по дважды-дифференциальным сечениям реакций (${}^3\text{He},xd$), (${}^3\text{He},xt$) и (${}^3\text{He},x\alpha$) на ядре ${}^{59}\text{Co}$ при энергии налетающих частиц 50,5 МэВ были проинтегрированы в измеренном угловом диапазоне. Полученные интегральные сечения, усредненные в диапазоне энергий 0,5 МэВ, представлены на рисунке 5. Величины парциальных сечений соответствующих реакций представлены в таблице 2.

Полная систематическая ошибка сечений реакции не превышала 10% и обусловлена, главным образом, погрешностями в определении толщины мишени (<7%) и телесного угла спектрометра (1,3%). Энергия пучка ускоренных частиц измерялась с точностью 1%. Статистическая ошибка не превышала 8%.

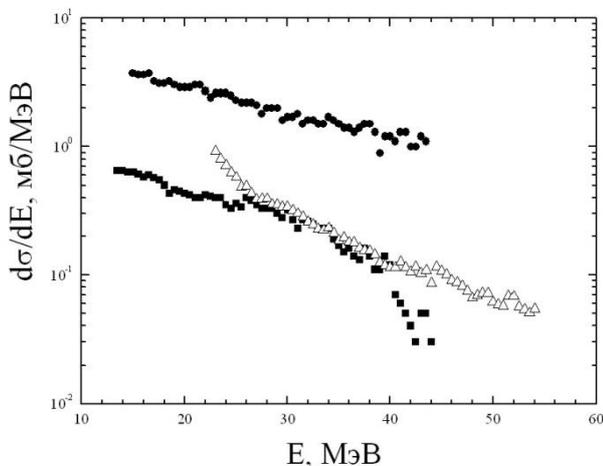


Рисунок 5. Интегральные сечения реакции (${}^3\text{He},xd$) – кружки, (${}^3\text{He},xt$) – квадраты и (${}^3\text{He},x\alpha$) – треугольники на ядре ${}^{59}\text{Co}$ при $E_{(3\text{He})} = 50,5$ МэВ

Таблица 2. Экспериментальные парциальные сечения реакций (${}^3\text{He},xd$), (${}^3\text{He},xt$) и (${}^3\text{He},x\alpha$) на ядре ${}^{59}\text{Co}$ при $E_{3\text{He}} = 50,5$ МэВ

Реакция	Энергетический диапазон, МэВ	Сечение, мбн
${}^{59}\text{Co}({}^3\text{He},xd)$	9,5 – 46,0	$54,2 \pm 0,2$
${}^{59}\text{Co}({}^3\text{He},xt)$	13,5 – 45,0	$5,9 \pm 0,1$
${}^{59}\text{Co}({}^3\text{He},x\alpha)$	23,0 – 53,0	$6,72 \pm 0,03$

Теоретический анализ экспериментальных результатов выполнен в рамках модифицированной версии экситонной модели (ЭМ) предравновесного распада ядер [6, 9, 10]. В рамках этой модели принимается, что ядро имеет набор эквидистантных одночастичных состояний. Взаимодействие, в результате которого ядро переходит из одного состояния в другое, считается двухчастичным и достаточно слабым, что позволяет применить теорию возмущений при вычислении вероятностей переходов. Энергия системы сохраняется. В двухкомпонентной модели протонные и нейтронные степени свободы учитываются раздельно.

Состояние ядра характеризуется четырьмя параметрами p_π , h_π , p_ν и h_ν , где p и h обозначают частичные и дырочные, а π и ν протонные и нейтронные степени свободы, соответственно. Компаунд ядро формируется с частично-дырочной конфигурацией, которая учитывает налетающие нуклоны как частичные степени свободы и не учитывает дырочные степени свободы. Такая конфигурация обозначается как $(p_\pi, h_\pi, p_\nu, h_\nu) = (Z_w, 0, N_w, 0)$, где a относится к бомбардирующей частице.

Предполагается, что разность между числом частиц и дырок в процессе перехода в равновесное состояние остается постоянной и для компаунд ядра $p_\pi - h_\pi = Z_a$, $p_\nu - h_\nu = N_a$ и $p - h = A_a$, где A_a – массовое число налетающей частицы. Это условие не всегда выполняется, особенно при приближении к состоянию равновесия, но вполне адекватно для вычисления предравновесной компоненты спектра.

В двухкомпонентной ЭМ используются два набора одночастичных состояний, отдельно для протонов и нейтронов. Они определяются плотностью одночастичных состояний $g_{\pi 0}$ и $g_{\nu 0}$, соответственно. Принимается, что они пропорциональны Z и N рассматриваемого ядра:

$$g_{\pi 0} = \frac{Z}{K_g}, \quad (8)$$

$$g_{\nu 0} = \frac{N}{K_g}. \quad (9)$$

Плотность частично-дырочных возбужденных состояний ядра бралась согласно Вильямсу [11]:

$$\omega_{ESM}(p, p_\pi, E) = \frac{(g_{\pi 0})^{n_\pi} (g_{\nu 0})^{n_\nu} (E - A(p, p_\pi, E))^{n-1}}{p_\pi! h_\pi! p_\nu! h_\nu! (n-1)!}, \quad (10)$$

где $A(p, p_\pi, E)$ поправка, определяемая принципом Паули.

Среднеквадратичные матричные элементы также зависят от типа взаимодействующих частиц. Необходимо рассматривать три величины, $|M_{\pi\pi}|^2$, $|M_{\nu\nu}|^2$ и $|M_{\pi\nu}|^2 = |M_{\nu\pi}|^2$, где π и ν протонные и нейтронные степени свободы соответственно. Предполагается, что каждый из этих матричных элементов имеет одинаковую форму и отличаются только нормализующими коэффициентами K_{ij} :

$$|M_{ij}|^2 = K_{ij} A_a g_0^{-3} \left(\frac{E}{3A_a} + 20.9 \right)^{-3}, \quad (11)$$

где A_a масса налетающей частицы, значение K_{ij} имеет размерность МэВ². Эта параметризация хорошо работает до энергий бомбардирующих частиц ниже 90 МэВ.

Во всех расчетах по модели Гриффина в качестве исходной бралась $(p_\pi, h_\pi, p_\nu, h_\nu) = (2, 0, 1, 0)$ частично-дырочная конфигурация. Нормировочный коэффициент K_g принимался равным 15 МэВ. При параметризации квадрата матричных элементов использовались значения нормировочных констант: $K_{\pi\pi}$: $K_{\nu\nu}$: $K_{\pi\nu} = 2200:900:900 \text{ МэВ}^2$.

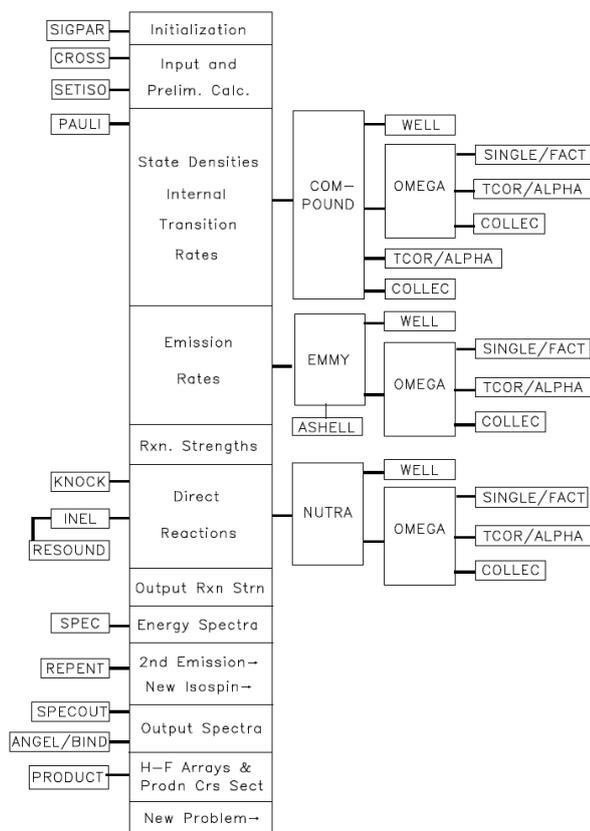


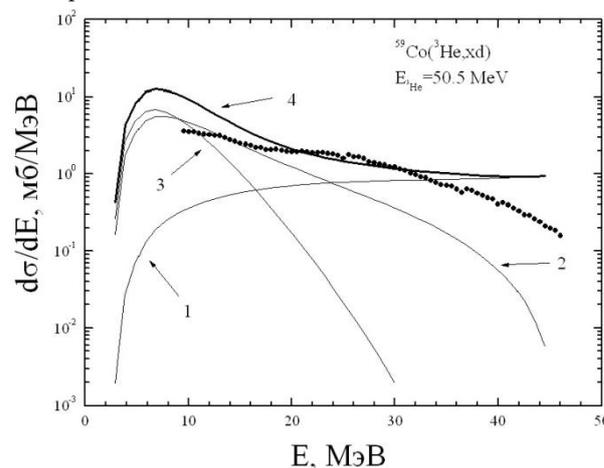
Рисунок 6. Схематическая диаграмма программы PRECO-2006

Для полного описания эмиссии частиц в ядерных реакциях, в дополнение к вычислениям в рамках ЭМ, были проведены расчеты в рамках других механизмов. При вычислении равновесного сечения использовались расчеты на основе формализма распада составного ядра Вайскопфа. Определены вклады прямых процессов (передача – выбивание нуклонов, неупругое рассеяние).

При анализе экспериментальных данных исследуемых реакций использовалась написанная на языке Фортран программа PRECO-2006 [12], схематичная диаграмма которой представлена на рисунке 6.

На рисунках 7–9 совместно с экспериментальными результатами представлены рассчитанные вклады механизмов, формирующих инклюзивные сечения реакций $(^3\text{He},\text{xd})$, $(^3\text{He},\text{xt})$ и $(^3\text{He},\alpha)$ на ядре ^{59}Co при энергии налетающих частиц 50,5 МэВ. В целом, удовлетворительное качество описания получено только для вторичных дейтронов. В реакциях с вылетом трионов и α -частиц наблюдается превышение теоретических кривых над экспериментальными данными, обусловленных, в основном, завышенным значением роли одноступенчатых прямых процессов. Это может быть связано с не совсем корректной параметризацией, вшитой в программу расчета.

Из сравнения экспериментальных и теоретических рассчитанных интегральных спектров следует, что низкоэнергетическая часть спектра дейтронов в реакции $(^3\text{He},\text{xd})$ формируется через механизм составного ядра и предравновесный механизм (рисунок 7). С ростом энергии вылетающих дейтронов вклад равновесной компоненты быстро падает и большую роль начинают играть прямые процессы, вклад которых, начиная с энергии 30 МэВ, становится определяющим.

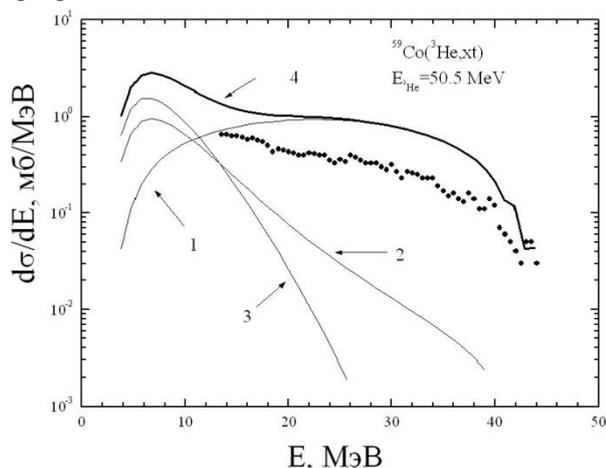


Символы – эксперимент, 1 – одноступенчатые процессы, 2 – предравновесная компонента, 3 – равновесная эмиссия, 4 – суммарное интегральное сечение

Рисунок 7. Сравнение экспериментальных интегральных сечений реакций $^{59}\text{Co}(^3\text{He},\text{xd})$ с расчетами в рамках экситонной модели

ДВАЖДЫ-ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ И ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СЕЧЕНИЯ РЕАКЦИЙ (${}^3\text{He},xd$), (${}^3\text{He},xt$) И (${}^3\text{He},x\alpha$) НА ЯДРЕ ${}^{59}\text{Co}$ ПРИ ЭНЕРГИИ ${}^3\text{He}$ 50,5 МэВ

Совершенно другая картина наблюдается при рассмотрении механизмов, определяющих сечение реакции с вылетом вторичных тритонов (рисунок 8). Здесь ключевую роль, за исключением области низких энергий, играют одноступенчатые прямые механизмы. Низкоэнергетическая часть спектра тритонов формируется двумя конкурирующими процессами – предравновесным и составным.

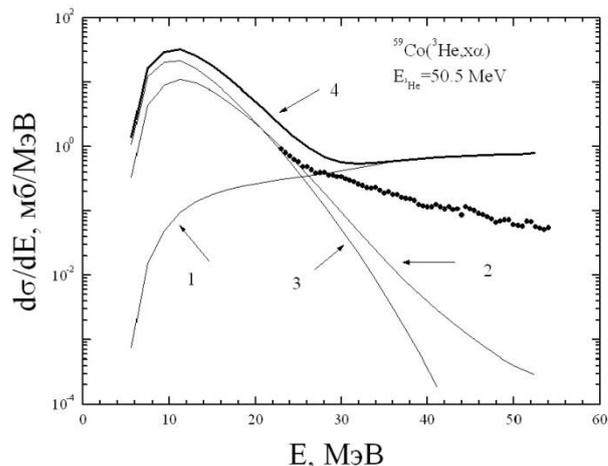


Символы – эксперимент, 1 – одноступенчатые процессы, 2 – предравновесная компонента, 3 – равновесная эмиссия, 4 – суммарное интегральное сечение.

Рисунок 8. Сравнение экспериментальных интегральных сечений реакций ${}^{59}\text{Co}({}^3\text{He},xt)$ с расчетами в рамках экситонной модели

При рассмотрении процессов, участвующих в построении интегрального сечения реакций (${}^3\text{He},x\alpha$), представленного на рисунке 9, следует, что образование α -частиц с энергией меньше 25 МэВ идет аналогично, как и в случае дейтронов, через равновесный и предравновесный механизм. Начиная с энергии 25 МэВ преобладающим становится вылет

α -частиц в результате одноступенчатых прямых механизмов.



Символы – эксперимент, 1 – одноступенчатые процессы, 2 – предравновесная компонента, 3 – равновесная эмиссия, 4 – суммарное интегральное сечение.

Рисунок 9. Сравнение экспериментальных интегральных сечений реакций ${}^{59}\text{Co}({}^3\text{He},x\alpha)$ с расчетами в рамках экситонной модели

В таблице 3 приведены численные значения вкладов различных механизмов ядерных реакций в построении интегральных спектров (${}^3\text{He},xd$), (${}^3\text{He},xt$) и (${}^3\text{He},x\alpha$) на ядре ${}^{59}\text{Co}$. Для сравнения в таблице 4 даны результаты исследования аналогичных реакций (${}^3\text{He},xd$), (${}^3\text{He},xt$) и (${}^3\text{He},x\alpha$), проведенного в рамках настоящего гранта для ядра ${}^{27}\text{Al}$ [13]. Определено, что характер формирования идентичных интегральных спектров на ядре ${}^{59}\text{Co}$ происходит на подобии с ядром ${}^{27}\text{Al}$ и отклонения связаны, в основном, с кинематическими пределами указанных реакций.

Таблица 3. Вклады различных механизмов ядерных реакций в формирование интегральных спектров (${}^3\text{He},xd$), (${}^3\text{He},xt$) и (${}^3\text{He},x\alpha$) на ядре ${}^{59}\text{Co}$ при $E_{3\text{He}} = 50,5$ МэВ

Реакция	Энергетический диапазон, МэВ	Механизмы ядерных реакций			
		прямой, мбн	предравновесный, мбн	равновесный, мбн	сумма, мбн
(${}^3\text{He},xd$)	4 – 49	30,7 (20,6%)	66,3 (44,5%)	52,0 (31%)	149,0 (100%)
(${}^3\text{He},xt$)	4 – 44	25,5 (55,8%)	8,6 (18,8%)	11,6 (25,4%)	45,7 (100%)
(${}^3\text{He},x\alpha$)	6 – 54	22,0 (6,9%)	108,0 (33,6%)	191,0 (59,5%)	321,0 (100%)

Таблица 4. Вклады различных механизмов ядерных реакций в формирование интегральных спектров (${}^3\text{He},xd$), (${}^3\text{He},xt$) и (${}^3\text{He},x\alpha$) на ядре ${}^{27}\text{Al}$ при $E_{3\text{He}} = 50,5$ МэВ

Реакция	Энергетический диапазон, МэВ	Механизмы ядерных реакций			
		прямой, мбн	предравновесный, мбн	равновесный, мбн	сумма, мбн
(${}^3\text{He},xd$)	2 – 43	25,3 (9%)	170 (60%)	88,4 (31%)	283,7 (100%)
(${}^3\text{He},xt$)	2 – 36	14,3 (44,5%)	10,9 (34%)	6,9 (21,5%)	32,1 (100%)
(${}^3\text{He},x\alpha$)	3 – 40	12,1 (9,7%)	47,8 (38,5%)	64,4 (51,8%)	124,3 (100%)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены экспериментальные дважды-дифференциальные и интегральные спектры реакций (${}^3\text{He},\text{xd}$), (${}^3\text{He},\text{xt}$) и (${}^3\text{He},\alpha$) в широком диапазоне энергий и углов, инициированных ионами ${}^3\text{He}$ с энергией 50,5 МэВ на ядре ${}^{59}\text{Co}$. Определены экспериментальные парциальные сечения исследованных реакций.

Выполнены теоретические расчеты экспериментальных инклюзивных спектров реакции (${}^3\text{He},\text{xd}$), (${}^3\text{He},\text{xt}$) и (${}^3\text{He},\alpha$) на ядре ${}^{59}\text{Co}$ на основе модифицированной двухкомпонентной экситонной модели предравновесного распада ядер. Установлено, что низкоэнергетическая часть спектра дейтронов в реакции (${}^3\text{He},\text{xd}$) формируется через механизм составного ядра и предравновесный механизм. С ростом энергии вылетающих дейтронов вклад равновесной компоненты быстро падает и большую роль начинают играть одноступенчатые прямые процессы, вклад

которых, начиная с энергии 30 МэВ, становится определяющим. В реакциях с вылетом вторичных тритонов ключевую роль, за исключением области низких энергий, играют одноступенчатые прямые механизмы. Низкоэнергетическая часть спектра тритонов формируется двумя конкурирующими процессами – предравновесным и составным. При рассмотрении процессов, участвующих в построении интегрального сечения реакций (${}^3\text{He},\alpha$) следует, что образование α -частиц с энергией меньше 25 МэВ идет аналогично, как и в случае дейтронов, через равновесный и предравновесный механизм. Начиная с энергии 25 МэВ преобладающим становится вылет α -частиц в результате одноступенчатых прямых механизмов.

Работа выполнена при поддержке программы Грантового финансирования научных исследований МОН РК, грант 0606/ГФ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Герасимов А.С., Киселев Г.В. Научно-технические проблемы создания электроядерных установок для трансмутации долгоживущих радиоактивных отходов и одновременного производства энергии (российский опыт) // ЭЧАЯ. – 2001. – Вып.1 (32). – С.143-188.
2. Blann M. Pre-equilibrium decay // Ann. Rev. Nucl. Sci. – 1975. – Vol.25. – P.123-166.
3. Gadioli E., Hodgson P.E. Pre-equilibrium Nuclear Reactions – New York: Oxford Univ. Press, 1992. – 328 p.
4. Зайдель К., Зелигер Д., Райф. Предравновесный распад в ядерных реакциях // ЭЧАЯ. – 1976. – Т.7, Вып.2. – С.499-552.
5. Hodgson P.E., Betac E. Cluster emission, transfer and capture in nuclear reactions // Phys. Rep. – 2003. – Vol. 374. – P.1-89.
6. Kalbach C. Pre-equilibrium reactions with complex particle channels // Phys. Rev. – 2005. – Vol. C71. – P.034606-1 – 034606-23.
7. Арзуманов А.А., Неменов Л.М., Анисимов О.И. и др. Изохронный циклотрон с регулируемой энергией ионов // Изв. АН КазССР, сер. физ.-мат. – 1973. – № 4. – С.6-15.
8. Дуйсебаев А.Д., Иванов Г.Н., Рыбин С.Н. Камера рассеяния для исследования продуктов ядерных реакций на пучке циклотрона // Изв.АН КазССР, сер. физ.-мат. – 1983. – № 2. – С.80-81.
9. Griffin J. J. Statistical model of intermediate structure // Phys. Rev. Lett. – 1966. – Vol.17, № 9. – P.478-481.
10. Kalbach C. Two-component exciton model: Basic formalism away from shell closures // Phys. Rev. – 1986. – Vol. C33. – P.818-833.
11. Williams F. C. Particle-hole state density in the uniform spacing model // Nucl. Phys. – 1971. – Vol.A166. – P.231-240.
12. Kalbach C. PRECO-2006: Exciton model preequilibrium nuclear reaction code with direct reaction. – Durham NC 27708-0308, 2007. – 184 p.
13. Дуйсебаев А., Дуйсебаев Б.А., Жолдыбаева Т.К., Садыков Б.М. Инклюзивные сечения реакций (${}^3\text{He},\text{xd}$), (${}^3\text{He},\text{xt}$) и (${}^3\text{He},\alpha$) на ядре ${}^{27}\text{Al}$ при энергии ${}^3\text{He}$ 50,5 МэВ // Вестник НЯЦ РК. – 2013. – Вып. 1. – С. 18-23.

**^3He ЭНЕРГИЯСЫ 50,5 МэВ КЕЗІНДЕ ^{59}Co ЯДРОСЫНДАҒЫ $(^3\text{He},\text{xd})$, $(^3\text{He},\text{xt})$ ЖӘНЕ $(^3\text{He},\alpha)$
РЕАКЦИЯЛАРДЫҢ ҚОС-ДИФФЕРЕНЦИАЛДЫҚ ЖӘНЕ ИНТЕГРАЛДЫҚ ҚИМАЛАРЫ**

¹⁾ Дүйсебаев А., ¹⁾ Дүйсебаев Б.А., ¹⁾ Жолдыбаев Т. К., ¹⁾ Садықов Б.М., ²⁾ Исмаилов К.М., ³⁾ Мереке А.

¹⁾ *Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан*

²⁾ *Назарбаев Университеті, Астана, Қазақстан*

³⁾ *ал-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан*

Жұмыс ядролық-энергетикалық қондырғыларда жобаланатын құралымдық элементтердің ядролар-кандидаттарында ^3He иондарымен ынталандырылған реакциялардың инклюзивті қималарын зерттеу циклінің жалғасы болып табылады.

Энергиясы 50,5 МэВ ^3He иондарының ^{59}Co ядросымен әрекеттесуі кезінде пайда болған $(^3\text{He},\text{xd})$, $(^3\text{He},\text{xt})$ және $(^3\text{He},\alpha)$ реакцияларының қос-дифференциалдық қималары алынды. Бұрыш бойынша интегралдаудан кейін көрсетілген реакциялардың интегралдық және парциалдық қималары анықталды. Ядролар ыдырауының экситондық моделі негізінде эксперименттік нәтижелерді талдау, қоздырылған жүйенің тепе-теңдік күйге ауысуын суреттейтін PRECO-2006 есептеу коды шеңберінде атқарылды. Тепе-теңдік алдымен бірге, құрамдық және тікелей механизмдердің интегралдық қималарының түзілуін қалыптастырудағы үлесі де есептелінді. Ядролық физиканың іргелі сұрақтары үшін де, әртүрлі қолданбалы салалар үшін де қойылған мәселені шешудің үлкен маңызы бар, мысалы, ұзақ ғұмырлы радиоактивті қалдықтардың ядролық трансмутациясы.

**THE DOUBLE-DIFFERENTIAL AND INTEGRAL CROSS SECTIONS OF REACTIONS
 $(^3\text{He},\text{xd})$, $(^3\text{He},\text{xt})$ AND $(^3\text{He},\alpha)$ ON ^{59}Co NUCLEUS AT 50,5 MeV ENERGY OF ^3He**

¹⁾ A. Duisebaev, ¹⁾ B.A. Duisebaev, ¹⁾ T.K. Zholdybayev, ¹⁾ B.M. Sadykov, ²⁾ K.M. Ismailov, ³⁾ A. Mereke

¹⁾ *Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan*

²⁾ *Nazarbayev University, Astana, Kazakhstan*

³⁾ *al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan*

Work is continuation of a cycle of researches of inclusive cross sections of reactions initiated by ions ^3He on nuclei – candidates of constructional elements of projected nuclear power plants. Double-differential cross sections of reactions $(^3\text{He},\text{xd})$, $(^3\text{He},\text{xt})$ and $(^3\text{He},\alpha)$ formed by the interaction of ions ^3He with energy of 50,5 MeV with a nucleus ^{59}Co are received. After integration on angles the integrated and partial cross sections of the specified reactions are determined. The analysis of experimental results is carried out on the basis of exciton model of nucleus decay within the frame of PRECO-2006 code describing the transition of excited system to an equilibrium state. Together with preequilibrium, deposits to formation of integrated sections of compound and direct mechanisms are calculated. The solution of an objective is of great importance, both for fundamental questions of nuclear physics, and for various applied areas, for example, a nuclear transmutation of long-living radioactive waste.

УДК 620.196.19

**ПИТТИНГОВАЯ КОРРОЗИЯ ХОЛОДНОДЕФОРМИРОВАННОЙ
НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ 12X18H10T****Яровчук А.В., Максимкин О.П., Цай К.В., Рубан С.В.***Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан*

Приведены результаты исследований склонности к питтинговой коррозии аустенизированной нержавеющей стали 12X18H10T после деформации статическим растяжением при комнатной и пониженной (-20 и -60°C) температурах. Установлено, что сопротивление локальной коррозии холоднодеформированной нержавеющей стали зависит от степени деформации и температуры, которые определяют структурно-фазовое состояние материала. Показано, что при малых степенях деформации формируется квазиоднородная дислокационная субструктура ячеистого типа, которая оказывает стабилизирующее влияние на состояние стали, в результате чего сопротивление коррозии повышается. Большие степени пластической деформации (более 30%) наряду с процессами образования высокофрагментированной неоднородной структуры инициируют в стали 12X18H10T фазовое превращение $\gamma \rightarrow \alpha'$ с образованием α' -мартенсита, что отрицательно сказывается на коррозионной стойкости материала.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что холодная пластическая деформация аустенитных нержавеющих сталей инициирует фазовое мартенситное $\gamma \rightarrow \alpha'$ превращение и способна существенно изменить коррозионную стойкость материала. Согласно данным, приведенным в работе [1] в результате деформации растяжением со степенью $5 \div 46\%$ чувствительность нержавеющих сталей AISI 301 LN и 316 L к локальной питтинговой коррозии растет, что обусловлено появлением деформационного мартенсита. При этом сталь, содержащая в составе азот (AISI 301 LN), проявляет большую склонность к питтинговой коррозии по сравнению со сталью без добавки. Исследователями [2] установлено, что чувствительность к коррозионному растрескиванию стали AISI 316 после предварительной холодной прокатки при увеличении степени обжатия ($5 \div 15\%$) возрастает, в то время, как после статического растяжения снижается. В [3] представлены результаты повышения в $5 \div 10$ раз стойкости к коррозионному растрескиванию сталей 06X18AГ15 и X18H10T после пластической деформации. В то же время в [4] установлено, что холодная деформация снижает склонность к межкристаллитной коррозии хромоникелевой стали типа 18-8. Авторы работы [5], изучая чувствительность к коррозии в растворах хлорного железа ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) сталей 301 LN и 316 (AISI), установили, что с увеличением степени деформации стали 301 LN коррозионная стойкость снижается, что сопровождается ростом количества индуцированного деформацией мартенсита ($\sim 32\%$). В более стабильной нержавеющей стали 316 при тех же условиях деформации количество индуцированного мартенсита не превышало 2% и сопротивление коррозионному растрескиванию оставалось практически неизменным. Снижение сопротивления коррозии стали AISI 301 с увеличением степени прокатки (обжатие $27 \div 60\%$) и ростом объемной доли α' -мартенсита обнаружено в работе [6]. Авторы обращают

внимание на множественность факторов, влияющих на проявление локальной коррозии, и невозможность разделения вклада фазового превращения в изменение сопротивления коррозии от вклада структурных изменений, сопутствующих деформации, таких, как, кристаллографическая текстура, плотность дислокаций, различный уровень внутренних напряжений, размер кристаллитов. Тем не менее, имеются работы, в которых указывается на непосредственную связь увеличения скорости локальной коррозии с количественным содержанием индуцированного деформацией мартенсита [7-9].

Таким образом, из приведенных данных видно, что в научной литературе нет единого мнения о влиянии холодной деформации на склонность к локальной коррозии нержавеющих сталей и, в частности, индуцированного деформацией мартенсита. Это определяет актуальность постановки подобного рода исследований.

Данная работа посвящена изучению влияния склонности к одному из локальных видов коррозии – питтинговой, в аустенизированной и холоднодеформированной нержавеющей стали 12X18H10T.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Исследовали образцы конструкционной нержавеющей стали 12X18H10T в следующих состояниях: аустенизированном (отжиг при 1050°C 30 минут с последующей закалкой в холодную воду) и деформированном после аустенизации. Образцы имели форму плоских пластин размерами $10,0 \times 5,0 \times 0,3$ мм, кроме этого испытывали образцы цилиндрической формы размерами рабочей части $\varnothing 2 \times 20$ мм. Деформацию образцов осуществляли методом статического растяжения на разрывной машине «ИНСТРОН-1195» с постоянной скоростью деформирования ($0,5$ мм/мин) при температурах испытания 20 , -20 и -60°C .

До и после деформации проводили измерения содержания ферромагнитной α' -фазы с помощью

ферритометра «Forster» и методом рентгеноструктурного анализа на универсальном дифрактометрическом комплексе D8 ADVANCE (Bruker AXS GmbH) с использованием CoK_α -излучения. Угловая скорость сканирования составляла 0.034 град/с (2 град/мин), скорость вращения образца ~60 об/мин, что позволяло получать наиболее полную картину отражающих плоскостей содержащихся фаз. Абсолютная точность определения угла составляла $(\theta \text{ и } 2\theta) \leq \pm 0.005^\circ$. Индексирование рефлексов дифрактограмм производили с помощью опции «Peak Search». Для расшифровки полученных данных использовали лицензионную базу данных JCPDS/ICDD 2001 PDF-2.

Исследования коррозионной стойкости стальных образцов выполняли в соответствии со стандартом ASTM G-48-03 (метод А). Для изучения кинетики развития питтинговой коррозии использовали химический метод с переменным погружением плоских и цилиндрических образцов на 2 часа в 5-и или 10%-й водный раствор $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. После каждого цикла погружения образцы тщательно промывали дистиллированной водой, сушили и производили измерения массы. Взвешивание образцов осуществляли на электронных аналитических весах KERN-700 с погрешностью измерения 0,001 г. Стойкость к коррозии оценивали по удельной характеристике потерь массы с единицы поверхности образцов (г/м^2), а также по максимальной глубине питтинга (h , мкм) [ГОСТ 9. 912-89 (СТ СЭВ 6446-88)].

Химический анализ состава локальных участков стальных образцов выполняли на сканирующем растровом электронном микроскопе «AMRAY-1200В», оснащенный энергодисперсионным микроанализатором «КВАНТУМ-4000». Металлографические исследования проводили на микроскопах «МеФ-2» и «Неорфот», используя увеличение от 50 до 500 крат.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На рисунке 1 приведены результаты коррозионных испытаний образцов стали 12Х18Н10Т после аустенизации и последующего растяжения до различной степени деформации. Видно, что наименьшим сопротивлением коррозии обладали недеформиро-

ванные образцы, потери массы с единицы поверхности ($\Delta m/s$) которых при времени коррозии 559 часов максимальны. Деформация растяжением первоначально способствует повышению сопротивления питтинговой коррозии. Кривая потерь массы снижается с увеличением степени формоизменения вплоть до $\epsilon = 30\%$. Однако, как видно из представленной зависимости, на кривой отчетливо проявляется перелом при степени деформации (~30–40%), после чего ($\Delta m/s$) начинает расти.

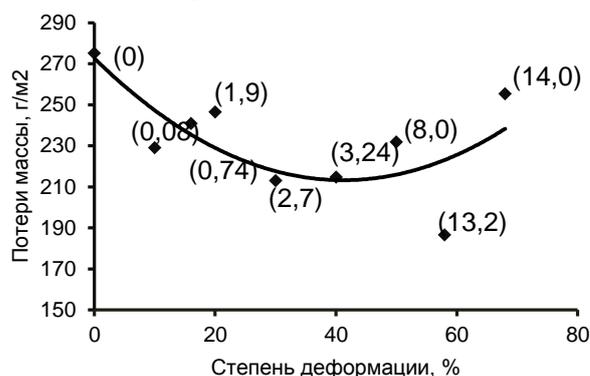


Рисунок 1. Зависимость потерь массы ($\Delta m/s$) плоских образцов нержавеющей стали 12Х18Н10Т, деформированных растяжением при 20°C до различных степеней при времени коррозии 559 часов в 10%-м растворе FeCl_3 (в скобках объемное содержание деформационного мартенсита, %)

Проведенные с помощью феррозонда измерения намагниченности позволили установить, что холодная пластическая деформация аустенизированных образцов стали 12Х18Н10Т вызвала появление магнитных свойств в наиболее деформированных участках, при этом содержание магнитной фазы (μ_f) увеличивалось с ростом степени формоизменения. Возле экспериментальных точек в скобках приведены значения максимального объемного содержания мартенситной фазы (μ_f , %) в шейке образца после растяжения. Фазовый рентгеноструктурный анализ деформированных растяжением при комнатной температуре образцов установил наличие в них α' -мартенситной составляющей (рисунок 2).

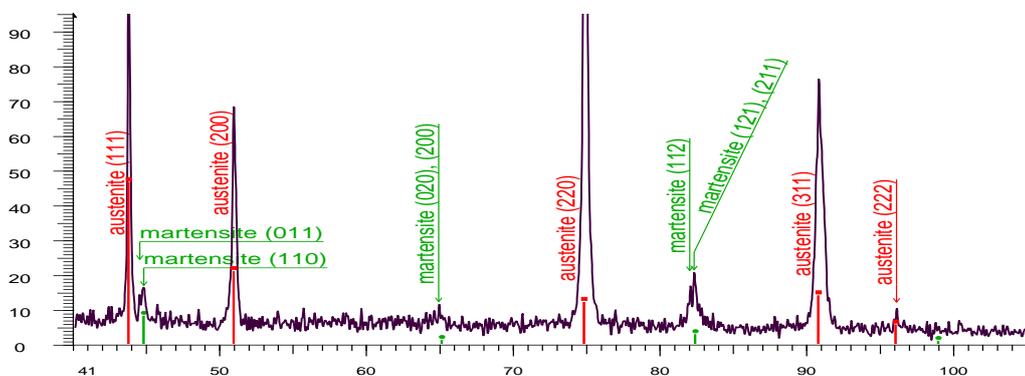


Рисунок 2. Дифрактограмма образца аустенитной стали 12Х18Н10Т после деформации растяжением при 20°C до степени 60%

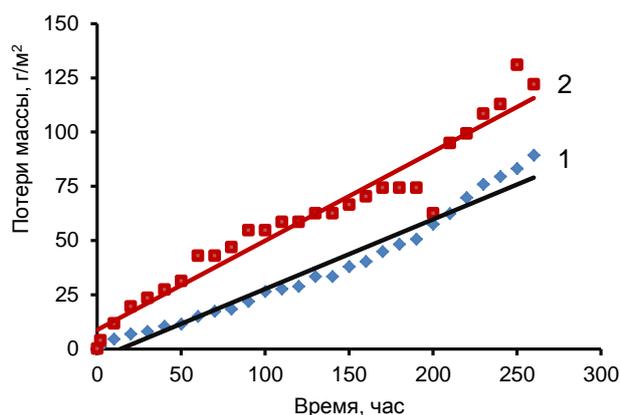


Рисунок 3а. Временная зависимость потерь массы недеформированного (1) и деформированного растяжением ($\epsilon=38\%$) при 20°C (2) цилиндрического образца стали 12Х18Н10Т в 5% растворе FeCl_3

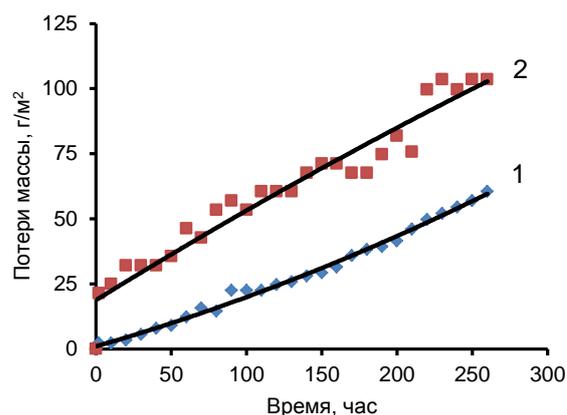


Рисунок 3б. Временная зависимость потерь массы недеформированного (1) и деформированного растяжением ($\epsilon=47\%$) при -60°C (2) цилиндрического образца стали 12Х18Н10Т в 5% растворе FeCl_3

Измерения объемного содержания α' -фазы показали, что ее количество в различных участках деформированного образца неодинаково. Максимальное содержание фазы наблюдалось в зоне локального формоизменения, т.е. в шейке, где степень деформации максимальна. Отмечается повышение потерь массы с увеличением количества индуцированной деформацией мартенсита (рисунок 1).

На рисунке 3 представлены временные зависимости потерь массы ($\Delta m/s$) цилиндрических образцов, недеформированных и деформированных растяжением при 20°C и -60°C . Магнитометрические измерения деформированных образцов показали, что после растяжения при 20°C объемное содержание магнитной фазы (μ_f) не превысило $\sim 0,3\%$, при этом полная деформация составляла $\sim 38\%$, в случае растяжения при отрицательной температуре (-60°C) количество μ_f в образце достигло $\sim 9,9\%$ при полной деформации $\sim 47\%$. Из анализа обоих графиков видно, что кривые ($\Delta m/s$) деформированных образцов расположены выше, чем недеформированных. При одном и том же времени коррозии (250 часов) потери массы деформированного при комнатной температуре образца оказались на 25% больше, чем недеформированного (рисунок 3а). Потери массы образца после растяжения при отрицательной температуре (-60°C), почти на $\sim 50\%$ выше, чем недеформированного (рисунок 3б).

Как оказалось, такое повышенное различие в скорости коррозии деформированного при -60°C образца вполне согласуется с более высоким содержанием в нем μ_f (9,9%). Проведенные измерения максимальной глубины (h) питтингов (время коррозии 250 часов) позволили установить, что для образцов после растяжения при комнатной температуре, h составила ~ 930 мкм, и это значение оказалось в 1,5 раза больше, чем h , установленное за это же время коррозии для недеформированных образцов. Максимальная глубина питтинга у образца, деформирован-

ного при -60°C составила ~ 1875 мкм и почти в три раза превысила h образца недеформированного. Таким образом, полученные результаты показывают, что появление в образцах нержавеющей стали 12Х18Н10Т деформационного мартенсита оказывает отрицательное влияние на сопротивление питтинговой коррозии.

Ранее авторами [10] было установлено, что после отжига в области $425\div 450^{\circ}\text{C}$ в деформированной при отрицательной температуре нержавеющей аустенитной стали 12Х18Н10Т количество мартенсита увеличивается. Нами проведены исследования сопротивления питтинговой коррозии стальных образцов, подвергнутых отжигу при 425°C после низкотемпературного растяжения. На рисунке 4 приведены результаты коррозионных испытаний в 5% растворе FeCl_3 цилиндрических образцов, отожженных при 425°C после растяжения при 20°C (кривая 1) и -60°C (кривая 2). Оказалось, что в образце, после растяжения при -60°C , количество μ_f возросло до $\sim 11\%$, в образце, деформированном при комнатной температуре, μ_f составило $\sim 4\%$.

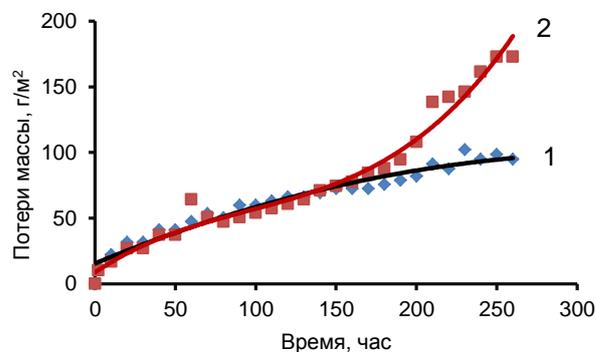


Рисунок 4. Временная зависимость потерь массы образцов аустенитной стали 12Х18Н10Т после растяжения при 20°C (1) и -60°C (2), отожженных при 425°C 30 минут

Из представленного графика видно, что первоначально до 150 часов коррозии кривые практически совпадают, но после 150 часов воздействия агрессивного раствора наблюдается значительное расхождение значений $\Delta m/s$. Образец, содержащий повышенное количество мартенсита, показал более высокую скорость коррозии. Прирост $\Delta m/s$ деформированного и отожженного при 425°C образца составил более 30% по сравнению с не отожженным образцом.

Для выяснения роли структурных составляющих в изменении коррозионных свойств нержавеющей стали проведены металлографические исследования. На рисунке 5а, б, в, представлены снимки структуры образцов стали 12Х18Н10Т в состоянии аустенизированном и после деформации при 20°C и при -60°C. Структура стали в аустенизированном недеформированном состоянии представляет собой совокупность полиэдрических зерен, средний размер которых составляет порядка ~ 25 мкм (рисунок 5а). В структуре стального образца после растяжения при 20°C обнаруживается присутствие небольшого количества двойников отжига и полос скольжения (рисунок 5б). Вероятно, наличие деформационных дефектов определяет повышение сопротивления коррозии стальных образцов при малых степенях деформации растяжением. Заметное увеличение коррозионной стойкости стали установлено нами вплоть до деформации ~30÷40% (рисунок 1). Включения упорчяющей фазы в деформированном мате-

риале достаточно мелкие, границы зерен тоньше, чем в аустенизированной недеформированной стали. Можно сказать, что деформированные до определенной степени образцы по структуре более близки к гомогенному материалу, что и объясняет повышенную стойкость к питтинговой коррозии. Ряд исследователей [11, 12] полагают, что повышение сопротивления питтинговой коррозии нержавеющей стали после деформации обусловлено именно появлением многочисленных деформационных дефектов и высокой фрагментированностью структуры, которые затрудняют диффузию к границам зерен углерода, и, что особенно важно, атомов хрома, который обеспечивает повышенную коррозионную стойкость. Это, в целом, стабилизирует структурное состояние материала и обеспечивает высокое сопротивление коррозии. На неоднозначное влияние малых и больших степеней деформации на локальную коррозию нержавеющей сталей указывалось в работе [11], при этом причину различия авторы связывают с особенностями деформационной структуры, шириной деформационных полос и конфигурацией дислокаций. На рисунке 5 в приведена структура образца, деформированного растяжением при отрицательной температуре, из которого видно, что деформация при -60°C изменила строение аустенитных зерен, форму и протяженность их границ (рисунок 5в). Структура характеризуется высокой степенью полигонизации и неоднородности, причем, границы кристаллитов заметно утолщены.

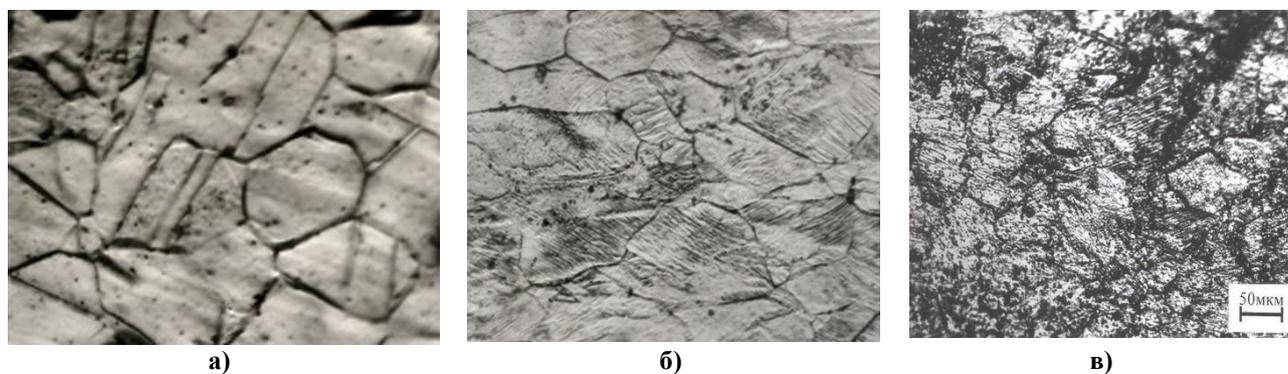


Рисунок 5. Микроструктура нержавеющей стали 12Х18Н10Т в аустенизированном состоянии (а), после деформации растяжением при 20°C до $\epsilon \approx 47\%$ (б), и при -60°C до $\epsilon \approx 48\%$ (в)

Для выявления особенностей тонкой структуры образца проведены электронномикроскопические исследования. На рисунках 6 и 7 представлены ПЭМ-снимки деформированных растяжением при 20°C на различную степень образцов. Обращает на себя внимание тот факт, что тонкое строение образца деформированного на степень до ~30% характеризуется дислокационной субструктурой ячеистого типа, имеются множественные протяженные дефекты упаковки, параллельные направлению, близкому к $\bar{4}22$ (рисунок 6а, б). ПЭМ исследования показали, что в деформированном до невысоких степеней

формоизменения материале имеются участки с квазиоднородной дислокационной субструктурой, размеры дислокационных ячеек находятся в пределах 60÷400 нм. Средняя плотность дислокаций составляет $7 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$. В случае деформации растяжением до ~58% структура более неоднородна, выявлено присутствие ϵ - и α' -мартенсита, присутствие которых создает в материале фазовую гетерогенность (рисунок 7 а, б).

Изучение элементного состава поверхности стального образца после коррозии показало, что наблюдаются значительные изменения состава мате-

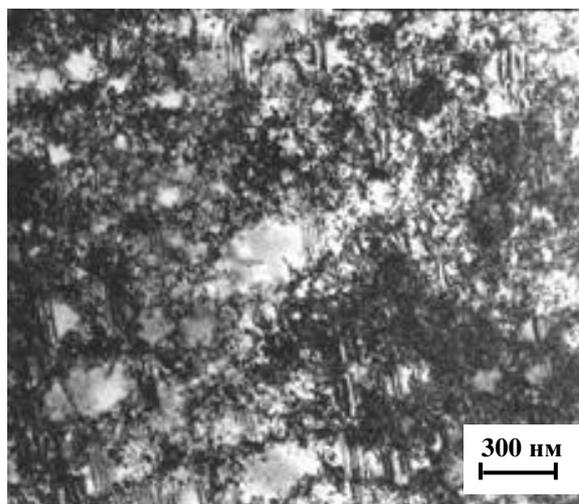
риала в различных участках. Установлено, что внутри питтингов количество титана возросло почти на 80% по сравнению с содержанием этого элемента в матричной основе; изменился состав по хрому, произошло увеличение его количества в отдельных зонах с 18% до 27%. Это согласуется с представлением о том, что коррозионные процессы, протекающие в материале, сопровождаются изменениями химического состава отдельных поверхностных зон [1, 5, 9].

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

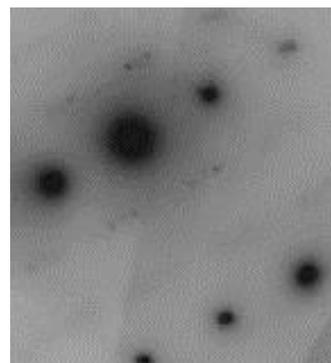
Проведенные исследования сопротивления питтинговой коррозии холоднодеформированной нержавеющей аустенитной стали 12Х18Н10Т позволили установить, что во многих случаях степень деформации оказывает решающее влияние на коррозионные свойства стали. При холодной деформации стали 12Х18Н10Т до степени, не превышающей 30%, наблюдается увеличение плотности дислокаций, формируется квазиоднородная субструктура ячеистого типа, которая вызывает повышение со-

противления локальной коррозии. Аналогичные данные были получены авторами [13] на стали 30ХМА после обработки по специальной технологии, позволяющей формировать ячеисто-полигональную субструктуру. Авторы полагают, что наличие устойчивой субструктуры, упорядоченной на микро- и нано- масштабном уровне, позволяет достигать определенной электрохимической гомогенизации поверхности, в результате которой наблюдается повышение сопротивления коррозии материала.

Повышение степени холодной деформации ($\geq 30\%$) вызывает не только трансформацию тонкой структуры аустенитной стали, но инициирует развитие фазового превращения $\gamma \rightarrow \alpha'$, в результате которого появляется новая составляющая – мартенсит (ОЦК решетка). Фазовая гетерогенность, независимо от способа ее возникновения, способствует снижению коррозионной стойкости материала. При этом, как было замечено, сопротивление питтинговой коррозии уменьшается с увеличением объемного содержания α' -мартенсита.



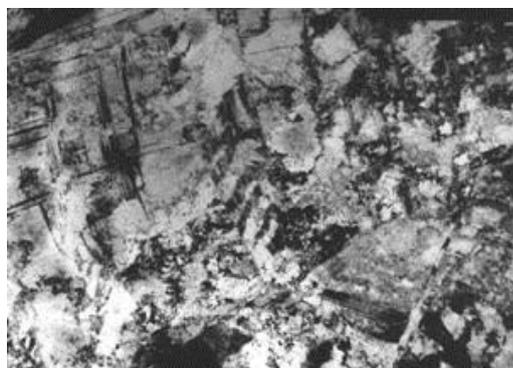
а)



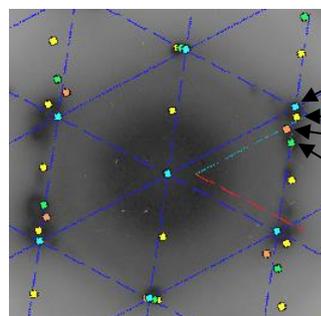
б)

Рисунок 6. Тонкая структура стали 12Х18Н10Т после растяжения ($\epsilon=30\%$) при 20°C (а).

Множественные протяженные дефекты упаковки, параллельные направлению, близкому к $\bar{4}22$ в кристалле (б)



а)



1 – γ ГЦК $[10\bar{1}]$

2 – ϵ ГПУ $[2\bar{1}\bar{1}0]$

3 – α' ОЦК $[11\bar{1}]$

4 – γ двойник, плоскость двойникования типа (111)

б)

Рисунок 7. ПЭМ снимок структуры стали 12Х18Н10Т после растяжения при 20°C ($\epsilon=58\%$).

Присутствуют фазы: γ -аустенит, α' -мартенсит деформации, ϵ -мартенсит (б)

Механизм коррозии в материалах, обладающих фазовой гетерогенностью, обусловлен, по мнению большинства исследователей, электрохимическими процессами, протекающими на границе разнородных фаз, в частности, аустенита и мартенсита. В работе [14] автор считает, что фазовая гетерогенность увеличивает свободную энергию металла, которая является причиной ускорения реакций, протекающих при коррозионном процессе. Высказано предположение о том, что в результате распада аустенита и образования мартенситной фазы в нержавеющей хромоникелевой стали типа 304 накапливаются внутренние напряжения, которые возникают за счет большего объема мартенситной фазы и способствуют процессу ускорения локальной коррозии. Образование α' -мартенсита при холодной прокатке, по мнению [6], повышает чувствительность стали к коррозионному растрескиванию в виду более высокой скорости диффундирования углерода и хрома в (bcc) мартенсит, чем в (fcc) аустенит. Именно иницирование диффузионных процессов основных легирующих элементов и в результате обеднение матрицы аустенитостабилизирующими элементами являются основными причинами ускорения деградации свойств стали, содержащей мартенсит.

Полученные нами данные свидетельствуют о неоднозначном влиянии холодной деформации на питтинговую коррозию аустенитной стали. Аустенитная нержавеющая сталь типа 18-10 проявляет структурную и фазовую нестабильность при деформации. Наряду с процессами фрагментированности структуры, которая проявляется при малых степенях деформации и вызывает повышение сопротивления питтинговой коррозии, при больших деформациях аустенитной нержавеющей стали развивается фазовая неоднородность в виде появления индуцированной деформацией магнитной α' -фазы, которая сни-

жает коррозионную стойкость материала. Разброс данных и их неоднозначность, скорее всего, можно объяснить проявлением конкурирующих процессов, в число которых входит гомогенизация структурного состояния материала за счет появления в нем повышенного количества деформационных дефектов, результатом которого является повышение коррозионной стойкости стали, и развитие фазового $\gamma \rightarrow \alpha'$ превращения, сопровождающегося появлением мартенсита, что вызывает снижение сопротивления питтинговой коррозии стали.

Таким образом, на основании проведенных исследований установлено следующее:

- Стойкость к питтинговой коррозии конструкционной нержавеющей стали 12X18H10T зависит от степени холодной деформации, которая определяет структурно-фазовое состояние материала.

- Малые степени деформации ($\epsilon < 30\%$) способствуют формированию в стали квазигомогенной дислокационной субструктуры ячеистого типа, в результате чего происходит стабилизация структурного состояния и повышение сопротивления локальной коррозии.

- При достаточно больших степенях пластической деформации (более 30%) наряду с процессами образования высокофрагментированной структуры в стали 12X18H10T инициируется превращение $\gamma \rightarrow \alpha'$ с образованием мартенситной α' -фазы, что отрицательно сказывается на сопротивлении локальной коррозии.

- Конечный результат сопротивления питтинговой коррозии аустенитной стали 12X18H10T обусловлен проявлением конкурирующих процессов влияния степени полигонизации структурных составляющих и объемного содержания α' -мартенсита деформации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gomes de Abreu H.F., Carvalho Sh. S. Deformation Induced Martensite in an AISI 301LN Stainless Steel: Characterization and Influence on Pitting Corrosion Resistance // *Materials Reseach*. – 2007. – V. 10. – № 4. – P. 359-366.
2. Khatak H.S., Muraleedharan P., Gnanamoorthy J.B., Rodriguez P., Padmanabhan K.A. Evaluation of stress corrosion resistance of cold rolled AISI type 316 stainless using constant load and slow strain rate tests // *J.Nuclear Mater.* – 1989. – 168. – № 1-2. – P. 157-161.
3. Сотниченко А.Л. и др. Структура и свойства холоднодеформированных нержавеющих сталей. // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 1974. – № 7. – С. 6-10.
4. Hines J.G., Hoar T.P.J. Stress-corrosion cracking of austenitic stainless with applied E.M.F // *Applied. Chem.* – 1958. – V. 8. – 11. – P. 764-776.
5. Fukuya K., Shina S., Kayano H., Naruj M. Stress corrosion cracking and intergranular corrosion of neutron irradiated austenitic stainless steels // *IFRM. 5-th Int. Conf. Fusion react. Mater.* – Clearwater, Fla. – 1991. – Nov. 17-22. – P. 276.
6. Barbucci A., Dellucchi M., Sacco M., Cerisola G. Electrochemical and corrosion behaviour of cold rood AISI 301 in 1M H_2SO_4 // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2001. – V. 317-318. – P. 607-611.
7. Elayaperumal K., De P.K. and Balachandra J. Passivity of Type 304 Stainless Steel– Effect of Plastic Deformation // *Corrosion-Nace*. – 1972. – V. 28. – № 7. – July. – P. 269-273.
8. Rondelli G., Mazza B., Pastore T., Vicentini B. Study on the intergranular corrosion of cold worked austenitic stainless steels // *Electrochemical Methods in Corrosion Research*-Edited by M. Materials Science Forum. – 1986. – V. 8. – P. 593-604.
9. Butler E.P., Burke M.G. Chromium depletion and martensite formation at grain boundaries in sensitized austenitic stainless steel // *Acta Metall.* – 1986. – V. 34. – № 3. – P. 557-570.
10. Максимкин О.П. Рубан С.В., Рыбин С.В. Аномальный эффект изменения магнитных и механических свойств облученной нейтронами нержавеющей стали 12X18H10T при отжиге 400 $^{\circ}C$ // *Вестник НЯЦ РК*. – 2011. – В. 3. – С. 98-101.

11. Kamachi U., Mudali P., Chankar S. Ningshen On the pitting corrosion resistance of nitrogen alloyed cold worked austenitic stainless steels // Corrosion Science. – 2002. – 44. – P. 2183-2198.
12. Salvago G., Fumagalli G., Sinigaglia D. The corrosion behavior of AISI 304L stainless steel in 0.1M HCl at room temperature – II. The effect of cold working //Corrosion Science. – 1983. – V. 23. – № 5. – P. 515-523.
13. Савченков Э.А., Айткулов Р.Р. Коррозионные свойства стали с ячеисто-полигональной субструктурой // Вестник ОГУ. – 2005. – № 9. – С.179-183.
14. Герасимов В.В. Коррозионное растрескивание аустенитных нержавеющей сталей /М.: Атомиздат. – 1960. – С. 77-93.

СУЫҚТАЙ ДЕФОРМАЦИЯЛАНҒАН ТОТЫҚПАЙТЫН 12X18H10T БОЛАТЫНЫҢ ПИТИНГЛІК КОРРОЗИЯСЫ

Яровчук А.В., Максимкин О.П., Цай К.В., Рубан С.В.

Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан

Бөлме және төмендетілген (-20 және -60°C) температураларда статикалық созу арқылы деформациядан кейінгі аустениттендірілген тотықпайтын 12X18H10T болатының питинглік коррозияға бейімділігінің зерттеу нәтижелері келтірілген. Суықтай деформацияланған тотықпайтын болаттың жергілікті коррозияға қарсыласуы жадығаттың құрылымдық-фазалық күйін айқындайтын температура мен деформация дәрежесіне тәуелді екендігі анықталды. Деформацияның кішкене дәрежелері кезінде болаттың күйіне тұрақтандырушы ықпал жасайтын ұяшық тектес квазиртекті дислокациялық субқұрылымның туындауы нәтижесінде коррозияның қарсыласуы жоғарылайтыны көрсетілді. Пластикалық деформацияның үлкен дәрежелері (30%-дан аса) жоғары ферромагнитті біртексіз құрылым түзілу үрдісімен қатар 12X18H10T болатындағы жадығаттың коррозиялық беріктігіне теріс әсер етуші α' -мартенсит туындайтын $\gamma \rightarrow \alpha'$ фазалық түрленуіне басшылық етеді.

PITTING CORROSION IN COLD-DEFORMED 12Cr18Ni10Ti STAINLESS STEEL

A.V. Yarovchuk, O.P. Maksimkin, K.V. Tsai, S.V. Ruban

Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan

The results of studies on pitting corrosion of 12Cr18Ni10Ti stainless steel austenized after tensile testing at room and low (-20 and -60°C) temperatures are given. It has been established that local corrosion resistance of cold-deformed stainless steel depends on strain and temperature which determine structure-phase state of material. It is shown that at low degrees of deformation dislocation substructure formed of quasi-homogeneous honeycomb type which has a stabilizing effect on the state of the steel, resulting in increase of resistance to corrosion. Large degree of plastic deformation ($>30\%$) along with the formation processes of high fragmented inhomogeneous structure in 12Cr18Ni10Ti steel initiate phase transformation $\gamma \rightarrow \alpha'$ to form α' -martensite, which negatively affects the corrosion resistance of the material.

УДК 539.56:621.039:669.017

О ЛОКАЛИЗАЦИИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ В ОБЛУЧЕННОЙ АУСТЕНИТНОЙ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ 12Х18Н10Т

Максимкин О.П., Такиева А.М.

Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан

Методами механических испытаний и деформационной микрокалориметрии исследованы особенности локализованного пластического течения в необлученных и облученных нейтронами образцах нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Выявлены механизмы эволюции шейки, связанные с протеканием мартенситного $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения.

ВВЕДЕНИЕ

Надежность работы ядерно-энергетических установок существенным образом зависит от степени радиационной стойкости конструкционных реакторных материалов – нержавеющей сталей и сплавов. Одним из важнейших критериев пригодности материалов в качестве элементов конструкций атомных реакторов является их способность сохранять в рабочих условиях необходимый уровень механических свойств. Однако в результате облучения большими флюенсами нейтронов может значительно уменьшиться пластичность сплавов, что в отдельных случаях приводит к преждевременному хрупкому разрушению оболочек ТВЭлов. Интенсивное развитие повреждений в этих тонкостенных конструкциях сопровождается явлением сосредоточения пластической деформации и перерождения равномерной деформации в локализованную. Несмотря на многочисленные исследования, посвященные изучению процессов охрупчивания и разрушения конструкционных реакторных материалов под влиянием облучения, вопросы, связанные с установлением причин и закономерностей развития сосредоточенной деформации освещены недостаточно. Большинство научных работ ограничивается констатацией факта образования шеек в пробах, в то время как большой научный и практический интерес представляют систематизированные знания закономерностей и особенностей локализации деформации в облученных конструкционных материалах.

Несмотря на многочисленные исследования [1,2] картина физических процессов, протекающих в шейке деформируемого металлического образца, еще далека до глубокого понимания, тем более для облученных материалов. Так, в [1] сообщается об аномально низких напряжениях течения при развитии локализации, в то время как в [2] рассматривается вопрос о деформационном упрочнении и росте истинных напряжений течения. Экспериментальные данные свидетельствуют о возможности снижения в ряде случаев плотности дислокаций в развивающейся шейке [3]. Кроме того установлено, что в материале на стадии локализации деформации образуется значительное количество микротрещин, что ведет к снижению его плотности [4].

Многие исследователи полагают, что началу образования локализованного пластического течения соответствует условие возникновения неустойчивости пластической деформации (условие Консидера), которое для ГЦК-материалов можно записать как [5]:

$$\sigma_{\text{лок}} \leq \frac{d\sigma_{\mu}}{d\rho} \frac{d\rho}{d\varepsilon}, \quad (1)$$

где σ_{μ} – температурно-независимое напряжение; ρ – плотность дислокаций; ε – деформация.

Этот критерий возникновения пластической неустойчивости типа шейки имеет простой физический смысл: деформация становится неустойчивой, когда деформационное упрочнение перестает компенсировать рост напряжения вследствие уменьшения поперечного сечения одноосно растягиваемого образца. Многочисленными работами показано (см. например [6]), что для аустенитных нержавеющей сталей как в необлученном, так и в облученном нейтронами состояниях $\sigma_{\text{лок}} \approx 1000$ МПа. В некоторых работах утверждается, что истинное напряжение возникновения пластической неустойчивости $\sigma_{\text{лок}}$ является свойством самого материала и не зависит от облучения. В этом случае $\sigma_{\text{лок}}$ можно использовать в исследованиях по определению критерия истинного напряжения при разрушении материалов с целью оценки ресурса эксплуатации материалов.

В работе [7] приводится следующее выражение для напряжения начала образования шейки:

$$\sigma_{\text{лок}} = \left\{ \frac{(\alpha G b)^2}{3} \rho_0 + \frac{\sigma_{\mu}}{3} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

где b – вектор Бюргерса; G – модуль сдвига; ρ_0 – исходная плотность дислокаций; $\sigma_{\mu} = (\sigma_D^2 + \sigma_c^2 + \sigma_s^2 + \sigma_d^2 + \sigma_v^2 + \sigma_R^2)^{1/2}$; σ_D – вклад границ зерен; σ_c – твердорастворное упрочнение; σ_s – субструктурное упрочнение; σ_d – дислокационное упрочнение; σ_v – упрочнение вторыми фазами; σ_R – радиационное упрочнение.

В то же время можно предположить, что не напряжение $\sigma_{кр}$, а энергия искажений кристаллической решетки E_s (с которой связаны внутренние напряжения [8,9]) является некоторой константой и величина E_s не зависит от облучения или еще каких-либо внешних воздействий – это термодинамическая константа. Другими словами указанные выше изменения структуры и свойств металлов и сплавов в процессе локализации пластического течения могут быть связаны с изменением величины запасаемой (латентной) энергии E_s , носителями которой являются дефекты кристаллического строения [10]. В этой связи представляет значительный интерес экспериментальное изучение закономерностей накопления энергии деформируемым материалом, особенно, на стадии локализации деформации [11]. Наряду с тем, большую роль в локализации деформации метастабильных аустенитных сталей отводят фазовому $\gamma \rightarrow \alpha$ -переходу [12].

В настоящей работе приведены результаты изучения основных закономерностей локализации деформации и ее влияния на механические свойства аустенитной нержавеющей стали 12Х18Н10Т с учетом неоднородности развития пластического течения и с одновременным исследованием мартенситного $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения, протекающего в локально деформированных областях образца с целью установления возможных причин радиационного охрупчивания.

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТА

Плоские и цилиндрические образцы из стали 12Х18Н10Т после отжига (1320К, 30 мин) облучали в активной зоне реактора ВВР-К при $T \leq 80^\circ\text{C}$ до максимального флюенса нейтронов $2 \cdot 10^{20}$ н/см² нейтронов. Механические испытания необлученных и облученных нейтронами плоских образцов с размерами рабочей части $10 \times 3.5 \times 0.3$ мм проводили на установке, совмещающей прецизионный калориметр Кальве и микроразрывную машину [13]. При этом

образец в специальной микросборке помещали непосредственно в калориметрическую ячейку (в другой ячейке находился эталон) и деформировали со скоростью растяжения $8.3 \cdot 10^{-4}$ с⁻¹ при температуре 293К. В результате получали диаграмму растяжения "нагрузка F – удлинение Δl " и термограмму "интенсивность тепловыделения dQ/dt – время t", используя которые рассчитывали стандартные механические характеристики (пределы текучести $\sigma_{0.2}$ и прочности σ_b , равномерное и полное удлинение), а также энергетические параметры: работу деформации $A = \int F dl$, рассеянное тепло $Q = \int dQ/dt \cdot dt$, латентную энергию $E_s = A - Q$. В связи с инерционностью калориметра первичная термограмма была в некоторой степени искажена и для корректного определения значений Q, E_s , P применяли специально разработанную методику [14].

Наряду с этими экспериментами на универсальной испытательной машине Инстрон-1195 выполняли механические испытания «на растяжение» цилиндрических образцов диаметром 1,6 мм и длиной рабочей части 10 мм. Одновременно с удлинением образца регистрировали изменение содержания в нем ферромагнитной α -фазы и уменьшение его диаметра с помощью, соответственно, феррозонда, Ferster 1-053 и специально разработанного оптико-электронного экстензометра [15]. Результатом таких экспериментов являлись диаграммы растяжения «нагрузка – удлинение» и зависимости «количество ферромагнитной фазы (M_f) – деформация (δ)», «сужение (ψ) – истинная деформация ($\epsilon = \ln(1 + \delta)$)».

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 1 приведены инженерные диаграммы растяжения стальных цилиндрических образцов, а также кривые образования и накопления ферромагнитной мартенситной α' -фазы.

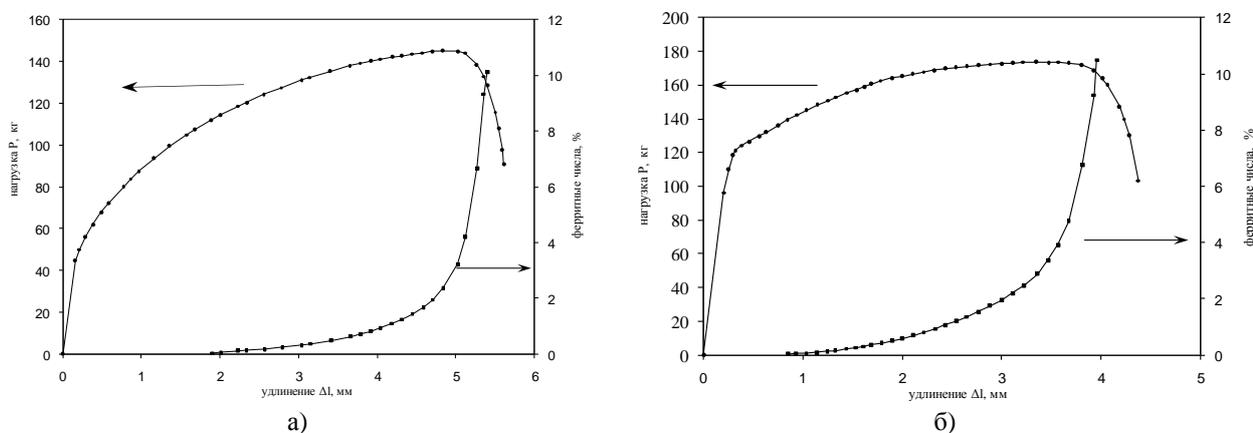
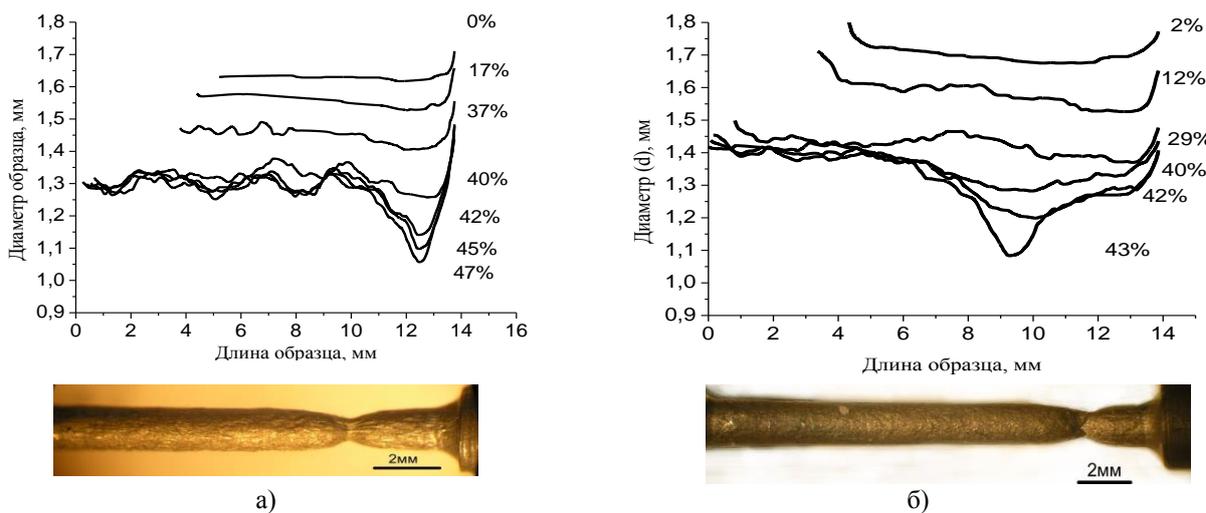


Рисунок 1. Диаграммы растяжения и накопления мартенситной α' -фазы для необлученного (а) и облученного нейтронами (б) $2 \cdot 10^{18}$ н/см² образцов стали 12Х18Н10Т ($v=0,5$ мм/мин, $T_{исп} = 20^\circ\text{C}$)



а – необлученная сталь, б – облученная нейтронами ($5 \cdot 10^{18} \text{ н/см}^2$), цифры у кривых – процент деформации (ϵ)

Рисунок 2. Экстензограммы изменения длины и диаметра рабочей части образцов стали 12Х18Н10Т в процессе растяжения

Таблица 1. Механические и энергетические характеристики аустенитной нержавеющей стали 12Х18Н10Т при $T=20^\circ\text{C}$, $v = 0,1 \text{ мм/мин}$ (плоские образцы)

Состояние стали	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_{в1}$, МПа	δ_p , %	δ , %	A, МДж/м ³	Q, МДж/м ³	E _s , МДж/м ³	V _{Loc} , мм ³	V _{Loc/V}
Необлученная	180	640	63	70	410	310	100	0,7	1:14
Облученная нейтронами, $5 \cdot 10^{18} \text{ н/см}^2$	440	700	49	60	405	330	75	1,2	1:8

На рисунке 2 представлены данные оптической экстензометрии необлученных и облученных нейтронами стальных образцов, характеризующие изменения диаметра цилиндрического образца по всей длине его рабочей части в процессе пластической деформации.

В таблице 1 приведены значения механических и энергетических характеристик плоских образцов нержавеющей стали в необлученном и облученном состояниях, найденные в результате проведения деформационно-калориметрических экспериментов.

С целью определения величины локализованного объема V_{Loc} сопоставляли геометрию образцов, деформированных только до предела прочности, с разрушенными при комнатной температуре образцами. Установлено, что объем V_{Loc} , участвующий в процессе локализации деформации, в среднем в 15-20 раз меньше исходного объема плоского образца V_0 . С учетом полученных значений V_{Loc} (см. табл.1) была рассчитана плотность величины латентной энергии, накапливаемой в развивающейся шейке – $E_{ш}$, которая для необлученной стали 12Х18Н10Т достигает значений 130-140 МДж/м³, тогда как в среднем по образцу $E_s=100 \text{ МДж/м}^3$. Для облученной нейтронами стали ($5 \cdot 10^{18} \text{ н/см}^2$) эти же значения оказались в среднем равны 100-110 и 70–75 МДж/м³, соответственно. При этом у облученного материала доля объема образца, участвующего в развитии локализованной деформации (V_{Loc}), выше, чем у необлученного.

В случае испытаний цилиндрических стальных образцов экспериментальные данные о деформационном изменении диаметра были использованы для определения значений коэффициента локализации деформации, который характеризует степень отклонения от равномерного течения образцов при их деформировании [1]:

$$K_n = \frac{D_0^2}{d_i^2 (1 + \delta)} \quad (3),$$

где δ – относительное удлинение, D_0 и d_i – начальный и текущий диаметры. Полученные результаты для необлученных и облученных нейтронами цилиндрических образцов приведены на рисунке 3, из которого видно, что K_n для всех степеней деформации для облученных образцов выше, чем для необлученных. При этом истинные напряжения, соответствующие точке перелома и резкому росту коэффициента локализации деформации на графике его деформационной зависимости, очевидно связанные с образованием шейки оказались следующими (см. табл. 2).

Таблица 2. Критические значения деформаций и напряжений образования шейки

Состояние	$\epsilon_{лок}$, %	$\psi_{лок}$, %	$\sigma_{лок}$, МПа
Необлученный	39	35	~1000
$2 \cdot 10^{20} \text{ н/см}^2$	30	29	~1000

На основании анализа полученных экспериментальных результатов (см. рис. 3) можно предположить, что в общем случае при статическом растяжении зависимость коэффициента локализации от деформации будет определяться двучленом: $K_{л} = 1 + A\psi^n$, в котором коэффициенты A и n могут принимать различные значения в зависимости от природы металлов и сплавов, их термической, механической или радиационной обработки.

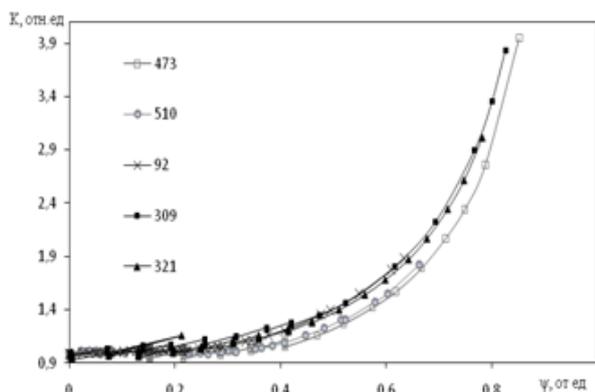


Рисунок 3. Деформационные зависимости коэффициента локализации для необлученных (№473, 510) и облученных нейтронами флюенсами $5 \cdot 10^{18}$ н/см² (№309, 321) и $2 \cdot 10^{20}$ (№92) образцов стали 12Х18Н10Т

Анализ полученных экспериментальных результатов показал, что это действительно так (см. табл. 3), причем, поскольку относительные значения $\psi < 1$, то величина $K_{л}$, характеризующая степень сосредоточения пластической деформации в образце, для необлученной стали меньше, чем для облученной. При этом резкое увеличение $K_{л}$ (начало образования стационарной шейки) наблюдается при значениях ψ

$= 40 \div 50\%$ в зависимости от степени облучения (табл. 3).

Таблица 3. Параметры аналитического описания деформационной зависимости коэффициента локализации необлученных и облученных нейтронами цилиндрических образцов стали 12Х18Н10Т

№ образца	Флюенс, н/см ²	Формула	A	n	ψ , (область определения $K_{л}$), отн.ед.
473	0	$K_{л}=1+6,4\psi^{4,9}$	6,4	4,9	0,41-0,85
106	0	$K_{л}=1+2,66\psi^{2,7}$	2,7	2,7	0,25-0,47
107	0	$K_{л}=1+90\psi^{5,8}$	12	5,8	0,29-0,40
510	0	$K_{л}=1+4,5\psi^{4,53}$	4,5	4,5	0,41-0,62
309	$5 \cdot 10^{18}$	$K_{л}=1+6\psi^{3,6}$	6	3,6	0,42-0,83
321	$5 \cdot 10^{18}$	$K_{л}=1+4,5\psi^{3,5}$	4,5	3,5	0,42-0,78
332	$5 \cdot 10^{18}$	$K_{л}=1+4,95\psi^{3,9}$	5	3,9	0,32-0,48
92	$2 \cdot 10^{20}$	$K_{л}=1+4\psi^{3,4}$	4	3,4	0,31-0,63

На рисунке 4 приведены кривые деформационного упрочнения в координатах “ $\sigma_{ист} - \epsilon$ ”, а также графики зависимости сужения от продольной деформации для необлученной и облученной стали.

Полагая, что развитие шейки происходит, в основном на стадии III, характеризующейся максимальным углом наклона графика к оси ϵ , можно найти координаты ($\psi_{лок}$, $\epsilon_{лок}$) точки перегиба между стадией II и стадией III.

Откладывая найденные таким образом значения критических степеней деформаций $\epsilon_{лок}$, на графиках $\sigma_{ист} - \epsilon$ находим значения истинных напряжений, соответствующих началу образования шейки ($\sigma_{лок}$). Оказалось, что для двух, рассмотренных выше состояний стали (необлученной и $2 \cdot 10^{20}$ н/см²) это напряжение одиноково и составляет ~ 1000 МПа.

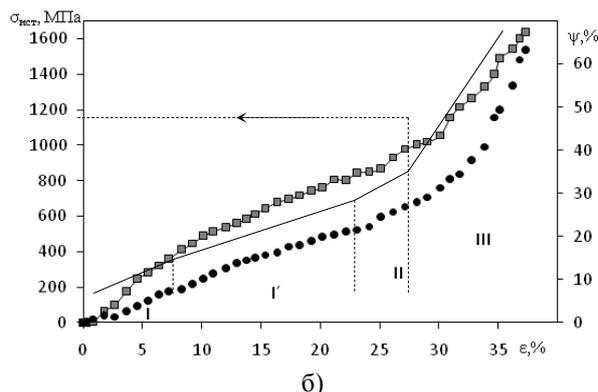
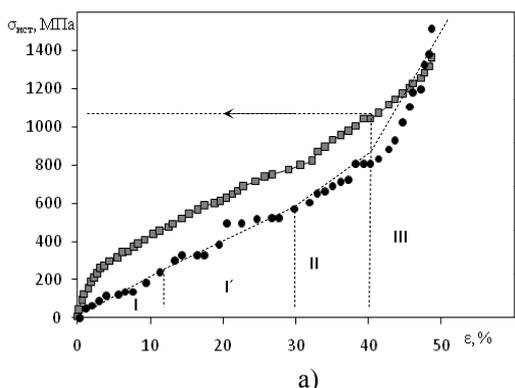


Рисунок 4. Изменения истинного напряжения и сужения в шейке образцов необлученной (а) и облученной нейтронами $2 \cdot 10^{20}$ н/см² (б) стали 12Х18Н10Т с ростом степени деформации. II, III – стадии развития шейки

Наряду с $K_{л}$ развитие локализации деформации, согласно [1], целесообразно характеризовать также величиной локально-деформированного объема, который определяет долю исходного рабочего объема образца (V_0), участвующего в локальном течении:

$$V_{лок} = \frac{V_0}{K_{л}} - 0,785 \cdot d_i^2 l_p \quad (4),$$

где d_i – текущий минимальный диаметр; l_p – длина равномерно деформированного участка образца.

На рисунке 5 приведены деформационные зависимости локально-деформированных объемов для стальных образцов в необлученном и облученном нейтронами состояниях.

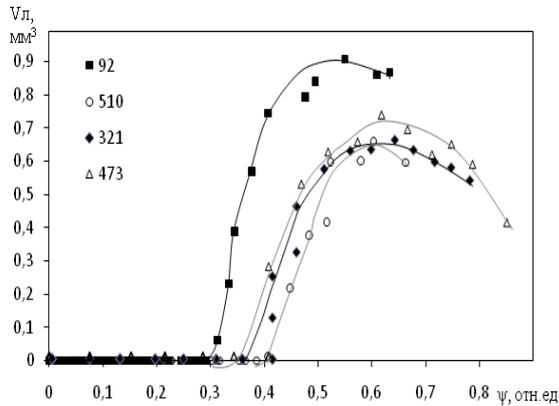


Рисунок 5. Деформационные зависимости локально-деформированного объема для необлученных (№ 510, 473) (1) и облученных нейтронами флюенсом $5 \cdot 10^{18}$ н/см² (№ 321) и $2 \cdot 10^{20}$ н/см² (№ 92) (2) образцов стали 12Х18Н10Т

Из рисунка 5 видно, что при одинаковых степенях поперечной деформации локально-деформированный объем резче выражен в образце, облученном нейтронами до флюенса $2 \cdot 10^{20}$ н/см². Во-вторых, видно, что величина $V_{лок}$ с ростом сужения сначала возрастает, достигает максимума и уменьшается к концу растяжения. Для количественной оценки размеров зоны локализованной пластической деформации в настоящей работе применяли методику магнитного картографирования, сканируя феррозондом по рабочей длине деформированного образца.

РАЗВИТИЕ ШЕЙКИ ПРИ ДЕФОРМАЦИИ ОБРАЗЦА МЕТАСТАБИЛЬНОЙ СТАЛИ

Анализ экстензограмм, экспериментально регистрируемых на заключительной стадии растяжения образцов, позволил получить данные об изменениях величин поперечных $\Delta h/h = f(\epsilon)$ и продольных $\Delta l/l = f(\epsilon)$ деформаций (см. рис. 6), а также величин интенсивности мартенситного превращения $I = M_f/\psi$ (см. рис. 7) для каждого значения, соответственно, поперечной (ψ) или продольной (ϵ) деформации.

Установлено, что кривые продольного и поперечного изменения размеров шейки на начальной стадии ее эволюции могут находиться или в противофазе, или возрастают и уменьшаются одновременно. Так, в необлученной стали шейка попеременно развивается то вглубь, то вширь (причем вглубь более интенсивно, чем вширь). Графики $\Delta l/l = f(\epsilon)$ и $\Delta h/h = f(\epsilon)$ находятся в противофазе при деформациях $0,3 < \epsilon < 0,4$ и в фазе при $0,4 < \epsilon < 0,47$ (см. рис. 6б). Изменение вширь, по видимому, связано с упрочнением перемычки шейки из-за $\gamma \rightarrow \alpha$ -перехода вследствие чего слева и справа к ней начинают примыкать дополнительные объемы образца. Этому случаю соответствует наличие на диаграмме растяжения плато. Изменение вглубь – это когда зона локализации не успевает упрочняться из-за недостаточного для этого количества индуцированной деформацией α' -фазы и внутри нее зарождаются и развиваются деформационные процессы. В этом случае на инженерной диаграмме растяжения наблюдается монотонное снижение нагрузки.

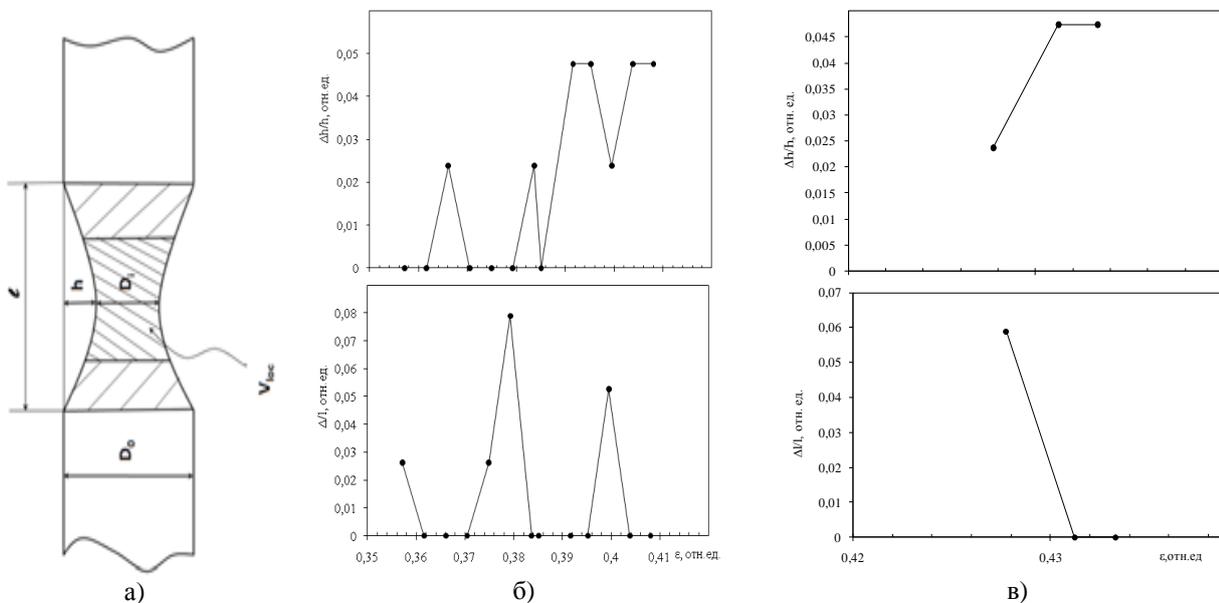
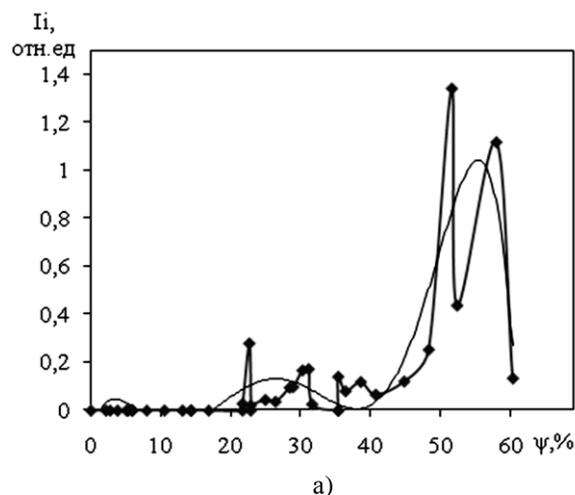


Рисунок 6. (а) Шейка (схема) и деформационные изменения шейки по оси поперечных и по оси продольных деформаций в процессе статического растяжения необлученного (б) и облученного нейтронами $5 \cdot 10^{18}$ н/см² (в) образца нержавеющей стали 12Х18Н10Т

В стальном образце, облученном нейтронами ($5 \cdot 10^{18}$ н/см²) значения $\Delta h/h$ и $\Delta l/l$ находятся в противофазе в интервале деформаций $0,42 < \varepsilon < 0,44$ (рис. 6в).

Аналогичные результаты были получены и описаны в [16,17].



На рисунке 7 показано, как изменяются с ростом степени поперечной деформации интенсивность мартенситного превращения в необлученных и облученных нейтронами стальных образцах. Видно, что при увеличении деформации на кривых образуются и растут локальные экстремумы, механические параметры которых приведены в таблице 4.

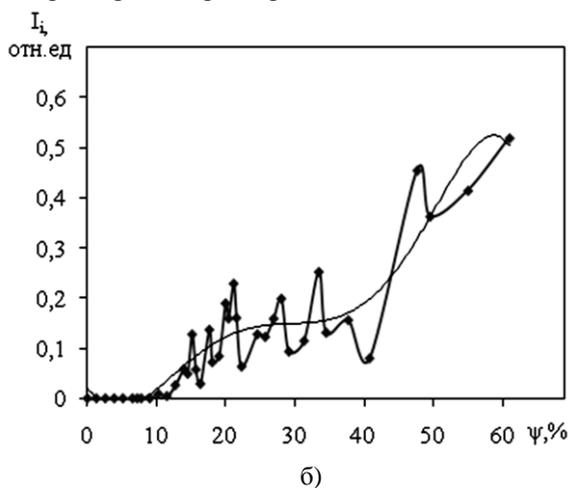


Рисунок 7. Деформационные изменения интенсивности мартенситного превращения для необлученной (а) и облученной нейтронами $2 \cdot 10^{20}$ н/см² (б) аустенитной нержавеющей стали 12X18H10T

Таблица 4. Параметры экстремальных точек на кривой деформационной зависимости интенсивности $\gamma \rightarrow \alpha$ -перехода (рис. 6)

№	Флюенс, н/см ²	Параметры	Экстремумы на кривой $I_i=f(\psi)$							
			max				min			
			1	3	5	7	2	4	6	8
510	0	σ , МПа	700	1000	1200	1300	800	1100	1250	1350
		ψ , %	23	31	51	58	26	41	52	60
		ε , %	25	36	46	48	32	44	47	49
92	$2 \cdot 10^{20}$	σ , МПа	1000	1150	1200	1500	950	1250	1350	–
		ψ , %	21	33	48	61	22	41	50	–
		ε , %	22	31	35	37	24	34	35	–

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По-видимому, основной причиной такой своеобразной эволюции формоизменения является $\gamma \rightarrow \alpha$ -переход с образованием более прочной, чем аустенитная, мартенситной α -фазой. Можно предположить, что форма шейки зависит от того, какой из эффектов и на какой стадии превалирует. Развитие шейки вглубь приводит к росту ψ , тогда как в случае изменений вширь – увеличивается ε . Развитие шейки в ширину означает, что материал перемычки шейки прочен настолько, что при действующих напряжениях его объем ($V_{ЛОК}$) остается постоянным и в деформацию вовлекаются новые участки материала – слева и справа от перемычки. Именно в этих

малодеформированных участках интенсивно протекает $\gamma \rightarrow \alpha$ -переход и величина M_f резко возрастает.

В заключение отметим, что ранее эти два механизма локализации деформации, отражающие преимущественное развитие шейки вширь и вглубь, были выявлены при изучении закономерностей процессов структурно-фазовых превращений и формоизменения шейки на стадии предразрушения металлических поликристаллов с ГЦК-решеткой, облученных до высоких повреждающих доз в быстром реакторе БН-350 [12].

Работа выполнена при поддержке гранта МОН РК 0607/ГФ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пресняков А.А. Очаг деформации при обработке металлов давлением. //Алма-Ата: «Наука» Каз ССР , 1988, 70 с.
2. Трефилов В.И., Моисеев В.Ф. и др. Деформационное упрочнение и разрушение поликристаллических металлов. 1989, 256 с.
3. Рыбин В.В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. М., «Металлургия», 1986, 224 с.
4. Гуляев А.П. Пластическая деформация за пределом прочности //МиТОМ, №12, 1996, с. 20–22.
5. Малыгин Г.А. Анализ структурных факторов, определяющих образование шейки при растяжении металлов и сплавов с ГЦК-решеткой //Физика твердого тела, 2005, т. 47, вып. 2, стр. 236–241.
6. Вyun T., Hashimoto N. Strain Localization in irradiated materials. Nuclear Engineering and Technology. – 2006. – Vol.38, – N.7. – P.619–638.
7. Колесников А.Н., Красноселов В.А., Прохоров В.И. К вопросу о смене механизмов пластической деформации в облученных нейтронами металлах и сплавах // ВАНТ, 1982, №4 (23), с. 49–54.
8. Фастов Н.С. Энергия искажения кристаллической решетки // в кн. «Проблемы металловедения и физики металлов», М.: Металлургиздат. – 1955, стр. 377–388.
9. Фастов Н.С. Вычисление энергии искажений решетки III рода в зависимости от величины деформации // ФММ. – 1986. – №3. – с. 56–58.
10. Большанина М.А., Панин В.Е. Скрытая энергия деформации. В кн. Исследования по физике твердого тела. М., Академиздат, 1957, 277 с.
11. Максимкин О.П., Тиванова О.В., Гусев М.Н., Ткаченко Е.А., Цай К.В., Стадийность пластической деформации и разрушение облученных нейтронами металлических материалов. // Материаловедение, 2002, №3, стр. 23–29.
12. Тиванова О.В. Процессы локализации деформации, сопровождаемые структурно-фазовыми изменениями в металлах (Ni, Mo) и сплавах (12X18N10T, 08X16N11M3T), облученных нейтронами и альфа-частицами. //Диссертация канд. физ.-мат. наук, Алматы, 2008, 206 с.
13. Максимкин О.П. и др. Автоматизированная установка для определения энергии, запасаемой в процессе растяжения материалов. //Препринт 4–87, ИЯФ АН КазССР, Алма-Ата, 1987, 26 с.
14. Астафьев И.В., Максимкин О.П. Восстановление калориметрических термограмм в экспериментах по изучению тепловыделения и запасаения энергии при деформировании // Заводская лаборатория, 1994, №1, с. 44–46.
15. Бабушкин А.А., Максимкин О.П., Челноков С.Д. Оптико-электронный экстензометр // Известия АН Каз ССР сер. физ.-мат. 1986, №2, стр. 21–22.
16. Ушков С.С., Разуваева И.Н., Иванова Л.А. Равномерная деформация металлов и сплавов //Проблемы прочности, 1989, №4, стр. 49–53.
17. Полетика Т.М., Пшеничников А.П. Нелинейный характер макролокализации деформации в ГПУ-сплавах циркония //ЖТФ, 2009, т. 79, №3, стр. 54–58.

СӘУЛЕЛЕНДІРІЛГЕН АУСТЕНИТТІ ТОТЫҚПАЙТЫН 12X18N10T БОЛАТЫНЫҢ ПЛАСТИКАЛЫҚ ДЕФОРМАЦИЯСЫНЫҢ ШЕКТЕЛУІ ТУРАЛЫ

Максимкин О.П., Такиева А.М.

Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан

Сәулелендірілмеген және нейтрондармен сәулелендірілген 12X18N10T болат үлгілеріндегі шектелген пластикалық ағымдардың ерекшеліктері деформациялық микрокалориметрия және механикалық сынаулар әдістерін қолдану арқылы зерттелді. Мартенситті $\gamma \rightarrow \alpha$ -түрленуінің өтуімен байланысты, мойын эволюциясының механизмдері айқындалды.

ON LOCALIZED PLASTIC DEFORMATION IN IRRADIATED 12Cr18Ni10Ti AUSTENITIC STAINLESS STEEL

O.P. Maksimkin, A.M. Takieva

Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan

Localized plastic flow in non-irradiated and irradiated with neutrons 12Cr18Ni10Ti stainless steel was investigated using mechanical testing and deformation microcalorimetric method. Mechanisms of necking evolution attributed to $\gamma \rightarrow \alpha$ martensitic transformation were identified.

УДК 539.17.02

ИЗУЧЕНИЕ РЕАКЦИИ $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ЭНЕРГИЙ

Буртебаев Н., Мадигалин Г.А., Еденбаев А.Н., Кенжебеков А.С.

Евразийский Национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

В данной работе приводится описание экспериментальных данных упругого рассеяния системы $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$ с двумя способами: по оптической модели с l -зависимым кором и комбинированным способом. Получено хорошее согласие экспериментальных данных с расчетами на основе предложенных методов. Из анализа экспериментальных данных по упругому рассеянию в широком интервале энергий найдены глобальные параметры оптического потенциала взаимодействия.

Целью работы является более точное описание экспериментальных данных по упругому рассеянию систем $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$ при энергиях $E_{lab}=15, 18, 21, 42.86, 49.28, 53.14, 56.57, 72.85, 85.71, 98.57, 111.4$ МэВ. Исследуется роль обменного взаимодействия в области задних углов. Получены коэффициенты сжимаемости ядерной материи, которые согласуются с величиной, полученной из данных по гигантскому монополюму резонансу. Для воспроизведения сечения в задней полусфере учитывалась передача α -кластера.

ВВЕДЕНИЕ

Конечная стадия эволюции массивных звезд завершается циклом горения ядер углерода, кислорода и др. более тяжелых альфа-кластерных ядер. Правильная оценка энергетического баланса процесса взрыва сверхновой связана с точными расчетами по нуклеосинтезу с участием легких ядер. Для проведения таких расчетов необходимо иметь достоверные параметры ядерно-ядерного взаимодействия для легких ядерных систем и информацию об их структуре.

В настоящей работе описание экспериментальных данных упругого рассеяния системы $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$ проводилось двумя способами: по оптической модели с l -зависимым кором и комбинированным способом. Последний заключается в описании данных с помощью оптической модели (ОМ) и метода искаженных волн (МИВ), который учитывал обменный процесс. Получено хорошее согласие экспериментальных данных с расчетами на основе предложенных методов. Экспериментальные данные для системы $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$ были взяты из работ [1-3].

Одним из методов получения информации о взаимодействии ядер является феноменологический анализ экспериментальных данных по упругому рассеянию в рамках оптической модели. Результат феноменологического анализа в большей степени предопределен выбором радиальной зависимости потенциала [4].

Интерес к изучению упругого рассеяния тяжелых ионов связан с тем, что для них характерно отклонение от модели сильного поглощения, что позволяет изучать взаимодействие на малых расстояниях и свойства ядерной материи. Также для таких ионов во многих реакциях наблюдается подъем дифференциального сечения на большие углы, в широком интервале энергий. Этот эффект находит объяснение в модели слабого поглощения, в которой появляется возможность орбитирования, что означает вращение сталкивающихся ядер друг относительно

друга при сохранении индивидуальности. Для описания этих состояний становится целесообразным введение в оптический потенциал отталкивающего кора. Помимо отталкивающего кора рост сечения рассеяния на больших углах для ядер сравнимой массы может быть следствием передачи кластера. Это может быть инструментом для изучения кластерных эффектов в основных состояниях ядер. С этой целью выполнен теоретический анализ угловых распределений упругого рассеяния ионов углерода на ядрах кислорода в широком интервале энергии.

РАСЧЕТЫ**Теоретическое описание упругого рассеяния $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$ в рамках оптической модели**

В данной работе для расчетов угловых распределений упругого рассеяния тяжелых ионов в рамках оптической модели был использован следующий вид феноменологического ядро-ядерного потенциала:

$$U(r) = V_{coul}(r) - Vf_V(r) - iWf_W(r) + 4ia_{W_d} W_d \frac{df_{W_d}(r)}{dr} + V_{core}(r), \quad (1)$$

где V_{coul} – кулоновский потенциал равномерно заряженной сферы, V , W , W_d – параметры, определяющие глубины вещественного потенциала и потенциалов объемного и поверхностного поглощения. Кулоновская компонента потенциала взаимодействия точечного заряда $Z_a e$ с однородно заряженной сферой, имеющей заряд $Z_A e$ и радиус R . Следующие два слагаемых в выражении (1) являются ядерным оптическим потенциалом типа Вудса–Саксона с объемным поглощением. Радиальная зависимость потенциалов выбиралась в форме Вудса–Саксона:

$$f(r) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{r - R_x}{a_x}\right)}, \quad (2)$$

где $R_x = r_x (A_t^{1/3} + A_p^{1/3})$, $x = V, W, W_d$. Для более корректного описания упругого рассеяния в задней полусфере вводится отталкивающий кор с l -зависимостью в параболической форме:

$$V_c(r) = \begin{cases} V_k(r), & r \leq R_c \\ 0, & r > R_c \end{cases}$$

$$V_k(r) = C \left(1 - \frac{r^2}{R_c^2} \right) \quad (3)$$

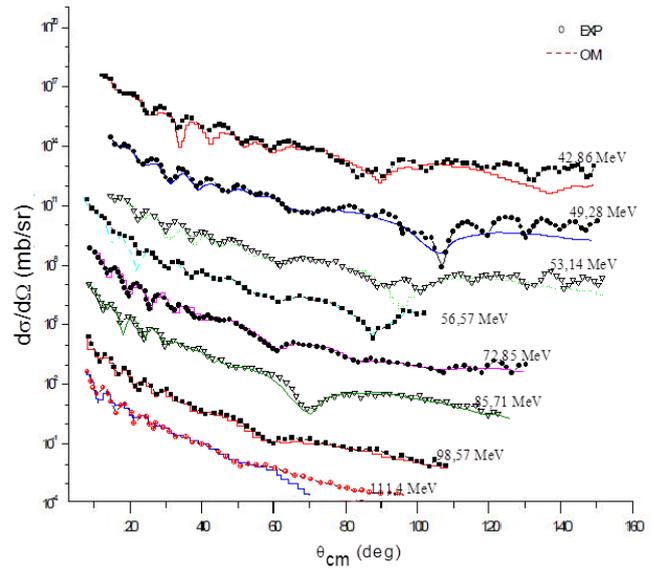
$$R_c = r_k + \frac{\Delta r (1 - (-1)^l)}{2},$$

где $C, r_k, \Delta r$ – свободные параметры. Для радиуса кора должно примерно выполняться соотношение $r_k \approx R_t + R_p$. l -зависимость потенциала кора вводится для описания расщепления полос положительной и отрицательной четности [2].

Оптимальные параметры оптических потенциалов для системы $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$ подбирались таким образом, чтобы достичь наилучшего согласия между теоретическими и экспериментальными угловыми распределениями. Теоретические расчеты выполнялись по программе SPI-GENOA, реализованной на персональном компьютере. Автоматический поиск оптимальных параметров ОП производился путем минимизации величины χ^2 / N . Итоговые значения параметров потенциалов, полученных в результате описании экспериментальных угловых распределений упругого рассеяния ионов углерода на ядрах кислорода в рамках ОМ (см. рис.1) в интервале энергии 15-111 МэВ представлены в таблице.

Как видно из рисунка 1, расчеты по оптической модели с l -зависимым потенциалом позволяют достаточно корректно описать экспериментальные данные по упругому рассеянию в интервале энергии 42

– 111 МэВ, за исключением угловых распределений в предельно больших углах при низких энергиях. Найденные при этом значения коэффициента сжимаемости ядерной матери согласуются с величиной, полученной из анализа данных по гигантскому монополюному резонансу (≈ 250 МэВ) [5].



сплошные кривые – расчеты по оптической модели, точки – эксперимент
Рисунок 1. Угловая зависимость дифференциальных сечений $^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$ при различных энергиях

Расхождение расчетных величин от экспериментальных сечений при низких энергиях в области обратных углов, скорее всего, связано с вкладом механизма упругой передачи кластера в процесс рассеяния, которого стандартная оптическая модель не может учесть.

Таблица. Параметры оптических потенциалов для системы $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$

E	V_0	W_0	a_v	a_w	r_v	r_w	J_v	J_w	R_c
15	107.06	39.0	0.439	0.155	1.18	1.25	452.06	186.2	1.25
18	92.9	16.87	0.453	0.2945	1.18	1.25	394.16	85.6	1.25
21	98.28	11.94	0.4579	0.378	1.18	1.25	417.97	58.75	1.25
42.86	321.35	12.88	0.621	0.534	0.76	1.261	439.75	67.46	0.95
49.28	296.31	13.77	0.722	0.4026	0.76	1.261	438.28	69.9	0.95
53.14	293.97	14.39	0.731	0.623	0.76	1.261	436.89	77.31	0.95
56.57	291.91	15.38	0.598	0.627	0.76	1.261	393.13	82.73	0.95
72.85	280.69	16.408	0.698	0.556	0.76	1.261	406.71	86.46	0.95
85.71	213.218	17.138	0.857	0.554	0.76	1.261	350.62	90.01	0.95
98.57	195.6	19.15	0.767	0.459	0.76	1.261	289.55	98.45	0.95
111.4	168.29	24.863	0.801	0.4542	0.76	1.261	264.37	127.68	0.95

Результаты расчета по методу искаженных волн

В теории рассеяния учет тождественности частиц приводит к процессам обмена. Описание обменной передачи является нетривиальной задачей. В связи с этим большое развитие получили приближенные методы вычислений. Одним из таких методов является МИВ, в котором, как известно, предполагается, что основной вклад в прямой процесс дает упругое рассеяние, а процессы, отличные от основного, рассматриваются как малое возмущение.

Для реакции $^{16}\text{O}(^{12}\text{C}, ^{12}\text{C})^{16}\text{O}$, существенным процессом, влияющим на сечение упругого рассеяния на большие углы, является механизм передачи альфа-кластера налетающему ядру ^{12}C от ядра-мишени ^{16}O , с образованием ядра в основном состоянии. Такой процесс может быть описан в методе искаженных волн. Тогда полное сечение упругого рассеяния ионов углерода на ядрах кислорода с учетом механизма упругой передачи кластера $^{16}\text{O}(^{12}\text{C}, ^{16}\text{O})^{12}\text{C}$ можно записать в следующем виде:

$$\frac{d\sigma_{el}}{d\Omega} = |f_{el}(\theta) + e^{i\alpha} S f_{DWBA}(\pi - \theta)|^2, \quad (4)$$

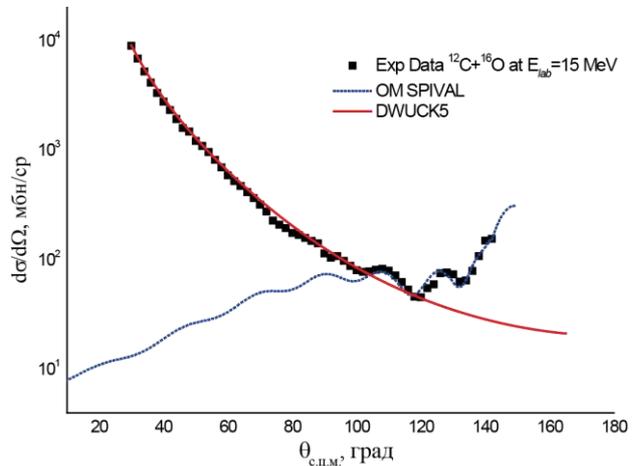
где $f_{el}(\theta)$ – амплитуда упругого рассеяния, $f_{DWBA}(\pi - \theta)$ – амплитуда рассчитанная в методе искаженных волн, при расчетах МИВ проводилась замена на $\pi - \theta$, где замена $\theta \rightarrow \pi - \theta$ связана с тем, что обмениваются одинаковые частицы, S – свободный параметр [6].

Расчет передачи альфа-кластера в рамках МИВ был выполнен с использованием стандартной программы DWUCK5. Для расчета были использованы параметры оптических потенциалов из таблицы, которые хорошо описывали экспериментальные данные в области передних углов. В качестве потенциала связанного состояния кластера с остовом использован потенциал Вудса–Саксона с параметрами радиуса $R_0 = 1.25(A_c + A_\alpha)^{1/3}$ и диффузности $a=0.065$. Квантовые числа состояния кластера определялись из соотношения Тальми-Мошинского $2(N-1)+L = \sum_{i=1}^4 2(n_i-1)+l_i$, где n_i, l_i – квантовые числа составляющих кластер нуклонов в модели гармонического осциллятора, N, L – квантовые числа кластера. В случае альфа-кластера в ^{12}C получаем значение $2N+L=6$.

В итоге по формуле (4) были рассчитаны полное сечение упругого рассеяния для системы $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$ при энергиях 15; 18 и 21 МэВ [3]. На рис. 2 показано в качестве примера результаты описания экспериментальных данных по рассеянию при энергии 15 МэВ. Как видно из рисунка, теоретические расчеты

удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными в полном угловом диапазоне.

Таким образом, данные по упругому рассеянию ионов углерода на ядрах кислорода при низких энергиях удастся воспроизвести в полном угловом диапазоне с учетом вклада механизма упругой передачи альфа-кластера.



символы – экспериментальные данные, красная линия – сечения, рассчитанные в рамках оптической модели ядра с потенциалами из таблицы, синяя линия – расчет методом искаженных волн по программе DWUCK5

Рисунок 2. Дифференциальные сечения упругого рассеяния ионов углерода на ядрах кислорода

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе выполнено описание угловых распределений упругого рассеяния ионов углерода на ядрах кислорода в широком интервале энергии в рамках оптической модели и метода искаженных волн.

Из подгонок угловых распределений упругого рассеяния в области передних углов получены оптимальные значения параметров потенциалов взаимодействия для системы $^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$.

Учет вклада механизма упругой передачи альфа-кластера в сечение процесса рассеяния вычисленный в рамках метода искаженных волн позволил описать подъем сечений в области обратных углов при низких энергиях.

Из величины отталкивающего кора вычисленно в рамках оптической модели с l -зависимым потенциалом была получена константа сжимаемости ядерной материи, которая согласуется с величиной, полученной из данных по гигантскому монополюному резонансу.

Найденные параметры оптического потенциала будут полезными для проведения корректных расчетов астрофизических реакций горения углерода и кислорода в звездах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Szilner S., Nicoli M.P., Basrak Z., Freeman R.M., Haas F., Morsad A., Brandan M.E., Satchler G.R. Refractive elastic scattering of carbon and oxygen nuclei: The mean field analysis and Airy structures // Phys. Rev. C. – 2001. – Vol.64, №6. – id.064614.
2. Nicoli M.P., Haas F., Freeman R.M., Szilner S., Basrak Z., Morsad A., Satchler G.R., Brandan M.E. Detailed study and mean field interpretation of $^{16}\text{O}+^{12}\text{C}$ elastic scattering at seven medium energies // Phys. Rev. C. – 2000. – Vol.61, №3. – id.034609.
3. Burtbayev N. et al., Investigation of Elastic Scattering of ^{12}C , ^{16}O And ^{14}N on the ^{12}C , ^{16}O Nuclei at Energies Near The Coulomb Barrier // LX International Conference of Nuclear Physics «NUCLEUS 2010». July 6 – 9, 2010, Saint-Petersburg, Russia.
4. Гриднев К.А., Родионова Е.Е., Фадеев С.Н. // ЯФ. 2008. Т. 71. С. 1290.
5. Dao T. Khoa, von Oertzen W., Bohlen H.G. et al. // J. Phys. G. 2007. V. 34. P. 111.
6. Известия РАН. Серия Физическая, 2011, том 75, № 7, с. 1016–1018.

$^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$ РЕАКЦИЯСЫН КЕҢ ДИАПАЗОНДЫ ЭНЕРГИЯДА ЗЕРТТЕУ

Бөртебаев Н., Мәди Ғ.Ә., Еденбаев А.Н., Кенжебеков А.С.

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

Осы жұмыста $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$ жүйесінің серпімді шашырауының тәжірибелік деректерін екі әдіспен: қабықшасы l -тәуелді оптикалық модель бойынша және құрама әдіспен түсіндіріледі. Ұсынылған әдіс негізіндегі есептермен тәжірибелік деректер жақсы келісетіндігі айқындалды. Тәжірибелік деректерді саралаудан кең интервал энергияда серпімді шашырау бойынша әсерлесудің оптикалық потенциалының глобалды параметрлері табылды.

Жұмыстың мақсаты $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$ жүйенің $E_{lab}=15, 18, 21, 42.86, 49.28, 53.14, 56.57, 72.85, 85.71, 98.57, 111.4$ МэВ энергиялардағы серпімді шашырауы бойынша тәжірибелік деректерін анығырақ түсіндіру болып табылады. Артқы бұрыштарда әсерлесудің алмасу рөлі зерттеледі. Алынған ядролық материялардың сығымдылық коэффициенті аса зор монополиялы резонанс бойынша алынған деректер шамасымен үйлеседі. Артқы жартылай сферадағы қималарды жаңғырту үшін α -кластердің берілуі ескерілді.

STUDY OF THE REACTION $^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$ IN WIDE RANGE OF ENERGIES

N. Burtbayev, G.A. Madi, A.N. Yedenbayev, A.S. Kenzhebekov

L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

In this work we describe the experimental data of elastic scattering of $^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$ in two ways: by the optical model with l -dependent k and combined way. A good agreement was taken between the experimental data with calculations based on the proposed methods. From the analysis of experimental data on elastic scattering in a wide energy range have found global optical potential parameters of interaction.

The purpose of the given work is more exact description of the experimental data of elastic scattering of the systems $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$ at energies $E_{lab} = 15, 18, 21, 42.86, 49.28, 53.14, 56.57, 72.85, 85.71, 98.57, 111.4$ MeV. The role exchange interaction in the range of back angles is investigated. The received values of coefficient of compressibility of nuclear matter are consistent from the data which obtained on the giant monopole resonance. To reproduce section in the rear hemisphere was accounted transfer α -cluster.

УДК 621.039.577

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ РАСЧЕТОВ ПРОТИВОПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Борисенко А.Н., Зверев В.В., Кукушкин С.М., Цынгаев В.М.

Национальный ядерный центр Республики Казахстан, Курчатов, Казахстан

В работе приведены подходы и методики, позволяющие при проведении проектных работ оценить возможность безопасной эвакуации людей из проектируемых зданий и сооружений в случае возможного пожара. Рассмотрен программный комплекс CFAST, являющийся одним из передовых инструментов для расчетов времени блокирования путей эвакуации, который позволяет произвести оценки изменения термогазодинамических параметров опасных факторов пожара в сложных многоэтажных зданиях и сооружениях. Показаны результаты расчетов возможного пожара в административно-бытовом корпусе №2 геофизической обсерватории «Боровое», которые подтверждают правильность противопожарных проектных решений, выбранных для строительства данного объекта.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из направлений деятельности РГП «НЯЦ РК» является проектирование и строительство различных объектов, как в атомной отрасли, так и в других отраслях промышленности Казахстана. Проекты строительства промышленных предприятий, зданий или сооружений в обязательном порядке должны содержать раздел, в котором описаны мероприятия, требующие обязательного выполнения для обеспечения безопасности людей в случае возможного пожара. Требования пожарной безопасности распространяются и на значительную часть уже действующих предприятий: существует закон, который обязывает предприятия оформить и иметь пожарную декларацию, подтверждающую возможность безопасной эвакуации персонала и населения из общественных мест, таких как магазины, офисы, аптеки, и т.п. в случае возможного возгорания.

Возможность безопасной эвакуации людей из зоны пожара определяется временем блокирования путей эвакуации, то есть временем, после которого значения термогазодинамических параметров опасных факторов пожара на пути эвакуации людей достигают критических значений. Время блокирования путей эвакуации при возможном пожаре, как правило, определяется расчетным путем.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕРМОГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОЖАРА

Для описания термогазодинамических параметров пожара применяются три основные группы детерминистических моделей [1]: интегральные, зонные (зональные) и полевые. Выбор конкретной модели расчета времени блокирования путей эвакуации осуществляется исходя из следующих предположений:

Интегральный метод применяется:

– для зданий, содержащих развитую систему помещений малого объема простой геометрической конфигурации;

– для помещений, где характерный размер очага пожара соизмерим с характерными размерами помещения и размеры помещения соизмеримы между собой (линейные размеры помещения отличаются не более чем в 5 раз);

– для предварительных расчетов с целью выявления наиболее опасного сценария пожара.

Зонный (зональный) метод используется:

– для помещений и систем помещений простой геометрической конфигурации, линейные размеры которых соизмеримы между собой (линейные размеры помещения отличаются не более чем в 5 раз), когда размер очага пожара существенно меньше размеров помещения;

– для рабочих зон, расположенных на разных уровнях в пределах одного помещения (наклонный зрительный зал кинотеатра, антресоли и т.д.).

Полевой метод необходим:

– для помещений сложной геометрической конфигурации, а также помещений с большим количеством внутренних преград (атриумы с системой галерей и примыкающих коридоров, многофункциональные центры со сложной системой вертикальных и горизонтальных связей и т.д.);

– для помещений, в которых один из геометрических размеров гораздо больше (меньше) остальных (тоннели, закрытые автостоянки большой площади и т.д.);

– для иных случаев, когда применимость или информативность зонных и интегральных моделей вызывает сомнение (уникальные сооружения, распространение пожара по фасаду здания, необходимость учета работы систем противопожарной защиты, способных качественно изменить картину пожара, и т.д.).

Расчет времени блокирования путей эвакуации производится на основе решения взаимосвязанных дифференциальных уравнений баланса массы и сохранения энергии, которые позволяют описать изменение температуры, оптической плотности дыма, а также концентрации кислорода и продуктов горения

в помещениях здания. Аналитическое решение этих дифференциальных уравнений возможно для расчета параметров пожара в одиночном помещении [2], но расчет параметров распространения тепла и дыма в нескольких взаимосвязанных между собой помещениях возможен лишь с использованием численных методов. Для численного решения систем дифференциальных уравнений, как правило, составляется расчетный код (программа), и расчет нужных параметров производится с помощью ЭВМ.

Перечисленные выше модели расчета параметров пожара имеют свои особенности. Моделям, основанным на интегральном методе, присуща высокая погрешность расчетных оценок. Полевые модели, использующие метод конечных элементов, обладают хорошей точностью, но ресурсоемки, требуют значительных затрат машинного времени. Наиболее предпочтительными из перечисленных моделей являются зонные модели, которые при достаточной точности имеют низкую ресурсоемкость и позволяют производить расчеты распространения пожара по помещениям больших многоэтажных зданий.

Одним из комплексов, основанных на использовании зонной модели пожара, является программный комплекс CFAST, разработанный Национальным институтом стандартов и технологии США в международной кооперации с научно-исследовательскими организациями США, Канады и Финляндии. Комплекс CFAST предназначен для определения времени блокирования путей эвакуации опасными факторами пожара при расчете пожарного риска, в соответствии с положениями Технического регламента о требованиях пожарной безопасности [3].

ОПИСАНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА CFAST

Название модели CFAST расшифровывается как Consolidated Fire Growth and Smoke Transport Model (единая модель развития пожара и перемещения дыма). Программа написана на FORTRAN 90. Первая версия CFAST была выпущена в июне 1990 года пожарным исследовательским отделом Национального института стандартов и технологии США. Современная, шестая, версия CFAST была выпущена в июле 2005 года. Все эти годы программа развивалась и дорабатывалась, получая новые возможности.

Программа CFAST распространяется бесплатно и имеет открытый код, который может быть свободно модифицирован любым пользователем [4].

Программа CFAST 6.1 реализует двухзонную модель расчета тепломассопереноса при пожаре и позволяет прогнозировать параметры продуктов горения (температуру, снижение видимости, концентрацию токсичных продуктов горения) и их распространение по зданию. Зонная модель, реализованная в программе CFAST, предназначена для оценки динамики опасных факторов пожаров в жилых, общественных и промышленных зданиях и сооружениях. Также CFAST может использоваться для расчетного

определения параметров противопожарных систем – противодымной естественной и/или механической вентиляции, пожарной сигнализации и т.п.

Двухзонная модель тепломассопереноса при пожаре предполагает разделение каждого расчетного помещения на два контрольных объема – верхний (дымовой) слой и нижний слой. Дополнительными контрольными объемами в помещении с источником пожара являются дымовая струя и припотолочная струя. Для выполнения расчета рассматриваемые здания и сооружения представляются в виде системы помещений, соединенными проемами, источников пожаров, дымоприемных отверстий и устройств, систем подпора воздуха. С учетом теоретических основ зонной модели и экспериментальных оценок достоверности расчетов при натуральных испытаниях, программа CFAST дает решение с достаточной инженерной точностью 10-15%.

Модель, реализованная в программе, позволяет варьировать режимом распространения потока газа в помещениях и разделять помещения на три категории: «Normal», «Shaft» и «Corridor»:

– Категория «Normal» применяется для описания обычных помещений.

– Категория «Shaft» выбирается для лестничных клеток и шахт. В этом случае расчет помещения производится с помощью интегральной модели (поскольку дымовая струя взаимодействует со стенами помещения и смешивается с нижним слоем).

– Выбор категории «Corridor» производится для помещений, где длина помещения много больше его ширины (коридоров). В этом случае заполнение помещения дымом происходит неравномерно, и для уменьшения ошибки расчета вводится задержка распространения дыма.

Математическая модель программы позволяет задавать одновременно несколько источников пожара, расположенных в разных помещениях здания или сосредоточенных в одном помещении. Для каждого источника пожара задается своя временная зависимость изменения тепловыделения и состав продуктов горения.

Модель CFAST подверглась подробным оценочным исследованиям, проводимым специалистами Национального института стандартов и технологий США (NIST) и других организаций. Подробнее о валидации CFAST можно прочитать в документе «Software and Experimental Validation Guide» [5].

В ходе сравнения экспериментальных данных и расчетов с использованием CFAST получено, что:

– Прогнозы высоты и температуры слоя горячих газов находятся в основном в пределах экспериментальной погрешности. Прогнозы температуры слоя горячих газов обычно слегка завышены, а высоты – слегка занижены (прогнозируемая глубина слоя чуть больше экспериментальной). Прогнозы в основном находятся в пределах 10–20% от экспериментальных измерений. Погрешность прогноза тем-

пературы и высоты слоя горячих газов несколько выше в помещениях, удалённых от огня, по сравнению с горящим помещением.

– Температуру припотолочной струи CFAST в основном прогнозирует в пределах экспериментальной погрешности. В случаях, когда температура слоя горячих газов намного ниже 70°C, наблюдается значительное завышение прогнозируемых значений.

– Прогнозы по высоте пламени, выполненные в программе CFAST, согласуются с визуальными наблюдениями высоты пламени в ходе экспериментов.

– Прогнозы CFAST относительно концентрации газа и давления в помещении находятся в пределах экспериментальной погрешности.

– CFAST, как правило, даёт завышенный прогноз концентрации дыма. При испытаниях «с открытой дверью» (в стенде, открытом в окружающее пространство) прогнозируемые значения концентрации дыма находятся в пределах экспериментальных погрешностей, а в испытаниях «с закрытой дверью» (в изолированном стенде) – значительно превышают экспериментальные.

Прогнозы CFAST согласуются с многочисленными исследованиями и экспериментальными данными, и это свидетельствует о том, что применение модели уместно для широкого спектра сценариев пожара.

ОСНОВНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ CFAST

В основе математической модели CFAST лежит задача Коши для системы обыкновенных дифференциальных уравнений. В систему входят уравнения сохранения массы, энергии (первый закон термодинамики), уравнение состояния идеального газа, отношения для плотности и для внутренней энергии. Уравнения сформулированы относительно следующих переменных: давление, объем дымового слоя, температура верхнего и нижнего слоев. Система уравнений, описывающая изменение параметров пожара в помещении j здания имеет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_j}{dt} = \frac{k-1}{V_j} (\dot{h}_{Lj} + \dot{h}_{Uj}) \\ \frac{dV_{Uj}}{dt} = \frac{1}{kP_j} \left[(k-1)\dot{h}_{Uj} - V_{Uj} \frac{dP_j}{dt} \right] \\ \frac{dT_{Uj}}{dt} = \frac{1}{c_p \rho_{Uj} V_{Uj}} \left[(\dot{h}_{Uj} - c_p \dot{m}_{Uj} T_{Uj}) + V_{Uj} \frac{dP_j}{dt} \right] \\ \frac{dT_{Lj}}{dt} = \frac{1}{c_p \rho_{Lj} V_{Lj}} \left[(\dot{h}_{Lj} - c_p \dot{m}_{Lj} T_{Lj}) + V_{Lj} \frac{dP_j}{dt} \right] \end{array} \right.$$

где L, U – индекс нижней и верхней зоны, соответственно;

P – давление в помещении, Па;

k – коэффициент адиабаты;

\dot{h}_{ij} – изменение энтальпии в зоне i помещения

$(\dot{h}_i = \frac{dQ_i}{dt} + \frac{d(c_v \dot{m}_i T_i)}{dt} + P \frac{dV_i}{dt})$, Дж/с;

V, V_i – полный объем помещения и объем зоны i , соответственно, м³;

T_i – температура зоны i помещения, К;

c_p, c_v – удельная изобарная и изохорная теплоемкость газа, Дж/(кг К);

Q_i – тепловыделение в зоне i , Дж;

\dot{m}_i – изменение массы газа в зоне i помещения, кг/с.

Система замыкается уравнениями для расчета источниковых членов.

Расход продуктов горения от источника пожара:

$$\dot{m}_e = \begin{cases} 0,011 Q_f \left[\frac{Z}{Q_f^{2/5}} \right]^{0,566} & \text{для области факела} \\ 0,026 Q_f \left[\frac{Z}{Q_f^{2/5}} \right]^{0,909} & \text{для переходной области} \\ 0,124 Q_f \left[\frac{Z}{Q_f^{2/5}} \right]^{1,895} & \text{для области колонки} \end{cases}$$

где Q_f – мощность очага пожара, кВт;

Z – высота нижнего уровня задымленной зоны, м.

Скорость потока газов через проем между помещениями i и j :

$$v_{ij} = C \left[\frac{2\Delta P_{ij}}{\rho_i} \right]$$

где ρ_i – плотность газовой смеси в помещении i , кг/м³;

C – коэффициент расхода проема.

Более подробное описание математической модели CFAST приведено в Техническом руководстве [3].

Система уравнений, описывающая изменение параметров пожара в помещениях в модели CFAST основана на законах сохранения массы, энергии, компонентов и аналогична уравнениям методики [1]. Модель CFAST соответствует модели этой методики и может быть использована для решения практических задач пожарной безопасности.

ПРИМЕНЕНИЕ CFAST ДЛЯ РАСЧЕТА ВРЕМЕНИ БЛОКИРОВКИ ПУТЕЙ ЭВАКУАЦИИ ПЕРСОНАЛА ОБСЕРВАТОРИИ «БОРОВОЕ»

В недавнем прошлом предприятия РГП «НЯЦ РК» проводили разработку проекта по передислокации геофизической обсерватории «Боровое» на новое место. Одной из задач при проведении проектных работ являлось определение распространения продуктов горения по помещениям проектируемых зданий и сооружений в случае возможного пожара и оценка последствий воздействия опасных факторов пожара на людей для различных сценариев его развития. Расчеты пожара в проектируемых зданиях обсерватории проводились с использованием комплекса CFAST.

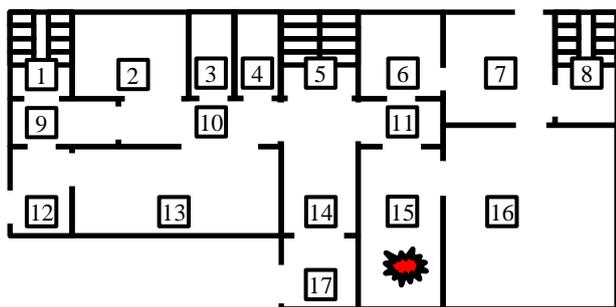
В качестве иллюстрации использования CFAST далее показаны результаты расчетов времени блокировки путей эвакуации персонала обсерватории из административно-бытового корпуса №2.

Расчет опасных факторов пожара

Мощность пожара определяется пожарной нагрузкой и типом горючих материалов. Трехэтажный административно-бытовой корпус №2 является офисным зданием, в котором расположены кабинеты руководства и администрации предприятия, гостиничные номера, столовая, и т.п. С точки зрения пожарной безопасности помещения здания однотипные, поскольку пожарная нагрузка и тип горючих материалов в помещениях здания примерно одинаковы.

Расчет параметров возможного пожара в здании проводился с использованием трехмерной расчетной модели здания, включающей в себя все помещения, лестничные клетки, вестибюли и коридоры с дверными проемами. Для упрощения модели часть помещений, геометрия которых не сказывается на условиях распространения тепла и дыма по зданию, была объединена между собой. Размеры и характеристики помещений и дверных проемов выбраны в соответствии с данными проекта.

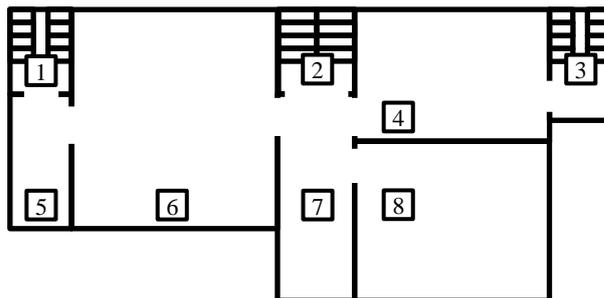
Расчетная схема первого этажа здания показана на рисунке 1.



1 – лестничная клетка левого крыла; 2 – кладовые, постирочная, бухгалтерия, кабинет начальника; 3 – кабинет начальника жизнеобеспечения и механика; 4 – щитовая ССУ; 5 – лестничная клетка центрального входа; 6 – банкетный зал и санузел; 7 – кабинет заведующей, комната официантов и вспомогательные помещения; 8 – лестничная клетка правого крыла; 9, 10, 11 – коридоры; 12 – раздевальная и тамбур; 13 – комната отдыха, бассейн, касса, отдел кадров, медицинский кабинет; 14 – вестибюль; 15 – обеденный зал; 16 – цеха столовой; 17 – вход.

Рисунок 1. Расчетная схема первого этажа административно-бытового корпуса №2

Помещения второго и третьего этажей здания в расчетной модели выполняют роль объемов, которые заполняются продуктами горения, поступающими через лестничные клетки с первого этажа. Геометрия и расположение этих помещений слабо влияют на условия распространения продуктов горения по зданию, поэтому большая часть этих помещений была объединена. Расчетную схему второго и третьего этажей здания иллюстрирует рисунок 2.



1, 2, 3 – лестничные клетки; 4 – коридоры и гостиничные номера правого крыла здания; 5, 6 – коридоры и гостиничные номера левого крыла здания; 7 – холл; 8 – конференц-зал.

Рисунок 2. Расчетная схема второго и третьего этажей административно-бытового корпуса №2

Выбор наиболее опасного варианта развития пожара проводился исходя из следующих предпосылок:

– При пожаре в многоэтажном здании пламя и задымление, как правило, распространяется по помещениям на этаже пожара и далее по помещениям на этажах, находящихся выше этажа пожара. Наиболее опасным вариантом развития пожара в многоэтажном здании является случай, когда очаг возгорания возникает в помещениях первого этажа. В такой ситуации время, затраченное на эвакуацию персонала, находящегося в помещениях, расположенных на втором и выше этажах здания, будет максимальным.

– Опасность пожара возрастает, если возгорание происходит в помещениях, расположенных в центральной части здания. В этом случае высокая температура и дым распространяются по большему числу помещений, по сравнению с ситуацией, когда пожар произошел в помещении на торце дома, и подверженными воздействию опасных факторов пожара оказались люди в помещениях, расположенных в данном крыле здания.

– Мощность пожара возрастает пропорционально площади возгорания, поэтому более опасным является пожар в больших помещениях.

На основании вышесказанного, в качестве вариантов пожара рассматривался случай, когда пожар возникает в помещении обеденного зала на первом этаже здания. Принималось, что очаг пожара расположен в центре помещения, распространение пожара – круговое, и, в итоге, пожар охватывает всю площадь помещения. Распространение дыма и тепла по помещениям здания происходит через дверные проемы. Расчеты пожара проводились в предположении, что дверные проемы между всеми помещениями здания раскрыты.

Для расчета термогазодинамических параметров пожара в лестничных клетках здания использовалась категория «Shaft». Этим учитывалось, что при движении газов между этажами происходит перемешивание дымовой струи и нижнего слоя воздуха. Для описания коридоров 9, 10 и 11 первого этажа

использовалась категория «Corridor». Выбор этой категории позволил учесть, что заполнение этих помещений дымом происходит неравномерно. Параметры источника пожара выбирались на основании справочных данных [6]. Принималось, что пожарной нагрузкой является мебель и линолеумное покрытие пола. Параметры источника пожара приведены в таблице.

Таблица. Параметры источника пожара

Параметр	Значение
Низшая теплота сгорания, H_f , МДж/кг	14
Линейная скорость распространения пламени, v , м/с	0,015
Удельная массовая скорость выгорания, ψ , кг/(м ² с)	0,0137
Дымообразующая способность, Dm , Нпм ² /кг	47,7
Потребление кислорода, $L(O_2)$, кг/кг	1,369
Выделение углекислого газа, $L(CO_2)$, кг/кг	1,478
Выделение угарного газа, $L(CO)$, кг/кг	0,03
Выделение хлористого водорода, $L(HCl)$, кг/кг	0,0058
Коэффициент полноты сгорания, η	0,93

Площадь обеденного зала составляет 107 м². На основании данных, приведенных в таблице, получено, что:

– Максимальная скорость тепловыделения при горении в обеденном зале равна 19,1 МВт;

– Время увеличения скорости тепловыделения до 1 МВт равно 89 секунд.

Рассчитанные результаты изменения температуры верхнего (дымового) слоя, высоты рабочей зоны и концентрации кислорода в помещении обеденного зала иллюстрирует рисунок 3.

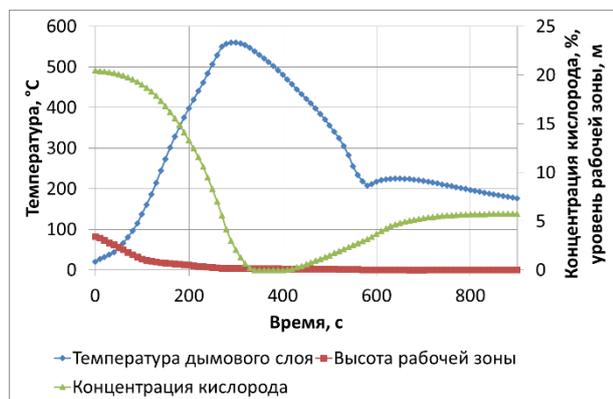


Рисунок 3. Рассчитанные результаты изменения температуры верхнего уровня, концентрации кислорода и высоты рабочей зоны в помещении обеденного зала

В ходе расчетов получено, что пожар развивается в течение первых ~ 300 секунд, он сопровождается ростом температуры дыма до 550 °C и выжиганием кислорода в помещении. Снижение концентрации кислорода в помещении приводит к тому, что интенсивность горения впоследствии уменьшается, а температура дыма в течение последующих 300 се-

кунд падает до ~ 230 °C и далее стабилизируется примерно на этом уровне.

Время блокирования путей для эвакуации персонала определяется опасными факторами пожара в помещениях, ведущих к выходу из здания. Такими помещениями являются вестибюль (помещение 14 на схеме 1 этажа здания, рисунок 1), коридор 9 левого крыла и группа помещений 7 в правом крыле, расположенные на первом этаже здания. Рисунок 4 иллюстрирует рассчитанные результаты изменения температуры верхнего (дымового) слоя в этих помещениях.

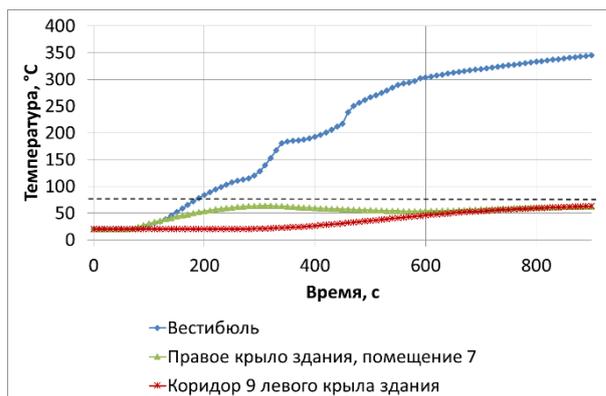


Рисунок 4. Рассчитанные результаты изменения температуры дымового слоя в вестибюле, помещении 7 правого крыла и коридоре 9 левого крыла при пожаре в обеденном зале здания

На основании полученных результатов можно сказать, что время блокирования путей для эвакуации, связанное с температурой дыма в вестибюле здания, составляет ~ 170 секунд с момента начала пожара. Рассчитанная температура воздуха в помещениях 7 и 9 остается в пределах нормы.

Изменение оптической плотности (ограничение видимости) в помещениях 7, 9 и 14 при пожаре в обеденном зале здания показано на рисунке 5.

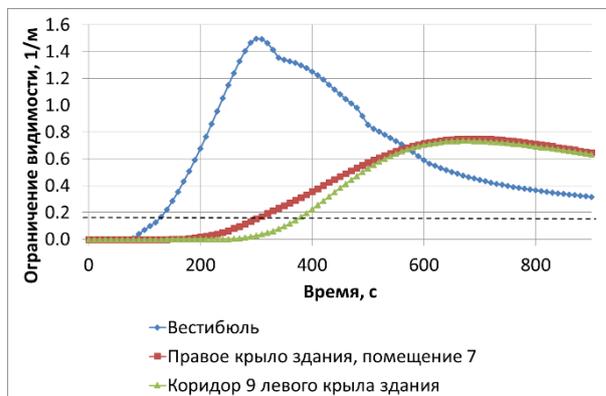


Рисунок 5. Рассчитанные результаты изменения оптической плотности в вестибюле, помещении 7 правого крыла и коридоре 9 левого крыла при пожаре в обеденном зале здания

На основании результатов расчетов можно сказать, что время блокирования путей для эвакуации, связанное с ограничением видимости в вестибюле составляет ~ 120 секунд, помещении 7 – 290 секунд, коридоре 9 – 370 секунд.

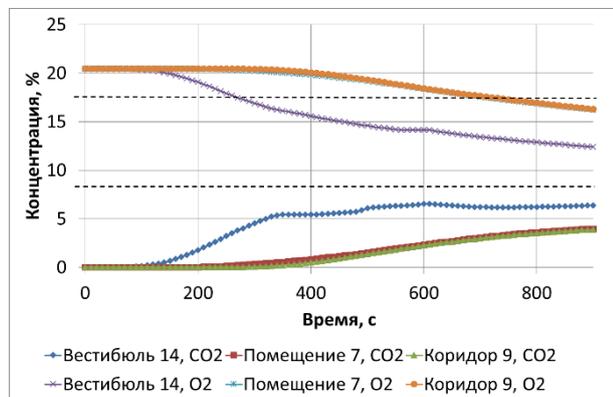


Рисунок 6. Изменение концентрации кислорода и углекислого газа в вестибюле, помещении 7 правого крыла и коридоре 9 левого крыла при пожаре в обеденном зале здания

Изменение концентрации кислорода и углекислого газа в помещениях 7, 9 и 14 при пожаре в обеденном зале здания иллюстрирует рисунок 6.

Расчеты показывают, что время блокирования путей для эвакуации, связанное со снижением концентрации кислорода, в вестибюле наступит через ~ 260 секунд с момента начала пожара, в коридоре 9 и помещении 7 – через ~ 700 секунд, а ограничений, связанных с повышением концентрации углекислого газа, в течение 900 секунд расчета не наступает.

Изменение концентрации угарного газа в помещениях 7, 9 и 14 при пожаре в обеденном зале здания показано на рисунке 7.

На основании результатов расчетов можно сказать, что время блокирования путей для эвакуации, связанное с повышением концентрации угарного газа, в вестибюле наступит через ~ 240 секунд с момента начала пожара, а в коридоре 9 и помещении 7 в течение 900 секунд расчета опасных концентраций угарного газа не достигается.

Анализ результатов расчетов возможного пожара административно-бытового корпуса №2 показывает, что наиболее опасным фактором при пожаре является ограничение видимости. Время блокирования путей для эвакуации, связанное с ограничением видимости, при возгорании в обеденном зале в вестибю-

ле здания составляет ~ 120 секунд, в помещении 7 в районе запасного выхода в правом крыле здания ~ 290 секунд, в коридоре 9 вблизи запасного выхода в левом крыле здания ~ 370 секунд.

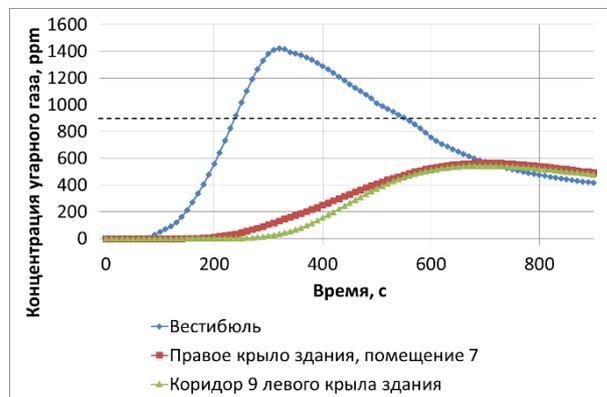


Рисунок 7. Изменение концентрации угарного газа в вестибюле, помещении 7 правого крыла и коридоре 9 левого крыла при пожаре в обеденном зале здания

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные результаты расчетов гипотетического возгорания на геофизической обсерватории «Боровое» позволяют сделать вывод, что с использованием программных комплексов типа CFAST можно прогнозировать термогазодинамические параметры распространения пожара в многоэтажных зданиях, имеющих сложную систему взаимосвязанных помещений.

Так в рассматриваемом случае пожара в административно-бытовом корпусе №2 обсерватории было получено расчетное подтверждение правильности выбранных решений при разработке проекта данного здания. В соответствии с нормативами [1] общее время эвакуации персонала из здания, с учетом времени, затраченного на сборы персонала при срабатывании пожарной сигнализации, составляет 2,55 минуты или 153 секунды. Время блокирования путей эвакуации правого крыла здания составляет 290 секунд, а левого – 370 секунд, что значительно превышает время, необходимое для удаления людей из здания. Таким образом, в здании административно-бытового корпуса №2 персонал при пожаре имеет возможность беспрепятственно эвакуироваться через запасные выходы и, тем самым, обеспечить свою безопасность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности: Приложение к приказу МЧС России от 30 июня 2009 года № 382.
2. ССБТ «Пожарная безопасность. Общие требования»: ГОСТ 12.1.004-91. – 1992.
3. Технический регламент «Общие требования к пожарной безопасности»: Постановление Правительства Республики Казахстан от 16 января 2009 года № 14.
4. NIST Special Publication 1041. CFAST – Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (Version 6). User's Guide. – NIST, 2005. / CFAST – Руководство пользователя.

5. NIST Special Publication. CFAST – Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (Version 6). Software and Experimental Validation Guide. – NIST, 2008. / CFAST – Руководство по проверке достоверности программного обеспечения на основе экспериментальных исследований.
6. Кошмаров, Ю.А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении. – М., Академия ГПС МВД РФ, 2000.

ҒИМАРАТТАР МЕН ҚҰРЫЛЫСТАРДЫҢ ӨРТ ҚАУІПСІЗДІГІНІҢ ЕСЕПТЕРІНЕ АРНАЛҒАН БАҒДАРЛАМАЛЫҚ ҚҰРАЛДАРДЫ ПАЙДАЛАНУ

Борисенко А.Н., Зверев В.В., Кукушкин С.М., Цынгаев В.М.

Қазақстан Республикасының Ұлттық ядролық орталығы, Курчатов, Қазақстан

Бұл мақалада жобалық жұмыстар жүргізу кезінде адамдарды ықтимал өрт жағдайында жобаланып жатқан ғимараттар мен құрылыстардан қауіпсіз эвакуациялау мүмкіндігін бағалай алатын әдіс-тәсілдер келтірілген. Эвакуациялау жолдарын бұғаттау уақытын есептеуге арналған озық құралдардың бірі болып табылатын, күрделі көпқабатты ғимараттар мен құрылыстардағы қауіпті факторлардың термогаздинамикалық параметрлерін өзгертуді бағалауға мүмкіндік беретін CFAST бағдарламалық кешені қарастырылды. «Бурабай» геофизикалық обсерваториясының №2 әкімшілік-тұрмыстық корпусындағы осы объектінің құрылысы үшін таңдалып алынған өртке қарсы жобалық шешімдердің дұрыстығын растайтын ықтимал өртті есептеу нәтижелері көрсетілген.

USE OF FIRE PROTECTION SOFTWARE PROGRAM FOR BUILDINGS AND STRUCTURES

A.N. Borisenko, V.V. Zverev, S.M. Kukushkin, V.M. Tsyngayev

National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov, Kazakhstan

This effort presents approaches and methods of project activities enabling to evaluate safe evacuation preparedness of people from designed buildings and structures at possible fire risk. CFAST computer program, one of the most advanced tools for estimation of escape route blocking time that allows to carry out assessment for thermogasdynamic parameters change within the hazardous fire situations in multistory buildings and structures is studied. The results of possible fire risk estimation are shown in administrative and service building #2 of “Borovoye” geophysical observatory which certified adequacy of fire-protection project decisions for the object construction.

УДК 550.344+550.34

НЕОДНОРОДНОСТИ ПОЛЯ ПОГЛОЩЕНИЯ КОРОТКОПЕРИОДНЫХ S-ВОЛН В ЛИТОСФЕРЕ АЛТАЯ И ИХ СВЯЗЬ С СЕЙСМИЧНОСТЬЮ

¹⁾ Копничев Ю.Ф., ²⁾ Кунакова О.К., ²⁾ Соколова И.Н.

¹⁾ *Институт физики Земли РАН, Москва, Россия*

²⁾ *Институт геофизических исследований, Курчатов, Казахстан*

Проведено картирование поля поглощения короткопериодных S-волн в литосфере Алтая и прилегающей территории Монголии и Южной Сибири. Использован метод, основанный на анализе отношения максимальных амплитуд волн S_n и P_n . Обработано около 500 записей землетрясений, полученных станциями Маканчи и Улан-Батор на расстояниях ~300–1900 км. Показано, что в целом поглощение поперечных волн гораздо сильнее в западной части района по сравнению с восточной. В западной части района выделена V-образная полоса сильного поглощения в верхах мантии, к которой приурочены очаги Зайсанского землетрясения 1990 г. ($M=6.9$) и Чуйского землетрясения 2003 г. ($M=7.3$). В то же время очаговым зонам сильных землетрясений с $M \geq 7.0$, произошедших до 1970 г., соответствует относительно слабое поглощение поперечных волн. Сделан вывод, что перед сильными землетрясениями в районе Алтая, как и в других районах Центральной Азии, формируются зоны высокого содержания флюидов в литосфере. После сильных сейсмических событий флюиды в течение нескольких десятков лет поднимаются в земную кору из верхов мантии, что приводит к уменьшению поглощения волн S_n .

В последние 10-15 лет получены многочисленные данные, свидетельствующие о важной роли глубоких флюидов в процессах подготовки сильных коровых землетрясений [1–6]. Эти результаты могут быть использованы для разработки новых методов выделения очаговых зон возможных сильных землетрясений. Области высокого содержания флюидов в литосфере, связанные с подготовкой сильных землетрясений, могут быть обнаружены по характеристикам поля поглощения короткопериодных поперечных волн, наиболее чувствительных к присутствию жидкой фазы [1–8]. Ниже с этой целью рассматриваются характеристики поля поглощения в районе Алтая и на прилегающих территориях Монголии и Южной Сибири.

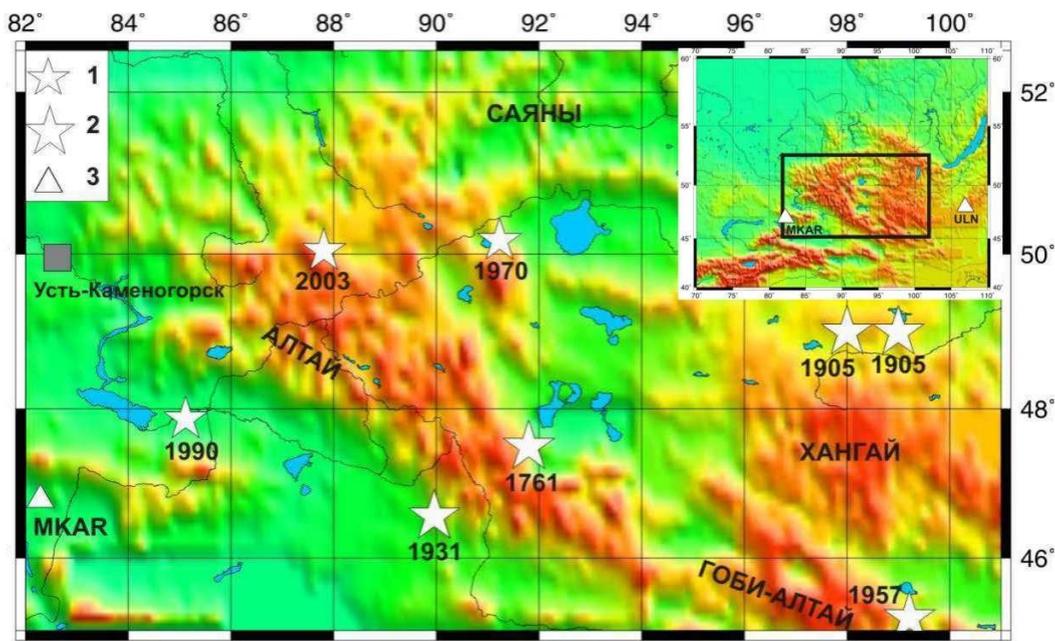
ИСТОРИЧЕСКАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ

Рассматривается большой район Центральной Азии, ограниченный координатами 45-52.5°N 82-101°E (рисунок 1). Здесь за последние 2.5 века зарегистрировано восемь достаточно сильных землетрясений, в том числе пять с $M \geq 8.0$ (таблица 1, рисунок 1). Монгольское землетрясение 1791 г. ($M=8.3$) было связано с крупным разлом Ар-Хутел северо-западного простирания. Цэцэргэгское землетрясение 09.07.1905 г. ($M_w=8.5$) и Болнайское землетрясение 23.07.1905 г. ($M_w=8.4$) были одними из сильнейших на Азиатском континенте с начала XX-го века. Очаги обоих этих событий (механизмы – левосторонние сдвиги) были приурочены к субширотному Болнайскому разлому; суммарная длина сейсмодислокаций составляла несколько сотен км. При Монголо-Ал-

тайском землетрясении 1931 г. ($M_w=8.0$) длина разрывов на поверхности составляла около 200 км. Гоби-Алтайское землетрясение 04.12.1957 г. ($M_w=8.1$), также с механизмом типа левостороннего сдвига было связано с субширотным разломом Богдо. Общая длина области дислокаций составляла ~270 км при ширине ~30 км. Довольно сильным было Урэг-Нурское землетрясение 15.05.1970 г. ($M=7.0$); размер области его афтершоков составлял $90 \times 40 \text{ км}^2$. Зайсанское землетрясение 14.06.1990 г. ($M_w=6.9$) было сильнейшим на территории Восточного Казахстана за историческое время. Очаг этого события был приурочен к зоне Уленгур-Зайсанского разлома; область афтершоков имела размеры ~45×15 км². И наконец, Чуйское землетрясение 27.09.2003 г. ($M_w=7.3$) имело очаг, вытянутый в направлении северо-запад – юго-восток; размер области афтершоков составлял ~75×30 км² [9]. Особенностью большинства сильных событий является то, что они приурочены к границам впадин (рисунок 1).

Таблица 1. Сильные землетрясения в районе Алтая

Дата	φ, °N	λ, °E	M	Название
09.12.1761	47.50	91.80	8.3	Монгольское
09.07.1905	49.00	99.00	8.5	Цэцэргэгское
23.07.1905	49.00	98.00	8.4	Болнайское
10.08.1931	46.57	89.96	8.0	Монголо-Алтайское
04.12.1957	45.18	99.22	8.1	Гоби-Алтайское
15.05.1970	50.17	91.23	7.0	Урэг-Нурское
14.06.1990	47.87	85.12	6.9	Зайсанское
27.09.2003	50.04	87.81	7.3	Чуйское



Эпицентры сильных землетрясений в районе Алтая: 1 – $M=6.9-7.3$, 2 – $M \geq 8.0$, 3 – сейсмическая станция

Рисунок 1. Район исследований (на врезке – расположение района исследований и сейсмические станции)

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Для анализа поля поглощения отобраны записи коровых землетрясений, полученные станцией Маканчи (МКАР) в 1995–2012 гг. в диапазоне эпицентральных расстояний $\Delta \sim 300-1450$ км. Кроме того, для сравнения рассмотрены записи землетрясений из этого же района, полученные станцией Улан-Батор (ULN) на расстояниях $\sim 500-1900$ км (рисунок 1). В общей сложности обработано около 500 записей событий с $M=3.5-5.5$.

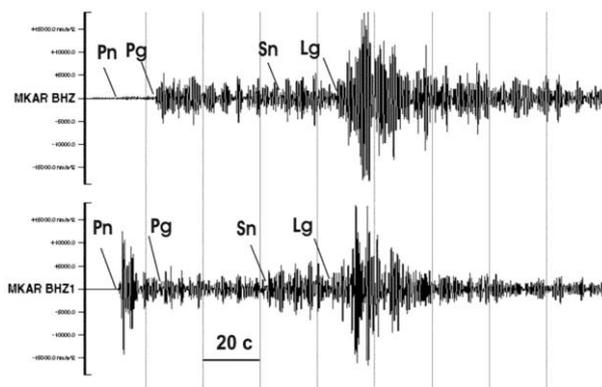
Использован метод картирования поля поглощения в литосфере по отношению максимальных амплитуд волн Sn и Pn (параметру $\lg(A_{Sn}/A_{Pn})$, который для краткости будем обозначать как Sn/Pn). Совокупность имеющихся данных позволила сделать вывод, что группа Sn сформирована поперечными волнами, отраженными от многочисленных субгоризонтальных границ в верхней мантии [7]. В этом случае при использовании записей одной станции уровень группы Sn служит мерой поглощения S-волн в нижней коре и верхах мантии в области эпицентра [4-6]. Параметр Sn/Pn используется для нормировки, поскольку волны Sn и Pn распространяются близкими трассами. При этом длина отрезков трасс, проходимых волнами Sn в нижней коре, составляет несколько десятков км и почти не зависит от Δ [4-7], поэтому изменение параметра Sn/Pn с расстоянием происходит в основном вследствие вариаций поглощения в верхах мантии. В связи с тем, что поглощение существенно зависит от частоты колебаний, предварительно проводилась фильтрация вертикальных компонент записей (использовался фильтр с центральной частотой 1.25 Гц и полосой пропускания 2/3 октавы [8]).

АНАЛИЗ ДАННЫХ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 2-а приведены типичные примеры сейсмограмм событий из очаговых зон двух сильных землетрясений: Монголо-Алтайского 1931 г. и Чуйского 2003 г. (по данным станции МКАР). Эпицентры этих событий расположены примерно на одинаковых расстояниях от станции МКАР (534 и 557 км соответственно). Из рисунка 2 следует, что записи существенно отличаются друг от друга: для очаговой зоны землетрясения 1931 г. наблюдаются очень высокие отношения Sn/Pn, а для зоны события 2003 г. – очень низкие. Отметим, что на обеих записях доминирует коровая группа Lg [8].

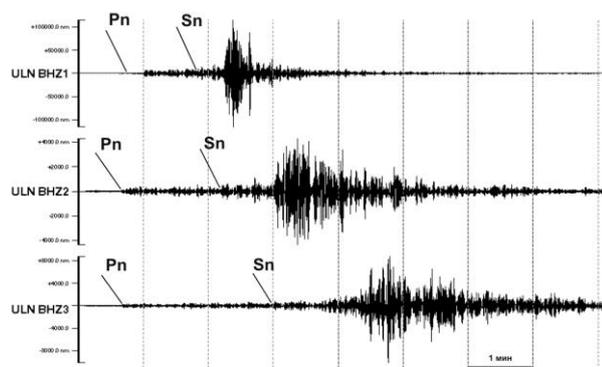
На рисунке 2-б представлены примеры записей событий из очаговых зон трех сильных землетрясений: Монголо-Алтайского 1931 г., Гоби-Алтайского 1957 г. и Чуйского 2003 г. (по данным станции ULN). Видно, что для всех трех сейсмограмм относительный уровень группы Sn достаточно высок по сравнению с нижней трассой на рисунке 2-а, несмотря на существенно большие эпицентральные расстояния (от ~ 660 до ~ 1420 км). В то же время значения параметра Sn/Pn значительно меньше для очаговой зоны Чуйского землетрясения, чем для зоны Монголо-Алтайского землетрясения (хотя эпицентральные расстояния для этих событий различаются сравнительно мало). Для рассматриваемых трасс максимальные амплитуды также соответствуют интерференционной группе Lg.

**НЕОДНОРОДНОСТИ ПОЛЯ ПОГЛОЩЕНИЯ КОРОТКОПЕРИОДНЫХ S-ВОЛН В ЛИТОСФЕРЕ АЛТАЯ
И ИХ СВЯЗЬ С СЕЙСМИЧНОСТЬЮ**



верхняя трасса – зона очага 1931 г. (26.08.2003 г., 47.33° N, 89.27° E, h=10 км), нижняя – зона очага 2003 г. (05.11.2003 г., 50.08° N, 88.00° E, h=10 км)

а) станция Моканчи (MKAR)



верхняя трасса – зона очага 1957 г. (27.11.2011 г., 45.44° N, 99.23° E, h=10 км), средняя – зона очага 1970 г. (03.07.2003 г., 50.26° N, 90.92° E, h=10 км), нижняя – зона очага 2003 г. (27.09.2003 г., 50.02° N, 87.86° E, h=10 км)

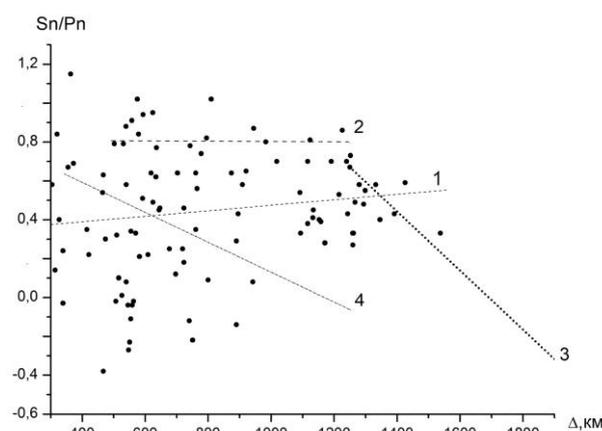
б) станция Улан-Батор (ULN)

На сейсмограммах указаны моменты вступления различных волновых групп

Рисунок 2. Примеры сейсмограмм событий из очаговых зон сильных землетрясений района Алтая. Вертикальная компонента, канал 1.25 Гц

На рисунке 3 показана зависимость параметра Sn/Pn от эпицентрального расстояния (по данным станции MKAR). Точки на рисунке в подавляющем большинстве соответствуют средним значениям, полученным для небольших зон с линейными размерами, как правило, несколько десятков километров. Несмотря на осреднение, которое позволяет уменьшить зависимость параметра Sn/Pn от диаграммы направленности излучения волн Sn и Pn, наблюдается очень большой разброс значений. Из рисунка следует, что в среднем величины Sn/Pn не падают с расстоянием, в отличие от других районов Центральной Азии [4–6]. Отметим, что данный эффект служит еще одним подтверждением вывода о том, что максимальные амплитуды в группе Sn не могут соответствовать головной волне, распространяющейся вдоль границы М [7] – очевидно, что в этом случае средняя величина параметра Sn/Pn может только уменьшаться с расстоянием.

Для сравнения на рисунке 3 приведены аналогичные данные, полученные по записям станции ULN. Видно, что для области к востоку от 90° E ($\Delta < 1300$ км) средние величины Sn/Pn находятся на уровне ~0.80, что значительно выше, чем по данным станции MKAR. В то же время, к западу от 90° E наблюдается их резкое падение (до ~0.25 при $\Delta \sim 1850$ км). Сопоставление с данными, полученными для районов Центрального Тянь-Шаня и Джунгарии по записям станции MKAR [4], показало, что при $\Delta \sim 600$ км средние величины Sn/Pn существенно выше для района Алтая (при $\Delta \sim 1000$ –1300 км различия достигают ~0.35–0.60 ед. лог.).



Показаны линии регрессии для района Алтая: 1 – по данным станции MKAR; 2, 3 – по данным станции ULN (соответственно к востоку и западу от 90° E), 4 – по данным станции MKAR (район Центрального Тянь-Шаня и Джунгарии)

Рисунок 3. Зависимость параметра Sn/Pn от расстояния для района Алтая

На рисунке 4 представлена карта поля поглощения S-волн в литосфере рассматриваемого района (по данным станции MKAR). Все величины Sn/Pn разбиты на три уровня, соответствующие пониженному ($Sn/Pn \geq 0.70$), промежуточному ($0.25 < Sn/Pn < 0.70$) и повышенному ($0.25 \leq Sn/Pn$) поглощению. Здесь, в отличие от работ [4–6], не вводились поправки за расстояние, поскольку средние величины Sn/Pn растут с Δ . Видно, что на большей части территории наблюдается относительно слабое поглощение. На этом фоне выделяется V-образная зона повышенного и отчасти промежуточного поглощения. Зона расположена в северо-западной части района, между 83° и 91° E (более широкая ее ветвь – на востоке, относительно узкая – на западе). Восточная ветвь этой зоны, вытянутая в северо-восточном направлении, пересекает высокогорные области Алтая. Западная ветвь, простирающаяся в северо-западном направлении, проходит по границе Рудного Алтая. Следует отметить, что в данном случае V-образная зона проявляется значительно более четко, чем это было приведено в [10], где было использовано относительно небольшое количество данных. Интересно, что большинство минимальных

значений параметра S_n/P_n (-0.38 – -0.03) соответствуют северо-западному краю V-образной зоны, а также очаговой зоне Чуйского землетрясения 2003 г. (очень низкие величины S_n/P_n для указанной зоны, расположенной на сравнительно небольших удалениях от станции MKAR, позволяют объяснить рост средних значений этого параметра с расстоянием). Еще одно небольшое пятно пониженных величин S_n/P_n находится к северу от оз. Убсу-Нур.

Полученные результаты хорошо согласуются с данными станции ULN, свидетельствующими о резком различии средних характеристик поля поглощения в западной и восточной частях рассматриваемого района (рисунок 3).

Сопоставление с сейсмичностью района показывает, что очаговым зонам сильных землетрясений, произошедших ранее 1990 г., включая все события с $M \geq 8.0$, соответствует пониженное и промежуточное поглощение (рисунок 4). В то же время очаг Чуйского землетрясения попадает в восточную часть зоны высокого поглощения поперечных волн. На расстоянии нескольких десятков км от южного края зоны (к юго-западу от него) располагается очаговая зона Зайсанского землетрясения 1990 г. С учетом сноса лучей в земной коре (~40–50 км для источников в верхней части земной коры при глубине границы $M \sim 50$ км [4-6]) это также свидетельствует о сильном поглощении в верхах мантии под зоной этого события.

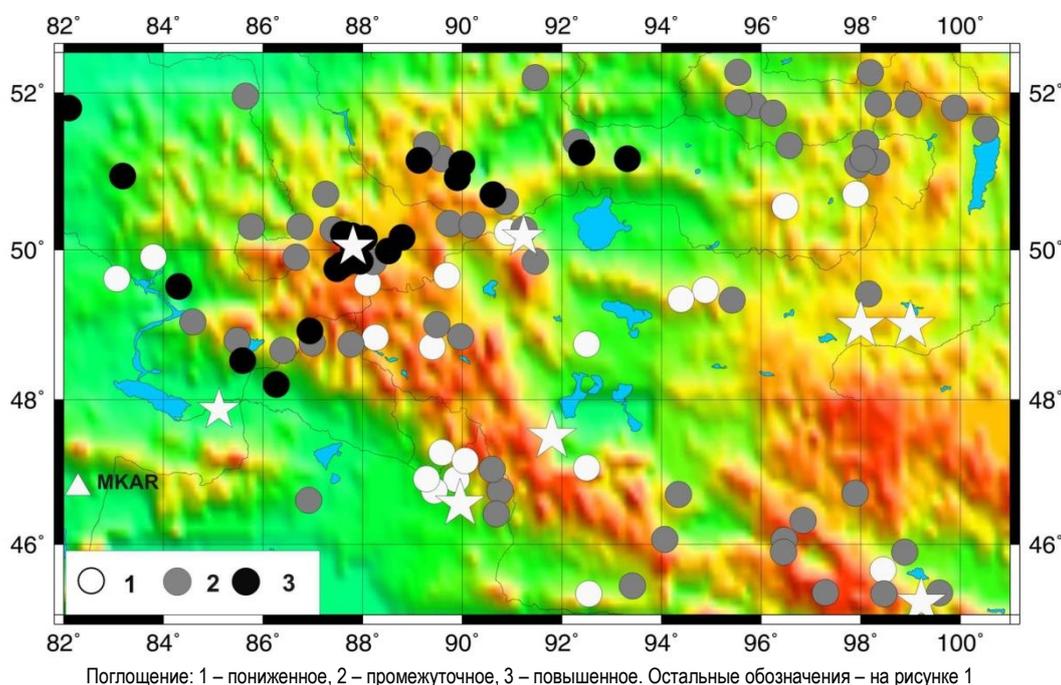


Рисунок 4. Карта поля поглощения поперечных волн в районе Алтая

Новые данные согласуются со сделанными ранее выводами об относительно высоком содержании флюидов в верхах мантии под очаговыми зонами перед сильными внутриконтинентальными землетрясениями [1-6]. Повышенное содержание флюидов, которые формируют связную сеть, приводящую к концентрации напряжений на кровле двухфазного слоя [11], обеспечивается в результате их постепенного подъема из верхов мантии [1, 3]. Известно, что в обычных условиях подъем флюидов, первоначально сконцентрированных в углах зерен породы, происходит вследствие приложения сдвиговых напряжений [12]. В этой связи следует заметить, что западная и восточная ветви V-образной зоны ориентированы в направлениях максимальных сдвиговых напряжений в земной коре Западного Алтая [9], аналогично областям сильного поглощения S-волн в

районах Гиндукуша, Памира, Центрального Тянь-Шаня и Джунгарии [4, 6].

Как показано в [1, 3], после неглубоких сильных землетрясений происходит подъем флюидов из верхов мантии в земную кору в течение нескольких десятков лет. Это позволяет объяснить пониженное поглощение S-волн в верхах мантии под очаговыми зонами сильных событий, произошедших ранее 1990 г., а также достаточно высокое поглощение в земной коре под очагами Монголо-Алтайского и Урэг-Нурского землетрясений, что было установлено ранее путем анализа вариаций отношения амплитуд волн L_g и P_g (по записям станции MKAR [10]). Подъем флюидов в зоне события 1970 г. мог произойти за время не более 30–35 лет, что не противоречит оценкам, полученным по мировым данным [1, 3].

Сопоставление с результатами, полученными для других районов Центральной Азии [4–6], показывает, что в целом поглощение S-волн в литосфере Алтая сравнительно слабое, что свидетельствует об относительно низком содержании флюидов. Возможно, именно с этим связаны достаточно большие периоды повторяемости T_p для сильных землетрясений в районе Алтая (для $M=7.0-7.5$ $T_p \sim 1-2$ тыс. лет [13]). Дело в том, что проницаемость верхнемантийных и коровых пород k очень сильно зависит от объемной доли флюидов ϕ (согласно модели Мак-Кензи [14], $k \sim \phi^3$). В связи с этим при уменьшении содержания флюидов резко возрастает время их миграции θ ($\sim 1/k$), в результате которой в верхах мантии и нижней коре может образоваться слой двухфазного материала со связанными порами и трещинами [11]. Для сравнения заметим, что в зонах субдукции, где в результате дегидратации материала погружающей-

ся океанической коры верхи мантии относительно быстро насыщаются флюидами, величины T_p для $M \sim 8.0$ составляют $\sim 100-200$ лет [15].

Данные об аномалиях параметра S_n/P_n в очаговых зонах землетрясений 1990 и 2003 гг. (так же, как и для недавних сильных событий в других районах Центральной Азии [4–6]) позволяют использовать предложенную методику для выделения областей возможной подготовки сильных землетрясений. Судя по имеющимся данным, яркая аномалия параметра S_n/P_n в районе Алтая наблюдается в северо-западной части полосы высокого поглощения, вблизи которой находится довольно крупный промышленный центр – г. Усть-Каменогорск (Казахстан). Полученные результаты свидетельствуют о необходимости более детального изучения геодинамических процессов в этой области с целью среднесрочного прогноза сильных сейсмических событий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Копничев, Ю.Ф. Пространственно-временные вариации структуры поля поглощения поперечных волн в районе Семипалатинского полигона / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Физика Земли, 2001. – № 11. – С. 73–86.
2. Копничев, Ю.Ф. Пространственно-временные вариации поля поглощения S-волн в очаговых зонах сильных землетрясений Тянь-Шаня / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Физика Земли, 2003. – № 7. – С. 35–47.
3. Копничев, Ю.Ф. Неоднородности поля поглощения короткопериодных сейсмических волн в литосфере Центрального Тянь-Шаня / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Вулканология и сейсмология, 2007. – № 5. – С. 54–70.
4. Копничев, Ю.Ф. Пространственно-временные вариации поля поглощения поперечных волн в верхней мантии сейсмически активных и слабосейсмических районов / Ю.Ф. Копничев, Д.Д. Гордиенко, И.Н. Соколова // Вулканология и сейсмология, 2009. – № 1. – С. 49–64.
5. Копничев, Ю.Ф. Неоднородности поля поглощения короткопериодных S-волн в литосфере Тянь-Шаня и Джунгарии и их связь с сейсмичностью / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // ДАН, 2010. – Т. 433. – № 6. – С. 808–812.
6. Копничев, Ю.Ф. Неоднородности поля поглощения короткопериодных S-волн в литосфере Центральной и Южной Азии и их связь с сейсмичностью / Ю.Ф. Копничев, О.К. Кунакова, И.Н. Соколова // Вестник НЯЦ РК, – 2012. – Вып. 1. – С. 147–152.
7. Копничев, Ю.Ф. Неоднородности поля поглощения короткопериодных поперечных волн в литосфере Центральной Азии и их связь с сейсмичностью / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // ДАН, 2011. – Т. 437. № 1. – С. 97–101.
8. Копничев, Ю.Ф. О природе короткопериодных сейсмических полей на расстояниях до 3000 км / Ю.Ф. Копничев, А.Р. Аракелян // Вулканология и сейсмология, 1988. – № 4. – С. 77–92.
9. Копничев Ю.Ф. Короткопериодные сейсмические волновые поля. – М.: Наука. – 1985. – 176 с.
10. Глико А.О. (ред.). Сильное землетрясение на Алтае 27 сентября 2003 г. – М.: ИФЗ РАН. – 2004. – 112 с.
11. Копничев, Ю.Ф. Картирование поля поглощения поперечных волн в земной коре и верхах мантии Алтая / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Вестник НЯЦ РК, 2010. – Вып. 1. – С. 93–99.
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. Hier-Majumder, S. Role of dynamic grain boundary wetting in fluid circulation beneath volcanic arcs / S. Hier-Majumder, D. Kohlstedt // Geophys. Res. Lett, 2006. – V. 33. – PL08305.
14. Рогожин, Е.А. Очаговые зоны сильных землетрясений Алтая в голоцене. / Е.А. Рогожин, С.Г. Платонова // М.: ОИФЗ РАН, 2002. – 130 с.
15. McKenzie D. The generation and compaction of partially molten rocks // J. Petrol, 1984. – V. 25. № 3. – P. 713–765.
16. Уеда С. Новый взгляд на Землю. – М.: Мир. – 1980. – 214 с.

**АЛТАЙДЫҢ ЛИТОСФЕРАСЫНДА ҚЫСҚАПЕРИОДТЫ S-ТОЛҚЫНДАР ЖҰТЫЛУ ӨРІСІНІҢ
БІРТЕКТІ ЕСЕМЕСТІКТЕРІ ЖӘНЕ ОЛАРДЫҢ СЕЙСМИКАЛЫҚПЕН БАЙЛАНЫСЫ**

¹⁾ Копничев Ю.Ф., ²⁾ Кунакова О.К., ²⁾ Соколова И.Н.

¹⁾ *РФА Жер физикасы институты, Мәскеу, Ресей*

²⁾ *Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатов, Қазақстан*

Алтай мен Монголия және Оңтүстік Сібірдің жанасқан аумақтарының литосферасында қысқапериодты S-толқындар жұтылу өрісін карталауы жүргізілген. Sn және Pn толқындардың максимум амплитудаларының қатынасын талдауында негізделген әдісі қолданылған. Мақаншы және Ұлан-Батор станцияларымен ~300–1900 км. қашықтықтарында алынған 500 жерсілкінулердің жазбалары өңделген. Тұтасында, ауданның батыс жағында көлденең толқындардың жұтылуы шығыстағымен салыстырғанда едәуір жоғары болуы көрсетілген. Ауданның батыс жағында мантияның жоғарында қатты жұтылудың V-тәрізді жолағы көрсетілген, оған Зайсандағы 1990 жылғы (M=6.9) және Шудағы 2003 жылғы (M=7.3) жерсілкінулердің ошақтары тұсталады. Сонымен қатар, 1970 жылға дейін болған $M \geq 7.0$ қатты жерсілкінулердің ошақ зоналарына көлденең толқындар шамалы жұтылуы үйлесіп келеді. Алтай ауданында, Орта Азияның басқа аудандарындағыдай, қатты жерсілкінулер алдында литосферада флюидтердің жоғары мөлшері бар зоналар қалыптастырылу туралы қорытындысы жасалған. Қатты сейсмикалық оқиғалардан кейін флюидтер бір неше десте жылдар ағымында мантияның жоғары жағынан жер қыртысына көтеріледі, бұл, Sn толқындар жұтылуын төмендетуіне келтіреді.

**HETEROGENEITIES OF SHORT-PERIOD S WAVE ATTENUATION FIELD
IN THE ALTAY LITHOSPHERE AND ITS RELATION TO SEISMICITY**

¹⁾ Yu.F. Kopnichev, ²⁾ O.K. Kunakova, ²⁾ I.N. Sokolova

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

²⁾ *Institute of Geophysical Research, Kurchatov, Kazakhstan*

Mapping of short-period S wave attenuation field in the lithosphere of Altay and adjacent territories of Mongolia and South Siberia have been conducted. The authors used a method based on an analysis of a ratio of maximum amplitudes for Sn and Pn waves. About 500 earthquake seismograms obtained by Makanchi and Ulan Bator stations at distances of ~300–1900 km have been processed. As a whole, shear wave attenuation is much stronger in the western part of the region relative to the eastern one. V-shaped strip of high attenuation in the uppermost mantle is picked out in the western part of the region. Rupture zones of Zaisan earthquake of 1990 (M=6.9) and Chu earthquake of 2003 (M=7.3) are connected with this strip. At the same time relatively low attenuation corresponds to rupture zones of large and great earthquakes with $M \geq 7.0$ that occurred before 1970. A conclusion has been made that zones of high fluid content in the Altay lithosphere, as in the other regions of Central Asia, are being formed prior to large shallow earthquakes. After large seismic events the fluids are ascending into the earth's crust from the uppermost mantle during a few decades, which leads to diminishing attenuation of Sn waves.

УДК 550.34

НОВЫЕ КОЛЬЦЕВЫЕ СТРУКТУРЫ СЕЙСМИЧНОСТИ В РАЙОНАХ СЕВЕРНЫХ КУРИЛ И КАМЧАТКИ

¹⁾ Копничев Ю.Ф., ²⁾ Соколова И.Н.

¹⁾ Институт физики Земли РАН, Москва, Россия

²⁾ Институт геофизических исследований, Курчатов, Казахстан

Рассматриваются пространственно-временные характеристики сейсмичности в трех областях северных Курил и южной Камчатки. Ранее в этих областях были выделены кольцевые структуры сейсмичности в двух диапазонах глубин: 0–33 и 34–70 км, сформировавшиеся за период 01.01.1973–01.01.2009 гг. Показано, что за последние 4.5 года параметры некоторых кольцевых структур существенно изменились, в первую очередь, в области между 52° и 53° N. Аналогичные изменения наблюдались перед некоторыми сильными и сильнейшими землетрясениями в других зонах субдукции. Это дает основание предполагать подготовку сильных землетрясений в рассматриваемых областях.

ВВЕДЕНИЕ

Исследованиями последних лет [1–7] установлено, что перед сильными и сильнейшими землетрясениями в зонах субдукции, как правило, формируются кольцевые структуры сейсмичности в двух диапазонах глубин: 0–33 и 34–70 км (ниже для простоты они называются соответственно “мелкими” и “глубокими” кольцами). Показано также, что эпицентры главных событий, как правило, располагаются вблизи областей пересечения или наибольшего сближения мелких и глубоких колец сейсмичности [1, 2, 4–7]. Получены корреляционные зависимости размеров таких кольцевых структур, а также пороговых значений магнитуд от энергии главных событий (M_w) для разных регионов [2, 4, 6, 7], что позволяет прогнозировать по этим параметрам магнитуды готовящихся землетрясений. Вместе с тем, на примере северо-восточной Японии показано, что характеристики кольцевых структур могут существенно изменяться в последние несколько лет перед сильным сейсмическим событием [4, 7]. В целом результаты проведенных исследований показали, что для повышения точности оценок магнитуды положения очаговых зон готовящихся землетрясений необходимо вести регулярный мониторинг параметров колец сейсмичности в интересующих районах. В данной статье проводится анализ изменения характеристик кольцевых структур в трех областях северных Курил и южной Камчатки, где ранее параметры сейсмичности были исследованы по состоянию до 01.01.2009 г. [6].

ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

В районе Курило-Камчатской дуги (рисунки 1, 2) Тихоокеанская плита погружается под Североамериканскую со скоростью ~7–8 см/год. В [8] приведены данные о результатах анализа скоростей деформации в районах северных Курил и Камчатки, полученные с использованием *Global Positioning System* (GPS). Из рисунка 1 следует, что на самом севере Курил наблюдаются высокие скорости скольжения

океанической плиты. В то же время в районе южной Камчатки скорости скольжения резко падают, что соответствует существованию “зацепов” (asperities), на которых происходит накопление деформаций.

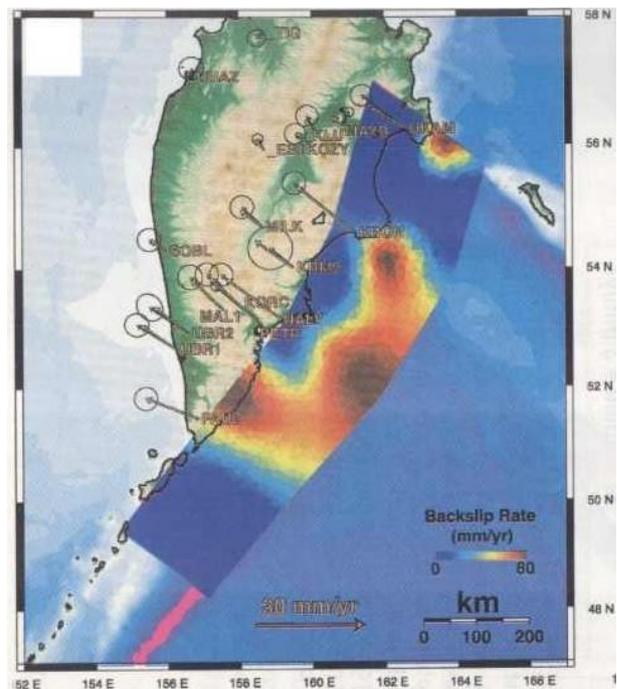


Рисунок 1. Район Курило-Камчатской дуги. Распределение скоростей смещения земной поверхности по данным GPS [8]

Начиная с 1900 г., в районе между 47° и 56.5° N произошло 9 сильных неглубоких землетрясений с $M_w \geq 7.5$, в том числе 3 события с $M_w \geq 8.0$ (таблица 1, рисунок 2).

Великое Камчатское землетрясение 4 ноября 1952 г. ($M_w=9.0$) было третьим по силе сейсмическим событием XX-го века, равным по магнитуде Суматра-Андаманскому землетрясению 26.12.2004 г. и землетрясению Тохоку 11.03.2011 г. Очаг этого события имел размеры около 600 км, он породил цуна-

ми, распространившееся по всему Тихому океану. Следует также отметить сильное землетрясение 17.05.1841 г. с $M \sim 8.4$, произошедшее в районе южной Камчатки (рисунок 2). По данным [9] средний период повторяемости событий с $M \geq 7.7$ в районе Курило-Камчатской дуги составляет 140 ± 60 лет. После 1959 г. в районах северных Курил и Камчатки событий с $M_w > 7.8$ не зарегистрировано, тогда как в районах южных и центральных Курил в 1963–2007 гг. произошло 5 землетрясений с $M_w > 8.0$.

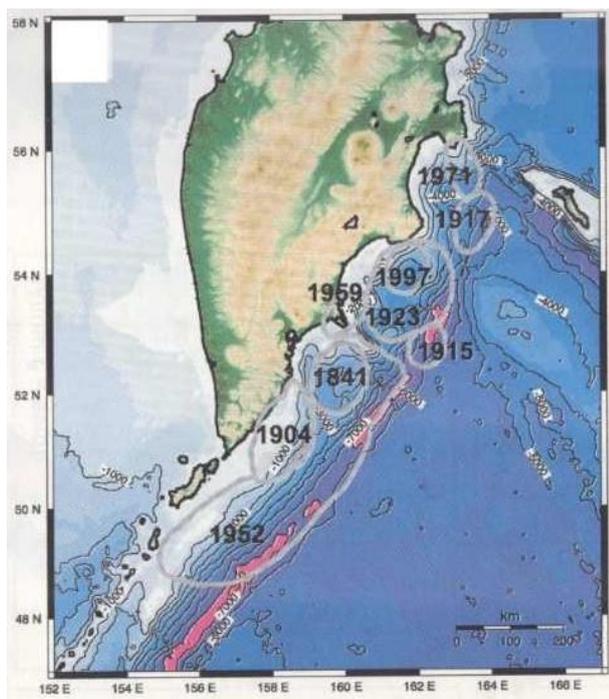


Рисунок 2. Район Курило-Камчатской дуги. Положение очаговых зон сильных и сильнейших землетрясений [8]

Следует подчеркнуть, что 24.05.2013 г. в районе Охотского моря произошло глубокофокусное землетрясение, сильнейшее зарегистрированное на Земле с начала XX-го века (глубина $h=609$ км, $M_w=8.3$). Интересно, что до этого землетрясения самым сильным глубокофокусным событием было землетрясение в Боливии 09.06.1994 г. ($h=635$ км, $M_w=8.2$).

Таблица 1. Сильные землетрясения в северной части Курило-Камчатской дуги (с начала XX-го века)

Дата	φ° N	λ° E	h, км	M_w
25.06.1904	52.00	159.00	-	7.6
05.01.1915	47.50	154.50	35	7.9
31.07.1915	54.00	162.00	-	7.5
30.01.1917	56.50	163.00	-	7.7
03.02.1923	53.85	160.76	35	8.5
04.11.1952	52.75	159.50	-	9.0
04.05.1959	53.37	159.66	35	8.0
15.12.1971	56.02	163.17	22	7.8
05.12.1997	54.80	162.00	37	7.8

Анализ, проведенный авторами, показал, что после землетрясения 09.06.1994 г. резко активизировалась неглубокая сейсмичность в обширном регионе Южной Америки. Если с 1900 по 1994 гг. здесь было зарегистрировано только 9 землетрясений с $M_w \geq 8.0$ (с глубинами гипоцентров до 45 км), то всего лишь за 20 лет (с 1995 по 2014 гг.) – 5 таких событий, причем первое из них (землетрясение в Антофагасте 30.07.1995 г. с $M_w=8.0$) произошло через год после Боливийского. Отсюда вытекает, что частота возникновения сильных неглубоких землетрясений после события 1994 г. выросла более чем в два раза. Эти данные показывают, что после землетрясения 24.05.2013 г. существует большая вероятность значительного повышения уровня сейсмической активности в районе Курило-Камчатской дуги в ближайшие годы, в первую очередь, в северной ее части, где наблюдается явный дефицит сильных землетрясений в течение последних 50 лет (таблица 1).

МЕТОДИКА И ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ

В [6] выделен ряд мелких и глубоких кольцевых структур в районах северных Курил и Камчатки. При этом рассматривались события, произошедшие за период 01.01.1973–01.01.2009 гг. Пороговые значения магнитуды M_{p1} для мелких кольцевых структур варьировались от 4.9 до 5.5, а для глубоких (M_{p2}) – от 4.6 до 5.3. Для анализа были выбраны три области с наибольшими величинами M_{p1} (5.3–5.5), которые ограничены соответственно координатами: $47\text{--}50^\circ$ N, $154\text{--}157^\circ$ E; $52.0\text{--}53.5^\circ$ N, $158\text{--}161^\circ$ E и $52\text{--}54^\circ$ N, $159\text{--}163^\circ$ E. Рассмотрено, как изменились кольцевые структуры в указанных областях через 4.5 года, до 01.07.2013 г. (использованы каталоги землетрясений геологической службы США NEIC (National Event Information Center)). Кроме пороговых значений магнитуд, кольцевые структуры характеризовались длинами больших осей (соответственно L и I для мелких и глубоких колец), а также наибольшими магнитудами землетрясений (M_{max}).

АНАЛИЗ ДАННЫХ

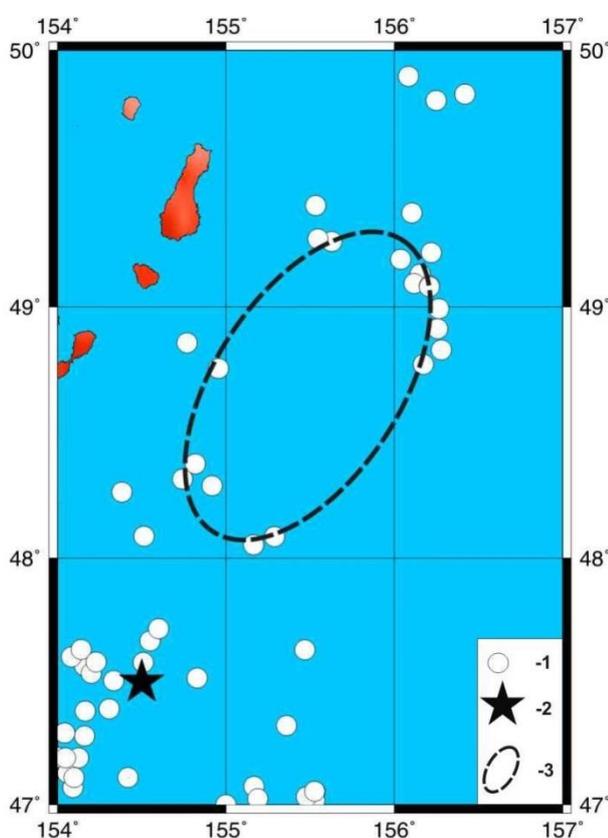
На рисунке 3 представлены характеристики сейсмичности в первой из выбранных областей (северные Курилы). На рисунке 3-а отобраны землетрясения с $M_{p1}=5.4$ за период 01.01.1973–01.01.2009 гг. Из рисунка следует, что в рассматриваемой области сформировалось довольно крупное неглубокое кольцо, вытянутое в северо-северо-восточном направлении ($L \sim 150$ км, $M_{max}=6.2$).

Рисунок 3-б иллюстрирует, как изменились параметры сейсмичности в этой области к 01.07.2013 г. Видно, что в данном случае значительно более четко прорисовались северный и северо-восточный контуры кольцевой структуры; размер кольца немного уменьшился ($L \sim 140$ км). Кроме того, выросла наибольшая магнитуда ($M_{max}=6.5$). Отметим, что северная граница мелкого кольца примерно соответствует южному краю очаговой зоны Великого Кам-

чатского землетрясения 04.11.1952 г. (рисунок 2); к юго-западу от него находится очаговая зона землетрясения 01.05.1915 г. ($M_w=7.9$).

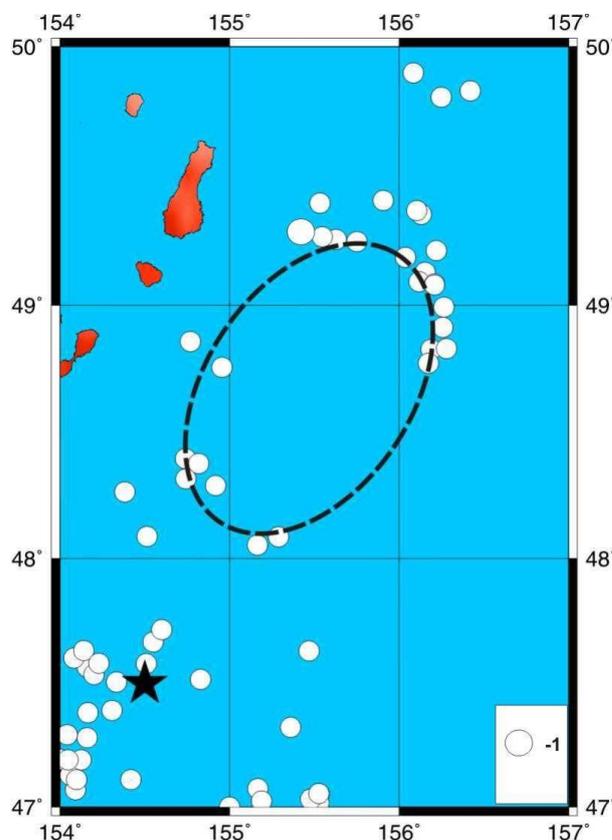
На рисунке 3-в представлена зависимость магнитуд землетрясений в области мелкого кольца от времени, из которой следует, что с 1974 по 1998 гг. ве-

личины M не превышали 5.7. В то же время в 2004–2012 гг. наблюдался резкий рост уровня магнитуд – до 6.2–6.5. Следует отметить, что наибольшая скорость сеймотектонической деформации (СТД) в области кольцевой структуры имела место в 2012 г., когда произошли три события с $M=5.6–6.5$.



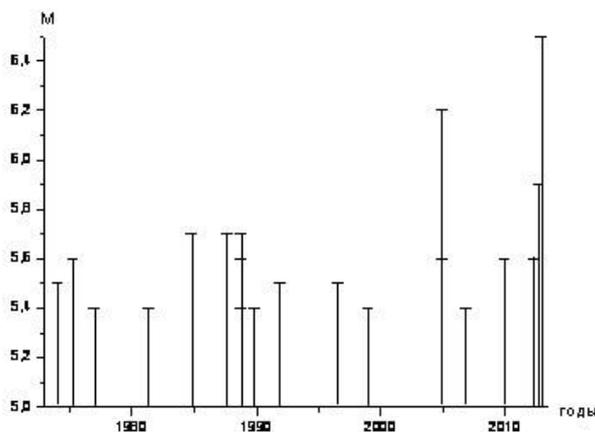
1 – эпицентры землетрясений ($5.4 \leq M < 6.5$).
2 – эпицентр землетрясения 01.05.1915 г. 3 – мелкое кольцо

а) до 01.01.2009 г.



Большой кружок – $M \geq 6.5$.
Остальные обозначения – на рисунке 3а

б) до 01.07.2013 г.



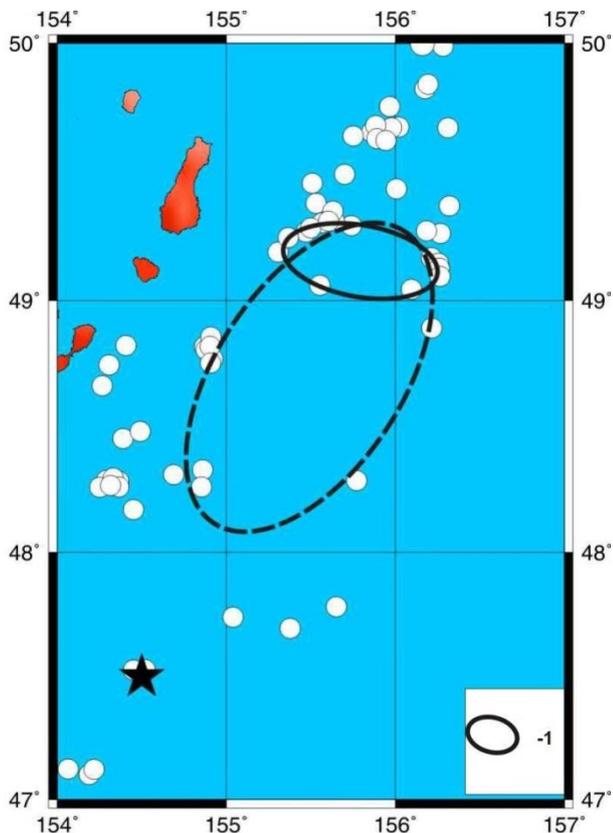
в) зависимость величин M от времени (в области мелкого кольца)

Рисунок 3. Район северных Курил. Характеристики сейсмичности для глубин 0–33 км

На рисунке 4 показаны аналогичные данные для диапазона глубин 34–70 км. В данном случае к 01.01.2009 г. четко проявилось меньшее по размеру глубокое кольцо, вытянутое в субширотном направлении (1–70 км, $M_{p2}=5.3$, см. рисунок 4-а). Следует отметить, что через 4.5 года эта кольцевая структура не изменилась, несмотря на то, что в данной области происходили события с $M>6.0$ (рисунок 4-б). Из ри-

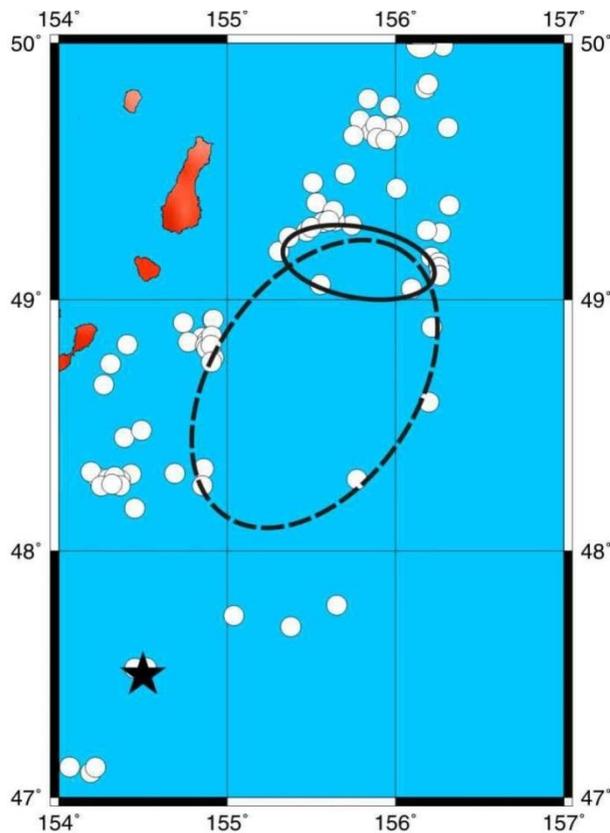
сунка видно, что мелкое и глубокое кольца пересекаются в области между 49.0° и 49.3° N.

На рисунке 4-в представлена зависимость $M(T)$ для области глубокого кольца. Видно, что наибольшая магнитуда ($M_{max}=6.3$) наблюдалась здесь в 1983 г., а максимальная скорость СТД – в 1981–1988 гг., когда произошло 5 событий с $M=5.5-6.3$. После 2003 г. землетрясений с $M \geq 5.3$ в области глубокого кольца не зарегистрировано.



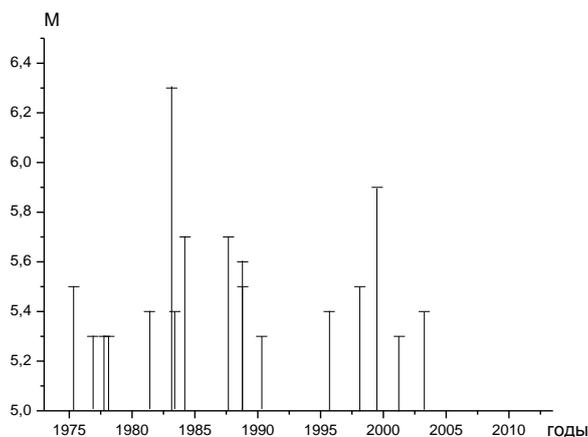
1 – глубокое кольцо. Малые кружки – $5.3 \leq M < 6.5$.
Остальные обозначения – на рисунке 3-а

а) до 01.01.2009 г.



Обозначения – на рисунке 4-а

б) до 01.07.2013 г.



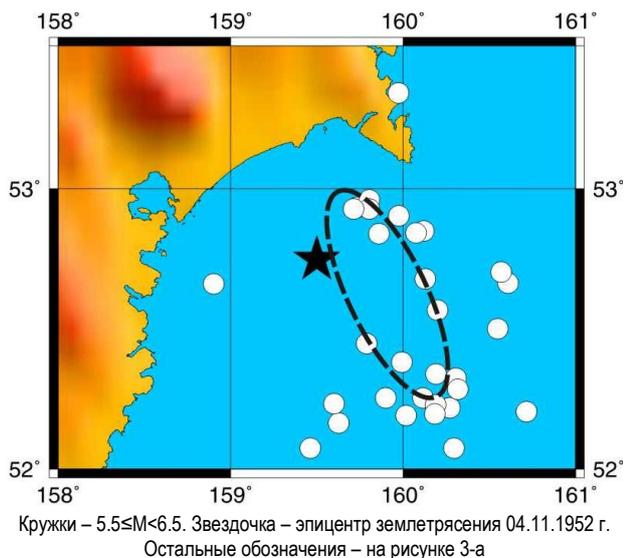
в) зависимость величин M от времени (в области глубокого кольца)

Рисунок 4. Район северных Курил. Характеристики сейсмичности для глубин 34–70 км

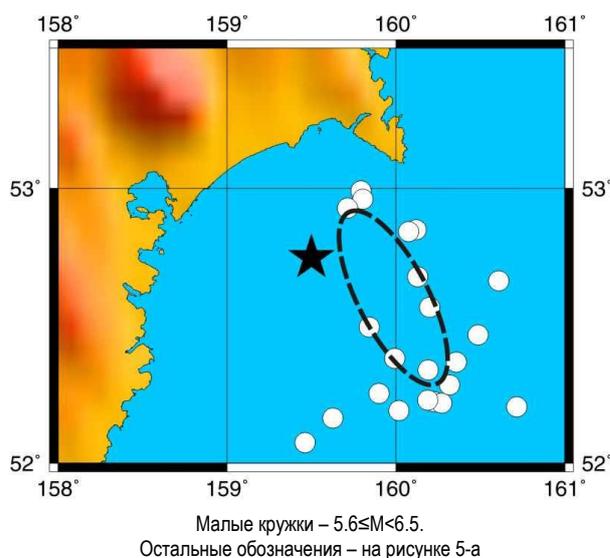
На рисунках 5, 6 приведены соответствующие данные для второй исследуемой области – района южной Камчатки (52.0–53.5° N, 158–161° E). На рисунке 5-а показаны эпицентры землетрясений с глубинами 0–33 км, зарегистрированных до 01.01.2009 г. В данном случае сформировалось нечетко выраженное мелкое кольцо (M_{п1}=5.5, L~90 км), расположенное к югу от полуострова Шипунский и вытянутое в северо-северо-западном направлении. Существенно, что к 01.07.2013 г. более четко проявилось новое кольцо чуть меньшего раз-

мера (L~80 км), но с большей величиной M_{п1} (5.6), ориентированное в том же направлении (рисунок 5-б). Интересно, что рядом с западной границей мелкого кольца находился эпицентр Великого Камчатского землетрясения 04.11.1952 г.

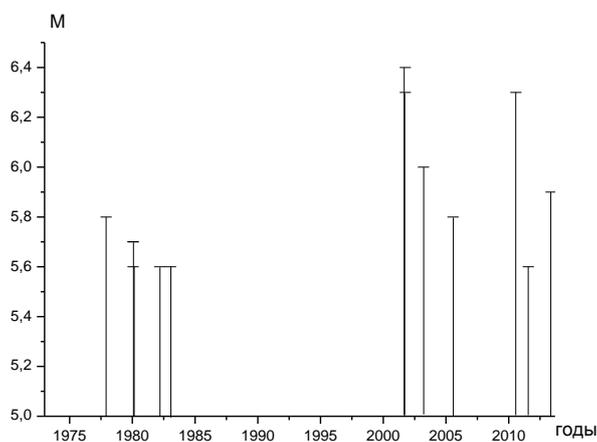
На рисунке 5-в представлена зависимость M(T) для области нового мелкого кольца. Из рисунка следует, что график имеет U-образную форму; максимальная скорость STD наблюдалась в 1977–1983 и 2001–2013 гг. Величина M_{тах} равнялась 6.4 (для землетрясения 10.08.2001 г.).



а) до 01.01.2009 г.



б) до 01.07.2013 г.



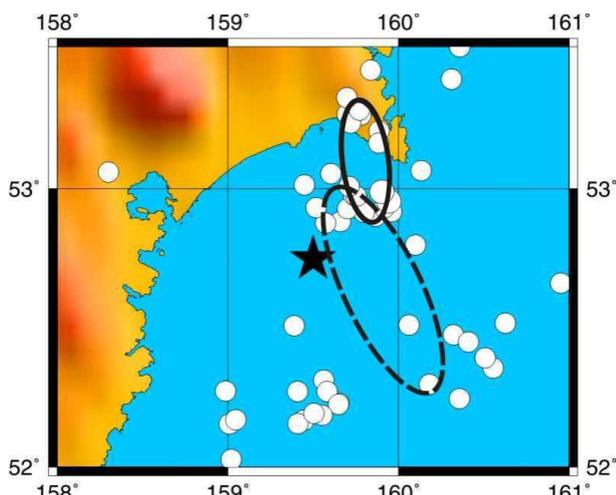
в) зависимость M землетрясений от времени (в области мелкого кольца)

Рисунок 5. Район южной Камчатки (52.0–53.5° N, 158–161° E).
Характеристики сейсмичности для глубин 0–33 км

Рисунок 6-а иллюстрирует характеристики глубокой сейсмичности за период до 01.01.2009 г. ($M_{п2}=5.2$). В данном случае проявилась нечеткая кольцевая структура, вытянутая в субмеридиональном направлении (1~50 км), которая на юге пересеклась с мелким кольцом. За последующие 4.5 года эта структура не изменилась (рисунок 6-б); вместе с тем к юго-востоку от нее появилось новое, гораздо более четко выраженное кольцо сейсмичности

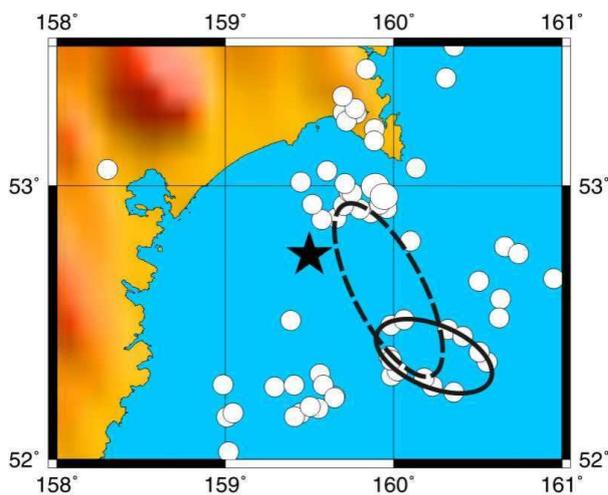
(1~50 км), ориентированное в запад-северо-западном направлении. Новая кольцевая структура пересекается с новым мелким кольцом в его юго-восточной части.

На рисунке 6-в показана зависимость $M(T)$ для нового глубокого кольца. Видно, что наибольшая скорость СТД здесь наблюдалась в 2011–2013 гг.; величина M_{max} равна 6.1 (для землетрясения 21.05.2013 г.).



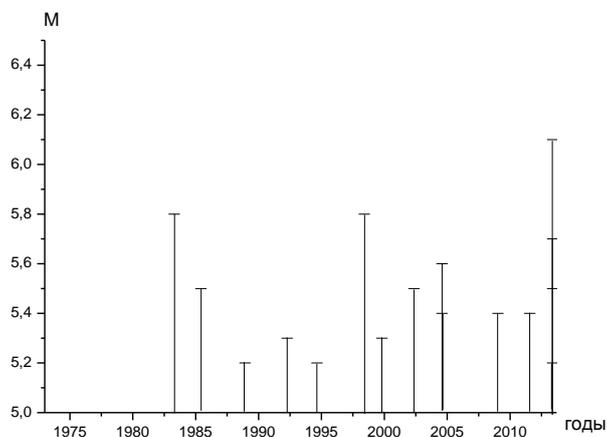
Малые кружки – $5.2 \leq M < 6.5$. Остальные обозначения – на рисунке 4-а

а) до 01.01.2009 г.



Малые кружки – $5.2 \leq M < 6.5$. Остальные обозначения – на рисунке 6-а

б) до 01.07.2013 г.



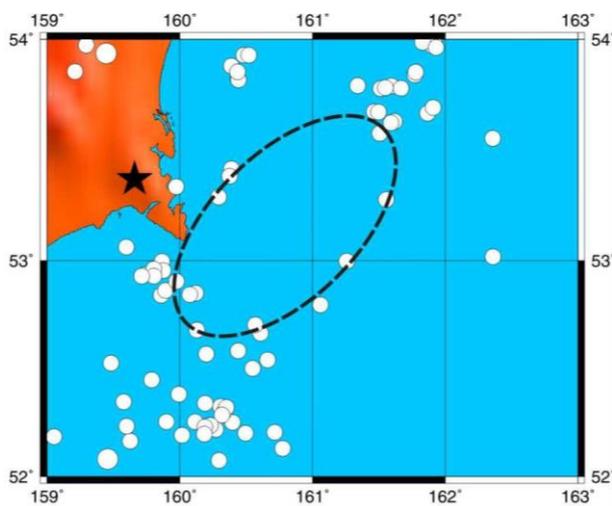
в) зависимость величин M от времени (в области глубокого кольца)

Рисунок 6. Район южной Камчатки ($52.0-53.5^\circ N$, $158-161^\circ E$).
Характеристики сейсмичности для глубин 34–70 км

На рисунках 7, 8 представлены характеристики сейсмичности для третьей рассматриваемой области – района южной Камчатки (52.0–53.5° N, 158–161° E). Из рисунка 7-а следует, что к 01.01.2009 г. здесь сформировалось довольно большое мелкое кольцо (M_{п1}=5.3, L~140 км), вытянутое в северо-восточном направлении. Кольцо почти касалось Шипунского полуострова. К западу от кольца сейсмичности расположен эпицентр землетрясения

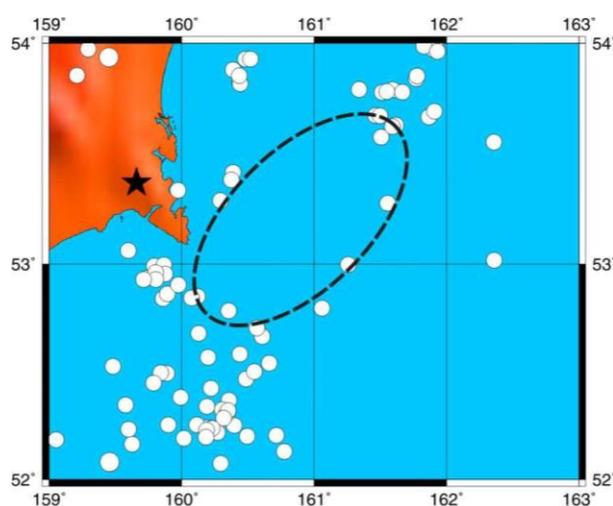
04.05.1959 г. (M_w=8.0). Анализ новых данных (рисунок 7-б) показал, что к 01.07.2013 г. мелкое кольцо почти не изменилось (L~140 км).

На рисунке 7-в показана зависимость M(T) для области мелкого кольца. Видно, что магнитуда самого сильного события M_{max} здесь равна 6.3 (для землетрясения 08.10.2001 г.); наибольшие скорости STD наблюдались в 1973 и 2001–2005 гг.



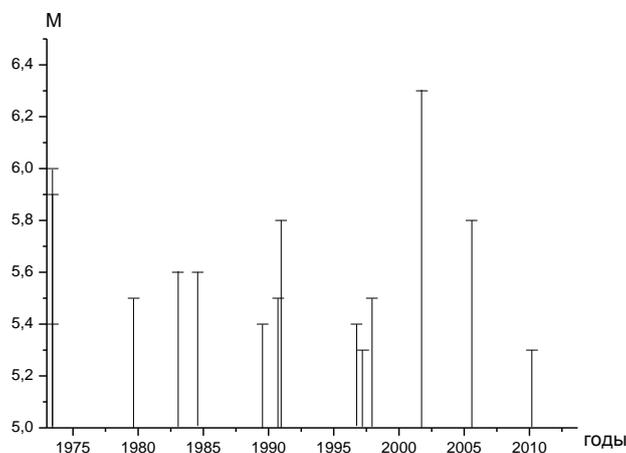
Малые кружки – 5.3 ≤ M < 6.5. Звездочка – эпицентр землетрясения 04.05.1959 г. Остальные обозначения – на рисунке 3-а

а) до 01.01.2009 г.



Обозначения – на рисунке 7-а

б) до 01.07.2013 г.

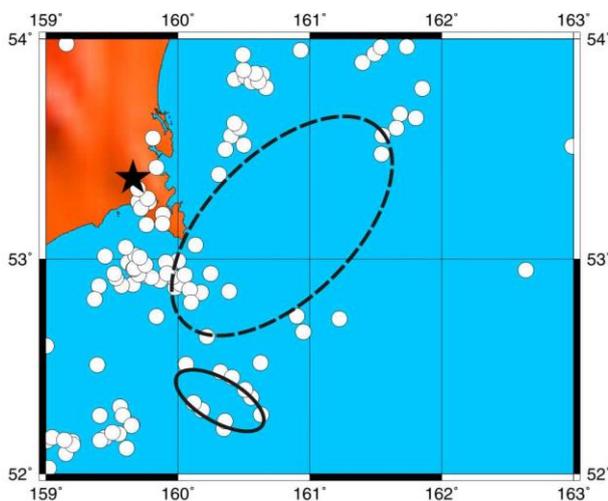


в) зависимость величин M от времени (в области мелкого кольца)

Рисунок 7. Район южной Камчатки (52.0–54° N, 159–163° E). Характеристики сейсмичности для глубин 0–33 км

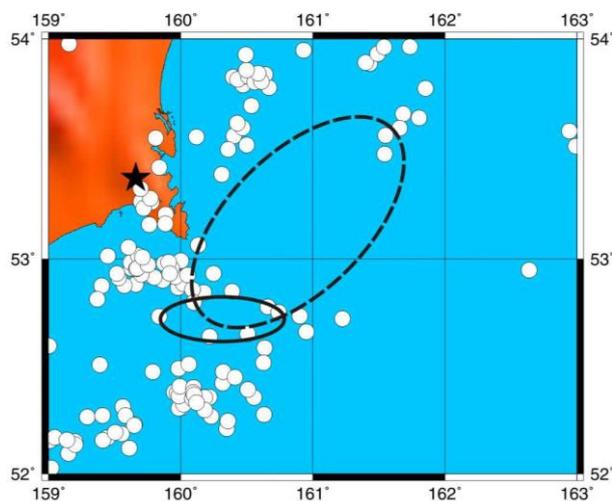
На рисунке 8 представлены характеристики сейсмичности на глубинах 34–70 км. К 01.01.2009 г. к югу от Шипунского п-ова сформировалось глубокое кольцо с M_{п2}=5.0 (рисунок 8-а), практически совпадающее с глубоким кольцом, показанным на рисунке 6б (l~50 км). Мелкое и глубокое кольца почти касались в области около 52.5° N. Из рисунка 8-б следует, что к 01.07.2013 г. это кольцо распалось; вместе с тем начала прорисовываться новая глубокая

кольцевая структура, расположенная чуть севернее и вытянутая в субширотном направлении (M_{п2}=5.0, l~50 км). Новое мелкое и глубокое кольца пересекаются около широты 52.8° N. Рисунок 8-в демонстрирует, что в области нового глубокого кольца скорость STD резко выросла в 2011–2013 гг., хотя величина M_{max} относительно мала (5.5 для землетрясения 21.05.2013 г.).



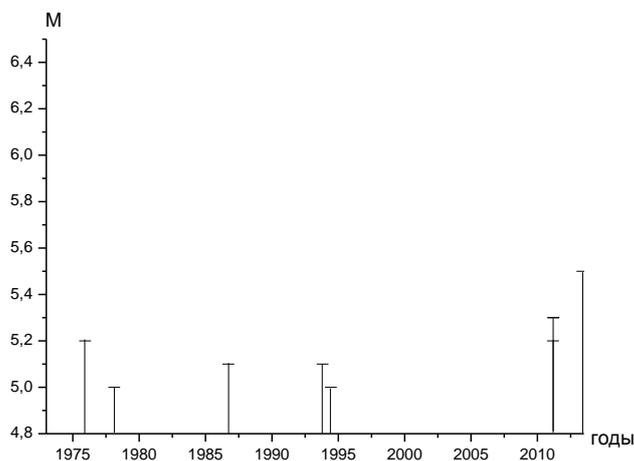
Малые кружки – $5.0 \leq M < 6.5$. Остальные обозначения – на рисунке 7-а

а) до 01.01.2009 г.



Обозначения – на рисунке 8-а

б) до 01.07.2013 г.



в) зависимость M землетрясений от времени (в области глубокого кольца)

Рисунок 8. Район южной Камчатки ($52.0-54^\circ N$, $159-163^\circ E$).
Характеристики сейсмичности для глубин 34–70 км

Оценка магнитуд возможных сильных землетрясений. Для прогнозирования величин M_w использованы корреляционные зависимости размеров мелких и глубоких колец сейсмичности, а также величин $M_{п1}$ и $M_{п2}$ от магнитуд главных событий для северо-запада Тихого океана (районы северо-восточной Японии, Курил, Камчатки и запада Алеутских островов) [10]. Эти зависимости имеют достаточно высокие значения коэффициентов корреляции r :

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

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

В таблице 2 приведены результаты оценки средних величин M_w , полученные по формулам (1) и (2).

Таблица 2. Оценки магнитуд возможных сильных землетрясений

$\varphi^\circ N$	$\lambda^\circ E$	$M_{п1}$	$M_{п2}$	M_w
47,0–50,0	154,0–157,0	5.4	5.3	8.8 ± 0.2
52,0–53,5	158,0–161,0	5.6	5.2	8.8 ± 0.2
52,0–54,0	159,0–163,0	5.3	5.0	8.5 ± 0.2

ОБСУЖДЕНИЕ

Приведенные в статье и ранее полученные [6] данные свидетельствуют о том, что в районах северных Курил и южной Камчатки достаточно четко проявляются мелкие и глубокие кольцевые структуры сейсмичности, аналогичные выявленным в других зонах субдукции [1, 2, 4, 5, 7]. Корреляция кольцевых структур и неоднородностей поля поглощения короткопериодных поперечных волн [3] позволила сделать вывод, что образование колец сейсмичности облегчает подъем глубинных флюидов и в целом отражает процессы самоорганизации геологических структур [11], ведущих к уменьшению потенциальной энергии Земли. Положение эпицентров сильных землетрясений вблизи областей пересечения или наибольшего сближения мелких и глубоких колец сейсмичности [1, 2, 4, 5, 7], скорее всего, связано с тем, что в таких областях достигается наибольшая мощность двухфазного слоя с заметной долей флюидов [3, 5]. В случае, когда флюиды образуют связную сеть, на кровле такого слоя обеспечивается концентрация напряжений [12], приводящая в конечном счете к подвижке при сильном землетрясении. Этот эффект, а также зависимость пороговых значений магнитуды от энергии готовящегося события [2, 4, 6, 7] позволяют прогнозировать положение очага и магнитуду сильного землетрясения. Проведенный в [4, 7] анализ характеристик сейсмичности в районе северо-восточной Японии показал, что за последние 2–3 года перед землетрясением Тохоку 11.03.2011 г. резко изменились характеристики мелкого кольца сейсмичности в окрестностях будущего эпицентра, в то время как для других кольцевых структур, располагавшихся в очаговой зоне, такие изменения были незначительными. За два года до Суматра-Андаманского землетрясения 26.12.2004 г. ($M_w=9.0$) также существенно увеличилась скорость СТД в области мелкой кольцевой структуры, сформировавшейся перед этим событием [3]. Такие факты дают основание предполагать, что в ближайшие годы сильное землетрясение наиболее вероятно во втором из рассмотренных районов, где резко изменились характеристики кольцевых структур начиная с 2010 г. При этом размер очаговой зоны может быть в несколько раз больше размеров отдельных кольцевых структур и, в частности, она может включать также кольцевые структуры, образовавшиеся в третьей области. Аналогичный эффект наблюдался,

например, при землетрясении Тохоку 11.03.2011 г., когда в очаговую зону вошли три пары колец сейсмичности [7].

Оценки величин M_w для возможных сильных землетрясений, приведенные в таблице 2, следует рассматривать лишь в качестве первого приближения. Возможно, оценки завышены, поскольку основаны на корреляционных зависимостях, полученных для большого района. Не исключено, что отдельно для северных Курил и южной Камчатки такие зависимости могут заметно отличаться от зависимостей, описанных формулами (1) и (2).

Сопоставление с полем скоростей деформации, полученным методом GPS [8], показало, что в первом изученном районе, в области пары колец сейсмичности, наблюдается высокая скорость скольжения Тихоокеанской плиты, погружающейся под Охотское море. Это может свидетельствовать о незначительном накоплении деформаций в данной области. В то же время областям второй и третьей пар кольцевых структур соответствуют контрастные зоны – высокая скорость скольжения к западу от этих структур резко изменяется на очень низкую к востоку от них. Это свидетельствует о существовании зацепов к востоку от кольцевых структур, где происходит накопление деформаций [8]. Таким образом, данные о кольцевых структурах и геодезические данные говорят о возможной подготовке сильного землетрясения в этих областях.

Следует отметить, что пара колец во втором районе попадает в очаговые зоны двух сильнейших землетрясений – 17.05.1841 г. ($M=8.4$) и 04.11.1952 г. (рисунок 2 [8]). Вместе с тем, анализ данных о цунами, сопровождавшем Великое Камчатское землетрясение, показывает, что максимальные подвижки при этом событии наблюдались к югу от $52^\circ N$, т.е. к северу от указанной параллели высвобождение деформации было сравнительно небольшим [13]. Отсюда может следовать, что в области второй пары колец сейсмичности готовится аналог землетрясения 1841 г. (это не противоречит оценкам среднего периода повторяемости для сильных землетрясений в районе Курило-Камчатской дуги [9]). С учетом того, что эта область находится вблизи г. Петропавловск-Камчатский, здесь необходимо проводить постоянный мониторинг различных геофизических и геохимических полей с целью среднесрочного прогноза сильного землетрясения.

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 кольцевой сейсмичности в разных диапазонах глубин в районах Курил и Камчатки / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Вестник НЯЦ РК. 2009. – Вып. 3. – С. 76–87.
7. Копничев, Ю.Ф. Кольцевые структуры сейсмичности в районе северо-восточной Японии и катастрофическое землетрясение Тохоку 11 марта 2011 г. ($M_w=9.0$) / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Вестник НЯЦ РК. 2012. – Вып. 1. С. 121–130.
8. Burgmann, R. Interseismic coupling and asperity distribution along the Kamchatka subduction zone / R. Burgmann, M. Kogan, M. Steblov, G. Hillel, V. Levin, E. Apel // J. Geophys. Res. 2005. – V. 110. B07405.
9. Федотов, С.А. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на 2006-2011 гг. и успешный прогноз Средне-Курильского землетрясения / С.А. Федотов, А.В. Соломатин, С.Д. Чернышев // Вулканология и сейсмология. 2007. – № 3. – С. 3–25.
10. 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.
11. Летников, Ф.А. Синергетика геологических систем. – Новосибирск: Наука, 1992. – 229 с.
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. Innes, B. Slip distribution of the 1952 Kamchatka great earthquake based on near-field tsunami deposits and historical record / B. Innes, R. Weiss, J. Bourgeois, T. Pinegina // Bull. Seismol. Soc. Amer. 2010. – V. 100. N 4. – P. 1695–1709.

СОЛТҮСТІК КУРИЛДЕР ЖӘНЕ КАМЧАТКА АУДАНДАРЫНДА СЕЙСМИКАЛЫҚТЫҢ ЖАҢА САҚИНАЛЫ ҚҰРЫЛЫМДАРЫ

¹⁾ Копничев Ю.Ф., ²⁾ Соколова И.Н.

¹⁾ *РФА Жер физикасы институты, Мәскеу, Ресей*

²⁾ *Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатов, Қазақстан*

Солтүстік Курилдер мен Камчатканың үш аймақтарында сейсмикалықтың кеңістік-уақыттық сипаттамалары қарастырылуда. Бұрын бұл аймақтарда, тереңдіктің екі ауқымында – 0–33 және 34–70 км., 1973 ж. 01.01 – 2009 ж. 01.01 кезеңінде қалыптастырылған сейсмикалықтың сақиналы құрылымдары айқындалған. Соңғы 4.5 жыл ішінде сейсмикалықтың кейбір құрылымдары, бірінші кезегінде $N 52^\circ$ және 53° арасындағы аймағында, едәуір өзгерілгені көрсетілген. Тәрізді өзгерістер кейбір қатты және өте қатты жерсілкінулер алдында субдукцияның басқа зоналарында байқалған. Бұл, қарастырылудағы аймақтарда, қатты жерсілкінулер дайындалуда болуын жорамалдауына негізін береді.

NEW RING-SHAPED SEISMICITY STRUCTURES IN THE REGIONS OF KURILS AND KAMCHATKA

¹⁾ Yu.F. Kopynichev, ²⁾ I.N. Sokolova

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

²⁾ *Institute of Geophysical Research, Kurchatov, Kazakhstan*

This paper presents spatial-temporal seismicity characteristics in three areas of the northern Kurils and southern Kamchatka. Earlier ring-shaped seismicity structures were picked up in these areas in two depth ranges: 0–33 and 34–70 km, which have been formed during a period of 01.01.1973-01.01.2009. It was shown, that after this period during the last 4.5 years parameters of some ring-shaped structures changed essentially, first of all within the range between 52° and 53° N. Similar changes were observed prior to some large and great earthquakes in the other subduction zones. This gives a reason to suggest a preparation for large earthquakes in these areas.

УДК 550.344 + 550.34

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛЯ ПОГЛОЩЕНИЯ S-ВОЛН В ОЧАГОВЫХ ЗОНАХ ДВУХ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ЮЖНОЙ АЗИИ И ИХ СВЯЗЬ С СЕЙСМИЧНОСТЬЮ

¹⁾ Копничев Ю.Ф., ²⁾ Соколова И.Н.

¹⁾ Институт физики Земли РАН, Россия

²⁾ Институт геофизических исследований, Курчатов, Казахстан

Исследуются характеристики очаговых зон двух сильных землетрясений Южной Азии (Кашмирского 08.10.2005 г., $M_w=7.6$ и Бхуджского 26.01.2001 г., $M_w=7.7$). Использован метод, основанный на анализе отношений амплитуд волн S_n и P_n по записям станций ААК (Кыргызстан) и NIL (Пакистан). Показано, что в очаговых зонах межплитного Кашмирского и внутриплитного Бхуджского землетрясений наблюдается соответственно сильное и слабое поглощение S-волн в литосфере. Перед Кашмирским землетрясением (в отличие от Бхуджского) сформировалась кольцевая структура сейсмичности. Кроме того, после Кашмирского землетрясения зарегистрировано в несколько раз больше афтершоков с $M \geq 5.0$, чем после Бхуджского. Предполагается, что большие вариации структуры полей поглощения и сейсмичности связаны с резким различием содержания глубинных флюидов в литосфере двух изучаемых очаговых зон.

ВВЕДЕНИЕ

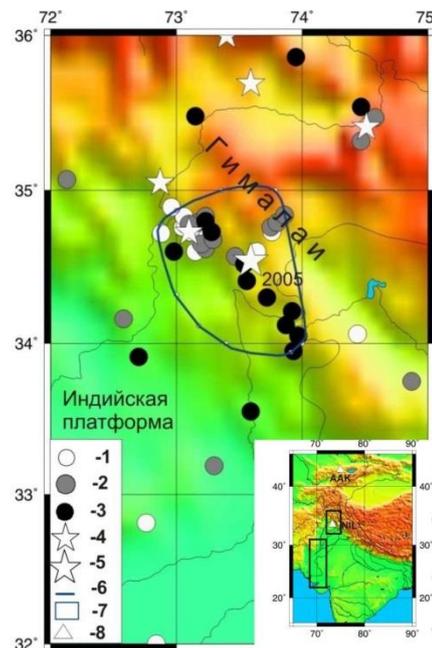
В [1-6] выявлены существенные различия в характеристиках сейсмичности, проявляющейся перед сильными межплитными (interplate) и внутриплитными (intraplate) землетрясениями. Перед межплитными событиями, которые происходят в областях с относительно высокой скоростью деформации литосферы [7], как правило, формируются кольцевые структуры сейсмичности, характеризующиеся пороговыми значениями магнитуд (M_p). Величины M_p , а также размеры кольцевых структур существенно растут с ростом магнитуды (M_w) главных событий [1, 3, 4, 5]. В то же время такие структуры не образуются перед внутриплитными землетрясениями [5, 6]. Для выяснения природы этих различий целесообразно провести анализ содержания флюидов в очаговых зонах сильных землетрясений, существенно влияющих на вязкость пород земной коры и верхов мантии, которая определяет скорость деформации литосферы [8]. Для оценки роли флюидов в настоящей работе проводится изучение неоднородностей поля поглощения S-волн в очаговых зонах двух сильных землетрясений, произошедших в начале XXI-го века в регионе Южной Азии: Бхуджского 26.01.2001 г. ($M_w=7.7$) и Кашмирского 08.10.2005 г. ($M_w=7.6$). Характеристики поля поглощения сопоставляются с некоторыми особенностями афтершоковых процессов для этих событий.

СЕЙСМИЧНОСТЬ РАЙОНОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Рассматриваемые районы Южной Азии ограничены координатами $32^\circ-36^\circ N$, $72^\circ-75^\circ E$ и $22^\circ-31^\circ N$, $68.5^\circ-72.0^\circ E$, соответственно (рисунок 1). Первый из этих районов для краткости назван “северным”, а второй – “южным”.

Северный район включает северо-западный участок Гималаев с вершинами, достигающими 8126 м (гора Нангапарбат), и северную окраину Индийской платформы. Начиная с 1950 г. здесь произошло 6 сейсмических событий с $M \geq 6.0$, включая печально

известное Кашмирское землетрясение 08.10.2005 г. На рисунке 2 показана область афтершоков этого межплитного события (отобраны землетрясения с $m_b \geq 4.5$ за два месяца). Сильнейший повторный толчок, произошедший 08.10.2005 г., имел магнитуду 6.4. Количество афтершоков с $M \geq 5.0$, зарегистрированных в течение 30 дней после главного события, составляет $N_{5.0}=43$.

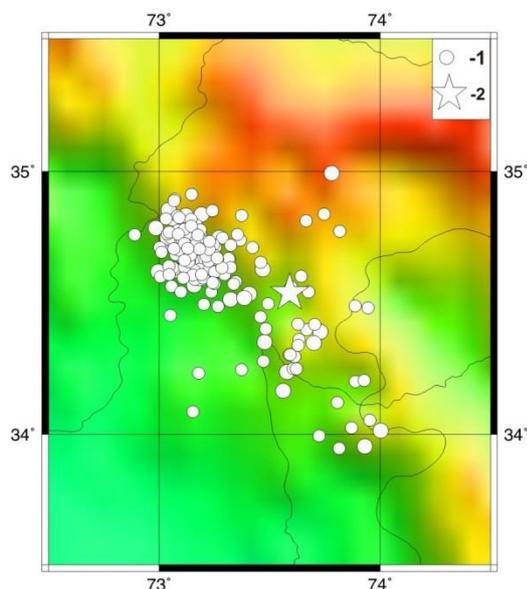


Поглощение: 1 – пониженное; 2 – промежуточное; 3 – повышенное. Эпицентры сильных землетрясений: 4 – $M=6.0-6.5$; 2 – $M_w=7.6$; 6 – область афтершоков. На врезке: 7 – северный и южный районы; 8 – сейсмическая станция

Рисунок 1. Северный район. Элементы сейсмичности и поля поглощения S-волн

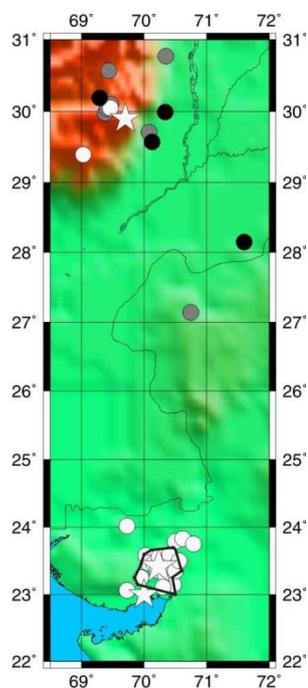
Южный район (рисунок 3) практически целиком расположен на Индийской платформе. С начала XX-го века здесь зарегистрированы 3 землетрясения с

$M \geq 6.0$, причем два из них произошли в области Качского рифта. Бхуджское землетрясение 26.01.2001 г. было одним из сильнейших внутриплитных событий в континентальных районах за последние 200 лет [7]. Судя по имеющимся историческим данным, предыдущее землетрясение примерно такой же энергии произошло в этой области в 1819 г. [7].



1 – афтершоки (увеличение размера кружка соответствует росту магнитуды); 2 – эпицентр главного события

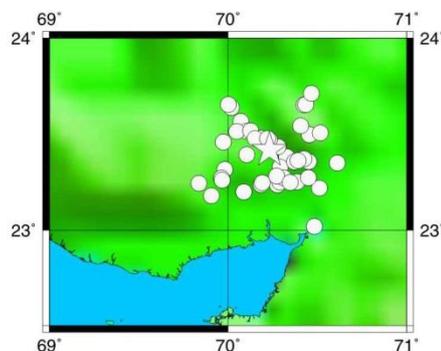
Рисунок 2. Кашмирское землетрясение 08.10.2005 г. Область афтершоков



Большая звездочка – эпицентр Бхуджского землетрясения. Остальные обозначения – на рисунке 1

Рисунок 3. Южный район. Элементы сейсмичности и поля поглощения S-волн

На рисунке 4 показаны афтершоки с $M \geq 4.5$, произошедшие за 2 месяца после землетрясения 26.01.2001 г. Общее количество афтершоков с $M \geq 5.0$ в несколько раз меньше, чем в случае Кашмирского землетрясения ($N_{5.0}=9$).



Обозначения – на рисунке 2

Рисунок 4. Бхуджское землетрясение 26.01.2001 г. Область афтершоков

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Выделение кольцевых структур сейсмичности.

Методика выделения таких структур имеет следующие особенности [1, 3-5, 9]:

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

- Рассматриваются параметры сейсмичности в двух диапазонах глубин: 0–33 и 34–70 км, в которых формируются кольцевые структуры.

- Производится перебор пороговых магнитуд M_p (в обоих диапазонах глубин) с целью определения оптимальных значений, при которых кольцевые структуры выделяются наиболее четко. При меньших значениях M_p кольца сейсмичности “расплываются”, а при больших – прорисовываются гораздо хуже.

- Кольцевые структуры характеризуются величинами M_p , M_{max} (наибольшая магнитуда), L (длина большой оси кольца сейсмичности) и T_p (время формирования).

Изучение характеристик поля поглощения. Для анализа характеристик поля поглощения использована методика, основанная на анализе отношений максимальных амплитуд в волнах Sn и Pn (параметра $Ig(ASn/APn)$), который для краткости далее обозначен как Sn/Pn. Ранее было установлено, что группа Sn формируется поперечными волнами, отраженными от многочисленных субгоризонтальных границ в верхней мантии [10]. При этом основное поглощение волн Sn приходится на самые верхи мантии. Параметр Sn/Pn использован для нормировки, т.к. волны Sn и Pn распространяются по близким трассам. Поглощение S-волн существенно зависит от частоты, поэтому при анализе записей применялась узкополосная фильтрация (использовался

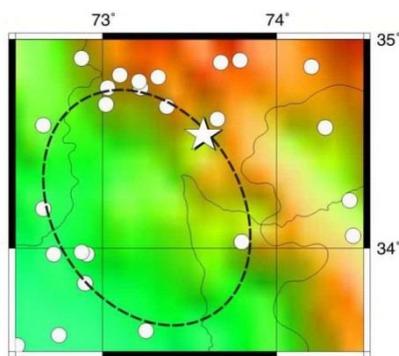
фильтр с центральной частотой 1.25 Гц и полосой пропускания 2/3 октавы [11]). Для минимизации эффекта азимутальной направленности волн Р и S проводилось осреднение величин Sn/Pn для близких эпицентров (как правило, для площадок с линейными размерами несколько десятков километров).

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

При анализе сейсмичности исследуемых районов использован каталог сейсмичности NEIC (National Event Information Center) Геологической службы США, начиная с 1973 г. Картирование поля поглощения проведено по записям местных землетрясений, полученным станциями Ала-Арча (ААК, Кыргызстан) и Нилоре (NIL, Пакистан) в 1995–2009 гг. на эпицентральных расстояниях соответственно ~750–1200 и 400–1250 км (рисунок 1). В общей сложности обработано около 200 записей коровых землетрясений с глубинами гипоцентров от 0 до 33 км.

АНАЛИЗ ДАННЫХ

Северный район. На рисунке 5 представлены характеристики сейсмичности в районе Кашмира перед землетрясением 08.10.2005 г. (в диапазоне глубин 0–33 км). Из рисунка следует, что перед этим событием образовалась кольцевая структура сейсмичности ($M_p=4.2$, $M_{max}=5.2$, $L\sim 130$ км, $T_p=28$ лет), ориентированная в северо-западном направлении. Эпицентр главного землетрясения располагался на северо-восточном крае кольца сейсмичности.

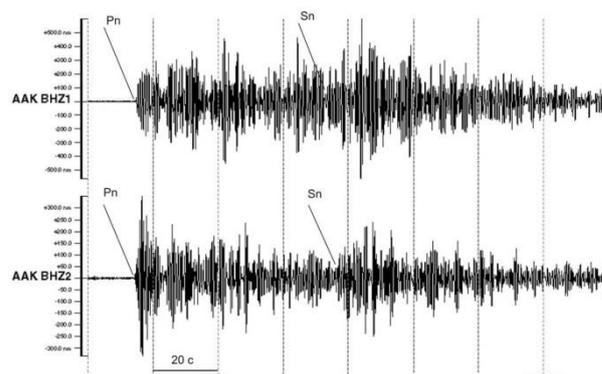


Звездочка – эпицентр главного события; пунктир – кольцевая структура сейсмичности

Рисунок 5. Северный район. Кольцевая структура сейсмичности, сформировавшаяся перед Кашмирским землетрясением 08.10.2005 г. ($M_p=4.2$)

Сопоставление рисунков 2 и 5 показывает, что кольцевая структура смещена относительно облака афтершоков к юго-западу. В то же время, в отличие от зон субдукции [1, 3-5], в данном случае не сформировалось глубокое кольцо сейсмичности (на глубинах 34–70 км).

На рисунке 6 приведены примеры записей землетрясений из северного района, полученных примерно на одинаковых эпицентральных расстояниях.



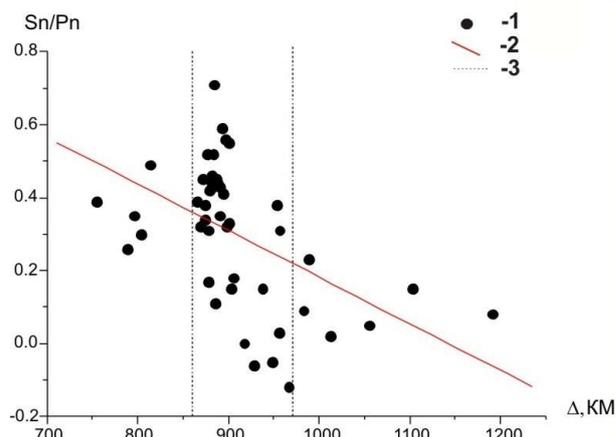
Верхняя трасса – к востоку от очаговой зоны Кашмирского землетрясения (23.02.1999 г., 34.06° N, 74.44° E, $\Delta=952$ км); нижняя – в очаговой зоне (08.08.2007 г., 34.25° N, 73.68° E, $\Delta=934$ км). Стрелки – моменты вступления волн Pn и Sn

Рисунок 6. Северный район. Примеры записей землетрясений, полученных станцией ААК

Из рисунка 6 видно, что для события в очаговой зоне Кашмирского землетрясения 08.10.2005 г. амплитуда группы волн Sn относительно Pn гораздо меньше, чем для события, произошедшего к востоку от очага. Следует отметить, что в данном случае для трасс, проходящих по горным районам, на сейсмограммах отсутствует коровая группа Lg. На рисунке 7 показана зависимость параметра Sn/Pn от эпицентрального расстояния для трасс, пересекающих северный район. Каждая точка на графике представляет среднее значение параметра Sn/Pn для небольшого участка. Несмотря на выполненное осреднение, наблюдается достаточно большой разброс данных (от 0.71 до -0.12); уравнение линейной регрессии имеет вид:

$$Sn/Pn \sim 1.46 - 0.0013\Delta \text{ (км)}, \quad r = -0.50, \quad (1)$$

где r – коэффициент корреляции.



1 – индивидуальные данные; 2 – линия регрессии; 3 – границы очаговой зоны Кашмирского землетрясения

Рисунок 7. Северный район. Зависимость параметра Sn/Pn от эпицентрального расстояния

Рисунок 8 иллюстрирует зависимость параметра Sn/Pn от эпицентрального расстояния непосредственно в очаговой зоне Кашмирского землетрясения. Как следует из этого рисунка, имеет место очень быстрое уменьшение средних величин Sn/Pn с расстоянием, при этом уравнение линейной регрессии описывается формулой:

$$\text{Sn/Pn} \sim 4.68 - 0.0049\Delta \text{ (км)}, r=-0.56 \quad (2)$$

На трассах, пересекающих очаговую зону, значение параметра Sn/Pn уменьшается в среднем примерно на 0.45 на расстоянии ~90 км.

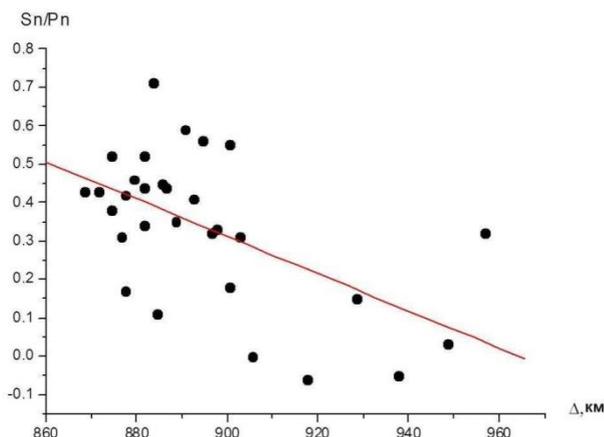


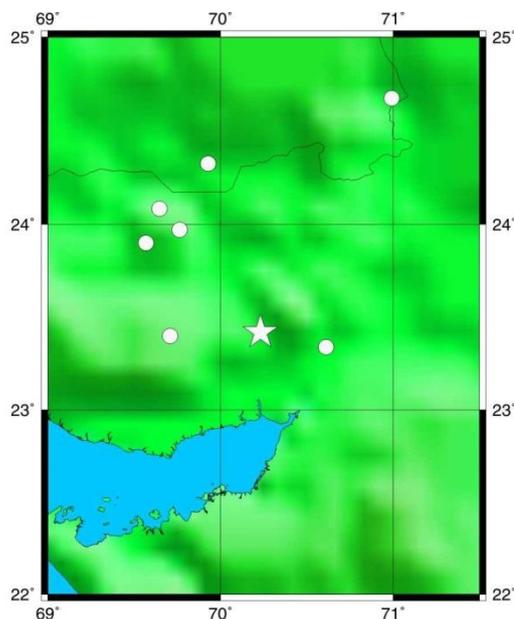
Рисунок 8. Очаговая зона Кашмирского землетрясения. Зависимость параметра Sn/Pn от эпицентрального расстояния

Неоднородности поля поглощения в северном районе показаны на рисунке 1, где приведены значения параметра Sn/Pn, “исправленные” за эпицентрального расстояния (отклонения от средней зависимости (1)). Все величины Sn/Pn разбиты на три уровня, соответствующие пониженному ($\text{Sn/Pn} > 0.10$), промежуточному ($0.10 \geq \text{Sn/Pn} \geq -0.10$) и повышенному ($\text{Sn/Pn} < -0.10$) поглощению S-волн. Из рисунка 1 следует, что поле поглощения в северном районе характеризуется большой неоднородностью. В горных областях преобладает промежуточное и высокое поглощение поперечных волн. На северной окраине Индийской платформы (по небольшому числу данных) наблюдается пониженное поглощение поперечных волн. Большой контраст поглощения S-волн имеет место в очаговой зоне Кашмирского землетрясения 08.10.2005 г. Из сопоставления рисунков 1 и 2 следует, что области наибольшего контраста поглощения (на северо-западе очага) соответствует максимальная плотность афтершоков.

Южный район. На рисунке 9 представлены характеристики сейсмичности в области очага Бхуджского землетрясения и его окрестностях за период 01.01.1973–25.01.2001 гг. (отбирались события с $M \geq 4.0$). Из рисунка следует, что за указанное время здесь произошло всего 7 событий, магнитуда которых варьировалась в диапазоне 4.2–5.0. Большинст-

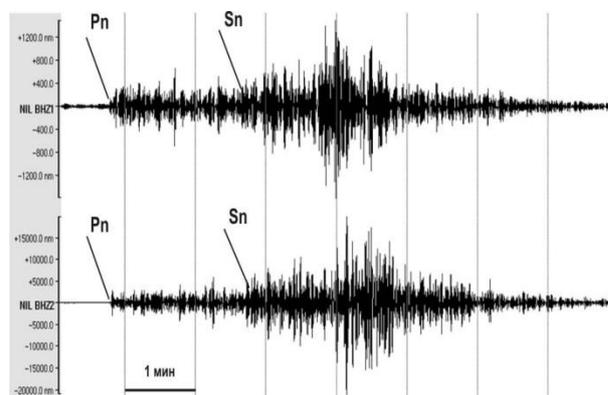
во эпицентров, сконцентрировано в узкой полосе, вытянутой в субмеридиональном направлении; они не формируют сколько-нибудь заметной кольцевой структуры.

На рисунке 10 показаны примеры записей афтершоков Бхуджского землетрясения 26.01.2001 г., полученных станцией NIL. Верхняя запись соответствует событию с эпицентром в северной части очаговой зоны, а нижняя – в ее южной части. Видно, что форма записей существенно отличается от записей, полученных в северном районе. На обеих сейсмограммах доминирует коровая группа Lg, относительный уровень волны Sn значительно выше, чем в северном районе на соответствующих эпицентральных расстояниях.



Обозначения – на рисунке 5

Рисунок 9. Южный район. Характеристики сейсмичности перед Бхуджским землетрясением



Верхняя трасса – север очаговой зоны Бхуджского землетрясения (18.02.2001 г., 24.07° N, 69.70° E, $\Delta=1117$ км); нижняя – юг очаговой зоны (04.03.2001 г., 23.02° N, 70.48° E, $\Delta=1209$ км)

Рисунок 10. Южный район. Примеры записей землетрясений, полученных станцией NIL

На рисунке 11 представлена зависимость средних величин S_n/P_n от эпицентрального расстояния. В данном случае для трасс, проходящих в основном по Индийской платформе, наблюдается падение величин S_n/P_n с Δ , уравнение линейной регрессии описывается формулой:

$$S_n/P_n \sim 1.08 - 0.00068 \Delta \text{ (км)}, r = -0.90 \quad (3)$$

Сопоставление с рисунком 7 показывает, что в данном случае величина S_n/P_n убывает с расстоянием значительно слабее, чем на трассах, пересекающих горные районы. Вместе с тем, указанный параметр убывает с ростом Δ заметно быстрее, чем для района Прибайкалья [9].

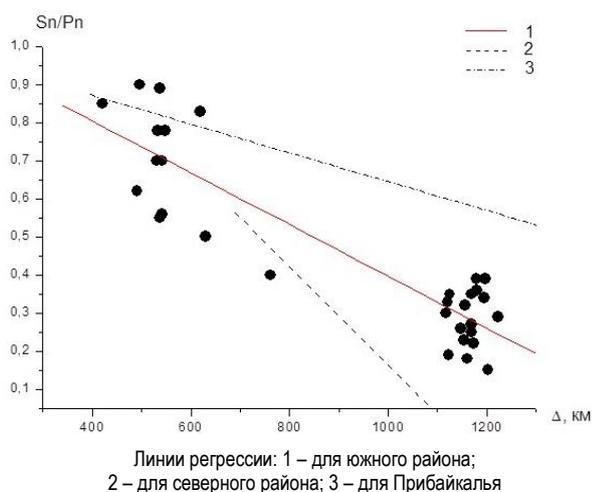


Рисунок 11. Южный район. Зависимость параметра S_n/P_n от эпицентрального расстояния

По записям афтершоков была рассмотрена зависимость S_n/P_n (Δ) для очаговой зоны Бхуджского землетрясения. Из рисунка 12 следует, что средние величины S_n/P_n практически не изменяются для трасс, пересекающих очаговую зону (в отличие от примера на рисунке 8).

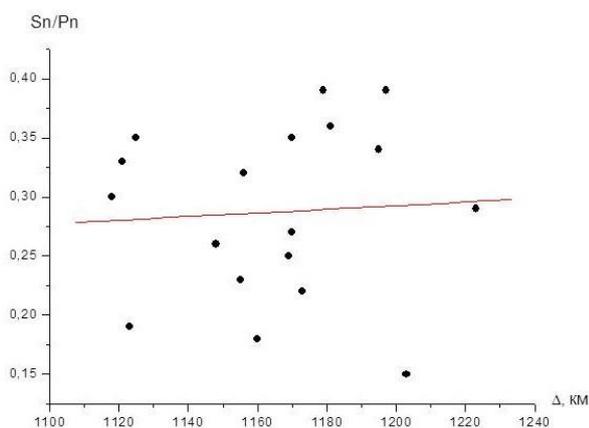


Рисунок 12. Очаговая зона Бхуджского землетрясения. Зависимость параметра S_n/P_n от эпицентрального расстояния

Для всего южного района было проведено картирование неоднородностей поля поглощения. При этом для сопоставления с рисунком 1 были проанализированы отклонения параметра S_n/P_n от зависимости (1). Из рисунка 3 видно, что все области промежуточного и высокого поглощения поперечных волн находятся в северной части района. В то же время очаговой зоне Бхуджского землетрясения соответствует область слабого поглощения S-волн.

ОБСУЖДЕНИЕ

Получены данные, свидетельствующие о резком различии характеристик сейсмичности, связанных с межплитным и внутриплитным землетрясениями примерно равной энергии. Перед Кашмирским землетрясением сформировалось мелкое кольцо сейсмичности, что типично для сильных межплитных событий [1–5]. Кроме того, после землетрясения наблюдалось большое количество афтершоков, в том числе достаточно сильных. Перед Бхуджским землетрясением кольцо сейсмичности не проявилось; аналогичный эффект имел место и для других внутриплитных землетрясений, данные для которых проанализированы в [5, 6]. Наибольшие магнитуды афтершоков и общее их количество в данном случае были значительно ниже, чем для серии афтершоков Кашмирского землетрясения.

Переходя к обсуждению характеристик поля поглощения S-волн в литосфере северного и южного районов, следует, прежде всего, заметить, что величины S_n/P_n уменьшаются с расстоянием для платформенного южного района гораздо медленнее, чем для горного северного. Учитывая, что длина отрезков трасс для волн S_n , соответствующих земной коре, в рассматриваемых случаях практически не изменяется с увеличением расстояния [10], можно сделать вывод, что поглощение поперечных волн в верхах мантии южного района гораздо слабее, чем для северного района. Доминирование группы волн L_g на записях, полученных станцией NIL, говорит о том, что и в коре Индийской платформы поглощение S-волн относительно слабое. Это свидетельствует о значительно более низком содержании глубинных флюидов в земной коре и верхах мантии Индийской плиты, что согласуется с данными, полученными ранее для других платформенных областей [12, 13].

Вместе с тем, уменьшение параметра S_n/P_n с увеличением Δ для Индийской платформы в целом заметно сильнее, чем для района Прибайкалья. Это свидетельствует о некоторых особенностях строения литосферы Индийской плиты по отношению к другим внутриплитным районам. Данный результат не противоречит выводам, сделанным в [14], где показано, что архейский и реннепротерозойский литосферный “киль” Индийской платформы был переработан благодаря относительно молодым геодинамическим процессам, приведшим к понижению скоростей S-волн в верхах мантии.

На фоне общего затухания величин S_n/P_n с расстоянием в северном районе уменьшение этого параметра в очаговой зоне Кашмирского землетрясения оказалось аномально быстрым. Из рисунка 1 также следует, что область сильного поглощения поперечных волн смещена к югу относительно афтершоковой зоны Кашмирского землетрясения (на расстояние ~30–50 км). Этот эффект можно объяснить сносом лучей, формирующих группу волн S_n при пересечении слоя с высоким содержанием флюидов. По аналогии с районом Центрального Тянь-Шаня [15] можно полагать, что этот слой находится в нижней коре и верхах мантии (в случае, если бы сильное поглощение соответствовало верхней части коры, снос лучей был бы минимальным). Полученные данные служат доказательством очень высокого содержания флюидов в верхах мантии под очаговой зоной землетрясения 08.10.2005 г. В то же время величины параметра S_n/P_n практически не изменяются при пересечении трассами лучей очаговой зоны Бхуджского землетрясения, что свидетельствует о низком содержании флюидов под этой зоной.

Таким образом, характеристики поля поглощения и параметры сейсмичности в рассматриваемых случаях коррелируются между собой. Межплитному Кашмирскому землетрясению соответствует высокое содержание флюидов, формирование кольцевой структуры и относительно большая суммарная энергия афтершоков. Для очага внутриплитного Бхуджского землетрясения характерны низкое содержание флюидов, отсутствие четко выраженной кольцевой структуры и малая энергия афтершоков.

В [16, 17] показано, что в литосфере под очаговыми зонами сильных межплитных землетрясений сразу после этих событий наблюдается высокое поглощение S-волн. Вместе с тем, поглощение закономерно уменьшается в течение нескольких десятков лет, что свидетельствует о подъеме мантийных флюидов в земную кору и дальнейшем расплывании их в горизонтальном направлении [16, 17]. Подъем флюидов ускоряется в результате интенсивного вибрационного воздействия на геологическую среду при сильных землетрясениях и их афтершоках. Такой эффект наблюдается даже в модельных экспериментах [18]; тем более его можно ожидать на достаточно больших глубинах, где архимедова сила стремится выдавить флюиды к поверхности [19].

Результаты, приведенные в данной статье, согласуются с выводами, сделанными в [1-6, 17] о том, что одна из важных функций сильных землетрясений состоит в высвобождении мантийных флюидов. Формирование кольцевых структур, а также относительно большое количество сильных афтершоков являются отражением процессов самоорганизации геологических структур, ведущих в конечном счете к уменьшению потенциальной энергии нашей планеты [20]. Новые данные позволяют уточнить эти представления, указывая на то, что подъем флюидов происходит главным образом благодаря сильным межплитным землетрясениям. В связи с этим можно полагать, что высокая скорость деформации, соответствующая межплитным областям, связана, в первую очередь, с относительно малой вязкостью литосферы, обусловленной высоким содержанием флюидов.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. 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 // Вулканонология и сейсмология, 2010. – № 6. – С. 34–51.
3. 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.
4. Копничев, Ю.Ф. Неоднородности поля поглощения короткопериодных S-волн в районе очага землетрясения Мауле (Чили, 27.02.2010 г., $M_w=8.8$) и их связь с сейсмичностью и вулканизмом района / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Геофизические исследования, 2011. – Т.12. № 3. – С. 22–32.
5. Копничев, Ю.Ф. Кольцевые структуры сейсмичности в разных диапазонах глубин перед сильными и сильнейшими землетрясениями в районах Алеут и Аляски / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Вестник НЯЦ РК, 2012. – Вып. 1. – С.137–146.
6. 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.
7. Gangopadhyay, A. Symptomatic features of intraplate earthquakes / A.Gangopadhyay, P.Talwani // Seismol. Res. Lett. , 2003. – V. 74. N 6. – P. 863–883.
8. Калинин, В.А. Геодинамические эффекты физико-химических превращений в твердой среде / В.А.Калинин, М.В. Родкин, И.С. Томашевская // М.: Наука, 1889. – 157 с.
9. Копничев, Ю.Ф. Неоднородности поля поглощения S-волн и кольцевые структуры сейсмичности в районе Байкальской рифтовой зоны / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Вестник НЯЦ РК, 2012. – Вып. 4. – С. 33–41.
10. Копничев, Ю.Ф. О природе короткопериодных сейсмических полей на расстояниях до 3000 км / Ю.Ф.Копничев, А.Р.Аракелян // Вулканонология и сейсмология, 1988. – № 4. – С. 77–92.

11. Копничев, Ю.Ф. Короткопериодные сейсмические волновые поля / М.: Наука, 1985. – С. 176.
12. Шукин, Ю.К. Глубинное строение слабосейсмичных регионов СССР / Ю.К. Шукин, В.З. Рябой (ред.) . – М: Наука, 1987. – 238 с.
13. Копничев, Ю.Ф. Поглощение поперечных волн в верхней мантии Украинского щита / Ю.Ф.Копничев, О.В. Павлова // Физика Земли, 1988. – № 12.
14. Kosarev, G.L. Heterogeneous lithosphere and the underlying mantle of the Indian subcontinent / G.L.Kosarev, S.I.Oreshin, L.P. Vinnik et al // Tectonophysics, 2013. – V. 198. N 3.
15. Бакиров, А.Б. (ред.) Земная кора и верхняя мантия Тянь-Шаня в связи с геодинамикой и сейсмичностью. Бишкек: Илим, 2006. – 115 с.
16. Копничев, Ю.Ф. Пространственно-временные вариации поля поглощения S-волн в очаговых зонах сильных землетрясений Тянь-Шаня / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Физика Земли, 2003. – № 7. – С.35–47.
17. 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.
18. Барабанов, В.Л. О некоторых эффектах вибрационного сейсмического воздействия на водонасыщенную среду. Сопоставление их с эффектами удаленных сильных землетрясений / В.Л. Барабанов, А.О. Гриневский, И.Г. Киссин, А.В. Николаев // Докл. РАН., 1987. – Т. 297. № 1. – С. 53–56.
19. 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.
20. Летников, Ф.А. Синергетика геологических систем. Новосибирск: Наука, 1992. – 229 с.

ОНТҮСТІК АЗИЯДАҒЫ ЕКІ ҚАТТЫ ЖЕРСІЛКІНУЛЕРДІҢ ОШАҚ ЗОНАЛАРЫНДА S-ТОЛҚЫНДАР ЖҰТЫЛУ ӨРІСІНІҢ СИПАТТАМАЛАРЫ ЖӘНЕ ОЛАРДЫҢ СЕЙСМИКАЛЫЛЫҚПЕН БАЙЛАНЫСЫ

¹⁾ Копничев Ю.Ф., ²⁾ Соколова И.Н.

¹⁾ *РФА Жер физикасы институты, Мәскеу, Ресей*

²⁾ *Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатова, Қазақстан*

Онтүстік Азиядағы (Кашмир, 2005 ж. 01-08-і, Mw=7.6 және Бхудж, 2001 ж. 01.26-сы, Mw=7.7) екі қатты жерсілкінулердің ошақ зоналарында қысқапериодты толқындар жұтылу өрістері мен сейсмикальлықтардың сипаттамалары зерттеледі. ААК (Кыргызстан) және NIL (Пакистан) станциялардың жазбалары бойынша Sn және Pn толқындардың амплитудаларының қатынасын талдауында негізделген әдісі қолданылған. Кашмирдің тақта арасындағы және Бхудждің тақта ішіндегі жерсілкінулердің ошақ зоналарында литосферада S-толқындар тиісті қатты және әлсіз жұтылуы көрсетілген. Қашмир жерсілкінуі алдында (Бхудж жерсілкінуі айырмашылығына) сейсмикальлықтың сақиналы құрылымы қалыптастырылған. Одан басқа, Кашмир жерсілкінуінен кейін, Бхудждағыдан кейін болғандарына қарағанда, $M \geq 5.0$ афтершоқтар бір неше рет көп болғаны тіркелген. Жұтылу өрісі мен сейсмикальлықтың үлкен вариациялары, зерттелудегі екі ошақ зоналардың литосферасында тереңдегі флюидтердің мөлшерінде үлкен айырмашылығына байланысты болуы жорамалдануда.

CHARACTERISTICS OF S WAVE ATTENUATION FIELD IN RUPTURE ZONES OF TWO LARGE EARTHQUAKES IN SOUTH ASIA AND THEIR RELATION TO SEISMICITY

¹⁾ Yu.F. Kopnichev, ²⁾ I.N. Sokolova

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

²⁾ *Institute of Geophysical Research Kurchatov, Kazakhstan*

The characteristics of short-period shear wave attenuation and seismicity fields in rupture zones of two large earthquakes in South Asia (Kashmir, 08/10/2005, Mw 7.6 and Bhuj, 26/01/2001, Mw 7.7) are being studied. The authors used a method, based on an analysis of Sn and Pn waves amplitude ratio (by recordings of AAK- Kyrgyzstan and NIL-Pakistan seismic stations). It was shown, that strong and weak S wave attenuation is observed correspondingly in rupture zones of the interplate Kashmir and intraplate Bhuj earthquakes. Ring-shaped seismicity structure had been formed prior to the Kashmir earthquake (in contrast to the Bhuj event). Besides, several more aftershocks with $M \geq 5.0$ were recorded after the Kashmir earthquake in comparison to the Bhuj one. It is supposed, that big variations of attenuation and seismicity fields structure are connected with sharp difference of deep fluid content in the lithosphere of two rupture zones.

УДК 004.418

СОЗДАНИЕ ПИЛОТНОЙ ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ УЧАСТКА АКБОТА, ПОТЕНЦИАЛЬНО ПРИГОДНОГО ДЛЯ ИЗОЛЯЦИИ РАО

Гаджимагомедова М.Г., Яковенко А.М.

Институт геофизических исследований, Курчатов, Казахстан

Описан пилотный вариант ГИС, созданный для участка Акбота-Западный, потенциально пригодного для изоляции РАО, на основе собранных данных. При разработке структуры, заполнении слоев и тестировании ГИС подтвердилась работоспособность и польза пилотного варианта, позволившего систематизировать результаты нескольких лет исследований, повысить оперативность использования имеющихся данных и обеспечить возможность проведения более глубокой интерпретации результатов полевых измерений благодаря применению различных методов – статистической обработки, фильтрации и др.

ВВЕДЕНИЕ

Для Казахстана, где принято принципиальное решение о строительстве АЭС, и где на территории разных регионов накопились и хранятся во временных хранилищах радиоактивные отходы от эксплуатации исследовательских ядерных реакторов, химико-металлургических предприятий и др. видов деятельности, проблема изучения и выбора участков для временной и окончательной изоляции РАО также актуальна, как для многих других стран мира с развитой ядерной энергетикой. И, если в России, в странах дальнего зарубежья либо уже построен, либо проектируется ряд подземных объектов для захоронения РАО, то в Казахстане пока проводятся исследования по поиску и применению различных подходов к изучению, оценке и выбору мест, перспективных для изоляции РАО. В Институте геофизических исследований в период 2009–2012 гг. проведены такие работы на примере двух участков СИП: Косшоки (западная периферия горного массива Дегелен) в связи с возможным сооружением здесь хранилища штольневого типа в гранит-порфирах и Акбота-Западный (центральная часть СИП) в связи с возможным глубинным захоронением РАО в вертикальных выработках (скважинах, шахтах) в плагиогранитах [1]. Этапность, принятая при проведении работ была ориентирована на Рекомендации МАГАТЭ [2].

За время проведения различных исследований по изучению этих участков накоплен достаточно большой объем различных разномасштабных данных. Однако, несмотря на проведенное обобщение, существовавшая система хранения данных не позволяет с необходимой оперативностью систематизировать и использовать эти данные. Таким образом, актуальным является создание более развитых средств оперирования и анализа информации, на основании которой будут приниматься решения. Одним из таких средств является геоинформационная система (ГИС).

Целью настоящей работы является создание пилотного варианта ГИС для участка Акбота-Западный на основе накопленных данных (дистанционно-

го зондирования, полевых и камеральных исследований) для повышения полноты и оперативности их использования.

Для выполнения поставленной цели решались следующие основные задачи:

1. Разработка основных положений методики создания пилотной ГИС
2. Разработка структуры пилотной ГИС
3. Заполнение слоев и тестирование пилотной ГИС.

УЧАСТОК АКБОТА - ЗАПАДНЫЙ НА СИП

Участок Акбота-Западный расположен в 55 км к югу от г. Курчатов в центральной части Семипалатинского полигона (рисунок 1).

Согласно международному опыту для размещения радиационно-опасных объектов, целесообразно выделять монолитные геодинамически стабильные блоки горных пород, преимущественно кристаллические, и изучать породные массивы на участках размером порядка $5 \times 5 \text{ км}^2$ [3, 4]. Участок Акбота-Западный, приуроченный к одноименному интрузивному массиву, сложенному гранодиоритами, диоритами и плагиоклазовыми гранитами, который был выбран в результате работ 2006–2007 гг., изучался на площади размером $2 \times 2 \text{ км}^2$. Позднее, учитывая еще одно из требований МАГАТЭ [5] о необходимости дополнительного изучения ближайшего геологического окружения, территория изучения на участке Акбота-Западный была расширена до 25 км^2 .

Информационные потребности в описании характеристик участков, на основании которых принимается решение о выборе его под строительство объекта изоляции РАО, определены целым рядом документов, разработанных МАГАТЭ [5]. В состав основных критериев входят геолого-геофизические, гидрогеологические, геохимические, экологические условия. Дополнительная информация, помимо геологических и экологических данных, которая должна быть собрана для обеспечения необходимого уровня понимания геологических условий, включает такие данные, как землепользование, транспортная инфраструктура, воздействие человека на участок. Для оценки строительных и инженерных условий

требуются топография участка и его окрестностей, история сейсмичности района, история заводнения и др.

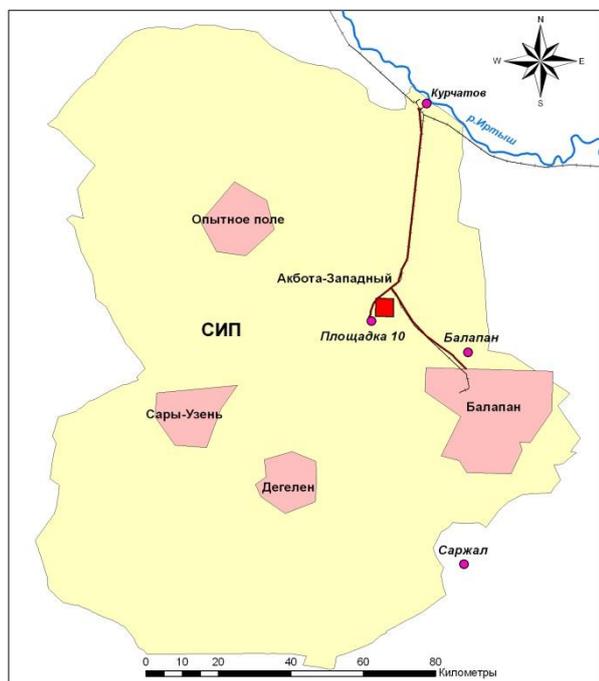


Рисунок 1. Схема расположения испытательных площадок и участка Акбота-Западный на территории СИП

В данной работе при разработке пилотного проекта ГИС, несмотря на ограниченность, ее информационный состав определен с ориентировкой на [6, 7] и имеющиеся данные для участка площадью 25 км².

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МЕТОДИКИ СОЗДАНИЯ ПИЛОТНОЙ ГИС

Учитывая известный опыт [8, 9], доступные программные, технические средства и имеющиеся данные, приняты следующие основные положения методики создания пилотной ГИС по участку Акбота-Западный.

1. Используются функциональные возможности, предоставляемые программным обеспечением ArcGIS v 10.0 [10].

2. Из данных, полученных при изучении участка, в качестве исходных для создания пилотного проекта выбраны космические, топографические, геологические, гидрогеологические данные.

3. Имеющиеся тематические данные разносятся по слоям. Для создания слоев взяты:

- топографические карты масштабов 1:500 000, 1:200 000, 1:100 000, 1:10 000;
- геологическая карта масштабов 1:200 000, 1:10 000;
- гидрогеологические карты масштаба 1:200 000;
- космические снимки;
- результаты различных полевых работ/

4. Для ввода данных в ГИС выбраны стандартные устройства ввода (клавиатура, мышь, сканер) и GPS-приемники.

5. Система координат ГИС, принятая для участка Акбота-Западный – международная прямоугольная система координат WGS-1984 UTM Zone 44N (Universal Transverse Mercator Zone 44, сфероид WGS 84).

6. Предусмотрено использование программных продуктов GeonICS, MapInfo для обеспечения:

- преобразования пространственных данных путем трансформации координат объектов из одной проекции в другую, перевычисления прямоугольных координат точек в географические и наоборот;
- конвертирования данных в различные форматы в процессе экспорта и импорта;
- растрово-векторного и векторно-растрового преобразования данных.

7. Все объекты содержат атрибутивную информацию (характеристики, классификация, параметры объекта), которые логически систематизируются для определения того, какую информацию должен нести слой.

8. Для представления пространственных данных в виде карт и тематических слоев приняты следующие форматы: шейп-файлы, базы геоданных, img [11].

9. Для хранения и анализа картографической информации используется база данных.

РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ ПИЛОТНОЙ ГИС

С учетом имеющихся данных [3, 4, 6, 7] для пилотного проекта ГИС «Акбота-Западный» определено 12 слоев. На первом этапе определено 6 следующих слоев:

- 1) Границы
- 2) Населенные пункты
- 3) Дорожная сеть
- 4) Геодезические пункты
- 5) Топография
- 6) Геология

Границы. Это слой, который должен содержать информацию о территориальном расположении участка в пределах СИП.

Населенные пункты. Это слой, который должен включать в себя места, где проживают люди: город, аулы, поселки, зимовки.

Дорожная сеть. Этот слой должен включать информацию о дорожной сети, ведущей к участку и на самом участке.

Геодезические пункты. Этот слой будет включать в себя пункты триангуляции, полигонометрии, располагающиеся как непосредственно на участке, так и в ближайшей окрестности.

Топография. Здесь должна быть представлена информация о топографической основе, включающая рельеф местности.

Геология. Данный слой должен включать геолого-геофизическую изученность, геологические стро-

СОЗДАНИЕ ПИЛОТНОЙ ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ УЧАСТКА АКБОТА, ПОТЕНЦИАЛЬНО ПРИГОДНОГО ДЛЯ ИЗОЛЯЦИИ РАО

ения, гидрогеологические, геофизические данные и поля.

Предусматривается добавление новых слоев, необходимых для получения более полной информации об участке Акбота-Западный.

ЗАПОЛНЕНИЕ СЛОЕВ И ТЕСТИРОВАНИЕ ПИЛОТНОЙ ГИС «АКБОТА-ЗАПАДНЫЙ»

Для заполнения слоев ГИС растровые изображения графических материалов по участку Акбота-Западный на площади 25 км² преобразовывались в цифровой формат путем сканирования. Привязка по координатам выполнялась в ArcMap 10.0 в системе WGS-1984 UTM Zone 44N (Universal Transverse Mercator Zone 44, сфероид WGS 84). Созданы слои, согласно перечню, приведенному в разделе 3 (рисунок 2а) и по ним разносилась информация, которую можно просматривать в свойствах слоя, используя таблицу атрибутов (рисунок 2б).

В слое «Границы» (рисунок 1) отображена информация о границе участка Акбота-Западный. Информация получена по результатам топографичес-

кой съемки. Границы основных испытательных участков и граница СИП – по результатам работ 2005–2006 гг. при установке маркерных знаков на СИП [1, 3].

Слой «Населенные пункты» (рисунок 1). Данные получены в процессе оцифровки топографических карт масштаба 1:500 000. Нанесены: город Курчатов, аул Саржал, поселок Балапан, техническая площадка «Объект 300».

Слой «Дорожные сети» (рисунок 1). Данные о дорожной сети в районе участка получены в виде треков с GPS-навигаторов. Нанесены дороги с улучшенным покрытием Курчатов – «Объект 300» (52 км), Курчатов – разрез Каражыра, а так же полевые дороги непосредственно на участке Акбота-Западный.

Слой «Геодезические пункты» (рисунок 3). Данные получены в процессе оцифровки топографических карт масштаба 1:100 000 и представлены на участке пунктом триангуляции 2 класса Меденколь и 29 пунктами полигонометрической сети 2 разряда.

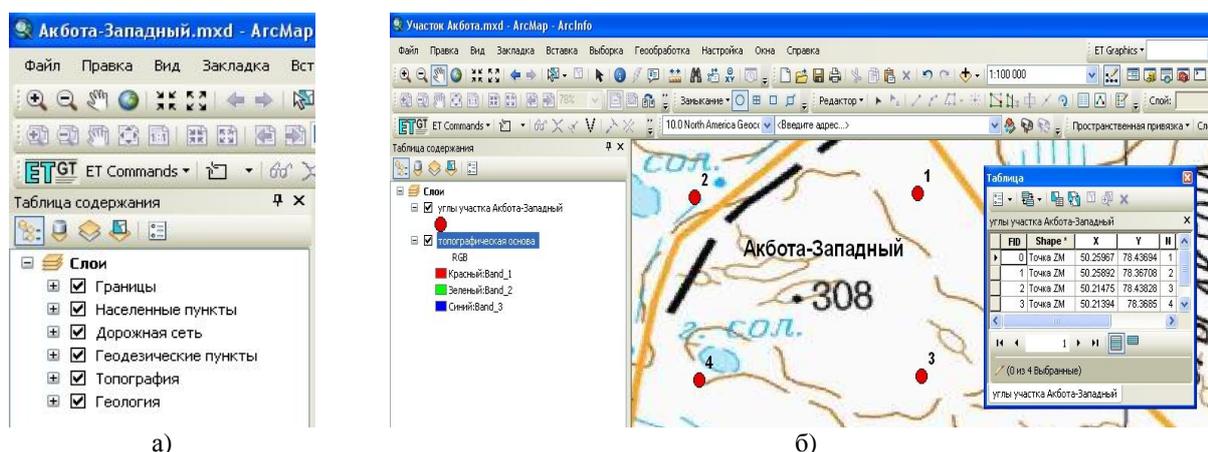


Рисунок 2. Пользовательский интерфейс (а) и форма вывода топографических и табличных атрибутивных данных (б)

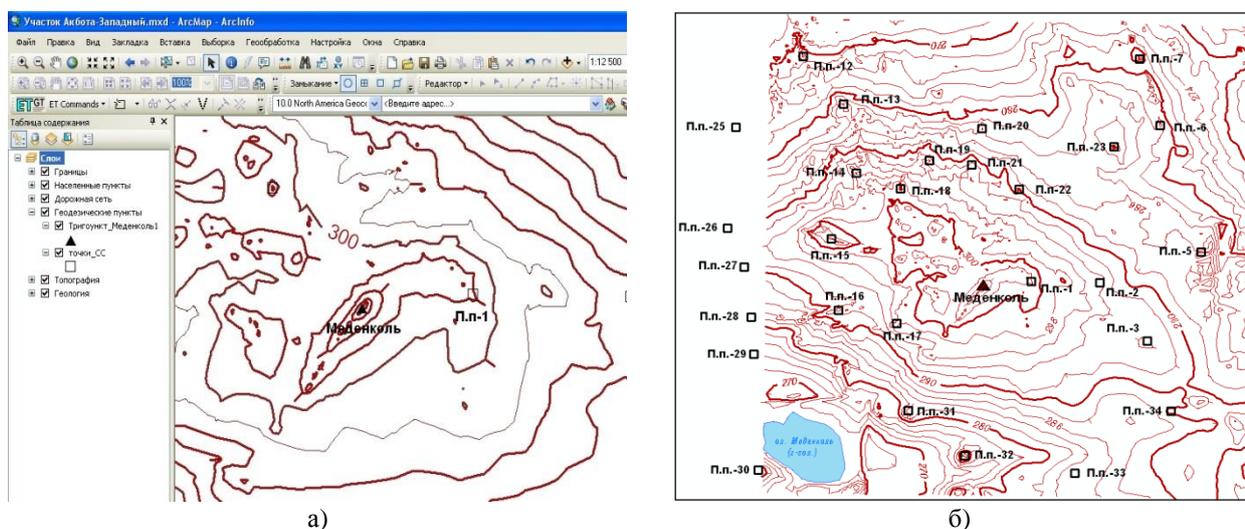


Рисунок 3. Форма вывода геодезических пунктов и рельефа на участке Акбота-Западный

СОЗДАНИЕ ПИЛОТНОЙ ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ УЧАСТКА АКБОТА, ПОТЕНЦИАЛЬНО ПРИГОДНОГО ДЛЯ ИЗОЛЯЦИИ РАО

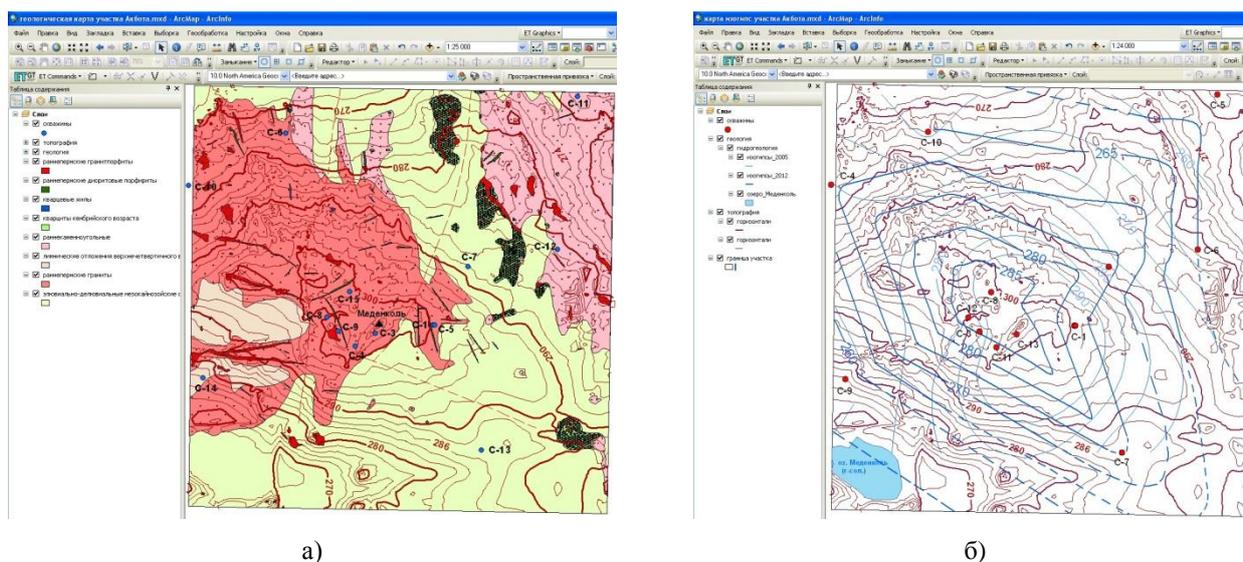


Рисунок 4. Форма вывода (с рельефом): а – геологической карты; б – карты гидроизогипс

Слой «Топография» (рисунок 3). Данные получены в результате импорта и редактирования в ArcMap результатов топографической съемки масштаба 1:5 000 с сечением горизонталей через 1 м, выполненной в 2005–2010 гг. специалистами Института геофизических исследований. Карта построена с использованием программного обеспечения GeonICS [12].

Слой «Геология» (рисунок 4а) содержит несколько карт. Геологическая карта участка масштаба 1:10 000 с детализацией до масштаба 1:5 000 построена по результатам проведения геологической съемки в 2008–2011 гг. [7]. Карта гидроизогипс (рисунок 4б) масштаба 1:10 000 с детализацией до масштаба 1:5 000 получена по результатам работ 2010 и 2012 гг. [7]. Карты магнитного поля масштаба 1:10 000 построены по результатам 2006 и 2012 гг. Карта фактического материала содержит информацию о методах исследований примененных на участке Акбота-Западный, всех пунктах наблюдений. Эти данные получены путем импорта в ArcMap из программной среды AutoCad.

Всего в 6 слоев занесено 12 карт. Проведено тестирование работы пилотной ГИС «Акбота-Западный». При этом проверена работа следующих основных функций:

- выполнение пространственного запроса по заданным критериям;
- получение атрибутивной информации, внесение в нее изменений;
- редактирование слоев, объектов;
- экспорт изображения в различных форматах;
- визуальное отображение слоев;
- получение карт в различных масштабах;
- хранение информации в базе данных.

Тестирование подтвердило работоспособность созданного пилотного варианта ГИС «Участок Ак-

бота-Западный». Система позволила систематизировать имеющиеся данные по участку, перевести их в цифровые форматы и надежно хранить в базе данных. Обеспечена возможность достаточно просто и удобно редактировать карты, выводить их на печать с высоким разрешением, в красочной, стандартизированной форме.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для участка Акбота-Западный и его ближайшего геологического окружения разработан и создан пилотный вариант ГИС, предназначенный, с одной стороны, для улучшения использования комплекса данных при оценке пригодности участка (в связи с изоляцией РАО), а с другой стороны, для последующего изучения положительных и отрицательных сторон системы в целях разработки основного проекта.

ГИС «Участок Акбота-Западный» состоит из 6 тематических слоев – разделов: границы, населенные пункты, дорожная сеть, геодезические пункты, топография, геология.

Разработанная структура и ее практическая реализация позволили систематизировать результаты нескольких лет исследований, проведенных на участке, которые представлены в виде электронных карт – топографических, геологических, гидрогеологических и др.

Цифровой формат и координатная привязка данных обеспечивают уже в пилотном варианте возможность проведения более глубокой интерпретации результатов полевых измерений благодаря применению различных методов статистической обработки, фильтрации и др.

Продолжение работ должно позволить внести в уже созданные слои геологические, геофизические, гидрогеологические карты более детального масштаба, создать новые информационные блоки и но-

СОЗДАНИЕ ПИЛОТНОЙ ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ УЧАСТКА АКБОТА, ПОТЕНЦИАЛЬНО ПРИГОДНОГО ДЛЯ ИЗОЛЯЦИИ РАО

вые слои (тектоника, сейсмичность, метеорология, почвы, растительность, и др.).

Использование геоинформационной системы обеспечит необходимой информацией специалистов, выполняющих работы как на данной, так и на

соседних территориях, создает информационную поддержку при планировании, при проведении работ, при принятии обоснованных организационных решений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Геолого-геофизическое сопровождение строительства энергетических установок и объектов захоронения РАО на территории РК: отчет о НИР (окончательный по теме 02.01.04.Н за 2004-2008 гг.) / ДГП ИГИ НЯЦ РК. – Авторы Коновалов В.Е., Дроздов А.В., Пестов Е.Ю., Тореев В.Ю., Великанов А.Е. [и др.] – Курчатов, 2009. – 180 с. – Фонды КазГосИНТИ, № ГР № 0104РК00193 – Инв. № 0209РК00935.
2. Руководство по безопасности № 50-SG-S1, IAEA, Vienna, 1997.
3. Отчет по мероприятию «Обеспечение безопасности бывшего Семипалатинского испытательного полигона» в составе государственной бюджетной программы БП-011 «Обеспечение радиационной безопасности» за 2006 г. – ИГИ НЯЦ РК; рук. Демин В.Н. – Курчатов, 2006. – 77 с. (с приложениями на CD).
4. Отчет по мероприятию «Обеспечение безопасности бывшего Семипалатинского испытательного полигона» в составе государственной бюджетной программы БП-011 «Обеспечение радиационной безопасности» за 2005 г. – ИГИ НЯЦ РК; рук. Демин В.Н. – Курчатов, 2005. – 65 с. (с приложениями на CD).
5. Стандарт безопасности МАГАТЭ Захоронения РАО в геологических структурах № SSG-14, Vienna, 2011.
6. Отчет по мероприятию «Обеспечение безопасности бывшего Семипалатинского испытательного полигона» в составе государственной бюджетной программы БП-011 «Обеспечение радиационной безопасности» за 2010 г. – ИГИ НЯЦ РК, рук. Дроздов А.В. – Курчатов, 2010. – 50 с.
7. Развитие геолого-геофизических методов изучения и оценки кристаллических горных пород СИП для экологически безопасной изоляции РАО: отчет о НИР (окончательный по теме 04.02.Н за 2009-2011 гг.) / ДГП ИГИ НЯЦ РК. – Авторы Пестов Е.Ю., Тореев В.Ю., Великанов А.Е. [и др.] – Курчатов, 2011. – 81 с. – Фонды НЦ НТИ, № ГР № 0109РК00472 – Инв. № 0211РК00528.
8. Яковенко, Ю.Ю. Разработка ГИС-проекта СИП / Ю.Ю. Яковенко // Сборник трудов Национального ядерного центра Республики Казахстан за 2010 г. – Павлодар: ТОО «Дом печати. – 2010. – С. 373–385.
9. Веселов, В.В. Создание геоинформационно-математической модели / В.В. Веселов, Паничкин В. Ю., Адар Элон, Якиричев А., [и др.] // Терра, вып. № 1, 2006. – Алматы: Центр дистанционного зондирования и ГИС «Терра». – С. 75-84.
10. Сайт компании ESRI [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.esri.com/software/arcgis/arcgis10>, свободный. – Загл. с экрана.
11. Сайт компании ESRI [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.esri.com/library/whitepapers/pdfs/shapefile.pdf>, свободный. – Загл. с экрана.
12. Сайт компании CSoft Development [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.csoft.ru/catalog/soft/geonics/geonics-2013.html>, свободный. – Загл. с экрана.

РАҚ ОҚШАУЛАУЫНА ӘЛЕУЕТТІ ЖАРАМДЫ АҚБОТА УЧАСКЕСІ ҮШІН СЫНАМАЛЫ ГЕОАҚПАРАТТЫҚ ЖҮЙЕСІН ЖАСАУ

Гаджимагомедова М.Г., Яковенко А.М.

Геофизикалық зерттеулер институты РМК, Курчатов, Қазақстан

Жиналған деретері негізінде Ақбота-Батыс учаскесі үшін жасалған ГАЖ сынамалы нұсқасы сипатталады. ГАЖ құрылымын әзірлеуінде, қабаттарын толтыруында және тестілеуінде, бір неше жылдардың зерттеулерін жүйеге келтіруіне, қолдағы деректерді пайдаланудың жеделдігін жоғарылатуына және әр түрлі әдістерді – статистикалық өңдеу, сұзу ж.б. – қолдану арқасында далалық өлшеулердің нәтижелерін одан толық пайымдауына мүмкіншілік берген сынамалы нұсқаның жұмыс қабілеттілігі мен пайдасы расталған.

CREATION OF A PILOT GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM FOR AKBOTA SITE CAPABLE FOR RADIOACTIVE WASTES ISOLATION

M.G. Gadzhimagomedova, A.M. Yakovenko

RSE Institute of Geophysical Research, Kurchatov, Kazakhstan

The pilot version of GIS created for a site of Akbota-Zapadny potentially suitable for radioactive wastes isolation is based on the collected data. When developing structure, filling layers and testing of GIS reliability and advantage of the pilot option was confirmed, which allowed to systematize results over several years of researches, improve efficiency of use of available data and provide possibility more deep interpretation of the results from field measurements owing to various techniques applied – statistical processing, filtering, etc.

УДК 681.84/85

АНАЛИЗ ЗАПИСЕЙ ЧЕБАРКУЛЬСКОГО МЕТЕОРИТА НА ИНФРАЗВУКОВЫХ СТАНЦИЯХ ЯДЕРНОГО МОНИТОРИНГА

Дубровин В.И., Смирнов А.А.

Институт геофизических исследований, Курчатов, Казахстан

15 февраля 2013 года сеть сейсмических и инфразвуковых станций Казахстана записала сигналы от взрыва болида в районе г. Челябинск. По записям инфразвуковых станций выявлены и исследованы сигналы от взрыва болида, определены кажущиеся скорости, частотные полосы, азимуты прихода сигнала. По сейсмическим станциям установлено время и место удара о Землю звуковой волны, магнитуда сейсмического события. Показано, что это событие является вторым по силе после падения Тунгусского метеорита в 1908 г.

ВВЕДЕНИЕ

15 февраля 2013 года примерно в 9:20 по местному времени (03:20:33 GMT) в атмосфере в районе г. Челябинск произошел взрыв метеорного тела. Болид вошел в атмосферу Земли незамеченным на скорости примерно 18 – 19 км/сек. Спустя примерно 32,5 секунды после входа в атмосферу небесное тело разрушилось над территорией Южного Урала на высоте примерно 15–25 км. Разрушение представляло собой серию событий, сопровождавшихся распространением ударных волн и ярким свечением. Осколки болида разлетелись по нескольким районам области. Точкой падения самого большого осколка считается озеро Чебаркуль.

Первыми движение тела по небу в 9:15 увидели жители Костанайской и Актюбинской областей Казахстана. Жители Оренбурга – в 9:21 по местному времени. Также его след наблюдался в Свердловской, Курганской, Тюменской, Челябинской областях и Башкортостане. Самой далёкой точкой с видеофиксацией полёта болида является район посёлка Просвет в Волжском районе Самарской области. Расстояние до Челябинска составляет 750 км.

От ударной волны были повреждены стекла в 7320 зданиях, большинство из них – жилые дома. За медицинской помощью обратилось 1613 южноуральцев, из них 69 человек пришлось госпитализировать. Материальный ущерб был предварительно оценён от 400 млн. до 1 млрд. рублей.

16 февраля члены метеоритной экспедиции Уральского федерального университета обнаружили в районе озера Чебаркуль фрагменты метеорита. В результате химических анализов была подтверждена внеземная природа мелких камней, найденных на поверхности озера Чебаркуль, и доказано, что это обыкновенный хондрит [1].

Это уникальный объект, изучением которого занялись люди разных специальностей как научного, так и ненаучного мира, так как события такого масштаба происходят в мире крайне редко.

Явление наблюдали сотни тысяч человек, оно было зафиксировано большим числом видеорегистраторов и камер наблюдения.

Настоящая работа посвящена обнаружению и детальному анализу сигналов от взрыва болида по записям казахстанских станций. Это уникальное явление должно быть изучено именно по инструментальным записям в различных физических полях (инфразвук, сейсмические колебания и др.).

ОБЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ЧЕБАРКУЛЬСКОМ МЕТЕОРИТЕ

По расчетам НАСА в 03:20:33 GMT метеорит диаметром около 17 – 20 метров и массой порядка 10 тыс. тонн вошёл в атмосферу Земли на скорости около 18,6 км/с и взорвался на высоте 23.3 км [2]. Максимальное свечение было отмечено в точке с географическими координатами 54.8° с. ш. 61.1° в. д. Приблизительная энергия основного взрыва по оценкам НАСА составила около $3.75 \cdot 10^{14}$ Дж, что эквивалентно 90 кТ в тротиловом эквиваленте. По оценкам НАСА, это самое большое из известных небесных тел, падавших на Землю со времени Тунгусского метеорита в 1908 году и соответствует событию, происходящему в среднем раз в 100 лет.

Рисунок 1 показывает трассу пролета болида от начала вхождения в атмосферу до взрыва над поверхностью. Вдоль трассы показаны высоты, красной звездочкой показано место взрыва [2].



Рисунок 1. Карта трассы пролета метеорного тела с изменением высот

Ядерный взрыв и взрыв болида в атмосфере создают низкочастотные звуковые колебания (меньше 20 Гц), которые можно использовать для определения параметров события. Данные расположенных по всему миру инфразвуковых станций слежения за ядерными испытаниями (ОДВЗЯИ) показали наличие источника инфразвуковых волн в Уральских горах, что позволило сделать оценки его мощности. Среди всех событий это было наиболее мощным со времени ввода в строй первой инфразвуковой станции в 2001 году. До февраля месяца, взрыв болида над Сулавеси в Индонезии в октябре 2009 г. был самым сильным инфразвуковым событием, записанным 15 станциями сети ОДВЗЯИ. Взрыв болида 15 февраля 2013 года записан 17 инфразвуковыми станциями и превзошел событие в Сулавеси по интенсивности сигналов.

Этот источник инфразвука оказался нестационарным, как было бы при испытании ядерного оружия в шахте, а перемещался, что было отмечено по изменению направления на источник. Самая дальняя станция, которая зафиксировала событие, расположена в Антарктиде в 15 000 км от источника. Самой близкой инфразвуковой группой оказалась IS31 Актюбинск (рисунок 1). Данная станция позволила более детально изучить сигнал и определить параметры взрыва и сопутствующих ему явлений (Рисунок 2). Важность полученной записи на инфразвуковой станции IS31 Актюбинск была отражена в пресс-релизе ОДВЗЯИ, опубликованном на следующий день после события [3].

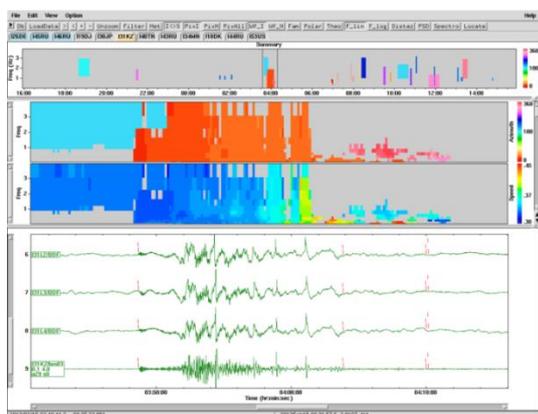


Рисунок 2. Волновые формы инфразвуковых волн, записанные станцией IS31 Актюбинск (ОДВЗЯИ), опубликованные в пресс-релизе ОДВЗЯИ на следующий день после события.

В пресс-релизе приведен фрагмент записи станции IS31 Актюбинск (рисунок 2). Начало записи низко-частотных звуковых волн от взрыва соответствует 03:22 GMT 15 февраля 2013 г.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАПИСЕЙ СИГНАЛОВ ОТ МЕТЕОРИТА НА КАЗАХСТАНСКИХ СТАНЦИЯХ

В казахстанскую сеть РГП ИГИ входят две инфразвуковые станции. Инфразвуковая станция IS31

Актюбинск расположена на северо-западе Казахстана (рисунок 3) [4]. Группа состоит из 8 элементов, оснащенных микробарометрами MB2000, апертура группы 2 км (рисунок 4).

Инфразвуковая станция Курчатов «KURIS» [5] расположена в районе г. Курчатов Восточно-Казахстанской области (рисунок 3). Она состоит из 4 элементов, использованы микробарометры MB2005 (рисунок 5).

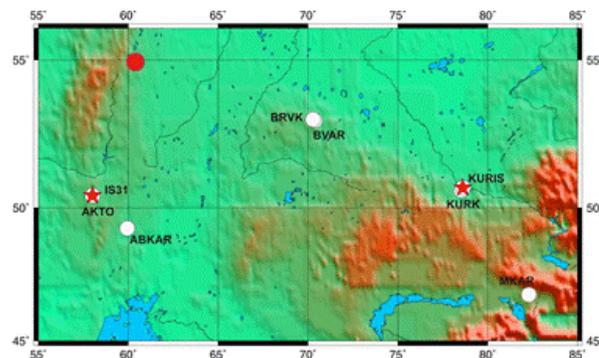


Рисунок 3. Расположение сейсмических (○) и инфразвуковых станций (★) сети РГП ИГИ на территории Казахстана, зарегистрировавших болид (● – ориентировочное место эпицентра взрыва болида)

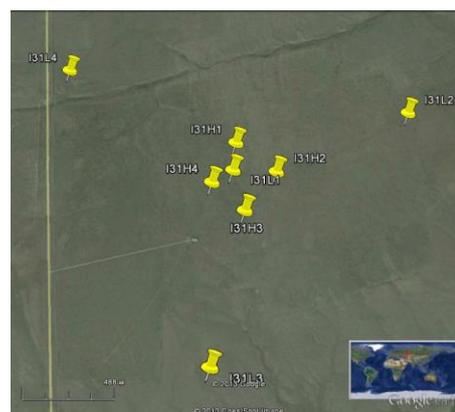


Рисунок 4. Конфигурация инфразвуковой группы IS31 Актюбинск



Рисунок 5. Конфигурация инфразвуковой группы Курчатов «KURIS»

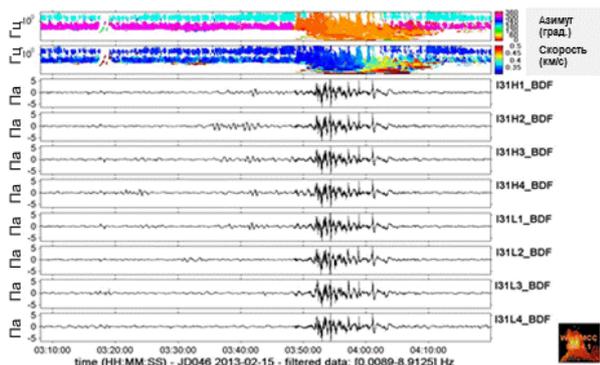
Инфразвуковая станция IS31 Актюбинск расположена примерно в 520 км от взрыва. Время вступления инфразвуковых фаз от взрыва болида 03:48 GMT. Данные станции IS31 Актюбинск поступают по спутниковому каналу, в режиме реального времени в Международный центр данных (г. Вена), а затем в Казахстанский Национальный центр данных (г. Алматы), где они систематически обрабатываются и анализируются.

Инфразвуковая станция «KURIS» расположена в 1300 км, время вступления инфразвуковых фаз от взрыва болида 04:28 GMT. Время пробега инфразвука составило около 26 минут для станции IS31 и 1 час 6 минут для станции Курчатова. Данные станции передаются в центр сбора информации. Затем информация через интернет каналы передается в ЦСОССИ.

Результатами обработки сигналов обеих инфразвуковых станций являются автоматические бюллетени, которые создаются в Центре данных за каждые сутки. В бюллетенях как станции Актюбинск, так и Курчатова были найдены детектирования, соответствующие взрыву болида. Именно эти отрезки записей анализировались более подробно.

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА СИГНАЛОВ С ПОМОЩЬЮ ДЕТЕКТОРА РМСС

Сейсмическая и инфразвуковая сеть Казахстана зарегистрировали взрыв Чебаркульского болида наилучшим образом. Самой близкой в мировой сети к эпицентру оказалась инфразвуковая группа IS31 Актюбинск, она расположена примерно в 520 км к югу от него. Азимут от группы на эпицентр около 16° . Такое удачное расположение позволило записать сигнал в самом широком частотном диапазоне, с самым большим количеством деталей.

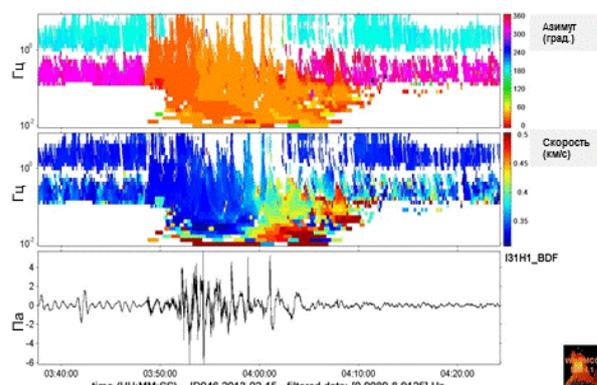


Верхний график – азимуты на источники инфразвуковых сигналов, второй сверху – кажущиеся скорости, нижние восемь графиков записи инфразвука на элементах группы. В волновых формах с 3:48:00 чётко виден сильнейший сигнал от взрыва болида

Рисунок 6. Обзорный вид сигналов от Чебаркульского болида на инфразвуковой станции IS31 и результат применения РМСС детектора

На рисунке 6 показан обзорный вид записи сигналов от взрыва болида группой IS31. Кроме того, что станция была расположена ближе всех к эпицентру,

в этот день, в это время суток в районе её расположения были идеальные условия для регистрации инфразвука. Основным источником шума для инфразвука являются ветровые помехи [6]. На рисунке 6 видно, что станция до и после взрыва детектировала североатлантические микробаромы [7] (азимут на источник около 300°) и сигналы от газовых факелов Жанажол [8] (азимут на источник около 190°). Это говорит о том, что в это время ветровые помехи были очень слабы. В 3 часа 48 минут по Гринвичу на всех восьми каналах станции вступил мощнейший сигнал от взрыва болида. Сигналы от него регистрировались в течение 24 минут.



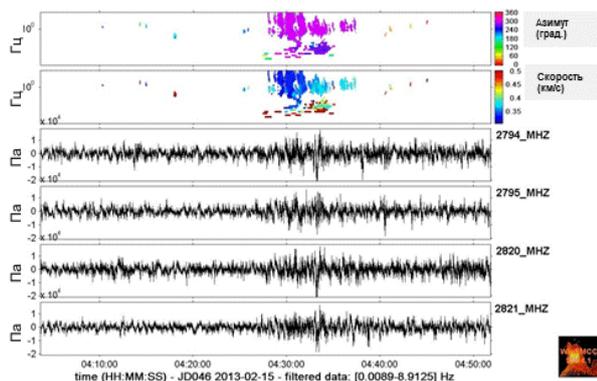
На верхнем графике показан результат расчета азимута на источник, на среднем – результат расчета кажущейся скорости сигнала. Внизу показана запись сигнала на канале H1 инфразвуковой группы IS31 Актюбинск

Рисунок 7. Детальная картина записи сигналов от взрыва Чебаркульского болида

На рисунке 7 показана детальная картина записи сигналов от взрыва. Нижний график на рисунке – это волновая форма от взрыва на канале H1 инфразвуковой группы IS31. Сигнал вступил в 3:48, сначала с относительно небольшой амплитудой. В 3:52 амплитуда сигнала резко возросла, всего видно 5 N волн. Параметры сигнала, рассчитанные методом РМСС, показаны на двух верхних графиках на рисунке 7. На верхнем графике показан результат расчета азимута на источник. Частотный спектр сигнала очень широк и выходит за пределы полосы 0,01–9 Гц, в которой производился расчет. Верхний предел полосы ограничен частотой Найквиста, которая при частоте дискретизации записи 20 Гц составляет 10 Гц. На верхнем графике рисунка 7 видно, что азимут на источник немного увеличивается от начала к концу сигнала. По-видимому, это обусловлено различной скоростью ветра на разных высотах преломления инфразвуковых волн. Такие различия в скорости приводят к различным отклонениям детектированного азимута от истинного [9]. Первыми пришли стратосферные фазы сигнала, преломляющиеся на высоте менее 50 км, ближе к концу записи детектированы, по-видимому, термосферные фазы, преломившиеся на большей высоте. Подтверждением этой гипотезы служит информация о кажущейся

скорости, представленная на среднем графике. На графике видно, что примерно в течение 12 минут в области высоких частот кажущиеся скорости составляли около 0,35 км/с, что характерно для стратосферных фаз [9]. Позднее кажущиеся скорости увеличились примерно на 400 м/с и более, это говорит о том, что эти фазы были преломлены на большей высоте. Большой разброс найденных значений азимутов и скоростей в области самых низких частот говорит о том, что для надёжного детектирования сигналов в области этих частот апертура инфразвуковой группы уже мала.

Сигналы от взрыва были детектированы ещё одной казахстанской инфразвуковой станцией, установленной в г. Курчатове. Это третья ближайшая к эпицентру инфразвуковая группа (вторая – российская станция I43RU, Дубна). Расстояние от эпицентра до Дубны составляет 1 090 км, до Курчатова 1 300 км, соответственно. Азимут от инфразвуковой группы «KURIS» на эпицентр составляет 298°. Вид сигналов от Чебаркульского болида на инфразвуковой станции в Курчатове и результат применения РМСС детектора показаны на рисунке 8.



Верхний график – азимуты на источники инфразвуковых сигналов, второй сверху – кажущиеся скорости, нижние четыре графика – записи инфразвука на элементах группы

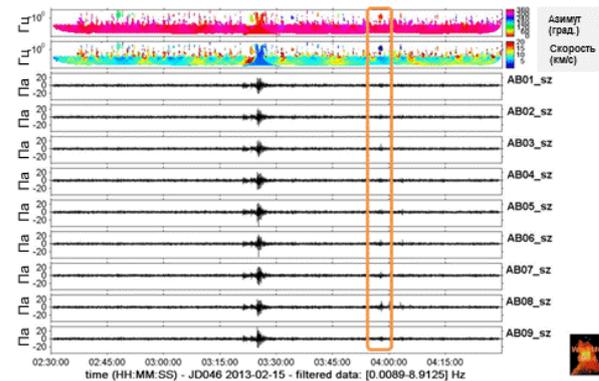
Рисунок 8. Вид сигналов от Чебаркульского болида на инфразвуковой станции «KURIS» и результат применения РМСС детектора

На рисунке видно, что станция не детектировала в это время микробаромы. Это говорит о том, что в районе её установки были сильные ветровые помехи. Вид волновых форм подтверждает это, сигнал визуально выделяется на фоне не очень четко. Результаты применения детектора РМСС показывают, что записи, тем не менее, содержат ценную информацию об источнике. Картина распределения по времени и частоте найденных азимутов и кажущихся скоростей в целом похожа на результаты, полученные для IS31 Актюбинск. Однако хорошо заметно, по крайней мере, одно важное отличие. Детектирования в области низких частот на станции Курчатова образуют отдельный кластер. Таким образом, по записям этой станции можно выделить уже не две, как в Актюбинске, а три инфразвуковых фа-

зы. По-видимому, в области низких частот регистрируются акустико-гравитационные волны [10].

Помимо инфразвуковых станций болид был зарегистрирован также и сейсмическими станциями мониторинговой сети ИГИ. На рисунке 9 показаны вид сигналов от Чебаркульского болида на сейсмической группе Акбулак и результат применения РМСС детектора. Сейсмический сигнал от удара о землю звуковой волны под местом взрыва четко виден в волновых формах в 3:22:00 по Гринвичу. Значительно позднее, около 4:00:00 GMT в волновых формах видны записи инфразвукового сигнала, записанного сейсмической станцией. Такая разница во времени регистрации сейсмического и акустического сигналов объясняется тем, что инфразвук распространяется значительно медленнее, чем сейсмические сигналы.

Помимо группы Акбулак, сейсмический сигнал от взрыва болида записали группы Боровое, Каратау, Маканчи и другие станции. Положение эпицентра, полученное по данным сейсмических групп ИГИ, очень хорошо совпадает с данными других источников.



В оранжевой рамке – волновые формы и детектирования инфразвука от челябинского болида, сейсмический сигнал от взрыва записан группой в 3:22:00

Рисунок 9. Вид сигналов от Чебаркульского болида на сейсмической группе Акбулак и результат применения РМСС детектора

Определено значение T_0 – времени достижения звуковой волной от взрыва поверхности Земли. Оно равно 03:21:59.64 GMT. Разница между временем взрыва по расчетам НАСА 03:20:33 GMT и временем T_0 удовлетворительно соответствует определениям высоты взрыва (23 км). Этот метод можно использовать для определения высоты источника.

По сейсмическим данным удалось определить магнитуду и энергию сейсмического события. Магнитуда $M_b = 3.5$, энергетический класс $K = 8.4$. Для сравнения отметим, что магнитуда по сейсмическим данным Тунгусского метеорита равна 5,0.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Казахстанские станции мониторинга ядерных испытаний зарегистрировали сигналы от взрыва Чебаркульского болида 15 февраля 2013 г. Причем

благоприятное географическое расположение станций казахстанской сети позволило получить самую существенную информацию о событии, казахстанские станции расположены ближе всех к эпицентру.

Уже начальные стадии интерпретации болида позволили уточнить информацию о координатах эпицентра взрыва болида, о частотном составе инфразвуковых и сейсмических сигналов от него. Получены предварительные данные об инфразвуковых

фазах от события. Произведена парадоксальная регистрация инфразвуковых сигналов сейсмической группой.

Следует отметить, что на данном этапе проведена только начальная интерпретация сигнала от взрыва болида. Дальнейшее изучение этого мощнейшего сигнала очень ценно как для задач мониторинга, так и для изучения физики болидов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пинкус, М. В Челябинской области обнаружены новые фрагменты метеорита/ М. Пинкус //Челябинская область: Российская газета. – 2013. – 20 фев.
2. Additional Details on the Large Fireball Event over Russia on Feb. 15, 2013 [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://neo.jpl.nasa.gov/news/fireball_130301.html.
3. Пресс-релиз Организации Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (ОДВЗЯИ) [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://ctbto.org/press-centre/press-releases/2013/russian-fireball-largest-ever-detected-by-ctbtos-infrasound-sensors/>.
4. Демин, В.Н. Новая инфразвуковая станция международной системы мониторинга ОДВЗЯИ Актюбинск (IS31) / В.Н. Демин, В.Г. Кунаков, А.А. Смирнов // Мониторинг ядерных испытаний и их последствий: тезисы докладов. Междунар. конф., Боровое, Казахстан: 12 – 16 августа 2002 г. – Курчатов, 2002. – С. 11.
5. Инфразвуковые станции КНЦД [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.kndc.kz/index.php/ru/observation-network-menu-ru/infrasound-stations-menu-ru/kuris-menu-ru>.
6. Walker, K.T. and Hedlin, M.A.H. In: *Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies*/ A. Le Pichon, E. Blanc and A. Hauchecorne (Eds.)//Springer, – 2010. ISBN: 978-1-4020-9507-8.–P. 141–184.
7. Объяснение природы источников когерентных низкочастотных сигналов, регистрируемых мониторинговой сетью НЯЦ РК / А.А. Смирнов, ЛеПишон А., Гильберт Ж. // Вестник НЯЦ РК. – 2010. – Вып. 3. – С. 76–81.
8. Сезонные вариации инфразвуковых сигналов от газовых факелов: наблюдение и моделирование / А.А. Смирнов, В.И. Дубровин, Л. Эверс // Вестник НЯЦ РК. – 2010. – Вып. 3. – С. 70–75.
9. Garces, M. A., Hansen, R. A. and Lindquist, K. G. Traveltimes for infrasonic waves propagating in a stratified atmosphere, *Geoph. J. Int.*, 135, 255–263.
10. Evers, L.G. and Haak, H.W. In: *Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies*/ A. Le Pichon, E. Blanc and A. Hauchecorne (Eds.)//Springer, – 2010. ISBN: 978-1-4020-9507-8.–P. 3–27.

ЯДРОЛЫҚ МОНИТОРИНГТІҢ ИНФРАДЫБЫСТЫҚ СТАНЦИЯЛАРЫНДАҒЫ ШҰБАР КӨЛ МЕТЕОРИТТІҢ ЖАЗБАЛАРЫН ТАЛДАУ

Дубровин В.И., Смирнов А.А.

Геофизикалық зерттеулер институты РМК, Курчатов, Қазақстан

2013 жылғы 15 ақпанда Қазақстанның сейсмикалық және инфрадыбыстық станциялар желісі Челябинск қ. ауданында болид жарылысынан сигналдарын жазып алған. Инфрадыбыстық станциялардың жазбалары бойынша болид жарылысынан сигналдары айқындалған және зерттелген, көзге көрінетін жылдамдықтары, жиіліктік жолағы, сигнал түсу азимуты анықталған. Сейсмикалық станциялары бойынша дыбыстық толқыны Жерге соғылу уақыты мен орны, сейсмикалық оқиғаның магнитудасы белгіленген. Бұл оқиға 1908 ж. Тунгус метеориті құлаудан кейін құлау күші бойынша екіншісі болып табылатыны көрсетілген.

THE RECORDS ANALYSIS OF THE CHEBARKULSKY METEORITE AT INFRASOUND ARRAYS OF NUCLEAR MONITORING

V.I. Dubrovin, A.A. Smirnov

Institute of Geophysical Researches, Kurchatov, Kazakhstan

On February 15, 2013 the network of seismic and infrasound arrays of Kazakhstan recorded signals from fireball explosion around Chelyabinsk. Using infrasound station records the signals from fireball explosion were detected and investigated, apparent velocity, frequency bands, azimuths of signal arrival were determined. Using seismic stations data the time and place of acoustic wave ground impact and magnitude of seismic event were determined. This event is the second by its force after falling of Tungus meteorite in 1908.

УДК 550.8:621.039.9

ГЕОРАДИОЛОКАЦИЯ: ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ НА УЧАСТКАХ СИП И ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Лисаевич А.В., Фролов З.Н.

Институт геофизических исследований РК, Курчатов, Казахстан

Описаны методика и результаты применения георадиолокации для инженерно-геологического и геоэкологического изучения условий участков Балапан, Опытное поле, Дегелен на СИП и для оценки информационных возможностей этого метода электроразведки.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время георадиолокационный метод можно назвать самым технологичным и производительным геофизическим методом. В основу этого метода положен эффект отражения электромагнитных волн на границах геологических сред, различающихся по диэлектрической проницаемости и электропроводности.

Георадиолокация применяется при решении гидрогеологических, инженерно-геологических, геотехнических и экологических задач. При этом традиционными объектами применения георадаров являются среды с низким и умеренным поглощением электромагнитных волн: гранит, кварцит, известняк, гипс, песчаные грунты, суглинки с низкой влажностью. Но даже в таких благоприятных средах максимальная глубина георадарного зондирования не превышала 20–30 метров. Область применения георадарных зондирований существенно расширилась с появлением новых технических средств [1], обеспечивающих глубину исследований геологических сред до 100 и более метров.

Такой георадарный комплекс (Лоза-Н), разработанный в российском Институте механизированного инструмента (ВНИИСМИ), впервые успешно был применен ИГИ на СИП при подготовке к ликвидации штолен ПЯВ. Требовалось протрассировать осевые линии этих объектов, расположенных на глубине от первых метров до 50–60 метров, в условиях отсутствия достоверных данных по их координатной привязке, что традиционно выполнялось только по данным дорогостоящего бурения. К настоящему времени в ИГИ накоплен значительный опыт применения георадарных зондирований не только по поиску штолен, но и при решении геоэкологических (связанных с последствиями ПЯВ на СИП) и инженерно-геологических задач. Теоретические основы, методика георадарных зондирований и некоторые результаты его применения с оценкой эффективности являются основным предметом рассмотрения в настоящей работе. не только на объектах СИП.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ

Первое зафиксированное радиоотражение от подповерхностных структур было получено случай-

но на ледовом аэродроме в Антарктиде А. Уэйтом в 1957 г. Он обратил внимание на то, что радиовысотомер показывал высоту 900 футов еще до момента отрыва самолета от взлетной полосы. Оказалось, что радиовысотомер, который представлял собой импульсный радиолокатор, фиксировал отражение от нижней границы ледника. Наблюденный эффект послужил началом исследований вопроса об использовании радиолокации в геофизике.

Глубина проникновения электромагнитных волн, согласно [2], определяется, главным образом, электрическим сопротивлением и диэлектрической проницаемостью геологической среды. На границах сред, различающихся по диэлектрической проницаемости (ϵ), происходит отражение электромагнитных волн:

$$K_{отр} = (\epsilon_1 - \epsilon_2) / (\epsilon_1 + \epsilon_2).$$

Скорость распространения электромагнитных волн в общем случае зависит от относительной диэлектрической проницаемости, относительной магнитной проницаемости и частоты приложенного поля. Однако для большинства сред, встречающихся на практике, относительная магнитная проницаемость равна единице, а влиянием частоты можно пренебречь. Поэтому скорость распространения волн в среде определяется по формуле:

$$V = c / (\epsilon)^{0.5},$$

где: c – скорость света,

ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость среды.

Скорость сильно зависит от влажности.

Глубина залегания отражающей границы рассчитывается из уравнения годографа отраженной волны [3]:

$$t = (x^2 + 4h^2) / V,$$

где: t – время точки на оси синфазности, снятое с радарограммы,

h – глубина до отражающей границы,

x – расстояние от излучающей антенны до приемной,

V – скорость распространения волн в слое над границей.

Волновая картина при полевых съемках (радарограмма) представляет собой совокупность записей

сигналов (трасс), пришедших к приемной антенне в интервал времени от 0 – момента посылки зондирующего импульса, до конца интервала записи. Как показано на рисунке 1а, радарограмма в виде гиперболы указывает на наличие локального объекта, по-

ложение которого по линии профиля и глубине определяется координатами (x, T) минимума гиперболы. Для границ раздела (рисунок 1б) она повторяет, в основных чертах, геологический разрез.

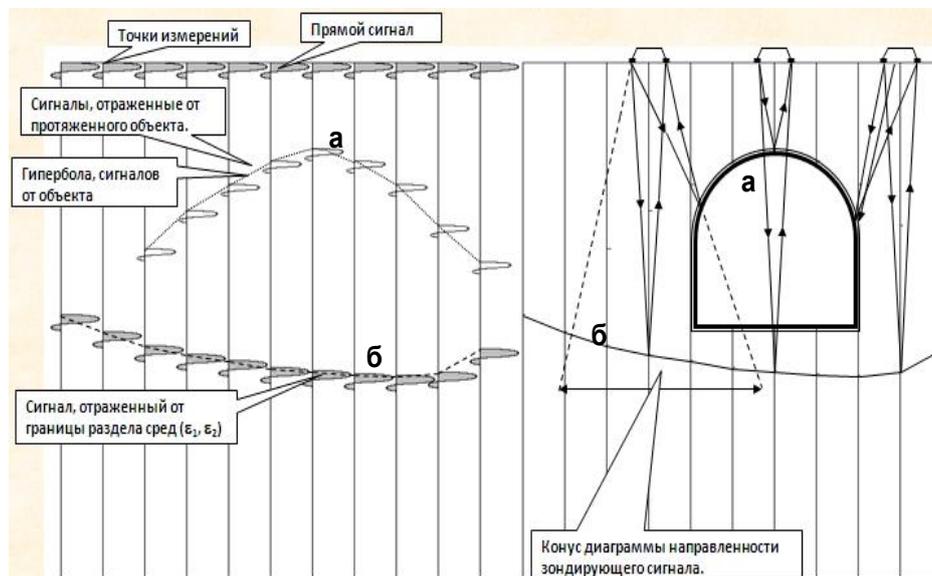


Рисунок 1. Схема образования «радиообразов» локального подземного объекта (штольни) при перпендикулярном сечении (а) и протяженной границы раздела сред (б) [2]

Полевые наблюдения сводятся к двум принципиально различным способам. Первый и наиболее распространенный состоит в перемещении антенн с постоянным разномом (базой) от нескольких сантиметров для высоких частот (сотни МГц) до 6–10 метров для низких частот (25–15 МГц) по поверхности с заданным шагом. Второй способ состоит в последовательном увеличении разноса между антеннами от десятков сантиметров до 5–15 метров. Целью таких наблюдений ставится получение годографа отраженных волн, по которому рассчитывается скорость распространения электромагнитных волн в геологической среде, а также выбор базы наблюдений, обеспечивающей максимальное соотношение сигнал-помеха для регистрации отраженных волн.

МЕТОДИКА ПОЛЕВЫХ СЪЕМОК, ОБРАБОТКА И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ

При георадиолокационных съемках использован аппаратно-методический комплекс Лоза-Н, включающий в себя блок формирования зондирующих импульсов, блок регистрации и блок управления и индикации с набором резистивно-нагруженных антенн (полуволновой вибратор) с рабочими частотами 50, 25 и 15 МГц. В состав комплекса также входит ПМО для вывода радарограмм на персональный компьютер и обработки данных.

Возбуждение и прием электромагнитных колебаний осуществлялись на средней частоте 25 МГц резистивно-нагруженными дипольными антеннами (полуволновыми вибраторами) длиной 6 метров с

регистрируемой длительностью волновых форм 512 и 1024 нс.

Наблюдения по линиям профилям выполнялись с шагом 0.5–1.0 метр при фиксированном расстоянии (6.0–8.0 метров) между излучающей и приемной антеннами, располагавшимися не только вдоль, но и вкрест направления профилей.

Направление антенн вкрест профилей применялось при поиске штолен. Такой методический прием позволил увеличить интервал прослеживания годографа дифрагированной волны от кровли штольни за счет ослабления эффекта направленности антенн по линии наблюдения и, тем самым, повысить точность расчета скорости электромагнитной волны и, соответственно, глубину залегания дифрагирующих объектов (сечений штольни).

Конечным результатом наблюдений являлась совокупность трасс по каждому профилю, записанная в отдельные файлы в блоке регистрации, преобразованные в формат интерпретационного ПМО с помощью программы Transfer и сохраненные на стандартных носителях ПК. Обработка и интерпретация георадарных данных осуществлялась в среде ПМО Krot-179B, входящего в состав поставки комплекса Лоза-Н.

Основными элементами обработки являлись низкочастотная двумерная фильтрация волновых форм с целью ослабления поля высокочастотных случайных и регулярных помех, повышение динамической выразительности слабых сигналов с использованием режима производной функции (в первом приближе-

нии функционального аналога АРУ в сейсморазведке) и уточнение средней скорости электромагнитных волн до кровли штольни по дифрагированным волнам.

Неотъемлемой составляющей процесса интерпретации георадарных данных при поисках штолен в условиях сильно пересеченного рельефа дневной поверхности являлись пересчет эхо-глубин до дифрагирующих объектов в вертикальные глубины и уточнение положения проекций этих объектов на линии профилей. Практически такие пересчеты осуществлялись согласно выражениям:

$$H_v = H_n / \cos \varphi \text{ и } \delta L = H_n \times \operatorname{Tg} \varphi,$$

где: H_v – глубина залегания кровли штольни по вертикали, рассчитанная с учетом угла наклона рельефа дневной поверхности по профилю в районе минимума годографа дифрагированной волны;

H_n – эхо-глубина до кровли штольни, рассчитанная по положению минимума годографа дифрагированной волны на радарограмме;

φ – угол наклона рельефа дневной поверхности в районе минимума годографа дифрагированной волны, рассчитанный по превышениям высотных отметок;

δL – смещение (в сторону увеличения высотных отметок) положения дифрагирующего объекта (кровли штольни) по линии профиля за счет угла наклона (φ) дневной поверхности.

Скорректированные таким образом координаты проекций точек дифракции на дневную поверхность были вынесены на линии профилей согласно плановой привязке и, в совокупности с данными бурения послужили основой для трассирования направления продольной оси штольни.

УТОЧНЕНИЕ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ НА УЧАСТКЕ ДЕГЕЛЕН

При подготовке штолен к ликвидации одной из актуальных задач является уточнение и трассирование направления таких выработок от портала к концевому боксу. Незначительные размеры объектов изучения в поперечном сечении (порядка 3–4 метров), а также положительный опыт выявления скрытых тоннелей, трубопроводов и т.п. как дифрагирующих объектов в полях электромагнитных волн, определили перспективность привлечения для решения этой задачи георадарных технологий. Фактурной основой для инженерно-геологической интерпретации георадарных данных в районе штольни N явились волновые формы, отражающие неоднородность изучаемых разрезов по латерали и на глубину в сечениях по отработанным профилям. Рассмотрим особенности этих проявлений на примере одного профиля 50 (рисунок 2).

В результате опытно-методических работ была определена средняя скорость электромагнитной волны. Для данного участка работ она составила 55 см/нс.

В волновом поле по этому профилю (рисунок 2 а-в) имеет место не менее трех четко выраженных осей синфазности гиперболической формы, минимумы которых расположены в районе ПК25 на глубинах 12, 16 и 20–22 метра. Самая верхняя из них, с расчетной средней скоростью порядка 11 см/нс, проинтерпретирована как обусловленная дифракционными явлениями на контакте порода-воздух, как наиболее контрастной границы. Именно на этой глубинной отметке бурением был вскрыт верхний свод штольни.

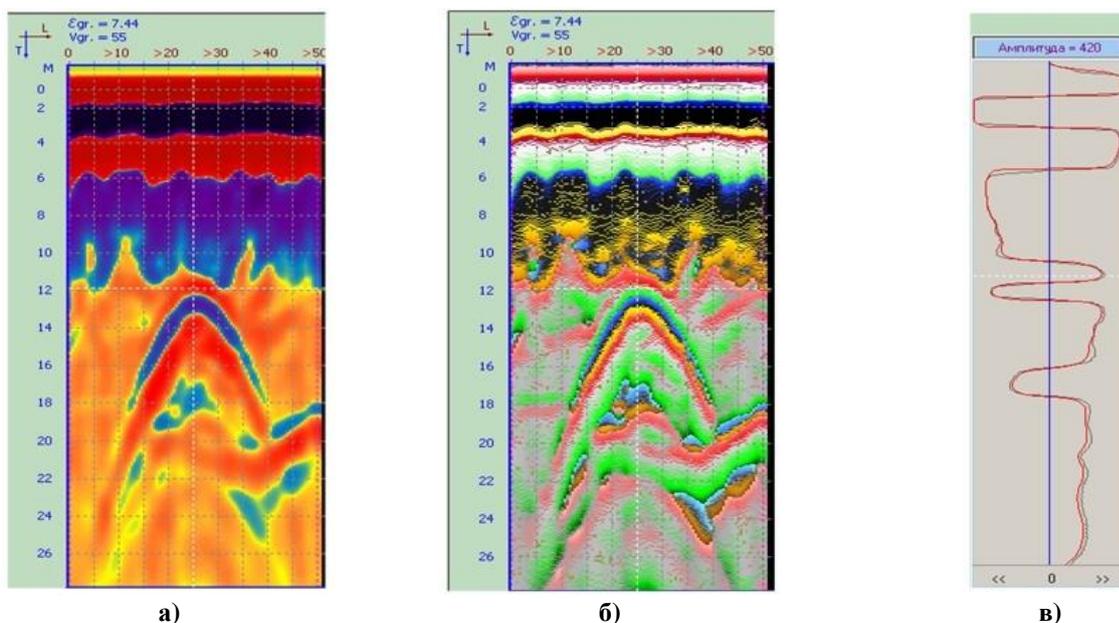
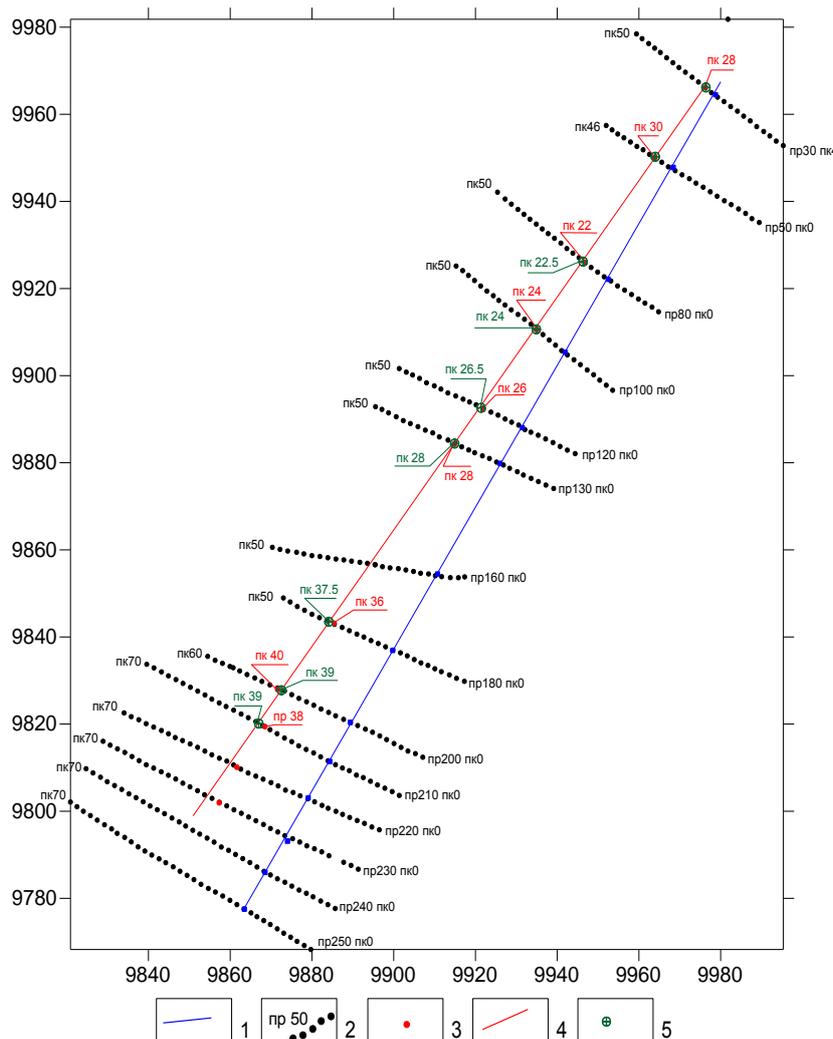


Рисунок 2. Участок Дегелен, штольня N. Радарограмма по линии профиля 50 в амплитудной форме (а), в виде производной функции (б), отдельная ее трасса (в), в районе минимума годографа дифрагированной волны



1 – ось штольни по геодезическим данным; 2 – профили георадарной съемки; 3 – точки определения координат кровли штольни в сечениях по профилям; 4 – ось штольни по данным георадарной съемки; 5 – опорные точки на оси штольни

Рисунок 3. Участок Дегелен, штольня N. Плановое положение по данным георадарной съемки

Ось синфазности, с минимумом на глубине порядка 16 метров (ПК 25), характеризуется с несколько повышенной кажущейся скоростью, проявленной сближением участков гипербол на удалении от минимумов на 10–20 метров. Наличие этой оси синфазности, возможно вызвано отражениями (дифракцией) в основании штольни на нижней границе воздуха-порода. Появление осей синфазности в интервале глубин 20–22 метра в виде цуга колебаний, наиболее вероятно, вызвано многократными отражениями (реверберацией) в замкнутом воздушном пространстве штольни.

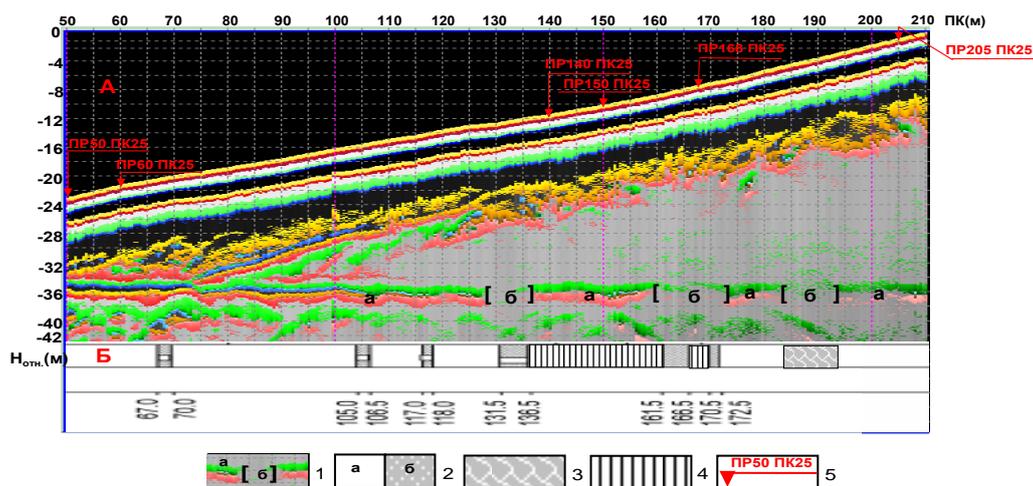
В целом, в результате обработки системы профилей, пересекающих штольню (рисунок 3), было существенно уточнено направление ее оси, что в конечном счете было использовано для определения мест заложения технологических скважин.

Для оценки информационных возможностей метода при выявлении бетонных сооружений в этой горной выработке отработан профиль вдоль оси

объекта. Наблюдаемое волновое поле с учетом поправок за рельеф и результаты его интерпретации приведены на рисунке 4.

Характерной особенностью волны, отраженной от свода штольни, является наличие участков значительного снижения амплитуд (интервалы ПК 128–135, 161.5–170.5 и 184–194) вплоть до полного отсутствия их корреляции. Такие участки проинтерпретированы как заполненные бетонными пробками. Рассмотренные особенности проявления вещественных неоднородностей в пространстве этой горной выработки фактически иллюстрируют экспериментально полученные данные по предельной разрешающей способности выполненных георадарных съемок на частоте 25 МГц.

В целом результаты съемок по этой штольне иллюстрируют высокие информационные возможности георадиолокационных зондирований не только при выявлении подземных горных выработок, но и при изучении их конструктивных особенностей.



1 – дифрагированные волны от штольни: а – интенсивные на границе контрастного изменения диэлектрической проницаемости между гранитным сводом ($\epsilon \approx 7$) и воздушной средой ($\epsilon = 1$) в интервалах отсутствия или незначительных (не более 1-3 метра) размеров бетонных сооружений и пр.), б – слабо проявленные, вплоть до потери корреляции в интервалах бетонных сооружений ($\epsilon \approx 2-10$) размерами от 5 и более метров; 2 – участки отсутствия бетонных сооружений (а) и местоположение бетонных пробок (б); 3 - предполагаемая зона инженерных сооружений, выделенная по данным георадарной съемки; 4 – интервал штольни, подлежащий заполнению бетонной смесью; 5 – проекции профилей георадарной съемки, проложенных ортогонально створу штольни

Рисунок 4. Участок Дегелен, штольня N. Проявленность инженерных сооружений (бетонных пробок) в волновом поле георадарной съемки по створу штольни

ИЗУЧЕНИЕ ПОСТВЗРЫВНОЙ НАРУШЕННОСТИ НА УЧАСТКЕ БАЛАПАН НА ПРИМЕРЕ СКВАЖИНЫ 1313

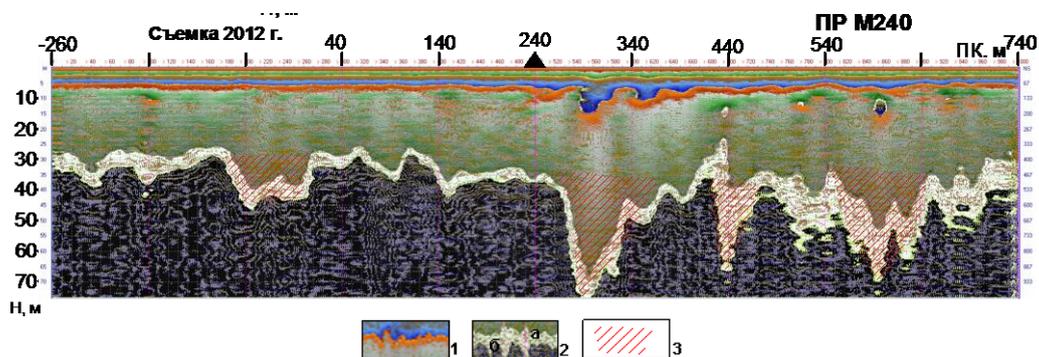
В районе этой скважины георадарная съемка выполнялась в 2012 году. Целью этих съемок ставилось выявление геодинамически активных структур в пространстве, прилегающем к эпицентру ПЯВ в этой скважине.

По данным съемки, как показано на рисунке 5, самая верхняя отражающая граница, залегающая на глубине 8–10 метров, определена как подошва деструктурированных покровных отложений. Далее, на глубинах более 20 метров выявлены диэлектрические границы в скальном фундаменте, предположительно связанные с кровлей и подошвой трещиноватых обводненных пород.

Важной особенностью полученного разреза является наличие участков (в интервале ПК 200-380) локальных структур с повышенной диэлектрической проницаемостью пород скального фундамента. Такое повышение наиболее вероятно вызвано их обводнённой трещиноватостью, которая наиболее контрастно проявлена вблизи эпицентра ПЯВ в этой скважине (ПК240).

На основании полученных данных выявлены активные зоны ослабленных структур в приустьевой площадке.

В целом, мониторинговая георадарная съемка позволила выявить геодинамически активную часть блока скважины 1313. При этом глубинность исследований составила порядка 70 метров.



1 – диэлектрическая граница подошвы деструктурированных покровных отложений; 2 – диэлектрические границы по скальному фундаменту: предположительно кровля (а) и подошва (б) трещиноватых обводненных пород; 3 – интервалы разрезов с повышенной мощностью трещиноватых обводненных пород.

Рисунок 5. Участок Балапан, скважина 1313. Выявление и мониторинг геодинамически активных зон по данным георадарных съемок в 2011 и 2012 годах

ИЗУЧЕНИЕ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ПОД ХРАНЕНИЕ РАО НА УЧАСТКЕ ОПЫТНОЕ ПОЛЕ

Для обоснования мест приповерхностного захоронения РАО необходимы достоверные данные о наличии и латеральной однородности водоупорных суглинистых грунтов и глубине залегания скального фундамента. С этой целью на одном из перспективных участков было пробурено 4 скважины глубиной по 15 метров. По данным бурения скважины 1А1 верхняя часть разреза до глубины 1 метр представлена супесными грунтами. Ниже этой отметки, вплоть до забоя, вскрытые грунты определены как суглинки тяжелые песчанистые, малой степени водонасыщения.

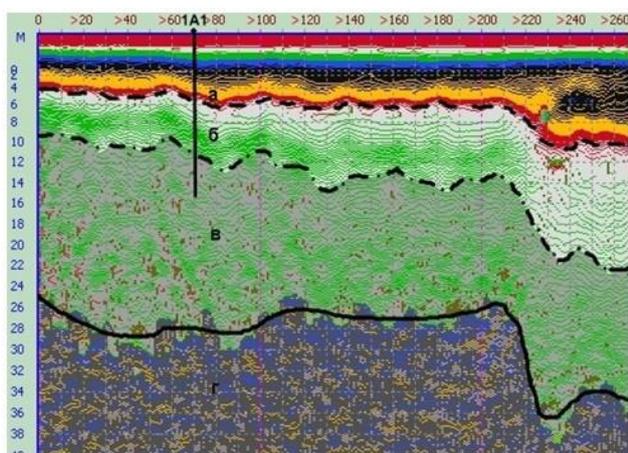
Задачей георадарной съемки, выполненной на частоте 25 МГц, ставилось определение глубины залегания скального фундамента не вскрытого бурением. Для уточнения природы диэлектрических границ на устьях скважин были выполнены электрические зондирования (ВЭЗ). Результаты этих исследований приведены на рисунке 6. В радарограмме, полученной по профилю, проложенному через скважину 1А1 (рисунок 6а) выделены 4 комплекса грунтов, различающихся по диэлектрическим свойствам.

Самый верхний (а), мощностью от 3–4 метров в районе скважины до 8–9 метров в интервале ПК240–260 определен как нерасчлененная (в виду недостаточной разрешающей способности метода на частоте 25 МГц) супесная толща. По данным ВЭЗ (рисунок 6б) с глубины более 0.7 метра установлено закономерное снижение электрического сопротивления разреза, минимум которого отмечен в интервале глубин 4–10 метров.

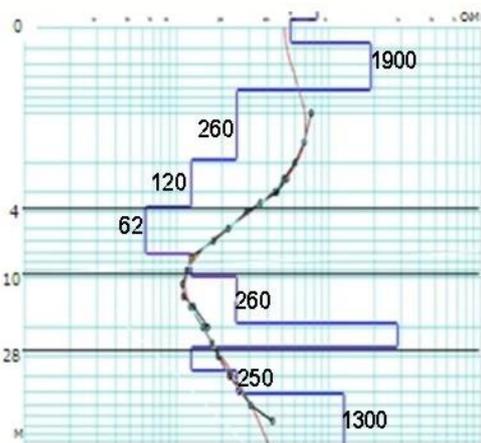
Далее, в интервале 4–10 метров выявлен электропроводящий горизонт (б). Принимая во внимание, что по данным ВЭЗ эта часть разреза характеризуется минимальными значениями электрического сопротивления, выделенный горизонт объяснен как сложенный преимущественно суглинистыми грунтами.

Пространство (в) между суглинистой частью разреза и отражающей границей на глубине 27–28 метров (в районе скважины), судя по повышенным значениям электрического сопротивления, составляющим порядка 200–260 Ом·м, сложено, наиболее вероятно, песчанистыми суглинками. При этом по данным ВЭЗ установлено, что разрез в интервале глубин 20–30 метров характеризуется существенной неоднородностью по электрическому сопротивлению, что, видимо, связано с наличием в нем обломочного материала вблизи кровли фундамента, сложенного алевролитами и песчаниками.

Как следует из рисунка 6а, песчано-глинистая толща характеризуется в целом как имеющая моноклиналиное залегание с небольшим углом падения в интервале ПК0–210, дальше которых установлено резкое ее погружение, синформное с погружением кровли фундамента. Такое погружение, наиболее вероятно, вызвано проявлением тектоники типа сброса. Таким образом, очевидно, что георадарная съемка в данном случае позволила не только закартировать кровлю скального фундамента, но и уточнить геологическое строение участка – выявить наличие и определить мощность наименее проницаемой суглинистой толщи.



а)

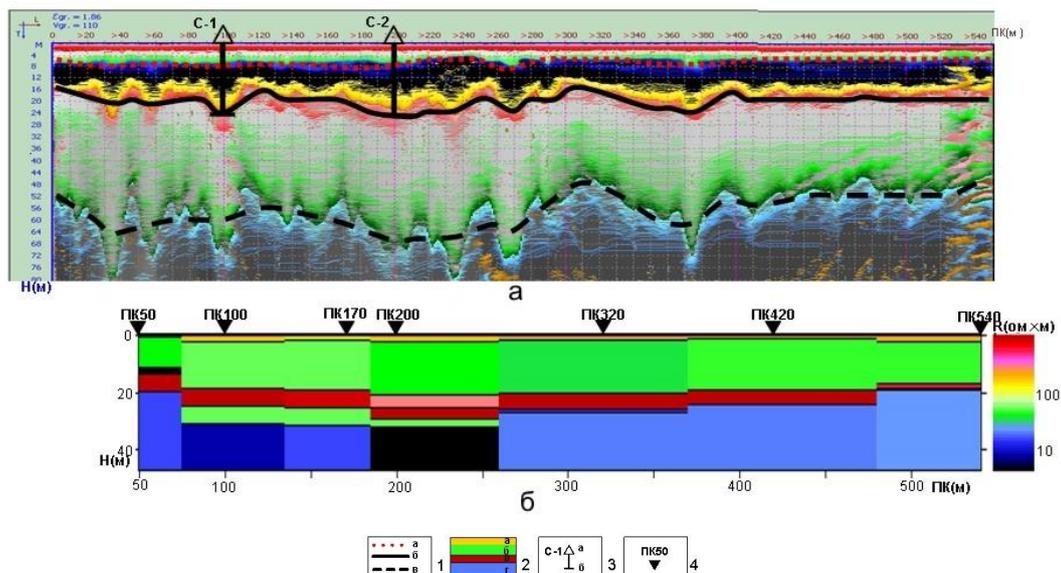


б)



1 – разделение слоев по диэлектрической проницаемости: а – деструктурированный супесный грунт, б – суглинок, в – суглинок песчанистый; 2 – наблюдаемая (а) и подобранная (б) кривые ВЭЗ; 3 – геоэлектрическая колонка по данным ВЭЗ со значениями электрического сопротивления Ом·м по горизонтам

Рисунок 6. Участок Опытное поле, площадка 1А. Уточнение геологического разреза по данным георадарной съемки – а, электроразведки ВЭЗ – б



1 – диэлектрические границы по данным георадарной съемки: а – подошва деструктурированных грунтов (зоны аэрации), б – кровля плотных суглинков и супесей, в – предположительно подошва горизонта плотных суглинков и супесей; 2 – геоэлектрические горизонты по данным ВЭЗ: а – зона аэрации (100-300 Ом·м), б – толщина супесей (50-80 Ом·м), в – необводненные пески, галечники (до 1000 Ом·м), г – толщина плотных супесей и суглинков (не более 50 Ом·м); 3 – параметрические скважины: их номера (а) и глубина залегания кровли плотных суглинков и супесей (б); 4 – точки ВЭЗ

Рисунок 7. Участок ТЭЦ-2. Результаты георадарной съемки – а, вертикальных электрических зондирований (ВЭЗ) – б по линии профиля 1

ИНЖЕНЕРНЫЕ ИЗЫСКАНИЯ ПРИ УТОЧНЕНИИ СЕЙСМИЧНОСТИ ПЛОЩАДКИ РАСШИРЕНИЯ ТЭЦ-2 Г. АЛМАТЫ

Целевым назначением георадарной съемки ставилась оценка неоднородности (по латерали и глубине) глинистой части разреза. В поле электромагнитных волн (рисунок 7а) разрез по линии профиля 1 представлен наличием двух явно выраженных (в интервале глубин 0–24 метра) и одной предполагаемой (на глубинах порядка 48–64 метра) диэлектрических границ. Самая верхняя граница, залегающая на глубине 5–8 метров, проинтерпретирована подошвой зоны аэрации. Вторая, наиболее выраженная в амплитудах сигнала, соответствует, согласно данным бурения, кровле плотных суглинков. Пространство между этими границами в диэлектрических свойствах характеризуется как однородное.

В отношении возрастания амплитуды сигнала на глубинах 48–64 метра отметим, что данными георадарной съемки, видимо, отмечена нижняя граница толщи плотных суглинков под которыми возможно залегают песчаные грунты, существенно отличающиеся от суглинков по диэлектрическим свойствам.

На рисунке 7б приведен геоэлектрический разрез по тому же профилю. В параметре электрического сопротивления исследуемая толщина также дифференцирована. При этом самая верхняя часть разреза на глубину порядка 5–8 метров характеризуется значениями сопротивления в первые сотни Ом·м, что вполне закономерно для зоны аэрации.

Характерной особенностью распределения электрического сопротивления является наличие высо-

коомного (до тысяч Ом·м) горизонта в интервале глубин от 15 до 25 метров. Такие значения сопротивления характерны для «сухих» песчаных пород и грунтов. Ниже этого горизонта отмечены минимальные значения электрического сопротивления. Область таких значений проинтерпретирована горизонтом плотных суглинков.

В целом, по результатам георадарной съемки на этой площадке была установлена пространственная связь диэлектрической границы, высокоомного горизонта и области с пониженными значениями скорости поперечных волн в верхней части разреза. Этот факт позволил повысить достоверность выводов по данным сейсмозвездки о наличии в ней наиболее разуплотненных грунтов, существенным образом влияющих на сейсмичность площадки расширения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о высокой информативности параметра диэлектрической проницаемости, реализуемого методом георадиолокации. При этом показана эффективность метода при решении широкого круга задач – от геоэкологических, связанных с изучением последствий ПЯВ на испытательных площадках, до инженерно-геологических. Обладая высокой разрешающей способностью и детальностью, метод георадиолокации позволяет не только выявлять локальные объекты незначительных размеров на глубинах порядка 50 метров, но и получать данные по особенностям вещественного состава таких объектов.

Метод георадиолокации представляется важным элементом комплексных исследований при выявлении и мониторинге геодинамически активных трещинных структур на бывших площадках проведения ПЯВ. Для повышения достоверности и детальности решения таких задач на площадках ПЯВ, с учетом высокой производительности метода представляется целесообразным проведение съемок по площадным системам наблюдения с построением трехмерных изображений изучаемой геологической среды.

Не менее эффективен этот метод при инженерно-геологических исследованиях, когда сведения по неоднородности геологической среды в параметре диэлектрической проницаемости позволяют существенно уточнить геологическое строение изучаемых разрезов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сайт ООО «ВНИИ СМИ», Россия (производитель радаров марки Лоза): [электронный документ]. (www.geo-radar.ru).
2. Беркут А.И., Копейкин В.В., Морозов П.А., Козьяков А.Н. Подповерхностное зондирование с помощью геофизического комплекса «ЛОЗА», «ЛОЗА-М» (Методические рекомендации). Институт механизированного инструмента (ВНИИСМИ). М. 2002 г.
3. Владов М.Л., Старовойтов А.В. Введение в георадиолокацию. Учебное пособие – М.: Издательство МГУ, 2004. – 153 с.

ГЕОРАДИОЛОКАЦИЯ: ССП УЧАСКЕЛЕРІНДЕ ЖӘНЕ ИНЖЕНЕРЛІК-ГЕОЛОГИЯЛЫҚ ЗЕРТТЕУЛЕРІНДЕ ҚОЛДАНУ ТӘЖІРИБЕСІ

Лисаевич А.В., Фролов З.Н.

Геофизикалық зерттеулер институты РМК, Курчатов, Қазақстан

ССП-дағы Балапан, Тәжірибелік алаңы, Дегелең учаскелердің жағдайларын инженерлік-геологиялық және геоэкологиялық зерделеу және электрбарлаудың осы әдісінің ақпараттылық мүмкіншіліктерін бағалау үшін георадиолокацияны қолданудың әдістемелері мен нәтижелері сипатталған.

GEORADAR LOCATION: EXPERIENCE OF APPLICATION WITHIN THE STS AND IN ENGINEERING-GEOLOGICAL RESEARCHES

A.V. Lisayevich, Z.N. Frolov

RSE Institute of Geophysical Research, Kurchatov, Kazakhstan

Procedures and results from applied georadar location are described for engineering-geological and geoeological studying of conditions of Balapan sites, the Experimental field, Degelen site in the STS and for assessment of informational capabilities of this electrical survey technique.

УДК 550.344

100 ЛЕТ КЕМИНСКОЙ КАТАСТРОФЕ: НОВЫЕ ДАННЫЕ ОБ ОЧАГЕ

Мукамбаев А.С., Михайлова Н.Н.

Институт геофизических исследований, Курчатов, Казахстан

Собраны и обобщены данные, в том числе новые, в отношении параметров очага катастрофического Кеминского землетрясения 1911 г. Установлены завышение магнитуды этого события в каталогах землетрясений Казахстана. Выявлены расхождения в положении эпицентра Кеминского землетрясения в глобальных и региональных каталогах. Результаты проведенного изучения этого землетрясения следует учитывать в работах по сейсмическому районированию и прогнозу сейсмических воздействиях на ответственные объекты.

ВВЕДЕНИЕ

Катастрофическое Кеминское землетрясение произошло почти 100 лет назад 3 января 1911 года вблизи города Верный (Алматы). Магнитуда землетрясения в каталогах землетрясений, составленных в Советском Союзе и международных каталогах [3, 8], оценивалась $M=8,2$, а максимальная интенсивность в эпицентре достигала 10–11 баллов. Таким образом, это событие попало в список самых сильных внутриконтинентальных землетрясений XX века и в число пяти землетрясений Центральной Азии с магнитудой, превышавшей 8. Землетрясение было исключительным не только по силе, но и по площади распространения сотрясений. По многочисленным свидетельствам жителей г. Верного «землетрясение началось сильными горизонтальными ударами и закончилось колебаниями во все стороны, причем их продолжительность была исключительно большая. Будто гигантские руки схватили наше жилище и встряхнули его, как встряхивают пузырек с лекарством, чтобы разболтать его содержимое...», – писал один из очевидцев этой катастрофы.

По советским источникам основные параметры землетрясения были определены в основном по макросейсмическим данным и были следующие [3]:

Дата землетрясения.....	3 января 1911 г.
Время начала землетрясения, t_0	3 часа 23 минуты (03.23.58)
Координаты центра эпицентральной зоны.....	$\varphi^0=42,90\text{ N}$, $\lambda^0=76,90\text{ E}$
Магнитуда землетрясения M	8,2
Глубина очага H , км.....	25
Горизонтальная протяженность очага l_x , км.....	200
Максимальная сила в эпицентре I_0 , баллов.....	> 10–11
Интенсивность I в г. Верный, баллов.....	8–9.

Землетрясение ощущалось на огромной территории. Отмечено качение всяких предметов в г. Омске, Томске, Кокшетау, т.е. на расстоянии свыше 1 000 км. Известны случаи остановки маятниковых часов во многих районах Центральной России.

Долгие годы информация в существующих каталогах не ставилась под сомнение и переходила из одного источника в другой, использовалась при построении карт сейсмического районирования, бралась за основу при расчете сейсмических воздействий на объекты близ г. Алматы. Но в последние годы в мире начались работы по созданию глобальной

модели землетрясений (проект GEM), в задачи которого входило уточнение характеристик всех землетрясений с магнитудой более 5,5. Частью этого проекта стал и проект для Центральной Азии (EMSA). При выполнении этих проектов исследователям стали доступны новые архивные материалы, новые методы изучения очагов и их параметров. Именно для Кеминского землетрясения выявились несоответствия в его характеристиках. Очень важно установить истинные характеристики, поскольку Кеминское землетрясение используется сейчас как эталонное событие при разработке сценариев сильных землетрясений, его параметры положены в основу оценки сейсмopotенциала сейсмогенерирующих зон вблизи г. Алматы, от его магнитуды ведутся расчеты сейсмических воздействий на ответственные объекты.

Целью настоящей работы был сбор различных доступных исторических и современных данных по Кеминскому землетрясению, анализ его параметров для учета в каталогах EMSA и других работах.

ИСТОРИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ О КЕМИНСКОМ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИИ

Самые подробные сведения о последствиях Кеминского землетрясения были собраны специально созданной Российской горным обществом экспедицией и Центральным сейсмическим бюро Российской империи сразу после землетрясения экспедицией, которая уже весной 1911 года направилась в г. Верный под руководством профессора горного института К.И. Богдановича.

В экспедиции принимали участие горные инженеры Д.И. Мушкетов, И.М. Карк, Б.Я. Корольков, и два студента горного института Ковалевский и Наливкин. С 12 апреля по 28 мая продолжались непрерывные исследования эпицентральной области. В течение недели с 12 по 19 апреля профессор К.И. Богданович и горный инженер И.М. Карк обследовали последствия землетрясения на территории в г. Верного. Дальше экспедиция продолжалась по трем основным маршрутам:

1) Горный инженер Д.И. Мушкетов и студент Наливкин для осмотра западного района землетрясения пошли маршрутом через перевал Кастек в долину реки Чу и в область Большого Кебина, где произошли крупные нарушения на поверхности земли.

Оттуда Мушкетов прошел северным берегом Иссыккуля до Сазановки, затем из Пржевальска по южному берегу Иссыккуля до Нарына.

2) И.М. Карк отправился из Зайцевки по реке Чилик на Джаланаш и до Пржевальска для осмотра восточного района области землетрясения и для выбора путей для горизонтальной невелировки. Кроме этого, ему было поручено призвести съемку нескольких площадей со следами сильных нарушений в грунтах около Уйтала, Сазановки и на Большом Кебине. С Б. Кебина он вернулся в г. Верный через перевал Кара-Кастек.

3) К.И. Богданович с 19 апреля по 1 мая совместно с горным инженером Корольковым и студентом Ковалевским обследовали северные склоны Заилиского Алатау между Талгаром и Каскеленом, а с 2 по 28 мая совершили круговой рейс из г. Верного

через перевал Аманжол, Шаты, Турайгыр и Алмалты. Осмотрели долину реки Чилик от Шатов почти до вершины, долину Б. Кебина от района исследования Мушкетова до вершины. Посетили Пржевальск, северный берег Иссыккуля до Сазановки и Чоткала. Сделал несколько разездов по южному и северному склону Кунгей Алатау.

Изучение последствий землетрясения данной экспедицией было выполнено на исключительно высоком уровне. В составленном отчете приведен обширный фактический материал о разрушениях зданий в г. Верном и большом числе окрестных селений, а также об изменениях земной поверхности (разрывы, обвалы, оползни и др.) в эпицентральной зоне, построены карты изосейст и разломов (рисунок 1).

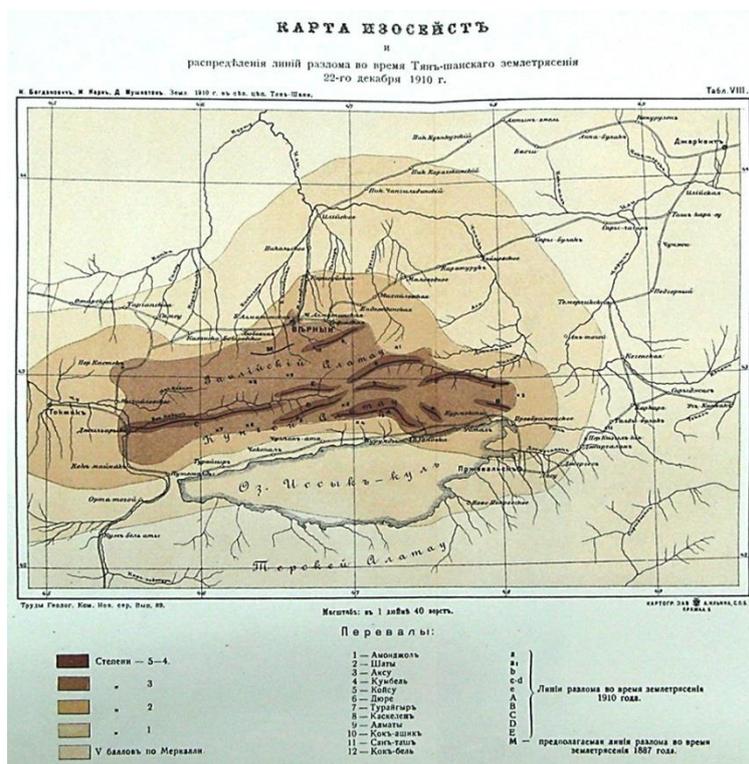


Рисунок 1. Карта изосейст (по шкале интенсивности Меркалли) и распределение линий разломов Кеминского землетрясения

ПОСЛЕДСТВИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

В результате землетрясения в г. Верном не осталось буквально ни одного дома, который бы не пострадал хотя бы в малой степени (рисунок 2). Согласно актам оценочной комиссии, число совершенно разрушенных жилых домов достигло 616, требующих капитального ремонта – 301, домов с более легкими повреждениями – 1010, разрушенных торговых помещений и складов – 121, поврежденных – 397, нежилых разрушенных построек – 3 000, поврежденных – 2 000. Наблюдалась деформация почвы в районах Большой и Малой станиц, Кузнечно-промышленных (ниже Ташкентской аллеи) и Клевер-

ных участков, Татарской слободки. Образовались глубокие разрывы почвы: трещины местами достигали ширины 1 метр и глубины 5 метров (рисунки 2, 3).

Жертвы от землетрясения. В долине Большого и частью Малого Кемина погибло 245 и ранено 89 человек, юрт было уничтожено 616. В самом г. Верном и в близлежащих станицах погибло 44 и ранено 108 человек. В селе Сазановка погибло 9 и ранено 20 человек. В Токмаке погибло 11 человек. Общее число погибших при Кеминском землетрясении превышает 450 человек.

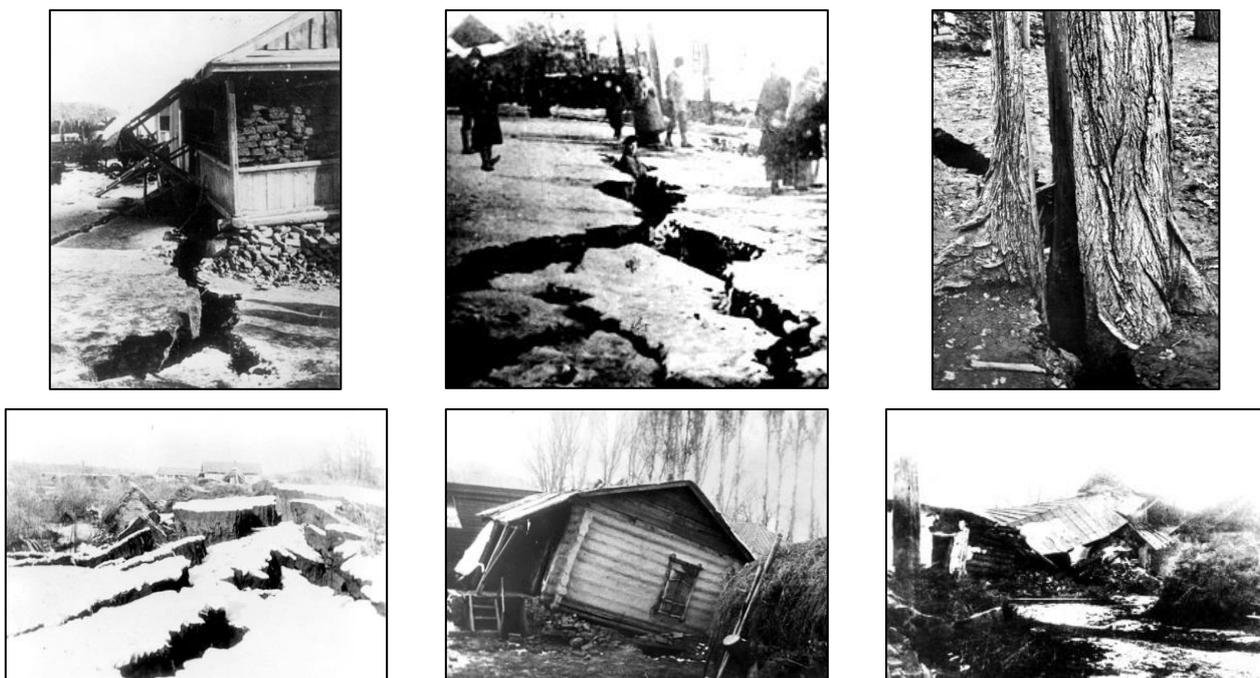


Рисунок 2. Фото обрушений и деформаций земной поверхности, вызванных землетрясением [4]

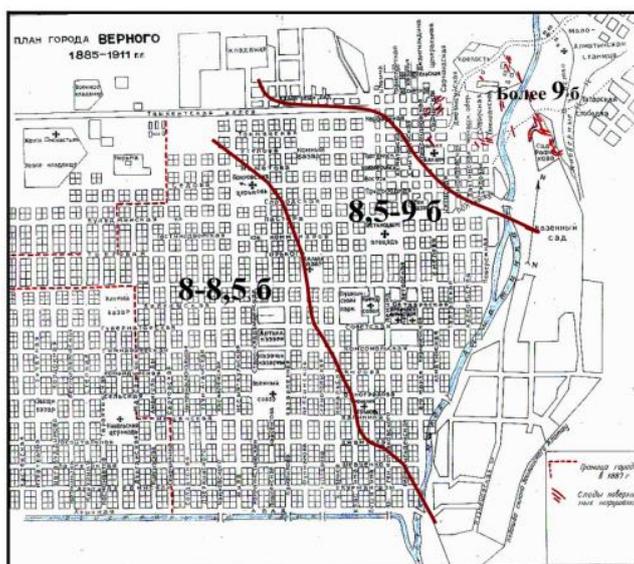


Рисунок 3. План г. Верного и распределение силы сотрясений Кеминского землетрясения 1911 г. (шкала интенсивности MSK-64) [4]

Как видно из карты распределения сотрясений на территории города Верный, в разных частях города интенсивность сотрясений по шкале MSK-64 составила 8–9 баллов в зависимости от инженерно-геологических условий района.

Эпицентральная область землетрясения, где произошли наибольшие изменения поверхности Земли, представляет собой узкую полосу, вытянутую вдоль долины Большого Кемина и верховий р. Чилик до берегов Иссык-Куля. В поперечном направлении она охватывает южные склоны Заилийского Алатау

и северные склоны Кунгей Алатау (рисунок 1). В этой области образовались системы разрывов значительной протяженности. Обвалы в долине Большого Кемина достигали колоссальных размеров. Так, каменный обвал в Чон-Каинды имел высоту более 400 м. Такие же обвалы с вертикальной высотой оторванной части не менее 500–600 м наблюдались к северу от Сазановки в долинах Сутгы-Булак и Тергерменты (рисунок 4).

Очаг Кеминского землетрясения имел огромный размер. Для сравнения на рисунке 5 приведена свод-

ная схема очагов наиболее известных землетрясений Средней Азии и Кавказа, составленная Шебалиным Н.В. [13].

Итак, при анализе параметров Кеминского землетрясения главным образом исследователи учитывали макросейсмические данные о проявлениях это-

го события как на территории г. Верный, так и в горной местности в пределах хребтов северного Тянь-Шаня. С учетом построенной карты изосейст [3] по макросейсмическим данным были рассчитаны магнитуда, глубина очага, установлен макросейсмический эпицентр.

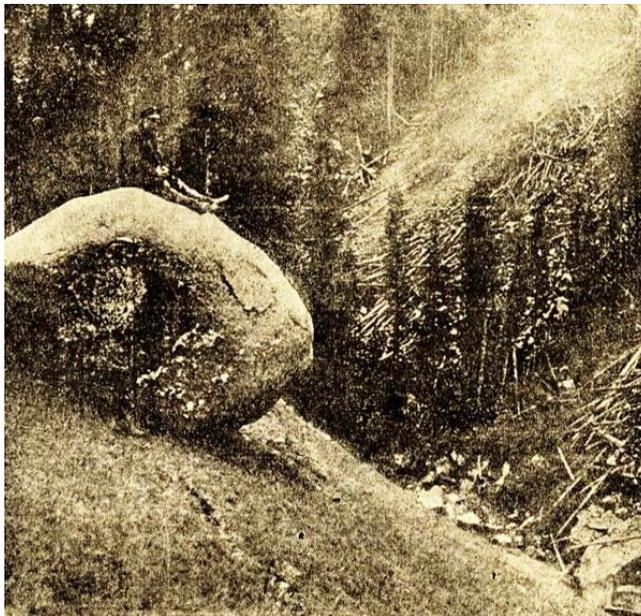


Рисунок 4. Один из упавших во время Кеминского землетрясения камней; склон покрыт сбитыми камнями деревьями (фото Д. Мушкетова)

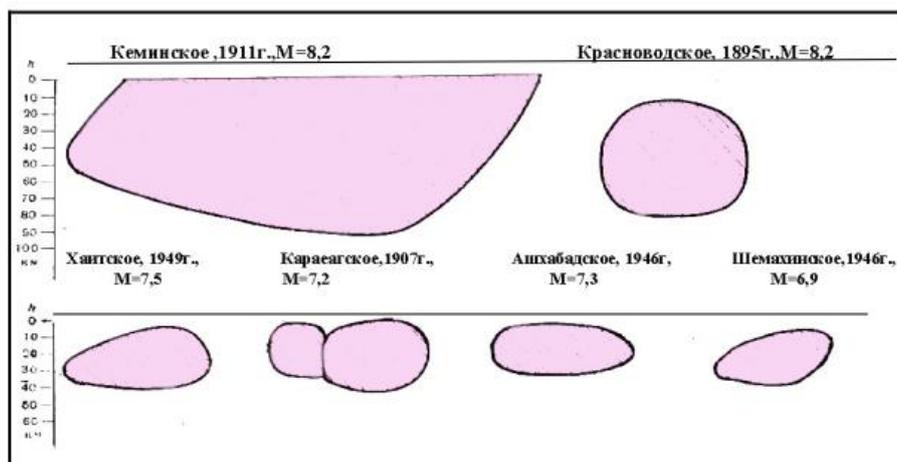


Рисунок 5. Схема очагов некоторых сильных землетрясений (по Н. Шебалину)

НОВЫЕ ДАННЫЕ И ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ КЕМИНСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Благодаря сотрудничеству между Центром данных (KNDC) и Международным сейсмологическим центром (ISC, Англия) получены новые данные, касающиеся Кеминского землетрясения. В мире имеются записи Кеминского землетрясения (рисунок 6), полученные по 19 сейсмическим станциям, зарегистрировавшим данное землетрясение (таблица 1).

Самой близкой к очагу в 1911 году оказалась сейсмическая станция Тифлис (TIF), а самой далекой – станция Ривервью в Австралии.

Имеющееся сейчас программное обеспечение и новые глобальные скоростные модели среды позволяют по этим записям вновь провести локализацию и определить точку начала процесса разрывообразования. Локализация гипоцентра по этим данным показала, что координаты находятся гораздо восточнее, чем это следует из имеющихся каталогов.

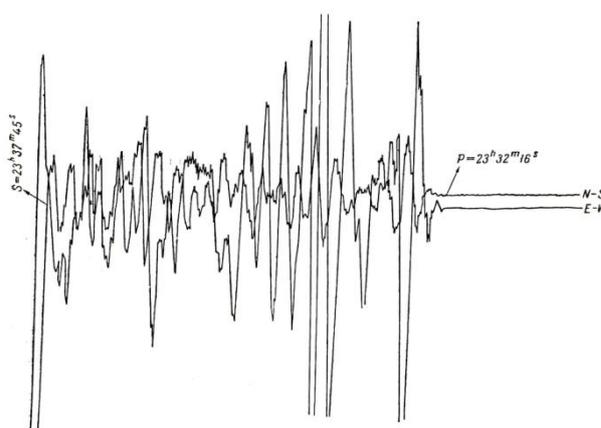
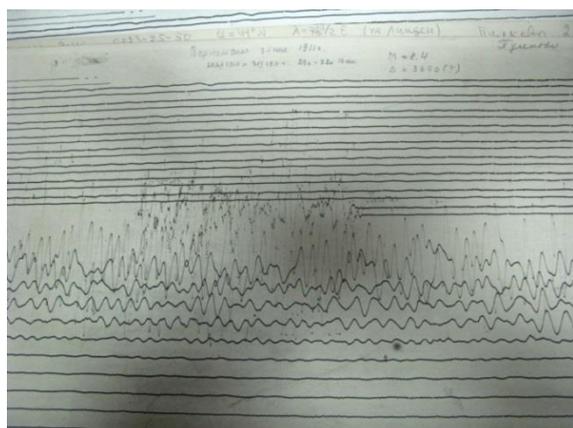


Рисунок 6. Запись Кеминского землетрясения на сейсмической станции Пулжово

Таблица 1. Фрагмент параметров записей Кеминского землетрясения по станциям мира

Обработка события 16958130...									
Автор	Время	ϕ°	λ°	Глубина	F	Кол-во станций	Кол-во фаз	Кол-во определений	
GEM	03.01.1911 23:25	43.013	78.530	20.00	H	19	113	47	
Станция	Фаза	Расст.	Дата	Время	Каналл	A	T	A фазы	Δt
TIF	P	24.86	03.01.1911	23:31:03	?			P	-6.841
TIF	S	24.86	03.01.1911	23:35:37	?			S	5.297
PUL	P	33.53	03.01.1911	23:32:16	?			P	-10.629
PUL	S	33.53	03.01.1911	23:37:45	?			S	-2.322
ZKW	P	35.84	03.01.1911	23:32:48	N	4000	18264,00	P	1.120
ZKW	P	35.84	03.01.1911	23:32:48	E	6000	2,00	P	1.120
ZKW	P	35.84	03.01.1911	23:32:48	?			P	1.120
UPP	P	39.93	03.01.1911	23:33:15	E	2000	6,00	P	-6.094
UPP	P	39.93	03.01.1911	23:33:15	?			P	-6.094

В рамках проекта ЕМСА для Центральной Азии (ЦА), который начал выполняться с 2011 года, основной задачей является построение карты сейсмической опасности, основанной на новой методологии. Для ее построения в вероятностной и детерминистской постановке важно иметь унифицированное представление о сейсмических структурах (разломах) на всей территории Центральной Азии и унифицированный каталог землетрясений для всей территории, желательно как можно за больший период времени. Задача составления каталога с исторических времен по настоящее время для ЦА была выполнена Центром данных РГП ИГИ и в настоящее время каталог пополняется новыми данными.

При сравнении регионального каталога и каталогов Международных центров данных наибольшие расхождения отмечаются в параметрах Кеминского землетрясения. В таблице 2 приведен фрагмент каталогов *GEM (ISC)* и *EMSA(KNDC)*, где видно, что особенно сильно отличаются значения долготы (lon) и магнитуды.

Недавно, Delvaux и др. [5] и Arrowsmith и др. [6] (2005) провели исследовательское картирование разрыва и сдвига масс горных пород, связанных с Кеминским землетрясением. В частности, Delvaux и др. [5] (2001) разделили разрыв на 6 частей с разным направлением, плоскостью падения и кинематикой. Полевая работа, а также анализ стерео-аэросъемки позволили Arrowsmith и др. [6] улучшить представление о геометрии разломов и распределении сдвига в разных частях разлома. Их предпочтительным значением сейсмического момента является $M_0=3.86 \cdot 10^{20}$ Nm, что соответствует моментной магнитуде, по которой сейчас оценивается сила всех сильных землетрясений, $M_w=7.72$. Это значение находится в хорошем согласии с сейсмическим моментом $M_0=4.9 \cdot 10^{20}$ Nm, оцененным для этого землетрясения в другой работе Chen и Molnar (1977) при анализе поверхностных волн, записанных на двух станциях, одна из которых находится в Париже, а вторая в Ривервю (Австралия) [7].

Таблица 2. Параметры Кеминского землетрясения в каталоге GEM(ISC) и CA(KNDC)

GEM	Дата	Время	φ°	λ°	Глубина	Mw		
		03.01.1911	23:25:49.71	43,01	78,53	20.0	7,7	
EMSA	Дата	Время	φ°	λ°	Глубина	MLH	К	
		03.01.1911	23:25:58	42,90	76,90	25	8,2	17,8

Кеминское землетрясение 1911 г. включено в каталог Сейсмичности Земли Гутенберга и Рихтера [8], с магнитудой 8.4. Позже, некоторые авторы изучали параметры сейсмографов Милна, используемые для измерения амплитуд смещений, и нашли некоторые проблемы в калибровке этой аппаратуры. В частности, Abe and Noguchi [9] заново оценили магнитуды нескольких землетрясений в каталоге «Сейсмичность Земли» с учетом усиления примерно на три порядка больше, чем значение, использованное Гутенбергом и Рихтером (1954), и получили ошибку примерно 0.49 магнитудных единиц. Их определение магнитуды Кеминского землетрясения составило $M_s=7.8$ [7]. Магнитуда Кеминского землетрясения по расчетам Международного сейсмологического центра (ISC) составляет $M_w=7.7$. В 2012 году также проведены работы по оценке локализации и магнитуды, исходя из данных распределения интенсивности методом Bakun и Wentworth [10], используя модель затухания, ранее полученную Бинди и др. [11].

Распределение локализаций первоначальной загрузки (рисунок 8) показывает два основных кластера, согласующихся со среднеквадратичным значением изолиний, показанных на рисунке 8 (слева), которое показывает 2 минимума. Поэтому, распределение значений интенсивности в разных пунктах на поверхности Земли не позволяет определить единое

решения для локализации события. Это является следствием наблюдаемого сложного макросейсмического поля, где интенсивность больше 9 баллов оказалась «разбросанной» на расстоянии примерно 150 км с тремя пространственно хорошо разделенными кластерами высокой интенсивности (рисунок 7). Принимая во внимание решение, соответствующее абсолютному минимуму, центр интенсивности (красный квадрат) сдвинут примерно на 54 км на восток от расположения эпицентра (черный крест) (рисунок 8). Решение, найденное в этом исследовании для локализации хорошо согласуется с решением Arrowsmith и др. [6], который обнаружил, что большая часть сейсмической энергии высвободилась в самых восточных под-разломах (т.е. части Аксу и Чон-Аксу). Это наблюдение подтверждает, что центр интенсивности, в целом, более представительен по моменту центроида, нежели по эпицентральному расположению [12]. Западный кластер расположен вокруг самой западной части чу-кеминского разлома, где произошел разрыв во время землетрясения 1911 г. (например, часть разлома Жыл-Арык). Магнитуды интенсивности в соответствии с центроидом момента этого наиболее западного кластера (желтый квадрат) (рисунок 8, справа) немного больше, чем магнитуды в центре интенсивности (например, $M_{LN}=7.9$).

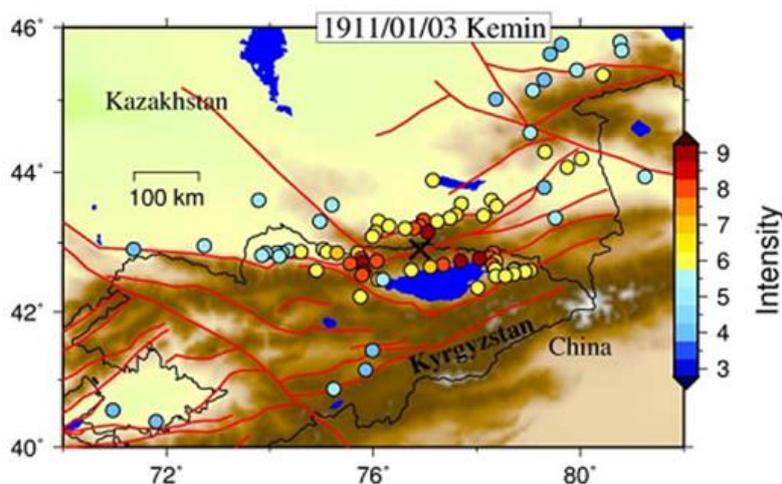
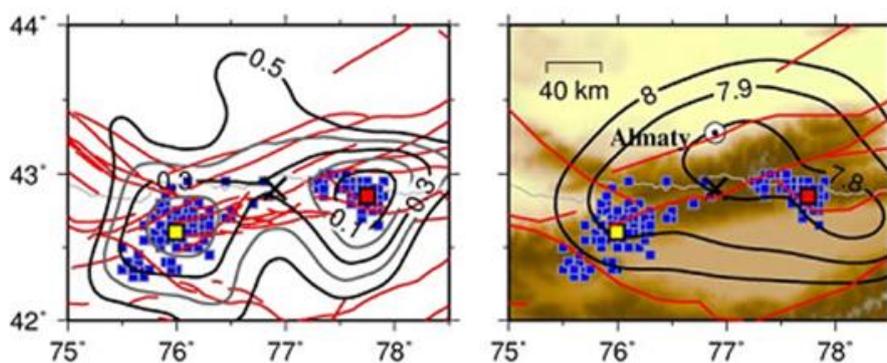


Рисунок 7. Карта распределения значений интенсивности и расположение эпицентра Кеминского землетрясения (черный крест), красными линиями выделены основные разломы [7]



Показано расположение центров интенсивности (красные и желтые квадратики) для двух кластеров первоначальной загрузки решений. Линиями показаны среднеквадратичные значения отклонений интенсивности (слева) и магнитуды M_{ln} (справа), эпицентр землетрясения (черный крест)

Рисунок 8. Карта результатов оценки положения центра интенсивности и магнитуды по данным распределения интенсивности [7]

Суммируя собранные новые данные об очаге Кеминского землетрясения и принимая в расчет имеющиеся архивные макросейсмические данные, можно сделать выводы:

– магнитуда Кеминского землетрясения в советских каталогах, скорее всего, является завышенной. Это следует из переопределения магнитуды по инструментальным записям с учетом исправления аппаратных характеристик, приведших к ошибочным завышенным результатам. Значения магнитуды 7,7–7,8 согласуются с новыми определениями сейсмического момента, сделанными по результатам изучения сдвига горных масс при этом землетрясении. Эти значения согласуются также с расчетами исходя из распределения интенсивности по новым моделям затухания.

– координаты эпицентра по разным источникам сильно разнятся. Видно, что разрыв был сложным, состоял из разных по кинематическим характеристикам субразрывов. Выделяются несколько кластеров, ответственных за распределение максимальной интенсивности сотрясений. В любом случае для

столь сильных событий недостаточно одной точки для описания сложного протяженного очага.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Впервые за многие годы вновь собраны и обобщены результаты исследований, касающиеся процессов в очаге Кеминского землетрясения и его параметров.

2. Установлено, что магнитуда землетрясения в советских и ряде мировых каталогов была завышена. По новым данным она не превышает 8.

3. Подвергнуто сомнению положение единого эпицентра Кеминского землетрясения. Показано, что его очаг был сложным, состоял из нескольких под-очагов. Начало излучения, вероятнее всего, находится в восточной части разлома, общая длина которого достигает почти 200 км. В западной части разлома в месте его окончания в 1938 г. произошло сильнейшее Кеминско-Чуйское землетрясение.

4. При прогнозе воздействий на ответственные объекты в районе г. Алматы в качестве исходных данных следует учитывать новые данные о Кеминском землетрясении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Богданович, К.И. Землетрясение 22 декабря 1910г.(4 января 1911г.) в северных цепях Тянь-Шаня между Верным и Иссык-Кулем / К.И. Богданович / С-Петербург. Известие Геологического Комитета, 1911.
2. Зенков, А.П. Сейсмические требования, которым должны удовлетворять постройки, сооружения в местностях, подверженных землетрясениям / А.П. Зенков // Смерчинская Областная Ведомость, 1911. – №52,54.
3. Новый каталог сильных землетрясений на территориях СССР с древнейших времен до 1975 г. / – М.: Наука 1977.
4. Нурмагамбетов, А. Сейсмическая история города Алматы / А. Нурмагамбетов // Алматы: LEM 1999.
5. Landslides and surface breaks of the 1911 Ms 8.2 Kemin earthquake / Delvaux [at al] / Kyrgyzstan, Russian Geology and Geophysics, 2001. – №42. – P. 1167–1177.
6. Surface rupture of the 1911 Kebin (Chon-Kemin) earthquake, Northern Tien Shan, Kyrgyzstan, Eos Trans / I.R.Arrowsmith [at al]. AGU, 86(52), Fall Meet. Suppl., Abstract T51F-05. 2005.
7. Location and magnitudes of earthquakes in Central Asia from seismic intensity data: application to earthquakes occurred before 1964. D. Bindi [at al].
8. Gutenberg, B. Seismicity of the Earth and Associated Phenomena, 2nd Edn / Richter, C.F. – Princeton University Press, Princeton, 1954. – N J – 310p.
9. Abe, K. Determination of magnitude for large shallow earthquakes 1898-1917/ Noguchi, S. Phys. Earth Planet. Inter., 1983.– №32. – P. 45–59.
10. Bakun, W. H. and Estimating earthquake location and magnitude from seismic intensity data / C. M. Wentworth. Bull. Seism. Soc. Am., 1997. – №87. – P.1502–1521.

11. Location and magnitudes of earthquakes in Central Asia from seismic intensity data: model calibration and validation / D. Bindi [et al]. *Geophysical Journal International*, 2013. doi: 10.1093/gji/ggs039.
12. Bakun, W. H. Seismicity of California's north coast / W. H. Bakun, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 2000. – № 90 – P. 797–812.
13. Шебалин, Н.В. Сильные землетрясения / Н.В. Шебалин // М: Издательство академии горных наук, 1997.

КЕМИН АПАТЫНА 100 ЖЫЛ: ОШАҒЫ ТУРАЛЫ ЖАҢА ДЕРЕКТЕРІ

Мукамбаев А.С., Михайлова Н.Н.

Геофизикалық зерттеулер институты РМК, Курчатов, Қазақстан

1911 жылғы Кемин апатты жерсілкінудің ошағы параметрлеріне қатысты жаңа деректері жиналып қорытылған, соның ішінде жаңалары. Қазақстан жерсілкінулері каталогтарында осы оқиғаның магнитудасы арттырылып жазылғаны анықталған. Глобал және аймақтық каталогтарда эпиорталығы орналасуында айырмашылықтары айқындалған. Осы жерсілкінуді зерделеу нәтижелерін сейсмикалық аудандау және маңызды объектілерге сейсмикалық әсерлерін болжамдау жұмыстарында есепке алу тиіс.

100 YEARS AFTER KEMIN CATASTROPHE: NEW DATA ABOUT FOCUS

A.S. Mukambayev, N.N. Mikhailova

RSE Institute of Geophysical Researches CAE RK, Kurchatov, Kazakhstan

New data related to focal parameters of catastrophic Kemin earthquake of 1911 were collected and generalized. The magnitude exceedance of the event was revealed in Kazakhstan earthquake catalogues. Discrepancies in Kemin earthquake epicenter location between global and regional catalogues were found. New data should be considered in works on seismic zoning and prediction of seismic impact on critical facilities.

УДК 550.344

ОЧАГ И АФТЕРШОКОВАЯ АКТИВНОСТЬ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 28.01.2013 г. НА СЕВЕРНОМ ТЯНЬ-ШАНЕ

Рябенко П.В., Узбеков Р.Б.

Институт геофизических исследований, Курчатов, Казахстан

Приведены результаты параметризации основного толчка землетрясения в Северном Тянь-Шане, произошедшего 28 января 2013 г. с магнитудой $m_b=6.6$. Определено пространственное положение очага, геолого-тектонические особенности района, механизм и тензор момента (СМТ), закономерности афтершоковой деятельности, проведено сравнение параметров основного толчка, полученных различными сейсмологическими центрами. Для афтершоковой последовательности проведена перелокализация гипоцентров с использованием метода двойных разностей. По результатам расчета изучена закономерность пространственного распределения афтершоков.

ВВЕДЕНИЕ

Самым сильным землетрясением 2013 г. на территории Казахстана было, землетрясение в Алматинской области 28 января 2013 года в 22 часа 38 минут по времени Астаны (28 января в 16 часов 38 минут по Гринвичу). Интенсивность сотрясений в г. Алматы составила 4–5 баллов. Эпицентр землетрясения находился в 230 км к востоку от г. Алматы близ населенного пункта Нарынкол. После землетрясения 28 января в течение суток регистрировались повторные ощутимые толчки. На веб-сайте Центра данных РГП ИГИ www.kndc.kz в круглосуточном режиме оперативно представлялись сведения о регистрируемых толчках.

По данным агентства «Синьхуа» в результате этого землетрясения 28.01.2013, на северо-западе КНР в приграничном Синьцзян-Уйгурском автономном районе имеются пострадавшие и разрушения. Наиболее значительные разрушения отмечены в Или-Казахской автономной области и округе Аксу СУАР КНР: повреждены 5681 жилых домов, пострадали 20421 человек, полностью разрушены 216 квартир в 78 жилых домах. В уезде Чжаосу, согласно данным властей Синьцзяна, повреждены 4062 жилых дома, пострадало 14217 человек, эвакуировано 379 человек из 93 жилых зданий.

ХАРАКТЕРИСТИКА ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОЧАГА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Сведения об основных параметрах землетрясения по разным источникам приведены в таблице 1.

Виден важный вклад данных станций ИГИ РК в определении параметров землетрясения всех мировых Центров. На рисунке 1 показано положение эпицентра в плане по всем имеющимся данным. Из рисунка и табличных данных видно, что различие в положении гипоцентра по разным источникам не значительно: оно не превышает $0,11^\circ$ и $0,13^\circ$ по широте и долготе соответственно и 5 км по глубине. Вариации в значениях магнитуды m_b составляют 1,2.

На рисунке 2 приведено положение эпицентра рассматриваемого землетрясения по инструментальным данным сетей Казахстана на карте тектонических разломов, уточненных А.Е. Великановым по данным дешифрирования космоснимков. Исследуемый район землетрясения характеризуется сложной тектонической обстановкой. Здесь преобладают региональные тектонические разломы северо-восточного простирания, ограничивающие горные цепи Северного Тянь-Шаня. Наблюдаются также тектонические разломы северо-западного и субмеридионального направления. Как видно из рисунка, очаг землетрясения расположен в восточном крыле регионального Капчагай-Чиликского сдвига, простирающегося в северо-западном направлении ($300^\circ-305^\circ$) от хребтов Кокшаал-Тау в платформенные зоны. Гипоцентр находится на глубине 10–15 км, южнее Баянкольского разлома северо-восточного простирания, здесь выходят на поверхность породы палеозойского фундамента. По данным сейсмического районирования Казахстана, в этой зоне Тянь-Шаня возможны землетрясения с максимальной магнитудой $M \leq 7,5$ [3].

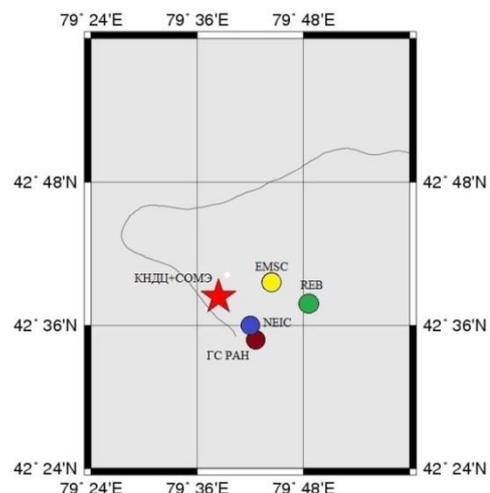
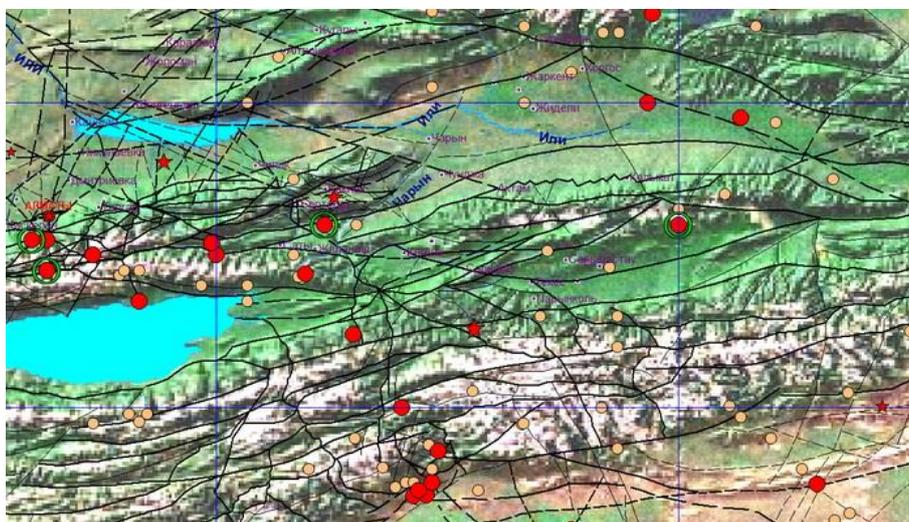


Рисунок 1. Карта эпицентров землетрясения по данным сети РК и международных центров

**ОЧАГ И АФТЕРШОКОВАЯ АКТИВНОСТЬ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 28.01.2013 г.
НА СЕВЕРНОМ ТЯНЬ-ШАНЕ**

*Таблица 1. Инструментальные характеристики землетрясения 28.01.2013 г.
по данным разных международных центров*

Источник	Широта, с.ш.	Долгота, в.д.	to, ч : м : с	mb	Mw	Н, км	Станции ИГИ РК, участвующие в решении
EMSC (Франция)	42.63	79.81	16:38:53		6.1	10	AAK, PDG, TKM MAKZ, ABKAR, MNAS KKAR, OTUK, KURK, BVAR, MKAR
REV (СВТО)	42.55	79.71	16:38:55	5.4		12	AAK, PDG, TKM MAKZ, ABKAR, MNAS KKAR, OTUK, KURK, BVAR, MKAR
ГС РАН (Россия)	42.66	79.74	16:38:51	6.1		10	AAK, PDG, TKM MAKZ, ABKAR, MNAS KKAR, OTUK, KURK, BVAR, MKAR
NEIC (США)	42.60	79.70	16:38:53		6.1	15	AAK, PDG, TKM MAKZ, ABKAR, MNAS KKAR, OTUK, KURK, BVAR, MKAR
КНЦД+СОМЭ(РК)	42.52	79.67	16:38:52	6.6		10	AAK, PDG, TKM MAKZ, ABKAR, MNAS KKAR, OTUK, KURK, BVAR, MKAR



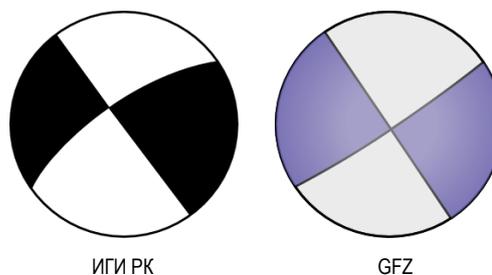
○ – катастрофические землетрясения с магнитудой $M_s \geq 7$; ● – $M_s \geq 6$; ● – $M_s \geq 5$;
★ – эпицентры землетрясений последних лет

*Рисунок 2. Схема расположения эпицентров землетрясений в Северном Тянь-Шане
за весь исторический период*

Проведенный анализ имеющихся каталогов землетрясений показывает, что с исторических времен до настоящего времени в радиусе около 1° от эпицентра не было зарегистрировано ни одного сейсмического события с $M \geq 6$, а очаги с $M \geq 5$ находятся на расстоянии около 0.5° (рисунок 2).

Фокальный механизм главного толчка получен двумя методами: по методу тензора центроида сейсмического момента (СМТ) в Центре Геофизических исследований (GFZ) ФРГ и по первым знакам вступлений Р- волн, зарегистрированных сейсмическими сетями РК (ИГИ и СОМЭ), KNET, CAREMON, международных сетей IRIS, полученный Полешко Н.Н. О надежности решения фокального механизма по первым вступлениям объемных волн свидетельствует использование 43 равномерно распределенных знаков, согласованность которых составила 100%, а

вариации определяемых параметров не превышали $1-2^\circ$. Стереогаммы фокального механизма, полученного по данным двух методов, приведены на рисунке 3.



*Рисунок 3. Решение механизма очага
по данным ИГИ РК и GFZ*

Видно, что решения по двум методам хорошо согласуются между собой, максимальная разница в значениях параметров не превышает 5° . Поскольку решения по первым вступлениям объемных сейсмических волн характеризуют первое движение по разрыву, а решение СМТ относится к главной фазе разрыва, то согласованность этих двух решений свидетельствует о том, что разрыв в очаге землетрясения был простым скольжением по плоскости под действием двойной пары сил [4]. По данным механизма очага следует, что в очаге землетрясения произошел горизонтальный сдвиг по близвертикальной плоскости. Одна из возможных плоскостей разрыва имеет северо-восточное направление, она хорошо согласуется с ориентацией Боянкольского разлома. Другая возможная плоскость разрыва простирается в северо-западном направлении, субпараллельном Капчагай-Чиликскому сдвигу. Оси главных напряжений сжатия и растяжения, снимаемых в очаге, близгоризонтальны, ось напряжения сжатия ориентирована субмеридионально, ось напряжения растяжения – субширотно. Такая ориентация напряжений соответствует системе напряжений, действующих в данном регионе [5].

Решение фокального механизма дает два варианта ориентации разрыва, чтобы выбрать наиболее вероятную плоскость разрыва необходимо привлекать другие независимые данные. Анализ имеющейся сети тектонических разломов показывает, что обе nodальные плоскости в решении механизма, а также характер подвижки по ним, находят ясное структурное объяснение и соответствуют крутым сдвигам, субпараллельным либо северо-западной ориентации Капчагай-Чиликского сдвига, либо северо-восточному простиранию Боянкольского разлома. Поэтому использование сведений о тектонике района не позволяет установить истинную плоскость разрыва.

ИССЛЕДОВАНИЕ АФТЕРШОКОВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Другим способом выявить наиболее вероятную действующую плоскость является изучение пространственного положения облака афтершоков, которое может дать представление об объемной модели очага в земной коре [6]. Афтершоковая активизация после главного толчка проявлялась в очень компактной области с радиусом 12 км (рисунок 4). Из положения афтершоков в плане видно равномерное распределение их эпицентров в восточном и западном направлениях от главного толчка, и некоторая вытянутость в северном направлении. Все облако афтершоков расположено в тектоническом блоке ограниченном двумя субпараллельными разломами северо-западного простирания и двумя разломами северо-западного простирания.

Всего в течении месяца после главного толчка в каталог и сейсмологические бюллетени включено более 900 афтершоков этого землетрясения, большая часть из которых была зарегистрирована в первые 3 дня. Распределение афтершоков по энергиям и во времени характеризует рисунок 5: большинство наиболее сильных толчков с $M \geq 4$, в том числе с $M=5$, произошли в первые 2 дня. Через 20 дней, 19 февраля, был зарегистрирован еще один афтершок с $M=5$, положение эпицентра которого практически совпало с положением главного толчка.

Для того, чтобы получить более точное положение афтершоков в пространстве был применен метод двойных разностей, реализованный в программе huroDD [1, 2], позволяющий минимизировать ошибки определения гипоцентров афтершоковой последовательности. По уточненным данным с использованием программы “zmap (matlab)” построена трехмерная модель очага (рисунок 6), которая позволяет изучить закономерность пространственного распределения афтершоков. Из рисунка видно, что положение гипоцентров по долготе и широте после перелocalизации стало более компактным, однако в целом не изменилось. Вся афтершоковая активизация происходила в компактном объеме геологической среды практически изометричной формы, со всех сторон ограниченном разломами. Линейные размеры основного облака афтершоков в плане составляют 10×15 км.

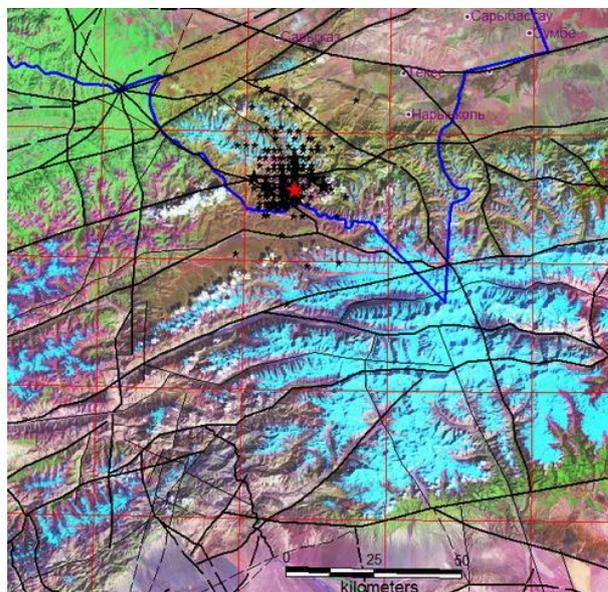


Рисунок 4. Эпицентры главного толчка землетрясения и его афтершоков и тектонические разломы Северного Тянь-Шаня на основе космоснимка

**ОЧАГ И АФТЕРШОКОВАЯ АКТИВНОСТЬ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 28.01.2013 г.
НА СЕВЕРНОМ ТЯНЬ-ШАНЕ**

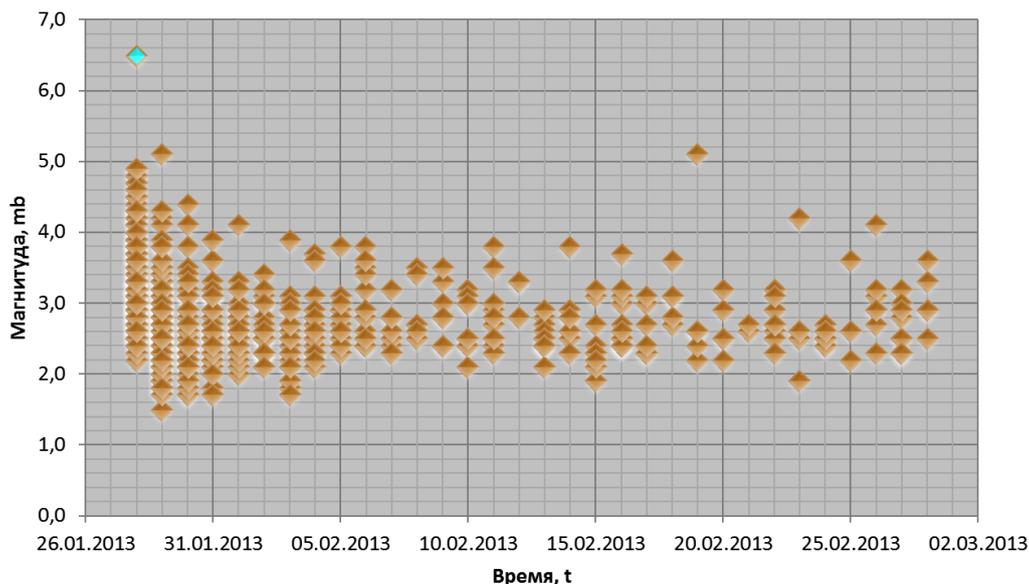


Рисунок 5. Затухание афтершоковой деятельности в очаге землетрясения

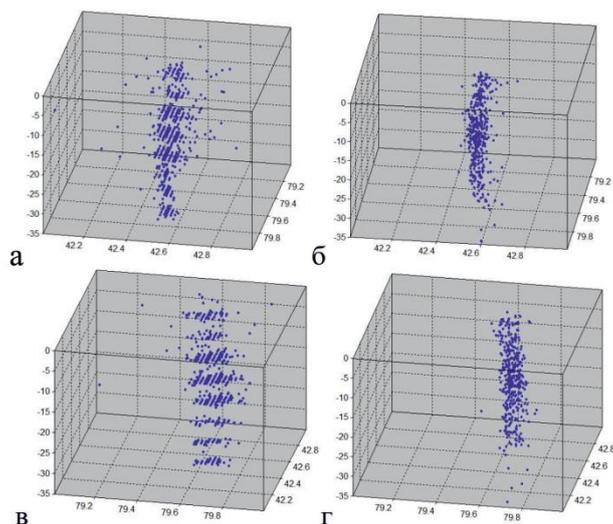


Рисунок 6. Трехмерная модель очага землетрясения по данным СОМЭ (а, в) и по уточненным данным (б, г)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Очаг землетрясения 28.01.2013 г. реализовался под действием регионального напряжения сжатия в субмеридиональном направлении и субширотного растяжения.

Гипоцентры главного и повторных толчков располагались в тектоническом блоке, ограниченном со всех сторон разломами, ориентированными в северо-западном и северо-восточном направлениях. Геометрические размеры очаговой зоны ограничены размерами блока и соответствуют средним размерам очагов землетрясений с магнитудой $M=6$.

Одна из возможных плоскостей разрыва согласуется с ориентацией и кинематикой Капчагай-Чиликского трансрегионального сдвига, другая с Боянкольским разломом.

Принимая во внимание наиболее значительные разрушения в Или-Казахской автономной области и округе Аксу СУАР КНР, можно предположить, что в очаге землетрясения произошел горизонтальный сдвиг по плоскости субпараллельной Боянкольскому разлому северо-западного простирания. На всем протяжении разрыва сохранялась ориентация смещений, зафиксированная в начальной стадии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Waldhauser, F. A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the Hayward Fault, California/ F.Waldhauser, W.L.Ellworth // Bull.Seism. Am., 90. 2000. – P. 1353–1368.
2. Рябенко, П. В. Капчагайское землетрясение 1 мая 2011 года по данным региональной сети сейсмических станций./ П. В. Рябенко, Н.А. Сейнасинов, Н.Н. Михайлова // Актуальные вопросы мирного использования атомной энергии. Доклады международной конференции молодых ученых и специалистов. 6-8 июня 2012 г. Алматы. 2012. – С. 149 – 159
3. Сейсмическое районирование Республики Казахстан. Алматы, изд-во Эверо, 2000. 219 с.
4. Михайлова, Н.Н. Сопоставление региональных определений механизмов очагов землетрясений Центральной Азии с решениями тензора момента центра по данным глобальных сейсмических сетей/ Н.Н Михайлова, Н.Н Полешко. // Вестник НЯЦ РК. – 2007. – Вып.2. – С.96 – 103.
5. Полешко Н.Н. Механизмы очагов землетрясений и сеймотектоническое деформация земной коры Северного Тянь-Шаня и Жонгарии. Автореферат дисс. канд. геол.-мин.наук. Алматы, 2009. – 21 с.
6. Михайлова, Н.Н. Текелийское землетрясение в Казахстане в 2009: очаг и воздействия / Н.Н Михайлова, Н.Н Полешко // Вопросы инженерной сейсмологии. ISSN 0132-2826. 2010. – Т.37. №2. – С. 20 – 33.

СОЛТҮСТІК ТЯНЬ-ШАНЬДАҒЫ 2013 Ж. 01.28-ИНДЕГІ ЖЕРСІЛКІНУДІҢ ОШАҒЫ МЕН АФТЕРШОҚТЫҚ БЕЛСЕНДІЛІГІ

Рябенко П.В., Узбеков Р.Б.

Геофизикалық зерттеулер институты РМК, Курчатова, Қазақстан

Солтүстік Тянь-Шаньда 2013 ж. қаңтардың 28-інде болған жерсілкінудің магнитудасы $m_b=6.6$ бірінші соққысын параметрлеу нәтижелері келтірілген. Ошақтың кеңістік орны, ауданның геология-тектоникалық ерекшеліктері, механизмы мен мезет тензоры (СМТ), афтершоқтық әрекетінің заңдылықтары анықталған, әр түрлі сейсмикалық орталықтарымен алынған бірінші соққының параметрлерін салыстыруы жүргізілген. Афтершоқтың реттілігі үшін қос айрмашылық әдісін пайдаланып гипоорталықтарды қайта жергіліктеуі жүргізілген. Есептеу нәтижелері бойынша афтершоқтардың кеңістік таратылу заңдылығы зерделенген.

FOCUS AND AFTERSHOCK ACTIVITY OF THE EARTHQUAKE OF 28.01.2013 AT NORTHERN TIEN SHAN

P.V. Ryabenko., R.B. Uzbekov

Institute of Geophysical Researches, Kurchatov, Kazakhstan

The paper considers the issue of the main shock parametrization of the earthquake occurred at Northern Tien Shan on January 28, 2013 with magnitude $m_b=6.6$. Spatial location of the focus, geological and tectonic features of the region, mechanism and CMT, regularities of aftershock activity were investigated, the main shock parameters obtained by different seismological Centers were compared. Aftershock sequence hypocenters were relocated using double-difference method. Regularities of aftershocks spatial distribution was studied using calculation results.

УДК 550.344:621.039.9

СОПОСТАВЛЕНИЕ ЗАПИСЕЙ ТРЕХ СЕВЕРО-КОРЕЙСКИХ ЯДЕРНЫХ ИСПЫТАНИЙ ПО ДАННЫМ КАЗАХСТАНСКИХ СТАНЦИЙ

Сейнасинов Н., Михайлова Н.Н.

Институт геофизических исследований, Курчатов, Казахстан

Приведены методика и результаты обработки результатов регистрации трех ядерных испытаний, произведенных в Северной Корее в 2006, 2009, 2013 гг., выполненных в Казахском национальном центре данных.

ВВЕДЕНИЕ

12 февраля 2013 г. сейсмические станции многих стран мира зафиксировали колебания от проведенного КНДР ядерного испытания. Это был уже третий взрыв, который произведен Северной Кореей на полигоне Пунгери. Первый взрыв осуществлен в 2006 г., второй – в 2009 г. на том же полигоне. Общий вид местности и полигона по космическим снимкам показан на рисунке 1 [1].



Рисунок 1. Общий вид местности и полигона по космическим снимкам

Для контроля за проведением ядерных испытаний и выполнением Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний мировым сообществом за последние менее чем 20 лет создана Международная система мониторинга (МСМ) с Международным центром данных (МЦД) в Вене. В состав МСМ входят станции, расположенные на территории 90 стран мира. В том числе 5 объектов этой глобальной системы расположены на территории Казахстана. Все станции несут круглосуточную непрерывную службу по регистрации и передаче данных

в МЦД, где данные казахстанских станций обрабатываются совместно с данными других станций системы. Создается обзорный бюллетень всех событий REB. Казахские станции также передают данные в другие Международные и Национальные центры (ISC, EMSC, NEIC, GS RAS и др.).

Казахстанский Центр данных, созданный в 1999г., зарегистрировал все три взрыва, проведенных Северной Кореей. Но надежность обнаружения сигналов, точность обработки, оперативность передачи информации при этих событиях были различными. Опыт регистрации первых двух взрывов помог при работе с записями третьего взрыва. Аналитик Казахского центра данных при оперативной обработке имел в своем распоряжении образцы записей взрывов по казахским станциям, полученных в 2006 и 2009 гг. Это помогло быстрому распознаванию природы события и надежному определению его параметров.

Сейсмические волны от места взрыва до самой далекой от него станции Казахстана распространяются примерно 9 минут. Далее информация по спутниковым каналам поступает в г. Алматы, где накапливается, визуализируется и обрабатывается в автоматическом и интерактивном режимах. Объективно в течение первых 10 минут невозможно оценить ситуацию по источнику и природе события. При третьем взрыве уже через 7 минут была по телефону передана первая информация о факте произошедшего сейсмического события на территории Северной Кореи, через 10 минут было опубликовано первое сообщение о сейсмическом событии в Северной Корее на веб-сайте Центра данных. Через 30 минут информация о параметрах взрыва – время в источнике, координаты, магнитуда – передана в вышестоящие организации. Но самое важное, что Казахские станции весь объем необходимой информации передали в Международный центр данных СТВТО, так как там совместно используются данные станций разных стран, обеспечивающих хорошее окружение источника и, тем самым, высокую точность и достоверность оценок. Станции Казахстана являются одними из лучших в международной системе мониторинга по количеству обнаруживаемых и ассоциируемых сейсмических событий.

В настоящей работе проведен сравнительный анализ всех трех испытаний по данным казахстан-

СОПОСТАВЛЕНИЕ ЗАПИСЕЙ ТРЕХ СЕВЕРО-КОРЕЙСКИХ ЯДЕРНЫХ ИСПЫТАНИЙ ПО ДАННЫМ КАЗАХСТАНСКИХ СТАНЦИЙ

ских станций. Это важный опыт, способствующий совершенствованию мониторинга ядерных испытаний в будущем.

СРАВНЕНИЕ СИСТЕМ НАБЛЮДЕНИЙ, ЗАРЕГИСТРИРОВАВШИХ ТРИ ЯДЕРНЫХ ИСПЫТАНИЯ

Первый взрыв был произведен в Северной Корее 9 октября 2006 года. Он был зарегистрирован ограниченным числом станций на территории Казахстана [2]. Это станции Акбулак (сейсмическая группа), Восточное, Зеренда и Чкалово большебазовой группы Боровое, станция Курчатова (сейсмическая группа). По сейсмической группе Маканчи обнаружение сигнала было весьма затруднительно на фоне сейсмических помех. На рисунке 2 представлены все полученные записи по вертикальной компоненте. На них отмечено вступление Р-волны.

На рисунке 3 показано местоположение станций, зарегистрировавших это событие.

Как видно из рисунка, станции Казахстана расположены в узком створе азимутов относительно места взрыва. Диапазон азимутов составляет всего 13 градусов. При этом эпицентральные расстояния дос-

точно велики: от 3 700 км до 5 300 км. Рассчитывать на высокую точность при локализации источника при таком расположении станций не приходится. Все записи были обработаны, определены времена вступления сейсмических фаз, а также азимуты на эпицентр. Для определения азимутов использовался F-k анализ. Все результаты определений представлены в таблице 1.

Важным является то, что данные казахстанских станций в реальном времени были переданы в различные международные центры данных. Там были определены параметры этого взрыва по всей системе глобальных наблюдений. Практически во всех центрах были использованы казахстанские данные. Результаты определений приведены в таблице 2.

Как видно из таблицы, по всему миру это событие в разных сетях было зарегистрировано от 11 до 21 станции, 6 станций зарегистрировали взрыв в Казахстане. Это объясняется малой мощностью взрыва. По сейсмическим данным, магнитуда этого события имеет значение 3,9–4,1. Эквивалентная мощность взрыва составляет менее 1 кТ.

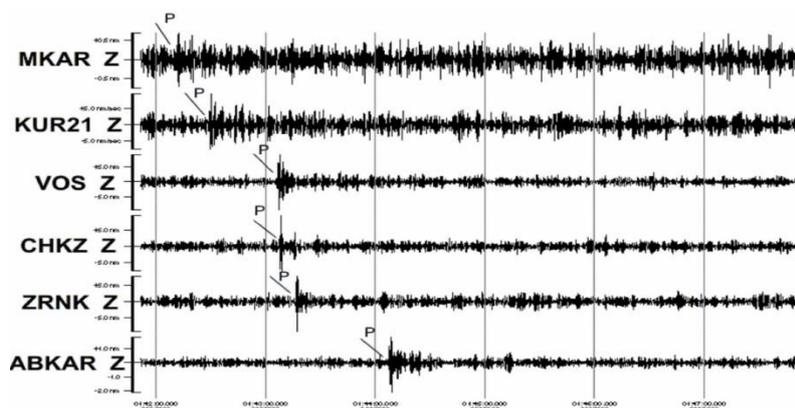


Рисунок 2. Сейсмические записи первого северокорейского ядерного испытания 2006 г. (вертикальные компоненты)

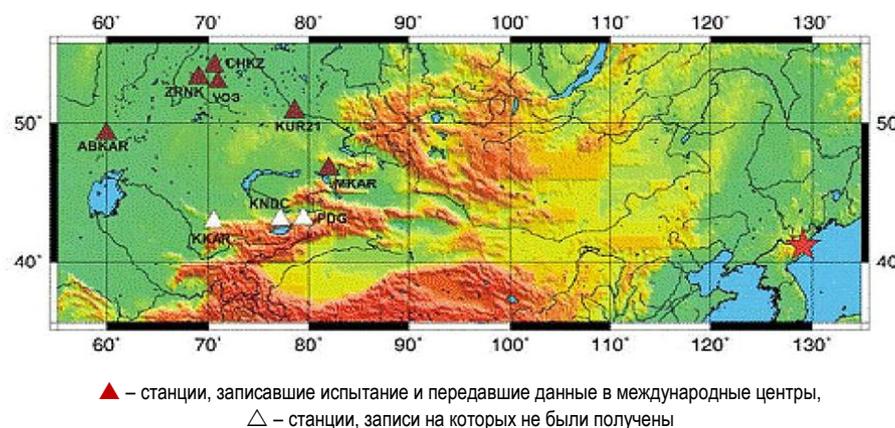


Рисунок 3. Взаимное расположение станций сети НЯЦ РК (треугольники) и эпицентра (★) ядерного испытания в Северной Корее в 2006 г.

**СОПОСТАВЛЕНИЕ ЗАПИСЕЙ ТРЕХ СЕВЕРО-КОРЕЙСКИХ ЯДЕРНЫХ ИСПЫТАНИЙ
ПО ДАННЫМ КАЗАХСТАНСКИХ СТАНЦИЙ**

Второй взрыв был произведен на том же полигоне 25 мая 2009 г. Он был зарегистрирован 9 станциями сети НЯЦ РК (рисунок 4).

Обнаружение его было произведено более уверенно в автоматическом и интерактивном режиме.

На рисунке 5 представлены записи второго взрыва по вертикальным компонентам станций Казахстана.

Были определены кинематические и динамические параметры записей, которые представлены в таблице 3.

Таблица 1. Кинематические и динамические характеристики сейсмических колебаний для первого северокорейского взрыва по данным сейсмических станций сети НЯЦ РК

Станция	Расстояние, км	Азимут, градусы	т _p (чч:мм:сс)	т _b
АВКАР	5310	72.07	01:44:07.2	3.82
СНКЗ	4481	83.42	01:43:07.1	3.87
ВОС	4469	82.56	01:43:05.6	3.95
ЗРНК	4598	81.44	01:43:15.4	3.90
МКАР	3746	82.06	01:42:11.6	3.79
КУР21	3974	85.14	01:42:28.5	3.97

Таблица 2. Параметры северокорейского ядерного взрыва 2006 г. по данным различных сейсмологических центров

Источник	т ₀ (чч:мм:сс)	Широта	Долгота	Кол-во станций	mb	Станции Казахстана, участвовавшие в обработке
ИОЦ ГС РАН	01-35-26.0	41.35	128.96	11	4.0	МКАР
ИГИ НЯЦ РК	01:35:30.7	41.105	128.518	6	3.9	КУР21, ЗРНК, ВОС, СНКЗ, МКАР, АВКАР
PDE (NEIC)	01-35-27.8	41.294	129.134	20	4.2	СНКЗ, ЗРНК, БРВК
SEL1 (IDC)	01:35:28.3	41.279	129.014	13	4.1	МКАР
REB	01:35:27.6	41.312	129.019	21	4.1	МКАР

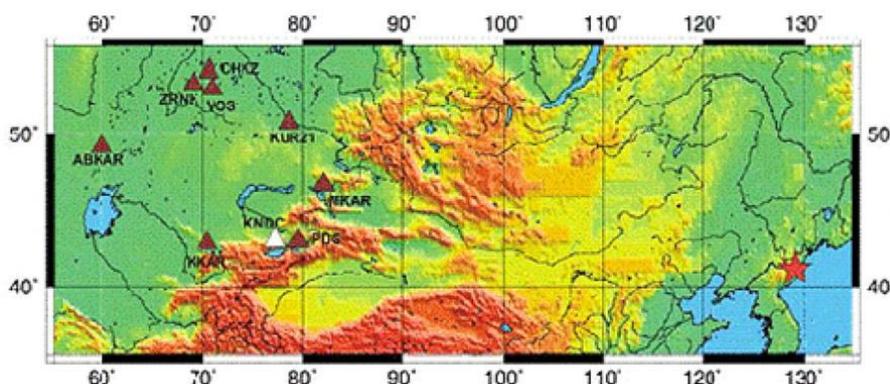


Рисунок 4. Расположение станций РГП ИГИ, зарегистрировавших северокорейский взрыв 2009 г.

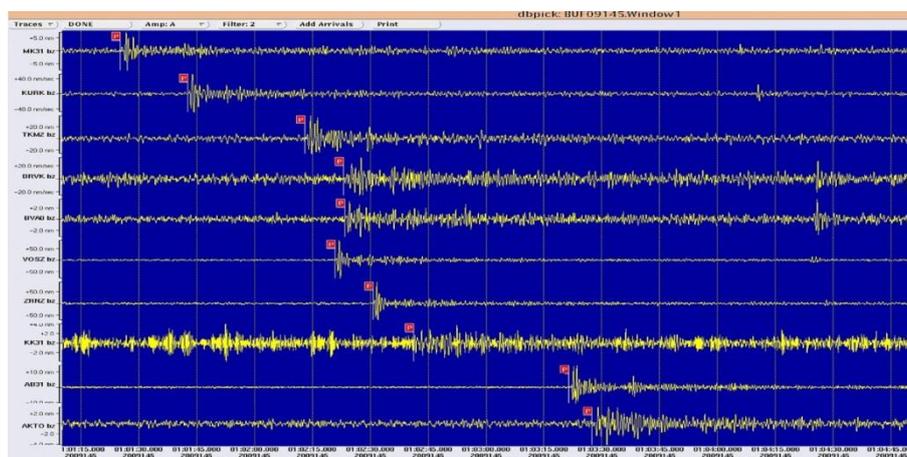


Рисунок 5. Сейсмические записи второго северокорейского взрыва по станциям НЯЦ РК (вертикальные компоненты)

**СОПОСТАВЛЕНИЕ ЗАПИСЕЙ ТРЕХ СЕВЕРО-КОРЕЙСКИХ ЯДЕРНЫХ ИСПЫТАНИЙ
ПО ДАННЫМ КАЗАХСТАНСКИХ СТАНЦИЙ**

Данные казахстанских станций также использовались международными центрами, где были определены координаты и магнитуда этого события. Результаты приведены в таблице 4.

Как видно из таблицы 4, второй взрыв был зарегистрирован гораздо большим количеством сейсмических станций мира (до 126 станций). Это объясняется большей мощностью этого взрыва. Магнитуда, определенная по сейсмическим данным, составила

по бюллетеню REB $m_b=4,5$. Следовательно, она была примерно на 0,4 больше, чем у первого взрыва.

Третий взрыв был произведен 12 февраля 2013 года. Он был зарегистрирован всей сетью станций РГП ИГИ (рисунок 6).

Этот взрыв был хорошо обнаружен, четко выделялось вступление сейсмических волн на фоне помех. На рисунке 7 показана волновая картина сейсмических записей этого события.

Таблица 3. Кинематические и динамические характеристики сейсмических колебаний для второго северокорейского взрыва по данным сейсмических станций НЯЦ РК

Станция	Расстояние, км	Азимут, градусы	tP (чч:мм:сс)	m_b
ABKAR	5310	72.097	01:03:21	4.19
VOS	4469	82.587	01:02:21	4.72
ZRNK	4598	81.473	01:02:21	4.71
MKAR	3746	82.069	01:01:25	4.17
KURBB	3974	85.169	01:01:43	3.54
BVAR	4504	82.525	01:02:23	3.35
KKAR	4744	74.200	01:02:41	3.93

Таблица 4. Решения различных центров данных по второму северокорейскому взрыву

Центр данных	Время в очаге, чч,мин.,сек.	Широта, с.ш.	Долгота в.д.	Магнитуда m_b	Кол-во станций	Участие станций ИГИ
NEIC (США)	00.54.43.30	41,306°	129,029°	4,7	75	MKAR,KURK,BRVK
EMSC (Франция)	00.54.44,5	41,31°	128,98°	4,8	126	MKAR,KURK,BRVK
GSRAS (Россия)	00.54.40,9	41,29	129,07	5,0	51	MKAR,KURK,VOSZ, BRVK,ZRN,ABKAR, AKTO
IDC (REB) (Австрия)	00.54.42,8	41,3110°	129,0464°	4,5	59	MKAR, KURK, BVAR,AKTO
KNDC	00.54.43,22	41,3861	129,1386	4,5	9	

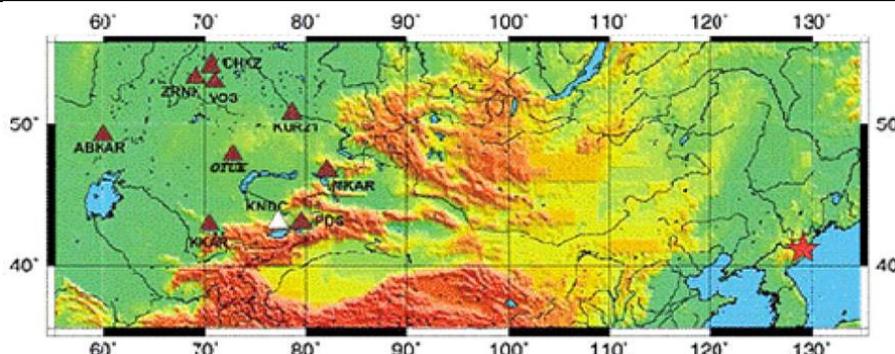


Рисунок 6. Расположение станций РГП ИГИ, зарегистрировавших третий северокорейский взрыв

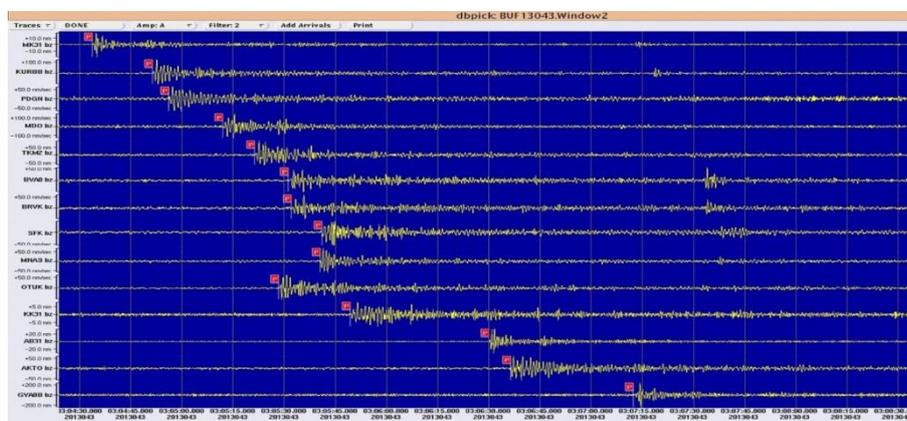


Рисунок 7. Сейсмические записи казахстанских станций северокорейского взрыва 2013 г. (вертикальные компоненты)

**СОПОСТАВЛЕНИЕ ЗАПИСЕЙ ТРЕХ СЕВЕРО-КОРЕЙСКИХ ЯДЕРНЫХ ИСПЫТАНИЙ
ПО ДАННЫМ КАЗАХСТАНСКИХ СТАНЦИЙ**

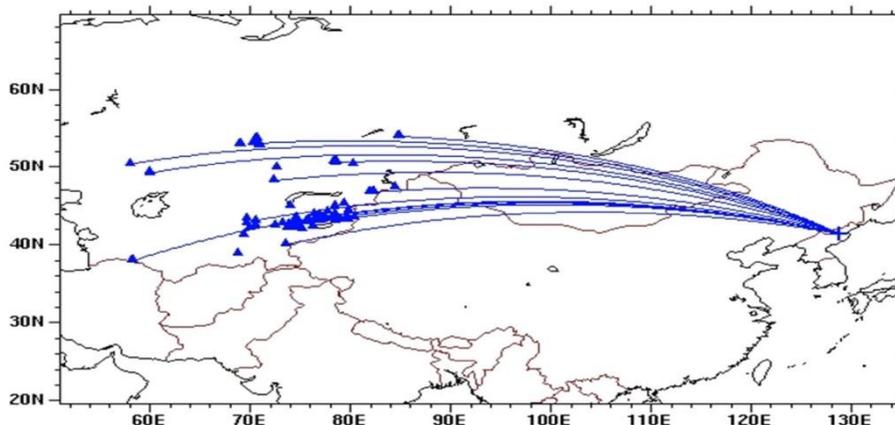


Рисунок 8. Пример локализации эпицентра взрыва в Центре данных

Таблица 5. Результаты оперативной обработки сейсмических записей северокорейского сейсмического события 12 февраля 2013 года

Станция	Расстояние, км	Азимут, градусы	Истинный азимут	t _p (чч:мм:сс)	mb
ABKAR	5310	72.24	72.072	03:06:29.937	4.84
AKTO	5401		71.954	03:06:36.340	4.77
BVAO	4504	82.98	82.491	03:05:31.188	4.48
KKAR	4744	76.87	71.614	03:05:49.375	4.61
KURBB	3974	87.03	85.142	03:04:51.350	5.03
MKAR	3746	89.75	82.060	03:04:33.684	4.67
OTUK	4457		78.179	03:05:28.318	4.63
PDGN	4037		75.767	03:04:56.122	4.79

Таблица 6. Решения различных центров данных по северокорейскому взрыву 2013 г.

Центр данных	Время в очаге, ч.,мин.,сек.	Широта, с.ш.	Долгота, в.д.	Магнитуда mb	Кол-во станций	Участие станций НЯЦ
NEIC (США)	02:57:51	41.308°	129.076°	5.1	120	MKAR,KURK,BRVK
EMSC (Франция)	02:57:51.0	41.32	128.99	5.0	514	MKAR,KURK,BRVK
GSRAS (Россия)	02:57:49.4	41.31	129.10	5.3	70	MKAR,KURK,VOSZ, BRVK,ZRN,ABKAR, AKTO
IDC (REB) (Австрия)	02:57:50.80	41.3005	129.0652	4.9	96	MKAR, KURK, BVAR,AKTO
KNDC	02:57:53.63	41.4497	128.7741	4,7	14	

Локализация этого взрыва в Центре данных показана на рисунке 8, параметры обработки представлены в Таблице 5.

В таблице 6 приведена информация различных международных центров для третьего северокорейского взрыва. Видно, что количество зарегистрировавших этот взрыв станций было гораздо больше, чем в случае второго взрыва. Например, в EMSC их было 514. Во всех центрах использованы и казахстанские данные. Магнитуда этого взрыва по данным REB составила 4,9, то есть на 0,4 больше, чем для второго взрыва.

**МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ И РЕЗУЛЬТАТЫ
ЛОКАЛИЗАЦИИ ВЗРЫВОВ ПО КАЗАХСТАНСКИМ
СТАНЦИЯМ**

Основой обработки данных является определение азимута на эпицентр с помощью F-k анализа. Его можно использовать только для сейсмических групп. На рисунке 9 показан пример определения азимута по P-волнам на станции Акбулак для тре-

тьего взрыва. Он получился равным 72,45 градуса.

Совместное использование азимутов и времен вступлений позволяет определять координаты эпицентра. Заключительный сейсмический бюллетень для третьего взрыва представлен на рисунке 10. Показаны параметры источника и параметры записей по всем станциям, использованным для обработки.

Для всех трех взрывов значения азимутов, полученные по F-канализу (наблюдаемые азимуты), и истинные азимуты от станции на полигон Пунгери приведены в таблице 7.

Как следует из таблицы, оценки азимутов по отдельным станциям дают систематические отклонения, вызванные спецификой распространения волн по конкретным трассам. Наибольшее отклонение азимута от истинного наблюдается по станции Маканчи (более 7 градусов). Этот факт был ранее отмечен нами при исследовании японского землетрясения 2011 года [3]. Примерно для того же направления мы получили систематическую невязку азимутов и для корейских взрывов, равную 7 градусам.

СОПОСТАВЛЕНИЕ ЗАПИСЕЙ ТРЕХ СЕВЕРО-КОРЕЙСКИХ ЯДЕРНЫХ ИСПЫТАНИЙ ПО ДАННЫМ КАЗАХСТАНСКИХ СТАНЦИЙ

Азимут по Маканчи при первом взрыве не учитывался нами при расчете невязки, так как вступление волны Р находилось на фоне сильных помех. Наиболее точный азимут получен по станции Акбулак. Этот результат должен быть учтен в последующих исследованиях и в практике обработки событий из района Северной Кореи.

Далее нами были определены и сравнены значения магнитуд событий для трех взрывов. Поскольку система наблюдений при каждом взрыве была различной, нельзя признать сравнение средних значе-

ний магнитуд по всей сети корректным. Поэтому мы решили использовать следующий подход. Мы сравнивали значения амплитуд, определенные по одной и той же станции, зарегистрировавшей все три взрыва. Среди казахстанских станций таковыми были станция Акбулак и станция Маканчи (рисунок 11).

В таблице 8 приведены все измеренные амплитуды по разным компонентам для трех взрывов.

В таблице 9 приведены все измеренные амплитуды по разным компонентам для трех взрывов.

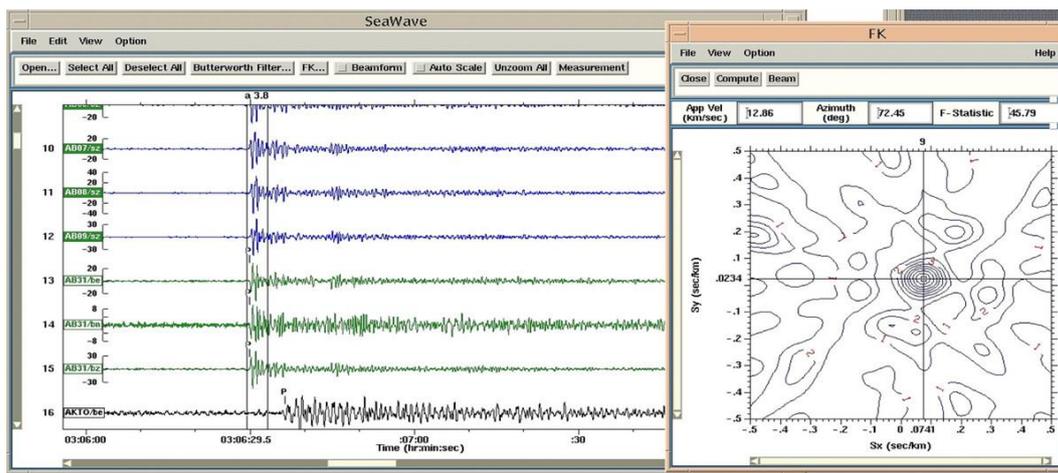


Рисунок 9. Пример использования F-k анализа (слева) и результат локализации эпицентра взрыва (справа) для третьего северокорейского взрыва.

Event	1	NORTH KOREA																		
Date	Time	Err	RMS	Latitude	Longitude	Smaj	Smin	Az	Depth	Err	Ndef	Nsta	Gap	mdist	Mdist	Qual	Author	OrigID		
2013/02/12	02:57:53.63	5.84	0.31	41.4497	128.7741	101.2	35.0	118	0.0	-1.0	14	0	338	31.49	52.93	a	1	uk	spep	1
Magnitudes																				
mb	4.72																			
mpv	-																			
class	-																			
Sta	Dist	EvAz	Phase	Time	TRes	Azim	AzRes	Slow	SRes	Def	SNR	Amp	Per	Qual	mb	mpva	class	ArrID		
BVAO	40.08	307.2	P	03:05:31.188	-0.4	89.3	6.8	10.2	1.9	TA	29.4	6.2	0.85	m	4.48			20717		
KK31	42.25	292.5	P	03:05:49.375	-0.1	69.7	-1.8	9.5	1.3	TA	26.5	11.0	1.15	m	4.61			27937		
AAK	39.62	290.4	P	03:05:27.569	-0.4					T		9.8	0.65	m	4.80			43562		
AB31	47.30	304.0	P	03:06:29.937	0.1					T		8.4	0.55	m	4.84			43563		
AKTO	48.11	306.0	P	03:06:36.340	0.2					T		18.8	1.45	m	4.77			43564		
CVAOB	52.93	291.1	P	03:07:12.347	-0.4					T		10.6	0.60	m	4.94			43566		
KURBB	35.33	302.4	P	03:04:51.350	0.0					T		23.3	0.95	m	5.03			43567		
MK31	33.30	295.2	P	03:04:33.684	-0.0	89.8	7.8	8.3	-0.4	TA		6.2	0.60	m	4.67			43568		
MNAS	41.06	290.9	P	03:05:40.542	0.7					T		9.9	0.80	m	4.72			43569		
OTUK	39.67	299.5	P	03:05:28.318	0.1					T		14.0	1.38	m	4.63			43570		
PDGN	35.92	289.9	P	03:04:56.122	-0.4					T		13.9	0.98	m	4.79			43571		
SFK	41.17	287.0	P	03:05:40.982	0.1					T		11.4	1.24	m	4.59			43572		
TKM2	38.76	290.5	P	03:05:21.333	0.5					T		9.2	0.65	m	4.78			43573		
ZAAOB	31.49	308.4	P	03:04:17.718	-0.0					T		2.9	0.60	m	4.35			43574		

Рисунок 10. Заключительный сейсмический бюллетень КНЦД взрыва 2013 г.

Таблица 7. Сравнение наблюдаемых и истинных азимутов на эпицентр взрывов

Станция	Азимут по F-K			Истинный азимут	δAz
	1 взрыв	2 взрыв	3 взрыв		
ABKAR	72.07	72.26	72.24	72.072	0.118
MKAR		88.76	89.75	82.060	7.195
KURBB	85.14	86.12	87.03	85.14	0.956
BVAR		89.83	82.98	82.491	3.914
KKAR		74.2	76.87	71.614	3.921

**СОПОСТАВЛЕНИЕ ЗАПИСЕЙ ТРЕХ СЕВЕРО-КОРЕЙСКИХ ЯДЕРНЫХ ИСПЫТАНИЙ
ПО ДАННЫМ КАЗАХСТАНСКИХ СТАНЦИЙ**

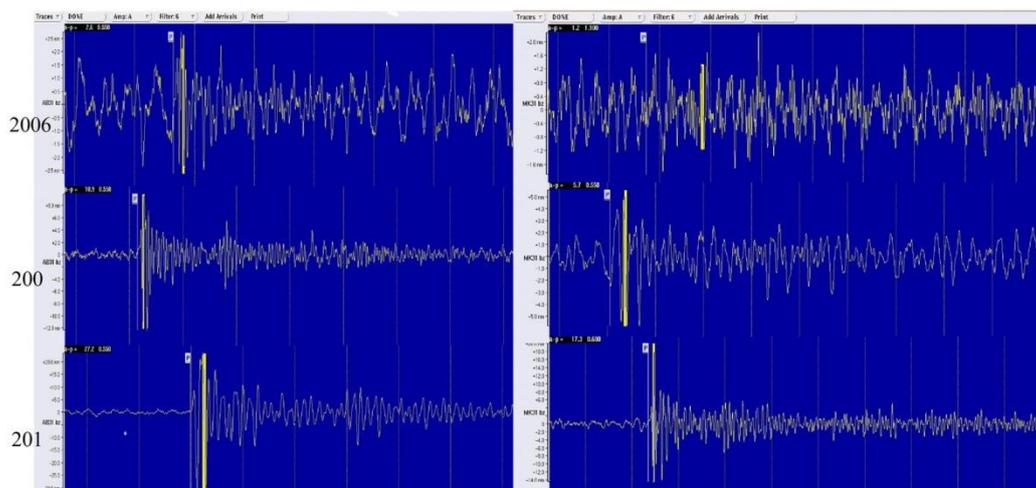


Рисунок 11. Записи всех трех взрывов по станции Акбулак (слева) и Маканчи (справа)

Таблица 8. Сравнение амплитуд колебаний по трем компонентам для трех испытательных взрывов по станциям Акбулак и Маканчи

Станции	1 взрыв, 2006 год			2 взрыв, 2009 год			3 взрыв, 2013 год		
	N, nm	E, nm	Z, nm	N, nm	E, nm	Z, nm	N, nm	E, nm	Z, nm
АВКАР	0.5	0.5	0.8	1.0	2.1	2.1	1.8	6.1	8.4
МКЗ1	0.3	0.1	0.4	1.5	1.4	1.8	1.6	4.0	6.2

Таблица 9. Сравнение амплитуд колебаний по трем компонентам для трех испытательных взрывов по станциям Акбулак и Маканчи

Станции	1 взрыв, 2006 год			2 взрыв, 2009 год			3 взрыв, 2013 год		
	N, nm	E, nm	Z, nm	N, nm	E, nm	Z, nm	N, nm	E, nm	Z, nm
АВКАР	0.5	0.5	0.8	1.0	2.1	2.1	1.8	6.1	8.4
МКЗ1	0.3	0.1	0.4	1.5	1.4	1.8	1.6	4.0	6.2

Даже простое сравнение амплитуд показывает, что каждый последующий взрыв был сильнее предыдущего. Для того, чтобы точно определить магнитуду событий, можно использовать простой прием. Если магнитуда для первого события известна, то определить магнитуду второго и третьего взрыва можно только исходя из соотношения амплитуд. Следует иметь в виду, что при этом расстояние от конкретной станции до источника взрыва оставалось постоянным для всех трех событий. Для оперативного определения магнитуды ядерного взрыва достаточно оценить отношение амплитуд. Формула (1) является общей формулой для определения магнитуд по объемным волнам. Учитывая, что $\Delta = \text{const}$ для трех взрывов, T_1 , T_2 и T_3 также примерно постоянны при одном используемом цифровом фильтре, то

$$\begin{aligned}
 M_1 &= \lg(A_1/T_1) + \sigma(\Delta_1) \quad (1) \\
 M_2 &= \lg(A_2/T_2) + \sigma(\Delta_1) \\
 M_3 &= \lg(A_3/T_3) + \sigma(\Delta_1) \\
 M_2 - M_1 &= \lg(A_2/T_2) - \lg(A_1/T_1) \\
 M_3 - M_2 &= \lg(A_3/T_3) - \lg(A_2/T_2),
 \end{aligned}$$

где: M – магнитуда по объемным волнам,
 A и T – соответственно амплитуда и период смещений в P -волне,

$\sigma(\Delta)$ – значение калибровочной функции на расстоянии Δ .

Цифры 1, 2, 3 – характеризуют первый, второй и третий взрыв.

Магнитуда второго взрыва больше магнитуды первого на 0,622. Если $mb_1=3,9$, то $mb_2=4,5$.

Аналогично получаем, что магнитуда третьего взрыва больше магнитуды второго на 0,4. Следовательно, $mb_3=4,9$.

Далее, определив магнитуду взрыва, можно определить мощность ядерного испытания Y . Для оперативного определения мощности можно использовать соотношение между магнитудой mb и Y . Сложность заключается в том, что подобные соотношения получены для разных условий взрыва (физико-химические свойства пород, их пористость, влагонасыщенность и др. характеристики). Поэтому, использование средней зависимости дает лишь некоторое приближение к истинной эквивалентной мощности взрыва.

В качестве такой формулы мы использовали приведенное в работе [4] для Семипалатинского испытательного полигона (СИП) соотношение:

$$mb=0.72lgY+4.52 \quad (2)$$

По этой формуле мощность первого взрыва менее одной килотонны, второго примерно 1 кТ, у третьего ядерного взрыва мощность равна примерно 3,4 кТ (рисунок 12).

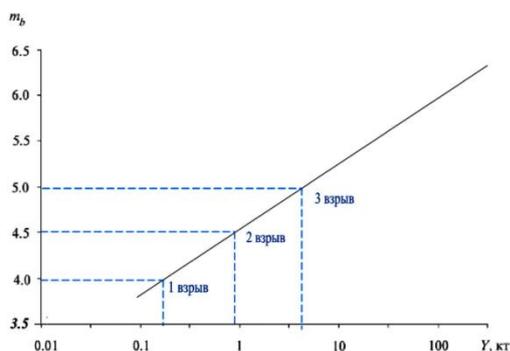


Рисунок 12. Зависимость между магнитудой mb и мощностью взрыва

ЛИТЕРАТУРА

1. Richard, L. Garwin and Frank N. von Hippel. A Technical Analysis of North Korea's Oct. 9 Nuclear Test, Arms Control Today, November 2006. – www.armscontrol.org
2. Михайлова, Н.Н. Северокорейское ядерное испытание 9 октября 2006 г. по данным Казахстанской и глобальной систем мониторинга / Н.Н. Михайлова, И.Н. Соколова // Вестник НЯЦ РК. 2008. – Выпуск 1. – С. 17 – 26.
3. Михайлова, Н.Н., Сейнасинов Н.А. Японское землетрясение 11.03.2011 г. и его афтершоки по записям станций НЯЦ РК / Н.Н. Михайлова, Н.А. Сейнасинов // Вестник НЯЦ РК, 2011. – Вып. С. 154 – 158.
4. Кедров, О.К. Сейсмические методы контроля ядерных испытаний / О.К. Кедров // Москва – Саранск, 2005. Тип. «Красный Октябрь» – С. 248.

ҚАЗАҚСТАНДЫҚ ЖЕЛІСІНІҢ ДЕРЕКТЕРІ БОЙЫНША СОЛТҮСТІК-КОРЕЯЛЫҚ ҮШ ЯДРОЛЫҚ СЫНАҚТАРДЫҢ ЖАЗБАЛАРЫН САЛЫСТЫРУ

Сейнасинов Н.А., Михайлова Н.Н.

Геофизикалық зерттеулер институты РМК, Курчатов, Қазақстан

2006, 2009, 2013 ж.ж. Солтүстік Кореяда жүргізілген үш ядролық сынақтардың Қазақстандық ұлттық деректер орталығында орындалған тіркеу нәтижелерін өңдеуінің әдістемсі мен нәтижелері келтірілген.

COMPARISON OF THREE NORTH KOREAN NUCLEAR EXPLOSIONS RECORDS BY DATA OF KAZAKHSTAN STATIONS

N. Seinassinov, N.N. Mikhailova

Institute of Geophysical Researches, Kurchatov, Kazakhstan

Due to increase of number of States possessing nuclear potential, the task on verifying the CTBT implementation and monitoring of nuclear explosions conducting in the world becomes more urgent. Kazakhstan stations data are used by different International Centers for location and parametrization of a nuclear test. The present work shows methods and processing results obtained by Kazakhstan National Center for three nuclear tests conducted in North Korea in 2006, 2009, 2013.

УДК 550.34

РЕГИСТРАЦИЯ И БАЗА ДАННЫХ СИЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ НА КАЗАХСТАНСКИХ СТАНЦИЯХ ЯДЕРНОГО МОНИТОРИНГА

Соколов А.Н., Михайлова Н.Н.

Институт геофизических исследований, Курчатов, Казахстан

Приведены результаты исследования параметров записей сильных движений, зарегистрированных казахстанскими станциями ядерного мониторинга за 1997–2013 гг., а также северотяньшаньскими станциями сети Института сейсмологии МОН РК и Института сейсмологии НАН Кыргызстана за 1970–2010 гг. Проведено сравнение результатов наблюдений сильных движений с мировой зависимостью Абрахамсона-Сильвы. Получены поправки для территории Северного Тянь-Шаня и Джунгарии относительно мировой кривой затухания максимальных амплитуд ускорений.

ВВЕДЕНИЕ

В современной сейсмологии одной из самых актуальных задач является оценка сейсмических воздействий на инженерные сооружения, здания и окружающую среду. Особенно важно решение этой проблемы для Казахстана, так как юг и юго-восток республики, где расположен крупнейший город Алматы, находится в районах с интенсивностью сотрясений от 8 до 10 баллов. Кроме того в республике находится большое количество ответственных объектов, таких как исследовательские реакторы, хранилища радиоактивных отходов, гидросооружения и т.д., в будущем планируется строительство АЭС. Правильная оценка сейсмических воздействий при проектировании и эксплуатации столь ответственных объектов значительно влияет на снижение социально-экономического ущерба, причиняемого землетрясениями. Кроме того, изучение сильных движений очень важно и для научных исследований процессов в очагах сильных землетрясений, моделей затухания ускорений, скоростей, смещений.

СЕТЬ НАБЛЮДЕНИЙ И ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Сеть станций РГП ИГИ, регистрирующих сильные движения, состоит из 6 станций, расположенных на юго-востоке (KNDC, PDGK), востоке (MAKZ, KURK), севере (BRVK) и в центральной части Казахстана (OTUK). В таблице 1 представлены параметры станций сильных движений, на рисунке 1 карта расположения станций.

Первая станция сильных движений сети РГП ИГИ начала свою работу в сентябре 1996 г., когда

на сейсмической станции IRISGSN в Маканчи был установлен акселерограф сильных движений FBA23. Постоянный мониторинг сильных движений в Центре данных ИГИ был начат с 2005 г. после установки прибора сильных движений на территории Центра данных (станция KNDC). За время работы станций сильных движений по результатам обработки были сформированы каталоги параметров сильных движений и соответствующих спектров реакции.

В настоящее время база данных в KNDC содержит информацию по 116 землетрясениям и 130 записям землетрясений (рисунок 2). Диапазон магнитуд m_b землетрясений составляет от 2.7 до 6.9, диапазон эпицентральных расстояний от 18 до 997 км. В базе данных есть события, зарегистрированные несколькими станциями, например, Торайгырское землетрясение 30 мая 2012 г. в Алматинской области [2], которое было зарегистрировано 5 станциями сильных движений (рисунок 3). Наибольшее количество записей имеется по станции KNDC, установленной в г. Алматы в Центре данных в 2005 г. Максимальное ускорение зарегистрировано при землетрясении 29 декабря 2007 г. с $m_b=4.5$ станцией KNDC на расстоянии 26 км от очага, $A_{max}(NS)=33.9 \text{ см/с}^2$.

На рисунке 4 представлено распределение по магнитудам и расстояниям всех полученных записей сильных движений сети РГП ИГИ. Из рисунка видно, что практически отсутствуют данные о сильных движениях землетрясений с большими магнитудами на близких расстояниях, необходимые для прогноза воздействий.

Таблица 1. Параметры станций сильных движений сети РГП ИГИ РК

Код станции	Широта, N	Долгота, E	h, м	Название станции	АЦП	Акселерометр	Частота оцифровки, Гц
BRVK	53.0580	70.2828	315	Боровое	Q330	FBA23	1
KNDC	43.2172	76.9658	900	KNDC	DM-24	CLA200	40
KURK	50.7154	78.6202	184	Курчатов	Q330	FBA23	1
MAKZ	46.8080	81.9770	600	Маканчи	Q330	FBA-ES-Episor	40
OTUK	48.2445	72.3378	602	Ортау	DM-24	CMG5T	100
PDGK	43.3276	79.4849	1290	Подгорное	DM-24	CMG5T	100

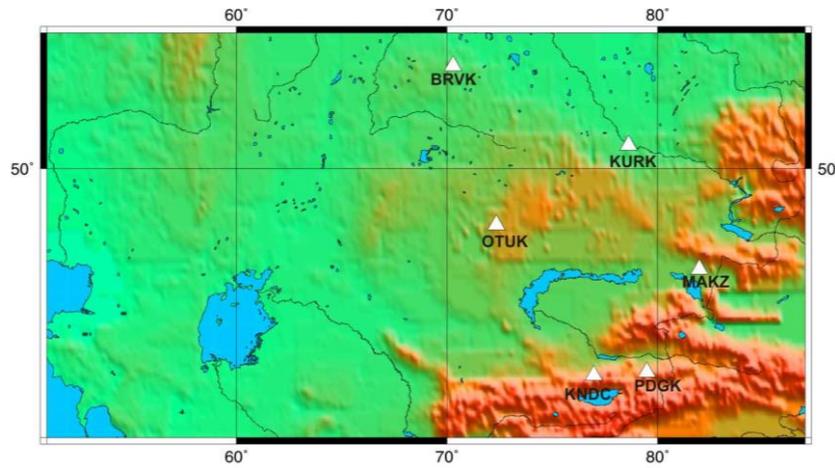


Рисунок 1. Карта расположения станций сильных движений сети РГП ИГИ

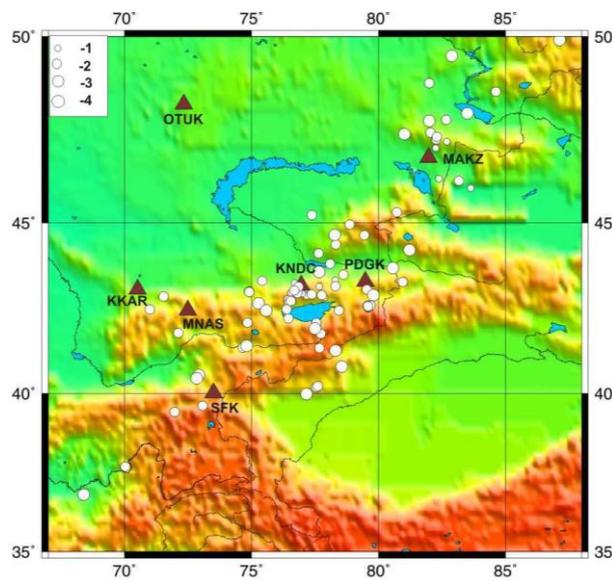


Рисунок 2. Карта расположения эпицентров сейсмических событий, зарегистрированных сетью станций сильных движения ИГИ за период 1997–2013 гг., с магнитудами: 1 – $mb < 4$, 2 – $4 \leq mb < 5$, 3 – $5 \leq mb < 6$, 4 – $mb \geq 6$

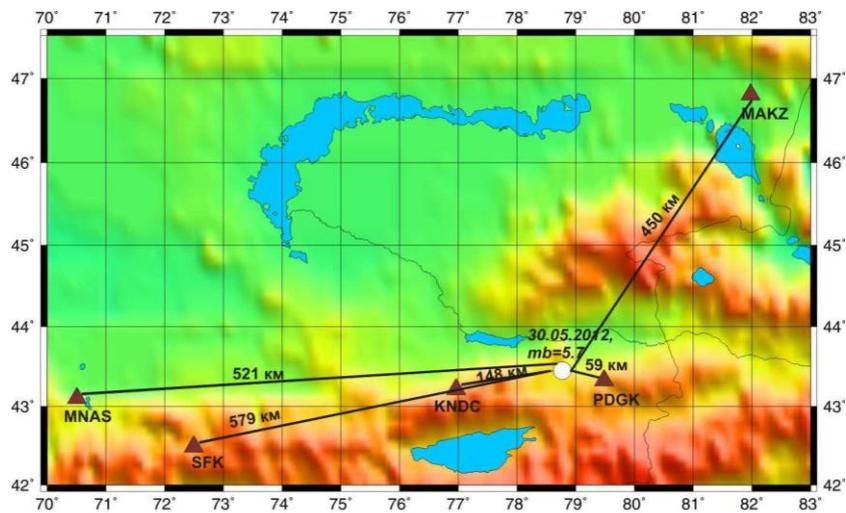


Рисунок 3. Станции регистрации Торайгырского землетрясения в Алматинской области 30 мая 2012 г. $mb=5.7$

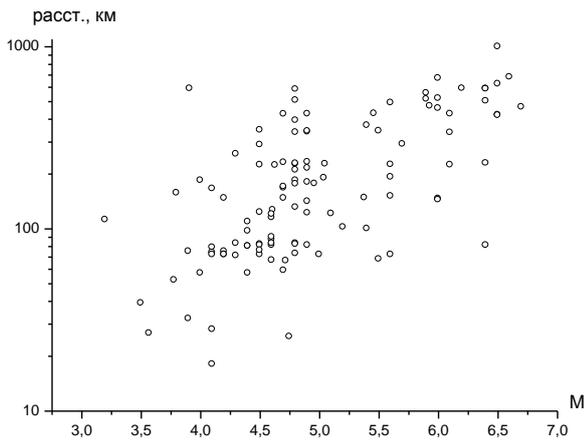


Рисунок 4. Распределение записей сильных движений по магнитудам и расстояниям

Имеющаяся выборка демонстрирует скоррелированность значений расстояний и магнитуд: все сильные землетрясения зарегистрированы, как правило, на больших расстояниях, а на малых расстояниях имеются записи только слабых событий. Это распределение свидетельствует о том, что получить надежную зависимость для затуханий максимальных ускорений только по данным исследуемого региона пока невозможно.

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ И БАЗА ДАННЫХ СИЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ

Обработка данных сильных движений существенно отличается от рутинной обработки сейсмических событий в Центре данных [3]. Рутинная обработка данных происходит в несколько этапов: обнаружение вступлений и определение параметров сигнала; автоматическая локализация событий; срочная обработка сильных событий; оставление оперативного бюллетеня, составление совместного с СОМЭ МОН РК бюллетеня для территории Центральной Азии. Для определения динамических и кинематических параметров сейсмических событий производится расстановка времен вступлений основных сейсмических фаз, замеры максимальных амплитуд, f - k анализ для сейсмических групп, после чего производится локализация события, определяются координаты, глубина, время в очаге, магнитуда и энергетический класс.

Обработка данных сильных движений направлена на изучение параметров записей ускорений, скоростей, смещений (то есть воздействий во временной области), а также параметров воздействий в спектральной области. Для этого необходимо производить с записью различные преобразования: интегрировать, дифференцировать записи, рассчитывать спектр Фурье и спектр реакции, оценивать параметры спектров.

Ниже приведены этапы обработки записей сильных движений в практике Центра данных.

1. Для анализа сильных движений выбираются события, которые ощущались на территории Казахстана, а также землетрясения вблизи сейсмических станций, которые были зарегистрированы приборами сильных движений, формат данных CSS3.0.

2. С помощью программы DSP_Java производится визуализация события, цифровая запись в формате CSS3.0 переводится в текстовый вид – ASCII.

3. Далее производится обработка текстового файла для приведения условных значений в физические характеристики колебаний грунта, размерность $\text{см}/\text{с}^2$ с учетом АЧХ приборов. Проводится корректировка за нулевую линию. Если это необходимо, то производится дифференцирование записи для перевода записи, например, велосиграфа в акселерограмму.

4. При помощи программного обеспечения ViewWave, разработанного Т. Кашимой [4], которое позволяет проводить визуализацию записи, откалиброванной за характеристики прибора в физических единицах, производится расчет спектра Фурье и спектра реакции для разных значений затухания, дифференцирование и интегрирование записей. Спектр реакции представляется в тройном логарифмическом масштабе, что позволяет анализировать одновременно три кинематических параметра.

На рисунке 5 представлен пример обработки записи и спектры реакции землетрясения 28.01.2013 г. в 16:38 по станции PDGK.

Несмотря на то, что база данных сети сильных движений ИГИ постоянно пополняется, данных для изучения закона затухания амплитуд сильных движений недостаточно. В связи с этим, была проведена большая работа по сбору данных по параметрам сильных движений по станциям, расположенным на территории Северного Тянь-Шаня по литературным данным [5, 6, 7]. Были собраны данные по 760 записям сильных движений, зарегистрированных как аналоговой, так и цифровой аппаратурой с 1970 по 2010 гг., диапазон расстояний составил от 5 до 1220 км, диапазон магнитуд MLH от 2.3 до 7.5.

На рисунке 6 приведена схема базы данных сильных движений, в состав которой вошли:

1. База данных сильных движений сети РГП ИГИ, (1997–2013), составленная по цифровым данным приборов сильных движений [1].

2. Каталог параметров сильных движений ИС МОН РК (1970–1995), составленный Михайловой Н.Н. по оцифрованным аналоговым записям сети станций сильных движений, установленных на территории Северного Тянь-Шаня [5, 6].

3. База данных сильных движений г. Алматы ИС МОН РК (2000–2010), составленная по цифровым данным станций сильных движений, расположенных на территории г. Алматы [7].

4. Каталог параметров сильных движений (1970–2005), созданный в рамках проекта CASRI по данным Центрально азиатских станций.

Созданная база данных явилась объединением всех данных в унифицированном формате (рисунок 7). В объединенной базе данных содержится 890 за-

писей сильных движений, максимальное ускорение было зарегистрировано станцией Курменты на расстоянии 35 км от эпицентра Байсорунского землетрясения 12 ноября 1990 года с $M_L=6.4$, $A_{max}=675 \text{ см/с}^2$.

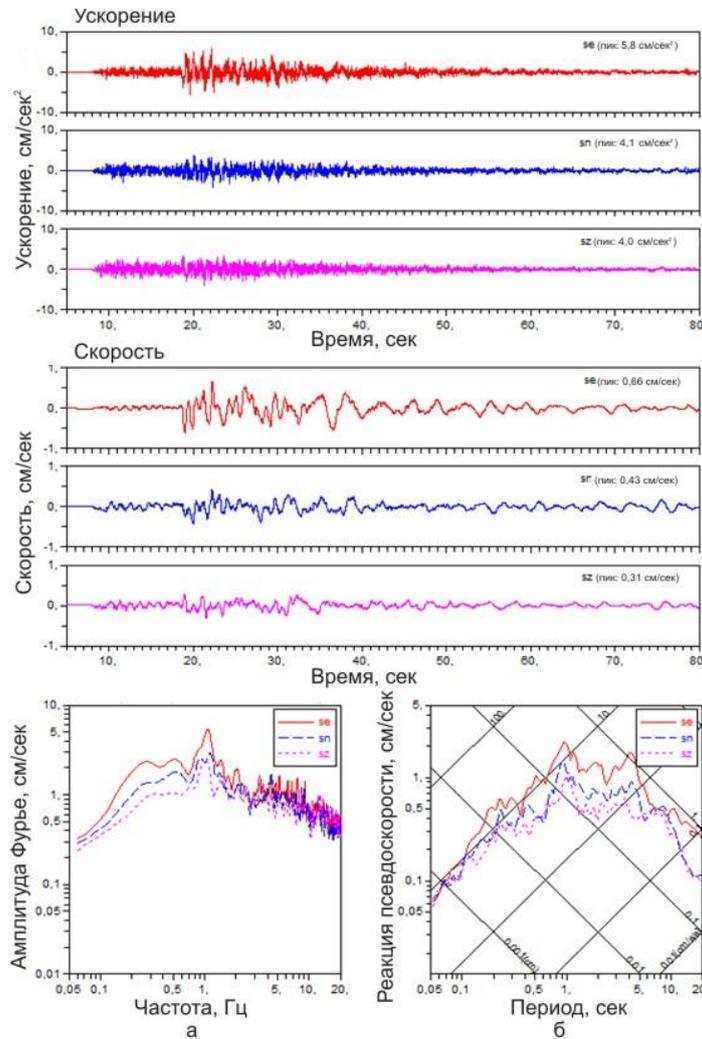


Рисунок 5. Записи и спектры реакции землетрясения 28.01.2013 г. в 16-38-53.8 (станция PDGK), а – спектр Фурье, б – спектр реакции псевдоскорости

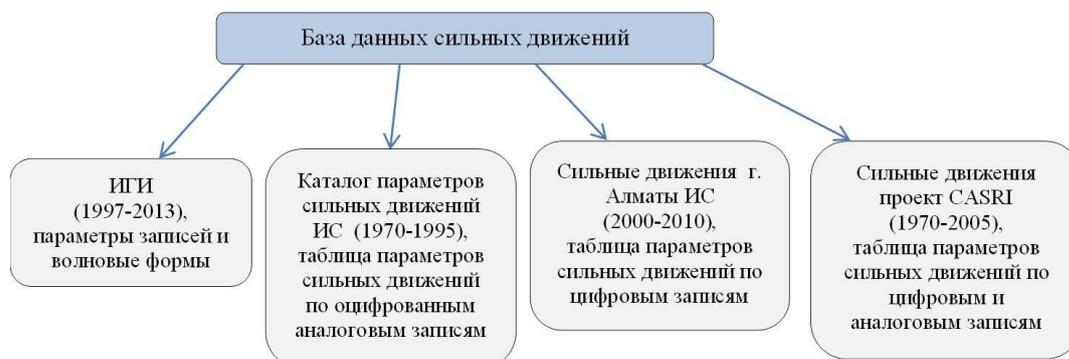


Рисунок 6. Схема базы данных сильных движений

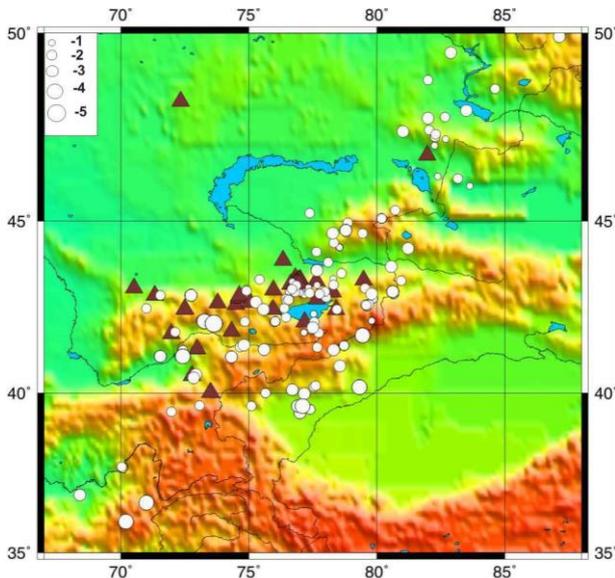


Рисунок 7. Карта расположения эпицентров сейсмических событий, вошедших в объединенную базу данных сильных движений, за период 1970-2013 гг., с магнитудами: 1 – $mb < 4$, 2 – $4 \leq mb < 5$, 3 – $5 \leq mb < 6$, 4 – $6 \leq mb < 7$, 5 – $mb \geq 7$

На рисунке 8 представлено распределение всех записей созданной базы данных по расстояниям и магнитудам.

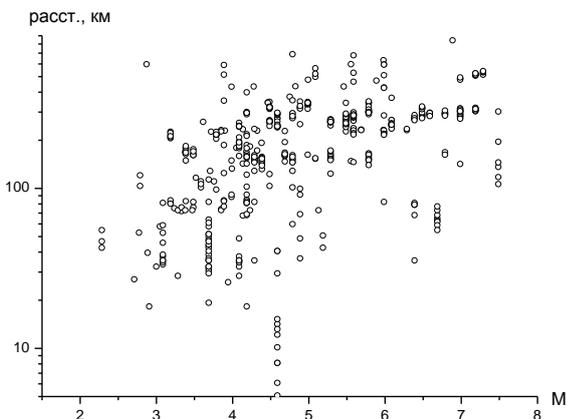


Рисунок 8. Распределение по магнитудам и расстояниям акселерограмм землетрясений Северного Тянь-Шаня и Джунгарии

МОДЕЛЬ ЗАТУХАНИЯ СИЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Для оценки воздействий землетрясений на объекты в настоящее время существует две возможности: это теоретический прогноз сейсмических воздействий, который в настоящее время реализовать практически невозможно ввиду того, что строение и свойства среды на трассе распространения сигнала, как правило, не очень хорошо изучены, кроме того очаги сильных землетрясений имеют сложное строение. В связи с этим, более перспективным является использование эмпирического прогноза, с использованием записей колебания грунта на площад-

ке сооружаемого объекта. Для использования этого метода необходимо знать модель затухания амплитуд сильных движений, которая дает возможность рассчитать воздействие для заданной магнитуды, механизма очага, расстояния до сейсмогенерирующего разлома.

На рисунке 9 представлен один пример затухания максимальных амплитуд ускорений для станций сети сильных движений РГП ИГИ для Нарынкольского землетрясения 28.01.2013. Только большая статистика данных подобного рода поможет получить эмпирическое уравнение затухания для данного района, то есть представить зависимость уровня колебаний от магнитуды, расстояния, параметров очага и грунтовых условий. Такую зависимость называют моделью затухания ускорений.

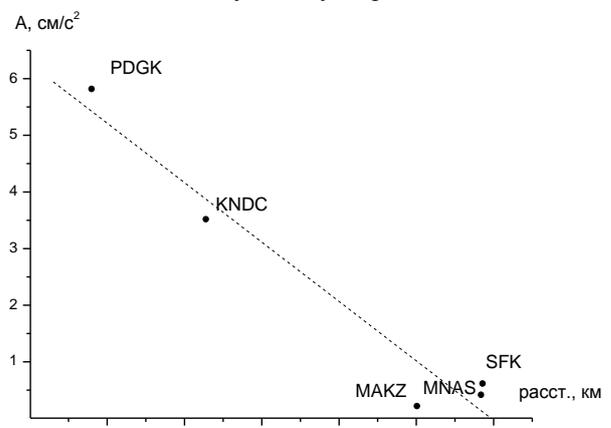


Рисунок 9. Затухание максимальных амплитуд ускорений для станций сети сильных движений РГП ИГИ, Нарынкольское

Согласно рисунку 8, собранных за 43 летний период данных по сильным движениям для Северного Тянь-Шаня и Джунгарии для построения собственной модели затухания безусловно недостаточно. Практически отсутствуют данные о сильных движениях землетрясений с большими магнитудами на близких расстояниях, а также событий с магнитудами менее 4.5 на удаленных расстояниях. В подобных случаях обычно подбирают наиболее подходящую для условий данного региона мировую модель затухания, т.е. модель, построенную на данных представительной выборки по ряду районов, где имелось много станций сильных движений и достаточное количество зарегистрированных ими землетрясений. В качестве примера была выбрана модель Абрахамсона-Сильвы 2008 г. [8]. Эта модель применима для магнитуд M_w от 5 до 8.5, расстояний 0-200 км и спектральных периодов 0-10 с. В связи с этим из нашей базы данных сильных движений были выбраны события, удовлетворяющие этим условиям.

Модель для медиан сильных движений задана уравнением:

$$\ln Sa(g) = f_1(M, R_{rup}) + a_{12}F_{RV} + a_{13}F_N + a_{15}F_{AS} + F_{HW}f_4(R_{jb}, R_{rup}, R_x, W, dip, Z_{top}, M) + f_5(PGA_{1100}, V_{S30}) + F_{RV}f_6(Z_{top}) + (1 - F_{RV})f_7(Z_{top}) + f_8(R_{rup}) + f_{10}(Z_{1.0}, V_{S30}) \quad (1)$$

где: M – моментная магнитуда,
 R_{rup} – расстояние до разрыва,
 R_{jb} – расстояние Джойнера-Бура,
 R_x – горизонтальное расстояние до границы разрыва (измеренный перпендикуляр до простира-ния разлома),
 Z_{top} – глубина-верх разрыва,
 F_{RV} – индикатор для землетрясения с механизмом взброс,
 F_N – с механизмом сброс,
 F_{AS} – индикатор для афтершоков (1 для афтершоков, 0 для основных толчков, форшоков и роев),
 F_{HW} – индикатор для висячего блока,
 dip – угол падения разлома в градусах,
 V_{S30} – скорость распространения поперечных волн на глубине 30 м,
 $Z_{1.0}$ – глубина, для которой $V_s=1.0$ км/с,
 PGA_{1100} – медиана пиковых ускорений (g) для $V_{S30}=1100$ м/с,
 W – ширина разрыва в км.

Функционалы f_1-f_{10} зависят от типа грунта под станцией, магнитуды, длины и глубины разрыва, а также фокального механизма землетрясения [8].

Указанный выше алгоритм реализован в виде программного обеспечения [9] и протестирован на данных по сильным движениям, зарегистрированным северотяньшаньскими и джунгарскими станциями. Из базы данных по сильным движениям были выбраны данные, удовлетворяющие условиям применимости модели Абрахамсона-Сильвы, произведены расчёты пиковых ускорений (PGA) согласно модели Абрахамсона-Сильвы, произведено сравнение полученных расчетных значений и наблюдаемых на станциях сильных движений. На рисунке 10 и 11 представлено распределение по расстояниям и магнитудам отношения расчетных согласно модели Абрахамсона-Сильвы (A_p) и наблюдаемых ускорений (A_n) для района Северного Тянь-Шаня и Джунгарии. На рисунке 12 представлено интегральное распределение значений логарифма отношений расчетных и наблюдаемых ускорений. Медиана логарифма отношений расчетных, и наблюдаемых ускорений составила 0,228. Это говорит о том, что прогнозируемые значения по выбранной модели незначительно (в среднем в 1.7 раза) завышают наблюдаемые ускорения. Требуется введение поправок в уравнение, либо продолжение тестирования других моделей, используемых в мировой практике.

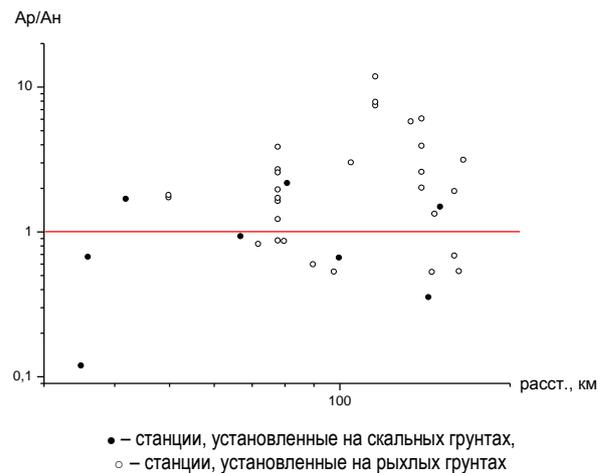


Рисунок 10. Распределение по расстояниям A_p/A_n для района Северного Тянь-Шаня и Джунгарии

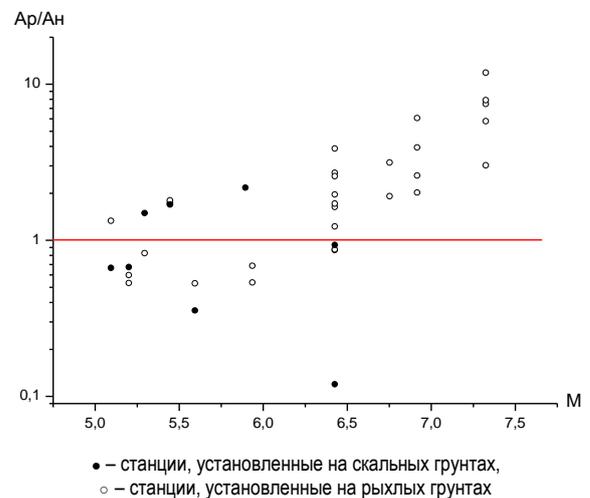


Рисунок 11. Распределение по магнитудам A_p/A_n для района Северного Тянь-Шаня и Джунгарии.

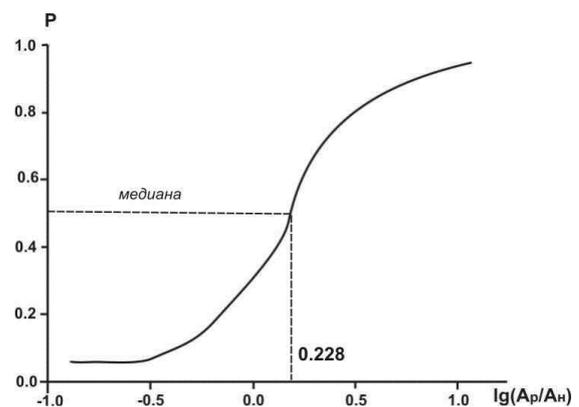


Рисунок 12. Интегральное распределение значений логарифма отношений расчетных, согласно модели Абрахамсона-Сильвы и наблюдаемых ускорений для района Северного Тянь-Шаня и Джунгарии

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Впервые создана база данных параметров сильных движений, в которой объединены данные разных организаций, разных приборов, за разные годы. На данный момент в ней содержится 890 записей за период 1970–2013 гг. на эпицентральных расстояниях от 5 до 1220 км. Имеющаяся информация свидетельствует о недостаточном развитии сетей сильных движений в Казахстане, невозможности получить по ним региональной зависимости для прогноза сейсмических воздействий.

2. Проведено сравнение результатов наблюдений сильных движений с мировой зависимостью

Абрахамсона-Сильвы, свидетельствующее о завышении (в среднем в 1.7 раза) расчетных по модели значений по сравнению с наблюдаемыми. Получена поправка для Северного Тянь-Шаня и Джунгарии для использованной модели затухания максимальных амплитуд ускорений.

3. Созданную базу данных и полученные результаты по тестированию модели следует учитывать как в методическом, так и в практическом аспекте при будущих работах по сейсмическому микро-районированию, при строительстве АЭС и хранилищ ядерных отходов.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Даугавет, В.П. Регистрация землетрясения 31.05.2012 г. станциями инженерно-сейсмометрической службы города Алматы / В.П. Даугавет, В.А. Лапин // Сборник материалов IV Межд. научно-практ. конф. – Алматы, 2012. – С. 178–182.
3. Михайлова, Н.Н. Организация обработки данных в Центре специальной сейсмической информации ИГИ НЯЦ РК / Н.Н.Михайлова, З.И. Синева // Докл 2-го Казахстанско-Японского семинара по предотвращению последствий разрушительных землетрясений. 23–25 сентября 2002 г. С. 301–306. Алматы, 2003.
4. Kashima T. 2002. ViewWaveHelp, ISEE, BRI.
5. Михайлова, Н.Н. Каталог основных и спектральных параметров сейсмических воздействий по сильным землетрясениям Казахстана (1970–1992 гг.) // Алматы. ИС МОН РК. 76 с.
6. Михайлова, Н.Н. Сейсмическая опасность в количественных параметрах сильных движений грунта (на примере г. Алматы). // Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Москва. 1996. 338 с.
7. Абаканов, Т. ред. Каталог параметров движений грунта по данным цифровой сети станций сильных движений на территории г. Алматы за 2000-2010 г. // Алматы. 2011. ИС МОН РК. – 136 с.
8. Abrahamson, N. A. Summary of the Abrahamson and Silva NGA ground-motion relations. / N.A. Abrahamson, W. J. Silva // Earthquake Spectra, 2008. – 24: 67–97.
9. Интернетресурс Next Generation Attenuation (NGA) Models: http://peer.berkeley.edu/ngawest/nga_models.html

**ЯДРОЛЫҚ МОНИТОРИНГТІҢ ҚАЗАҚСТАНДЫҚ СТАНЦИЯЛАРЫНДА
ҚАТТЫ ҚОЗҒАЛЫСТАРДЫ ТІРКЕУ МЕН ДЕРЕКТЕР БАЗАСЫ**

Соколов А.Н., Михайлова Н.Н.

Геофизикалық зерттеулер институты РМК, Курчатов, Қазақстан

Ядролық мониторингтің қазақстандық станцияларымен 1997–2013 ж.ж., сонымен қатар ҚР БҒМ Сейсмология институтының және Қырғызстанның ҰҒА Сейсмология институтының солтүстіктяньшандік станцияларымен 1970–2010 ж.ж. тіркелген қатты қозғалыстар жазбаларының параметрлерін зерттеу нәтижелері келтірілген. Абрахамсон-Сильва дүниежүзілік байланысымен қатты қозғалыстарды байқаудың нәтижелерін салыстыруы жүргізілген. Үдеудің максмаль амплитудалары басылу қисығына қатысты Солтүстік Тянь-Шань мен Жоңғартау аумағы үшін түзетулері алынған.

**RECORDS OF STRONG MOTIONS BY KAZAKHSTAN STATIONS
OF NUCLEAR MONITORING AND ITS DATABASE**

A.N. Sokolov, N.N. Mikhailova

Institute of Geophysical Researches, Kurchatov, Kazakhstan

The parameters of strong motions recorded by the IGR nuclear monitoring stations in 1997–2013 and by North Tien Shan stations of IS MES RK and IS NAS KR in 1970–2010 were investigated. The results of strong motions observation were compared with world dependence of Abrakhamson-Silva. The corrections on the world attenuation curve of maximum acceleration amplitudes were received for Northern Tien Shan and Dzhungariya.

СПИСОК АВТОРОВ

- Бакланова Ю.Ю., 12
Борисенко А.Н., 55
Буртебаев Н., 51
Гаджимагомедова М.Г., 85
Гулькин А.В., 18, 24
Дубровин В.И., 90
Дуйсебаев А., 29
Дуйсебаев Б.А., 29
Еденбаев А.Н., 51
Ерыгина Л.А., 12
Жолдыбаев Т.К., 29
Зарва Д.Б., 18, 24
Зверев В.В., 55
Исмаилов К.М., 29
- Кенжебеков А.С., 51
Копничев Ю.Ф., 62, 68, 78
Котов В.М., 12
Кукушкин С.М., 55
Кунакова О.К., 62
Лисаевич А.В., 95
Мади Г.А., 51
Максимкин О.П., 4, 37, 44
Мереке А., 29
Михайлова Н.Н., 103, 116, 124
Мукамбаев А.С., 103
Рахадиллов Б.К., 18, 24
Рубан С.В., 37
Рябенко П.В., 111
- Садыков Б.М., 29
Сейнасинов Н., 116
Скаков М.К., 18, 24
Смирнов А.А., 90
Соколов А.Н., 124
Соколова И.Н., 62, 68, 78
Супрунов В.И., 12
Такиева А.М., 44
Узбеков Р.Б., 111
Фролов З.Н., 95
Цай К.В., 4, 37
Цынгаев В.М., 55
Яковенко А.М., 85
Яровчук А.В., 37

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Статьи предоставляются в электронном виде (на CD, DVD диске или по электронной почте присоединенным [attachment] файлом) в формате MS WORD и печатной копии.

Текст печатается на листах формата А4 (210×297 мм) с полями: сверху 30 мм; снизу 30 мм; слева 20 мм; справа 20 мм, на принтере с высоким разрешением (300-600 dpi). Горизонтальное расположение листов не допускается.

Используются шрифт Times New Roman высотой 10 пунктов для обычного текста и 12 пунктов для заголовков. Пожалуйста, для заголовков используйте стили (Заголовок 1, 2...) и не используйте их для обычного текста, таблиц и подписочных подписей.

Текст печатается через одинарный межстрочный интервал, между абзацами – один пустой абзац или интервал перед абзацем 12 пунктов.

В левом верхнем углу должен быть указан индекс УДК. Название статьи печатается ниже заглавными буквами. Через 3 интервала после названия, печатаются фамилии, имена, отчества авторов и полное наименование, город и страна местонахождения организации, которую они представляют. После этого, отступив 2 пустых абзаца или с интервалом перед абзацем 24 пункта, печатается основной текст.

Максимально допустимый объем статьи – 10 страниц.

При написании статей необходимо придерживаться следующих требований:

- Статья должна содержать аннотации на казахском, английском и русском языках (130-150 слов) с указанием названия статьи, фамилии, имени, отчества авторов и полного названия организации, города и страны местонахождения, которую они представляют;
- Ссылки на литературные источники даются в тексте статьи цифрами в квадратных [1] скобках по мере упоминания. Список литературы следует привести по ГОСТ 7.1-2003;
- Иллюстрации (графики, схемы, диаграммы) должны быть выполнены на компьютере (ширина рисунка 8 или 14 см), либо в виде четких чертежей, выполненных тушью на белом листе формата А4. Особое внимание обратите на надписи на рисунке – они должны быть различимы при уменьшении до указанных выше размеров. На обороте рисунка проставляется его номер. В рукописном варианте на полях указывается место размещения рисунка. Рисунки должны быть представлены отдельно в одном из форматов *.tif, *.gif, *.png, *.jpg, *.wmf с разрешениями 600 dpi.
- Математические формулы в тексте должны быть набраны как объект Microsoft Equation или MathType. Химические формулы и мелкие рисунки в тексте должны быть вставлены как объекты Рисунок Microsoft Word. Следует нумеровать лишь те формулы, на которые имеются ссылки.

К статье прилагаются следующие документы:

- рецензия высококвалифицированного специалиста (доктора наук) в соответствующей отрасли науки;
- выписка из протокола заседания кафедры или методического совета с рекомендацией к печати;
- акт экспертизы (экспертное заключение);
- сведения об авторах (в бумажном и электронном виде): ФИО (полностью), наименование организации и ее полный адрес, должность, ученая степень, телефон, e-mail.

Текст должен быть тщательным образом выверен и отредактирован. В конце статья должна быть подписана автором с указанием домашнего адреса и номеров служебного и домашнего телефонов, электронной почты.

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

Ответственный секретарь к.ф.-м.н. У.П. Козтаева
тел. (722-51) 2-33-35, E-mail: KOZTAEVA@NNC.KZ

Технический редактор И.Г. Перепелкин
тел. (722-51) 2-33-33, E-mail: IGOR@NNC.KZ

Адрес редакции: 071100, Казахстан, г. Курчатов, ул. Красноармейская, 2, зд. 054Б
<http://www.nnc.kz/vestnik>

© Редакция сборника «Вестник НЯЦ РК», 2014

Регистрационное свидетельство №1203-Ж от 15.04.2000 г.
Выдано Министерством культуры, информации и общественного согласия Республики Казахстан

Тираж 300 экз.

Выпуск набран и отпечатан в типографии
Национального ядерного центра Республики Казахстан
071100, Казахстан, г. Курчатов, ул. Красноармейская, 2, зд. 054Б

